

کاربرد روش زمان دوام در ارزیابی لرزه‌ی قاب خمشی فولادی با بام سبز

مژده همتی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

محمد علی داستان دیزناب* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۰
دوری ۲ - ۳۷، شماره ۴/۲، ص. ۱۴۷-۱۵۷، (پادداشت فنی)

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی قابلیت استفاده از روش زمان دوام در تحلیل لرزه‌ی قاب خمشی فولادی با بام‌های سبز پرداخته شده است. روش زمان دوام، یک تحلیل تاریخی‌ی زمانی است که می‌تواند با هزینه‌ی محاسباتی پایین، سازه را در سطوح مختلف شدت تحریک، ارزیابی لرزه‌ی کند. با وجود مزایای بسیار روش زمان دوام، نحوه‌ی عملکرد آن در ارزیابی لرزه‌ی سازه‌های مختلف - به خصوص زمانی که رفتار لرزه‌ی سازه با سازه‌های متداول متفاوت باشد - از موضوعات چالش‌برانگیز است. در پژوهش حاضر، یک قاب خمشی فولادی متوسط ۵ طبقه با بام‌های: معمولی، سبز گسترده و فشرده در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شده و برای ارزیابی دقت روش زمان دوام، از ۷ رکورد زلزله در سطوح مختلف شدت تحریک استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که روش زمان دوام با دقت‌های متفاوتی می‌تواند بیشینه‌ی تغییرمکان بام، برش پایه و بیشینه‌ی تغییرمکان نسبی طبقات را نسبت به روش‌های تاریخی‌ی زمانی معمول ارزیابی کند. همچنین افزودن بام سبز می‌تواند تأثیر قابل توجهی در رفتار لرزه‌ی قاب خمشی فولادی ایجاد کند.

واژگان کلیدی: روش زمان دوام، بام سبز، ارزیابی لرزه‌ی، تحلیل دینامیکی غیرخطی.

mozhdeh.hemati97@gmail.com
m-dastan@araku.ac.ir

۱. مقدمه

بام سبز، مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی در طول چرخه‌ی عمر یک ساختمان دارند؛ ولی ارزیابی لرزه‌ی آنها، اهمیت بسیار زیادی دارد.^[۱] جتا^۴ و همکاران (۲۰۱۹) هم به ارزیابی لرزه‌ی یک قاب خمشی فولادی ۳ طبقه‌ی دوبعدی با بام سبز با استفاده از تحلیل تاریخی‌ی زمانی برای زلزله‌ی کوبه در یک سطح تحریک پرداختند و دریافتند که اضافه کردن بام سبز باعث کاهش شتاب در تمام طبقات می‌شود؛ ولی برای اثبات بیشتر آثار بام سبز در رفتار لرزه‌ی سازه‌ها، مطالعات بیشتری لازم است و بهتر است سازه تحت مجموعه‌ی از شتاب‌نگاشت‌ها تحلیل شود.^[۷]

بسته به اهمیت سازه و شرایط لرزه‌خیزی یک منطقه، روش‌های مختلفی برای تحلیل لرزه‌ی آن می‌تواند استفاده شود. روش دینامیکی غیرخطی در میان روش‌های ذکر شده، از هر دو نظر غیرخطی بودن مصالح و ماهیت دینامیکی زلزله‌های واقعی قابل اعتمادتر است؛ ولی هزینه‌ی محاسباتی بسیار بالایی دارد. همچنین استکانچی و همکاران (۲۰۰۴)، روش زمان دوام (ET)^۵ را به عنوان یک ابزار سریع و کارآمد برای تحلیل‌های دینامیکی تاریخی‌ی زمانی معرفی کردند.^[۸] در واقع روش زمان دوام، یک روش تاریخی‌ی زمانی است، ولی هزینه‌ی محاسباتی پایینی دارد. مطالعات متعددی در زمینه‌ی عملکرد روش زمان دوام در سازه‌های مختلف انجام شده است. برای مثال، حریری اردبیلی و همکاران (۲۰۱۳)، در ارزیابی لرزه‌ی سازه‌های قاب خمشی فولادی ویژه با استفاده از روش زمان دوام، از رکوردهای نسل دوم سری f استفاده و نتایج آن را با تحلیل تاریخی‌ی زمانی مقایسه کرده و دریافتند که

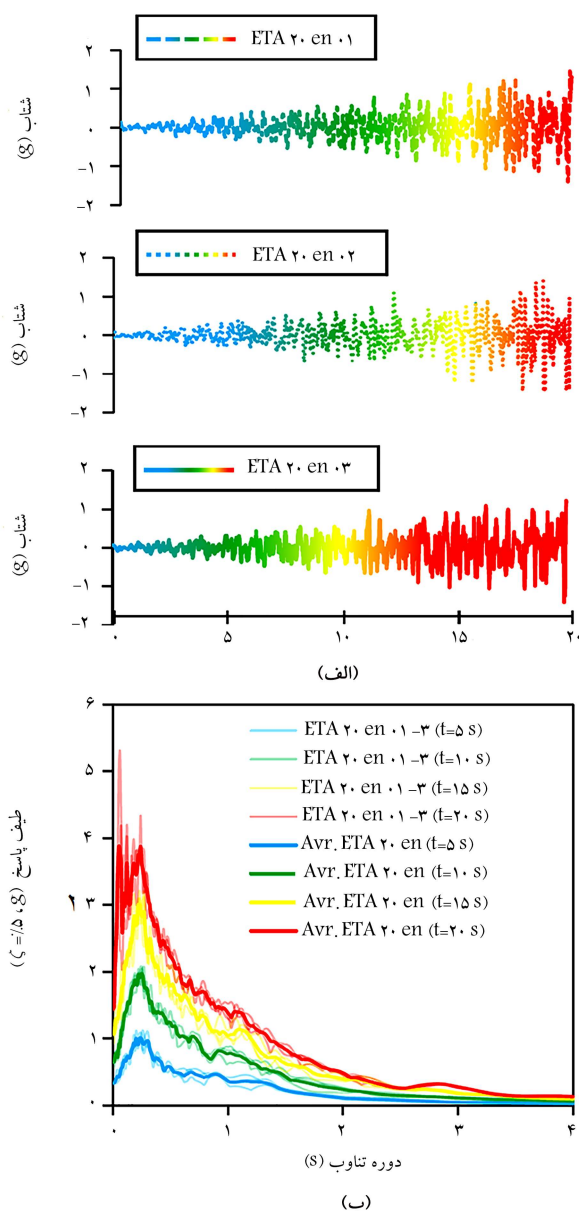
بام سبز، یکی از رویکردهای نوین معماری و شهرسازی است، که از آن می‌توان در جهت افزایش سرانه‌ی فضای سبز، ارتقاء کیفیت محیط زیست و توسعه‌ی پایدار شهری بهره برد.^[۱] سیستم‌های اجرای بام سبز به روش‌های متعددی انجام می‌شود، که بام سبز گسترده و فشرده دو نمونه‌ی رایج آن هستند. سیستم‌های اخیر، وزن سازه را به میزان قابل توجهی در تراز بام افزایش می‌دهند، که باعث تغییر رفتار دینامیکی سازه می‌شوند. از این رو آیین‌نامه‌های مختلف، ارزیابی سازه‌ی بام سبز را ضروری می‌دانند.^[۲]

تاکنون مطالعات کمی در زمینه‌ی ارزیابی لرزه‌ی بام سبز انجام شده است. برای مثال، کارمودی^۱ و همکاران (۲۰۰۹)، با یک مدل‌سازی ساده نشان دادند که آب موجود در لایه‌ی زهکشی می‌تواند به عنوان یک منبع میرایی عمل کند.^[۴] بیانچینیا^۲ و همکاران (۲۰۱۶)، نیز به بررسی تأثیر بام سبز در رفتار لرزه‌ی ۳ قاب بتن‌آرمه با استفاده از تحلیل تاریخی‌ی زمانی در یک سطح تحریک پرداختند و جابه‌جایی نسبی طبقات بررسی و اهمیت ارزیابی لرزه‌ی سازه‌های مذکور مطرح شد.^[۵] همچنین ولش^۳ و همکاران (۲۰۱۷) به ارزیابی لرزه‌ی، زیست‌محیطی و اقتصادی یک ساختمان بتنی ۴ طبقه با بام سبز پرداختند و دریافتند که ساختمان‌های

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۰/۱/۲۱، اصلاحیه ۱۴۰۰/۴/۱۳، پذیرش ۱۴۰۰/۵/۱۰.

DOI:10.24200/J30.2021.57980.2947



شکل ۱. الف) توابع شتاب ETA_{20en} ، ب) طیف پاسخ ETA_{20en} در زمان های مختلف.

