دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد عمران – مهندسی زلزله

عنوان:

بررسی تغییر رفتار لرزه‌ای تجهیزات پست‌های فشارقوی در اثر اتصال به تجهیزات مجاور

استاد راهنما:

دکتر رضا کرمی محمدی

تهیه کننده:

علی پورکاشانی طهرانی

زمستان ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به انسان‌های متفکر و شایسته‌ای که تلاش می‌کنند تا از مصائب و رنج‌های همنوعان خود در هنگام بروز حوادث غیرمترقبه بکاهند.

چکیده

پست‌های برق در کشورمان ایران، به طور منطقه‌ای ساخته می‌شوند تا انرژی برق را بین خانه‌ها، بیمارستان‌ها، کارخانجات و بسیاری از اماکن دیگر توزیع کنند. زلزله‌های اخیر نشان داده‌اند که این پست‌ها در برابر بارگذاری زلزله آسیب‌پذیر می‌باشند. چرا که تجهیزات پست‌های برق کمتر از لحاظ مسأله بارگذاری مورد توجه قرار گرفته‌اند. اجزای تشکیل‌دهنده تجهزات صرفاً به صورت تکی با توجه به نیاز الکتریکی طراحی گشته‌اند، ولی در رویدادهای لرزه‌ای، عملکرد ضعیفی از خود نشان داده‌اند.

در سال‌های اخیر برخی از محققین اثر اندرکنش دینامیکی دو تجهیز مجاور که توسط اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر یا صلب به هم متصل شده‌اند را تحت اثر زلزله بررسی نموده‌اند. این مطالعات نشان از رفتار دینامیکی بسیار پیچیده اتصال‌دهنده‌ها در هنگام زلزله داشته و لذا امر مدلسازی و تحلیل اندرکنش تجهیزات را به نحوی که بیانگر رفتار واقعی کابل باشد دچار مشکل نموده است. در جدیدترین تحقیقات، مدل‌های مناسبی توسط نرم‌افزارهای FEAP و OpenSees جهت مدلسازی رفتار کابل تهیه گردیده و با کارهای آزمایشگاهی مورد مقایسه قرار گرفته است. در تمامی مدلسازی‌های پیشین، تنها دو تجهیز به هم متصل گردیده‌اند. حال آنکه در واقعیت با مجموعه‌ای از تجهیزات متصل به هم مواجه هستیم. در تحقیق حاضر، با مدلسازی توسط نرم‌افزار OpenSees، اثر اندرکنش سه تجهیز متصل به هم با نمونه مشابه در حالتی که تنها دو تجهیز به هم متصل می‌باشد، مورد مقایسه قرار گرفت و اثرات اندرکنشی بین تجهیزات بر اساس مشخصات دینامیکی تجهیزات و کابل‌های اتصال‌دهنده مطالعه گردید. این اثرات شامل احتمال گسیختگی اتصال کابل به تجهیز و شکست مقره می‌باشد که با استفاده از اطلاعات حاصل از آنالیزهای تاریخچه زمانی غیرخطی (IDA) و با تحلیل‌های آماری و احتمالاتی، وضعیت خرابی ها مورد بررسی قرار گرفت و در پایان با ترسیم منحنی‌های خرابی و احتمالاتی مربوط به تجهیزات و کابل‌ها، نتایج کاربردی از رفتار دینامیکی این تجهیزات همراه با مقایسه تأثیر تعداد تجهیزات و میزان خلاصی اتصال‌دهنده‌ها حاصل گشت.

فهرست

۱- ادبیات فنی ۱

۱-۱- کلیات ۱

۱-۱-۱-مقدمه ۱

۱-۱-۲-روش‌های رایج تحلیل ۲

۱-۱-۳- مهمترین اثرات زلزله ۳

۱-۱-۴- مدهای خرابی عمده در پست‌ها ۵

۱-۲- برهم‌کنش تجهیزات پست‌های برق در هنگام زلزله ۱۰

۱-۲-۱- شرح عمومی ۱۰

۱-۲-۲- اتصال‌دهنده‌های صلب ۱۱

۱-۲-۳- مشاهده‌ی زلزله‌های گذشته ۲۲

۱-۲-۴- نتایج اصلی تحقیقات صورت گرفته بر برهمکنش تجهیزات ۲۳

۱-۳- روش مرسوم طراحی لرزه‌ای اتصالات ۲۷

۱-۳-۱- تعیین هندسه اصلی اتصالات ۳۰

۱-۳-۲- نصب کنداکتورها ۳۲

۱-۳-۳- تامین فاصله مجاز الکتریکی ۳۶

۱-۳-۴-تاثیرات افزایش خلاصی اتصال‌دهنده ۳۸

۱-۳-۵- اندرکنش تجهیزات متصل با کابل و پارامترهای مؤثر ۴۰

۱-۴- انتخاب، محاسبه و نصب اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر ۴۴

