

DOI: 10.48303/bese.2024.2031437.1167

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

بادگیرها عناصر معماری منحصر به فردی هستند که با هدف تنظیم شرایط محیطی در معماری گذشته کشورمان و به ویژه خانه‌های تاریخی شهر یزد استفاده می‌شده‌اند. علیرغم ارزش تاریخی و کارکردی این عناصر، رفتار دینامیکی سازه آنها مورد مطالعه چندانی قرار نگرفته است. انجام آزمون‌های شناخت ویژگی‌های دینامیکی بر روی سازه‌های تاریخی باید با آسیب حداقل به این سازه‌ها همراه باشد. به همین دلیل در سال‌های اخیر استفاده از آزمون غیر مخرب ارتعاش محیطی مبتنی بر تنها پاسخ و نه عامل تحریک، برای شناخت رفتار واقعی دینامیکی این نوع از سازه‌ها گسترش یافته است. بر این اساس، هدف مقاله حاضر شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه بادگیر از طریق تعیین فرکانس‌های طبیعی، شکل مودی و نسبت میرایی موده‌های مختلف دینامیکی با انجام آزمون ارتعاش محیطی است که به این منظور آزمون مذکور بر روی دو نمونه منتخب از بادگیرهای خانه‌های قاجاری شهر یزد انجام شد. قبل از انجام آزمون، به منظور تخمین شکل موده‌های سازه‌ها جهت تعیین نقاط نصب شتاب‌سنج‌ها، تحلیل مقادیر ویژه بر روی مدل اجزای محدود هر دو سازه انجام شد. در نهایت تحلیل مودال عملیاتی بر روی نتایج آزمایش در نرم‌افزار آرتیمیس و با استفاده از دو روش مبتنی بر جستار قله در حوزه فرکانس و یک روش شناسایی زیر فضای تصادفی در حوزه زمان، انجام شد و ویژگی‌های مودال استخراج و نتایج با هم مقایسه شدند.

واژگان کلیدی: آزمون ارتعاش محیطی، تحلیل مودال عملیاتی، زیر فضای تصادفی، نرم‌افزار آرتیمیس، یزد.

شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه بادگیر بر اساس تحلیل حوزه فرکانس و حوزه زمان داده‌های آزمایشگاهی

حامد عزیزی بندرآبادی

استادیار، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران،
hamed.azizi@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

قرار گرفته است. بادگیر به‌عنوان یکی از عناصر شاخص و هویت‌ساز معماری شهر یزد، به یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر نیمرخ کلی شهر و هویت‌بخش به نظام ریخت‌شناسی بافت تاریخی تبدیل شده است.

ارتفاع بلند بادگیر، نسبت لاغری (نسبت ارتفاع به ابعاد پلان) بزرگ، جداره‌های نازک و جزئیات ساخت آنها به‌خصوص در نواحی اتصال اجزای تشکیل‌دهنده آن با یکدیگر و با اندام‌های اصلی بنا به‌گونه‌ای است که این عناصر با ارزش را در برابر تکانه‌های ناشی از زمین‌لرزه و بادهای شدید آسیب‌پذیر می‌کند. این در حالی است که عمده تحقیقات در حوزه بادگیر به

بادگیر یکی از عناصر شاخص در معماری ایرانی و از اجزای اصلی مرتبط با تمهیدات معمارانه در بناهای بومی اقلیم گرم و خشک و گرم و مرطوب نه تنها در ایران، بلکه در سرتاسر خاورمیانه و کشورهایمانند مصر، پاکستان، افغانستان، عراق و امارات متحده عربی است (Yarshater, 1989) که به‌منزله سیستم سرمایشی ایستا تهویه مطبوع را با استفاده از انرژی تجدیدپذیر باد فراهم می‌آورد. شناخته‌شده‌ترین نمونه استفاده از بادگیر در معماری ایرانی مربوط به خانه‌های بافت تاریخی شهر یزد است که به‌عنوان یک مجموعه شهری شاخص و منحصر به فرد از سال ۱۳۹۶ مورد ثبت در حافظه میراث بشری نیز

آن به سازه، برای بررسی رفتار دینامیکی سازه‌های تاریخی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است. در این آزمون، ارتعاشاتی که عوامل طبیعی همچون لرزه‌های بسیار خفیف زمین، باد، ترافیک و حرکت مردم مسبب آن هستند، باعث می‌شوند که سازه در مودهای مختلف آن به ارتعاش درآید. با اندازه‌گیری پاسخ سازه در برابر این ارتعاشات با حس‌گرهای شتاب‌سنج بسیار حساس و تحلیل آنها می‌توان خواص دینامیکی سازه را بدون نیاز به لرزاننده‌های بزرگ و قوی به دست آورد.

عمده کارهای انجام‌شده در این حوزه برای سازه‌های تاریخی، مربوط به بررسی رفتار دینامیکی برج‌ها (Altunişik et al., 2016; Bayraktar et al., 2009; D'Ambrisi et al., 2012; Foti et al., 2012) و پل‌های تاریخی (Pachón et al., 2018; Roselli et al., 2019; Sánchez-Aparicio et al., 2018) است؛ هرچند سازه‌های ساختمانی تاریخی نیز در مراجعی مانند (Gara et al., 2023; Karanikoloudis & Lourenço, 2018; Lorenzoni et al., 2019; Michel et al., 2018; Ozcelik et al., 2022) مطالعه شده‌اند. از این روش در کشور ما بیشتر برای سازه‌های زیرساختی مانند سد و پل استفاده شده است (Jafari et al., 2003; Lameie et al., 2015; Yadegari & Bahar, 2010). ولی در سال‌های اخیر سازه‌های تاریخی نیز مورد آزمون ارتعاش محیطی قرار گرفته‌اند (Aghabeigi & Farahmand-Tabar, 2021; Ashayeri et al., 2021; Kabir, 2012; Nami, 2019; Parvizi Milani, 2012; Saber, 2022). این در حالی است که مرور ادبیات تحقیق نشان می‌دهد که انجام آزمون ارتعاش محیطی بر روی عناصر تاریخی مانند بادگیر مسبق به سابقه نیست.

انجام تحلیل مودال عملیاتی^۳ با استفاده از نتایج آزمون ارتعاش محیطی مستلزم در اختیار داشتن روش‌هایی است که شناسایی سیستم یا همان استخراج ویژگی‌های مودال را بر اساس داده‌های خروجی (پاسخ سازه) با دامنه بسیار کوچک و بدون داشتن اطلاعاتی از نیروی ورودی انجام دهند. این روش‌ها به دو دسته کلی حوزه فرکانس و حوزه زمان تقسیم‌بندی می‌شوند که در اولی بر پایه داده‌های تابع پاسخ فرکانسی و در دومی از اطلاعات

مطالعات معماری و گونه‌شناسی (Hoseini, 2020; Mahmoudi & Mofidi, 2008; Pourahmadi & Ayatollahi, 2011; Poursalman, 2020; Roaf, 1988) و بررسی کارکردهای تهویه و سرمایش طبیعی بادگیر (Bahadori, 1978; Dehghan et al., 2013; Jomehzadeh et al., 2020; Jomehzadeh et al., 1996; Mahyari, 2017) می‌پردازد و مطالعات سازه‌ای سهم بسیار ناچیزی از این تحقیقات دارد (به‌عنوان تنها نمونه یافته شده توسط نویسندگان رجوع شود به (Hejazi & Hejazi, 2014)).

بنا بر توصیه مشورها و ضوابط بین‌المللی حفاظت از ابنیه تاریخی (ICOMOS/ISCARSAH, 2003)، فرآیند ارزیابی رفتار سازه‌ای آنها باید با رعایت کامل اصل حداقل مداخله در بنا همراه باشد. بنابراین استفاده از آزمون‌های مخرب و نیمه‌مخرب در مورد ابنیه تاریخی با محدودیت‌های جدی روبرو است. بر این اساس در دهه اخیر استفاده از مجموعه آزمون‌های غیرمخرب شناخت و ویژگی‌های دینامیکی^۱ با هدف تعیین فرکانس طبیعی و شکل مودی مودهای مختلف دینامیکی سازه‌های تاریخی مورد توجه جدی محققین قرار گرفته‌اند. آزمون‌های شناخت ویژگی‌های دینامیکی، به‌عنوان ابزاری جهت شناخت رفتار واقعی سازه، به سه روش کلی: الف) آزمون‌های ارتعاشی ورودی/خروجی، که در آنها سازه ابتدا تحریک شده و سپس پاسخ ارتعاشی آن اندازه‌گیری می‌شود؛ ب) آزمون‌های ارتعاش آزاد که در آنها سازه تحت اثر یک جابجایی اولیه قرار گرفته و سپس به‌سرعت رها شده و پاسخ آن ثبت می‌شود؛ پ) آزمون‌های تنها خروجی یا ارتعاش محیطی^۲، که در آنها تنها پاسخ ارتعاشات سازه تحت تأثیر شرایط بهره‌برداری و تحریک‌های محیطی اندازه‌گیری می‌شود؛ انجام می‌شوند (Ramos, 2007).

از بین این سه روش، در دو روش اول سازه باید به‌وسیله ابزارهای مصنوعی مانند وزنه‌های سقوط‌کننده و یا لرزاننده‌ها تحریک شود که علاوه بر صرف هزینه و نیاز به تجهیزات، برای استفاده روی سازه‌های تاریخی می‌تواند آسیب‌زننده به بنا هم باشند. آزمون ارتعاش محیطی، به دلیل حداقل بودن میزان آسیب

بهترین محل برای نصب حس گرهای شتاب‌سنج، قبل از انجام آزمون مدل اولیه اجزای محدود هر دو سازه در نرم‌افزار دینانا نسخه ۴/۱۰/۵ (DIANA FEA BV, 2021) ساخته و تحلیل مقادیر ویژه انجام شد. در نهایت بر پایه نتایج آزمایش، با استفاده از نرم‌افزار آرتیمیس نسخه ۵/۹/۰ (ARTEMIS, 2019) سازه‌ها تحت تحلیل مودال عملیاتی قرار گرفتند. جهت مقایسه بهتر بین راه‌حل‌های متنوع شناسایی سیستم، از روش‌های حوزه فرکانس، دو الگوریتم تجزیه دامنه فرکانسی (FDD)^۶ و تجزیه دامنه فرکانسی پیشرفته (EFDD)^۷ مبتنی بر جستار قله و از روش‌های حوزه زمان، روش مؤلفه اصلی بی‌وزن تعمیم‌یافته (UPCX-SSI)^۸ مبتنی بر شناسایی زیر فضای تصادفی (SSI)^۹ استفاده و مقایسه نتایج انجام شد.

