راهنمای کاربردی کنترل ارتعاش در کف‌های بتنی

چکیده

کف‌های مدرن بتنی که دهانه‌های بلندی را پوشش می‌دهند، در شرایط خدمت پذیری ویژه ممکن است دچار ارتعاش شوند. راهنمای حاضر، روشی برای کنترل میزان ارتعاش در این کف‌ها ارائه می‌کند.

محدوده کاربرد این راهنما، کف‌های ساختمان‌های اداری و/یا مسکونی می‌باشد که ممکن است در اثر استفاده‌های معمول، کاربران بنا را تحت تأثیر قرار دهد. هدف از تهیه این راهنما، مشخص کردن الزامات تأمین راحتی استفاده‌کنندگان و تهیه طرحی است که این الزامات را تأمین نماید.

روشی که در راهنمای حاضر از آن استفاده شده است بر اساس مطالعات انجام شده در پروژه پژوهشی RECS تحت عنوان «ارتعاش کف‌ها» توسعه داده شده است. در مدرک مذکور، بیشتر روش‌های دستی برای محاسبه پارامترهای اساسی ارتعاش مدنظر بوده است؛ با این وجود با توجه به علاقه مخاطبین کشور به استفاده از نرم‌افزارهای رایج، این قسمت‌ها بر این اساس بازنویسی شده است. در این مقاله علاوه بر بیان روش، یک مثال موردی برای کنترل یک کف یوبوت به کمک نرم‌افزار آورده شده است.

کلمات کلیدی: ارتعاش کف، بتن مسلح، دال بتنی، نرم‌افزارهای رایج طراحی کف.

۱. مقدمه

کف‌های سازه‌ای برای حالات حدی نهایی و خدمت پذیری زیر طراحی می‌شوند:

- حالات حدی نهایی با مقاومت و پایداری در ارتباط هستند.
- حالات حدی خدمت پذیری اساساً مربوط به ارتعاش و خیز می‌باشند که در مورد ارتعاش با سختی خمشی، جرم، میرایی و مکانیزم ایجاد ارتعاش در ارتباط است.

برای کف‌های سازه‌ای فولادی که ضخامت کمتری نسبت به کف‌های بتنی دارند عموماً حالات حدی خدمت پذیری بر طراحی حاکم هستند.

در این راهنما، ارتعاش قابل قبول و رده‌های پذیرش معرفی شده‌اند. علاوه بر این، پیش‌بینی پاسخ کف به ارتعاشات انسانی با توجه به کاربری آن بیان شده است.

محدوده کاربرد این راهنما ارتعاشات ناشی از قدم زدن‌های انسانی در شرایط معمول است. ارتعاشات ناشی از ابزارها یا ترافیک عبوری و ... در این راهنما پوشش داده نشده است. این راهنما را نباید در مورد پل‌های پیاده‌رو یا سایر سازه‌هایی که مشخصاتی مشابه سازه‌های ساختمانی ندارند مورد استفاده قرار داد.

۲. مراحل طراحی کف‌ها در برابر ارتعاش

روند طراحی پیشنهاد شده در این راهنما را می‌توان برای کنترل طرح کف‌ها در برابر بارهای ارتعاشی ناشی از راه رفتن افراد مورد استفاده قرار داد. نخستین گام در این روش، تعیین مشخصات اولیه ارتعاشی کف است. با استفاده از این پارامترها و مجموعه‌ای از گراف‌ها، کمیتی که به‌عنوان ۹۰ درصد مقدار RMS یک گام مشهور است محاسبه می‌شود.

این کمیت چگونگی پاسخ کف به گام برداشتن روی آن را مشخص می‌کند. این مقدار با مقادیر توصیه شده برای کف‌های مختلف مقایسه می‌شود.

۳. رده‌بندی ارتعاشات

۱,۳ پارامتر مورد ارزیابی

میزان احساس ارتعاش توسط افراد به پارامترهای مختلفی بستگی دارد:

- جهت ارتعاش: در این راهنما فقط ارتعاشات عمودی بررسی می‌شوند.
- حالت افراد: اعم از اینکه ایستاده، نشسته یا دراز کشیده باشند.
- فعالیت در حال انجام استفاده‌کنندگان: به‌عنوان مثال افرادی که در یک کارخانه تولیدی کار می‌کنند، ارتعاش را به شکل دیگری درک می‌کنند.
- سن و میزان سلامت افراد نیز نقش مهمی در میزان ارتعاش احساس شده دارد.

