

شناخت ویژگی‌های دینامیکی دودکش
بنایی صنعتی جهت بررسی‌های حفاظتی
نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی
صفیه نامی، فرهاد آخوندی

صص ۱-۹



شناخت ویژگی‌های دینامیکی دودکش بنایی صنعتی جهت بررسی‌های حفاظتی نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی*

صفیه نامی^۱، فرهاد آخوندی^۲

۱- صفیه نامی (دانشجو کارشناسی ارشد استحکام بخشی بناهای تاریخی دانشگاه هنر اسلامی تبریز -
safiyehnam@gmail.com)

۲- فرهاد آخوندی (عضو هیئت علمی دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه هنر اسلامی تبریز)

چکیده

نوسازی و احیای سایت‌های صنعتی تاریخی جهت استفاده مجدد مستلزم شناخت کافی از شرایط و بررسی وضعیت سلامت بنا به منظور اطمینان از ایمنی آن می‌باشد. در این مقاله ویژگی‌های دینامیکی برای سازه یک دودکش بنایی صنعتی مربوط به دوره پهلوی اول استخراج می‌شود. دودکش مورد بررسی در این پژوهش دودکش شماره یک کارخانه چرم خسروی تبریز می‌باشد که با ورود مدرنیزه و معماری صنعتی به ایران در دوره پهلوی اول به سبک معماری آلمانی ساخته شده است. در این پژوهش دودکش برای مطالعه رفتار دینامیکی پایش شده و نتایج حاصل از آزمایش ارتعاش محیطی و مودال در مقاله ارائه شده است. برای این هدف، تحلیل مودال عملیاتی (OMA) جهت تعیین ویژگی‌های دینامیکی دودکش از جمله فرکانس طبیعی هر مود و اشکال مودی استفاده می‌شود.

نتایج تجزیه و تحلیل تجربی جهت انجام بررسی‌های لرزه‌ای و به‌روزرسانی مدل عددی به منظور انجام اقدامات حفاظتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. که بر این اساس نتایج نشان می‌دهد با توجه به تقارن محوری در دودکش مورد بررسی مدهای خمشی سازه به صورت جفت فرکانس‌های نزدیک به هم اما در جهات عمود بر هم ایجاد می‌شود همچنین مدول الاستیسته سازه در حالت استاتیک و دینامیکی متفاوت بوده و می‌تواند به عنوان پارامتری جهت به‌روزرسانی مدل عددی مورد استفاده قرار گیرد.

* مقاله حاضر برگرفته از رساله صفیه نامی تحت راهنمایی دکتر آخوندی در دوره کارشناسی ارشد فناوری معماری گرایش استحکام بخشی بناهای تاریخی دانشگاه هنر اسلامی تبریز، تحت عنوان بررسی لرزه‌ای و استحکام بخشی دودکش‌های کارخانه چرم خسروی (دانشگاه هنر اسلامی تبریز) می‌باشد.

واژگان کلیدی: دودکش صنعتی، کارخانه چرم خسروی، آزمایش ارتعاش محیطی، ویژگی دینامیکی