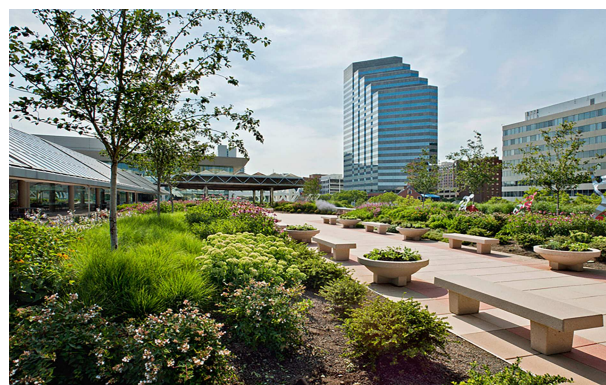
افزایش می‌یابد. معمولاً برای تولید توابع زمان دوام از تناسب خطی استفاده می‌شود. برای مثال، طیف پاسخ توابع شتاب زمان دوام در زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ ثانیه به ترتیب بر ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر طیف پاسخ الگوی هدف منطبق است. طیف الگوی هدف می‌تواند طیف طرح آیین‌نامه‌های لرزه‌یی مختلف، متوسط طیف پاسخ مجموعه‌یی از رکوردهای زلزله‌ی طبیعی و یا هر طیف دیگری باشد. در شکل ۱، توابع شتاب زمان دوام به کار رفته در مطالعه‌ی حاضر و طیف پاسخ شبه‌شتاب آنها در زمان‌های مختلف مشاهده می‌شود. در روش زمان دوام، سازه تحت یک سری توابع شتاب فزاینده قرار می‌گیرد و بیشینه مقدار پارامترهای پاسخ در مقابل زمان ترسیم می‌شود. پارامترهای پاسخ می‌توانند شامل تغییر مکان‌ها، تنش‌ها، نیروها و پارامترهای غیرخطی، مانند دوران خمیری و یا هر پارامتر پیچیده‌تری با توجه به نوع مسئله باشند و تا زمان ناپایداری سازه کنترل شوند.

منحنی‌های زمان دوام با نتایج حاصل از تحلیل رکوردهای زلزله برای بیشینه‌ی برش پایه، در بیشتر سطوح تحریک تطابق خوبی دارند و نتایج کمتر از ۸/۲۵٪ با یکدیگر اختلاف داشتند. همچنین نتایج مربوط به بیشینه‌ی جابه‌جایی بام با اختلاف کمتر از ۲۰٪ به دست آمده و نتایج مربوط به بیشینه‌ی تغییر مکان نسبی طبقات نیز کمتر از ۲۰٪ اختلاف داشته‌اند.^[۹]

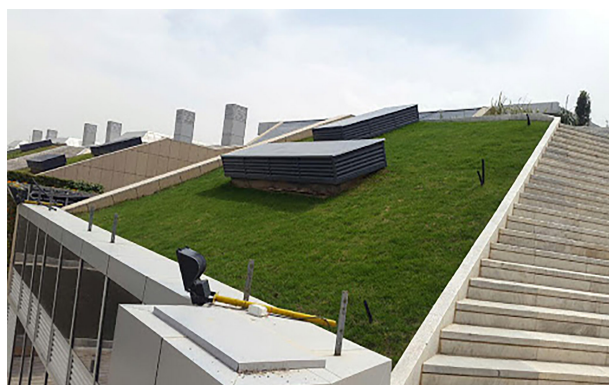
شیرخانی و همکاران (۲۰۱۵)، نیز رفتار قاب‌های فولادی مجهز به میراگرهای اصطکاکی دورانی را با استفاده از روش زمان دوام بررسی کرده‌اند.^[۱۰] همچنین چینی فروش و استکانچی (۲۰۱۷)، به ارزیابی لرزه‌یی گنبد امام رضا با استفاده از تحلیل بارافزون، تاریخچه‌ی زمانی و زمان دوام پرداختند.^[۱۱] داستان و همکاران (۲۰۱۹) نیز قابلیت روش زمان دوام را در ارزیابی رفتار لرزه‌یی سکوها در بای مطالعه کردند.^[۱۲] همچنین استکانچی و همکاران (۲۰۲۰)،^[۱۳] به ارزیابی لرزه‌یی قاب‌های مهاربندی شده‌ی فولادی پُر شده با مصالح بتایی و محسنیان و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۴] نیز به ارزیابی لرزه‌یی سازه‌های بتنی قالب تونلی با استفاده از روش زمان دوام پرداخته‌اند. سرچشمه‌پور و همکاران (۲۰۲۱)،^[۱۵] هم یک دیوار برشی فولادی را با در نظر گرفتن اثر متقابل خاک و سازه، با استفاده از روش زمان دوام ارزیابی لرزه‌یی کرده‌اند. میری و ریاحی (۱۳۹۸) نیز به ارزیابی قابلیت کاربرد روش زمان دوام در طراحی بهینه‌ی سازه‌ها بر اساس عملکرد به کمک تئوری تغییر شکل یکنواخت پرداخته‌اند.^[۱۶] همچنین شاد و همکاران (۱۳۹۹)، در بررسی رفتار لرزه‌یی اسکله‌های شمع و عرشه در بندر امام خمینی دریافتند که سرعت بالا در ارزیابی لرزه‌یی سازه‌ها از ویژگی‌های ممتاز روش زمان دوام است؛ ولی با وجود این، عملکرد آنها در تحلیل‌های غیرخطی باید با دقت بسیار ارزیابی شود.^[۱۷] از آنجایی که سازه‌های دارای بام سبز با توجه به نوع آن، توزیع جرمی خاصی دارند که با سازه‌های متداول متفاوت هستند و از طرفی می‌توانند نامنظمی جرمی ایجاد کنند، قابلیت روش زمان دوام در ارزیابی آنها از مواردی است که باید بررسی شود. در مطالعه‌ی حاضر، قابلیت روش زمان دوام در ارزیابی رفتار لرزه‌یی سازه‌ی بام سبز بررسی شده است. به این منظور، یک سازه‌ی ۵ طبقه‌ی فولادی مطابق با آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ در نرم‌افزار ایتبس^۶ طراحی شده و سپس یک قاب آن به صورت دوبعدی در نرم‌افزار انسیس^۷ در سه حالت با بام‌های: معمولی، سبز گسترده و سبز فشرده مدل‌سازی شده و در ادامه، قاب‌های مورد نظر تحت توابع شتاب زمان دوام و رکوردهای زلزله، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی شده‌اند. در نهایت به تأثیر اضافه شدن جرم بام سبز در عملکرد لرزه‌یی سازه‌ی مذکور پرداخته و عملکرد آنها در تحلیل‌های غیرخطی ارزیابی شده است. در پایان نیز نتایج تحلیل زمان دوام با نتایج تحلیل رکوردهای زلزله در سطوح مختلف تحریک مقایسه و دقت نتایج حاصل از روش زمان دوام برای ارزیابی سازه‌های ذکر شده بررسی شده است.

۲. روش زمان دوام

در روش زمان دوام با انجام یک تحلیل تاریخچه‌ی زمانی، می‌توان عملکرد سازه را در سطوح مختلف شدت تحریک ارزیابی کرد. در روش زمان دوام، سازه‌ی مورد نظر تحت یک سری شتاب‌نگاشت‌های فزاینده‌ی از پیش طراحی شده قرار می‌گیرد و پاسخ سازه در طول زمان ارزیابی و عملکرد آنها مبنی بر زمان رسیدن به یک شاخص معین از پیش تعیین شده قضاوت می‌شود. در روش زمان دوام، تحریک به صورت توابع شتابی، که در هر زمان معرف یک سطح تحریک لرزه‌یی مشخصی است، به سازه وارد می‌شود. توابع شتابی مذکور، که از پیش طراحی می‌شوند، توابع شتاب زمان دوام نام دارند و به گونه‌ی تولید می‌شوند که شدت آنها در طول زمان



شکل ۲. نمونه‌یی از بام سبز فشرده.^[۱۹]



شکل ۳. نمونه‌یی از بام سبز گسترده.^[۲۰]

۳. بام سبز

۱.۳. معرفی کلی

بام سبز، بامی است که بر روی سطح آن گیاهان رشد می‌کنند. سبزپوش کردن بام، نیازمند گیاهانی است که در برابر عواملی، مانند: محیط خشن و بی‌روح پشت بام در شرایط کم آبی، عوامل اقلیمی، یخ‌زدگی، نسیم دریا، خشکی و غیره مقاومت کنند. نوع گیاهان انتخابی بسته به نوع آب و هوا و شرایط اقلیمی مختلف متفاوت است. بام‌های سبز می‌توانند به صورت افقی باشند و یا شیب ملایمی داشته باشند.

۲.۳. انواع بام سبز

سیستم اجرای بام سبز در ساختمان‌ها به روش‌های متعددی انجام می‌شود، که عبارت‌اند از بام‌های: سبز فشرده، سبز نیمه‌فشرده، سبز گسترده و سیستم جعبه‌ی گیاه.

