مقاله

مروری بر استانداردهای ارتعاش در ساختمان

زهرا هاشمی*
دانشجوی دکتری تخصصی بهداشت حرفه‌ای
دانشکدهٔ بهداشت، دانشگاه تهران
z_hashemi26@yahoo.com

صبا کلانتری
دانشجوی دکتری تخصصی بهداشت حرفه‌ای
دانشکدهٔ بهداشت، دانشگاه تهران
saba.kalantary@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۰

چکیده

از جمله عوامل زیان‌آور فیزیکی محیط کار، ارتعاشات منتقله از محیط است. این عامل زیان‌آور در زمرهٔ عواملی است که از نظر صدمات وارده به انسان، سازه و محیط از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این مقاله استانداردهای مرتبط با ارتعاش در ساختمان‌ها مرور و بررسی شده است. این استانداردهای به دو دستهٔ استانداردهای مرتبط با آسیب در ساختمان‌ها و استانداردهای مرتبط با راحتی ساکنان تقسیم می‌شوند. استانداردهای مرتبط با ارتعاش در ساختمان، ارتعاش ناشی از منابعی چون انفجار معادن، شمع‌کوبی در سایت‌های ساختمان‌سازی، ارتعاشات ناشی از ترافیک جاده‌ای و ریلی، تجهیزات ساختمان‌سازی و ادوات و ماشین‌آلات صنعتی را پوشش می‌دهند و ارتعاشات ناشی از زلزله و دیگر حوادث طبیعی را دربر نمی‌گیرند.

واژگان کلیدی: ارتعاش، استاندارد، آسیب به ساختمان، راحتی ساکنان، ماکزیمم سرعت جزء[1]

۱. مقدمه

ساختمان‌ها در طول عمر مفید خود همواره در معرض عوامل متعدد فرسایشی قرار دارند. این عوامل ممکن است بر اثر حوادث طبیعی یا غیرطبیعی ایجاد شوند. این در حالی است که باید ساختمان‌ها، به‌عنوان بخش عظیمی از سرمایهٔ ملی، از خطرات این عوامل مخرب محفوظ و مصنون نگاه داشته شوند. از جمله عواملی که کمتر ملموس است و در مورد آن کمتر بحث و بررسی شده، ارتعاش و آثار آن بر ساختمان و ساکنان آن است. عامل مزبور آثار مستمر و در عین حال نامحسوسی بر ساختمان و ساکنان آن می‌گذارد، لذا بررسی آثار و ابعاد آن می‌تواند مفید و مؤثر باشد. منابع ارتعاش می‌تواند ناشی از انفجار در معادن، شمع‌کوبی در سایت‌های ساختمان‌سازی، ارتعاشات ناشی از ترافیک جاده‌ای و ریلی، تجهیزات ساختمان‌سازی، ماشین‌آلات صنعتی و ارتعاشات ناشی از زلزله و دیگر حوادث طبیعی می‌باشد. در این‌خصوص سازمان‌های ملی و فراملی با توجه به شرایط زمین‌شناختی، شرایط فونداسیون و خصوصیات ساختمان‌ها، اقدام به تدوین استانداردهایی نموده‌اند. این استانداردها تنها ارتعاشات ساختهٔ دست بشر را تحت پوشش داده و ارتعاشات ناشی از حوادث طبیعی را لحاظ نمی‌کنند. اساساً استانداردها به دو دستهٔ کلی تقسیم‌بندی می‌شوند:

استانداردهایی که آسیب‌های مرتبط با ارتعاش را در ساختمان مورد بحث قرار می‌دهند و استانداردهایی که فارغ از میزان آسیب وارده به سازه، راحتی ساکنان و پاسخ آنها به ارتعاش را مورد توجه قرار می‌دهند.

۲. استانداردهای مرتبط با آسیب سازه

اساساً شرایط ضعیف زمین باعث می‌شود شمع‌کوبی در مجاورت ساختمان‌ها و در حفاری‌های عمیق به‌عنوان یک راه‌حل و جبران‌کنندهٔ شرایط نامناسب زمین در نظر گرفته شود. پایه‌ها و صفحات شمع باعث نوسانات و ارتعاشاتی در زمین می‌شود که خود از طریق زمین به ساختمان‌ها و درپی آن به ساکنان منتقل می‌شوند و باعث آثاری در ساختمان و ساکنان خواهد. در بسیاری از مناطق، نگرانی‌هایی در مورد این ارتعاشات وجود دارد، تا جایی‌که استفاده از شمع‌کوبی محدود و حتی ممنوع شده است. برخی از استانداردها بر پایهٔ ارتعاش ناشی از شمع‌کوبی تدوین شده‌اند. بسیاری از استانداردها در ابتدا به‌منظور تعیین حدود مجاز در انفجار صخره‌ها تدوین شده‌اند، اما با گذشت زمان، به‌کرات برای ارزیابی ریسک ناشی از ارتعاش از دیگر منابع مانند فعالیت‌های ساختمان‌سازی و عملیاتی چون شمع‌کوبی استفاده شدند. به هر حال، این استانداردها در عمل تفاوت‌های معناداری در پارامترهای مورد استفاده خواهند داشت که این امر به‌دلیل بی‌توجهی به مسائل زمین‌شناسی و جغرافیایی مثل شرایط زمین، موقعیت منابع زیرزمینی آب و نوع فونداسیون زمین در این استانداردها می‌باشد. ارتعاش منتقل‌شده از زمین به ساختمان‌هایی که روی خاک‌هایی با مقاومت کم و متوسط بنا شده‌اند می‌تواند درجاتی از خطر را برای ساختمان و ساکنان به‌همراه داشته باشد. با توجه به اینکه استانداردهای ملی براساس شرایط زمین‌شناسی، تیپ ساختمان‌ها، مصالح ساختمانی و روش‌های ساختمان‌سازی ملی و بومی تدوین شده‌اند، به‌صورت گسترده در کشورهای دیگر قابل کاربرد نیستند و در صورت استفاده باید مقادیر اصلاحی مد نظر قرار بگیرد. نکتهٔ قابل توجه که سبب بروز تفاوت‌هایی در استانداردها شده است، پارامترهای متفاوتی است که برای بیان حدود مجاز به‌کار برده شده است. که این مسئله را باید در موقع اندازه‌گیری و تفسیر نتایج در نظر گرفت. همچنین تجهیزات و روش‌های اندازه‌گیری در استانداردهای مختلف متفاوت است که اگر بنا بر دستورالعمل به‌کار گرفته نشود، تفاوت‌های معناداری را باعث می‌شود. آسیب در بسیاری از ساختمان‌ها ممکن است با چند ترک کوچک شروع شود و همین مسئله امروزه استفاده از استانداردها را نسبت به گذشته رایج‌تر کرده است [۱].