۱- مقدمه

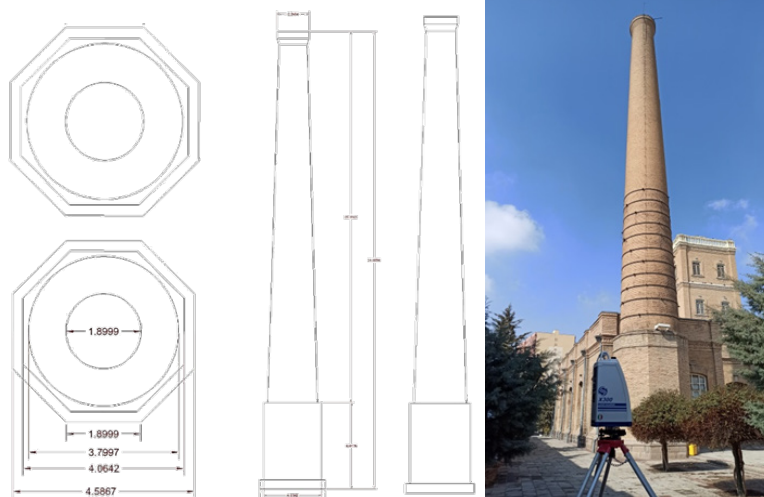
دودکش‌های آجری بنایی تا پایان دهه ۱۹۶۰ در بسیاری از مناطق صنعتی ساخته شده است. گسترش مناطق شهری به سمت مناطق صنعتی قدیمی، این سازه‌ها را به المان‌هایی که نمایانگر دوره صنعتی قدیمی است تبدیل کرده که وارد شهرسازی جدید شده‌اند. در واقع بسیاری از این دودکش‌ها به دلایل اجتماعی و تاریخی خود به عنوان ساختمان‌های محافظت شده ثبت شده‌اند. این بدان معناست که در مناطقی با خطر لرزه‌خیزی بالا لازم است مقاومت آن‌ها در برابر نیروهایی که در زمان ساخت مورد توجه قرار نگرفته است بررسی شود. علاوه بر این بسیاری از دودکش‌ها در مناطق شهری قرار دارند از این رو باید رفتار سازه‌ای آن‌ها برای محافظت از ساختمان‌ها و جمعیت اطراف آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین حفظ و نگهداری این بناها در برابر حوادث طبیعی و غیرطبیعی همچون زلزله و بررسی آسیب‌های موجود امری ضروری قلمداد می‌شود. (برو و همکاران، ۲۰۱۸، ۳۳)

به واسطه زلزله‌های مکرر، مداخلات صنعتی و به‌تأثیر از اتفاقات سیاسی ایران، شهر تبریز در دوره پهلوی اول، شاهد تغییرات زیادی در عرصه‌های معماری و شهری بوده است. در این دوره با ورود فناوری‌های ساخت و ایجاد سازه‌های جدید و اندیشه‌های حاکم بر آن، معماری صنعتی و کارخانه‌ای شکل گرفت. به طوری که به واسطه همسایگی با دولت روس و عثمانی و حضور مهندسان آلمانی و لهستانی عامل شکل‌گیری بناهای صنعتی در نقاط مختلف شهری آن است. (نژادابراهیمی و همکاران، ۱۳۹۸، ۳۴) کارخانه چرم خسروی، نمونه زیبایی از معماری سنتی تبریز است که برگرفته از سبک معماری آلمانی در دوره پهلوی اول ساخته شده است. این کارخانه جزو تنها کارخانه‌های باقی مانده از میان کارخانه‌های متعدد دوره پهلوی می‌باشد که در حال حاضر سالم و قابل مطالعه است. ساختمان کارخانه چرم‌سازی از جمله ابنیه صنعتی تاریخی شهر، یادگاری ارزشمند از دوره‌ی ورود صنایع نوین به ایران محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر و با تأسیس دانشگاه هنر اسلامی تبریز بنای متروکه کارخانه چرم‌سازی بهسازی شد و تغییر کاربری یافت و در نهایت به مجموعه ساختمان‌های دانشگاه افزوده شد. (آصفی و همکاران، ۱۳۹۳، ۳۹) از این رو بررسی شرایط ایمنی دودکش‌ها به عنوان عضوی از این مجموعه حائز اهمیت می‌باشد. هدف این مقاله شناخت خصوصیات دینامیکی سازه دودکش بنایی شمل فرکانس‌های طبیعی و لشکال مودی می‌باشد که به منظور به روز رسانی مدل عددی و تحلیل‌های لازم جهت بررسی‌های حفاظتی آتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این منظور تحلیل مودال تجربی فرآیندی است که برای تعیین ویژگی‌های دینامیکی سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی‌های دینامیکی اندازه‌گیری شده سازه را می‌توان با تحلیل عددی مقایسه کرد و از این طریق خصوصیات مدل عددی سازه را نسبت به شرایط واقعی به‌روزرسانی کرد. چرا که هرگونه تغییر در خواص فیزیکی (یعنی جرم، سختی و میرایی) باعث تغییر در رفتار دینامیکی می‌شود. تحلیل مودال استاندارد مستلزم دانستن برانگیختگی سازه و پاسخ است. اما در ساختمان‌هایی مانند دودکش‌ها که اطلاعات کاملی در دسترس نیست و امکان اعمال یک تحریک کنترل شده وجود ندارد به همین دلیل فقط پاسخ آن مشخص است. بنابراین، ارتعاش ناشی از محیط به عنوان ورودی در تحلیل مودال استفاده می‌شود. این بدان معنی است که تحریک توسط بار واقعی، یعنی بارهای محیطی ایجاد می‌شود. این نوع تحلیل مودال به عنوان تحلیل مودال عملیاتی (OMA) شناخته می‌شود و نشان داده شده است که ابزار مفیدی در این نوع سازه‌ها است.