۱.۲.۳. بام سبز فشرده

بام‌های سبز فشرده^۸، پوشش گیاهی متنوع‌تری نسبت به بام‌های دیگر دارند، که می‌توانند شامل گیاهان مختلفی، مانند: چمن‌ها، گل‌های تابستانی، درختچه‌ها و درختان باشند؛ به همین علت نسبت به سیستم‌های دیگر، وزن بیشتری را به بام وارد می‌کنند. مشخصه‌ی اصلی بام‌های سبز فشرده، عمق زیاد خاک آنهاست. عمق کاشت بام سبز فشرده بین ۲۰ تا ۶۰ سانتی‌متر است و باری در حدود ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع را به سازه وارد می‌کند. بهترین گزینه‌ی استفاده از بام‌های سبز فشرده، بر روی ساختمان‌های جدید است، که در آن طراحی و محاسبات سازه‌ی اولیه با در نظر گرفتن بار اضافی بام انجام شده باشد. در شکل ۲، نمونه‌یی از بام سبز فشرده مشاهده می‌شود.^[۱۸]

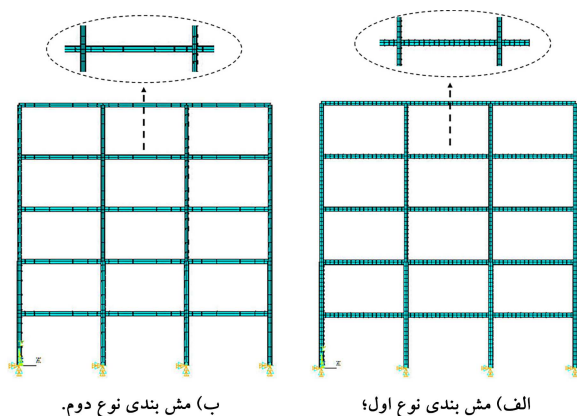
۲.۲.۳. بام سبز گسترده

در بام سبز گسترده^۹، سطح وسیعی از بام توسط گیاهانی که نیاز به نگهداری و آبیاری چندانی ندارند، پوشیده می‌شود. عمق کاشت بام سبز گسترده بین ۵ تا ۱۵ سانتی‌متر است، به همین علت سبک است و باری در حدود ۷۰ تا ۱۷۰ کیلوگرم بر مترمربع را به سازه وارد می‌کند. سیستم بام سبز گسترده بر روی بام‌های مسطح و شیب‌دار قابل اجراست و محدودیت آن، فقط استفاده از گیاهانی با ریشه‌ی کوتاه مانند چمن است. در شکل ۳، نمونه‌یی از بام سبز گسترده مشاهده می‌شود.^[۱۸]

۴. مدل‌سازی

۱.۴. مشخصات قاب فولادی

در مطالعه‌ی حاضر، به منظور ارزیابی لرزه‌یی قاب‌های خمشی دارای بام سبز، یک ساختمان متداول ۵ طبقه با کاربری مسکونی با بام معمولی واقع در شهر اراک برای خاک نوع II مطابق با ضوابط آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ طراحی شده است. ارتفاع طبقات ۳/۲ متر و طول هر دهانه ۵ متر بوده است. سیستم باربر جانبی سازه‌ی ساختمان مذکور در هر دو راستای x و y قاب خمشی متوسط در نظر گرفته شده است. مطابق با آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، ضریب رفتار Ru برای سازه‌ی مذکور، ۵ و ضریب بزرگ‌نمایی Cd، ۴ در نظر گرفته شده است. نوع فولاد به کار رفته در مطالعه‌ی حاضر، st۳۷ با تنش تسلیم ۲۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، تنش گسیختگی ۳۷۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌مترمربع، مدول کشسانی ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ بوده است. بارهای مرده و زنده‌ی اعمالی به قاب در همه‌ی طبقات به ترتیب ۶۵۰ کیلوگرم بر مترمربع و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده است. وزن لرزه‌یی محاسبه شده مطابق با آیین‌نامه‌ی استاندارد ۲۸۰۰ برای سازه‌های با بام‌های معمولی و سبز با مجموع بارهای مرده و وزن تأسیسات ثابت و وزن دیوارهای تقسیم‌کننده به اضافه‌ی ۲۰٪ از بار زنده و برف برابر است. بار زنده باید به صورت تخفیف‌نیافته مطابق با ضوابط مبحث ششم مقررات ملی ساختمان در نظر گرفته شود. در طراحی سازه‌ی مذکور، تغییر مکان جانبی نسبی طبقات نیز کنترل شده است، که این نسبت در تمامی طبقات از پیشینه‌ی مقدار مجاز آن یعنی $0.00625 / (C_d / 0.025)$ کمتر به دست آمده است. میزان ضریب نامعینی هم با توجه به تعداد دهانه‌های سیستم مقاوم جانبی در هر سمت مرکز جرم برابر واحد در نظر گرفته شده است. موقعیت قاب خمشی انتخابی برای ارزیابی لرزه‌یی دوبعدی به وسیله‌ی خطوط خط‌چین و همچنین نمای قاب مورد بررسی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. در جدول ۱، نیز مشخصات مقاطع تیرها و ستون‌های قاب مورد بررسی ارائه شده است. طبق آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، در مواردی که جرم هر طبقه بیش از ۵٪ با جرم‌های طبقات مجاور تفاوت داشته باشد، لذا سازه‌ی اشاره شده، نامنظمی جرمی دارد. اما طبقات بام و خرپشته از تعریف اخیر مستثناء هستند.^[۲۱] همچنین مطابق با آیین‌نامه‌ی ۱۶-ASCEV، در مواردی که جرم هر طبقه بیشتر از ۱۵٪ از جرم طبقات مجاور باشد، سازه‌ی مورد نظر، نامنظمی جرمی دارد. همچنین طبقه‌ی بامی که سبک‌تر از طبقه‌ی پایین خود باشد، در نظر گرفته نمی‌شود.^[۲۲] با توجه به توضیحات ارائه شده، طبق آیین‌نامه‌ی ۱۶-ASCEV در پژوهش حاضر، قاب با بام سبز فشرده، نامنظمی جرمی دارد و قاب با بام سبز گسترده، نامنظمی جرمی ندارد.



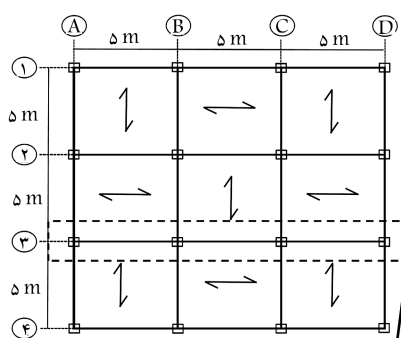
شکل ۵. مدل المان محدود قاب ۵ طبقه تحت دو نوع مش‌بندی. (الف) مش‌بندی نوع اول؛ (ب) مش‌بندی نوع دوم.

ذکر شده و ایجاد تغییرشکل‌های ثقلی، جرم لرزه‌یی برای سازه‌ی مدل‌سازی شده و سازه‌ی تحت شتاب افقی رکوردهای زلزله قرار می‌گیرد. در مطالعه‌ی حاضر از تأثیر مؤلفه‌ی برشی تیرهایی که بار خود را عمود بر قاب به قاب دوبعدی منتقل می‌کنند، صرف‌نظر شده است.

المان استفاده شده در مدل‌سازی از نوع المان نیرویی beam ۱۸۸ بوده است، که هر گره، ۶ درجه‌ی آزادی داشت. برای اعمال شرایط تکیه‌گاهی نیز تمامی درجات آزادی مرتبط در نقاط مورد نظر بسته شده است. در مدل المان محدود سازه، اثرات تحلیل غیرخطی هندسی و مصالح در نظر گرفته شده است. رابطه‌ی تنش - کرنش فولاد مصرفی بر اساس معیار دوخطی Bilinear Kinematic Hardening مدل‌سازی شده است. مقدار شیب خط دوم برابر با ۳٪ شیب ناحیه‌ی کشسان در نظر گرفته شده و معیار تنش فون میز^{۱۰} برای غیرخطی بودن مصالح استفاده شده است. همچنین اثر P-Delta نیز در تحلیل‌های غیرخطی نظر گرفته شده است. برای تحلیل حساسیت سازه مش‌بندی و تأثیر آن در دقت نتایج، سازه‌ی مورد نظر مطابق شکل ۵ تحت ۲ نوع مش‌بندی متفاوت برای رکوردهای زمان دوام، تحلیل غیرخطی شده است. میانگین درصد اختلاف نتایج به دست آمده برای پاسخ جابه‌جایی طبقات کمتر از ۱٪ به دست آمده است. با توجه به نزدیک بودن نتایج با یکدیگر، برای کم کردن حجم محاسبات برای تحلیل‌های نهایی از مش‌بندی نوع دوم استفاده شده است.

۳.۴. ضریب‌های میرایی رایلی

در مطالعه‌ی حاضر، برای در نظر گرفتن میرایی از روش میرایی رایلی استفاده شده است، که در آن تلاش می‌شود با فرض یک نسبت میرایی ثابت برای تمام مودهای مؤثر در سازه، مقادیر ضریب‌های رایلی تعیین شوند. این وضعیت غیرواقعی است، چرا که نسبت میرایی سازه در مودهای بالاتر به صورت یکنواخت با بسامد افزایش می‌یابد. برای حل این موضوع و به دست آوردن ضریب‌های رایلی، مودهای i و j به نحوی انتخاب می‌شوند که مقادیر قابل قبولی برای نسبت‌های میرایی در تمام مودهایی که به صورت معنی‌دار در جواب مشارکت دارند، به دست آید.^[۲۳] با توجه به آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰، تمام مودهایی که مجموع جرم مشارکتی در آنها بیشتر از ۹۰٪ جرم کل سازه است، به عنوان مودهای مؤثر سازه در نظر گرفته می‌شود.^[۲۱] در مطالعه‌ی حاضر، مودهای i و j برای قاب با بام معمولی؛ مودهای اول و سوم برای قاب با بام سبز گسترده و مودهای اول و دوم برای قاب با بام سبز فشرده در نظر گرفته شده است. در جدول ۲، ضریب‌های میرایی رایلی به دست آمده با استفاده



شکل ۴. موقعیت قاب بررسی شده در پلان سازه.

جدول ۱. مشخصات مقاطع.