۲-۱. استاندارد سوئد[۲]

به‌دلیل شرایط سخت زمین سوئد استفاده از شمع‌کوبی در مناطق حساس بسیار متداول است و در این مورد تحارب زیادی کسب شده است. استاندارد SS 02 5211 در سال ۱۹۹۹ م تدوین شده است [۲]. این استاندارد در آن سوی مرزهای اسکاندیناوی، به‌خصوص به‌دلیل فعالیت‌های پیشرفتهٔ ساختمانی و احتمالاً به‌دلیل وجود استانداردهای زیادی که تدوین شده‌اند، چندان شناخته‌شده نیست. استاندارد مزبور ارتعاشاتی که از منابعی چون شمع‌کوبی، سپرکوبی، حفاری و فشرده‌کردن زمین به‌وجود می‌آید را پوشش می‌دهد. حدود توصیه‌شده با توجه به پتانسیل صدمه‌رسانی به ساختمان‌ها و خصوصیات زمین‌های مختلف و براساس ۳۰ سال تجربه تدوین شده است. مطابق این استاندارد، تحلیل ریسکی که در سایت‌های ساختمان‌سازی صورت می‌گیرد باید ماکزیمم سطوح ارتعاش را پیش‌بینی کند و حدود مجازی را براساس فونداسیون آن سازه بیان نماید. این حدود به‌هیچ وجه ار روانی ساکنان، همچنین آثار ارتعاش بر ماشین‌های حساس و تجهیزات داخل ساختمان را دربر نمی‌گیرد. تراز ارتعاش در این استاندارد براساس اندازه‌گیری ارتعاش (سرعت هر جزء در محور عمودی)، همچنین مشاهدهٔ خرابی‌ها در ساختمان تدوین و آماده شده است. تراز ارتعاش به‌عنوان

ماکزیمم مقدار سرعت عمودی اجزاء بیان می‌شود. اندازه‌گیری این پارامتر روی فونداسیون سازه و در نزدیکترین نقطه به منبع ارتعاش صورت می‌گیرد و براساس رابطهٔ ۱ به‌دست می‌آید:

$$v = v_0 F_b F_g \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه v_0 ماکزیمم مقدار مجاز سرعت اجزاء در پایهٔ ساختمان و در جهت عمودی است و براساس شرایط زمین و نوع فعالیت ساختمان از جدول ۱ به‌دست می‌آید. همچنین F_b فاکتور ساختمان و F_g فاکتور زمین است. این دو پارامتر نیز از جدول‌های ۲ و ۳ به‌دست می‌آیند. ساختمان به پنج کلاس براساس حساسیت به ارتعاش دسته‌بندی شده است. جدول ۲ کلاس ۱ تا ۴ و ساختمان‌های با شرایط خوب را نشان می‌دهد. اگر ساختمان دارای شرایطی ضعیفی باشد، کمترین ضریب ساختمان را برای آن در نظر می‌گیرند (کلاس ۵). فاکتور فونداسیون (F_g) نیز در جدول ۴ آورده شده است. کمترین فاکتور مربوط به ساختمان‌هایی که فونداسیون کم‌عمق دارند و بیشترین فاکتور مربوط به ساختمان‌هایی است که فونداسیون آن روی شمع تیز بنا شده و این به‌دلیل کم‌کردن حساسیت به ارتعاش است.

جدول ۱. سرعت ارتعاش تصحیح‌نشده (v_0)

شرایط فونداسیون	شمع کوبی، سپرکوبی یا حفاری (میلی‌متر بر ثانیه)	متراکم‌کردن (میلی‌متر بر ثانیه)
خاک رس، شکاف، شن یا ماسه	۹	۶
سنگ‌های یخچالی	۱۲	۹
صخره	۱۵	۱۲

جدول ۲. فاکتور ساختمان (F_b)

دسته	نوع ساختمان	فاکتور ساختمان
۱	سازه‌های سنگین مانند پل، اسکله، سازه‌های دفاعی و جز این‌ها	۱/۷
۲	ساختمان‌های اداری و صنعتی	۱/۲
۳	ساختمان‌های عادی مسکونی	۱/۰۰
۴	ساختمان‌های حساس و ویژه، ساختمان‌هایی با ارزش بالا یا ساختمان‌هایی با محدودهٔ وسیع مانند کلیسا یا موزه	۰/۶۵
۵	ساختمان‌های تاریخی با دیورهایی که روبه خرابی پیش می‌روند	۰/۵۰

جدول ۳. فاکتور مصالح (F_m)

دسته	نوع مصالح ساختمانی	فاکتور مصالح
۱	بتن مسلح با فولاد یا الوار	۱/۲۰
۲	بتن غیرمسلح، آجر، بتن با فضای خالی، بتن سبک	۱/۰۰
۳	بلوک‌های بتنی سبک و اندود گچ	۰/۷۵
۴	سنگ آهک	۰/۶۵

جدول ٤. فاکتور فونداسیون (F_g)

دسته	روش ساخت	فاکتور فونداسیون
۱	فونداسیون مسطح، صفحهٔ بتنی	۰/۶۰
۲	ساختمان بناشده بر شمع مالشی	۰/۸۰
۳	ساختمان بناشده بر شمع نوک‌تیز	۱/۰۰

نکتهٔ قابل توجه در این استاندارد حدود مجاز بر به فرکانس وابسته نیست و مهمترین دلیل آن این است که فرکانس غالب در عملیات شمع‌کوبی و اصلاحات زمین دارای باند فرکانسی باریکی است.

