



دانشگاه علوم پزشکی و خدمات بهداشتی درمانی
شهید صدوقی زرد

دانشکده بهداشت

مقطع کارشناسی ارشد بهداشت حرفه ای

دستورالعمل انجام پروژه طراحی و کنترل ارتعاش

دکتر روح اله فلاح

ویرایش ۵

ارتعاش در محیط‌های صنعتی یکی از عوامل زیان‌آور فیزیکی است که می‌تواند باعث اختلال در عملکرد دستگاه‌ها، کاهش عمر تجهیزات، ایجاد صدای ناخواسته و مهم‌تر از همه، بروز عوارض بهداشتی نظیر سندرم دست-بازو (HAVS) و کمردرد در کارگران شود. کنترل ارتعاش نه تنها برای حفظ سلامت نیروی کار ضروری است، بلکه بهره‌وری و کیفیت محصولات را نیز افزایش می‌دهد.

در این دستورالعمل، دانشجو با استفاده از مثال‌های انگلیسی موجود در فایل **Vibration control.pdf**، گام‌به‌گام یک پروژه کامل کنترل ارتعاش را برای یک منبع واقعی صنعتی (موتور-ژنراتور، پرس، فن بزرگ، یا ابزار دستی) طراحی می‌کند. روش‌های اصلی شامل ایزولاسیون غیرفعال (فنر، الاستومر، پدها)، جذب دینامیکی ارتعاش (DVA)، میرایی لایه‌ای و کنترل مدیریتی/حفاظت فردی می‌باشد. همچنین محاسبه مواجهه روزانه با ارتعاش بر اساس استانداردهای اتحادیه اروپا (صفحات ۹۲-۸۷) انجام می‌شود.

بخش ۱: جمع‌آوری داده‌های میدانی (واقعی یا شبیه‌سازی شده)

قبل از هر محاسبه، دانشجو باید اطلاعات زیر را از یک دستگاه واقعی در صنعت (یا با فرض منطقی از روی کانالوگ) ثبت کند.

۱-۱ مشخصات منبع ارتعاش (ماشین ثابت)

نحوه تعیین	واحد	مقدار نمونه (واقعی)	علامت	پارامتر
پلاک / کانالوگ	lb (یا kg)	1200	W	وزن کل دستگاه
تبدیل	kg	lb = ؟ توجه: ۱۲۰۰ kg به lb برای 544 (544 kg)	m = W/g	جرم دستگاه
پلاک	rpm	1800	N	سرعت چرخش (rpm)
محاسبه	Hz	30	f = N/60	فرکانس تحریک
مشاهده	-	4	n	تعداد پایه‌های نصب
بازدید	-	بتن مسلح	-	جنس کف (فنداسیون)

نحوه تعیین	واحد	مقدار نمونه (واقعی)	علامت	پارامتر
اندازه گیری	-	خیر/بله	-	وجود ارتعاش اضافی (تشدید)

۱-۲ داده‌های ارتعاش سنجی (برای ارتعاش تمام بدن یا دست-بازو)

- شتاب وزن دار r.m.s در سه جهت (a_{wx} , a_{wy} , a_{wz}) بر حسب m/s^2
- زمان مواجهه روزانه (T_{exp} ساعت)
- در صورت عدم دسترسی به دستگاه اندازه گیری، از مقادیر مرجع کاتالوگ یا استاندارد استفاده کنید.

۱-۳ استانداردهای مرجع (برگرفته از فایل صفحات ۹۲-۸۷)

- ارتعاش تمام بدن: (WBV)
 - حد اقدام $A(8) = 0.5 m/s^2$ (Action value)
 - حد آستانه $A(8) = 0.9 m/s^2$ (Limit value)
 - ارتعاش دست-بازو: (HAV)
 - حد اقدام $A(8) = 2.5 m/s^2$
 - حد آستانه $A(8) = 5.0 m/s^2$
- اگر مواجهه روزانه از حد اقدام بالاتر باشد، باید اقدامات کنترلی اجرا شود. هدف پروژه کاهش مواجهه به زیر حد اقدام است.