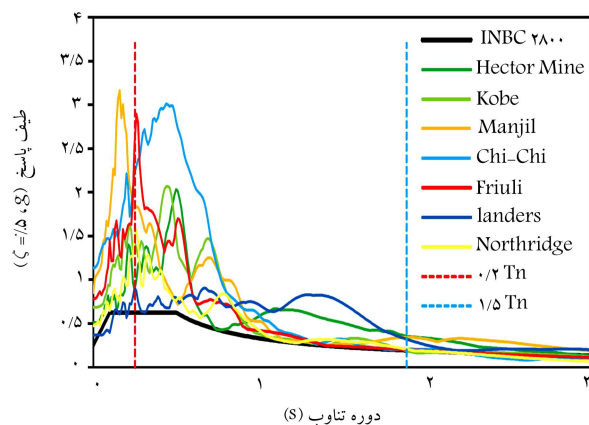
B۱	IPE۳۰۰
B۲	IPE۲۷۰
B۳	IPE۲۴۰
C۱	Box ۲۵ × ۲۵ × ۱cm
C۲	Box ۲۰ × ۲۰ × ۱cm

۲.۴. مدل‌سازی در نرم‌افزار انسیس

برای ارزیابی رفتار لرزه‌یی، قاب دوبعدی ۵ طبقه در سه حالت: بدون بارگذاری بام سبز، با بارگذاری بام سبز گسترده و فشرده در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شده است. جهت مدل‌سازی بام‌های سبز، جرم بام سبز گسترده و فشرده به ترتیب ۱۷۰ کیلوگرم بر مترمربع و ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته شده و به بار بام اضافه شده است. همچنین بار زنده‌ی بام‌های دارای بام سبز مطابق با میجث ششم مقررات ملی ساختمان برابر با ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمربع در نظر گرفته می‌شود. در هنگام تولید مدل دوبعدی از یک سازه‌ی سه‌بعدی، برای تحلیل غیرخطی لازم است تمهیدات خاصی در نظر گرفته شود. در ابتدا مطابق با آیین‌نامه‌ی ۴۱-۱۶ ASCE، باید بار ثقلی مطابق رابطه‌ی ۱ به سازه اعمال شود:

$$G_G = (Q_L + Q_D) \quad (۱)$$

که در آن، Q_D بار مرده و Q_L معادل ۲۵٪ بار زنده‌ی طراحی کاهش نیافته است، که نباید از بار زنده‌ی واقعی موجود در هنگام ارزیابی کمتر شود. پس از اعمال بار قائم



شکل ۷. رکوردهای زلزله‌ی مقیاس شده برای قاب با بام معمولی.

و مشخصات آنها در جدول ۶ ارائه شده است. مطابق با آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ برای تحلیل‌های دویعدی، طیف مؤلفه‌ی بزرگ‌تر شتاب‌نگاشت باید با طیف استاندارد مقایسه شود. ابتدا طیف پاسخ شبه‌شتاب در هر یک از شتاب‌نگاشت‌ها با منظور کردن نسبت میرایی ۵٪ تعیین می‌شود. سپس هر شتاب‌نگاشت به نحوی مقیاس می‌شود که برای هر دوره‌ی تناوب در محدوده‌ی ۰/۲T الی ۱/۵T، مقدار طیف پاسخ شبه‌شتاب از مقدار طیف طرح استاندارد کمتر نشود. T زمان تناوب اصلی سازه است. همچنین طیف طرح استاندارد مطابق با طیف آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ برای سطح خطر ۴۷۵ ساله، خاک نوع II و منطقه‌ی با خطر لرزه‌ی متوسط در نظر گرفته شده است. در جدول ۷، ضرایب مقیاس رکوردهای مختلف زلزله‌ی به کار رفته در مطالعه‌ی حاضر ارائه شده است. در شکل ۷، نیز طیف پاسخ زلزله‌های مقیاس شده برای قاب با بام معمولی مشاهده می‌شود.

۶. مقایسه‌ی نتایج تحلیل زمان دوام و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی

با استفاده از روش ارائه شده، قاب‌های ذکر شده تحت سه رکورد زمان دوام سری (ETA۲۰en۱-۰۳) و ۷ رکورد زلزله در سطوح مختلف شدت تحریک تحلیل شده‌اند. در مطالعه‌ی حاضر، ۲۱۰ تحلیل تاریخی‌چهی زمانی غیرخطی و ۹ تحلیل زمان دوام انجام شده است. بنابراین هزینه‌های محاسباتی روش زمان دوام فقط در حدود ۵٪ هزینه‌های محاسباتی روش تاریخی‌چهی زمانی معمول به دست آمده است، که بیان‌گر هزینه‌های محاسباتی بالای روش معمول تاریخی‌چهی زمانی نسبت به روش نوین زمان دوام است.

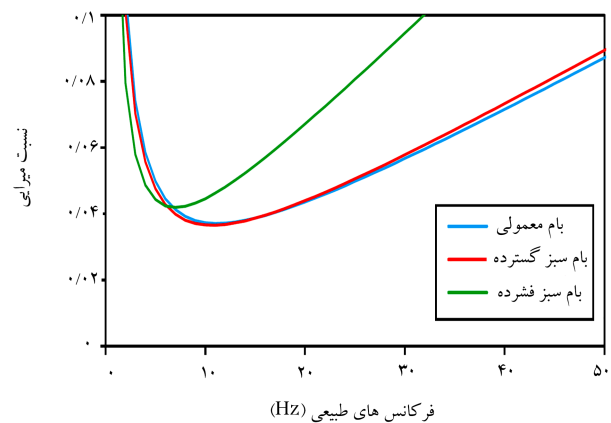
نحوه‌ی ترسیم منحنی‌های زمان دوام به این گونه است که پس از انجام تحلیل تاریخی‌چهی زمانی، مقدار پاسخ مورد نظر مثلاً تغییر مکان‌ها، جابه‌جایی‌های نسبی طبقات، برش پایه و یا هر شاخص مورد نظر دیگر در طول زمان به دست می‌آید. سپس مطابق معادله‌ی ۳ در هر زمان، مقدار بیشینه‌ی قدرمطلق پاسخ تا آن زمان تعیین می‌شود:

$$EDP_{ET}(t) = \text{Max}(\text{Abs}(f(\tau) : \tau \in [0, t])) \quad (3)$$

که در آن، EDP_{ET} متغیر پاسخ مورد نظر در روش زمان دوام و $f(\tau)$ پاسخ تاریخی‌چهی زمانی تحلیل زمان دوام است.^[۱۲] معمولاً نمودارها به صورت پله‌ی هستند. برای دقیق‌تر کردن نتایج و حذف خطای تصادفی ناشی از پله‌ی بودن

جدول ۲. ضرایب میرایی رایلی.

نوع سازه	α	β
قاب با بام معمولی	۰/۴۱	۰/۰۰۳۳
قاب با بام سبز گسترده	۰/۳۹	۰/۰۰۳۴
قاب با بام سبز متمرکز	۰/۲۹	۰/۰۰۵۹



شکل ۶. میرایی رایلی.

از رابطه‌ی ۱ برای نسبت میرایی ۵٪ ارائه شده است و در شکل ۶، نمودار میرایی رایلی به دست آمده برای قاب‌ها مشاهده می‌شود.

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_i\omega_j}{\omega_i + \omega_j} \quad \beta = \zeta \frac{2}{\omega_i + \omega_j} \quad (2)$$

۴.۴. ارزیابی مقایسه‌ی

به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی و نتایج به دست آمده، قاب مورد نظر در هر دو نرم‌افزار ایتبس و انسیس مدل‌سازی شده است. به این منظور، با استفاده از تحلیل مودال، دوره‌ی تناوب و درصد مشارکت جرمی سه مود اول قاب‌ها، مقایسه شده است و بر اساس نتایج ارائه شده در جدول ۳، می‌توان صحت عملکرد مدل‌سازی قاب‌های مذکور را تأیید کرد.

۵. رکوردها

در مطالعه‌ی حاضر، از توابع شتاب سری ETA۲۰en استفاده شده است، که طیف الگوی آنها از میانگین طیف پاسخ ۷ رکورد زلزله‌ی منتخب از FEMA۴۴۰ برای خاک نوع C به دست آمده است.^[۲۲] در جدول ۴، نیز مشخصات توابع زمان دوام مذکور ارائه شده است.

رکوردهای زمان دوام به گونه‌ی مقیاس می‌شوند که طیف پاسخ شبه‌شتاب آنها در زمان هدف در محدوده‌ی ۰/۲T الی ۱/۵T از مقدار طیف طرح استاندارد کمتر نشود؛ لذا زمان هدف ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شده است. طیف طرح استاندارد مطابق با طیف آیین‌نامه‌ی ۲۸۰۰ برای سطح خطر ۴۷۵ ساله، خاک نوع II و منطقه‌ی با خطر لرزه‌ی متوسط در نظر گرفته شده است. در جدول ۵، ضرایب مقیاس رکوردهای زمان دوام برای قاب‌های مختلف ارائه شده است. در مطالعه‌ی حاضر از ۷ رکورد زلزله‌ی دوازگسل توصیه شده توسط آیین‌نامه‌های FEMA۶۹۵ و FEMA۴۴۰ استفاده شده است. رکوردهای مذکور برای خاک نوع C بوده

جدول ۳. مقایسه‌ی دوره‌ی تناوب و درصد مشارکت جرمی سه مود اول قاب‌ها در انسیس و ایتبس.