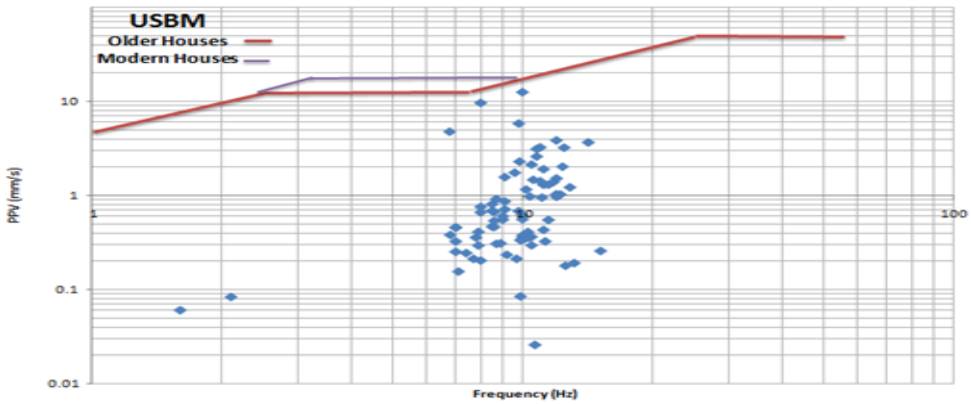
۲-۲. استاندارد امریکایی[۳]

در شمال امریکا، کدهای ارتعاش براساس تجربه و اطلاعات آماری به‌دست آمده است. منبع ارتعاش در این استاندارد بیشتر انفجارات و کمتر فعالیت‌های ساختمان‌سازی است. از جمله گسترده‌ترین و در عین‌حال نخستین استانداردهایی که معیارهایی برای ارزیابی ساختمان‌ها براساس فرکانس ارائه کرده، USBM است. این معیارها براساس مطالعات ساختمان‌های مسکونی در محدودهٔ انفجار معادن به‌دست آمده است.

سیسکایند در سال ۱۹۸۰ م نشان داد که ماکزیمم سرعت افقی اندازه‌گیری‌شده در سطح زمین و خارج از ساختمان ارتباط خوبی با آستانهٔ صدمه به تزئینات (ایجاد ترک‌ها) دارد [۳]. اگرچه واژه‌های دیگری برای توصیف حرکت زمین استفاده می‌شود، اما ماکزیمم سرعت اجزاء به‌عنوان مؤثرترین و ساده‌ترین روش ارزیابی انتخاب شد. این معیار در جدول ۵ و شکل ۱ براساس دو محدودهٔ فرکانسی آورده شده است. حدود فرکانسی زیر ۴۰ هرتز یادآور این حقیقت است که معمولاً فرکانس تشدید برای سازه‌های مسکونی در این محدوده است.

جدول ۵. محدودهٔ ماکزیمم سرعت هر جزء (*ppv*) در اثر ارتعاش ناشی از انفجار که عامل آسیب‌های تزیینی می‌شوند [۳]

نوع ساختمان	ارتعاش زمین	
	فرکانس‌های کمتر از ۴۰ هرتز	فرکانس‌های بیشتر از ۴۰ هرتز
مدرن	۱۹/۱ میلی‌متر بر ثانیه	۵۰/۸ میلی‌متر بر ثانیه
قدیمی	۱۲/۷ میلی‌متر بر ثانیه	۵۰/۸ میلی‌متر بر ثانیه



شکل ۱. حدود *PPV* مجاز براساس استاندارد *USBM*

همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، محدودهٔ آسیب به ساختمان‌های قدیمی از مقادیر پایین‌تر سرعت ارتعاش به‌وجود می‌آید. همچنین محدودهٔ وسیع‌تری از بیناب فرکانسی نسبت به محدودهٔ آسیب به ساختمان‌های جدید را شامل می‌شود.

۲-۳. استاندارد بریتانیایی[۴]

آثار ارتعاش در ساختمان‌ها در انگلستان توسط استاندارد BS7385-2: 1993 باعنوان *ارزیابی و اندازه‌گیری ارتعاش در ساختمان‌ها؛ قسمت دوم: تراز راهنما برای آسیب ناشی از ارتعاش منتقله از زمین* پوشش داده می‌شود [۴]. این قسمت از استاندارد بریتانیایی راهنمایی‌هایی در مورد آسیب ساختمان به‌دلیل منابع مختلف و مقادیر راهنمایی براساس کمترین میزان آسیب در ساختمان‌ها ارائه می‌دهد. همچنین در BS7385- 2 روشی برای اندازه‌گیری، ثبت و تحلیل ارتعاش به‌صورت همزمان و ثبت دقیق هر نوع آسیب ارائه می‌دهد [۵]. معیارهای مربوط به ارتعاش در BS 5228-2: 2009 با عنوان ذیل که همسان و برابر با استاندارد بریتانیایی ۷۳۸۵ است منتشر شده است.

Code of practice for noise and vibration control applicable to piling operations-part 2: vibration

ارتعاشاتی که در این استاندارد تحت پوشش قرار می‌گیرند عبارت‌اند از ارتعاشات ناشی از انفجارات (عملیات استخراج در معادن و تخریب در سایت‌های ساختمان‌سازی) انهدام و تخریب، شمع‌کوبی، اصلاحات زمین (فشردگی)، تجهیزات ساختمان‌سازی، حفر تونل، ترافیک ریلی و جاده‌ای و ماشین‌آلات صنعتی.

