



ISAV2022

دوازدهمین کنفرانس بین المللی آگوستیک و ارتعاشات

تهران - ایران ۲۳ و ۲۴ آذر ماه ۱۴۰۱



جلوگیری از انتقال لرزش ناشی از عملکرد تجهیزات مکانیکی نصب شده در ساختمان با استفاده از لرزه گیرهای مکانیکی

پدرام بدافی^{آ*}، محمد هاشمی^ب

^آ ایران، تهران، کوی نصر، شرکت سازه پایدار الهیه (گروه صنعتی لینکران)، ۱۴۴۷۸۱۳۱۸۴، کارشناسی مهندسی مکانیک

^ب ایران، تهران، کوی نصر، شرکت سازه پایدار الهیه (گروه صنعتی لینکران)، ۱۴۴۷۸۱۳۱۸۴، کارشناسی مهندسی عمران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: elahiesazepaidar.rd@gmail.com

چکیده

کنترل لرزش تجهیزات مکانیکی در کشورهای زلزله خیز مسأله‌ای است که بایستی به آن بطور ویژه توجه کرد. یکی از کاربردی ترین اجزا در مبحث کنترل لرزش، لرزه گیرهای فنری هستند که نسبت به لرزه گیرهای لاستیکی دفلکشن بیشتری دارند. مشکل این است که فرکانس رزونانس می تواند با فرکانس زلزله هماهنگ شود، و این بدین معنی است که در یک زلزله فتر شروع به "پرش" می کند و این باعث جابجایی تجهیز مکانیکی می شود. جابجایی تجهیز می تواند باعث ایجاد خسارات فراوانی شود (صدمات به تجهیز، عدم کارایی، قطع و شکستگی اتصالات و ...). همچنین سبب افزایش خطر آسیب های انسانی و حتی مرگ افراد شود. با توجه به خطرات مذکور، لازم است که در مناطق و کشورهای زلزله خیز از لرزه گیرهایی استفاده شود که در زمان بروز خطر توانایی تطابق با شرایط و کنترل لرزش ایجاد شده را داشته باشند. ضوابط، طراحی و پیشنهادات ارایه شده در این گزارش در خصوص کاربرد صحیح لرزه گیرها به همراه مهار کننده های لرزه ای برای تجهیزات مکانیکی و سیستم ها در کشور شیلی است. بعلاوه، برخی از خسارات ناشی از زلزله ۸/۸ ریشتری شیلی در ۲۷ فوریه ۲۰۱۰ نشان داده شده اند.

کلمات کلیدی: لرزه گیری؛ مهار لرزش.

۱- مقدمه

کنترل انتقال لرزش در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است زیرا مستقیماً بر عملکرد سیستم ها و سلامتی افراد تأثیر گذار است. انتقال لرزش خصوصاً در زمان بروز حوادثی مانند زلزله می تواند سبب ناپایداری یا حتا تخریب تجهیزات و سازه ها شود. بنابراین، کنترل لرزش یک نیاز حیاتی در علم مهندسی است، بخصوص وقتی که پای یک مولد قدرتمند لرزش مثل یک موتور در میان است. واضح است که سطوح و کف ساختمان ها وقتی که تجهیزات مکانیکی سنگین روی آنها قرار می گیرند تبدیل به یک منبع قدرتمند لرزش

می شوند. در چنین مواردی لرزش مستقیم دستگاه نسبت به اندازه لرزش و صدایی که توسط سازه ایجاد و منتقل می شود عملاً ناچیز است [۱].

در سال های اخیر استفاده از لرزه گیرهای فعال یا نیمه فعال روندی جدید در مبحث طراحی سیستم های ضد لرزش بوده است. با این حال، به کار گیری روش های غیر فعال ضد لرزش ساده، عملی و قابل استفاده تر هستند. همینطور، لرزه گیرهای غیر فعال به منظور حفاظت از تجهیزات حساس در مقابل شوک ها و لرزش های محیطی، ساده تر، ارزان تر و مطمئن تر هستند.

