

# تحلیل دینامیکی سقف‌های عرشه فولادی و بررسی ضوابط آیین‌نامه‌ای مربوط به آسایش تحت اثر راه رفتن انسان

وحید فراهانی

مهدی یزدانی\*

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه

دانشیار مهندسی سازه

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اراک

v.farahani.02@msc.araku.ac.ir

m-yazdani@araku.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۶

## چکیده

یکی از بحران‌های غیرطبیعی و انسان‌زا که جوامع را تهدید می‌نماید تولید ارتعاش و صدای کوبه‌ای ناشی از آن است. تولید ارتعاش و صدای ناخواسته می‌تواند به صورت درون ساختمانی یا برون ساختمانی باشد که یکی از مهم‌ترین عوامل تولید صدای درون ساختمانی به علت راه رفتن ساکنین آپارتمان‌ها تحت عنوان صدای کوبه‌ای است. صدای کوبه‌ای تنها به صورت ضوابط غیرسازه‌ای مطابق با مبحث هجدهم مقررات ملی ساختمان کنترل شده و کنترل آن در تحلیل و طراحی المان‌های سازه‌ای دیده نشده است. از نظر سازه‌ای؛ در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان با صرف‌نظر کردن از پارامترهای آکوستیکی و تنها با ارائه یک جدول، فرکانس سقف‌های مسکونی به حداقل پنج هرتز محدود شده است. در مقاله حاضر با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار ایتبس<sup>۱</sup> و ضوابط آیین‌نامه<sup>۲</sup> AISC، اثر راه رفتن به منظور بررسی پارامترهای آسایشی در یک ساختمان دارای سقف عرشه فولادی مطابق ضوابط مقررات ملی ساختمان ایران با سه روش مختلف بررسی شده است. این سه روش شامل: شبیه‌سازی راه رفتن با بار تاریخچه زمانی دینامیکی، تعریف چند مسیر فرضی مختلف راه رفتن روی سقف و بررسی تحریک آن و در نهایت تحریک گره‌ای با یک محتوای فرکانسی (صفر تا ۲۰ هرتز) است. فارغ از مسائل آکوستیکی، نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که حتی با رعایت کردن ضوابط طراحی مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، آسایش ساکنین آپارتمان‌های دارای سقف عرشه فولادی از جنبه ارتعاشی ممکن است تامین نشود و با محدوده آسایشی AISC Design 11 منطبق نباشد؛ در نتیجه باز طراحی سازه‌ها به منظور تامین الزامات آسایشی مورد نیاز است.

**واژگان کلیدی:** تحلیل دینامیکی، سقف عرشه فولادی، صدای کوبه‌ای، تحلیل آسایشی، حوزه فرکانس

## ۱. مقدمه

به‌واسطه بالارفتن بیش از پیش استانداردهای زندگی بشر، تقاضای ساکنین ساختمان‌های مسکونی

\* نویسنده مسئول

برای افزایش آسایش نیز فزونی یافته است. بنابراین ضروری است نقش اجزای سازه‌ای در تامین آسایش انسان‌ها از جنبه ارتعاشاتی و آکوستیکی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. راه رفتن یکی از انواع بارگذاری دینامیکی وارد بر کف ساختمان‌ها است که منجر به تولید صدای کوبه‌ای و ارتعاش می‌شود. در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی در زمینه ارتعاش حاصل از راه رفتن روی کف‌های ساختمانی انجام شده است [۱ و ۲]. از آنجایی که فرکانس طبیعی و نسبت میرایی کف‌های فولادی کمتر از دیگر کف‌های ساختمانی به خصوص کف‌های بتن مسلح است، ارتعاش کف ناشی از بار دینامیکی راه رفتن بر روی این نوع کف قابل توجه و محسوس بوده و این موضوع می‌تواند بهره‌برداری از این نوع کف‌ها را از جنبه آسایشی باتوجه به شتاب حاصل با مشکل روبرو نماید [۳].

جهت ارزیابی فعالیت‌های انسانی منجر به ارتعاش در کف‌ها دستورالعمل‌های متنوعی در کشورهای مختلف تدوین شده است؛ که مهم‌ترین آنها شامل: AISC Design 11 در ایالات متحده، SCI P354 و CCIP 016 در بریتانیا، EUR 21972 و EUR 24084 در اتحادیه اروپایی و AIJ design در ژاپن است. به‌طور معمول در دستورالعمل‌های مذکور باید سه عامل: ویژگی نیروی‌های تحریک کف، روش تخمین و معیار پذیرش پاسخ تعریف شود [۴]. حداکثر ارتعاشی که در جهت آسایش انسان در نظر گرفته می‌شود به کاربری کف (مسکونی، اداری و ...) وابسته است و با توجه به فرکانس کف می‌تواند متغیر باشد، اما به‌طور معمول بین ۴ تا ۸ هرتز در نظر گرفته می‌شود [۵]. در حالت بهره‌برداری کمیت‌های شتاب و سرعت به عنوان معیارهای آسایشی در نظر گرفته می‌شوند. باتوجه به فرکانس راه رفتن، در کف‌هایی که دارای فرکانس‌های کمتر از ۹ تا ۱۰ هرتز هستند و به عنوان یک کف با