بنابراین، میزان احساس ارتعاش بین افراد مختلف متفاوت است و تنها می‌توان توقعات اکثریت از مفهوم آسایش را مورد توجه قرار داد.

باهدف دستیابی به روشی کلی برای ارزیابی ارتعاشات ناشی از فعالیت‌های انسانی، مفهوم مقدار RMS یک گام (OS-RMS) به‌عنوان اندازه‌ای از ارتعاش کف‌ها توسعه داده شده است. این مقدار با ارتعاش ناشی از یک گام ارتباط دارد.

تأثیرات دینامیکی ناشی از راه رفتن افراد روی یک کف به پارامترهای مختلفی بستگی دارد. از این میان می‌توان به وزن و سرعت گام برداشتن، نوع کفش و نوع پوشش کف اشاره کرد. مقدار 90 درصد OS-RMS ($os - RMS_{90}$) برای ارزیابی این پارامترها پیشنهاد شده است. این مقدار برابر است با ۹۰ درصد تمام OS-RMS های به دست آمده برای یک مجموعه بار وارده که نشان دهنده تمام ترکیبات ممکن وزن و سرعت گام برداشتن باشد.

۲,۳ رده‌های انواع کف

جدول زیر، کف‌ها را به لحاظ ارتعاش به شش رده از A تا F تقسیم کرده است. علاوه بر این، توصیه‌هایی با توجه به عملکرد هر رده در نظر گرفته شده است:

جدول ۱. رده‌بندی پاسخ کف‌ها و توصیه‌های مربوط به عملکرد در نظر گرفته شده برای هر رده

عملکرد در نظر گرفته شده برای کف												OS-RMS$_{90}$		
ورزشی	صنعتی	زندان	هتل	مغازه	ملاقات	اداری	مسکونی	آموزشی	سلامت	کارگاه‌های بااهمیت	حد بالا	حد پایین	رده
توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	0.10	0.0	A
توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	بحرانی	0.20	0.1	B
توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه نشده	0.80	0.2	C
توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	توصیه‌شده	بحرانی	بحرانی	توصیه نشده	3.20	0.8	D
توصیه‌شده	توصیه‌شده	بحرانی	بحرانی	بحرانی	بحرانی	بحرانی	بحرانی	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	12.8	3.2	E
بحرانی	بحرانی	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	توصیه نشده	51.2	12.8	F

حدود هر ارتعاش در جدول ۲ نیز با توجه به مقادیر معادل OS-RMS$_{90}$ و بر اساس ISO 10137 بیان شده است.

جدول ۲ حدود ارتعاش مشخص شده در ISO 10137 برای ارتعاشات پیوسته

مکان	زمان	ضریب	OS-RMS$_{90}$ معادل
کارگاه‌های مهم (مثل اتاق عمل، آزمایشگاه‌های با ابزار دقیق و ...)	روز	۱	۰,۱
	شب	۱	۰,۱
مسکونی (مثل اتاق‌های بستری، خانه)	روز	۲ تا ۴	۰,۲ تا ۰,۴
	شب	۱,۴	۰,۱۴
اتاق‌های اداری ساکت و پلان‌های باز	روز	۲	۰,۲
	شب	۲	۰,۲
اتاق‌های اداری عمومی و مدارس	روز	۴	۰,۴
	شب	۴	۰,۴
کارگاه‌ها	روز	۸	۰,۸
	شب	۸	۰,۸

البته در برخی مراجع بیان شده که توصیه‌های جدول ۲ کمی سخت‌گیرانه است و به نظر می‌رسد حدود جدول ۱ مناسب‌تر باشد.

۴. مراحل کنترل ارتعاش

هرچند روش‌های دستی مناسبی برای به دست آوردن مشخصات ارتعاشی کف‌ها توسعه داده شده است اما به‌طور کلی استفاده از نرم‌افزار توصیه و پیگیری شده است.