۲- مشخصات نمونه‌های موردی انتخاب شده

دو نمونه بادگیر مورد مطالعه در این مقاله متعلق به خانه‌های تاریخی شفیع‌پور و کرمانی واقع در محدوده ثبت شده میراث جهانی بافت تاریخی شهر یزد هستند که طی سالیان اخیر به مجموعه دانشکده هنر و معماری دانشگاه یزد ملحق شده‌اند (شکل ۱). هر دو خانه اصالتاً دارای قدمت قاجاری و جزو خانه‌های دو حیاطه یزد شامل حیاط‌های اندرونی و بیرونی هستند. بادگیر هر دو بنا، به‌ویژه خانه شفیع‌پور، جزو مرتفع‌ترین بادگیرهای خانه‌های سنتی شهر یزد هستند و از این لحاظ، از نمونه‌های شاخص در میان بادگیرهای واقع در بافت تاریخی شهر یزد محسوب می‌شوند. از این نظر این دو بادگیر در مقابل محرک‌های بیرونی باد و زلزله آسیب‌پذیرتر خواهند بود. این در حالی است که قرار گرفتن این عناصر تاریخی در مجموعه دانشکده هنر و معماری دانشگاه یزد لزوم ارزیابی عملکرد دینامیکی سازه آنها را با توجه به نوع کاربری دوچندان می‌کند. از نظر ساختاری، این دو بادگیر بدون آسیب و ترک خوردگی مشهود هستند که باعث می‌شود تا نتایج آزمون ارتعاش محیطی تحت تأثیر ترک‌های موجود قرار نگرفته و با دقت بالاتری رفتار واقعی دینامیکی سازه را نشان دهد.

مربوط به پاسخ زمانی، مقدار سختی، جرم و میرایی سازه تخمین زده می‌شود. در شناسایی سیستم با استفاده از روش‌های حوزه فرکانس، ویژگی‌های مودال سازه با برداشت نقاط حداکثر یا اصطلاحاً جستار قله در دامنه فرکانس تخمین زده می‌شوند. علیرغم سادگی و سرعت بالای پیاده‌سازی روش‌های حوزه فرکانس که باعث محبوبیت زیاد آنها شده است، آنها در تجزیه سیگنال برای سیستم‌هایی با نسبت میرایی بالا، نویز زیاد و مودهای ارتعاشی نزدیک به هم از دقت مناسبی برخوردار نیستند. در مقابل، روش‌های حوزه زمان که در آنها ویژگی‌های مودال به‌طور مستقیم از سری‌های زمانی اندازه‌گیری شده و با خطای بسیار کم محاسبه می‌شوند؛ برای فرکانس‌های با وضوح پایین محدودیت عملکرد ندارند و با تجزیه مقدار منفرد سیگنال در پهنای باند فرکانسی دارای عملکرد بهتری هستند. هر چند برخلاف داده‌های تابع پاسخ فرکانسی که مودهای ارتعاشی تقریباً در آنها قابل مشاهده هستند، ظاهر پاسخ زمانی، مودهای ارتعاشی را نشان نمی‌دهد؛ لذا در این روش مهارت بیشتری مورد نیاز بوده و وجود نویز ممکن است به ایجاد مودهای محاسباتی نادرست و غیرواقعی منجر شود.

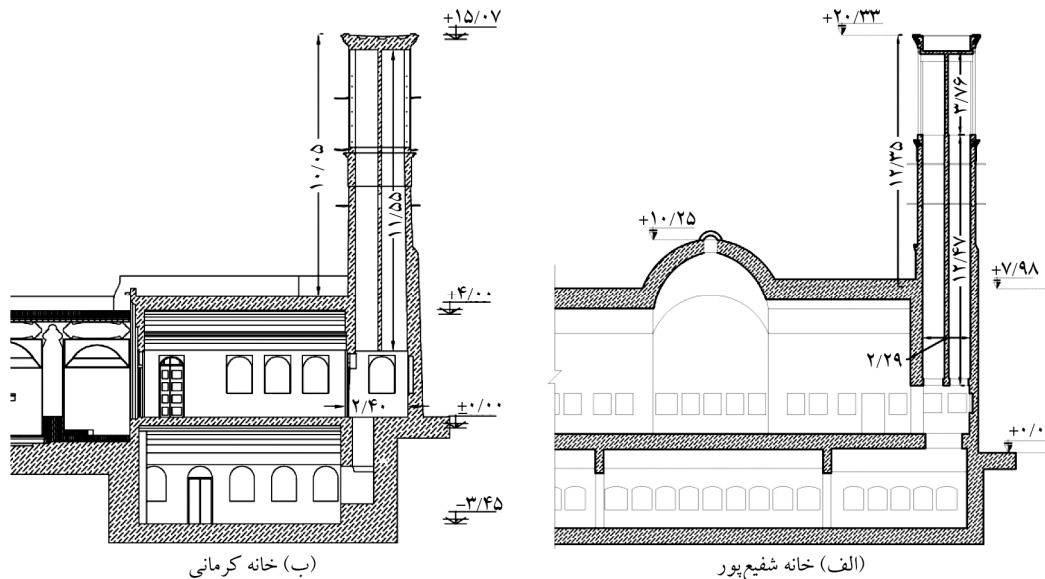
در اکثر مواقع پیش‌فرض‌های ریاضی و داده‌های ارتعاش محیطی به کار گرفته شده در روش‌های مختلف شناسایی سیستم به هم شبیه هستند. اختلاف بین این روش‌ها در مواردی مانند چگونگی حل معادلات و ترتیب عملیات ماتریسی است. در نتیجه نیاز داریم نتایج حاصل از این روش‌ها در سازه‌های واقعی را مقایسه کنیم. در واقع نبودن اختلاف قابل توجه در نتایج شناسایی سیستم به‌دست آمده از روش‌های مختلف می‌تواند دقت نتایج آزمایشگاهی در تخمین رفتار واقعی دینامیکی را تأیید کند. بر این اساس، در مقاله حاضر با هدف تعیین مشخصات واقعی دینامیکی سازه بادگیر شامل فرکانس طبیعی، شکل مودی و نسبت میرایی مودهای مختلف بدون آسیب رساندن به سازه، دو بادگیر متعلق به خانه‌های قاجاری کرمانی و شفیع‌پور از مجموعه دانشکده هنر و معماری دانشگاه یزد به‌عنوان نمونه‌های موردی انتخاب و آزمون غیرمخرب ارتعاش محیطی بر روی آنها انجام شد. جهت تخمین اولیه تغییر شکل سازه در مودهای مختلف و در نتیجه پیدا کردن



(ب) بادگیر خانه کرمانی

(الف) بادگیر خانه شفیع پور

شکل (۱): تصاویر سازه‌های مورد مطالعه از دو نما.



(ب) خانه کرمانی

(الف) خانه شفیع پور

شکل (۲): جزئیات مقطع طولی خانه برای بادگیرهای (الف) خانه شفیع پور و (ب) خانه کرمانی.

دیوارهای خشتی هستند. در بادگیر خانه شفیع پور، بعد بلندتر پلان رو به شمال غرب و جنوب شرق است و بعد کوتاه‌تر آن رو به سمت شمال شرق و جنوب غرب دارد. با توجه به شکل (۲)، این بادگیر بر روی فضای تالار اصلی خانه، دارای سقفی مسطح، ارتفاع از بام ۱۲/۳۵ متر و ارتفاع از بالای اتاقک زیر بادگیر در طبقه همکف ۱۶/۲۳ متر است. بادگیر خانه کرمانی در جبهه جنوب شرقی (متماثل به شرق) این خانه واقع شده است. فضای زیرین آن، اتاق بزرگ سه‌دوری با سه پنجره به سمت حیاط است. این بادگیر با زیرزمین ارتباط دارد. بعد بلندتر آن رو به شمال غربی و جنوب شرقی است، ولی بازشوهای کمتری رو به این جهت‌ها

علاوه بر این در روند مرمت‌های صورت گرفته در سال‌های اخیر، ساختار کالبدی بادگیرها به دلیل عدم وجود آسیب و ترک خوردگی مشهود، مورد مداخلات سازه‌ای جدی قرار نگرفته است. مجموع این موارد باعث شد تا بادگیرهای یاد شده از بین صدها نمونه موجود مناسب لازم برای قرار گرفتن در فهرست نمونه‌های موردی پژوهش حاضر را داشته باشند.

هر دو بادگیر از چهار طرف باد را دریافت می‌کنند و دارای شش کانال در تمام قسمت‌ها (دهانه و ساقه) هستند. فرم پلان آنها مستطیل شکل و تیغه‌های داخلی عمود بر هم هستند. هر دو سازه مورد مطالعه دارای تزئیناتی از جنس آجر، نمای کاهگلی و

وزش باد طبیعی انجام می‌شود و لرزش آن در نقاط مختلفی به‌وسیله چندین حس گر شتاب‌سنج به‌صورت هم‌زمان اندازه‌گیری می‌شود. در این حالت در مقایسه با عوامل تحریک دیگر مانند بارهای ترافیکی و رفت‌وآمد افراد، ارتعاش سازه خیلی ضعیف بوده و لذا به‌کارگیری حس گرهای حساس الزامی است. این مسئله برای سازه‌های مصالح بنایی با فرکانس طبیعی زیاد مانند بادگیر به نسبت سازه‌های سد، پل و یا ساختمان‌های چند طبقه که آزمایش‌های ارتعاش محیطی معمولاً برای آنها انجام می‌شوند، بیشتر مطرح است. از طرفی با توجه به نو بودن دانش تولید این نوع از حس گرها در کشور، در مورد بادگیر خانه شفیق‌پور و در حین انجام آزمایش حساسیت حس گرها برای ثبت تحریک باد کم تشخیص داده شد و لذا سازه با روش تحریک محیطی غیرمخرب دیگری یعنی راه رفتن در امتداد ضلع بام بادگیر تحریک شده و ارتعاشات آن ثبت و سپس تحلیل شد.