بخش ۲: محاسبه مواجهه روزانه با ارتعاش (وضع موجود)

مرجع اصلی: فایل Vibration control ، صفحات ۸۷ تا ۹۲
 مثال‌های انگلیسی مهم: صفحات ۸۷ (هاروستر)، ۸۸ (راننده دو وسیله)، ۹۰ (VDV)، ۹۱ (یک ابزار)، ۹۲ (چند ابزار)

۲-۱ ارتعاش تمام بدن (روش r.m.s)

فرمول‌ها (صفحه ۸۷):

$$A_x(8) = 1.4 \times a_{wx} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

$$A_y(8) = 1.4 \times a_{wy} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

$$A_z(8) = a_{wz} \sqrt{\frac{T_{exp}}{T_0}}$$

که $T_0 = 8$ ساعت (زمان مرجع). سپس مواجهه روزانه = بیشترین مقدار در بین سه محور.

مثال عددی (مطابق صفحه ۸۷):

یک راننده هاروستر به مدت ۶.۵ ساعت در روز کار می کند. شتابهای وزن دار روی صندلی:
 $z: 0.25 \text{ m/s}^2, y: 0.4 \text{ m/s}^2, x: 0.2 \text{ m/s}^2$

$$A_x(8) = 1.4 \times 0.2 \times \sqrt{\frac{6.5}{8}} = 0.28 \times 0.901$$

$$= 0.252 \text{ m/s}^2$$

$$A_y(8) = 1.4 \times 0.4 \times 0.901 = 0.56 \times 0.901$$

$$= 0.505 \text{ m/s}^2$$

$$A_z(8) = 0.25 \times 0.901 = 0.225 \text{ m/s}^2$$

مواجهه روزانه = 0.505 m/s^2 (محور y)

این مقدار از حد اقدام (0.5) کمی بالاتر است - نیاز به کنترل دارد (مثلاً بهبود صندلی یا کاهش زمان).

۲-۲ ارتعاش تمام بدن - مواجهه همزمان با دو وسیله (صفحه ۸۸)

راننده ۱ ساعت لیفتراک + ۶ ساعت کامیون. شتابها:

وسیله	a_{wx}	a_{wy}	a_{wz}
لیفتراک (1h)	0.5	0.3	0.9
کامیون (6h)	0.2	0.3	0.3

ابتدا مواجهه جزئی هر وسیله در هر محور:

لیفتراک:

$$A_{x,ft} = 1.4 \times 0.5 \times \sqrt{(1/8)} = 0.7 \times 0.354 = 0.248$$

$$A_{y,ft} = 1.4 \times 0.3 \times 0.354 = 0.149$$

$$A_{z,ft} = 0.9 \times 0.354 = 0.319$$

کامیون:

$$A_{x,tr} = 1.4 \times 0.2 \times \sqrt{(6/8)} = 0.28 \times 0.866 = 0.242$$

$$A_{y,tr} = 1.4 \times 0.3 \times 0.866 = 0.364$$

$$A_{z,tr} = 0.3 \times 0.866 = 0.260$$

سپس جمع مجذوری در هر محور:

$$A_x(8) = \sqrt{0.248^2 + 0.242^2} = \sqrt{0.0615 + 0.0586} = \sqrt{0.1201} = 0.346$$

$$A_y(8) = \sqrt{0.149^2 + 0.364^2} = \sqrt{0.0222 + 0.1325} = \sqrt{0.1547} = 0.393$$

$$A_z(8) = \sqrt{0.319^2 + 0.260^2} = \sqrt{0.1018 + 0.0676} = \sqrt{0.1694} = 0.412$$

مواجهه روزانه = ۰.۴۱۲) m/s² محور (z. زیر حد اقدام - نیازی به کنترل نیست.

۳-۲ ارتعاش دست-بازو - یک ابزار (صفحه ۹۱)

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \text{ فرمول}$$

مثال: برش زن با شتاب ۴ m/s² به مدت ۴.۵ ساعت:

$$A(8) = 4 \times \sqrt{4.5/8} = 4 \times 0.75 = 3.0 \text{ m/s}^2$$

این مقدار از حد اقدام (۲.۵) بالاتر است - نیاز به کنترل (کاهش زمان یا ایزولاسیون دسته).