۱-۴-۱- طیف طرح ۴۴

۱-۴-۲- حداقل ازدیاد طول لازم ۴۶

۱-۴-۳- طول نهایی اتصال‌دهنده انعطاف‌پذیر ۴۸

۱-۴-۴-مشخصات اتصال‌دهنده انعطاف‌پذیر ۵۳

۲- مدلسازی رایانه‌ای ۵۵

۲-۱- کنترل صحت مدلسازی ۵۷

۲-۱-۱- کنترل شکل اولیه کابل ۵۷

۲-۱-۲- تست فشار- کشش استاتیکی ۵۹

۲-۱-۳- تست پایداری ۶۰

۲-۱-۴- آزمایش بارگذاری دینامیکی سینوسی متغیر (بر هردو انتها) ۶۲

۲-۱-۵- آزمایش بارگذاری دینامیکی سینوسی متغیر (بر یک انتها) ۶۵

۲-۲- اتصال سه تجهیز ۶۶

۲-۳- معیارهای خرابی و روابط حاکم ۷۱

۳- نتایج تحلیل سیستم سه تجهیزی ۷۴

۳-۱- نحوه تعیین نوع خرابی و مقاومت سیستم ۷۵

۳-۲- تاثیر میزان خلاصی اتصال‌دهنده ۸۷

۳-۲-۱- شتاب اوج متناظر با خرابی (PGA خرابی) ۸۸

۳-۲-۲- نوع و احتمال خرابی آیتم‌ها ۹۰

۳-۳- تاثیر فرکانس طبیعی تجهیزات بر نوع خرابی ۹۳

۳-۳-۱- شتاب اوج متناظر با خرابی تجهیزات یا کابل (PGA خرابی) ۹۵

۳-۳-۲- نوع و احتمال خرابی آیتم‌ها ۹۶

۴- مقایسه سیستم سه تجهیزی با سیستم دو تجهیزی ۹۹

۴-۱- نتایج مدلسازی دو تجهیز متصل به هم ۹۹

۴-۲- مقایسه مدلسازی سه تجهیز و دو تجهیز ۱۰۶

۴-۲-۱- تاثیر مدلسازی سه تجهیزی بر مقاومت لرزه‌ای سیستم ۱۰۷

۴-۲-۲- تاثیر مدلسازی سه تجهیزی بر احتمال خرابی مقره‌ها ۱۰۸

۴-۲-۳- تاثیر مدلسازی سه تجهیزی بر احتمال خرابی کابل‌ها ۱۱۳

۴-۲-۴- مقایسه احتمالاتی حداکثر شتاب ایجادشده در تجهیزات ۱۱۹

۴-۲-۵- مقایسه احتمالاتی تغییر مکان افقی تجهیزات ۱۲۶

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۳۳

۵-۱- نتیجه‌گیری ۱۳۳

۵-۲- پیشنهادات ۱۳۷

ضمیمه ۱۳۸

الف- نمودارهای سه بعدی سیستم سه تجهیزی ۱۳۸

الف- ۱- نمودارهای مربوط به تغییر طول اتصال‌دهنده ۱۳۸

الف-۲- نمودارهای مربوط به تغییر فرکانس طبیعی سازه وسط (آیتم۲) ۱۵۵

الف-۳- نمودارهای مربوط به تغییر فرکانس طبیعی یکی از سازه‌های کناری (آیتم۳) ۱۷۶

ب- نمودارهای دو بعدی ۱۹۷

ج- مشخصات CT مدل شده ۲۲۵

مقالات ارائه شده ۲۲۷

مراجع و ماخذ ۲۲۸

لیست شکل‌ها

شکل ۱ : شکست مقره‌های از جنس چینی تردشکن (زلزله بم) [۳] ۱۹

شکل ۲ : دوران پایه یکی از مقره‌ها (زلزله بم) [۳] ۲۰

شکل ۳: ترکیب‌بندی کنداکتور بین کلید برق و کلید قطع که انعطاف‌پذیری اتصال را تامین کرده است[۴]. ۲۲