گام ۱. به دست آوردن مشخصات ارتعاشی کف: انجام تحلیل مودال روی طبقه موردنظر و محاسبه فرکانس مودهای ارتعاش و جرم مودی. معمولاً بررسی مود اول کافی است. هر چند اگر بررسی مودهای ارتعاش کف نشان دهد که بیش از یک مود مؤثر وجود دارد لازم است نتایج به ترتیبی که اشاره خواهد شد با هم ترکیب شوند. لازم به توضیح است که بارگذاری درست به همراه در نظر گرفتن جرم مؤثر صحیح برای به دست آوردن پاسخ‌های قابل قبول اهمیت دارد. توصیه‌شده است که مدول الاستیک دینامیکی که مقداری حدود ۱۰ درصد بیش از مدول استاتیکی مماسی معمولی دارد در محاسبات ارتعاش مورد استفاده قرار گیرد. در صورتی که قسمتی از مدل برای بررسی ارتعاش استفاده شود، توجه به توصیه‌های مراجع معتبر در مورد شرایط مرزی اهمیت دارد.

یکی از مشخصات ارتعاشی مهم کف‌ها، میرایی است. مقدار میرایی را می‌توان به کمک جدول ۳ برای مصالح سازه‌ای مختلف، نازک‌کاری و وسایل داخلی متفاوت محاسبه کرد. با استفاده از این جدول سه دسته میرایی D1,D2 و D3 محاسبه می‌شود، سپس میرایی کل سیستم با جمع کردن D1 تا D3 به دست می‌آید.

جدول ۳. تعیین میرایی

نوع	میرایی (به‌صورت درصدی از میرایی بحرانی)
میرایی سازه‌ای D1	
چوب	۶ درصد
بتن	۲ درصد
فولاد	۱ درصد
فولاد-بتن	۱ درصد
میرایی مربوط به اسباب و وسایل D2	
اتاق اداری سنتی برای ۱ تا ۳ کارمند با دیوارهای جداکننده	۲ درصد
اتاق اداری بدون کاغذ	۰ درصد
محیط اداری پلان باز	۱ درصد
کتابخانه	۱ درصد
مسکونی	۱ درصد
مدرسه	۰ درصد
ژیمناستیک	۰ درصد
میرایی ناشی از نازک‌کاری D3	
نازک‌کاری زیر کف	۱ درصد
کف شناور آزاد	۰ درصد
استخر خانگی	۱ درصد

گام ۲. مشخص کردن رده کاربری کف. با استفاده از جرم مودی و فرکانس کف که از گام ۱ به دست می‌آید، می‌توان مقدار $OS\text{-}RMS_{90}$ و رده کاربری کف را تعیین کرد. دو پارامتر ذکر شده را می‌توان با استفاده از نمودارهایی که برای مقادیر میرایی مختلف ترسیم شده‌اند به دست آورد (میرایی از روش بیان شده در گام ۱ محاسبه می‌شود). لازم است یادآوری شود که در صورتی که در گام ۱ بیش از یک مود در نظر گرفته شده است، نتایج با استفاده از رابطه زیر با هم ترکیب شوند:

$$OS-RMS_{90} = \sqrt{\sum_i OS-RMS_{90;i}^{\,2}}$$

در حقیقت گام ۲ برای فرکانس هر مود جداگانه تکرار می‌شود و مقدار $OS\text{-}RMS_{90}$ هر فرکانس و جرم مودی به دست می‌آید و در نهایت با استفاده از رابطه فوق به یک $OS\text{-}RMS_{90}$ دست پیدا می‌کنیم. مجدداً یادآور می‌شود که معمولاً استفاده از یک مود در محاسبات معمولی کافی است.

گام ۳. پس از محاسبه $OS\text{-}RMS_{90}$ با استفاده از جدول ۱ یا جدول ۲ رده کاربری کف به دست می‌آید و وضعیت ارتعاشی کف مشخص می‌شود.