۲- نمونه مورد بررسی: تعریف دودکش بنایی

دودکش مورد مطالعه در این پژوهش در شهر تبریز واقع شده و در دوره پهلوی اول ساخته شده است. این بنا متعلق به مجموعه کارخانه چرم خسروی سابق است که برای استفاده به عنوان بخشی از دانشگاه هنر اسلامی تبریز بازسازی و احیا شده است. تاریخ ساخت آن مربوط به سال ۱۳۱۰ هجری شمسی می باشد اما هیچ نقشه یا اطلاعاتی در مورد جزئیات و مصالح به کار رفته در ساخت آن وجود ندارد. بنابراین، تمام اطلاعات لازم برای انجام این مطالعه از جمله هندسه سازه و خصوصیات مواد، در محل و طی آزمایشات مختلف به دست آمده است. شکل ۱-الف وضعیت فعلی ساختمان و شکل ۱-ب هندسه آن را نشان می دهد.

باتوجه به در دسترس نبودن اطلاعات و نقشه های کافی از بنا هندسه کلی دودکش با استفاده از فناوری اسکن لیزری به دست آمد. هندسه دودکش بنایی صنعتی مورد مطالعه، یک مخروط ناقص توخالی به ارتفاع ۲۵٫۸۵ متر و پایه ۸ ضلعی به ارتفاع ۶٫۰۱ می باشد. قطر خارجی در تراز پایه ۴٫۷ و در تراز راس ۱٫۹ متر بوده و ضخامت جداره آن ۱ متر در پایه تا ۰٫۴۰ در راس و به طور یکنواخت متغییر است.



شکل ۱-الف) دودکش بنایی صنعتی ب) هندسه به دست آمده (مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱)

۳- تست مودال

شناسایی خصوصیات دینامیکی سازه در بسیاری از زمینه های صنعت مانند خودروسازی، هوافضا، رباتیک، مهندسی عمران و ... از اهمیت بالایی برخوردار است. تحقیقات عظیمی در مورد تکنیک های عددی و تجربی برای شناسایی رفتار دینامیکی سازه ها انجام شده است. تجزیه و تحلیل مودال آزمایشگاهی روشی مناسب برای شناسایی پارامترهای دینامیکی سازه ها و ارائه یک مدل ریاضی یا مودال است. (قالیشویان، ۲۰۱۵، ۱). شناسایی تجربی پارامترهای مودال در سازه های عمرانی به معنی استخراج پارامترهای مودال (فرکانس ها، نسبت های میرایی و شکل های مودی) از اندازه گیری های دینامیکی است. از این پارامترهای مودال می توان در به روز کردن مدل اجزاء محدود، شناسایی و مکان یابی آسیب های احتمالی در سازه ها، بررسی طولانی مدت سلامت سازه ها و ارزیابی ایمنی سازه ها بعد از بارگذاری های شدید مانند زلزله استفاده کرد.

آزمایش های دینامیکی سازه ها به سه دسته تقسیم می شوند: (۱) آزمایش ارتعاش اجباری، (۲) آزمایش ارتعاش آزاد و (۳) و آزمایش ارتعاش محیطی.