۴-۲ ارتعاش دست-بازو - چند ابزار (صفحه ۹۲)

$$A(8) = \sqrt{A_1(8)^2 + A_2(8)^2 + A_3(8)^2} \text{ جمع مجذوری}$$

مثال:

$$h \rightarrow A_1 = 4 \times \sqrt{(2.5/8)} = 4 \times 0.559 = 2.24 \text{ m/s}^2 \text{ به مدت ۲.۵}$$

$$h \rightarrow A_2 = 3 \times \sqrt{(1/8)} = 3 \times 0.354 = 1.06 \text{ m/s}^2 \text{ به مدت ۱}$$

$$h \rightarrow A_3 = 20 \times \sqrt{(0.25/8)} = 20 \times 0.1768 = 3.54 \text{ m/s}^2 \text{ به مدت ۲۵}$$

$$A(8) = \sqrt{2.24^2 + 1.06^2 + 3.54^2} = \sqrt{5.02 + 1.12 + 12.53} = \sqrt{18.67} = 4.32 \text{ m/s}^2$$

بسیار بالاتر از حد اقدام (۲.۵) و نزدیک به حد آستانه (۵) - کنترل فوری لازم است. راهکارها: کاهش زمان کار با چکش به ۰.۱h (۶ دقیقه) و استفاده از دستکش ضد ارتعاش.

بخش ۳: طراحی ایزولاسیون ارتعاش برای ماشین‌های ثابت

مرجع اصلی: صفحات ۱۶-۱۳، ۳۷-۳۲، ۴۴-۴۰ - مثال‌های صفحات ۳۱-۳۰، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۴۰، ۴۲، ۴۳

۳-۱ اصول پایه

سیستم جرم-فنر-میراگر:

- فرکانس طبیعی $(\text{Hz}) f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$
- جابجایی استاتیک (افتادگی) $d = \frac{g}{(2\pi f_n)^2}$ (متر) یا $d_{cm} = \frac{4.98^2}{f_n^2}$ سانتی‌متر)
- ضریب انتقال $T = \frac{F_{transmitted}}{F_{exciting}}$

برای ایزولاسیون مؤثر نیاز است $\frac{f}{f_n} > \sqrt{2} \approx 1.414$.
رابطه بدون میرایی (صفحه ۱۶):

$$T = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_n}\right)^2 - 1} \quad \left(\frac{f}{f_n} > 1\right)$$

با داشتن T مطلوب (مثلاً ۰.۰۵ برای ایزولاسیون ۹۵٪)، نسبت فرکانس:

$$\frac{f}{f_n} = \sqrt{1 + \frac{1}{T}}$$

۳-۲ گام‌های طراحی ایزولاتور فنری

گام ۱: تعیین فرکانس تحریک $(\text{Hz}) \cdot f = \text{rpm}/60$

گام ۲: انتخاب درصد ایزولاسیون (معمولاً ۹۵-۹۰٪ برای ماشین‌های حساس).

گام ۳: محاسبه $T = 1 - \text{percent} / 100$ (ایزولاسیون٪) و سپس $\frac{f}{f_n} = \sqrt{1 + 1/T}$

گام ۴: محاسبه فرکانس طبیعی $f_n = f / \left(\frac{f}{f_n}\right)$

گام ۵: محاسبه جابجایی استاتیک $(\text{m}) \cdot d = \frac{g}{(2\pi f_n)^2}$

گام ۶: تعیین بار وارده بر هر پایه $(P = \frac{\text{وزن دستگاه}}{n})$ نیوتن.

گام ۷: محاسبه سختی هر پایه $k = \frac{P}{d}$ (N/m).

گام ۸: انتخاب فنر از کاتالوگ موجود با نزدیک‌ترین سختی.

مثال عددی ۱: ماشین ۲ تنی (مطابق صفحات ۳۱-۳۰)

ماشین ۲۰۰۰ kg، سرعت ۲۴۰ rpm ($f=4$ Hz)، روی ۴ فنر، فرکانس طبیعی موجود $f_n=2$ Hz

- جابجایی استاتیک $d = \frac{9.81}{(2\pi \times 2)^2} = \frac{9.81}{157.9} = 0.062 \text{ m} = 62 \text{ mm}$
- سختی کل $k_{total} = m(2\pi f_n)^2 = 2000 \times 157.9 = 315.8 \text{ kN/m}$
- سختی هر پایه $k = 315.8/4 = 78.95 \text{ kN/m}$
- ضریب انتقال (بدون میرایی) $T = 1/((4/2)^2 - 1) = 1/(4 - 1) = 0.333 \rightarrow 33\%$: ارتعاش منتقل می‌شود. این ایزولاسیون ضعیف است (فقط ۶۷٪). برای بهبود باید f_n را کاهش داد (فنر نرم‌تر).