بنابراین، لرزه گیری با استفاده از لرزه گیرهای غیر فعال بسیار به صرفه تر بوده و بر این اساس دامنه کاربرد گسترده تری در صنایع مهندسی دارند. در نتیجه، در این مقاله به بررسی لرزه گیری و مهار لرزش غیر فعال می پردازیم.

استفاده از لرزه گیرها برای کنترل لرزش تجهیزات مکانیکی یک راه حل معمول است که مهندسان و متخصصان صوت و آکوستیک همیشه توصیه می کنند. در گستره وسیع لرزه گیرها، لرزه گیرهای لاستیکی و فنری پر کاربردترین ها هستند زیرا دفلکشن مناسب و قابل قبولی دارند. لرزه گیرهای فنری بطور معمول دارای دفلکشن^۱ بین ۱ تا ۵ اینچ هستند، در حالی که لرزه گیرهای لاستیکی دفلکشن ۰/۱۵ تا ۰/۵۵ اینچ دارند. بر این اساس، واضح است که وقتی دفلکشن بالا مورد نیاز است، بهترین گزینه لرزه گیرهای فنری هستند [۹]. مشکل لرزه گیرهای فنری این است که آنها دارای فرکانسی طبیعی^۲ هستند که می تواند به صورت بالقوه با فرکانس زلزله یکی شود، و این بدان معنی است که در زمان وقوع زلزله، لرزه گیر فنری می تواند وارد رزونانس^۳ شده و به شدت پرتاب شود. اگر لرزه گیر فنری فاقد قاب لرزه ای باشد، تحرک فنر باعث می شود تا تجهیز قرار گرفته بر روی آن حرکت کرده و سقوط کند. اگر تجهیز مورد نظر یک فن یا انواع دیگری از تجهیزات HVAC هوایی باشد خطر سقوط کل سیستم کانال کشی وجود دارد، و اگر تجهیز HVAC آبی باشد خطر سقوط و تخریب سیستم لوله کشی و آب گرفتگی ساختمان وجود دارد. بدتر از همه اینکه اگر تجهیز بیرون از ساختمان و روی بام قرار گرفته باشد، احتمال سقوط آن از روی بام وجود دارد.

در این مقاله، مفاهیم عمومی کنترل لرزش بر اساس روش های عملی کنترل لرزش تجهیزات مکانیکی و ملزومات طراحی بر اساس ASHRAE ارایه شده است تا به یک سیستم کنترل لرزش موثر برای تجهیزات خاص برسیم.

۲- لرزه گیری

۲-۱- بررسی اجمالی

مهندسان بطور معمول برای کاهش اثرات ناشی از لرزش تجهیزات و ماشین آلات در ساختمان ها از لرزه گیر استفاده می کنند. پروسه لرزش مکانیکی می تواند به چهار مرحله اصلی تقسیم بندی شود:

- تولید
- انتقال
- انتشار
- انعکاس

مرحله انتقال اصولاً بهترین، اقتصادی ترین و عملی ترین مرحله برای کنترل نویز و لرزش است. فرض بر این است که موثرترین راه برای از بین بردن لرزش بین تجهیز و سازه استفاده از یک لرزه گیر است [۳].

۲-۲- رویکرد عملی

طراحی یک سیستم لرزه گیری کامل شامل مراحل زیر است:

(۱) انتخاب دفلکشن استاتیکی یا انتقالی لازم برای لرزه گیر

^۱ Deflection ^۲ Resonance

^۳ Natural Frequency

۲) انتخاب صحیح ترین شکل نصب

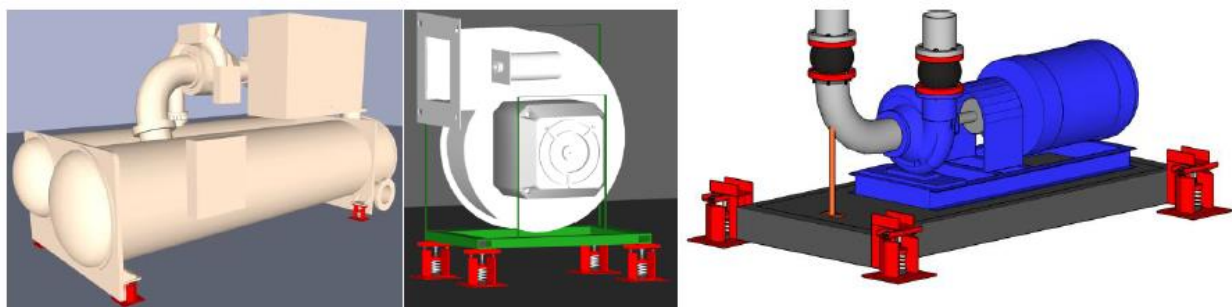
۳) انتخاب موضع لرزه گیرها و تعیین بار وارده بر هر کدام

۴) انتخاب لرزه گیر مناسب در تطابق با سه مورد قبل [۲] ، [۹].

۵) بازسازی و اصلاح اتصالات به منظور اطمینان از اینکه کارآیی لرزه گیر مختل نمی شود

دفلکشن استاتیکی مورد نیاز برای لرزه گیری بخش خاصی از تجهیز می تواند با مراجعه به ASHRAE به دست آید. معمولاً برای گرفتن لرزش های فرکانس پایین موتورها نیازمند دفلکشن زیادی هستیم.

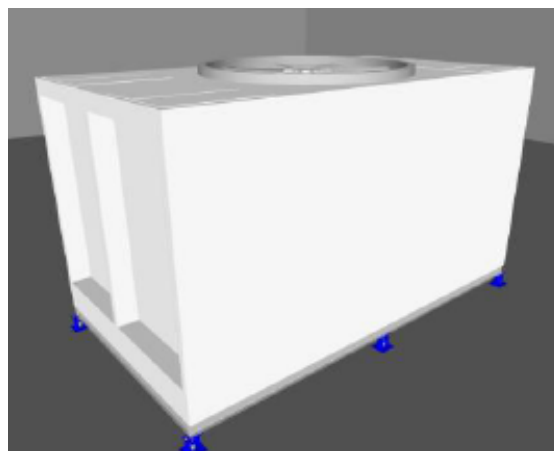
بطور معمول سه راه ممکن برای استقرار تجهیز وجود دارد. اولین راه اتصال مستقیم لرزه گیر به پایه دستگاه است. دومین روش قرار دادن دستگاه روی یک شاسی فلزی^۴ و اتصال لرزه گیرها به آن است و سومین راه قرار دادن دستگاه بر روی اینرشیا بیس^۵ بتنی و قرار دادن کل مجموعه بر روی لرزه گیرها است [۹].



شکل (۱): چپ: چیلری که مستقیماً بر روی لرزه گیرها قرار گرفته است. وسط: فنی که بر روی شاسی فلزی و لرزه گیرها قرار گرفته است. راست: پمپی که بر روی اینرشیا بیس بتنی و لرزه گیرها قرار گرفته است.

برای تجهیزاتی که مستقیماً بر روی لرزه گیرها قرار می گیرند، معمولاً تولید کننده تجهیز محل قرار گیری لرزه گیر را مشخص می کند، چون که اصولاً دستگاه در قسمت پایه خود سوراخ هایی برای اتصال دارد.

برای تجهیزاتی که روی شاسی فلزی یا اینرشیا بیس بتنی قرار می گیرند، اگر طول شاسی یا اینرشیا بیس نسبت به عرض آن خیلی زیاد باشد، باید لرزه گیرهای میانی هم در طول آن نصب شوند تا از خمش یا شکستگی خود شاسی یا اینرشیا بیس جلوگیری شود. این بدان معنی است که در انتخاب لرزه گیرها، ساپورت های میانی بایستی نسبت به لرزه گیرهای گوشه ای باربری بیشتری داشته باشند [۹].