شناخت ویژگی های دینامیکی دودکش بنایی صنعتی جهت بررسی های حفاظتی نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی صفیه نامی، فرهاد آخوندی

صص ۱-۹

در بسیاری از سازه‌های واقعی امکان استفاده از آنالیز مودال تجربی برای به دست آوردن پارامترهای مودال وجود ندارد. به عنوان مثال، در سازه‌های بزرگ امکان تحریک موثر سازه و اندازه‌گیری نیروی اعمالی به سازه وجود ندارد. بسیاری از سازه‌ها تحت تاثیر نیروهای حاصل از عملکرد خود به طور موثر و مناسبی تحریک می‌شوند که اندازه‌گیری این نیروها غیرممکن است. به همین دلیل، روش‌هایی مورد توجه قرار گرفتند که به تحریک و اندازه‌گیری نیروی ورودی به سازه جهت به دست آوردن پارامترهای مودال نیازی نباشد. این روش‌ها، آنالیز مودال عملیاتی^۱ یا آنالیز مودال محیطی نام دارند، زیرا تنها با ثبت پاسخ سازه ناشی از نیروهای اعمالی که حین شرایط کار در محیط طبیعی سازه به وجود می‌آیند، انجام می‌گیرد (صالحی، ۱۳۹۷، ۵۵). یکی از مهمترین کاربردهای OMA به روزرسانی مدل المان محدود (FE) است. از اواخر دهه ۱۹۴۰، روش‌های المان محدود (FE) ابتدا برای حل مسائل الاستیسیته توسعه یافت و تاکنون به عنوان یک روش عددی توانا در تحلیل دینامیکی سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های FE و به طور کلی عددی در مدل‌سازی سازه‌ها در شرایط واقعی، به ویژه برای سازه‌های پیچیده، اشکالاتی دارند. به کارگیری ویژگی‌های غیرخطی و میرایی دقیق، مدل‌سازی شرایط مرزی موجود و شرایط عملیاتی و... از چالش‌های اساسی FE هستند. این برای سیستم‌های پیچیده و عظیمی مانند سازه‌های مهندسی عمران و همچنین برای سازه‌هایی که اطلاعات کافی یا قطعی در مورد آنها نداریم مانند ساختمان‌های تاریخی چالش برانگیزتر خواهد بود. در نتیجه، نتایج تجربی باید برای به روزرسانی، تأیید یا بهینه‌سازی مدل اولیه FE مورد استفاده قرار گیرد که می‌تواند رفتار قابل اطمینان‌تری از سازه ارائه دهد. (قالیشویان، ۲۰۱۵، ۱)

تحلیل مودال تجربی همیشه بر اساس سه مرحله زیر است: برنامه‌ریزی و اجرای آزمایش، از جمله مکان مناسب سنسورها و در نهایت، محرک‌ها، انتخاب پارامترهای اکتساب داده و استفاده نهایی از تحریک خارجی. پردازش داده‌ها و استخراج پارامترهای مودال؛ و اعتبارسنجی مدل مودال هنگامی که مدل مودال شناسایی شد. (رینیری، ۲۰۱۱، ۱۱۰)

۳-۱- شرایط آزمایشگاهی تست OMA

کیفیت ابزار اندازه‌گیری نقش اساسی در شناخت پارامترهای دینامیکی معتبر رفتار سازه ایفا می‌کند. انتخاب سخت‌افزار اندازه‌گیری، تعداد و چیدمان حسگرها، تکنیک‌های نصب و کالیبراسیون، جمع‌آوری داده‌ها و سایر شرایط اندازه‌گیری مانند ترتیب کابل‌کشی و روش‌های کنترل نویز اهمیت قابل توجهی دارند. مطمئناً، یک آزمایش موفقیت‌آمیز مبتنی بر ارتعاش، به تکنیک‌هایی برای جبران نویز و اثرات محیطی نیاز دارد. از آنجایی که OMA یک آزمایش درجاس است و با شرایط عادی و عملکردی سازه‌ها تداخلی ندارد تجزیه و تحلیل سازه براساس output-only یک فرآیند ترجیحی برای سازه‌های عظیم و پیچیده مانند ساختمان‌ها، استادیوم‌ها، پل‌ها، سدها و غیره است. سازه‌های عمرانی به طور کلی با دامنه کم و فرکانس پایین (تقریباً در محدوده ۰٫۱-۱۰۰ هرتز) ارتعاش می‌کنند. بنابراین آزمون OMA به ابزارهای حساس و پیشرفته نیاز دارد.