تفسیر: $f/f_n=2$ ، ایزولاسیون کافی نیست. برای رسیدن به $T=0.1$ (۹۰٪ ایزولاسیون)، نیاز به $f/f_n=3.32$ و در نتیجه $f_n=4/3.32=1.2 \text{ Hz}$ ، $d=9.81/(2\pi \times 1.2)^2=0.173 \text{ m}=173 \text{ mm}$ که عملی نیست. بنابراین این ماشین با این فرکانس تحریک، ایزولاسیون مؤثر نیازمند فنرهای بسیار نرم و جابجایی زیاد است.

مثال عددی ۲: موتور-ژنراتور ۱۲۰۰ پوندی (صفحه ۳۷)

وزن ۱۲۰۰ lb (544 kg)، سرعت ژنراتور ۱۸۰۰ rpm ($f=30$ Hz)، هدف ایزولاسیون ۹۵٪ ($T=0.05$)

$$\rightarrow f_n = 30/4.58 = 6.55 \text{ Hz} \quad \frac{f}{f_n} = \sqrt{1 + 1/0.05} = \sqrt{21} = 4.58$$

$$d = \frac{9.81}{(2\pi \times 6.55)^2} = \frac{9.81}{1694} = 0.00579 \text{ m} = 0.23 \text{ in}$$

بار هر پایه $= 4/1200 = 0.33/300 = 0.23/300$ ، سختی هر پایه $= 0.23/300 = 0.77 \text{ lb/in}$.
طبق کاتالوگ صفحه ۳۷، پایه مدل SLF-412 با مشخصات نزدیک انتخاب می‌شود.

تفسیر: جابجایی استاتیک ۰.۲۳ اینچ (حدود ۶ میلی‌متر) و فرکانس طبیعی ۶.۵۵ هرتز، ایزولاسیون ۹۵٪ قابل دستیابی است. این طراحی برای موتورهای پرسرعت مناسب است.

مثال عددی ۳: محاسبه فرکانس طبیعی از روی جابجایی (صفحه ۳۶)

افتادگی استاتیک هر پایه ۴/۱ اینچ (6.35 mm)، فرکانس طبیعی:

$$f_n = \frac{4.98}{\sqrt{d_{cm}}} = \frac{4.98}{\sqrt{0.635}} = \frac{4.98}{0.797} = 6.25 \text{ Hz}$$

مثال عددی ۴: ماشین ۱۰۰ کیلوگرم با ایزولاسیون ۸۰٪ (صفحه ۳۵)

وزن ۱۰۰ kg، سرعت ۱۵۰۰ rpm ($f=25$ Hz)، $T=0.2$.

$$\rightarrow f_n = 25/2.45 = 10.2 \text{ Hz} \quad \frac{f}{f_n} = \sqrt{1 + 1/0.2} = \sqrt{6} = 2.45$$

$$d = 9.81/(2\pi \times 10.2)^2 = 9.81/4100 = 0.00239 \text{ m} = 2.39 \text{ mm}$$

بار هر پایه $= 4/(9.81 \times 100) = 0.00239/245.25 = 0.00239/245.25$ ، سختی $= 0.00239/245.25 = 0.00239/245.25$ kN/m.

تفسیر: جابجایی بسیار کم (2.4 mm) نشان می‌دهد که فنر نسبتاً سختی نیاز است. چنین ایزولاتوری به راحتی ساخته می‌شود و برای ماشین‌های با فرکانس بالا (مثل موتورهای الکتریکی) مناسب است.

۳-۳ ایزولاتورهای الاستومری (لاستیکی) - صفحه ۴۱-۴۰

مثال صفحه ۴۰: موتور احتراق داخلی lb۸۰۰، سرعت ۲۴۰۰ (f=40 Hz) rpm، هدف ایزولاسیون ۹۷ (T=0.03) % از جدول مخصوص الاستومرها، جابجایی استاتیک مورد نیاز ۰.۲۱ in (5.3 mm) بار هر پایه = ۴/۸۰۰ = lb. ۲۰۰ با مراجعه به منحنی‌های بار-جابجایی (شکل صفحه ۴۱)، پایه با درجه سختی ۴۰ (durometer) انتخاب می‌شود.