۵. مثال موردی

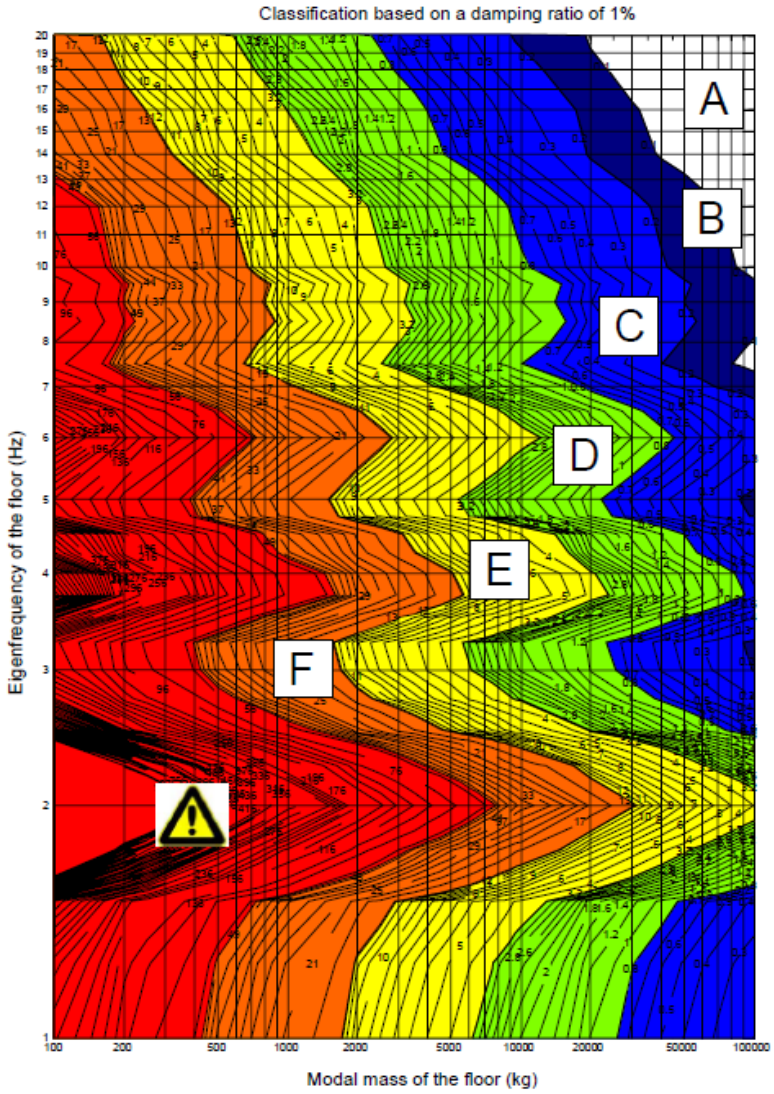
در بخش پایانی این نوشته جهت آشنایی بیشتر با طریقه کاربرد این راهنما یک مثال مورد بررسی می‌شود. ارتعاش دال بتنی تراز +۷٫۰۳ یک ساختمان هشت طبقه بررسی می‌شود. شکل ۱۰ هندسه طبقه مورد نظر را نشان می‌دهد.

۱. محاسبه پارامترهای ارتعاش با استفاده از نرم‌افزار

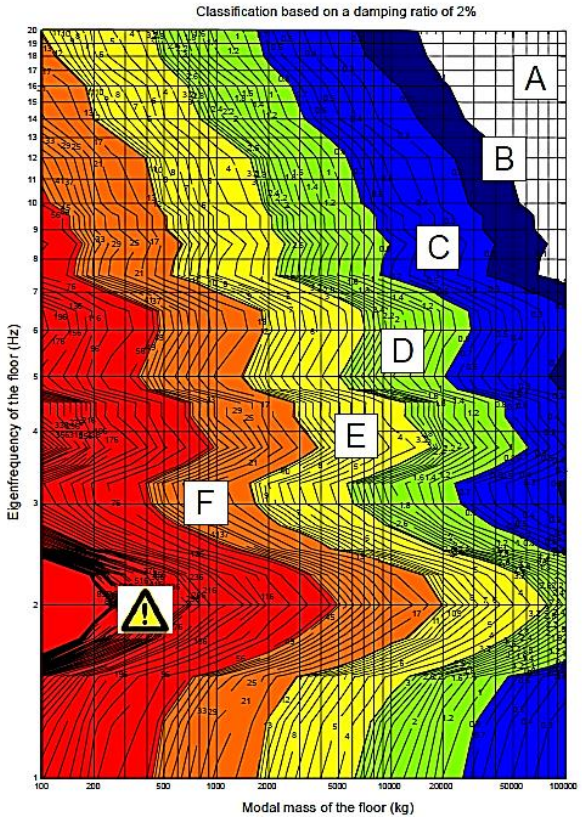
با استفاده از تحلیل مودال برنامه SAFE و برای مود ۱ پارامترهای ارتعاشی به شرح زیر محاسبه می‌شود:

پارامتر	مقدار
فرکانس مود اول	5.5 Hz
جرم مودی	40000 Kg

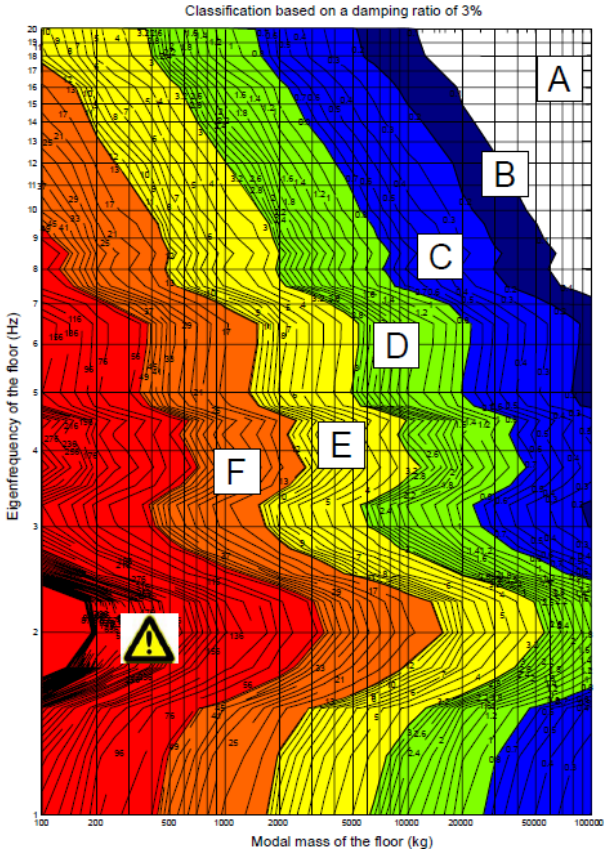
لازم است یادآوری شود SAFE به‌صورت مستقیم جرم مودی را گزارش نمی‌کند و در اینجا مقدار تقریبی در نظر گرفته شده است.



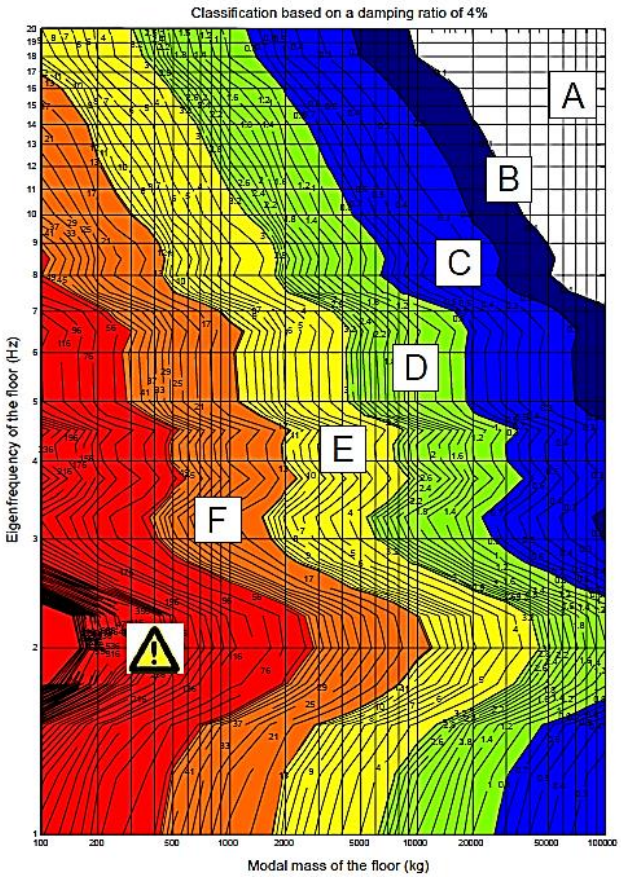
شکل ۱. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۱ درصد