فرکانس پایین طبقه‌بندی می‌شوند، امکان رخ دادن پدیده تشدید با تحریک چند گام وجود دارد. از سوی دیگر، تشدید در یک کف با فرکانس‌های بیشتر از ۹ تا ۱۰ هرتز اهمیت کمتر داشته و در این حالت پاسخ گذرای کف معیار بررسی آسایش است [۶]. بیشتر پژوهش‌های انجام شده از جمله لیو و همکاران در سال ۲۰۲۱ در خصوص سقف‌های توخالی و دینگ و همکاران در ۲۰۲۰ در خصوص سازه‌های چوبی به اندازه‌گیری فرکانس اصلی کف‌های مختلف ساختمانی و راه‌های کنترل ارتعاش آن با میراگرهای جرمی بوده است [۷ و ۸]. به عنوان نمونه دال لاگو و همکاران اخیراً آزمایش‌های سقوط آزاد و راه رفتن را بر روی تعدادی از کف‌های بتنی ساخته شده با اعضای توخالی (بدون وجود کف‌سازی‌ها، پارتیشن‌ها و مبلمان) انجام دادند و متوجه شدند که در این کف‌ها، فرکانس اصلی حدود ۸ هرتز و نسبت میرایی ویسکوز معادل آن‌ها در حدود  $0.051 \text{ m/s}^2$  یک درصد است. همچنین شتاب تا  $0.051 \text{ m/s}^2$  اندازه‌گیری شده بود که از آستانه‌های توصیه‌شده برای راحتی انسان در یک محیط اداری فراتر است [۹]. در یک پژوهش دیگر لاگو و همکاران با انجام آزمایش بر روی ۲۶ کف مجوف، متوجه شدند که اجزای غیرسازه‌ای بر میرایی کف‌ها بسیار تاثیرگذار هستند به طوری که حداقل میرایی با اجزای غیرسازه‌ای حداقل ۳/۴ درصد است [۱۰]. اسمیت و همکاران پیشنهاد داده‌اند که حداقل میرایی کف‌های مبله شده بین ۲ تا ۴ درصد در نظر گرفته شود [۱۱].

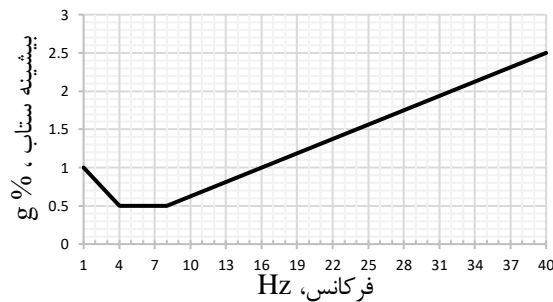
نسبت میرایی یک کف، که بیانگر اتلاف انرژی ارتعاشی است، نه تنها به نوع مصالح و سازه بلکه به اجزای معماری و اجزای غیرسازه‌ای متصل به کف وابسته است. کائو و همکاران با انجام آزمایش بر روی یک کف بتنی پیش‌تنیده با دهانه بلند که مربوط به سالن استراحت یک فرودگاه بزرگ بود، فرکانس اصلی کف را ۸/۹ هرتز و نسبت میرایی را در حدود ۲/۲ درصد محاسبه نمودند [۱۲].

مطابق بند ۱۰-۲-۱۰-۴ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ویرایش پنجم ۱۴۰۱، کف‌ها باید باتوجه به لرزش و ارتعاش حاصل از بارهای جنبشی (نظیر بار ناشی از حرکت افراد) طراحی شوند. در این مبحث حداقل فرکانس دوره‌ای کف‌ها برای کاربری مختلف به صورت جدول ۱ تعریف شده است.

جدول ۱. حداقل فرکانس مورد نیاز کف‌ها براساس جدول ۱۰-۱-۲-۱ مبحث دهم

حداقل فرکانس دوره‌ای کف (هرتز)	نوع کاربری
۵	ساختمان‌های مسکونی و اداری
۴	ساختمان‌های تجاری و فروشگاهها
۴	سالن اجتماعات با صندلی ثابت
۸/۵	سالن اجتماعات بدون صندلی ثابت
۹/۵	تعمیرگاه، سالن‌های ژیمناستیک و ورزشی
۴	پارکینگ‌ها

داخلی بدن انسان هستند. بنابراین خارج از این محدوده فرکانسی، افراد شتاب‌های بالاتری را تحمل می‌نمایند [۱۳]. به طور کلی محدوده پذیرفته شده شتاب توسط انسان‌ها مطابق با پیشنهاد آیین‌نامه AISC Design guide 11 ویرایش دوم در شکل ۱ نشان داده شده است [۱۳].



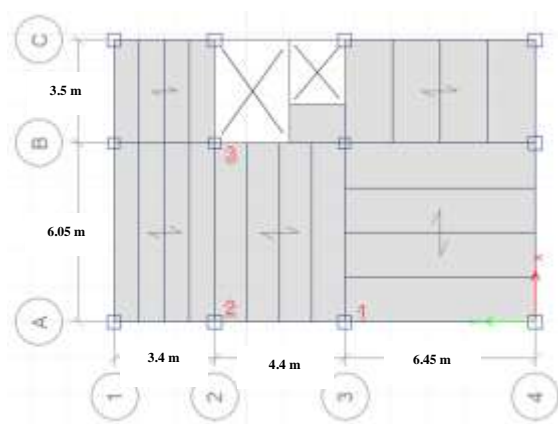
شکل ۱. محدوده قابل تحمل شتاب مطابق با دامنه فرکانسی پیشنهادی توسط AISC Design guide 11 ویرایش دوم برای آپارتمان‌های مسکونی