به‌منظور ثبت پاسخ سازه با محرک وزش باد طبیعی، حس گرهای شتاب‌سنج با حساسیت بالاتر سفارش داده شدند و توسط شرکت مربوطه تهیه شدند. این نوع از شتاب‌سنج‌ها موسوم به شتاب‌سنج‌های شبکه (VibNet 354) (شکل ۳-الف) در آزمایش بادگیر خانه کرمانی مورد استفاده قرار گرفتند. شتاب‌سنج‌های شبکه با قابلیت‌های خاص برای کاربردهای صنعتی و تحقیقاتی توسعه داده شده‌اند. با توجه به نویز کم و بازه دمایی گسترده این حس گرها، اندازه‌گیری دقیق ارتعاشات در یک شبکه زنجیره‌ای امکان‌پذیر خواهد بود.

دارد و بُعد کوتاه‌تر آن رو به سمت شمال شرقی و جنوب غربی است. سقف این بادگیر نیز مسطح، ارتفاع آن از بام ۱۰/۰۵ متر و ارتفاع آن از اتاقک زیر بادگیر ۱۱/۵۵ متر است (Aziz- Bondarabadi & Sadeghi, 2024; Emadian Razavi, 2018).

۳- آزمون ارتعاش محیطی

برای انجام آزمون ارتعاش محیطی از شتاب‌سنج‌های سه‌جهته MEMS ساخت شرکت دیده‌پرداز صبا (Didepardaz Saba, 2023) که مشخصات آنها در جدول (۱) آمده، استفاده شد. شتاب‌سنج‌های MEMS نسبت به شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک ارزان‌تر و دارای تنوع بیشتری در نوع خروجی می‌باشند و مزیت بسیار مهم این شتاب‌سنج‌ها (به دلیل خروجی دیجیتال) عدم نیاز به آنالایزر سیگنال برای دریافت سیگنال در کامپیوتر یا PLC است که هزینه تجهیزات اندازه‌گیری را بسیار کاهش خواهد داد. در آزمایش بادگیر خانه شفیق‌پور شتاب‌سنج‌های مینیاتوری (VibNet 344) (شکل ۳-الف) مورد استفاده قرار گرفتند. این نوع حس گرها بهترین انتخاب برای اندازه‌گیری هم‌زمان ارتعاشات و همچنین تحلیل مودال در سازه‌های سبک هستند. به دلیل جرم کم و ابعاد کوچک، این شتاب‌سنج‌های سه‌محوره کمترین اثر را بر روی مشخصات سازه و ارتعاشات آن دارند.

برنامه اولیه انجام آزمایش‌ها، ارتعاش سازه بادگیر تحت شرایط طبیعی وزش باد بود. در این روش تحریک سازه صرفاً از طریق

جدول (۱): مشخصات شتاب‌سنج‌های سه‌جهته مورد استفاده.

نوع حس گر	شتاب‌سنج سه‌جهته مینیاتوری (VibNet 344)	شتاب‌سنج سه‌جهته شبکه (VibNet 354)
پهنای باند	DC ~ 2000 Hz	DC ~ 1000 Hz
فرکانس نمونه‌برداری	~ 20000 Hz	~ 20000 Hz
محدوده شتاب	± 2/6/20/40 g	± 2/4/8/10/20/40 g
حساسیت	1024 counts/g	14563 counts/g
دمای عملکرد	-20 ~ +70 °C	-20 ~ +70 °C
چگالی نویز	50 ~ 900 µg/√Hz	20 µg/√Hz
وزن	4 gr	80 gr
ابعاد حس گر	19 × 12 × 7 mm	30 × 30 × 33 mm

بادگیر و بام خانه نیز انجام شد. انتخاب تعداد و طراحی چیدمان حس گرها به عنوان موضوعی بسیار مهم در آزمون‌های شناخت دینامیکی سازه مورد توجه قرار می‌گیرد. این امر در مورد سازه‌های مهندسی عمران مانند پل‌ها، استادیوم‌ها، سدها و غیره به دلیل مشارکت جرمی و ابعاد بزرگ چالش‌برانگیزتر می‌شود. چیدمان نامناسب یا تعداد ناکافی حس گرها می‌تواند منجر به داده‌های اشتباه یا اضافی شود. در مورد سازه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، مکان شتاب‌سنج‌ها با توجه به شناسایی حرکات انتقالی سازه، بر اساس نتایج تحلیل مقادیر ویژه مدلهای عددی اولیه در نرم‌افزار دینانا، مطابق جزئیاتی که در ادامه می‌آید، تعیین شد.

سازه مصالح بنایی با ترکیبی از واحدهای بنایی و بندهای افقی و عمودی رفتار سازه‌ای غیرهمسانگرد از خود نشان می‌دهد. مدل‌سازی عددی مصالح بنایی با دو ایده کلی که درجات متفاوتی از پیچیدگی و دقت را ارائه می‌دهند انجام می‌شود: مدل‌سازی به مثابه یک مصالح مرکب یا درشت مدل‌سازی؛ و مدل‌سازی جداگانه هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده یا ریز مدل‌سازی. در این مطالعه، از روش درشت مدل‌سازی به کار گرفته شده در نرم‌افزار اجزای محدود دینانا استفاده شد. در درشت مدل‌سازی فرض می‌شود که مشخصات واحدهای بنایی، ملات بندها و فصل مشترک واحد-ملات در یک المان پیوسته توزیع شده است. به عبارت دیگر مصالح بنایی به صورت یک مصالح همگن و پیوسته، همسانگرد/غیرهمسانگرد شبیه‌سازی می‌شود.

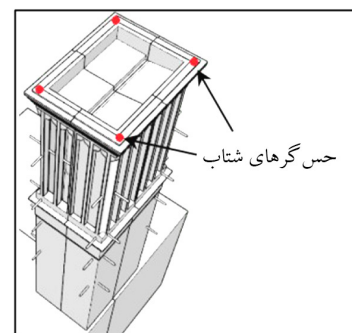
برای تهیه مدل اجزای محدود، ابتدا برداشت میدانی بادگیرها و به‌هنگام‌سازی اطلاعات در دسترس از وضعیت موجود آنها انجام شد. سپس از روی ترسیمات معماری تهیه شده و به کمک عکس‌های گرفته شده از نماهای مختلف، مدل سه‌بعدی آنها کاملاً منطبق بر وضع موجود در نرم‌افزار اتوکد ساخته شد و در نهایت این مدل‌ها به نرم‌افزار دینانا وارد شدند. مدل‌سازی در این نرم‌افزار بیشتر با استفاده از المان سه‌بعدی Solid انجام شد. با توجه به برخی پیچیدگی‌های هندسی موجود، از چهار نوع المان Isoparametric solid هشت، شش، پنج و چهار گرهی به ترتیب



شتاب‌سنج سه‌جهته شبکه
(VibNet 354) استفاده شده
در خانه کرمانی

شتاب‌سنج سه‌جهته مینیاتوری
(VibNet 344) استفاده شده
در خانه شفیق پور

(الف)



(ب) محل قرارگیری شتاب‌سنج‌ها در تراز بام هر دو بادگیر (نقاط قرمز رنگ)



(پ) دستگاه آنالایز ارتعاشات DPS-DAQ

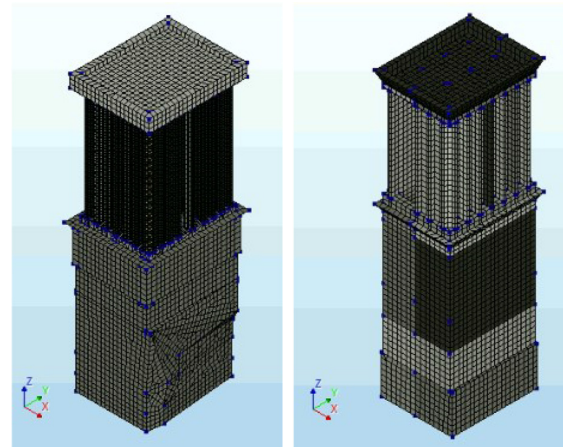
شکل (۳): تجهیزات آزمون ارتعاش محیطی.

قابلیت‌هایی مانند طول زیاد کابل، سرعت بالای انتقال داده‌ها در خروجی و تعداد زیاد نقاط قابل سنجش، آنها را به بهترین گزینه برای اندازه‌گیری سنکرون ارتعاشات سازه‌ها به منظور تحلیل مودال و تحلیل تغییر شکل عملیاتی تبدیل می‌نماید. در بادگیر مذکور تحریک علاوه بر باد از طریق راه رفتن روی بام

مصالح بنایی، تنها به مقادیر ضریب ارتجاعی، وزن مخصوص و ضریب پواسون از مشخصات مکانیکی مصالح نیاز است. با توجه به اینکه هدف از مدل‌سازی عددی در این مرحله تنها تخمین ویژگی‌های مودال سازه و به‌ویژه شکل مودی قبل از انجام آزمون ارتعاش محیطی است، مقدار اولیه‌ای برای ضریب ارتجاعی، وزن مخصوص و ضریب پواسون از یکی از مطالعات آزمایشگاهی موجود بر روی نمونه‌های منشور خشت تهیه شده از خاک منطقه یزد (Meybodian et al., 2020) برابر با به ترتیب ۵۱۰ مگاپاسکال، ۱۶ کیلونیوتن بر متر مکعب و ۰/۲ فرض شد. نتایج تحلیل مقادیر ویژه (شکل ۵) نشان می‌دهد که با توجه به اتصال بادگیر به سقف بام خانه، شکل سه مود اول سازه تا حد زیادی به تغییر شکل لبه آزاد آن (لبه‌های تراز بام سازه) بستگی دارد. به عبارت دیگر سازه در مودهای اول خود تغییر شکل کلی انتقالی (مودهای اول و سوم بادگیر کرمانی و مودهای اول و دوم بادگیر شفیع‌پور) و پیچشی (مود دوم بادگیر کرمانی و مود سوم بادگیر شفیع‌پور) بیشتر ناشی از تغییر شکل تراز بام دارد و تغییر شکل‌های موضعی غالب نیستند. لذا با توجه به محدودیت تعداد حس‌گرهای موجود، در هر دو سازه حس‌گرها در چهارگوشه سقف بادگیر نصب و سپس به روش‌های مختلف تحریک انجام شد (شکل ۳-ب). برای هر کدام از این تحریک‌ها تقریباً در حدود ۳۰۰ ثانیه داده‌برداری انجام و ارتعاشات آن ثبت و ذخیره شد. برای نمونه، پاسخ‌های شتاب در جهت x نسبت به زمان که توسط یکی از حس‌گرهای چهارگانه نصب شده بر روی دو بادگیر ثبت شده‌اند، در شکل (۶) ارائه شده است.