حدود ارتعاش برای آسیب‌های تزیینی[۵] در جدول ۶ ذکر شده است. این حدود برحسب ماکزیمم سرعت جزء، برحسب ماکزیمم سرعت جزء در محور غالب از میان ۳ محور بیان شده است. در این استاندارد برایند تراز ارتعاش در هر ۳ محور در نظر گرفته می‌شود. مقادیر ذکرشده در جدول ۶ مرتبط است با ارتعاش گذرا (آنی) که پاسخ‌های رزونانسی ساختمان را دربر نمی‌گیرد، در صورتی‌که حدود مجاز برای ارتعاش مداوم، پاسخ‌های رزونانسی ساختمان را نیز در نظر می‌گیرد. به‌خصوص در فرکانس‌های پایینی که حدود مجاز تعیین می‌شود. بنابراین ممکن است لازم باشد حدود ذکرشده در این جدول ۵۰ درصد تقلیل یابد، به‌خصوص برای ساختمان‌های غیرمقاوم و با اسکلت سبک در زیر فرکانس ۴ هرتز که در این محدوده نباید ماکزیمم جابه‌جایی از ۰/۶ میلی‌متر بیشتر شود.

حدود ارتعاشی که ممکن است باعث صدمهٔ به ساختمان شود، مسلماً بالاتر از حدود ذکرشده برای آسیب‌های زینتی است که در این استاندارد ذکر نشده است.

۲-٤. استاندارد آلمانی[۶]

استاندار آلمانی DIN-4150-3:1993 در مورد آثار ارتعاش یکنواخت و کوتاه‌مدت (آنی) بر ساختمان‌ها بحث می‌کند [۶]. این استاندارد در مورد آثار ارتعاش بر ساختمان‌های بناشده روی زمین یا زیرزمین قابل استفاده است. برای ارتعاشات کوتاه‌مدت (آنی)، اندازه‌گیری سرعت ارتعاش باید در پایهٔ ساختمان انجام شود و محور غالب در نظر گرفته شود. در مورد ارتعاشات یکنواخت (مداوم)، ارتعاشات افقی در بالاترین کف اندازه‌گیری می‌شود؛ حدود مجاز توصیه‌شده فارغ از نوع فرکانس بیان شده است. حدود مجاز ppv برحسب نوع ساختمان و محدودهٔ فرکانسی در جدول ۷ آمده است. در استاندارد DIN-4150-3:1993 راهنمایی‌هایی درباب پیش‌بینی مقدار ارتعاشات نیز می‌شود. لذا اگر رزونانس در ساختمانی مورد انتظار است، اندازه‌گیری ارتعاشات بایستی در چندین کف (نه‌تنها بالاترین کف) صورت پذیرد. در این حالت باید مقدار اندازه‌گیری شده در محور عمودی در نظر گرفته شود. در شکل ۲ حدود مجاز ماکزیمم سرعت ارتعاش در سه نوع سازه، صنعتی، مسکونی و ساختمان‌های حساس نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تمایل کلی هر سه نوع سازه تقریباً مشابه است. در هر سه نوع سازه حساسیت نسبت به

فرکانس‌های پایین بیشتر است و با افزایش فرکانس حساسیت سازه به نسبت کم می‌شود. به همین دلیل است که در فرکانس‌های پایین دامنهٔ موج بیشتر است و ارتعاش ساختمان با جابه‌جایی‌های بالاتری همراه است.

جدول ٦. حدود راهنما برای آسیب‌های تزیینی، اندازه‌گیری‌شده در پایهٔ ساختمان BS 5228-2:2009

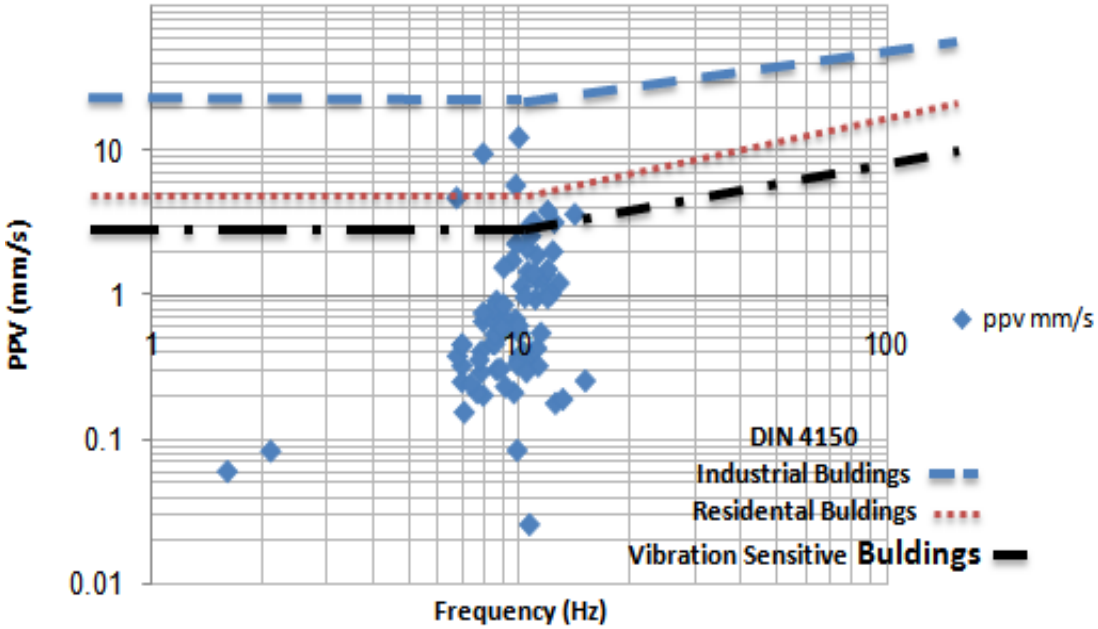
نوع ساختمان	ماکزیمم سرعت جزء در محدودهٔ فرکانسی غالب	
	۴ تا ۱۵ هرتز	۱۵ هرتز به بالا
سازه‌های مقاوم یا ساختمان‌های فلزی ساختمان‌های صنعتی و مراکز تجاری سنگین	۵۰ میلی‌متر بر ثانیه در ۴ هرتز و بالاتر	۵۰ میلی‌متر بر ثانیه در فرکانس ۴ هرتز به بالا
ساختمان‌های غیرمقاوم یا ساختمان‌های با اسکلت سبک ساختمان‌های مسکونی و مراکز تجاری کوچک	۱۵ میلی‌متر بر ثانیه در ۴ هرتز که افزایش میابد تا ۲۰ میلی‌متر بر ثانیه در ۱۵ هرتز	۲۰ میلی‌متر بر ثانیه در ۱۵ هرتز که افزایش می‌یابد به ۵۰ میلی‌متر بر ثانیه در ۴۰ هرتز به بالا