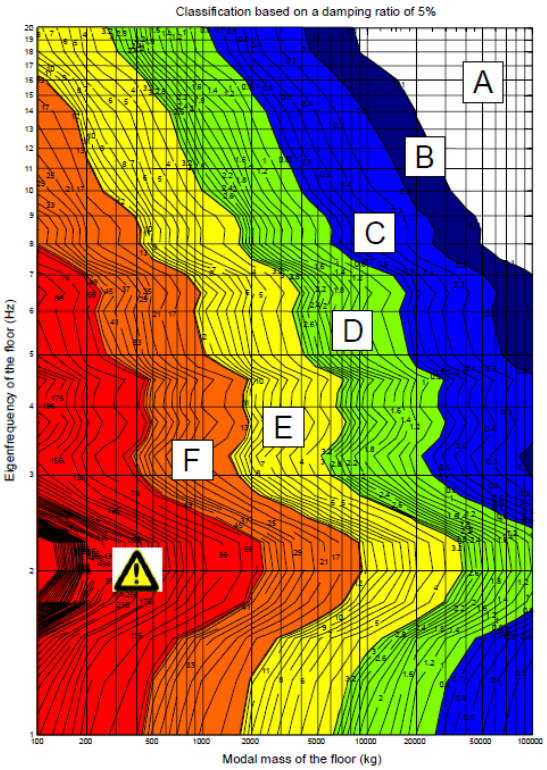
شکل ۲. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۲ درصد



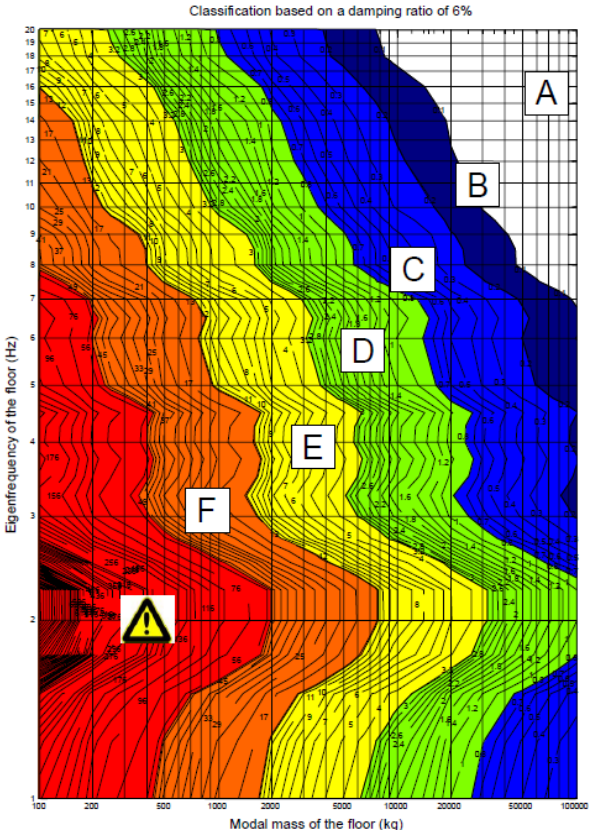
شکل ۳. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۳ درصد



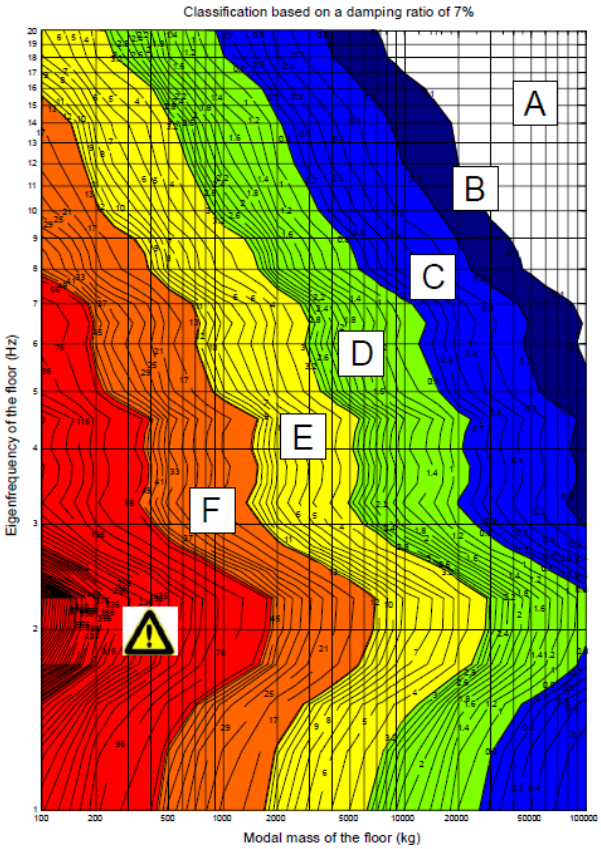
شکل ۴. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۴ درصد