لازم به ذکر است که مدل‌های عددی در این مقاله مدل‌های اولیه‌ای هستند که بر اساس فرض مقادیر ثابتی برای مشخصات مکانیکی مصالح و شرایط مرزی (تکیه‌گاهی) سازه‌ها ایجاد شده‌اند. می‌توان در قالب مطالعات بعدی و با استفاده از نتایج این مقاله، اقدام به صحت‌سنجی مدل‌های عددی نسبت به نتایج آزمایشگاهی (هم از حیث فرکانس و هم شکل مودی) و اصطلاحاً به‌روزرسانی این مدل‌ها (تغییر شرایط تکیه‌گاهی و مشخصات مکانیکی مصالح در قالب یک مسئله بهینه‌یابی تا

TE12L، PY15L، TP18L، HX24L نیز برای مدل‌سازی استفاده شد. شمای کلی از مدل بادگیرها و تعداد المان‌های به‌کاررفته در آنها در شکل (۴) آمده است. در حین انجام آزمون اصلی ارتعاش محیطی بر روی بادگیر شفیع‌پور، یک آزمون مجزا با نصب دو سنسور یکی در محل اتصال بادگیر به سقف خانه و دیگری در تراز بام بادگیر انجام شد. نتایج نشان داد که تغییر مکان نسبی سازه در محل اتصال به پشت‌بام نسبت به بالاترین تراز تقریباً صفر است. با توجه به این موضوع شرایط مرزی در هر دو سازه به‌صورت بستن درجات آزادی انتقالی فرض شد.



بادگیر کرمانی
تعداد المان: ۱۰۲۴۸۳

بادگیر شفیع‌پور
تعداد المان: ۱۱۴۳۲

شکل (۴): مدل‌های اجزای محدود ساخته‌شده در نرم‌افزار دینا از بادگیرهای مورد مطالعه.

تحلیل خطی مودال یا مقادیر ویژه در واقع یک نوع تحلیل دینامیکی سازه n درجه آزادی با ماتریس جرم m ، ماتریس سختی k و ماتریس جابه‌جایی، $u(t)$ ، تحت ارتعاش آزاد است (معادله ۱)، که از بسط نتایج آن و با حل معادله (۲) که به معادله مشخصه معروف است، می‌توان برای هر یک از مودهای دینامیکی سازه، فرکانس و شکل مودی را به‌دست آورد.

$$\underline{m}\ddot{u}(t) + \underline{k}u(t) = 0 \quad (1)$$

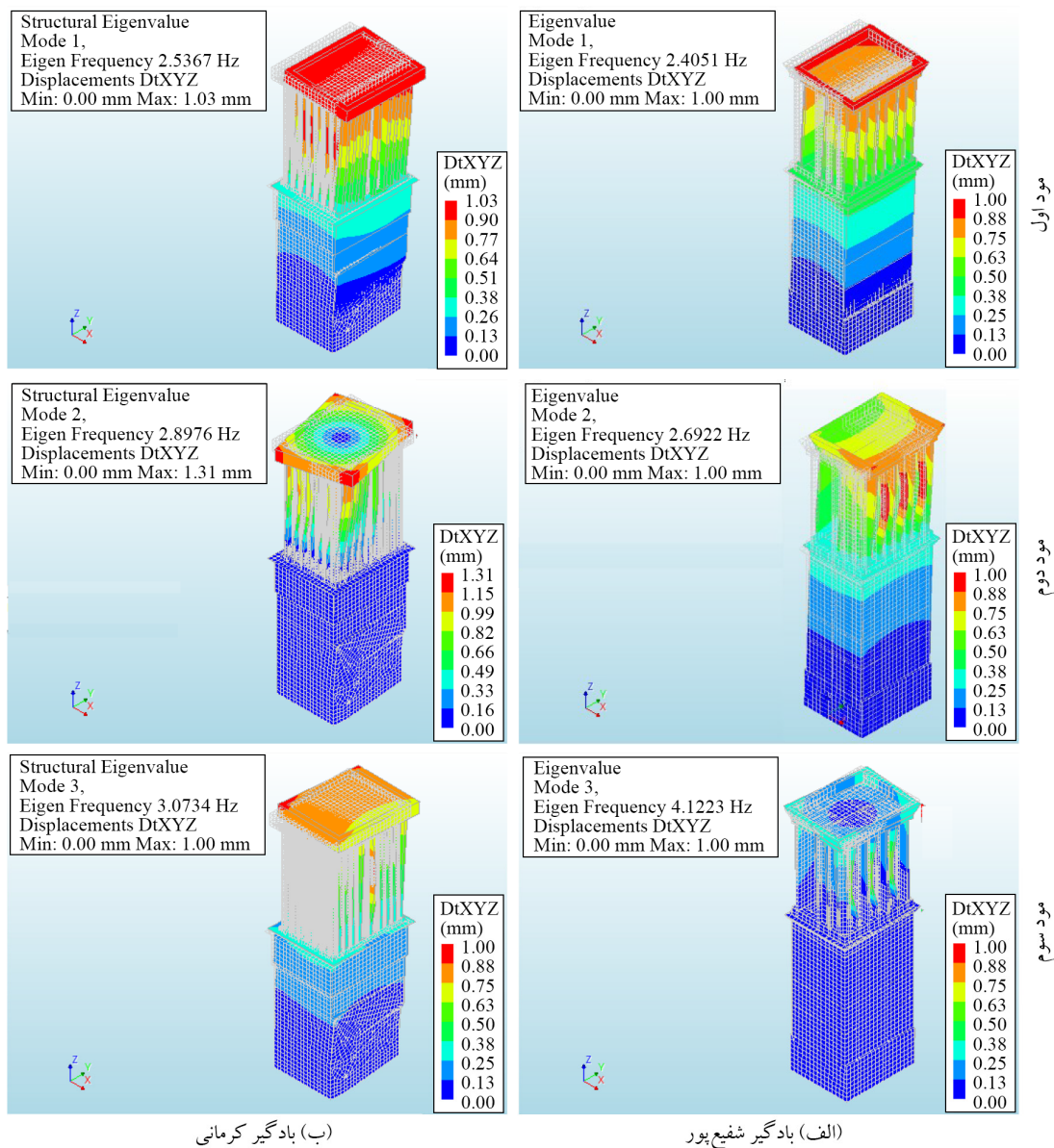
$$|\underline{k} - \omega_n^2 \underline{m}| = 0 \quad (2)$$

برای انجام تحلیل مقادیر ویژه، با فرض رفتار همسانگرد برای

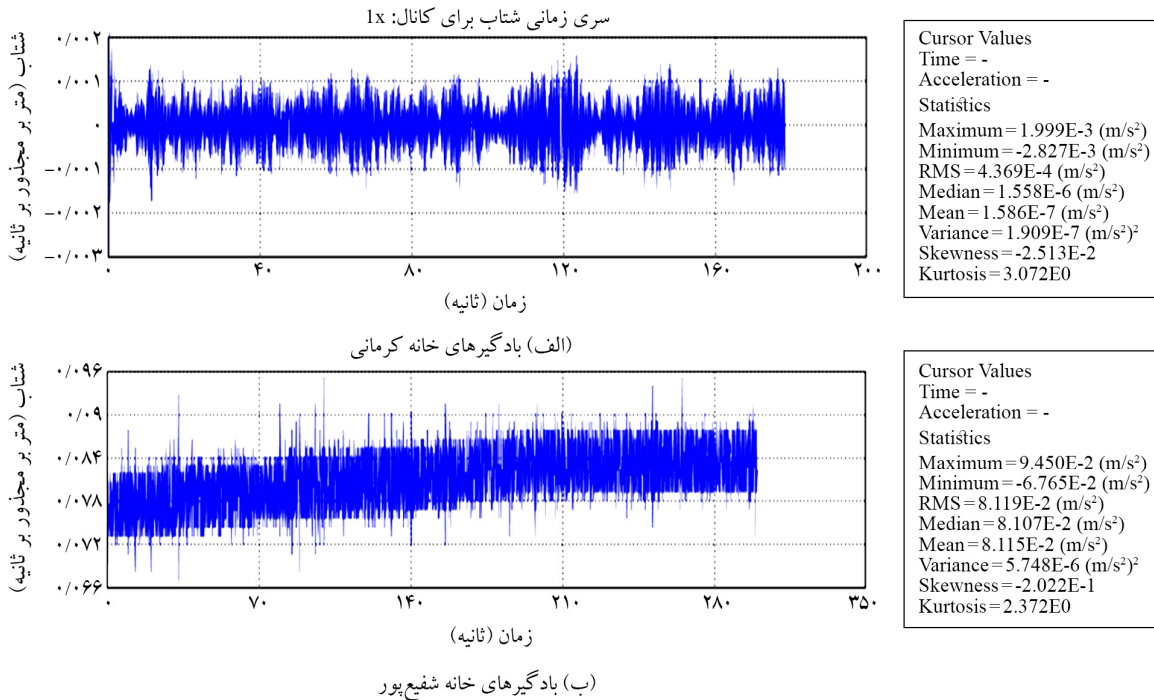
شرکت دیده پرداز صبا انجام شد. دستگاه آنالیز ارتعاشات، DPS-DAQ، یک دستگاه بلادرنگ و قابل جابجایی برای اندازه گیری های دقیق ارتعاشات و پردازش های بعد از آن است. توسط این دستگاه می توان هشت شتاب سنج سه جهته سازگار با آن (شتاب سنج شبکه یا شتاب سنج مینیا توری) را به صورت هم زمان اندازه گیری نمود. داده های دستگاه تحت نرم افزار خاصی به خروجی های استاندارد برای استفاده در نرم افزارهای تحلیل مودال مانند آرتیمیس تبدیل می شوند.

حصول کمترین خطا بین نتایج آزمایشگاهی و عددی و به دست آوردن مدل کالیبره شده) کرد. در فرآیند بهینه یابی یادشده، مقادیر کالیبره شده مشخصات مکانیکی مصالح باید در بازه تغییرات قابل قبولی قرار داشته باشند. این بازه بر اساس نتایج کارهای آزمایشگاهی بر روی مصالح مشابه که در ادبیات تحقیق موجود هستند، به دست می آید.

دریافت سیگنال هر دو نوع حس گر به کار گرفته شده، توسط آنالایزر ارتعاشی (DPS_DAQ) (شکل ۳- پ) ساخت



شکل (۵): نتایج تحلیل مقادیر ویژه برای سه مود اول سازه بر روی مدل اجزای محدود اولیه سازه بادگیر.



شکل (۶): پاسخ شتاب ثبت شده توسط یکی از حس‌گرها در جهت x برای بادگیرها.