تفسیر: الاستومرها میرایی ذاتی دارند و از تشدید در هنگام عبور از فرکانس طبیعی جلوگیری می‌کنند. برای موتورهای احتراق داخلی که فرکانس تحریک متغیر است، الاستومرها نسبت به فنرهای خالص ترجیح دارند.

۳-۴ پدهای نمدی (صفحه ۴۲)

مثال: پرس lb ۹۰۰۰ با ۶ پایه، هر پایه ۵×۴ اینچ (20 in²) بار هر پایه = lb۱۵۰۰، فشار = ۲۰/۱۵۰۰ = psi. ۷۵ طبق جدول صفحه ۴۲، این فشار در محدوده چگالی متوسط (Medium) قرار دارد. (50-100 psi) بنابراین پد نمدی Medium انتخاب می‌شود.

تفسیر: پدهای نمدی برای ایزولاسیون ارتعاشات با فرکانس بالا (مثلاً >30 Hz) مناسب هستند و هزینه پایینی دارند، اما در فرکانس‌های پایین مؤثر نیستند.

۳-۵ پدهای چوب پنبه‌ای (صفحه ۴۴-۴۳)

مثال: دستگاه lb۸۰۰، ۴ پایه، هر پایه ۳×۳ اینچ = ۹ in² بار هر پایه = lb۲۰۰، فشار = ۹/۲۰۰ = psi. ۲۲.۲ طبق جدول صفحه ۴۴، چوب پنبه با چگالی ۱.۲۵ lb/bd-ft برای محدوده ۵-۳۰ psi مناسب است.

تفسیر: چوب پنبه فشرده ایزولاسیون خوبی برای فرکانس‌های میانه (10-50 Hz) دارد و در برابر روغن مقاوم است.

۳-۶ جدول مواد ایزولاتور موجود در بازار ایران

نوع ایزولاتور	جنس	محدوده (kg) بار	جابجایی استاتیک (mm)	فرکانس طبیعی (Hz)	میرایی	قیمت تقریبی (تومان/عدد)	تأمین‌کننده نمونه
فنر مارپیچ	فولاد فنری ۶۰Si۲Mn	50 – 5000	5 – 50	2 – 7	بسیار کم	۸۰,۰۰۰ – ۳۰۰,۰۰۰	شرکت فنر ایران (تهران)

نوع ایزولاتور	جنس	محدوده بار (kg)	جابجایی استاتیکی (mm)	فرکانس طبیعی (Hz)	میرایی	قیمت تقریبی (تومان/عدد)	تأمین کننده نمونه
ایزولاتور الاستومری	لاستیک طبیعی (NR)	10 – 2000	2 – 15	8 – 20	متوسط	۴۰,۰۰۰ – ۱۵۰,۰۰۰	شرکت لاستیک یزد، پدهای لاستیکی صنعتی
پد نمدی	نمد پشمی صنعتی (چگالی ۰.۵-۰.۸ g/cm ³)	بار سطحی ۵-۰.۵ kg/cm ²	1 – 3	15 – 30	بالا	۲۰,۰۰۰ – ۵۰,۰۰۰ (بر متر مربع)	کارخانجات نمد ایران (کاشان)
پد چوب پنبه‌ای	چوب پنبه فشرده با چگالی ۰.۲-۰.۵ g/cm ³	بار سطحی ۳-۰.۳ kg/cm ²	0.5 – 2	25 – 50	متوسط	۳۰,۰۰۰ – ۸۰,۰۰۰ (بر متر مربع)	وارداتی (ترکیه)، ابزارفروشی‌های بزرگ
پد پشم شیشه (فایبرگلاس)	پشم شیشه با رزین فنولیک	بار سطحی ۱-۰.۱ kg/cm ²	2 – 10	10 – 20	کم تا متوسط	۲۵,۰۰۰ – ۶۰,۰۰۰	ایران پشم شیشه (کاشان)
بالشتک هوا (Pneumatic)	لاستیک + محفظه هوا	100 – 2000	10 – 50	1 – 3	قابل تنظیم	۱,۰۰۰,۰۰۰ – ۳,۰۰۰,۰۰۰	وارداتی (فروشگاه‌های تجهیزات دقیق)

نحوه انتخاب: ابتدا بار هر پایه و فرکانس تحریک را محاسبه کنید. برای فرکانس پایین ($<10\text{ Hz}$) از فنر یا بالشتک هوا استفاده کنید. برای فرکانس بالا ($>20\text{ Hz}$) پدهای نمدی یا الاستومر کافی است. همیشه سعی کنید $f/f_n > 2.5$ باشد تا ایزولاسیون حداقل ۸۵٪ حاصل شود.