شکل ۴: ترکیب بندی کنداکتور بدون خلاصی در اتصال انعطاف‌پذیر [۴]..... ۲۲

شکل ۵ : جابجایی بین تجهیزات متصل به هم در طول زلزله[۵] ۲۳

شکل ۶ : اتصالات ساده‌ی شینه‌ی صلب[۶] ۲۴

شکل ۷ : مدل اتصال فنری ساده [۸] ۲۶

شکل ۸ : استفاده از یک هادی مشابه به اتصال فنری بدون تامین نیاز لرزه‌ای در یکی از پست‌های برق ایران ۲۷

شکل ۹ : اتصال فنری بهینیه شده (تسمه‌ای) [۶] ۲۸

شکل ۱۰ : منحنی هیسترتیک اتصال فنری بهینه [۶]..... ۲۸

شکل ۱۱ : نمونه واقعی اتصالات فنری بهینه شده در حالت ابتدایی و در حالت فشرده[۶]..... ۲۹

شکل ۱۲ :حلقه‌های هیسترتیک اتصالات فنری[۶]..... ۲۹

شکل ۱۳ : مقایسه سختی سکانت انواع رایج اتصالات فنری[۶] ۳۰

شکل ۱۴ : نمونه‌ای از اتصال کشویی در آزمایشگاه[۶]..... ۳۱

شکل ۱۵ : نمونه استفاده از اتصالاتی مانند کشویی ولی بدون مقاومت سازه‌ای در یک پست برق ۳۲

شکل ۱۶ : اتصال کشویی بهینه شده [۶] ۳۳

شکل ۱۷ : اتصال کشویی بهینه در حالت فشرده[۶] ۳۳

شکل ۱۸ : اتصال کشویی بهینه در حالت جابجایی‌های حداکثری[۶] ۳۴

شکل ۱۹ : حلقه‌های هیسترتیک اتصالات کشویی[۶] ۳۴

شکل ۲۰ : تاثیر سختی عضور اتصال دهنده بر اندرکنش دو تجهیز [۵] ۳۷

شکل ۲۱ : تاثیر نسبت جرم تجهیزات بر اندرکنش دو تجهیز [۵] ۳۸

شکل ۲۲ : تاثیر میرایی عضو اتصال دهنده بر اندرکنش دو تجهیز [۵] ۳۸

شکل ۲۳ : درخت طراحی عمومی اتصالات انعطاف‌پذیر طبق دستورالعمل IEEE Std 1527 [۲] ۴۲

شکل ۲۴ : فلوچارت طراحی لرزه‌ای اتصالات به همراه ارجاع به فصول مربوط به دستورالعمل PEER [۵] ۴۳

شکل ۲۵ : هندسه اصلی اتصالات [۵] ۴۴

شکل ۲۶ : تعیین هندسه پایه برای اتصالات [۵] ۴۴

شکل ۲۷ : آویزهای انعطاف‌پذیر از کنداکتورهای صلب متصل به تجهیزات می‌تواند مزیت‌های هر دو کنداکتورهای صلب و انعطاف‌پذیر را تامین کند [۳] ۴۵

شکل ۲۸ : آرایش‌های ابتدایی کنداکتورها [۱] ۴۶

شکل ۲۹ : مثالی از کنداکتور بین دو تجهیز و طول بین آن‌ها [۱] ۴۸

شکل ۳۰ : نمای شماتیک فاصله مجاز الکتریکی مورد نیاز [۵] ۴۹

شکل ۳۱ : مثال برای فاصله مجاز الکتریکی[۵] ۵۰

شکل ۳۲: نحوه قرار گرفتن اتصال‌دهنده در حالتی که طول دهانه ۲ متر باشد با میزان خلاصی‌های مختلف [۵]. ۵۲

شکل ۳۳ : نحوه قرار گرفتن اتصال‌دهنده در حالتی که طول دهانه ۴ متر باشد با میزان خلاصی‌های مختلف [۵]. ۵۲

شکل ۳۴ : اتصال دهنده کابلی [۲۰] (ارجاع داده شده توسط [۱۹]) ۵۴

شکل ۳۵ : مقطع کابل و هندسه آن [۱۹] ۵۵

شکل ۳۶ : نمودارهای برازش شده خطی ارتباط بین ولتاژ اسمی تجهیزات و فرکانس طبیعی آن‌ها [۱۷] ۵۶