^۴ Metal Chasis

^۵ Inertia Base

شکل (۲): برج خنک کننده قرار گرفته بر روی ۶ لرزه گیر. ۴ لرزه گیر در گوشه ها و ۲ لرزه گیر در وسط

در نظر داشته باشید که اصولاً اتصال لوله ها به تجهیزاتی مانند پمپ ها، چیلرها، برج های خنک کننده و ... توسط اتصالات انعطاف پذیر انجام می شود. برای جلوگیری از لرزش، انتخاب معمول شیلنگ های فولادی انعطاف پذیر بلند هستند. برای جلوگیری از ایجاد فرکانس برشی، اتصالات انعطاف پذیر کروی مورد استفاده قرار می گیرند که هر دو حرکت طولی و محوری را به حداقل می رسانند [۴].

۲-۳- ضوابط طراحی

همانطور که در بخش ۲-۲ شرح داده شد، مرجع ضوابط برای انتخاب لرزه گیرها، نوع پایه و حداقل دفلکشن استاتیکی، ASHRAE است [۹]. انتخاب بر اساس متغیرهای زیر انجام می شود:

- نوع تجهیز
- توان (اسب بخار)
- دور در دقیقه (RPM)
- فاصله بین پایه های ساپورت

اشاره به این نکته مهم است که یکی از مهم ترین متغیرها برای تعیین حداقل دفلکشن استاتیکی مورد نیاز برای لرزه گیری تجهیز، فاصله بین پایه های ساپورت و محل قرار گیری تجهیز است.

۳- مهار لرزش

۳-۱- بررسی اجمالی

همانطور که قبلاً گفته شد، مشکل بزرگی برای مشاوران صوت و آکوستیک در کشورهای زلزله خیز در مورد نحوه انتخاب لرزه گیر و مبحث مهار لرزش وجود دارد. وقتی که بحث مهار لرزش مطرح است، نیروهای کششی و برشی و نقاط اتصال تجهیز به لرزه گیر بایستی به درستی محاسبه شوند. اگر موارد مذکور با دقت و به درستی رعایت نشوند، ممکن است سیستم در زمان بروز زلزله بطور کامل کارایی خود را از دست دهد [۵].

۳-۲- زلزله ها و کدها در کشور شیلی^۶

شیلی یکی از زلزله خیز ترین کشورهای جهان است. مطالعات زیادی وجود دارد که به بررسی زلزله های بزرگ و متعدد رخ داده در این کشور در قرن حاضر می پردازند. سه زلزله بزرگی که طی سال های گذشته این کشور را تحت تأثیر قرار داد و به بسط ضوابط و کدهای لرزه ای کمک کرد شامل [۷]:

(۱) زلزله سال ۱۹۶۰ در شهر "والدیویا"^۷ به بزرگی ۹/۵ ریشتر. پس از این زلزله، کد ساختمانی ۴۳۳-۱۹۹۶ NCh تدوین شد.

(۲) زلزله سال ۱۹۸۵ در شهر "وال پارایسو"^۸ به بزرگی ۷/۸ ریشتر. پس از این زلزله، کدهای ساختمانی ۲۳۶۹-۲۰۰۳ NCh و ۲۷۴۵-۲۰۰۳ تدوین شد.

(۳) زلزله سال ۲۰۱۰ در منطقه "بیو بیو"^۹ به بزرگی ۸/۸ ریشتر. پس از این زلزله، کدهای ساختمانی NTM-۰۰۱ از MINVU که بر اساس کد آمریکایی ASCE-۰۷ بود، و در سال ۲۰۱۵، ۳۳۵۷/۲۰۱۵ NCh تدوین شد.

^۶ Chili ^۷ Val Paraiso

^۸ Valdivia ^۹ Bio Bio

NCh-۳۳۰۷/۲۰۱۵ - ۳-۳ - کد

این کد حداقل ضوابط طراحی لرزه ای برای اجزا و سیستم های غیر سازه ای را مطرح می کند که به شکل دایمی در ساختمان ها نصب می شوند. این شامل تجهیزات مکانیکی مانند ژنراتورها، فن ها، برج های خنک کننده و ... می شود. در ادامه، تعاریف و معادلات مورد استفاده در کدها برای محاسبه ملزومات لرزه ای در اجزای غیر سازه ای ارائه شده است:

(۱) نیروی طرح لرزه ای: نیروی طرح لرزه ای افقی F_p ، برای مرکز گرانش تجهیز یا گرانش منتشر شده در توده تجهیز به کار می رود و از معادله زیر (۱) به دست می آید:

$$F_p = \frac{0.4 \alpha_p \alpha_A A W_p}{g \left(\frac{R_p}{I_p} \right)} \left(1 + 2 \frac{z}{h} \right) \quad (1)$$

این کد مشخص می کند که مقدار F_p باید در محدوده زیر باشد:

$$\frac{0.3 \alpha_A A I_p W_p}{g} < F_p < \frac{1.6 \alpha_A A I_p W_p}{g} \quad (2)$$

وقتی که F_p نیروی لرزه جزء غیر سازه ای باشد، α_A شتاب طیف طراحی است که توسط D.S.۶۱/۲۰۱۱ از MINVU دسته بندی می شود.

در جدول ۲ مقادیر ممکن نشان داده شده اند. α_p فاکتور تقویت دینامیکی است که بین ۰/۱ تا ۲/۵ است. I_p فاکتور اهمیت است که بین ۱/۰ تا ۱/۵ است. W_p وزن تجهیز در حین کار است. R_p فاکتور اصلاح پاسخ است که بین ۱ تا ۸ متغیر است. Z ارتفاع اجزا با توجه به زمین و ارتفاع طبقه است. برای اجزای مستقر در زیرزمین $Z=0$ است. h ارتفاع ساختمان با توجه به زمین و g شتاب گرانش بر حسب cm/s^2 است.

نیروی طرح لرزه ای افقی، F_p ، باید در دو جهت در مقابل بار هر جزء به کار رود. بعلاوه، یک نیروی طرح لرزه ای همزمان، F_{pv} ، وجود دارد که برابر با $(0.2 \alpha_A A W_p)/g \pm$ است.

جدول (۱): پارامتر α_A

Type of ground	α_A
A	977 Z
B	1.101 Z
C	1.144 Z
D	1.455 Z
E	1.576 Z

که در آن پارامتر Z ، بستگی به زون لرزه ای دارد که در جدول (۲) مشخص شده است. برای نوع زمین F، بر اساس کد NCh ۴۳۳-۱۹۹۶، یک مطالعه و بررسی خاص باید برای تعیین نیروهای لرزه ای انجام شود.

جدول (۲): فاکتور Z از شتاب دهنده طیفی زون لرزه ای

Seismic zone	Z
1	0.5
2	0.75
3	1

۴- بروز اختلالات در زمان زلزله

در این بخش، اختلالاتی که در زمان وقوع زلزله ۲۷ فوریه ۲۰۱۰ در شیلی رخ داد، شرح داده می شود. عکس ها در ۲۸ فوریه همان سال در نقاط کاری مختلف طی بازرسی های فنی گرفته شده اند. اختلالات مشاهده شده نشان دهنده ضعف و اشتباه در انتخاب و نصب لرزه گیرها و انتخاب نادرست انکر بولت ها است. هر یک از اختلالات فوق الذکر در زیر شرح داده شده است.

۴-۱- انتخاب لرزه گیرها

یکی از مشکلات اصلی انتخاب لرزه گیرهایی بود که در برابر زلزله مقاومت نداشتند. لازم است در مناطق زلزله خیز از لرزه گیرهایی استفاده شود که دارای قاب سختی باشند تا حرکات اضافی لرزه گیر و تجهیز مربوطه را در زمان وقوع زلزله محدود کنند [۶].



شکل (۳): چپ: لرزه گیرهای گوشه ای زیر چیلر کاملاً از محل خود خارج شده اند و چیلر سقوط کرده است. راست: اختلال سیستم لرزه گیر پمپ دارای اینرشیا بیس به دلیل فقدان مهار کننده فنر.

۴-۲- نصب لرزه گیرها

مشکل دیگری که مشاهده شد این بود که علیرغم انتخاب لرزه گیرهای درست در بسیاری از موارد، نصب انکر بولت ها در فاصله بسیار نزدیک به لبه بتن سبب تخریب بتن و انکر بولت شده است [۸].