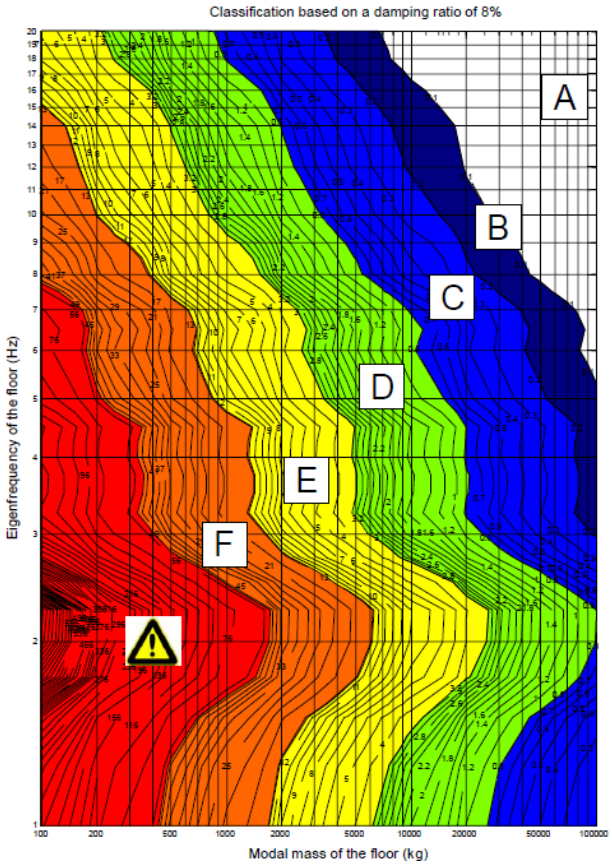
شکل ۵. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۵ درصد



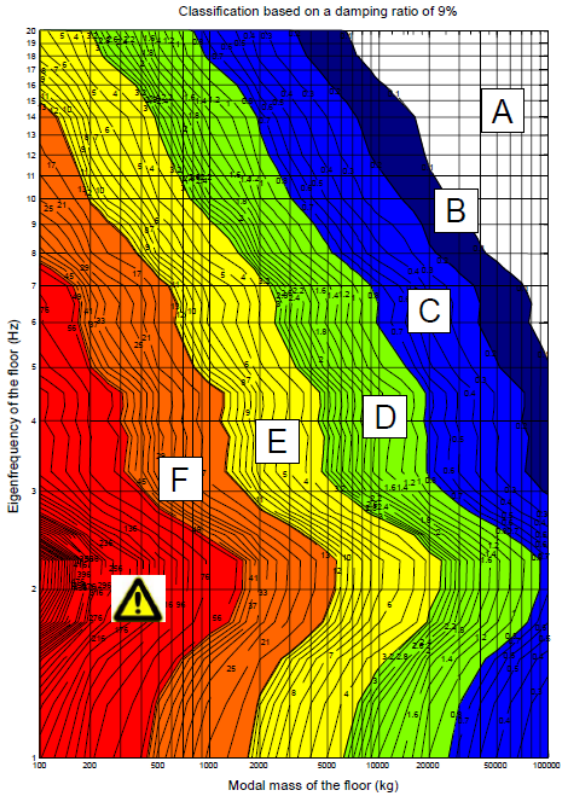
شکل ۶. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۶ درصد



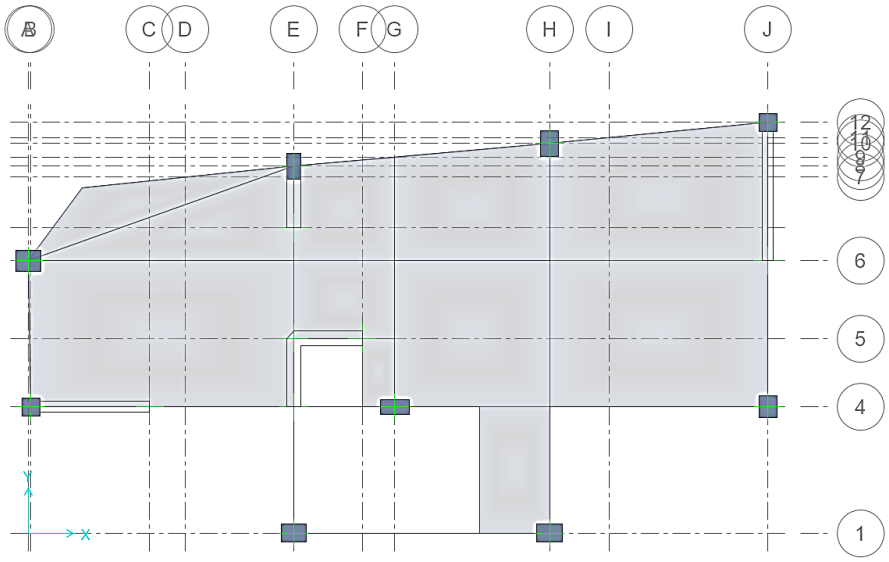
شکل ۷. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۷ درصد