نام سازه	شماره‌ی مود	دوره‌ی تناوب (ثانیه)			
		ایتبس	انسیس	ایتبس	انسیس
قاب با بام معمولی	مود اول	۱/۲۶۱	۱/۲۷۲	۷۵/۱۳	۷۵/۵۸
	مود دوم	۰/۴۲۹	۰/۴۳۰	۱۳/۹۶	۱۴/۰۸
	مود سوم	۰/۲۵۰	۰/۲۵۰	۵/۵۹	۵/۶۲
قاب با بام سبز گسترده	مود اول	۱/۳۵۱	۱/۳۶۶	۷۵/۲۸	۷۵/۶۸
	مود دوم	۰/۴۴۸	۰/۴۵۰	۱۳/۹۵	۱۴/۰۸
	مود سوم	۰/۲۵۵	۰/۲۵۶	۵/۶۶	۵/۷۲
قاب با بام سبز فشرده	مود اول	۱/۶۴۵	۱/۶۷۰	۷۷/۱۲	۷۷/۳۶
	مود دوم	۰/۴۸۶	۰/۴۹۳	۱۳/۳۶	۱۳/۵۰
	مود سوم	۰/۲۶۳	۰/۲۶۶	۵/۱۷	۵/۳۰

جدول ۴. مشخصات توابع شتاب ۱-۳- $\text{ETA}20\text{en}$.

ETAFs	زمان هدف (S)	PGA در زمان هدف (g)
$\text{ETA}20\text{en}^1$	۱۰	۰/۵۶۶
$\text{ETA}20\text{en}^2$	۱۰	۰/۷۰۱
$\text{ETA}20\text{en}^3$	۱۰	۰/۶۵۹

جدول ۵. ضریب‌های مقیاس رکوردهای زمان دوام برای قاب‌ها.

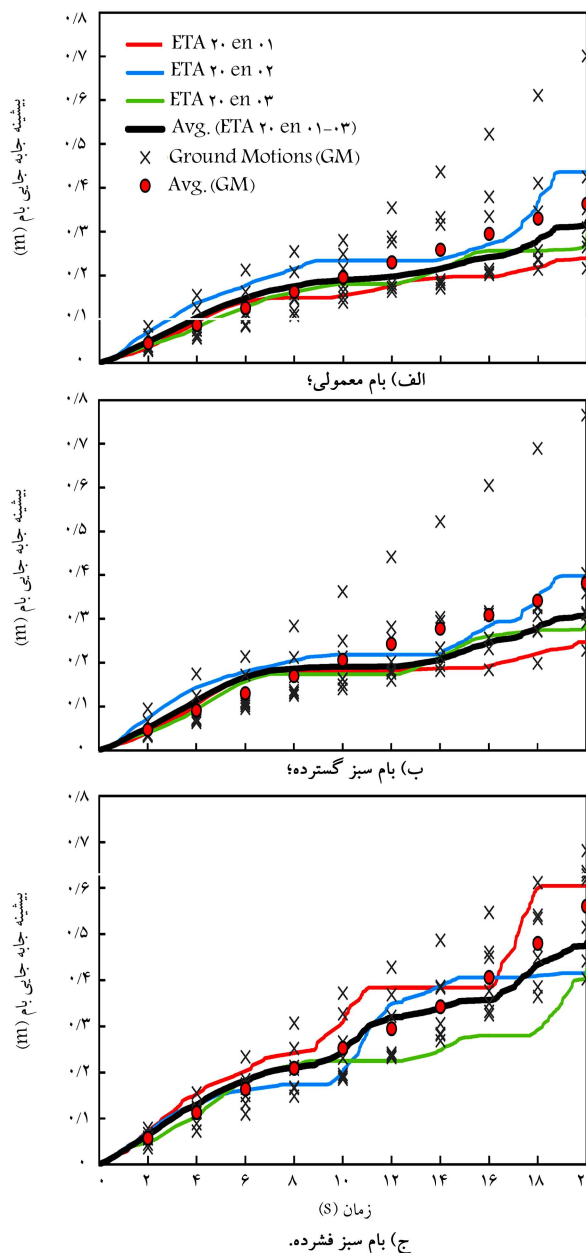
قاب‌ها	ضریب‌های مقیاس		
	$\text{ETA}20\text{en}^1$	$\text{ETA}20\text{en}^2$	$\text{ETA}20\text{en}^3$
قاب با بام معمولی	۰/۶۲	۱/۰۰	۰/۶۶
قاب با بام سبز گسترده	۱/۶۹	۱/۰۰	۰/۷۴
قاب با بام سبز فشرده	۱/۳۴	۱/۰۰	۱/۰۵

جدول ۶. مشخصات رکوردهای زلزله.

شماره	تاریخ	نام	ایستگاه	بزرگای (ریشتر)	PGA (g)
۱	۱۹۹۹	Hector Mine	Hector	۷/۱	۰/۳۴
۲	۱۹۹۵	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	۶/۹	۰/۵۱
۳	۱۹۹۰	Manjil, Iran	Abbar	۷/۴	۰/۵۱
۴	۱۹۹۰	Chi-Chi Taiwan	TCU۰۴۵	۷/۶	۰/۵۰
۵	۱۹۷۶	Friuli, Italy	Tolmezzo	۶/۵	۰/۳۵
۶	۱۹۹۲	landers	Yermo, Fire Station	۷/۱	۰/۲۴
۷	۱۹۹۴	Northridge	Castaic, Old Ridge Route	۶/۸	۰/۵۶

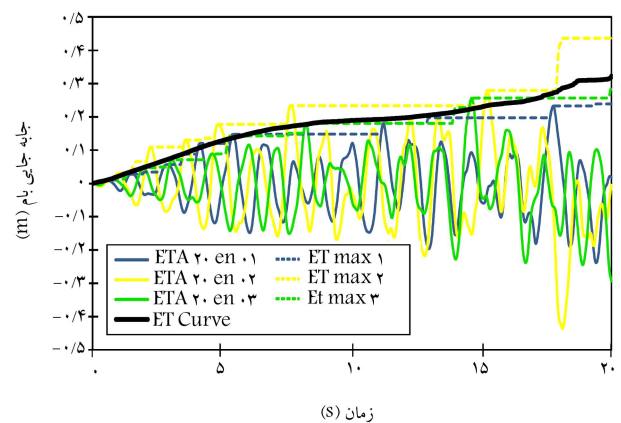
جدول ۷. ضریب‌های مقیاس رکوردهای زلزله برای قاب‌ها.

قاب‌ها	ضریب‌های مقیاس						
	Northridge	landers	Friuli	Chi – Chi	Manjil	Kobe	Hector Mine
قاب با بام معمولی	۱/۴۰	۱/۳۷	۱/۵۴	۲/۲۱	۲/۲۷	۱/۶۱	۰/۷۸
قاب با بام سبز گسترده	۱/۴۰	۱/۵۸	۱/۵۴	۲/۲۱	۲/۲۷	۱/۶۱	۰/۷۸
قاب با بام سبز فشرده	۱/۴۰	۱/۵۸	۱/۵۴	۳/۳۱	۲/۳۷	۱/۴۹	۰/۹۵



شکل ۹. منحنی‌های زمان دوام و نتایج تحلیل رکوردهای زلزله در سطوح مختلف تحریک برای بیشینه‌ی جابه‌جایی بام‌ها.

تا ۹/۷٪ و برای بام سبز فشرده تا ۶۱/۸٪ افزایش یافته است. بدیهی است که افزودن بام سبز و افزایش جرم سبب افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی سازه می‌شود. از طرفی با توجه به طیف پاسخ جابه‌جایی عموم زلزله‌ها، افزایش دوره‌ی تناوب طبیعی سازه معمولاً منجر به افزایش پاسخ سازه مانند تغییرمکان بام خواهد شد. در سازه‌ی مورد بررسی بیشترین تغییرمکان جانبی در طبقه‌ی بام رخ داده است. در بیشتر ساختمان‌ها نیز همین روند مشاهده می‌شود. بررسی تغییرمکان جانبی غیرخطی بام برای محاسبه‌ی پارامترهایی مانند عرض درز انقطاع ساختمان، اهمیت بسیاری دارد. لذا بررسی وضعیت بام با افزودن بام سبز یکی از مواردی است که باید کنترل شود. در شکل ۱۰، برش پایه‌ی به دست آمده از تحلیل رکوردهای زمان دوام و رکوردهای زلزله برای هر سه قاب مورد بررسی در سطوح مختلف تحریک مشاهده



شکل ۸. منحنی‌های زمان دوام $ETA_{20}en$ برای جابه‌جایی بام در قاب با بام معمولی.

نمودارها، از یک روش میانگین‌گیری متحرک برای هموارساختن نمودارها استفاده می‌شود. روش میانگین‌گیری با از بین بردن نوسان‌های کوتاه‌مدت و لحظه‌یی، روند طولانی‌مدت پاسخ را به خوبی نشان می‌دهد. با افزایش زمان و شدت تحریک انتظار می‌رود که پاسخ سازه نیز افزایش یابد، ولی در نمودارهای پله‌یی مقدار پاسخ در بازه‌یی از زمان ثابت است. با توجه به این‌که پله‌یی بودن نمودارهای زمان دوام با پاسخ‌های سازه سازگاری ندارد، از روش میانگین‌گیری متحرک برای هموارسازی نمودارها استفاده شده است. در شکل ۸، نمودار تحلیل زمان دوام با پاسخ جابه‌جایی بام برای قاب ۵ طبقه با بام معمولی مشاهده می‌شود.