جدول ۷. حدود راهنما ppv، ارزیابی تأثیر ارتعاشات بلندمدت و کوتاه‌مدت بر ساختمان‌ها DIN-4150-3:1993

انواع ساختمان	فرکانس	Peak velocity (mm/s)		محل اندازه‌گیری
		کوتاه مدت	بلند مدت	
ساختمان‌های اداری و صنعتی	۱	۲۰	۱۰	فونداسیون بالاترین سطح افقی
	۱۰	۲۰		
	۵۰	۴۰		
	۱۰۰	۵۰	۱۰	
خانه‌های مسکونی و ساختارهای مشابه	۱	۵	۵	فونداسیون بالاترین سطح افقی
	۱۰	۵		
	۵۰	۱۵		
	۱۰۰	۲۰	۵	
دیگر ساختمان های حساس به ارتعاش	۱	۳	۲/۵	فونداسیون بالاترین سطح افقی
	۱۰	3		
	۵۰	8		
	۱۰۰	10	۲/۵	

۲-۵. استاندارد سوئیسی[۷]

استاندارد سوئیسی SN 640 312:1978 در سال ۱۹۷۹ م معرفی شد و تأثیر ارتعاشات یکنواخت و آنی (شوک) را بر ساختمان‌ها مورد توجه قرار می‌دهد [۷]. در این استاندارد ساختمان‌ها به ۴ دسته تقسیم‌بندی شده‌اند که در جدول ۸ ذکر شده است. سطوح مجاز برای ارتعاشات یکنواخت نیز در جدول ۹ ذکر شده است. این مقادیر در دو محدودهٔ فرکانسی ۱۰ تا ۳۰ و ۳۰ تا ۶۰ هرتز بیان شده است.



شکل ۲. حدود *PPV* براساس *DIN4150*

جدول ۸ دسته‌بندی ساختمان‌ها SN 640 312:1978

دسته‌بندی ساختمان	نوع ساختمان
۱	ساختارهای با بتن مقاوم برای اهداف صنعتی، پل، برج و جز این‌ها. سازه‌های زیرزمینی، گودال، تونل با یا بدون شبکه‌های بتنی
۲	ساختمان‌هایی با فونداسیون و کف‌های بتنی، ساختمان‌های ساخته‌شده از سنگ و بلوک سیمانی سازه‌های زیرزمینی، شبکهٔ آب، لوله‌ها و گودال‌هایی مستقر در صخره‌های نرم
۳	فونداسیون‌های بتنی ابتدایی و پی سیمانی، کف چوبی
۴	ساختمان‌های ویژهٔ حساس به ارتعاش و ساختمان‌های نیازمند به مرمت و نگهداری

جدول ۹. ماکزیمم حدود توصیه‌شدهٔ ارتعاش یکنواخت (مداوم) SN 640 312:1978

دسته‌بندی ساختمان	محدودهٔ فرکانسی (هرتز)	حدود توصیه‌شده سرعت ارتعاش (میلی‌متر بر ثانیه)
۱	۱۰ تا ۳۰	۱۲
۱	۳۰ تا ۶۰	۱۲ تا ۱۸
۲	۱۰ تا ۳۰	۸
۲	۳۰ تا ۶۰	۸ تا ۱۲
۳	۱۰ تا ۳۰	۵
۳	۳۰ تا ۶۰	۵ تا ۸
۴	۱۰ تا ۳۰	۳
۴	۳۰ تا ۶۰	۳ تا ۵

۲-۶. استادندارد استرالیایی[۸]

کنسول محیطی استاندرد استرالیا حدودی را به‌منظور پیشگیری از آسیب ناشی از ارتعاش در ساختمان‌ها تدوین کرده است [۸] که کاملاً به ویژگی‌های ساختمان، زمین‌شناسی خاک و صخره و همچنین خصوصیات ارتعاش وابسته است. در جدول ۱۰ دسته‌بندی مختلف سازه‌ها و ppv بیان شده است.

۳. استانداردهای مربوط به راحتی ساکنان

پاسخ انسان به ارتعاشات منتقله از زمین پدیده‌ای پیچیده است که به مجموعه‌ای از عوامل از جمله دامنهٔ ارتعاش بستگی دارد. با اینکه بدن انسان قادر به درک مقادیر پایینی از ارتعاش است، اما میزان تغییرات ارتعاش را به‌سختی متوجه می‌شود. اگرچه تفاوت‌هایی بین انسان‌ها در درک ارتعاش وجود دارد، اما آستانهٔ درک از ۰/۱۵ میلی‌متر بر ثانیه و در بعضی از شرایط ممکن است به ۰/۵ میلی‌متر بر ثانیه هم برسد. اگر مقدار ارتعاش فراتر از آستانهٔ درک شود، نگرانی‌هایی در مورد پتانسیل آسیب به افراد به‌وجود می‌آید. آسیب به افراد به عواملی چون سن، وضعیت سلامتی عمومی و مواجهات قبلی بستگی دارد. اعتراض‌هایی که افراد نسبت به ارتعاش دارند، بیشتر ناشی از ترس از آسیب و آزار ناشی آن است. استانداردهایی که در ادامه بحث خواهند آمد دربارهٔ پاسخ انسان به ارتعاش و راحتی ساکنان در ساختمان‌ها بحث خواهند کرد.