بخش ۴: جاذب دینامیکی ارتعاش (Dynamic Vibration Absorber – DVA)

مرجع اصلی: صفحات ۲۷-۱۷، ۳۱-۳۰ – مثال صفحات ۳۱-۳۰

وقتی یک ماشین در فرکانس خاصی (مثلاً به دلیل نزدیکی به تشدید) دچار ارتعاش شدید می‌شود، می‌توان یک جرم-فنر کمکی (DVA) به آن اضافه کرد. فرکانس طبیعی DVA باید برابر فرکانس تحریک تنظیم شود. جرم DVA معمولاً ۵ تا ۲۰ درصد جرم اصلی است.

$$\text{DVA: } f_{DVA} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} = f_{exc} \text{ طبیعی}$$

پس از نصب DVA، دامنه ارتعاش جرم اصلی به شدت کاهش می‌یابد (در حالت ایده‌آل به صفر می‌رسد). اما در دو فرکانس جدید نزدیک به فرکانس اصلی، دو پیک تشدید ظاهر می‌شود. بنابراین DVA فقط برای ماشین‌هایی با سرعت ثابت مناسب است.

مثال عددی (صفحات ۳۱-۳۰):

ماشین ۲۰۰۰ kg، فنریت کل ۱۵.۸ kN/m، فرکانس طبیعی ۲ Hz، تحریک خارجی با فرکانس ۴ Hz (نزدیک به تشدید). یک DVA با جرم ۱۰۰ kg و دامنه استاتیکی ۱۲ mm طراحی می‌شود. سختی $k_2 = m_2(2\pi f)^2$ DVA: $100 \times (2\pi \times 4)^2 = 100 \times 631.6 = 63.16$ kN/m. پس از نصب، دامنه ارتعاش ماشین اصلی از مقدار بسیار زیاد به ۰.۸ mm (بدون فنداسیون) و ۰.۲ mm (با فنداسیون ۶ تنه) کاهش می‌یابد.

تفسیر DVA: یک راهکار مؤثر اما تخصصی است. در پروژه، اگر ماشین در یک فرکانس ثابت (مثل فن، کمپرسور رفت و برگشتی) دچار تشدید شد، می‌توانید طراحی DVA را پیشنهاد دهید. حرم DVA را از جنس فولاد (بلوک) و فنر را از نوع مارپیچ انتخاب کنید.

بخش ۵: میرایی، لایه‌ای (Constrained Layer Damping)

مرجع اصلی: صفحات ۶۵-۶۸

برای کاهش ارتعاش در صفحات نازک (پوسته فن، کانال هوا، بدنه ماشین) از لایه‌ای از ماده ویسکوالاستیک (مانند نیوپرن، پلی‌یورتان) بین دو لایه سفت (فلز) استفاده می‌شود. این تکنیک انرژی ارتعاشی را به گرما تبدیل می‌کند.

مواد موجود در ایران: ورق لاستیکی نئوپرن (ضخامت ۲، ۳، ۵ میلی‌متر) - شرکت لاستیک یزد، ورق پلی‌یورتان - کارخانجات پلیمر. چسب مناسب: چسب آکرو فیکس یا چسب لاستیکی دو جزئی.

طراحی ساده: روی صفحه مرتعش، یک لایه چسب + نئوپرن ۳ mm + ورق فولادی ۱ mm بچسبانید. این کار میرایی را به طور قابل توجهی افزایش می دهد.