در شکل ۹، بیشینه‌ی جابه‌جایی بام برای هر سه قاب با بام‌های: معمولی، سبز گسترده و سبز فشرده در سطوح مختلف تحریک، برای بررسی دقت نتایج تحلیل زمان دوام مشاهده می‌شود. برای بررسی دقیق میزان اختلاف نتایج حاصل از تحلیل رکوردهای زمان دوام و رکوردهای زلزله، می‌توان پارامتری را برای درصد اختلاف به عنوان α تعریف کرد، که از رابطه‌ی ۴ به دست می‌آید:

$$\alpha = \left| \frac{\text{Ave.GM} - \text{Ave.ET}}{\text{Ave.GM}} \right| \times 100 \quad (4)$$

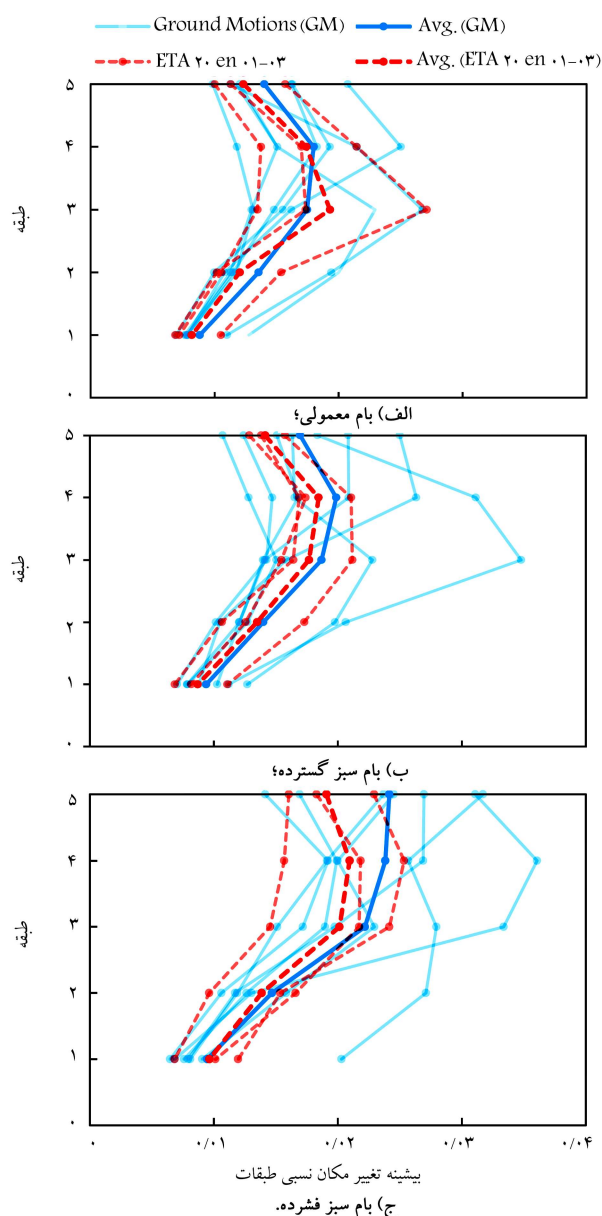
که در آن، Ave.GM میانگین پارامتر تقاضای مهندسی حاصل از رکوردهای زلزله و Ave.ET میانگین پارامتر تقاضای مهندسی حاصل از رکوردهای زمان دوام است. در جدول ۸، میزان درصد اختلاف بین نتایج تحلیل رکوردهای زمان دوام و رکوردهای زلزله برای بیشینه‌ی جابه‌جایی بام در سطوح مختلف تحریک ارائه شده است. برای قاب با بام معمولی بیشترین درصد اختلاف در سطح تحریک ۲ ثانیه برابر با ۲۰/۱۳٪، برای قاب با بام سبز گسترده در سطح تحریک ۶ ثانیه برابر با ۲۷/۹۳٪ و برای قاب با بام سبز فشرده در سطح تحریک ۴ ثانیه برابر با ۱۵/۳۳٪ به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیشترین اختلاف مربوط به زمان‌های ابتدایی توابع شتاب زمان دوام بوده است. در بام‌های معمولی و سبز گسترده، کمترین درصد اختلاف مربوط به زمان هدف ۱۰ ثانیه بوده است، که توابع شتاب زمان دوام در زمان مذکور مقیاس شده‌اند. در بام سبز فشرده نیز درصد اختلاف در زمان هدف ۲/۷٪ بوده است، که مقدار کمی است. افزودن بام سبز، بیشینه‌ی جابه‌جایی بام را در قاب مذکور افزایش داده است. با توجه به نتایج میانگین رکوردهای زلزله، بیشینه‌ی جابه‌جایی بام با افزودن بام سبز گسترده تا ۷/۶٪ افزایش و با افزودن بام سبز فشرده تا حدود ۵۴٪ افزایش یافته است. این مقدار برای میانگین نتایج رکوردهای زمان دوام به ترتیب برای بام سبز گسترده

جدول ۸. نتایج بیشینه‌ی جابه‌جایی بام و برش پایه در قاب‌ها.

نوع سازه	زمان (s)	بیشینه جابه‌جایی بام (m)			برش پایه (kN)		
		تحلیل میانگین رکوردهای زمان دوام	تحلیل میانگین رکوردهای زلزله	درصد اختلاف (α)	تحلیل میانگین رکوردهای زمان دوام	تحلیل میانگین رکوردهای زلزله	درصد اختلاف (α)
قاب با بام معمولی	۲	۰/۰۴۸	۰/۰۴۴	۹/۴۳	۱۱۸/۳۱	۱۰۹/۱۴	۸/۴۰
	۴	۰/۱۰۳	۰/۰۸۶	۲۰/۱۳	۲۳۴/۴۶	۲۱۳/۳۱	۹/۹۱
	۶	۰/۱۴۷	۰/۱۲۵	۱۸/۲۱	۳۳۳/۳۷	۲۹۶/۳۶	۱۲/۴۸
	۸	۰/۱۷۵	۰/۱۶۲	۷/۸۵	۳۷۱/۷۵	۳۵۹/۰۳	۳/۵۴
	۱۰	۰/۱۸۹	۰/۱۹۵	۳/۰۹	۳۹۶/۰۶	۴۰۹/۳۷	۳/۲۵
	۱۲	۰/۱۹۷	۰/۲۲۹	۱۳/۹۵	۴۲۵/۶۶	۴۴۶/۰۸	۴/۵۷
	۱۴	۰/۲۱۵	۰/۲۵۸	۱۶/۶۸	۴۶۸/۱۶	۴۷۷/۱۶	۱/۸۸
	۱۶	۰/۲۴۱	۰/۲۹۴	۱۸/۰۲	۵۲۵/۱۹	۵۰۶/۲۰	۳/۷۵
	۱۸	۰/۲۸۰	۰/۳۲۹	۱۴/۷۴	۵۵۰/۱۶	۵۲۷/۲۵	۴/۳۴
	۲۰	۰/۳۲۲	۰/۳۶۳	۱۱/۰۸	۵۵۰/۲۲	۵۴۹/۵۲	۰/۱۲
قاب با بام سبز گسترده	۲	۰/۰۵۳	۰/۰۴۷	۸/۶۸	۱۲۳/۶۲	۱۲۵/۰۱	۱/۱۱
	۴	۰/۱۱۳	۰/۰۹۱	۲۳/۹۳	۲۴۹/۰۴	۲۳۶/۴۲	۵/۳۳
	۶	۰/۱۶۶	۰/۱۳۰	۲۷/۹۳	۳۴۴/۶۱	۳۲۰/۸۷	۷/۳۹
	۸	۰/۱۸۶	۰/۱۷۰	۹/۵۳	۳۸۴/۹۵	۳۷۹/۸۶	۱/۳۳
	۱۰	۰/۱۹۱	۰/۲۰۶	۷/۳۲	۴۰۳/۱۷	۴۲۴/۳۴	۴/۹۸
	۱۲	۰/۱۹۲	۰/۲۴۳	۲۱/۱۶	۴۲۶/۷۵	۴۵۴/۰۶	۶/۰۱
	۱۴	۰/۲۰۶	۰/۲۷۷	۲۵/۶۳	۴۵۱/۹۳	۴۸۴/۹۴	۶/۸۰
	۱۶	۰/۲۴۵	۰/۳۰۹	۲۰/۵۲	۵۱۵/۰۵	۵۱۴/۲۵	۰/۱۵
	۱۸	۰/۲۸۰	۰/۳۴۲	۱۸/۱۵	۵۴۱/۷۸	۵۳۹/۲۲	۰/۴۷
	۲۰	۰/۳۱۳	۰/۳۸۲	۱۷/۹۶	۵۴۱/۸۶	۵۶۱/۹۲	۳/۵۷
قاب با بام سبز فشرده	۲	۰/۰۶۳	۰/۰۵۶	۱۲/۹۳	۱۳۰/۰۹	۱۲۴/۸۷	۴/۱۷
	۴	۰/۱۲۹	۰/۱۱۲	۱۵/۳۳	۲۶۳/۷۵	۲۳۸/۲۴	۱۰/۷۰
	۶	۰/۱۸۱	۰/۱۶۳	۱۰/۷۹	۳۸۴/۱۸	۳۲۱/۸۸	۸/۱۶
	۸	۰/۲۱۰	۰/۲۰۸	۰/۹۶	۴۰۸/۹۹	۳۷۵/۰۱	۹/۰۵
	۱۰	۰/۲۴۵	۰/۲۵۲	۲/۷۴	۴۳۵/۲۷	۴۱۱/۶۶	۵/۷۳
	۱۲	۰/۳۱۹	۰/۲۹۴	۸/۲۹	۴۵۸/۷۸	۴۴۶/۳۷	۲/۷۷
	۱۴	۰/۳۳۹	۰/۳۴۱	۰/۶۷	۴۹۹/۸۹	۴۸۰/۳۳	۴/۰۷
	۱۶	۰/۳۵۶	۰/۴۰۵	۱۲/۰۵	۵۲۳/۷۳	۵۰۹/۷۹	۲/۷۳
	۱۸	۰/۴۳۳	۰/۴۸۰	۹/۶۳	۵۳۴/۶۲	۵۳۹/۳۸	۰/۸۸
	۲۰	۰/۴۸۱	۰/۵۶۰	۱۴/۱۶	۵۴۰/۱۹	۵۶۳/۹۶	۴/۲۱