شکل ۳۷ : طیف پاسخ نیاز شدید، ۰/۵g ۵۸

شکل ۳۸ : آرایش‌های مرسوم اتصال‌دهنده‌های انعطاف‌پذیر [۲] ۶۲

شکل ۳۹ : Snap-back و Snap-through [۵] ۶۳

شکل ۴۰ : اتصال دهنده انعطاف‌پذیر [۱۹] ۶۶

شکل ۴۱ : مقایسه نتیجه محاسبات مدلسازی رایانه‌ای با نمونه آزمایشگاهی ۷۱

شکل ۴۲ : موقعیت اولیه کابل جهت تست فشار-کشش ۷۲

شکل ۴۳ : مقایسه نتیجه تست استاتیکی کشش-فشار ۷۳

شکل ۴۴ : اتصال‌دهنده 4000-MCM در آرایش نیم‌دایره معکوس قبل از اعمال بار وزن ۷۴

شکل ۴۵ : همان اتصال‌دهنده بعد از اعمال بار وزن ۷۴

شکل ۴۶ : تست آزمایشگاهی همراه با نقطه تشدید [۱۴] ۷۵

شکل ۴۷ : مقایسه نتایج حاصله از تست دینامیکی سینوسی متغیر در مدل رایانه‌ای با نمونه آزمایشگاهی (بر یک انتها). (الف) برای تمامی مقادیر مختلف I/I_{min} . (ب) برای مقدار $I/I_{min} = 2.1$ ۷۷

شکل ۴۸ : مقایسه نتایج حاصله از تست دینامیکی سینوسی متغیر در مدل رایانه‌ای با نمونه آزمایشگاهی (بارگذاری هر دو انتهای اتصال‌دهنده) ۷۹

شکل ۴۹ : نمونه‌ای از مجموعه تجهیزات متصل به هم در یکی از پست‌های برق استان تهران .. ۸۰

شکل ۵۰ : یک CT که از دو طرف به تجهیزاتی با فرکانس‌های متفاوت متصل شده است..... ۸۰

شکل ۵۱ : اتصال سه تجهیز توسط کابل انعطاف‌پذیر با آرایش تاب‌دار ۸۱

شکل ۵۲ : طیف زلزله‌های انتخابی ۸۲

شکل ۵۳ : بزرگای فوریه (Fourier Amplitude) زلزله‌های انتخاب شده ۸۳

شکل ۵۴ : بزرگای فوریه (Fourier Amplitude) زلزله‌های انتخاب شده ۸۳

شکل ۵۵ : مقطع مقره در CT با مقاومت خمشی ۷۰۰۰۰ نیوتن‌متر [۲۵] ۸۴

شکل ۵۶ : ابعاد CT مورد مطالعه [۲۵] ۸۵

شکل ۵۷ : نحوه مدل کردن سه تجهیز در مدل رایانه‌ای ۸۷

شکل ۵۸ : شماره گذاری المان‌های تشکیل دهنده سیستم ۸۷

شکل ۵۹ : تحلیل IDA – نیروی انتهایی کابل در محل اتصال آیتم ۴ به آیتم ۱ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۸۸

شکل ۶۰ : تحلیل IDA – نیروی انتهایی کابل در محل اتصال آیتم ۴ به آیتم ۲ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۸۹

شکل ۶۱ : تحلیل IDA – نیروی انتهایی کابل در محل اتصال آیتم ۵ به آیتم ۲ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۰

شکل ۶۲ : تحلیل IDA – نیروی انتهایی کابل در محل اتصال آیتم ۵ به آیتم ۳ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۰

شکل ۶۳ : تحلیل IDA - حداکثر خمش در مقره آیتم ۱ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۱

شکل ۶۴ : تحلیل IDA - حداکثر خمش در مقره آیتم ۲ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۲

شکل ۶۵ : تحلیل IDA - حداکثر خمش در مقره آیتم ۳ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۲

شکل ۶۶ : حرکت اتصال‌دهنده به سمت بالا و باقیماندن در همان حالت ۹۴

شکل ۶۷ : تحلیل IDA - حداکثر شتاب در مرکزجرم آیتم۱ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۵

شکل ۶۸ : تحلیل IDA - حداکثر جابجایی انتهای آیتم۱ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۵