به طور کلی تحلیل مسائل مربوط به آسایش و صدا با استفاده از سه روش: (۱) تحلیل آکوستیکی برای صداهای هوابرد، (۲) تحلیل ویبرو-آکوستیک برای صداهای کوبه‌ای و (۳) تحلیل ارتعاشاتی برای مسائل دینامیکی است. در تحلیل ارتعاشاتی مهم‌ترین پارامتر برای طراحی و ارزیابی بهره‌برداری ارتعاش سیستم‌های کف درون قاب‌های ساختمانی معمولاً فرکانس طبیعی است [۱۳]. بنابراین هدف از مطالعه حاضر بررسی ارتعاشات ناشی از راه رفتن در کف‌های عرشه فولادی است که مطابق با ضوابط مبحث دهم مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۴۰۱ طراحی شده است. بنابراین با استفاده از ابزارهای نرم‌افزار CSI ETABS 22.3.0 مطابق با سه رویکرد و مقایسه آن با ضوابط آیین‌نامه AISC Design 11 ویرایش دوم سال ۲۰۱۶، آسایش ساکنین بررسی می‌شود.

## ۲. روش‌شناسی

دامنه فرکانسی که بر بدن انسان تأثیر آشکار دارد معمولاً بین صفر تا ۵۰ هرتز است [۵] و احساس افراد از ارتعاش به شدت به کاری که انجام می‌دهند وابسته است. افرادی که در دفاتر یا محل‌های مسکونی هستند، ارتعاش محسوس با شتاب بیشینه بالای حدود ۰/۵ درصد شتاب جاذبه را دوست ندارند، در حالی که افرادی که در یک فعالیت شرکت دارند، ارتعاش‌های ۱۰ تا ۳۰ برابر بیشتر (g ۰/۵ تا ۱/۵ یا بیشتر) را می‌پذیرند. افرادی که در سالن‌های ورزشی، مراکز خرید و یا روی یک پل عابر پیاده سرپوشیده ایستاده‌اند، تا شتاب‌های g ۱/۵ را نیز پذیرفته‌اند. افرادی که روی یک پل عابر پیاده در فضای باز یا پله‌های یادبود هستند، شتاب‌های بالاتری را نیز تحمل خواهند کرد. حساسیت در هر نوع سطح اشغال نیز با مدت زمان ارتعاش و فاصله منبع تحریک تغییر می‌نماید. لازم به ذکر است که این محدودیت‌ها برای فرکانس‌های بین ۴ تا ۸ هرتز است، که دامنه فرکانس‌های تشدید اعضای

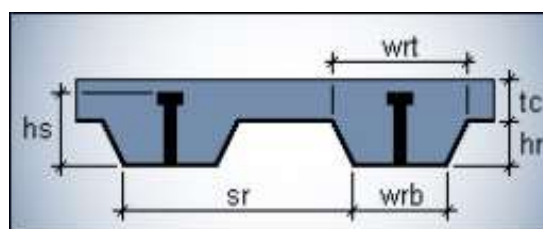
در این پژوهش حاضر از نرم‌افزار ایتبس به منظور استفاده از جدیدترین قابلیت‌های اضافه شده به نرم‌افزار در زمینه تحلیل کف‌ها تحت اثر راه رفتن بهره برده شده و سپس با محدوده آسایشی AISC Design 11 مقایسه شده است. پس از طراحی سقف مطابق مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، به منظور ارزیابی سقف عرشه فلزی از سه روش به منظور اعمال بارگذاری ناشی از راه رفتن استفاده شده است.



شکل ۳. پلان سقف عرشه فلزی مورد مطالعه

**روش اول:** به منظور در نظر گرفتن اثر کوبه‌ای ضربه پاشنه پا و پس از آن اثر سیلی پنجه پا، بارگذاری راه رفتن به صورت یک تابع ضربه مطابق شکل ۴ تعریف شد است. مدت زمان این ضربه  $0/45$  ثانیه تعریف شده است که در زمان  $0/225$  ثانیه به اوج خود یعنی یک، که به عنوان ضریب نیروی اعمالی است، می‌رسد. سپس این الگوی بار به تعداد قدم‌های ناشی از راه رفتن در یک مسیر مشخص به صورت یک تحلیل تاریخچه زمانی دینامیکی در نظر گرفته شده، که در اینجا مطابق شکل ۵، ۴۲ قدم برای مسیر مفروض در نظر گرفته شده است. این ۴۲ قدم در کف تعیین شده سپس به صورت پی‌درپی نیروهای تعریف شده‌ی هر قدم در نقاط مسیر مدنظر، با فاصله زمانی هر قدم  $0/5$  ثانیه ( $0/05$  ثانیه فاصله زمانی از سیلی پنجه پای قدم اول تا کوبه‌ای

در این پژوهش به منظور بررسی ضوابط مربوط به مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، یک ساختمان مسکونی با سقف عرشه فلزی مطابق شکل ۲ در نظر گرفته شده است. همچنین مشخصات هندسی سقف مطابق جدول ۲ ارائه شده است. میلگردهای استفاده شده از نوع S400 و مقاومت فشاری بتن در نظر گرفته شده مطابق بتن C25 انتخاب شده است.