۳-۱. استاندارد بریتانیایی[۹]

از جمله نخستین استانداردهای بریتانیا ارزیابی آثار پذیرفتنی ارتعاش بر انسان بوده است [۹]. یکی از مواردی که باعث شده است این استاندارد استفاده زیادی داشته باشد، دسته‌بندی منابع ارتعاش و ساختمان‌هاست. در این استاندارد منابع به‌وجود آوردندهٔ ارتعاش به سه دستهٔ ارتعاشاتی ریلی، صنعت و عملیات ساختمانی و سازه‌ها به چهار دستهٔ مناطق کاری بحرانی، مناطق مسکونی، دفاتر و مغازه‌ها تقسیم شده اند. در استاندارد BS 6472:1992 ارزیابی ارتعاش توسط مقدار دوز ارتعاش[۱۰] و دوز ارتعاش تخمین‌زده شده[۱۱] صورت می‌گیرد. مقدار دوز ارتعاش برای پیش‌بینی آثار نامطلوب در دو زمان روز و شب در این استاندارد تدوین شده که در جدول ۱۱ ذکر شده است. معیار ارزیابی علاوه بر مقدار دوز ارتعاش، ماکزیمم سرعت جزء است (جدول ۱۲).

این استاندارد در سال ۲۰۰۸ م مورد بررسی قرار گرفت و لغو شد و نسخهٔ جدیدی از آن با عنوان BS 6472-1 در سال ۲۰۰۸ م جایگزین شد [۱۰]. استاندارد جدید تفاوت‌های معناداری با نسخهٔ قبلی داشت [۱۱]. این تفاوت سبب شد که میزان دوز ارتعاش مجاز توصیه‌شده ۱/۵ تا ۲ برابر مقدار دوز ارتعاش مجاز توصیه‌شده در نسخهٔ قبلی شود. این ارتعاشات می‌تواند ناشی از منابع مختلفی چون کارگاه‌ها و دیگر منابع ارتعاش داخلی (سالن ورزشی و پله برقی)، ترافیک جاده‌ای و ریلی و فعالیت‌های ساختمان‌سازی باشد. این تفاوت به‌صورت مستقیم در فاصلهٔ ایمن بین منابع و افراد تأثیر گذاشته است. اما پرسش مطرح این است که این تفاوت از چه تغییراتی ناشی می‌شود؟ شبکهٔ وزنی یا شبکهٔ فرکانسی برای ارتعاش عمودی در نسخهٔ ۱۹۹۲ W_g بود که با W_b در نسخهٔ ۲۰۰۸ م جایگزین شد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این دو شبکهٔ فرکانسی در فرکانس‌های ۴ تا ۱۰ هرتز تفاوت زیادی با یکدیگر ندارند و تقریباً با هم برابرند. در فرکانس‌های پایین‌تر از ۴ هرتز؛ یعنی از ۱ تا ۴ هرتز W_g بیشتر از W_b است که این مقدار ۱/۴ مقدار W_b است و یا به‌عبارتی می‌توان گفت که W_g حساسیت بیشتری نسبت به شبکهٔ فرکانسی جدید دارد. اما در فرکانس‌های بالاتر از ۱۰هرتز شبکهٔ W_b ۱/۵ تا ۲ برابر بیشتر از W_g است، یا به‌عبارتی در فرکانس‌های بالای ۱۰ هرتز حساسیت نسخهٔ جدید BS 6472-1 بیشتر از نسخهٔ تدوین‌شده در سال ۱۹۹۲ است. تفاوت دیگر که در این دو شبکهٔ فرکانسی مشاهده می‌شود این است که ورژن ۱۹۹۲

محدودهٔ فرکانسی ۱ تا ۸۰ هرتز را پوشش داده است، اما در نسخهٔ ارائه‌شده در سال ۲۰۰۸ فرکانس‌های زیر ۱ هرتز و تقریباً از محدودهٔ ۰/۵ هرتز تا ۸۰ هرتز را مد نظر قرار داده است. همین شیفت شبکهٔ فرکانسی موجب شده که مقدار دوز ارتعاش توصیه‌شده در نسخهٔ جدید حدوداً دو برابر دوز ارتعاش در نسخهٔ قدیمی باشد و برای جبران این اختلاف، فاصلهٔ ایمن بین گیرنده و منبع تولیدکنندهٔ ارتعاش بیشتر شده است.

جدول ۱۰. حدود مجاز (PPV) ارائه‌شده در AS2187

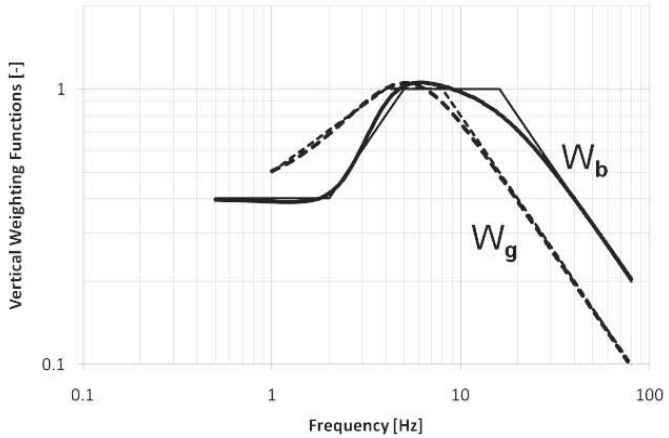
نوع ساختمان و سازه	ماکزیمم سرعت جزء
ساختمان‌های صنعتی و تجاری یا ساختمان‌هایی تقویت‌شده با بتن و فولاد	۲۵
خانه‌ها و ساختمان‌های کم‌ارتفاع مسکونی، ساختمان‌های تجاری	۱۰
ساختمان‌های تاریخی و بناهای یادبود و ساختمان‌های باارزش و ویژه	۲