شکل ۶۹ : تحلیل IDA - حداکثر جابجایی نسبی بین انتهای آیتم۱ و ۲ برای حالتی که f_1، f_2 و f_3 به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۸ و ۰/۳۵ هرتز است. ۹۶

شکل ۷۰ : نتایج تحلیل IDA برای حداکثر خمش ایجاد شده در مقره‌ی آیتم۱ درحالتی که فرکانس طبیعی آیتم‌های ۳ ، ۲ و ۱ به ترتیب برابر با ۲/۵ ، ۱/۸ و ۰/۵ باشد. ۹۷

شکل ۷۱ : نتایج تحلیل IDA برای حداکثر نیروی انتهای کابل متصل به آیتم۱ درحالتی که فرکانس طبیعی آیتم‌های ۳ ، ۲ و ۱ به ترتیب برابر با ۲/۵ ، ۱/۸ و ۰/۵ باشد. ۹۸

شکل ۷۲ : یک زلزله ممکن است باعث تخریب بیش از یک آیتم گردد. ۹۹

شکل ۷۳ : میانگین PGA خرابی سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۰۶ است. ۱۰۱

شکل ۷۴ : میانگین PGA خرابی سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۱۲ است ۱۰۲

شکل ۷۵ : میانگین PGA خرابی سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۱۸ است ۱۰۲

شکل ۷۶ : میانگین PGA خرابی سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۲۴ است ۱۰۳

شکل ۷۷ : احتمال خرابی کابل در سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۰۶ است ۱۰۴

شکل ۷۸ : احتمال خرابی کابل در سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۱۲ است ۱۰۴

شکل ۷۹ : احتمال خرابی کابل در سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۱۸ است ۱۰۵

شکل ۸۰ : احتمال خرابی کابل در سیستم سه تجهیزی در حالتی که فرکانس آیتم۲ برابر ۳/۸ و نسبت L/S برابر با ۱/۲۴ است ۱۰۵

شکل ۸۱ : میزان میانگین بیشترین PGA قابل تحمل توسط سیستم سه تجهیزی (فرکانس آیتم۲ برابر ۱/۸) ۱۰۸

شکل ۸۲ : میزان میانگین بیشترین PGA قابل تحمل توسط سیستم سه تجهیزی (فرکانس آیتم۲ برابر ۰/۸) ۱۰۹

شکل ۸۳ : احتمال خرابی تک تک آیتم‌ها، کابل‌ها و مقره‌ها الف- حالتی که فرکانس طبیعی آیتم۲ برابر ۱/۸ باشد. ب- حالتی که فرکانس طبیعی آیتم۲ برابر ۰/۸ باشد. ۱۱۱

شکل ۸۴ : نمای جانبی سیستم‌های دو تجهیزی و سه تجهیزی و نحوه شماره گذاری آیتم‌های آنها ۱۱۲

شکل ۸۵ : احتمال خرابی آیتم ۱ در سیستم دو تجهیزی نسبت به تغییرات فرکانس آیتم ۲.. ۱۱۴

شکل ۸۶ : احتمال خرابی آیتم ۱ در سیستم دو تجهیزی نسبت به تغییرات فرکانس آیتم ۱.. ۱۱۴

شکل ۸۷ : احتمال خرابی آیتم ۲ در سیستم دو تجهیزی نسبت به تغییرات فرکانس آیتم ۱ . ۱۱۶

شکل ۸۸ : احتمال خرابی آیتم ۲ در سیستم دو تجهیزی نسبت به تغییرات فرکانس آیتم ۲ . ۱۱۶

شکل ۸۹ : احتمال خرابی اتصال‌دهنده در سیستم دو تجهیزی نسبت به تغییرات فرکانس آیتم ۲ ..... ۱۱۸

شکل ۹۰ : احتمال خرابی اتصال‌دهنده در سیستم دو تجهیزی نسبت به تغییرات فرکانس آیتم ۱ ..... ۱۱۸

شکل ۹۱ : تمام نتایج احتمالاتی مربوط به سیستم دوتجهیزی ۱۲۰

شکل ۹۲ : مقایسه PGA خرابی حالتی که تنها دو تجهیز به هم متصل هستند با حالتی که تجهیز سومی نیز وجود داشته باشد ۱۲۱