تحلیل زمان دوام و تحلیل تاریخی‌چهی زمانی حاصل از عدم تطبیق کامل طیف پاسخ شتاب‌نگاشت‌ها و رکوردهای زلزله در سطوح مختلف تحریک و همچنین حاصل از میانگین‌گیری متفاوت روش زمان دوام با میانگین‌گیری متداول نتایج تحلیل تاریخی‌چهی زمانی بوده است. همچنین در سطوح تحریک پایین، که معادل زمان‌های ابتدایی رکوردهای زمان دوام هستند، تعداد چرخه‌های جابه‌جایی ایجاد شده توسط رکورد زمان دوام کمتر از رکوردهای زلزله بوده است. از طرفی، استفاده‌ی مستقیم از شتاب‌نگاشت‌های زلزله به علت ماهیت تصادفی زلزله و تنوع ساخت‌گاه و استفاده

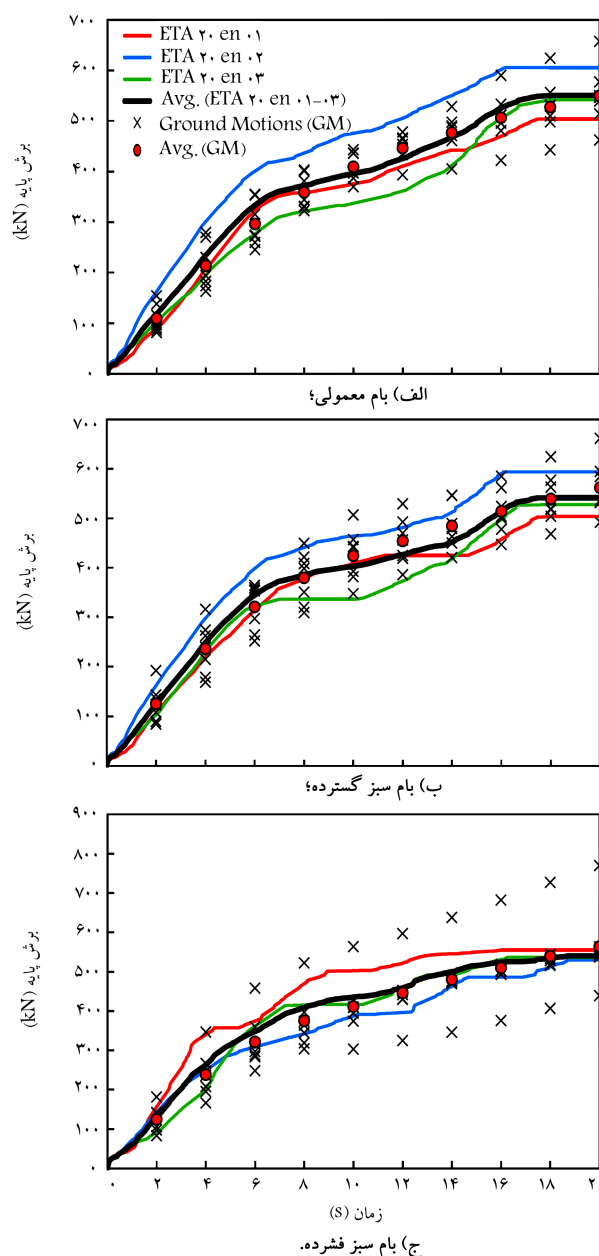
می‌شود، که مطابق آن، منحنی‌های زمان دوام با بیشینه‌ی نتایج حاصل از تحلیل رکوردهای زلزله، در بیشتر سطوح تحریک تطابق خوبی داشته‌اند. در جدول ۸، میزان درصد اختلاف بین نتایج تحلیل رکوردهای زمان دوام و رکوردهای زلزله برای برش پایه در سطوح مختلف تحریک ارائه شده است. با توجه به نتایج، بیشترین درصد اختلاف برای قاب با بام معمولی در سطح تحریک ۶ ثانیه برابر با ۱۲/۴۸٪، برای قاب با بام سبز گسترده در سطح تحریک ۶ ثانیه برابر با ۷/۳۹٪ و برای قاب با بام سبز فشرده، در سطح تحریک ۴ ثانیه برابر با ۱۰/۷۰٪ بوده است. اختلاف نتایج



شکل ۱۱. بیشینه تغییر مکان نسبی در طبقات مختلف تا مدت زمان ۱۰ ثانیه.

تخمین زده شده است. در شکل ۱۱ - ج، بیشینه تغییر مکان نسبی در قاب با بام سبز فشرده برای میانگین رکوردهای زلزله در طبقه پنجم و برای میانگین رکوردهای زلزله در طبقه چهارم مشاهده می شود. به طور کلی در بام های معمولی و سبز گسترده، نتایج حاصل از میانگین رکوردهای زلزله و زمان دوام برای بیشینه جابه جایی نسبی طبقات، همخوانی خوبی دارند؛ ولی در بام سبز فشرده، همخوانی ذکر شده کاهش پیدا کرده است. به نحوی که نتایج در طبقه پنجم برای بام معمولی در حدود ۱۲٪، برای بام سبز گسترده در حدود ۱۶٪ و برای بام سبز فشرده ۲۰٪ تفاوت داشته اند.

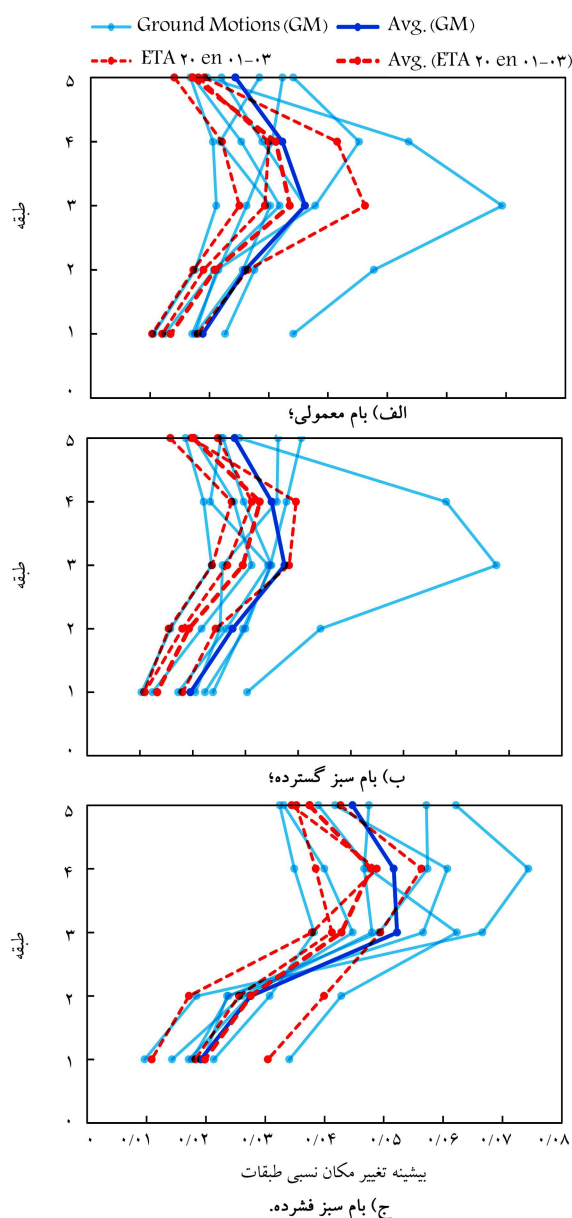
در شکل ۱۲، بیشینه تغییر مکان نسبی به دست آمده از تحلیل زمان و رکوردهای زلزله برای هر سه قاب بررسی شده، در زمان ۲۰ ثانیه در طبقات مختلف مشاهده می شود. در شکل ۱۲ - الف، بیشینه تغییر مکان نسبی در قاب با بام



شکل ۱۲. منحنی های زمان دوام و نتایج تحلیل رکوردهای زلزله در سطوح مختلف تحریک برای برش پایه.

از شتاب نگاشت های مصنوعی زمان دوام (مقاومت با ماهیت شتاب نگاشت های زلزله های طبیعی) می تواند منجر به اختلاف نتایج میان تحلیل زمان دوام و تحلیل تاریخی زمانی شود.

در شکل ۱۱، بیشینه تغییر مکان نسبی به دست آمده از رکوردهای زمان دوام و زلزله برای هر سه قاب با بام های: معمولی، سبز گسترده و سبز متمرکز در زمان هدف برای طبقات مختلف مشاهده می شود. در شکل ۱۱ - الف، بیشینه تغییر مکان نسبی در قاب با بام معمولی، برای میانگین رکوردهای زلزله و زمان دوام به ترتیب در طبقه های چهارم و سوم مشاهده می شود. در شکل ۱۱ - ب، بیشینه تغییر مکان نسبی به دست آمده از هر دو تحلیل توابع زمان دوام و رکوردهای زلزله برای قاب با بام سبز گسترده در طبقه چهارم مشاهده می شود و زمان دوام طبقه درست



شکل ۱۲. بیشینه تغییر مکان نسبی در طبقات مختلف تا مدت زمان ۲۰ ثانیه.