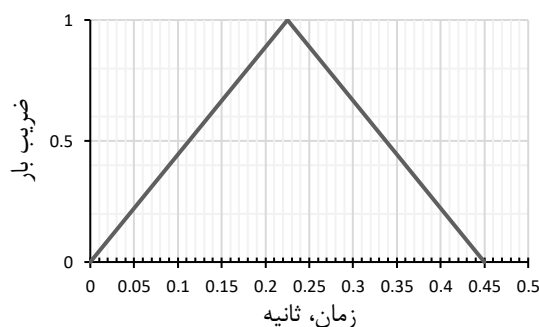
شکل ۲. مشخصات هندسی سقف در نظر گرفته شده

جدول ۲. مشخصات مقطع

پارامتر	مقدار (mm)
$t_c$	۵۰
$h_r$	۷۵
$w_{rt}$	۱۷۵
$w_{rb}$	۱۲۷
$s_r$	۳۰۵
ضخامت ورق فلزی عرشه	۱
قطر گل میخ	۲۰
ارتفاع گل میخ	۱۰۰

پلان سقف مدل شده در شکل ۳ نمایش داده شده است، این سقف به طول  $14/25$  متر و عرض  $9/55$  متر دارای سه دهانه طولی و دو دهانه عرضی است. تیرهای عرضی از نوع IPE 160 و شاه‌تیرهای محیطی تیررواق با ورق‌های بال  $250 \times 15$  میلی‌متر و ورق جان  $250 \times 10$  میلی‌متری است. فاصله تیرهای عرضی در دهانه بین آکس یک و دو  $0/85$  متر، در دهانه بین آکس دو و سه  $1/1$  متر و در دهانه بین آکس سه و چهار  $1/5$  متر در نظر گرفته شده است.

پاشنه پای قدم بعدی) به صورت یک تحلیل تاریخچه زمانی با میرایی ثابت ۰.۲٪ اعمال و پاسخها استخراج شده‌اند. لازم به ذکر است مسیر تعریف شده در شکل ۵ براساس بحرانی‌ترین حالت ممکن در تحلیل حساسیت بدست آمده است.



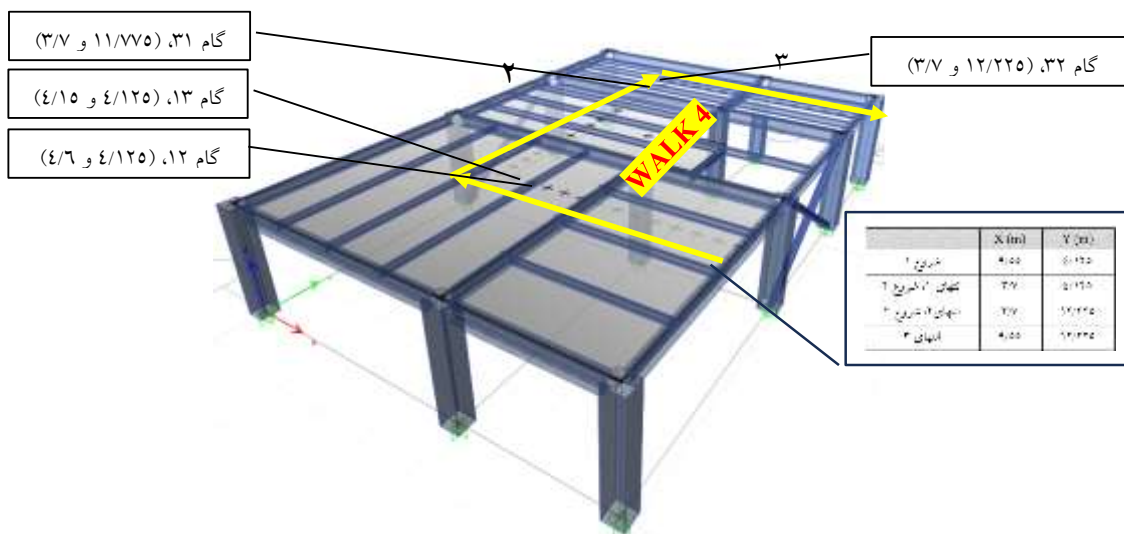
شکل ۴. بار ناشی از ضربه پا به سقف در یک تک قدم

بار اعمالی در مسیر انتخابی اعمال شده به ترتیب در محل‌های با فاصله هر گام ۰/۴۵ متری و با در نظر گرفتن بار ناشی از یک شخص معمولی با وزن ۷۵ کیلوگرم با ضریب ضربه ۱/۴ (به منظور در نظر گرفتن اندرکنش انسان-کف) مطابق با AISC Design Guide 11 تعریف شده است.

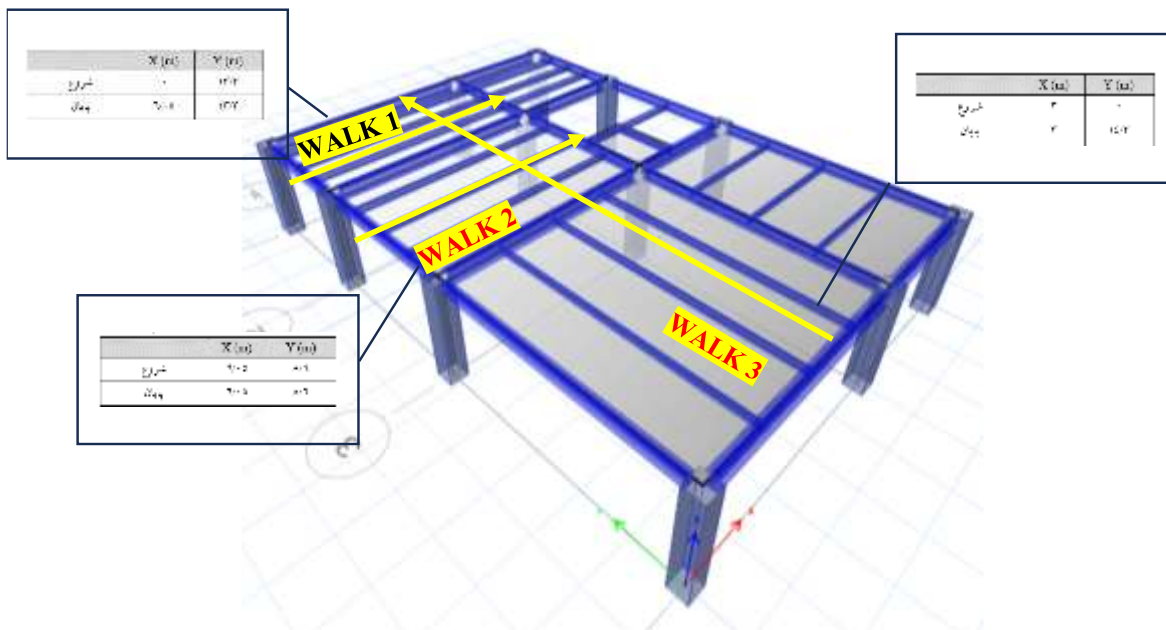
**روش دوم:** در این روش با استفاده از ابزار خود نرم‌افزار چهار مسیر فرضی راه رفتن مطابق شکل ۶ تعریف شده