شکل ۹۳ : مقایسه احتمال خرابی سازه ۱ در دو سیستم دو تجهیزی و سه تجهیزی..... ۱۲۳

شکل ۹۴ : مقایسه احتمال خرابی سازه ۲ در دو سیستم دو تجهیزی و سه تجهیزی..... ۱۲۴

شکل ۹۵ : مقایسه احتمال خرابی آیتم ۱ و ۳ در سیستم سه تجهیزی. ۱۲۵

شکل ۹۶ : مقایسه احتمال گسیختگی کابل ۴ در دو سیستم دو تجهیزی و سه تجهیزی. ۱۲۸

شکل ۹۷ : مقایسه احتمال گسیختگی آیتم ۴ و ۵ در سیستم سه تجهیزی. ۱۲۹

شکل ۹۸ : مقایسه احتمال گسیختگی حداقل یکی از کابل‌ها در دو سیستم دو تجهیزی و سه تجهیزی. ۱۳۱

شکل ۹۹ : مقایسه احتمال خرابی مقره‌ها در دو سیستم دو تجهیزی و سه تجهیزی. ۱۳۲

شکل ۱۰۰ : منحنی های شکنندگی نسبت شتاب حداکثر تجهیز ۱ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۲ ثابت و به ترتیب برابر با f1=0.5Hz و f2=1.8Hz باشد. (الف) f3=0.5Hz. (ب) f3=1.5Hz. (ج) f3=2.5Hz. (د) f3=3.5Hz. ۱۳۳

شکل ۱۰۱ : منحنی های شکنندگی حالتی که نسبت شتاب حداکثر تجهیز ۱ دوبرابر حداکثر شتاب اوج زمین باشد در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۲ ثابت و به ترتیب برابر با f1=0.5Hz و f2=1.8Hz باشد. ۱۳۵

شکل ۱۰۲ : منحنی های شکنندگی نسبت شتاب حداکثر تجهیز ۲ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۲ ثابت و به ترتیب برابر با f1=0.5Hz و f2=1.8Hz باشد. (الف) f3=0.5Hz. (ب) f3=1.5Hz. (ج) f3=2.5Hz. (د) f3=3.5Hz. ۱۳۶

شکل ۱۰۳ : منحنی های شکنندگی نسبت شتاب حداکثر تجهیز ۲ به حداکثر شتاب اوج زمین در سیستم دو تجهیزی در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۲ به ترتیب برابر با f1=0.5Hz و f2=1.8Hz باشد. ۱۳۶

شکل ۱۰۴ : منحنی های شکنندگی نسبت شتاب حداکثر تجهیز ۳ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۲ ثابت و به ترتیب برابر با f1=0.5Hz و f2=1.8Hz باشد. (الف) f3=0.5Hz. (ب) f3=1.5Hz. (ج) f3=2.5Hz. (د) f3=3.5Hz. ۱۳۷

شکل ۱۰۵ : منحنی های شکنندگی نسبت شتاب حداکثر تجهیز ۲ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۳ ثابت و برابر با f1=f3=0.5Hz باشد. (الف) f2=0.8Hz. (ب) f2=1.8Hz. (ج) f2=2.8Hz. (د) f2=3.8Hz. ۱۳۹

شکل ۱۰۶ : منحنی های شکنندگی نسبت شتاب حداکثر تجهیز ۲ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۳ ثابت و برابر با f1=f3=2.5Hz باشد. (الف) f2=0.8Hz. (ب) f2=1.8Hz. (ج) f2=2.8Hz. (د) f2=3.8Hz. ۱۴۰

شکل ۱۰۷ : منحنی های شکنندگی نسبت حداکثر جابجایی نسبی بین ۱ و ۲ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۲ ثابت و به ترتیب برابر با f1=0.5Hz و f2=1.8Hz باشد. (الف) f3=0.5Hz. (ب) f3=1.5Hz. (ج) f3=2.5Hz. (د) f3=3.5Hz. ۱۴۱

شکل ۱۰۸ : منحنی های شکنندگی نسبت حداکثر جابجایی نسبی بین ۲ و ۳ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۲ ثابت و به ترتیب برابر با f1=0.5Hz و f2=1.8Hz باشد. (الف) f3=0.5Hz. (ب) f3=1.5Hz. (ج) f3=2.5Hz. (د) f3=3.5Hz. ۱۴۳

شکل ۱۰۹ : منحنی های شکنندگی نسبت حداکثر جابجایی نسبی بین تجهیزات ۲ و ۳ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۳ ثابت و برابر با f1=f3=0.5Hz باشد. (الف) f2=0.8Hz. (ب) f2=1.8Hz. (ج) f2=2.8Hz. (د) f2=3.8Hz. ۱۴۴