معمولی برای میانگین رکوردهای زلزله و رکوردهای زمان دوام در طبقه سوم مشاهده می‌شود و زمان دوام، طبقه درست را تخمین زده است. همچنین نتایج در طبقات مختلف تطابق خوبی با یکدیگر دارند. در شکل ۱۲ - ب مشاهده می‌شود که بیشینه تغییر مکان نسبی در قاب با بام سبز گسترده برای میانگین رکوردهای زلزله و رکوردهای زمان دوام به ترتیب در طبقه‌های سوم و چهارم بوده است. در شکل ۱۲ - ج، بیشینه تغییر مکان نسبی برای میانگین رکوردهای زلزله و رکوردهای زمان دوام

به ترتیب در طبقه‌های سوم و چهارم مشاهده می‌شوند. افزودن بام سبز، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات را در قاب مذکور افزایش می‌دهد. برای مثال، با توجه به نتایج میانگین رکوردهای زلزله، بیشینه جابه‌جایی نسبی طبقات در طبقه سوم با افزودن بام سبز گسترده در حدود ۴٪ افزایش و با افزودن بام سبز فشرده در حدود ۴۵٪ افزایش یافته است. این مقدار برای میانگین نتایج رکوردهای زمان دوام به ترتیب برای بام سبز گسترده، ۱۲٪ کاهش و برای بام سبز فشرده، ۲۷٪ افزایش یافته است. نتایج نشان داده است که روش زمان دوام همیشه در جهت اطمینان تخمین نمی‌زند.

۷. نتیجه‌گیری

هدف از مطالعه حاضر، بررسی قابلیت روش زمان دوام در ارزیابی لرزه‌یی یک قاب خمشی فولادی متوسط در یک ساختمان متداول ۵ طبقه دارای بام سبز بوده است. برای این منظور یک قاب خمشی ۵ طبقه با بام‌های: معمولی، سبز گسترده و سبز فشرده مدل‌سازی شده و تحت توابع زمان دوام و رکوردهای زلزله در سطوح مختلف شدت تحریک، تحلیل تاریخچه‌ی زمانی شده است. در مطالعه حاضر، ۲۱۰ تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای ۷ رکورد زلزله در سطوح مختلف شدت تحریک و ۹ تحلیل تاریخچه‌ی زمانی غیرخطی برای ۳ رکورد زمان دوام انجام شده است. بنابراین می‌توان دریافت که روش زمان دوام هزینه‌های محاسباتی را به میزان قابل توجهی کاهش داده است. مطابق با آیین‌نامه‌ی ۱۶-ASCE بام سبز گسترده در سازه‌ی مورد بررسی، نامنظمی جرمی ایجاد نکرده است. ولی افزودن بام سبز فشرده، در سازه‌ی مورد بررسی باعث نامنظمی جرمی شده است. مقایسه‌ی بین نتایج حاصل از رکوردهای زلزله و توابع شتاب زمان دوام نشان می‌دهد که در سازه‌ی مذکور، روش زمان دوام، برش پایه با دقت خیلی بهتری نسبت به بیشینه جابه‌جایی بام به دست آورده و توانسته است روش زمان دوام نتایج برش پایه را با اختلاف کمتر از ۱۲/۵٪ تخمین بزند. همچنین نتایج بیشینه جابه‌جایی بام کمتر از ۲۸٪ اختلاف داشته‌اند. در مطالعه حاضر، میانگین نتایج رکوردهای زمان دوام نتوانسته‌اند بیشینه تغییر مکان نسبی را برای همه‌ی حالت‌ها در طبقه درست تخمین بزنند. همچنین نتایج زمان دوام در سازه‌ی مذکور در بعضی از پارامترها و شدت‌ها دست بالاتر و در بعضی دیگر دست پایین‌تر به دست آمده است، بنابراین در مطالعه‌ی حاضر نمی‌توان روند خاصی را برای نتایج زمان دوام در نظر گرفت.

نتایج نشان می‌دهد که با افزودن بام سبز فشرده در قاب مورد نظر، جابه‌جایی نسبی طبقات و بیشینه جابه‌جایی بام، به میزان قابل توجهی افزایش یافته است؛ بنابراین، تأثیر چشمگیری در رفتار لرزه‌یی قاب اخیر داشته است. همچنین مطابق با نتایج به دست آمده، افزودن بام سبز گسترده، تغییرات اندکی را در رفتار لرزه‌یی قاب مورد بررسی ایجاد کرده است. شایان ذکر است که نتایج به دست آمده فقط برای ساختمان مذکور صادق است و نتایج را برای سازه‌های دیگر نمی‌توان تعمیم داد. در پایان برای نتیجه‌گیری جامع‌تر، ارزیابی سیستم‌های مختلف سازه‌یی با تعداد طبقات متفاوت و همچنین استفاده از سایر توابع شتاب زمان دوام لازم است.

پانویس‌ها

1. Carmody
2. Bianchini

3. Welsh
4. Jenna
5. endurance time
6. ETABS
7. ANSYS

8. intensive green roof
9. extensive green roof
10. von mises

منابع (References)

1. Korol, E. and Shushunova, N. "Benefits of a modular green roof technology", *Procedia Engineering*, **161**, pp. 1820-1826 (2016).
2. FLL, "Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofing", *Green Roofing Guideline* (2018).
3. ASTM E2777-20, "Standard guide for vegetative (green) roof systems", *ASTM International* (2020).
4. Carmody, M., Jasarevic, M., Omenzetter, P. and et al. "Seismic response of green roofs", *In 2009 New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference* (2009).
5. Bianchini, F., Haque, A., Hewage, K. and et al. "Influence of green roofs on the seismic response of frame structures", *Earthquakes and Structures*, **11**(2), pp. 265-280 (2016).
6. Welsh-Huggins, S.J. and Liel, A.B. "A life-cycle framework for integrating green building and hazard-resistant design: examining the seismic impacts of buildings with green roofs", *Structure and Infrastructure Engineering*, **13**(1), pp. 19-33 (2017).
7. Tam, S. and Wong, J. "Seismic response of a 3-story green roof steel structure", *The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19)*, Jeju Island, Korea (17 - 21 Sept 2019).
8. Mashayekhi, M., Estekanchi, H.E., Vafai, A. and et al. "Simulation of cumulative absolute velocity consistent endurance time excitations", *Journal of Earthquake Engineering*, **45**, pp. 1-26 (2018).
9. Hariri-Ardebili, M., Zarringhalam, Y., Estekanchi, H. and et al. "Nonlinear seismic assessment of steel moment frames using time-history, incremental dynamic, and endurance time analysis methods", *Scientia Iranica*, **20**(3), pp. 431-444 (2013).
10. Shirkhani, A., Mualla, I.H., Shabakhty, N. and et al. "Behavior of steel frames with rotational friction dampers by endurance time method", *Journal of Constructional Steel Research*, **107**, pp. 211-222 (2015).
11. Chiniforush, A.A., Estekanchi, H. and Dolatshahi, K.M. "Application of endurance time analysis in seismic evaluation of an unreinforced masonry monument", *Journal of Earthquake Engineering*, **21**(2), pp. 181-202 (2017).
12. Dastan Diznab, M.A., Mehdigholi, H. and Seif, M.S. "Seismic performance assessment of fixed offshore structures by endurance time method", *Ships and Offshore Structures*, **14**(7), pp. 709-722 (2019).
13. Avanaki, M.J., Abedi, M. and Estekanchi, H.E. "Seismic response of infilled steel braced frames by endurance time analysis", *Asian Journal of Civil Engineering*, **21**(4), pp. 611-624 (2020).
14. Mohsenian, V., Gharaei-Moghaddam, N. and Hajirasouliha, I. "Seismic performance assessment of tunnel form concrete structures under earthquake sequences using endurance time analysis", *Journal of Building Engineering*, **40**, pp.102327 (2021).
15. Sarcheshmehpour, M., Shabanlou, M., Meghdadi, Z. and et al. "Seismic evaluation of steel plate shear wall systems considering soil-structure interaction", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **145**, pp.106738 (2021).
16. Miri, S., Tajmir Riahi, H. "Optimal performance based seismic design of shear buildings using endurance time method", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **35**,2(2.1), pp. 39-50 , (In Persian) (2019).
17. Shad, E., Amirabadi, R., Sharifi, M. "Comparison of seismic response of pile-supported wharves under endurance time with the other seismic analysis methods, case study of Imam Khomeini port". *Iranian Journal of Marine Technology*, **7**(1), pp.87-101, (In Persian) (2020).
18. Dastan, M.A. "Green roof, design and construction" Arak university, 1st edition (2020).
19. www.razheh.com
20. www.bagheketab.com
21. BHRC. Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. Standard no. 2800-05. 4th ed. Building and Housing Research Center.
22. ASCE/SEI 7-16, "Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures", *American Society of Civil Engineers* (2016).
23. Chopra, A.K. "Dynamics of structures theory and applications to earthquake engineering", *5th Edition* (2020).
24. <https://sites.google.com/site/etmethod>