شکل ۸. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۸ درصد

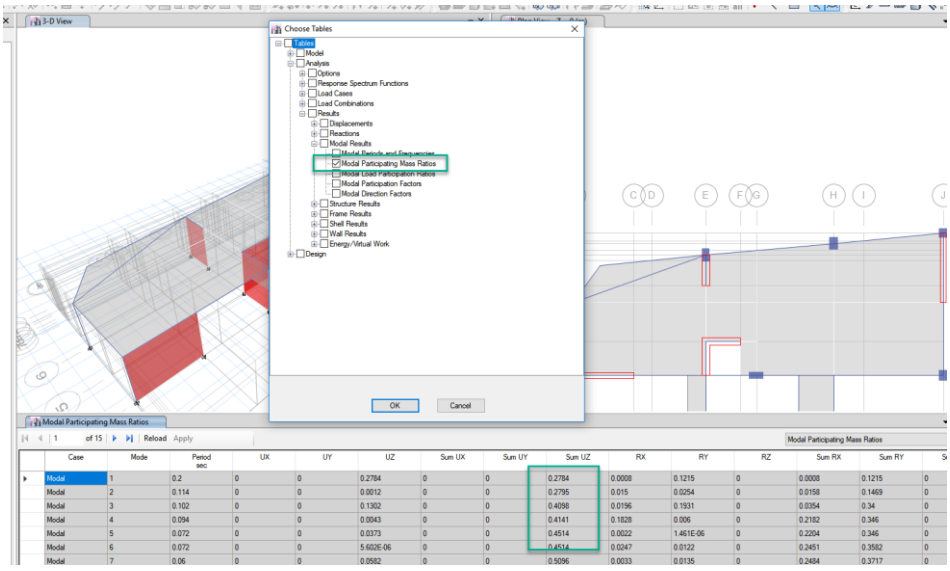


شکل ۹. $OS\text{-}RMS_{90}$ برای میرایی ۹ درصد



شکل ۱۰. تراز ۷٫۰۳+ مثال موردی

لازم به یادآوری است در صورت استفاده از برنامه ETABS برای تحلیل ارتعاش کف، می‌توان نسبت جرم مودی به جرم کل سازه را از خروجی برنامه استخراج کرد. (شکل ۱۱) جرم مودی از حاصل‌ضرب این نسبت در جرم کل کف به دست می‌آید.



شکل ۱۱. استخراج مقادیر دقیق جرم مودی با استفاده از برنامه ETABS امکان‌پذیر است.

۲. با استفاده از جدول ۳ میرایی کف به شرح زیر محاسبه می‌شود:

میرایی	شرح	مقدار
D1	میرایی سازه‌ای	۲
D2	میرایی مربوط به اسباب و وسایل	۱
D3	میرایی مربوط به نازک‌کاری	۱
جمع		۴

کاربری کف، مسکونی در نظر گرفته شده است.

۳. با توجه به میرایی، رده کاربری کف از شکل ۴ تعیین می‌شود. با توجه به مقدار فرکانس و جرم مودی خواهیم داشت:

$$OS - RMS_{90} \cong 0.35$$

و رده کاربری کف C می‌باشد.

۴. با توجه به جدول ۱ این کف برای کلیه کاربری‌ها به‌جز کارگاه‌های بااهمیت بدون مشکل خاص ارتعاشی قابل استفاده است.

این نوشته بر اساس RFS2-CT-2007-00033 می‌باشد.

نویسنده: عبدالمهدی عباسی