است که مسیر چهارم منطبق بر مسیر مفروض روش اول در نظر گرفته شده است تا نتایج علاوه بر اعتبارسنجی با یکدیگر نیز مقایسه شوند. سرعت گام‌ها برابر ۱۵۲۴ میلی‌متر بر ثانیه و فرکانس حرکت برابر ۲ هرتز (مشابه روش اول) در نظر گرفته شد.

**روش سوم:** در این روش با استفاده از قابلیت جدید ورژن ۲۲.۳.۰ نرم‌افزار ایتبس که به‌تازگی در آبان‌ماه ۱۴۰۳ به بازار عرضه شده، استفاده شده است، مجموعه‌ای از تحریک‌ها با محدوده فرکانسی دلخواه یعنی تا محدوده ۲۰ هرتز (دامنه متداول راه رفتن تا دویدن انسان است)، در کف سازه‌ای و در گره‌های خاصی ایجاد شده و سپس پاسخ‌ها در گره‌های دیگر برداشت می‌شوند. در پژوهش حاضر گره شماره یک نشان داده شده در شکل ۳ به عنوان گره تحریک انتخاب و گره‌های دو، سه و چهار به عنوان گره‌هایی که پاسخ در آن‌ها برداشت شده است انتخاب شدند و در نهایت نتایج با ضوابط آسایشی پیشنهادی AISC Design 11 مقایسه شده‌اند.

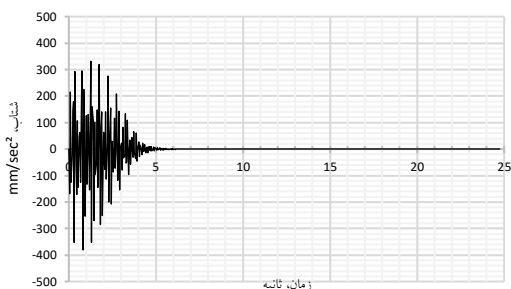


شکل ۵. مسیر حرکت ناشی از راه رفتن یک شخص معمولی با فرکانس ۲ هرتز و وزن ۷۵ کیلوگرم مطابق روش اول



شکل ۶. مسیر در نظر گرفته شده برای حرکت انسان در روش دوم

شتاب همواره کمتر از ۰/۵ درصد شتاب گرانش بوده و در نتیجه باتوجه به فرض مسکونی بودن کف، الزامات مبحث دهم اشاره شده در جدول ۱ برآورده می‌شود. خاطر نشان می‌شود این روش تنها شتاب حاصل از هر گام در محل همان گام را ثبت نموده و در صورتی که به علت تشدید ناشی از تحریک گام‌ها در جایی از کف شتاب بیش‌تری رخ دهد، شتاب ثبت نمی‌شود.



شکل ۷. شتاب قائم عرشه در روش اول و گام ۱۲ با مختصات (۴/۱۲۵ و ۴/۶)

### ۳. یافته‌ها

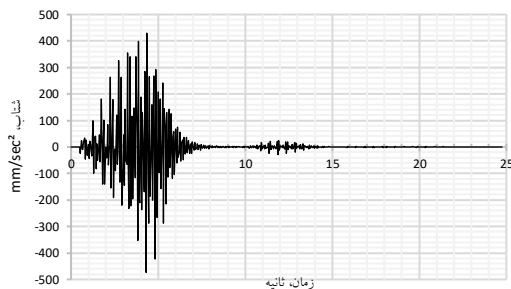
**نتایج روش اول:** در شکل‌های ۷ الی ۱۰ نتایج مربوط به تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای چند گره متوالی ارائه شده است. مطابق محل گام‌ها در شکل ۵؛ اگر حد ۰/۵ درصد شتاب گرانش پیشنهادی در مراجع را به عنوان حد آسایش در نظر گرفت، مشاهده می‌شود هر چهار گره انتخابی در محدوده قابل قبول قرار گرفته‌اند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با دور شدن از محل تحریک توسط گام، میزان شتاب نیز به طور نامحسوسی کاهش می‌یابد هر چند در این روش می‌توان تاریخچه شتاب گره‌ها، چگونگی تأثیر میرایی بر کاهش دامنه شتاب و همچنین تأثیر آن از تحریک گره‌های قبلی را مشاهده نمود، اما این روش قادر نیست شتاب را در سایر گره‌های مسیر حرکت بررسی نماید. به منظور درک بهتر بیشینه شتاب در هر گام از مسیر مطابق شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با مدل‌سازی انجام شده در این روش

**نتایج روش دوم:** مطابق جدول ۳ نتایج روش دوم ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای مسیرهای اول و دوم، شتاب در راستای قائم نامحسوس بوده ولی برای مسیرهای سه و چهار میزان شتاب تا ۱۰٪ از آستانه تحمل فراتر رفته که بیان‌گر آن است که جهت طراحی مناسب سقف برای آسایش ساکنین ضروری است تا دوباره تحلیل آسایش انجام شود.