شکل ۱۱۰ : منحنی های شکنندگی نسبت حداکثر جابجایی نسبی بین تجهیزات ۲ و ۳ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۳ ثابت و برابر با f1=f3=1.5Hz باشد. (الف) f2=0.8Hz. (ب) f2=1.8Hz. (ج) f2=2.8Hz. (د) f2=3.8Hz. ۱۴۵

شکل ۱۱۱ : منحنی های شکنندگی نسبت حداکثر جابجایی نسبی بین تجهیزات ۲ و ۳ به حداکثر شتاب اوج زمین در حالتی که فرکانس طبیعی تجهیزات ۱ و ۳ ثابت و برابر با f1=f3=3.5Hz باشد. (الف) f2=0.8Hz. (ب) f2=1.8Hz. (ج) f2=2.8Hz. (د) f2=3.8Hz. ۱۴۶

لیست جداول

جدول ۱ : حداکثر نیروهای محاسبه شده در آزمایشات بر روی اتصالات انعطاف‌پذیر [۵] ۴۱

جدول ۲ : نمونه جابجایی‌های تجهیزات [۱] ۴۷

جدول ۳ : خصوصیات کلی آرایش‌ها [۵] ۶۵

جدول ۴: مشخصات کابل‌های MCM-1796 و MCM-4000 [۸] ۶۸

جدول ۵ : مراحل بارگذاری انتهای اتصال‌دهنده در آزمایش بارگذاری دینامیکی سینوسی متغیر (بر هردو انتها) ۷۶

جدول ۶ : مراحل بارگذاری انتهای اتصال‌دهنده در آزمایش بارگذاری دینامیکی سینوسی متغیر (بر یک انتها) ۷۸

جدول ۷ : زلزله‌های انتخابی در خاک B دستورالعمل FEMA-440 ..... ۸۲

جدول ۸ : مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای مورد بررسی در سیستم سه تجهیزی (حالت اول). ۱۰۰

جدول ۹ : مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای مورد بررسی در سیستم سه تجهیزی (حالت دوم) ۱۰۶

جدول ۱۰ : مقادیر در نظر گرفته شده برای متغیرهای مورد بررسی در سیستم دوتجهیزی ... ۱۱۳

۱- ادبیات فنی

۱-۱- کلیات

حوزه مورد بررسی و تحقیق در این مجلد بیان نکات مهندسی و روشهای طراحی تجهیزات پست‌های فشارقوی تحت بار زلزله که با اتصال‌دهنده‌ها به هم متصل گشته‌اند می‌باشد.

۱-۱-۱-مقدمه

پست[۱]های برق در شهرهای مختلف به طور منطقه‌ای ساخته می‌شوند تا انرژی برق را بین خانه‌ها، بیمارستان‌ها، کارخانجات و بسیاری از اماکن دیگر توزیع کنند. زلزله‌های اخیر نشان داده‌اند که این پست‌ها در برابر بارگذاری زلزله آسیب‌پذیر می‌باشند؛ چرا که تجهیزات پست‌های برق که در حدود سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ میلادی طراحی گشته‌اند، کمتر از لحاظ مساله‌ی بارگذاری لرزه‌ای مورد توجه قرار گرفته‌اند. اجزای تشکلیل‌دهنده‌ی تجهیزات صرفاً به صورت تکی با توجه به نیاز الکتریکی طراحی گشته‌اند، ولی در رویدادهای لرزه‌ای عملکرد ضعیفی از خود نشان داده‌اند. برای پاسخ‌گویی به این آسیب‌پذیری‌ها، استاندارد IEEE 693 [۱] در سال ۲۰۰۵ برای نمایش عملکرد تجهیزات پست‌ها در بارگذاری لرزه‌ای منتشر گردید. به هرحال این استاندارد در موضوع اثر برهم‌کنش تجهیزات و عملکرد آن‌ها سخنی به میان نیاورده است. با توجه به پیچیدگی اتصالات، پاسخ لرزه‌ای سیستم‌های متصل به هم می‌تواند پیچیده و غیر قابل پیش‌بینی باشد. با توجه به استاندارد IEEE 693 کنونی، تجهیزات به صورت تکی کنترل می‌شوند. در سال ۲۰۰۶ استانداردی تحت عنوان IEEE Std 1527 [۲] جهت طراحی اتصال‌دهنده‌های انعطاف پذیر[۲] که غالبا از جنس آلومینیوم یا مس می‌باشند منتشر گردید. در هنگام