جدول۱۱. حدود دوز مجاز ارتعاش ($m/s^{1.75}$) غی یکنواخت BS 6472-1992

نوع گیرنده	زمان	مقدار دوز ارتعاش غیریکنواخت	
		توصیه‌شده	ماکزیمم
مسکونی	روز	۰/۲	۰/۴
	شب	۰/۱۳	۰/۲۶
مؤسسهٔ آموزشی	موقع استفاده	۰/۴	۰/۸

جدول۱۲. ماکزیمم سرعت جزء استادندارد BS 6472-1992 برای راحتی انسان از فرکانس ۸ تا ۸۰ هرتز

نوع گیرنده	زمان	ارتعاش یکنواخت		ارتعاش غیریکنواخت یا ضربه ای	
		توصیه‌شده	ماکزیمم	توصیه‌شده	ماکزیمم
مسکونی	روز	۰/۲۸	۰/۵۶	۸/۶	۱۷
	شب	۰/۲	۰/۴	۲/۸	۵/۶



شکل ۳. مقایسهٔ دو شبکه فرکانسی W_g (خطوط نقطه‌چین) و شبکهٔ فرکانسی W_b (خط ممتد)

جدول ۱۳ نشان می‌دهد که میزان دوز ارتعاش پیش‌بینی شده در عملیات مختلف در نسخهٔ جدید نسبت به نسخهٔ قدیمی به چه میزان افزایش می‌یابد، که همان‌طور که در قسمت قبل ذکر شد این افزایش ممکن به دو برابر مقدار تدوین‌شده در نسخه ۱۹۹۲ نیز برسد.

همانطور که ذکر شد برای جبران افزایش VDV در نسخهٔ جدید نسبت به VDV در نسخهٔ ۱۹۹۲، فاصلهٔ ایمن بین منبع ارتعاش و گیرنده در نسخهٔ جدید افزایش یافته است. در جدول ۱۴ مقایسه‌ای بین فاصلهٔ ایمن در دو نسخه انجام شده است. اعداد داخل پرانتز فاصلهٔ ایمن در نسخهٔ ۱۹۹۲ است و همان‌طور که مشخص است در نسخهٔ جدید فاصلهٔ ایمن افزایش یافته است. در استاندارد BS 6472-1:2008 حدود راهنمایی برای احتمال بد کار کردن تجهیزات یا جراحات ساکنان ساختمان‌ها در اثر ارتعاش ناشی از انفجارات ذکر نشده است. همچنین است حدود قانونی و روش‌های کاهش کنترل در این استاندارد.

ISO 2631-2:1989. Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz)

این استاندارد در سال ۱۹۸۹ م تدوین و در سال ۲۰۰۳ م در بررسی لغو شد [۱۲] و با استاندارد ISO 2631-2:2003 جایگزین گشت [۱۳]. این استاندارد مواجههٔ تمام بدن با ارتعاش یکنواخت و ضربه‌ای را در ساختمان‌ها با در نظر گرفتن راحتی و آزردگی ساکنان مورد توجه قرار داده است. این استاندارد روشی برای اندازه‌گیری و ارزیابی ارائه می‌دهد که شامل روشی برای تعیین جهت و مکان اندازه‌گیری است. همچنین این استاندارد یک شبکهٔ فرکانسی به نام W_m در محدودهٔ فرکانسی ۱ تا ۸۰ هرتز زمانی که پوسچر فرد ذکر نشده باشد معرفی می‌کند. استاندارد ISO 2631-2 قابل کاربرد برای ارزیابی آثار سلامتی و ایمنی روی انسان نیست. دامنهٔ ارتعاش پذیرفته شده و حدود راهنمایی را برای احتمال صدمه به سازه در این استاندارد ذکر نشده است.

۳-۲. استاندارد آلمانی[۱۲]

این استاندارد بسیار جامع و پیچیده است و در آن درجه‌ای از درک انسان به ارتعاش یکنواخت پیشنهاد شده است. این مقادیر در جدول ۱۵ ذکر شده است. با توجه به این استاندارد آستانهٔ درک ارتعاش ۰/۱۵ میلی‌متر بر ثانیه است [۶]. در جدول ۱۵ میزان درک انسان از ارتعاش و پاسخ انسان به ارتعاش ذکر شده است. همان‌طور که از جدول مشخص است، آستانهٔ درک ارتعاش در این استاندارد ۰/۱۵ میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد.

٤. جمع‌بندی

مقالهٔ حاضر تمامی استانداردهای مرتبط با ارتعاش در ساختمان را پوشش نداده، بلکه مهمترین و کاربردی‌ترین آنها را بررسی نموده است. مقایسهٔ استانداردها به‌دلیل تفاوت در اهداف، طبقه‌بندی ساختمان، منابع ارتعاش و پارامترهای عملیاتی امری مشکل است. در برخی از استانداردها حدود مجاز ارتعاش براساس طیف فرکانسی متفاوت است و بسیاری از استانداردها حدود مجاز تعیین‌شده را بدون در نظر گرفتن طیف فرکانسی ذکر کرده‌اند. بسیاری از استانداردها تنها پاسخ انسان به ارتعاش را فارغ از آسیب به سازه مورد بررسی قرار داده‌اند و برخی دیگر آسیب به سازه و نوع آسیب به سازه را بدون در نظر گرفتن احساس ساکنان بررسی کرده‌اند. در نهایت، هر یک از استانداردها با توجه به هدف مطالعه می‌توانند بسیار مفید و کارا باشند. در ایران نیز استانداردهای مرتبط با ارتعاش در ساختمان و سازه تدوین نشده است. امید است در آینده قدم‌هایی در این‌خصوص برداشته شود.