۴-۱- مبانی و فرضیات

تحلیل مودال عملیاتی در حوزه فرکانس در نرم‌افزار آرتیمس با سه روش تجزیه دامنه فرکانسی (FDD)، تجزیه دامنه فرکانسی پیشرفته (EFDD) و تجزیه دامنه فرکانسی برآزش منحنی (CFDD)^{۱۱} انجام می‌شود. در همه اینها ماتریس چگالی طیفی توان^{۱۲} که از پردازش خروجی تخمین زده می‌شود با توابع پاسخ فرکانسی مرتبط می‌شود. در روش FDD، پاسخ سازه به مجموعه‌ای از سیستم‌های یک‌درجه‌آزادی مستقل تجزیه می‌شود، به طوری که هر سیستم نماینده یک مود می‌شود. این کار به سادگی و با تجزیه هر کدام از ماتریس‌های چگالی طیفی انجام می‌شود. سپس با جستار و گزینش قله از تابع پاسخ فرکانسی، فرکانس‌های طبیعی سیستم به دست می‌آیند. روش FDD که اولین بار توسط برینکر و همکاران در سال ۲۰۰۱ (Brincker et al., 2001) ارائه شد، فقط قادر به شناسایی فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی سیستم است. به همین دلیل در سال ۲۰۰۷ روش تجزیه حوزه فرکانسی پیشرفته توسط جاکوبسن و همکاران (Jacobsen et al., 2007) پیشنهاد شد که

۴- تحلیل مودال عملیاتی

بعد از پایان آزمون‌های ارتعاش محیطی، مرحله بعد پردازش سیگنال اطلاعات آزمایشگاهی به دست آمده و تحلیل مودال عملیاتی سازه‌های بادگیر است. تحلیل مودال عملیاتی، به عنوان یکی از روش‌های تحلیل دینامیکی سازه‌ها، به تعیین خواص ذاتی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، نسبت‌های میرایی و شکل مودها می‌پردازد که از آنها برای ایجاد یک مدل ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم استفاده می‌شود.

با توجه به ماهیت تحریک‌های محیطی که قابل اندازه‌گیری نیستند، نیروهای وارد به سازه ناشناخته خواهند بود و در نتیجه تحلیل مودال برای به دست آوردن پارامترهای دینامیکی باید فقط بر اساس پاسخ‌های سازه یا به عبارت دیگر بر اساس داده‌های خروجی تنها انجام شود.

در این پژوهش، تحلیل مودال عملیاتی با استفاده از نرم‌افزار آرتیمس انجام شد. به این منظور ابتدا هندسه سازه در نرم‌افزار ایجاد و در مرحله بعد سیگنال‌های داده برداری شده به نرم‌افزار وارد شدند.

جستجو، مقدار تابع زنگی طیفی یک درجه آزادی برابر با صفر فرض می‌شود. این بدان معنی است که هر چه سطح رد معیار MAC کمتر انتخاب شود، مقادیر منفرد بیشتری شامل تابع زنگی طیفی یک درجه آزادی می‌شوند. معمولاً مقدار سطح رد MAC برابر با ۰/۸ توصیه می‌شود (ARTeMIS, 2019).

هم‌زمان با تشخیص مقادیر منفردی که تابع زنگی طیفی یک درجه آزادی را تشکیل می‌دهند، بردارهای منفرد متناظر با این مقادیر، میانگین‌گیری می‌شوند تا تخمین بهتری از شکل مود به دست آید. سپس از ضرب بردارهای منفرد در مقادیر منفرد متناظر، میانگین وزن‌دار می‌شود؛ بنابراین بردارهای نزدیک‌تر به مقدار حداکثر تابع زنگی طیفی یک درجه آزادی، وزن بیشتری در تخمین شکل مود دارند. بعد از شناسایی شکل مودها توسط توابع زنگی طیفی یک درجه آزادی، فرکانس طبیعی و نسبت میرایی هر مود با انتقال تابع مربوطه به حوزه زمان تخمین زده می‌شوند. این انتقال با استفاده از معکوس تبدیل سریع فوریه انجام می‌شود. در واقع آنچه در این مرحله به دست می‌آید یک تابع همبستگی یک درجه آزادی^{۱۶} است که با تحلیل رگرسیونی آن، فرکانس طبیعی و نسبت میرایی تخمین زده می‌شوند.

قسمت‌های انتهایی این تابع همبستگی، یعنی قله‌ها و دره‌ها که به‌عنوان زوال آزاد یک سیستم یک درجه آزادی میرا عمل می‌کنند، در یک پنجره زمانی مناسب برای انجام عملیات رگرسیون خطی جهت تخمین نسبت میرایی مودال تعیین می‌شوند، زیرا لگاریتم قسمت زوال آزاد برای سیستم‌های خطی میرای لزج یک خط مستقیم خواهد بود. تخمین فرکانس‌های طبیعی با استفاده از عملیات رگرسیون خطی روی خط مستقیمی که زمان‌های تلاقی همبستگی را توصیف می‌کند، انجام می‌شود. با دانستن نسبت میرایی و فرکانس‌های طبیعی میرایی تخمین زده شده، فرکانس‌های طبیعی نامیرا را نیز می‌توان برآورد کرد. روش CFDD کاملاً مشابه EFDD است، با این تفاوت که فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی به‌جای رگرسیون خطی با استفاده از تکنیک برازش منحنی دامنه فرکانس تخمین زده می‌شوند.

روش‌های حوزه زمان، گروه دیگری از روش‌های شناسایی

علاوه بر فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی بتواند نسبت میرایی مودال را نیز تخمین بزند. در این روش برخلاف روش تجزیه حوزه فرکانسی که فقط از داده‌های قله مربوط به یک مود در نمودار تجزیه مقادیر منفرد (SVD)^{۱۳} به‌منظور شناسایی استفاده می‌شود، از داده‌های اطراف قله مورد نظر در نمودار تجزیه مقادیر منفرد نیز بهره گرفته می‌شود.

تخمین ویژگی‌های مودی در این روش دو مرحله دارد. در گام اول جستار و گزینش قله از روش FDD انجام می‌شود و در گام دوم از مود شکل‌های شناسایی شده توسط FDD، برای شناسایی توابع زنگی طیفی سیستم یک درجه آزادی^{۱۴} استفاده می‌شود. از این توابع طیفی یک درجه آزادی هم فرکانس و هم ضریب میرایی به دست می‌آیند. شناسایی توابع زنگی طیفی سیستم یک درجه آزادی در یک تحلیل همبستگی بر اساس معیار اطمینان مودال (MAC)^{۱۵} (Ewins, 1986) و با استفاده از شکل‌های مودی شناسایی شده در FDD به‌عنوان بردار مرجع، انجام می‌شود. معیار MAC که رابطه آن در معادله (۳) آمده است؛ به‌طور کلی همبستگی عددی بین دو دسته بردار شکل مودی، یعنی ψ_r و ψ_s را نشان می‌دهد. بر حسب اینکه دو بردار شکل مودی که از روش‌های متفاوت به دست آمده‌اند، کاملاً غیرهمبسته باشند یا تطابق کامل با یکدیگر داشته باشند؛ مقدار این معیار می‌تواند به ترتیب از ۰ تا ۱ تغییر کند.

$$MAC_{rs} = \frac{|\{\psi_r\}^T \{\psi_s^*\}|^2}{\{\psi_r\}^T \{\psi_r^*\} \{\psi_s\}^T \{\psi_s^*\}} \quad (3)$$

در هر دو طرف قله فرکانسی شناسایی شده توسط FDD، یک معیار MAC مابین بردار مرجع و بردارهای منفرد متناظر با فرکانس‌های مختلف و مشخص، محاسبه می‌شود. اگر بزرگ‌ترین مقدار معیار MAC محاسبه شده برای یک بردار منفرد، بالاتر از سطح رد تعیین شده توسط کاربر برای MAC باشد؛ مقدار منفرد مربوطه، در تعریف تابع زنگی طیفی یک درجه آزادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. جستجو در هر دو طرف قله فرکانسی (فرکانس مرجع) تا زمانی ادامه می‌یابد که هیچ مقدار MAC بالاتر از سطح رد نباشد. در خارج از محدوده

مودال متمایز می‌کند. برخی از این مزایا عبارتند از: برآورد دقیق‌تر ویژگی‌های مودال نسبت به هنگام استفاده از روش‌های خوشه‌بندی مبتنی بر «میانگین» مرسوم؛ حذف مؤثر حالت‌های محاسباتی (نویز) و سایر حالت‌های ناپایدار؛ تخمین مودال خودکار که این ویژگی به‌ویژه در پایش سلامت سازه به نتایج قابل‌اعتمادتری منتهی می‌شود. در این مقاله، از روش‌های حوزه فرکانس، روش FDD به دلیل عملیات شناسایی آسان، مؤثر و سریع و روش EFDD به دلیل قابلیت استخراج مقادیر نسبت میرایی هر مود، مورد استفاده قرار گرفتند. از روش UPCX-SSI نیز به‌عنوان به‌روزترین روش حوزه زمان با دقت نتایج مناسب و دامنه کاربرد وسیع که نسبت میرایی را هم ارائه می‌دهد، استفاده شد. همچنین با توجه به تحریک سازه‌ها تحت ارتعاشات مختلف محیطی، میانگین خروجی‌ها به‌عنوان نتایج نهایی شناسایی سیستم تعیین شدند؛ هرچند اختلاف چندانی هم بین نتایج تحریک‌های مختلف وجود نداشت.

۴-۲- نتایج حاصل شده

جدول (۲) مقادیر فرکانس طبیعی و نسبت میرایی سه مود اول هر یک از سازه‌های مورد مطالعه که تحت تحریک‌های محیطی و با استفاده از روش‌های مختلف تحلیل مودال عملیاتی توسط نرم‌افزار آرتمیس به‌دست آمده‌اند را نشان می‌دهد. مقادیر این جدول و به‌ویژه فرکانس‌های طبیعی محاسبه‌شده نشان می‌دهند که در مورد سازه‌های مورد مطالعه، تحلیل مودال با روش‌های مختلف به نتایجی تقریباً مشابه منتج شده است.