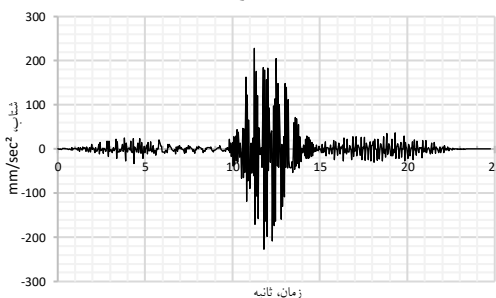
جدول ۳. نتایج روش دوم برای هر چهار مسیر مفروض

مسیر	شتاب قائم (mm/sec <sup>2</sup> )	بیشینه شتاب قائم مجاز (mm/sec <sup>2</sup> )	نسبت تقاضا به ظرفیت
Walk1	۱۳/۲۲	۴۹/۰۳	۰/۲۷
Walk2	۱۶/۶۵	۴۹/۰۳	۰/۳۴
Walk3	۵۳/۹۸	۴۹/۰۳	۱/۱۰۱
Walk4	۵۴/۰۲	۴۹/۰۳	۱/۱۰۲

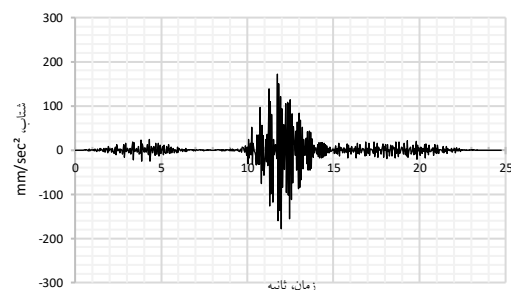
**نتایج روش سوم:** در جدول ۴ نتایج فرکانس‌های اصلی مربوط به سه مود کف ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود فرکانس مود اول کف برابر ۸/۱۱۶ هرتز بوده که ضوابط آسایشی پیشنهادی در مبحث دهم مقررات ملی ساختمان که قبلاً در جدول ۱ ارائه شد بود را رعایت نموده است. شایان توجه است که فرکانس مود اول و دوم بسیار به هم نزدیک هستند. همان‌طور که در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است؛ هرچند در گره مانند شکل ۱۳ تحلیل آسایشی برای سقف عرشه فولادی مدل شده در حدود آسایشی مطلوب قرار دارد اما می‌توان گره‌ای مانند شکل ۱۲ یافت که در تحلیل فرکانس‌های پایین به نزدیکی آستانه تحمل رسیده و در تحلیل فرکانس‌های بالا سقف از حدود آسایشی خارج شده باشد. لازم به ذکر است که منظور از تحلیل فرکانس‌های پایین هنگامی است که سقف دارای فرکانس طبیعی زیر ۴ هرتز بوده و باتوجه به نزدیک بودن به فرکانس راه رفتن



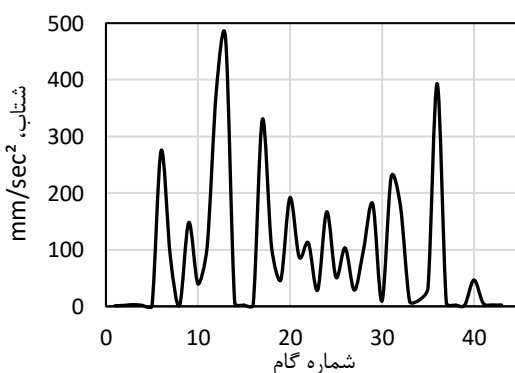
شکل ۸. شتاب قائم عرشه در روش اول و گام ۱۳ با مختصات (۴/۱۵ و ۴/۱۲۵)



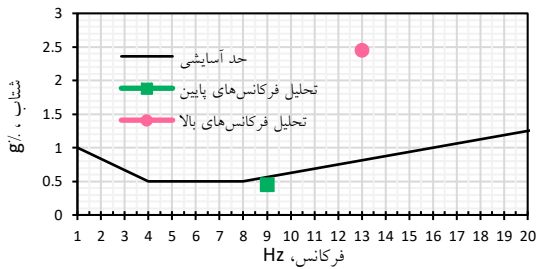
شکل ۹. شتاب قائم عرشه در روش اول و گام ۳۱ با مختصات (۳/۷ و ۱۱/۷۷۵)



شکل ۱۰. شتاب قائم عرشه در روش اول و گام ۳۲ با مختصات (۳/۷ و ۱۲/۲۲۵)

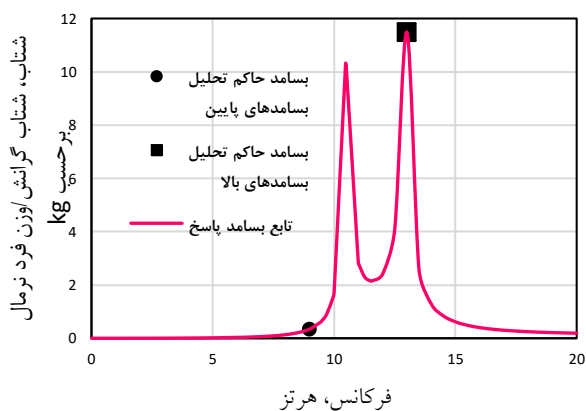


شکل ۱۱. بیشینه شتاب در هر گام در مسیر فرض شده روش اول



شکل ۱۳. مقایسه آستانه تحمل شتاب در انسان با شتاب پیش‌بینی‌شده گره‌های کف برای تحریک گره یک و پاسخ در گره سه