بخش ۶: کنترل ارتعاش دست و بازو (ابزارهای دستی)

مرجع اصلی: صفحه ۶ و صفحات ۹۱-۹۲

روش‌های اصلی:

۱. **میرا کردن درون ابزار:** سازنده باید ابزار را با دسته‌های الاستومری و جاذب‌های داخلی طراحی کند. در پروژه، دانشجو می‌تواند ابزاری که قبلاً خریداری شده را بررسی کرده و در صورت نبود ایزولاسیون، پیشنهاد تعویض با مدل پیشرفته‌تر را بدهد.
۲. **میرا کردن بین بدنه و دست کاربر:** استفاده از **دستکش ضد ارتعاش** (دارای لایه ژل یا نئوپرن). دستکش‌های استاندارد می‌توانند شانتقال را تا ۵۰-۳۰٪ کاهش دهند (معادل ۵-۲ دسی‌بل). برندهای موجود، Uvex, Ansell: و نمونه داخلی (شرکت کارا).
۳. **هدایت از راه دور:** مؤثرترین روش - استفاده از بازوی رباتیک یا اهرم بلند.
۴. **کاهش زمان مواجهه:** مثلاً در مثال صفحه ۹۲ که مواجهه 4.3 m/s^2 بود، اگر زمان کار با چکش را از $h \cdot 0.25$ به $h \cdot 0.1$ کاهش دهیم:

$$A_3 = 20 \times \sqrt{0.1/8} = 20 \times 0.1118 = 2.24$$

$$A(8) = \sqrt{2.24^2 + 1.06^2 + 2.24^2} = \sqrt{5.02 + 1.12 + 5.02} = \sqrt{11.16} = 3.34 \text{ m/s}^2$$

هنوز بالاتر از ۲.۵ است. بنابراین باید زمان چکش را به کمتر از $h \cdot 0.05$ (۳ دقیقه) برسانیم یا از دستکش استفاده کنیم. با دستکش ۴۰٪ کاهش $A_3 = 20 \times 0.6 \times \sqrt{0.1/8} = 12 \times 0.1118 = 1.34$ ، سپس جمع مجذوری $(2.24^2 + 1.06^2 + 1.34^2) = \sqrt{5.02 + 1.12 + 1.80} = \sqrt{7.94} = 2.82$ (تقریباً به حد اقدام).

بخش ۷: ارتباط کنترل ارتعاش با کاهش صدا (صفحه ۴۵)

کنترل ارتعاش به طور مستقیم صدای تابشی از سطوح را کاهش می‌دهد. کاهش توان صوتی تابشی (ΔSWL) از روی ضریب انتقال محاسبه می‌شود:

$$\Delta SWL = 10 \log_{10}(100 - T) \quad (\text{بر حسب درصد } T)$$

$$\text{یا } NR = 20 \log_{10}(1/T) \quad \text{برای } T \text{ به صورت کسر.}$$

مثال: اگر با ایزولاتور $T=0.1$ (۱۰٪ انتقال)، آنگاه $NR = 20 \log_{10}(10) = 20 \text{ dB}$. یعنی صدای پیکری ۲۰ دسی‌بل کاهش می‌یابد. این یک مزیت مهم کنترل ارتعاش است.

بخش ۸: جمع‌بندی و انتخاب بهینه راهکار

دانشجو پس از انجام محاسبات مواجهه و طراحی ایزولاتور، جدول زیر را برای مقایسه راهکارها پر می‌کند (برای یک ماشین ثابت مثلاً موتور-ژنراتور ۵۴۴ کیلوگرمی، ۱۸۰۰ rpm):

معایب	مزایا	هزینه تقریبی (تومان)	فرکانس طبیعی (Hz)	جابجایی استاتیک (mm)	کاهش ارتعاش (%)	ضریب انتقال T	راهکار
-	-	0	-	-	0	1.0	بدون کنترل
نیاز به فنداسیون، میرایی کم	عملکرد عالی در فرکانس بالا، عمر زیاد	۱,۲۰۰,۰۰۰	6.6	5.8	95	0.05	فنر مارپیچ (۴ پایه)
حساس به دما و روغن	نصب آسان، میرایی ذاتی	۶۰۰,۰۰۰	8.0	4.0	90	0.10	الاستومر (لاستیک)
فقط فرکانس بالا	ارزان، نصب سریع	۲۰۰,۰۰۰	13	1.5	65	0.35	پد نمدی
عملکرد محدود	مقاوم در برابر روغن	۲۵۰,۰۰۰	14	1.2	60	0.40	پد چوب پنبه‌ای
فقط تک فرکانس	حذف ارتعاش در یک فرکانس خاص	۱,۵۰۰,۰۰۰	-	-	حذف تشدید	-	DVA (اضافی)

انتخاب بهینه: برای موتور-ژنراتور با سرعت ۱۸۰۰ rpm، فنر مارپیچ با ۴ پایه بهترین است. ($T=0.05$) اگر محدودیت فضا یا بودجه وجود دارد، ایزولاتور الاستومری گزینه خوبی است. ($T=0.10$) در صورت وجود تشدید در فرکانس ۳۰ هرتز (مثلاً به دلیل بدنه نرم)، DVA نیز اضافه شود.