سیستم را تشکیل می‌دهند. این روش‌ها همگام با پیشرفت تئوری کنترل مدرن و فناوری کامپیوتر، گسترش زیادی یافته‌اند. از پرکاربردترین روش‌های حوزه زمان، شناسایی زیرفضای تصادفی (Andersen & Brincker, 2001) است. در روش‌های مبتنی بر شناسایی زیرفضای تصادفی، یک مدل پارامتریک مستقیماً به داده‌های خام سری زمان برآزش می‌شود. مدل پارامتریک یک مدل ریاضی با تعدادی پارامتر است که می‌توان مقادیر آنها را به‌گونه‌ای تغییر داد تا مدل بر داده‌ها حتی‌الامکان منطبق شود. به‌طور کلی هدف از این روش‌ها کالیبراسیون مدل یعنی به دنبال مجموعه‌ای از پارامترها بودن است که اختلاف بین پاسخ پیش‌بینی شده مدل و پاسخ اندازه‌گیری شده سیستم را به حداقل برساند. استفاده از راه‌حل‌های مؤثر برای مقابله با نویز و خطاهای تصادفی، توانایی تخمین مقادیر کم یا زیاد میرایی، استخراج خودکار مودهای ارتعاشی (برخلاف روش‌های حوزه فرکانس) و در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ارتعاشی از ویژگی‌های شناسایی زیرفضای تصادفی هستند.

تحلیل مودال عملیاتی در حوزه زمان در نرم‌افزار آرتمیس، شامل روش‌های مؤلفه اصلی بی‌وزن (UPC-SSI) و مؤلفه اصلی بی‌وزن تعمیم‌یافته (UPCX-SSI) می‌شود که هر دو بر اساس شناسایی زیرفضای تصادفی توسعه داده شده‌اند. از به‌روزترین اینها، روش UPCX-SSI (Mellinger et al., 2016) است که در آن تخمین عدم قطعیت ویژگی‌های مودال به روشی سریع و کارآمد از نظر حافظه انجام می‌شود. تخمین عدم قطعیت، UPCX-SSI را در مقایسه با دیگر روش‌های تخمین ویژگی‌های

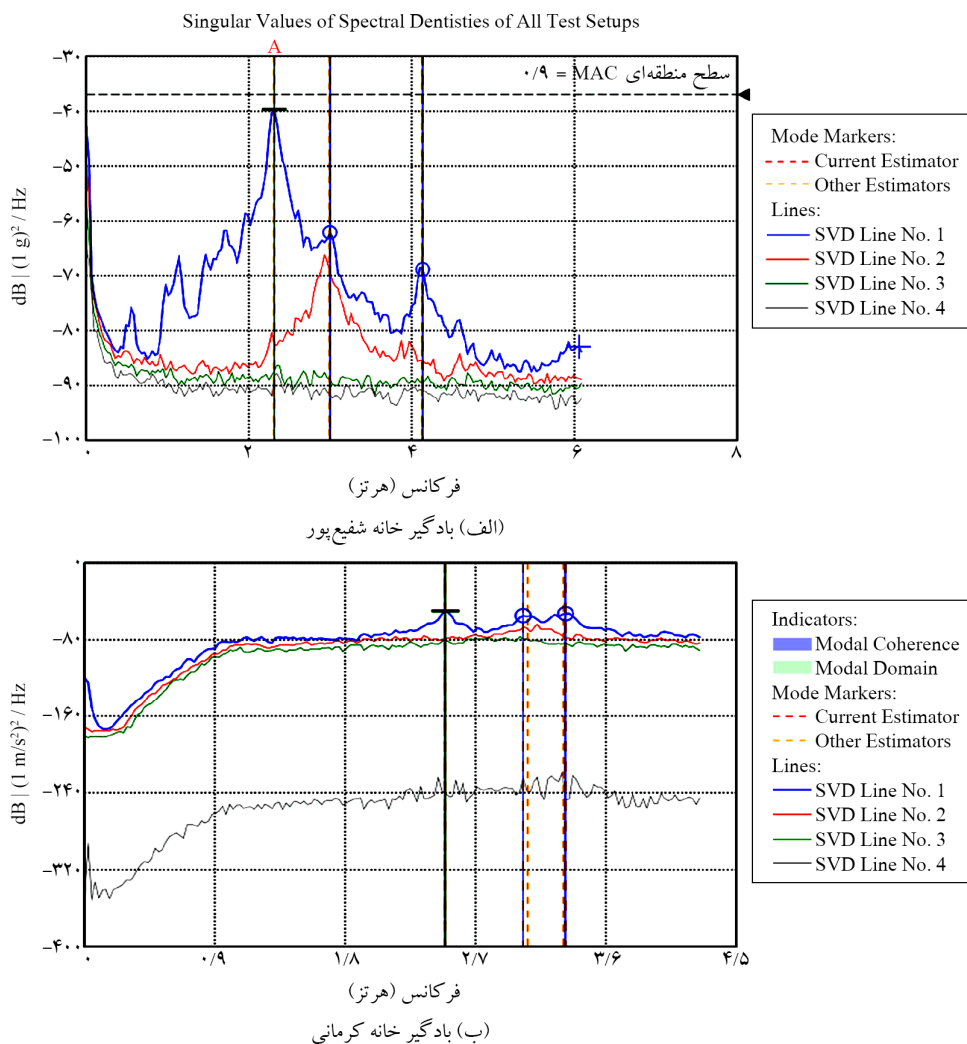
جدول (۲): فرکانس طبیعی و نسبت میرایی مودهای سه‌گانه بادگیرهای مورد مطالعه از روش‌های مختلف تحلیل مودال عملیاتی

نام سازه	شماره مود	FDD		EFDD		UPCX-SSI	
		فرکانس (هرتز)	نسبت میرایی (درصد)	فرکانس (هرتز)	نسبت میرایی (درصد)	فرکانس (هرتز)	نسبت میرایی (درصد)
بادگیر شفق‌پور	اول	۲/۳۷۷	-	۲/۳۴۵	۱/۳۰	۲/۳۶۰	۱/۰۷۲
	دوم	۲/۹۹۳	-	۲/۹۹۳	۱/۱۸	۲/۹۶۶	۱/۰۰۰
	سوم	۴/۱۵۱	-	۴/۱۲۰	۱/۸۸	۴/۱۱۷	۱/۷۷۰
بادگیر کرمانی	اول	۲/۴۹۰	-	۲/۴۸۹	۱/۲۱۴	۲/۴۸۵	۱/۱۸۶
	دوم	۳/۰۲۷	-	۳/۰۵۸	۱/۰۵۹	۳/۰۶۰	۰/۹۷۷
	سوم	۳/۳۲۰	-	۳/۳۰۷	۱/۰۱۱	۳/۳۰۳	۰/۵۹۷

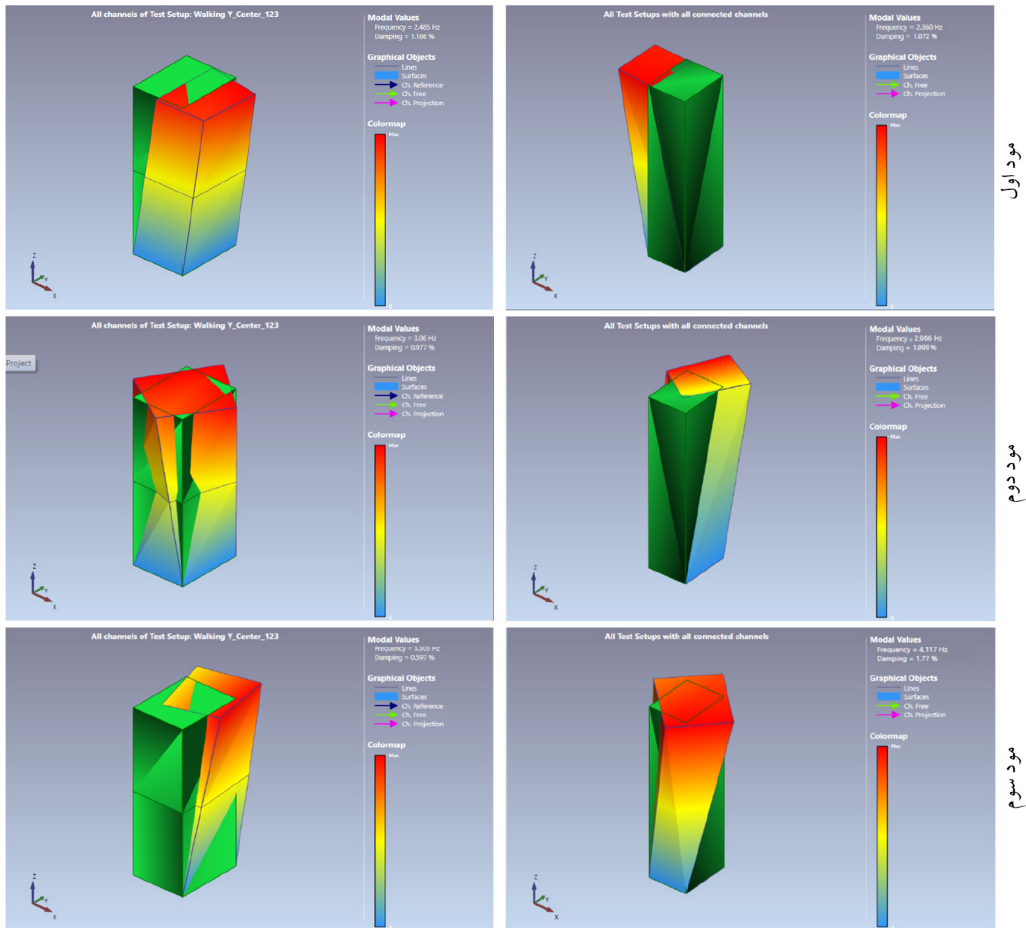
پیچش است. مود سوم نیز یک مود پیچشی می‌باشد. در بادگیر خانه کرمانی مود اول دارای حرکت انتقالی غالب در راستای x همراه با کمی پیچش است. مود دوم دارای حرکت غالب پیچشی است و مود سوم دارای حرکت انتقالی غالب در راستای y همراه با کمی پیچش است (جهت x و y به ترتیب امتداد عرضی و طولی در پلان سازه هستند).