قدردانی

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از زحمات خانم دکتر نصیری و راهنمایی‌های آقای دکتر منظم تشکر و قدردانی کنند.

جدول ۱۳. افزایش مقدار دوز ارتعاش پیش‌بینی شده بر اثر تغییر شبکهٔ فرکانسی W_g به W_b

منابع ارتعاش	مقدار افزایش
شمع‌کوبی	۲/۰
چکش شمع‌کوبی	۱/۸
مته دستی مخصوص سوراخ‌کردن سنگ	۱/۶
غلطک	۱/۹
سنگ‌شکن	۱/۹
متهٔ تونل	۱/۹

جدول ۱۴. مقایسهٔ فاصله ایمن در BS 6472:1992 و BS 6472-1:2008 با توجه به منبع ارتعاش

ماشین‌آلات	تعریف	رتبه	فاصلهٔ ایمن کارکردن	
			۱۹۹۲	۲۰۰۸
غلطک مرتعش	بزرگتر از ۵۰ کیلونیوتن	۱ تا ۲ تن	۱۵ تا ۲۰ متر	۲۰ تا ۲۵ متر
	بزرگتر از ۱۰۰ کیلونیوتن	۲ تا ۴ تن	۲۰ متر	۲۵ متر
	بزرگتر از ۲۰۰ کیلونیوتن	۴ تا ۶ تن	۴۰ متر	۵۰ متر
	بزرگتر از ۳۰۰ کیلونیوتن	۷ تا ۱۳ تن	۱۰۰ متر	۱۳۰ تا ۱۵۰ متر
	کوچکتر از ۳۰۰ کیلونیوتن	۱۳ تا ۱۸ تن	۱۰۰ متر	۱۳۰ تا ۱۵۰ متر
	کوچکتر از ۳۰۰ کیلونیوتن	۱۸ تن	۱۰۰ متر	۱۳۰ تا ۱۵۰ متر
چکش هیدورلیکی کوچک	۳۰۰ کیلوگرم	۵ تا ۱۲ تن	۷ متر	۱۰ متر
چکش هیدرولیکی متوسط	۹۰۰ کیلوگرم	۱۲ تا ۱۸ تن	۲۳ متر	۳۰ متر
چکش هیدرولیکی بزرگ	۱۶۰۰ کیلوگرم	۱۸ تا ۳۴ تن	۷۳ متر	۹۰ متر
عملیات شمع‌کوبی	صفحات شمع‌کوبی		۲۰ متر	۳۰ متر

جدول ۱۵– مقدار ارتعاش تقریبی در رنج فرکانسی ۱– ۸۰ هرتز

میزان درک ارتعاش	تراز ارتعاش تقریبی (میلی‌متر بر ثانیه)
غیرقابل درک	۰/۱
آستانهٔ درک	۰/۱۵
درک ناچیز	۰/۳۵
قابل توجه	۱/۰
براحتی قابل درک	۲/۲
تحریک‌کننده	۶
به‌شدت تحریک‌کننده	۱۴

۵. مآخذ

[1] Massarsch, K. R., B. H. Fellenius, "Ground Vibrations from Pile and Sheet Pile Driving Part 2- Review of Vibration Standards", Proceedings, DFI/EFFC International Conference on Piling and Deep Foundations, Stockholm, 21-23, 2014, pp. 487-501.

[2] Swedish Standard: Vibration and shock-Guidance levels and measuring of vibrations in buildings originating from piling, sheet piling, excavating and packing to estimate permitted vibration levels, (in Swedish). SS 02 5211. Swedish Institute of Standards, SIS. Stockholm, 1999.

[3] Siskind, D. E., M. S. Stagg, J. W. Kopp, C. H. Dowding, "Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting", USBM Report of Investigations RI8507, Washington, 1980.

[4] British Standards Institution."Evaluation and Measurement for Vibration in Buildings. Part 2: Guide to Damage Levels from Groundborne Vibration", British Standard 7385:Part 2: British Standards Institute, 1993.

[5] BS 5228.2, "Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites-Part 2: Vibration", Appendix B, 2009.

[6] DIN 4150-3, Structural vibration-Effects of vibration on structures, 1999-02.

[7] SN 640 312, Association of Swiss Highway Engineers, 1978.

[8] AS2187.2, Explosives-Storage, transport and use, Part 2: Use of explosive, 1993.

[9] BS6472, "Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1-80 Hz)", 1992.

[10] BS 6472-1, Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings-Part 1: Vibration sources other than blasting. BSI London, 2008.

[11] Allan, M., D. Duschlbauer, M. Harrison. "IMPLICATIONS OF UPDATING THE VIBRATION ASSESSMENT METHODOLOGY OF BS6472 FROM THE 1992 TO THE REVISED 2008 VERSION." *Acoustics Australia*, 38, 2010, p. 95.

[12] ISO 2631-2. Evaluation of human exposure to whole-body vibration -Part 2: Continuous and shock-induced vibrations in buildings (1 to 80 Hz), 1989.

[13] ISO 2631-2, Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to wholebody vibration-Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz), 2003.

پی‌نوشت

1 .Peak Particle *Velocity* (PPV)

2. SS 02 5211:1999. Vibration and shock- Guidance Level and measuring of vibration in buildings originating from piling, sheet piling excavating and packing [sic] to estimate permitted vibration levels

3. United States Bureau of Mines

4. BS7385- 2:1993. Evaluation and measurement for vibration in buildings -part 2: Guide to damage levels from ground borne vibration

5. cosmetic damage

6. DIN-4150-3:1993. Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings

7. SN 640 312:1978. Association of Swiss Highway Engineers, 1978

8. AS2187. Explosives – Storage, transport and use. Part 2: Use of explosive, 1993

9. BS 6472:1992. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)

10. Vibration Dose Values (VDV)
11. eVDV
12. DIN 4150 – 2:1999. Structural vibration - Human exposure to vibration in buildings