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ تابع پاسخ فرکانسی به تحریک انجام شده در دامنه فرکانسی صفر تا ۲۰ هرتز نشان داده شده است. در این اشکال مودهای نزدیک به فرکانس‌های حاکم نمایش داده شده است. در خصوص شکل‌های ۱۴ و ۱۵ این نکته قابل ذکر است که تابع پاسخ فرکانسی نشان دهنده رابطه بین نیروی وارده (در اینجا راه رفتن) و پاسخ ارتعاشی سازه به آن است. نقاط بیشینه در این تابع بیانگر فرکانس‌های طبیعی سازه بوده که طبعاً در آن‌ها تشدید رخ می‌دهد. اگر مود دو و سه در این نقاط بیشینه قرار گیرند گویای آن است که تشدید رخ داده است با توجه به این اشکال تشدید در فرکانس مود سوم رخ داده است و در این مود قاعداً بیشینه ارتعاش ثبت خواهد شد.

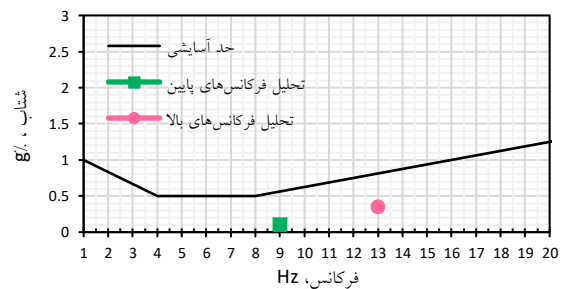


شکل ۱۴. تابع پاسخ فرکانسی و مودهای نزدیک به فرکانس‌های حاکم با تحریک گره یک و پاسخ در گره دو

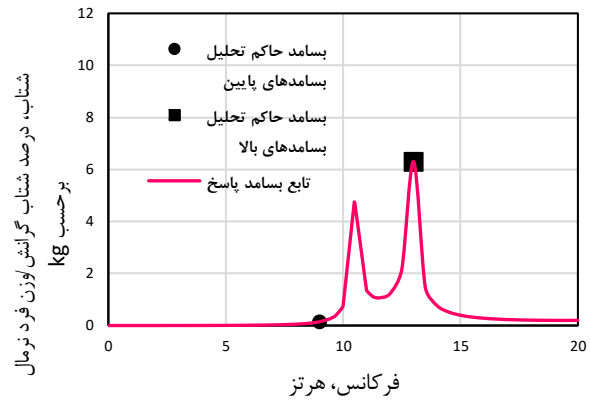
انسان (۱/۶ تا ۲/۴ هرتز) پدیده تشدید تأثیر بسزایی در پاسخ دارند. این نوع تحلیل معمولاً در کف‌هایی با دهانه بلند، پل‌های عابر پیاده و سازه‌های انعطاف‌پذیر کاربرد دارد، این در حالی است که تحلیل فرکانس‌های بالا در سازه‌هایی با فرکانس بالای ۱۰ هرتز بحرانی است. در این نوع سازه‌ها چون فرکانس راه رفتن بسیار پایین‌تر از فرکانس سازه هستند اثر تشدید ناچیز بوده و تحلیل باید بیش‌تر ناشی از پاسخ گذرای کف باشد. در این حالت ارتعاش‌های موضعی بیشتر بوده و معمولاً خیلی سریع از بین می‌رود. این حالت برای سقف‌های سخت، دال‌های دهانه کوتاه و دیگر سازه‌های صلبی که ارتعاش گذرا در آنها حاکم است، کاربرد بیشتری دارد. از آنجایی که کف مورد بررسی در این پژوهش دارای فرکانس ۸/۱۱۶ هرتز است، برای تفسیر نتایج باید ترکیبی از دو تحلیل در نظر گرفته شود تا پاسخ توأم شامل تأثیر پدیده تشدید و حالت گذرا باشد. با توجه به موارد ذکر شده به وضوح مشخص است که شکل ۱۲ خارج از محدوده آسایشی است.

جدول ۴. نتایج استخراج شده در روش سوم

مود	فرکانس (Hz)	جابجایی قائم نقطه تحریک (mm)	جابجایی قائم نقطه پاسخ (mm)
۱	۸/۱۱۶	۰/۴۳	۰/۹۴
۲	۸/۲۱۲	۰/۰۲۵	۰/۰۵
۳	۱۰/۴۷۵	-۷۹	-۱۴۳



شکل ۱۲. مقایسه آستانه تحمل شتاب در انسان با شتاب پیش‌بینی‌شده گره‌های کف برای تحریک گره یک و پاسخ در گره دو



شکل ۱۵. تابع پاسخ فرکانسی و مودهای نزدیک به فرکانس‌های حاکم با تحریک گره یک و پاسخ در گره سه