برای ابزار دستی (چکش بادی): کاهش زمان مواجهه به $0.1 + h$ دستکش ضد ارتعاش (هزینه ۳۰۰,۰۰۰ تومان) مواجهه را از ۴.۳ به حدود 2.8 m/s^2 کاهش می‌دهد.

بخش ۹: نحوه ارائه گزارش نهایی

گزارش پروژه باید شامل بخش‌های زیر باشد (به ترتیب):

۱. مقدمه: معرفی منبع ارتعاش (نوع ماشین، کاربرد، فرکانس تحریک)، شرح مشکل (شکایت کارگران یا اندازه‌گیری اولیه).
۲. داده‌های جمع‌آوری شده: جداول مشخصات دستگاه، زمان مواجهه، شتاب‌های اندازه‌گیری شده (با ذکر منبع).
۳. محاسبه مواجهه روزانه موجود (وضع موجود): با استفاده از فرمول‌های صفحات ۹۲-۸۷ و مثال‌های عددی. تفسیر اینکه آیا از حد اقدام بالاتر است.
۴. طراحی ایزولاتور (برای ماشین ثابت):

- انتخاب نوع ایزولاتور (فتری، الاستومری، پد) با دلیل.
 - محاسبه فرکانس طبیعی مورد نیاز، جابجایی استاتیک، سختی هر پایه.
 - انتخاب محصول از کاتالوگ موجود در ایران (قید نام شرکت، مدل، قیمت).
 - در صورت نیاز به DVA، محاسبه جرم و فنریت آن.
۵. راهکارهای کنترل ابزار دستی (در صورت وجود): پیشنهاد دستکش، کاهش زمان، یا ابزار با دسته ایزوله.
۶. ارتباط با کنترل صدا: محاسبه کاهش صدای ناشی از ایزولاسیون ارتعاش (فرمول صفحه ۴۵).
۷. جدول مقایسه و انتخاب نهایی: جمع‌بندی هزینه/عملکرد.
۸. نتیجه‌گیری و توصیه‌های اجرایی: نحوه نصب، نکات ایمنی، برنامه نگهداری.
۹. منابع: (ارجاع به صفحات فایل) Vibration control.pdf مثال: "طبق مثال صفحه ۳۷ فایل کنترل ارتعاش."

ضمیمه: نمونه جداول و نمودارهای کمکی

جدول A – تبدیل جابجایی استاتیک به فرکانس طبیعی

d (mm)	d (in)	$f_n \text{ (Hz)} \approx 4.98/\sqrt{d_{\text{cm}}}$
1	0.04	15.8
2	0.08	11.1
3	0.12	9.1
5	0.20	7.0
10	0.39	5.0
20	0.79	3.5
50	1.97	2.2

جدول B – مقادیر T برای نسبت‌های فرکانس مختلف (بدون میرایی)

f/f_n	$T = 1/((f/f_n)^2 - 1)$	(%) ایزولاسیون
1.5	0.80	20

f/f_n	$T = 1/((f/f_n)^2 - 1)$	(%) ایزولاسیون
2.0	0.33	67
2.5	0.19	81
3.0	0.125	87.5
4.0	0.0667	93.3
5.0	0.0417	95.8

نمودار کیفی انتخاب ایزولاتور بر اساس فرکانس تحریک

- **$f < 10 \text{ Hz}$:** فقط بالشتک هوا یا فنر بسیار نرم ($d > 25 \text{ mm}$)
- **$10 < f < 30 \text{ Hz}$:** فنر مارپیچ یا الاستومر ($d = 5\text{-}15 \text{ mm}$)
- **$30 < f < 100 \text{ Hz}$:** الاستومر یا پد نمدی/چوب پنبه‌ای ($d = 1\text{-}5 \text{ mm}$)
- **$f > 100 \text{ Hz}$:** یا اصلاً نیازی به ایزولاسیون نیست – پد نمدی یا چوب پنبه ($d < 1 \text{ mm}$)

موفق باشید!