شکل (۴): لرزه گیر سالم است اما بتن به دلیل نزدیک بودن بیش از حد انکر بولت به لبه آن تخریب شده است.

۴-۳- انتخاب پیچ

نکات مهم دیگری که نباید مورد غفلت قرار گیرند اتصال بین تجهیز و لرزه گیر و بین لرزه گیر و سازه است. در شکل زیر اختلال ایجاد شده بر اثر نیروی برشی وارده به پیچ نامناسب دیده می شود.



شکل (۵): تخریب پیچ به دلیل انتخاب پیچ نادرست، تحت تأثیر نیروهای برشی زلزله

نتیجه گیری

توجه داشته باشید که آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت در حقیقت اصول طراحی سیستم های لرزه گیر تجهیزات مکانیکی است که بایستی در تمام مناطق زلزله خیز مورد توجه قرار گیرد. توصیه های طراحی بر اساس ضوابط بین المللی ASHRAE در مورد کنترل لرزش و کد لرزه ای کشور شیلی (NCh-۳۳۵۷/۲۰۱۵) در مورد مقاومت لرزه ای ارائه شده اند. با جمع این دو ضابطه، می توان به یک سیستم طراحی کنترل لرزش منسجم و موثر دست یافت و بر اساس آن عملکرد پیوسته و صحیح تجهیزات مکانیکی دارای لرزه گیر را در خلال و پس از زلزله تضمین کرد. صدمات ناشی از یک سیستم لرزه گیر فاقد مهار کننده های لرزه ای می تواند سبب بروز خسارات مالی و جانی فراوانی شود. نهایتاً می توان نتیجه گرفت که مهندسان و مشاوران آکوستیک شاغل در کشورهای زلزله خیز بایستی با توجه به پیشرفت های حاصل شده در خصوص تولید لرزه گیرهای مهاردار، تمرکز خود را بر انتخاب و نصب دقیق و صحیح لرزه گیرها معطوف کنند تا به این وسیله از بروز خسارات مالی و جانی افراد در زمان بروز حوادث تا حد امکان جلوگیری کنند.

مراجع

۱. El-Sinawi AH. Active vibration isolation of a flexible structure mounted on a vibrating elastic base. Journal of Sound and Vibration ۲۷۱ (۲۰۰۴) ۳۲۳-۳۳۷.
۲. Mead DJ. Passive Vibration Control. John Wiley and Sons, ۱۹۹۹.
۳. Dynamic analysis of high static low dynamic stiffness vibration isolation mounts. Journal of Sound and Vibration ۳۳۲ (۲۰۱۳) ۱۴۳۷-۱۴۵۵.
۴. Elliot SJ, Serrand M, Gardonio P. Feedback stability limits for active isolation systems with reactive and inertial actuators. Journal of Vibration and Acoustics ۱۲۳ (۲۰۰۱) ۲۵۰-۲۶۱.
۵. Mak CM, Jianxin S. A power transmissibility method for assessing the performance of vibration isolation of building services equipment. Applied Acoustics ۶۳ (۲۰۰۲) ۱۲۸۱-۱۲۹۹.
۶. Fuller CR, Elliott SJ, Nelson. Active control of vibration. UK: Academic; ۱۹۹۶.
۷. Snyder SD, Tanaka N. Active control of vibration using a neural network. IEEE Transactions Neural Networks ۶ (۴) (۱۹۹۵) ۸۱۹-۸۲۸.
۸. Shaw J. Active vibration isolation by adaptive control. Journal of Vibration and Control ۷ (۱) (۲۰۰۱) ۱۹-۳۱.
۹. ۲۰۱۵ ASHRAE® HANDBOOK Heating, Ventilating, and Air-Conditioning APPLICATIONS ASHRAE, ۱۷۹۱ Tullie Circle, N.E., Atlanta, GA ۳۰۳۲۹ www.ashrae.org Inch-Pound Edition.