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی مانند تردد افراد، فعالیت‌های ساختمانی اطراف، تاسیسات مکانیکی و ترافیک باشد. در این پژوهش لرزش‌های ناشی از راه رفتن روی یک سقف عرشه فولادی که مطابق ضوابط ویرایش پنجم سال ۱۴۰۱ مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طراحی شده است، پرداخته شد. پس از بررسی الزامات آیین‌نامه‌های داخلی و خارجی، سه روش مدل‌سازی به تفصیل بیان شد؛ سپس نتایج این سه روش ارائه و تفاوت‌های خروجی‌های آن تشریح شد. نتایج تحلیل‌ها نشان داد که هرچند سقف از نظر مبحث دهم دارای فرکانسی بالاتر از حد مشخص شده است ولی از حدود آسایشی AISC Design 11 در بعضی از موارد خارج بوده و نیاز به باز طراحی دارد. همچنین در بررسی توابع پاسخ فرکانسی سقف نشان داده شد که امکان رخداد تشدید در فرکانس مود سوم سقف امکان‌پذیر است. در این پژوهش تنها به مدل‌سازی سازه کف بسنده شده (به منظور تحلیل سازه‌های آسایش) و اجزای غیرسازه‌ای دیگر مانند پوکه‌ریزی، سیمانکاری و سرامیک و یا پارتیشن‌ها و مبلمان‌ها مدل نشده است؛ این موارد به دلیل افزایش جرم سازه می‌توانند اثر منفی (تغییر فرکانس سازه) و به دلیل افزایش میرایی می‌توانند اثر مثبت در احساس لرزش ناشی از راه رفتن در روی کف ایجاد نمایند.

با افزایش سطح رفاه انسان‌ها، تامین آسایش در ساختمان پس از برآورده‌سازی نیازهای ایمنی و اقتصادی، به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر کیفیت زندگی ساکنین مطرح می‌شود. در تامین الزامات آسایشی باید به مواردی از جمله آسایش حرارتی، آسایش صوتی، آسایش بصری، آسایش فیزیکی و آسایش روانی دقت کرد. کنترل لرزش کف‌ها، به عنوان یکی از مؤلفه‌های اساسی آسایشی مربوط به آسایش صوتی، آسایش فیزیکی و آسایش روانی ساکنین ساختمان‌ها در نظر گرفته می‌شود. لرزش‌ها

#### ۵. منابع

- [1] مبحث دهم مقررات ملی ساختمان طرح و اجرای ساختمان فولادی ویرایش پنجم (۱۴۰۱). مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- [2] Bi, Wenzhai, Haitao Li, David Hui, Milan Gaff, Rodolfo Lorenzo, Ileana Corbi, Ottavia Corbi, and Mahmud Ashraf. "Effects of chemical modification and nanotechnology on wood properties." *Nanotechnology Reviews* 10, no. 1 (2021): 978-1008.
- [3] Cao, Liang, Jiepeng Liu, Jiang Li, and Ruizhi Zhang. "Experimental and analytical studies on the vibration serviceability of long-span prestressed concrete floor." *Earthquake Engineering and Engineering Vibration* 17 (2018): 417-428.
- [4] Dal Lago, Bruno, Luca Martinelli, and Francesco Foti. "Slender precast voided slabs under walking-induced vibration." *Structural Concrete* 23, no. 6 (2022): 3416-3443.

- [5] Ding, Yewei, Yifan Zhang, Zheng Wang, Zizhen Gao, Tongyue Zhang, and Xiuling Huang. "Vibration test and comfort analysis of environmental and impact excitation for wooden floor structure." *BioResources* 15, no. 4 (2020): 8212.
- [6] Jaafari, Chaimaa, and Jamshid Mohammadi. "Floor vibration control as a serviceability requirement in design standards and practices." *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 23, no. 2 (2018): 04018003.
- [7] Lago, Fernanda Scussiato, Moacir Kripka, Osama Sam Salem, and Zacarias M. Chamberlain Pravia. "Experimental and analytical study of vibration parameters in waffle concrete slabs." *Engineering Structures* 199 (2019): 109593.
- [8] Liu, Fangzhou, Jean-Marc Battini, and Costin Pacoste. "Assessment of hollow-Core concrete floors against human-induced vibration." *Structural Engineering International* 31, no. 3 (2021): 376-390.
- [9] Middleton, C. J., and J. M. W. Brownjohn. "Response of high frequency floors: A literature review." *Engineering Structures* 32, no. 2 (2010): 337-352.
- [10] Murray, T. M., D. E. Allen, and E. E. Ungar. "Design guide 11, floor vibrations due to human activities." *American Institute of Steel Construction* (2003).
- [11] Nguyen, Huu Anh Tuan, Noel Lythgo, Emad Gad, John Wilson, and Nicholas Haritos. "Development of dynamic load factors for human walking excitation for floor vibration design." (2022).
- [12] Kim, Deok-Ki, Je-Woo Park, Hong-Jin Kim, and Tae-Hyu Ha. "Floor vibration evaluation of lightweight steel frame floor for different design factors and measuring methods." *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction* 29, no. 7 (2013): 3-10.
- [13] Smith, Andrew L., Stephen J. Hicks, and Paul J. Devine. *Design of floors for vibration: A new approach*. Ascot, Berkshire, UK: Steel Construction Institute, 2007.
- [14] International Organization for Standardization. *Bases for design of structures--serviceability of buildings and walkways against vibrations*. ISO, 2007.
- [15] Yang, Xiaojun, Xiaolan Tang, Lan Ma, and Youfu Sun. "Sound insulation performance of structural wood wall integrated with wood plastic composite." *Journal of Bioresources and Bioproducts* 4, no. 2 (2019): 111-118.

پی نوشت

---

<sup>1</sup> Extended 3D analysis of building systems, ETABS

<sup>2</sup> American Institute of Steel Construction, AISC