انتظار کلی از رفتار دینامیکی سازه بادگیرها، که عموماً با پلان منظم مستطیل شکل و ارتفاع متوسط (در مقایسه با سازه‌های بلندمرتبه) ساخته می‌شوند، غلبه رفتار انتقالی در دو جهت افقی است. هرچند نامنظمی در ارتفاع بادگیر (به دلیل ساختار متفاوت در دو قسمت ساقه و قفسه و کاهش تدریجی ابعاد پلان در ارتفاع)

این مسئله می‌تواند بیانگر دقت نتایج آزمایشگاهی در تخمین رفتار واقعی دینامیکی سازه‌ها باشد. برای فهم بهتر جستار قله در روش‌های حوزه فرکانس، در شکل (۷) نمودار تجزیه مقادیر منفرد هر یک از دو سازه حاصل از روش FDD آورده شده است. شکل (۸) یکی دیگر از نتایج تحلیل مودال یعنی تغییر شکل سازه‌های مورد مطالعه در هر یک از سه مود اول را نشان می‌دهد (تغییر شکل مودی سازه‌ها حاصل از روش‌های مختلف تحلیل مودال به هم شبیه بودند و لذا تنها نتایج حاصل از روش UPCX-SSI آورده شده است). در بادگیر خانه شفیق پور مود اول دارای حرکت انتقالی غالب در راستای x است، در حالی که مود دوم دارای حرکت انتقالی غالب در راستای y همراه با کمی



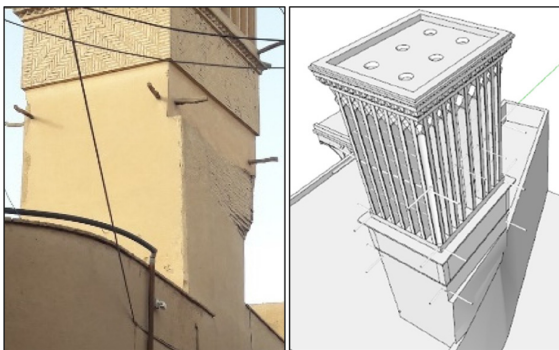
شکل (۷): نمودار SVD در روش FDD و جستار قله فرکانسی برای سازه‌های بادگیر.



(ب) بادگیر خانه کرمانی

(الف) بادگیر خانه شفیع پور

شکل (۸): تغییر شکل مودی سه مورد اول حاصل از تحلیل مودال عملیاتی برای سازه‌های بادگیر (رنگ سبز حالت تغییر شکل نیافته سازه است).



شکل (۹): پیش جداره‌های انتهایی بادگیر خانه کرمانی نسبت به دیوار کوچه مجاور.

و ارتفاع متفاوت قسمت قفسه دو بادگیر، ابعاد پلان متفاوت و تغییرات متفاوت ابعاد پلان در ارتفاع از جمله موارد دیگری هستند که به توزیع متفاوت جرم و سختی در دو بادگیر نسبت به

می‌تواند هر یک از دو مود انتقالی را با مقداری پیش‌همراه سازد. در مورد سازه‌های مورد مطالعه، بادگیر کرمانی برخلاف انتظار دارای مود دوم پیش‌همراه و مود سوم انتقالی در جهت y ، که به‌طور ضمنی دلالت بر غالب بودن رفتار پیش‌همراه دارد، است. این واقعیت می‌تواند به دلیل شرایط ساخت خاص این بادگیر باشد. زیرا با توجه به شکل (۹)، جداره‌های بادگیر در قسمت پایینی ساقه نسبت به دیوار خانه (مجاور کوچه) حول محور Z دارای پیش‌همراه بوده و به‌صورت بیرون زده اجرا شده‌اند. در حالی که در بادگیر شفیع پور دو مود اول انتقالی و مود سوم پیش‌همراه (غلبه رفتار انتقالی به دلیل فرم پلان منظم) است. بنابراین نمی‌توان مقادیر فرکانس مودهای متناظر در دو بادگیر را با هم مقایسه کرد چون دو رفتار ارتعاشی متفاوت دارند. علاوه بر این، ساختار

۱۴۹۶ و شماره قرارداد ۱۵۶/پ/ب با عنوان «راهکارهای استحکامبخشی لرزه‌ای بادگیرهای شاخص خانه‌های تاریخی شهر یزد»، با حمایت مالی مرکز تحقیقات بین‌المللی بادگیر وابسته به دانشگاه یزد انجام شده است. نویسنده مراتب تقدیر و تشکر خود را از مرکز یادشده اعلام می‌نماید.

References

- Aghabeigi, P., & Farahmand-Tabar, S. (2021). Seismic vulnerability assessment and retrofitting of historic masonry building of Malek Timche in Tabriz Grand Bazaar. *Engineering Structures*, 240, 112418.
- Altunişik, A., Adanur, S., Genç, A. F., Günaydin, M., & Okur, F. Y. (2016). Non-destructive testing of an ancient masonry bastion. *Journal of Cultural Heritage*, 22, 1049-1054. doi: 10.1016/j.culher.2016.05.008
- Andersen, P., & Brincker, R. (2001). The stochastic subspace identification techniques. *Structural Vibration Solutions A/S*.
- ARTeMIS. (2019). *Structural Vibration Solutions A/S (Version 6.0)*. NOVI Science Park, Aalborg East, Denmark.
- Ashayeri, I., Biglari, M., Formisano, A., & D'Amato, M. (2021). Ambient vibration testing and empirical relation for natural period of historical mosques. Case study of eight mosques in Kermanshah, Iran. *Construction and Building Materials*, 289, 123191. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123191
- Aziz-Bondarabadi, H., & H. Sadeghi, N. (2024). Modal analysis of the windcatcher structure based on the ambient vibration test results (in Persian). Paper presented at the *Ninth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE9)*, Tehran, Iran.
- Bahadori, M. N. (1978). Passive cooling systems in Iranian architecture. *Scientific American*, 238(2), 144-154.
- Bayraktar, A., Türker, T., Sevim, B., Altunişik, A., & Yildirim, F. (2009). Modal parameter identification of Hagia Sophia bell-tower via ambient vibration test. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 28, 37-47. doi: 10.1007/s10921-009-0045-9
- Brincker, R., Zhang, L., & Andersen, P. (2001).

مراجع

هم می‌انجامد و مقایسه تغییر شکل‌ها و فرکانس‌های مودی دو سازه را بی‌معنی می‌کند.

۵- نتیجه‌گیری

ارزیابی رفتار دینامیکی سازه بادگیرها در برابر عواملی مانند زلزله و باد مسئله‌ای است که علیرغم اهمیت آن در حفظ این عناصر بارز و هویت‌بخش معماری ایرانی، کمتر مورد توجه محققین قرار گرفته است. با توجه به اهمیت و لزوم استفاده از آزمون‌های غیرمخرب در شناخت رفتار دینامیکی سازه‌های تاریخی، در این پژوهش، با تمرکز بر دو نمونه از بادگیرهای خانه‌های تاریخی شهر یزد، آزمون غیرمخرب ارتعاش محیطی (آزمون تنها خروجی که در آن تنها پاسخ ارتعاشات سازه تحت تأثیر شرایط بهره‌برداری و تحریک‌های محیطی اندازه‌گیری می‌شود) و سپس تحلیل مودال عملیاتی بر روی آنها انجام شد. نتایج تحلیل مودال که از دو روش حوزه فرکانسی FDD و EFDD و یک روش حوزه زمانی UPCX-SSI بهره‌می‌برد، نشان داد که بین نتایج شناسایی سیستم از روش‌های مختلف، چه از حیث فرکانس طبیعی و چه شکل مودی سه‌گانه اول، تفاوت زیادی وجود ندارد. تفسیر شکل‌های مودی به‌دست‌آمده شناخت کلی و مناسبی از رفتار دینامیکی واقعی سازه‌های مورد مطالعه ارائه داد. از نتایج این مقاله می‌توان برای صحت‌سنجی و به‌روزرسانی مدل‌های عددی هر دو سازه استفاده کرد. این کار با کالیبراسیون مدل‌ها از نظر مشخصات مکانیکی مصالح (جرم مخصوص و ضریب ارتجاعی) و شرایط مرزی در محل اتصال با بنای اصلی انجام می‌شود. از این منظر، از نتایج تحقیق انجام‌شده در شناسایی و مکان‌یابی آسیب‌های احتمالی سازه‌های مورد مطالعه، ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای آنها، بررسی طولانی‌مدت سلامت و ارزیابی ایمنی این سازه‌ها بعد از بارگذاری‌های شدید مانند زلزله می‌توان استفاده کرد.

تقدیر و تشکر

مقاله حاضر به‌عنوان بخشی از طرح پژوهشی با کد طرح

of Architectural Heritage (www.icomos.org).

Jacobsen, N. J., Andersen, P., & Brincker, R. (2007). Using EFDD as a robust technique for deterministic excitation in operational modal analysis. Paper Presented at the the 2nd International Operational Modal Analysis Conference.

Jafari, M. K., Davoodi, M., & Razzaghi, M. (2003). Evaluation of dynamic characteristics of Marun embankment dam using ambient vibration test and FEM (in Persian). *Journal of Computational Methods in Engineering*, 22(1), 109-127. doi: 20.1001.1.22287698.1382.22.1.8.7

Jomehzadeh, F., Hussen, H. M., Calautit, J. K., Nejat, P., & Ferwati, M. S. (2020). Natural ventilation by windcatcher (Badgir): A review on the impacts of geometry, microclimate and macroclimate. *Energy and Buildings*, 226, 110396. doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110396

Jomehzadeh, F., Nejat, P., Calautit, J. K., Yusof, M. B., Zaki, S. A., Hughes, B. R., & Yazid, M. N. (2017). A review on windcatcher for passive cooling and natural ventilation in buildings, Part 1: Indoor air quality and thermal comfort assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 736-756. doi: 10.1016/j.rser.2016.11.254

Kabir Saber, M. (2022). *Safety Assessment of Chimneys of the Sohrol Historic Church* (in Persian). (M.S.). Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

Karanikouloudis, G., & Lourenço, P. B. (2018). Structural assessment and seismic vulnerability of earthen historic structures. Application of sophisticated numerical and simple analytical models. *Engineering Structures*, 160, 488-509. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.12.023

Lameie, M., Ashayeri, I., Biglari, M., & Kadivar, M. A. (2015). Soil-structure system identification with ambient vibration tests (A case-study on a surface pier of Kermanshah urban railroad). *Bulletin of Earthquake Science and Engineering*, 2(3), 1-13.

Lorenzoni, F., Valluzzi, M. R., & Modena, C. (2019). Seismic assessment and numerical modelling of the Sarno Baths, Pompeii. *Journal of Cultural Heritage*, 40, 288-298. doi: 10.1016/j.culher.2019.04.017

Mahmoudi, M., & Mofidi, S. M. (2008). An analysis of the architectural typology of windcatchers in Yazd and

Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition. *Smart Materials and Structures*, 10(3), 441.