---

[۱] Substation

[۲] Flexible buswork conductors

زلزله، این اتصال دهنده‌ها ممکن است نیروی قابل توجهی را به محل اتصال به تجهیزات[۳] منتقل کنند. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی پیرامون بررسی اثر برهمکنش تجهیزات پست‌های برق که از طریق اتصال‌دهنده‌های انعطاف پذیر و یا صلب به هم متصل شده‌اند انجام گرفته ولی همیشه فرض بر این گذاشته شده است که تنها دو تجهیز به هم متصل هستند. درصورتی که در واقعیت، اصولا با مجموعه‌ای از تجهیزات متصل به هم مواجه هستیم که آن را بی[۴] می‌نامند.

در ادامه نحوه عملکرد لرزه‌ای تجهیزات پست‌های برق که از طریق کابل و یا شینه‌های صلب به هم متصل شده اند، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۱-۲-روش‌های رایج تحلیل

رایج ترین نحوه‌ی مطالعه عملکرد لرزه‌ای اینگونه تجهیزات، استفاده از روش‌های دینامیک سازه‌ای و بدست آوردن حداکثر جابجایی انتهای تجهیز با استفاده از طیف شتاب طراحی می‌باشد. در این روش، وجود و یا عدم وجود اتصال دهنده (کابل و یا شینه صلب) تاثیری بر پاسخ تحلیل ندارد و پس از انجام تحلیل کنترل می‌گردد که آیا تفاضل جابجایی انتهای سازه‌ها از حد مجاز اتصال‌دهنده‌ها فراتر رفته است یا خیر. در این روش، ممکن است زمان حداکثر شدن جابجایی دو تجهیز یکسان نباشد. و یا آن که جابجایی‌ها هم جهت بوده و نیرویی به اتصال‌دهنده‌ها اعمال نگردد! مزایا و معایب این روش به صورت مفصل در قسمت‌های بعد به بحث گذاشته خواهند شد.

روش دیگری که از دقت بالاتری برخوردار است و با توجه به زمانبر بودن آن، کمتر مورد توجه مهندسین و پژوهشگران قرار گرفته است استفاده از تحلیل IDA می‌باشد. در این روش تعدادی زلزله با مقیاس‌های مختلف به کل سیستم (تجهیزات متصل به هم) اعمال می‌گردد و بدین ترتیب اثر وجود

---

[۳] Equipment terminals

[۴] Bay

اتصال‌دهنده‌ها در پاسخ سیستم مستقیما مشاهده می‌شود. بدین ترتیب می‌توان اشراف کاملی بر تمام معیارهای خرابی در زلزله‌های با شدت مختلف داشت.

۱-۱-۳- مهمترین اثرات زلزله

تاثیرات اصلی زلزله را می توان به بخش های زیر طبقه بندی نمود:

- لرزش زمین
- روانگرایی خاک
- اندرکنش خاک و سازه
- زمین لغزش ناشی از زلزله
- نشست
- گسلش سطح زمین
- امواج ناشی از زلزله در دریا (سونامی) [۳]

در اینجا بحث لرزه‌ای مد نظر می‌باشد زیرا بیشترین خرابی سیستم‌های انتقال نیرو ناشی از لرزش زمین بوده است. زمانی که زلزله رخ می‌دهد انرژی آزاد شده به شکل ارتعاش زمین در محیط منتشر می‌شود و اغلب با دور شدن از مرکز زلزله این ارتعاشات میرا شده[۵] و ضعیفتر می‌شوند. اما شرایط خاک روی بستر سنگی میتواند پارامتر های حرکتی زمین را به کلی تغییر دهد، چنانکه با افزایش عمق خاک سست در یک ناحیه، فرکانس‌های پایین زلزله تشدید و فرکانس‌های بالا فیلتر[۶] می‌شوند. در این صورت علاوه بر اینکه مدت دوام[۷] زلزله افزایش می‌یابد، تجهیزاتی که فرکانس طبیعی ارتعاش آن‌ها نزدیک به ناحیه تشدید می‌باشد، آسیب‌پذیری بیشتری خواهند داشت .بنابراین نوع خاک ساختگاه می‌تواند

---

[۵] Attenuated

[۶] Filtering

[۷] Duration