D'Ambrisi, A., Mariani, V., & Mezzi, M. (2012). Seismic assessment of a historical masonry tower with nonlinear static and dynamic analyses tuned on ambient vibration tests. *Engineering Structures*, 36, 210-219.

Dehghan, A. A., Esfeh Kazemi, M., & Dehghan Manshadi, M. (2013). Natural ventilation characteristics of one-sided wind catchers: experimental and analytical evaluation. *Energy and Buildings*, 61, 366-377. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.02.048

DIANA FEA BV. (2021). DIANA Release 10.5. Delft, Netherlands.

Didepardaz Saba. (2023). *Dideardaz Saba Vibration Department*. Retrieved from <https://vibration.didepardaz.ir>

Emadian Razavi, z. (2018). *Typology of Windcatchers of the Department of Art and Architecture of Yazd University* (in Persian). Retrieved from Yazd, Iran.

Ewins, D. J. (1986). Modal testing: theory and practice. *Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design*.

Foti, D., Diaferio, M., Giannoccaro, N. I., & Mongelli, M. (2012). Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower. *NDT & E International*, 47, 88-95. doi: 10.1016/j.ndteint.2011.11.009

Gara, F., Nicoletti, V., Arezzo, D., Cipriani, L., & Leoni, G. (2023). Model updating of cultural heritage buildings through swarm intelligence algorithms. *International Journal of Architectural Heritage*, 1-17. doi: 10.1080/15583058.2023.2277324

Hejazi, B., & Hejazi, M. (2014). Persian wind towers: Architecture, cooling performance and seismic behaviour. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 9(1). doi: 10.2495/DNE-V9-N1-56-70

Hoseini, M. (2020). *Identifiaction and Documantation of the Windcatchers of Yazd* (in Persian). Retrieved from Yazd, Iran.

ICOMOS/ISCARSAH. (2003). *Recommendations for the Analysis, Conservation and Structural Restoration*

1.1.1.4

Poursalman, A. R. (2020). *Traditional Construction Details of Badgir* (in Persian). Retrieved from Yazd, Iran.

Ramos, L. (2007). *Damage Identification on Masonry Structures Based on Vibration Signatures*. (Ph.D.). University of Minho, Guimaraes, Portugal. Retrieved from <http://hdl.handle.net/1822/7380>

Roaf, S. (1988). *The Wind Catcher of Yazd*. (Ph.D.). Oxford Polytechnic, England.

Roselli, I., Malena, M., Mongelli, M., Cavalagli, N., Giofrè, M., De Canio, G., & de Felice, G. (2018). Health assessment and ambient vibration testing of the "Ponte delle Torri" of Spoleto during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 8(2), 199-216. doi: 10.1007/s13349-018-0268-5

Sánchez-Aparicio, L. J., Bautista-De Castro, Á., Conde, B., Carrasco, P., & Ramos, L. F. (2019). Non-destructive means and methods for structural diagnosis of masonry arch bridges. *Automation in Construction*, 104, 360-382. doi: 10.1016/j.autcon.2019.04.021

Yadegari, J., & Bahar, O. (2010). Modal parameter identification using ambient vibration testing with introducing a new software (in Persian). *Journal of Civil and Surveying Engineering*, 44(1), 121-130.

Yarshater, E. (1989). *Encyclopaedia, Iranica* (E. Yarshater Ed. Vol. 3). London, Routledge & Kegan Paul.

واژه‌نامه

Dynamic Identification Tests	۱- شناخت ویژگی‌های دینامیکی
Ambient Vibration Test	۲- ارتعاش محیطی
Operational Modal Analysis	۳- تحلیل مودال عملیاتی
DIANA FEA, 10.5	۴- نرم‌افزار دیانا نسخه ۱۰/۵
ARTEMIS Modal 6.0	۵- نرم‌افزار آرتیمیس نسخه ۶/۰
Frequency Domain Decomposition (FDD)	۶- تجزیه دامنه فرکانسی
Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)	۷- تجزیه دامنه فرکانسی پیشرفته
Extended Unweighted Principal Component	۸- روش مؤلفه اصلی بی‌وزن تعمیم‌یافته

finding the optimal functional type (in Persian). *Journal of Fine Arts: Visual Arts*, 36, 28-31.

Mahyari, A. (1996). *The Wind Catcher: a Passive Cooling Device for Hot Arid Climate*. (Ph.D.). The University of Sydney, Sydney, Australia.

Mellinger, P., Döhler, M., & Mevel, L. (2016). Variance estimation of modal parameters from output-only and input/output subspace-based system identification. *Journal of Sound and Vibration*, 379, 1-27. doi: 10.1016/j.jsv.2016.05.037

Meybodan, H., Eslami, A., & Morshed, R. (2020). Sustainable lateral strengthening of traditional adobe walls using natural reinforcements. *Construction and Building Materials*, 260, 119892. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119892

Michel, C., Karbassi, A., & Lestuzzi, P. (2018). Evaluation of the seismic retrofitting of an unreinforced masonry building using numerical modeling and ambient vibration measurements. *Engineering Structures*, 158, 124-135. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.12.016

Nami, S. (2019). *Seismic Assessment and Strengthening of Chimneys of the Khosravi Leather Factory* (in Persian). (M.S.). Tabriz Islamic Art University, Tabriz, Iran.

Ozcelik, O., Misir, I. S., Yucel, U., Durmazgezer, E., Yucel, G., & Amaddeo, C. (2022). Model updating of Masonry courtyard walls of the historical Isabey mosque using ambient vibration measurements. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. doi:10.1007/s13349-022-00610-3

Pachón, P., Castro, R., García-Macías, E., Compan, V., & Puertas, E. (2018). E. Torroja's bridge: Tailored experimental setup for SHM of a historical bridge with a reduced number of sensors. *Engineering Structures*, 162, 11-21. doi: 10.1016/j.engstruct.2018.02.035

Parvizi Milani, S. (2012). *Study on Dynamic Specification of the Historic Buildings of Arg-e-Tabriz, Timche Malek and Kabood Mosque Using Microtremor Measurement* (in Persian). (M.S.). Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

Pourahmadi, M., & Ayatollahi, S. M. H. (2011). Refunctioning solutions for different wind catchers of Yazd based on their related summer side spaces (in Persian). *Journal of Architecture in Hot and Dry Climate*, 1(1), 7-18. doi: 20.1001.1.26453711.1390.

- ۹- شناسایی زیر فضای تصادفی
Stochastic Subspace Identification (SSI)
- ۱۰- مصالح مرکب یا درشت مدل‌سازی
Macro-Modeling
- ۱۱- تجزیه دامنه فرکانسی برازش
Curve-fit Frequency Domain Decomposition
منحنی
- ۱۲- ماتریس چگالی طیفی توان
Power Spectral Density Matrix
- ۱۳- تجزیه مقادیر منفرد
Singular Value Decomposition Diagram
- ۱۴- توابع زنگی طیفی سیستم
SDOF Spectral Bell Functions
یک‌درجه آزادی
- ۱۵- معیار اطمینان مودال
Modal Assurance Criterion (MAC)
- ۱۶- تابع همبستگی یک‌درجه آزادی
SDOF Correlation Function
- ۱۷- روش‌های مؤلفه اصلی بی‌وزن
Unweighted Principal Component

Dynamic Identification of the Wind-Catcher Structure Based on Frequency- and Time-Domain Analyses of Experimental Results

Hamed Azizi-Bondarabadi

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran, hamed.azizi@yazd.ac.ir

The present paper addresses the structural behavior of a tower-like historic structure called wind-catcher. The wind-catchers are important architectural elements in Persian architecture. These unique elements were used in old Iran, in particular in the world heritage city of Yazd, to create cross ventilation and passive cooling for protecting houses' residences against hot environmental conditions. However, their structural performance under dynamic loads (earthquake and heavy wind) is a matter of concern due to their relative high height, high slenderness ratio, and poor material and construction details. Nevertheless, evaluating their dynamic behavior is out of the scope of the relevant research in literature. Dynamic identification tests are known as one of the most robust tools for evaluating the dynamic behavior of structures. In the case of heritage constructions, the tests should respect the minimum intervention principle, which addresses the use of diagnosis/strengthening methods with minimum damage to the building under restoration. For this reason, the use of ambient vibration tests to identify the real dynamic behavior of such structures has received significant attention in recent years. The test is an output-only vibration test, where only the vibration response is measured during the service conditions of a structure (under wind, sound, or traffic vibrations).

Accordingly, this paper aims to identify the wind-catcher dynamic behavior, namely the determination of natural frequencies, mode shapes, and damping ratios of its different modes, with minimum damage to the structure. For this purpose, the ambient vibration test was conducted on two wind-catchers belonging to two houses located in Yazd's historic fabric. The sampled structures, which date back to about 200 years ago, are classified as high-height wind-catchers of the city houses.

To obtain an overall and initial estimation from the modal behavior of the studied structures, a finite element model implemented in the DIANA software was employed to conduct eigenvalue analysis before conducting the tests. The numerical results were also used to determine the installation points of accelerometers to be sure of identifying the real modes of the tested structures. A macro-modeling approach was used to simulate masonry as a homogeneous isotropic material in a continuum element. More than 100,000 solid elements were used to model each of the studied structures, adopting initial values for material properties (Young modulus and specific weight) from literature. It was also assumed that the translational degree of freedoms of both structures are restrained where they are connected to the underlying building. As a result, four accelerometer sensors were adopted for the purpose of in-situ ambient vibration tests. The sensors were placed on the four corners of the structures' top level.

Next, Operational Modal Analysis (OMA) was performed on the test results using frequency- and time-domain signal processing methods implemented in the Artemis software. The Frequency Domain Decomposition (FDD) method and its enhanced version (EFDD), which are based on frequency peak picking, were employed as frequency-domain methods. The extended Unweighted Principal Component (UPCX) technique, a subset of Stochastic Subspace Identification (SSI) methods, was also adopted. Finally, the results obtained were compared. The comparison showed that the modal parameters obtained from different OMA techniques have relatively similar values, implying that the obtained results represent the real modal behavior of the structures under study. The paper results can be used to obtain an updated numerical model for which material properties, geometrical features, and boundary conditions are calibrated with respect to experimental results. The calibrated model is able to simulate the test-obtained modal parameters. Updated numerical models are necessary for structural health monitoring, detection of existing damage, safety assessment, and seismic vulnerability evaluation of structures.

Keywords: Ambient Vibration Test, Operational Modal Analysis, Stochastic Subspace Identification, Artemis Software, DIANA Software, Yazd.