سنسورها یکی از مهم‌ترین اجزای تست‌های مبتنی بر ارتعاش هستند. سنسورها بر اساس پارامترهای اندازه‌گیری دسته بندی می‌شوند. از حسگرها برای اندازه‌گیری

1. operational modal analysis (OMA)

شناخت ویژگی‌های دینامیکی دودکش
بنایی صنعتی جهت بررسی‌های حفاظتی
نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی
صفیه نامی، فرهاد آخوندی

صص ۹-۱

شتاب، سرعت، جابجایی، کرنش، فشار و... استفاده می‌شود. در تست‌های ارتعاش محیطی بیشتر شتاب توسط حسگرهای شتاب‌سنج اندازه‌گیری می‌شود. طیف گسترده‌ای از انواع مختلف شتاب‌سنج مانند پیزوالکتریک، موازنه نیرو، ارتعاش‌سنج لیزری و غیره وجود دارد. برای اتخاذ یک حسگر مناسب برخی از ویژگی‌های مهم مانند هزینه، محدوده فرکانس، کمترین مقدار نویز، وضوح، پایداری، مصرف برق، نیازهای تهویه و غیره باید در نظر گرفته شود. انتخاب تعداد و طراحی چیدمان حسگرها به عنوان موضوعی بسیار مهم در تست‌های شناخت 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 چالش برانگیزتر می‌شود. چیدمان نامناسب یا تعداد ناکافی حسگرها می‌تواند منجر به داده‌های اشتباه یا اضافی شود. از طرفی تعداد و محل قرارگیری حسگرها به شدت بر هزینه تست شناخت سازه تاثیر می‌گذارد. انتقال و ثبت داده‌ها توسط سیستم‌های جمع‌آوری داده‌ها انجام می‌شود. نقش جمع‌آوری داده‌ها تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دست آمده از حسگرها به سیگنال‌های دیجیتال است. پس از آن، سیگنال‌های دیجیتال، آماده پردازش توسط نرم افزارهای تحلیلگر هستند. قابلیت اطمینان نتایج حاصله به ویژگی‌های حسگرها و سیستم‌های جمع‌آوری داده بستگی دارد. در واقع، سنسورها و سیستم‌های جمع‌آوری داده‌ها باید با یکدیگر سازگار باشند. در غیر این صورت نتایج ممکن است نادرست یا اشتباه باشد. مشکلات سیم‌کشی‌های عظیم و گران‌قیمت و مشکلات ایجاد نویز و اختلال، به ویژه برای سازه‌های بزرگ و پیچیده عمرانی، مهندسی را ترغیب به پیگیری سیستم‌های اندازه‌گیری بی‌سیم می‌کند. تحقیقات در مورد سیستم‌های جمع‌آوری داده‌های بی‌سیم و شبکه‌های حسگر بی‌سیم در اواخر دهه ۱۹۹۰ آغاز شد و به تدریج توسعه یافت. اگرچه حسگرهای بی‌سیم مزایای خاص خود را دارد، اما به دلیل هزینه بیشتر و زمان نصب، به طور کامل جایگزین سیستم‌های سیمی نشده است. (قالیشویان، ۲۰۱۵، ۶)

ارزیابی ایمنی سازه و حفظ برج‌های بنایی تاریخی در سال‌های اخیر مورد توجه فزاینده‌ای قرار گرفته است. فراتر از مسائلی که به طور کلی حفاظت از میراث معماری را مشخص می‌کند (یعنی پیری مصالح، وجود ترک و آسیب، اثرات تغییرات متوالی سازه‌ای و مداخلات تقویتی)، برج‌های بنایی سازه‌های نسبتاً باریکی هستند و تحت بارهای مرده قابل توجهی قرار می‌گیرند. در نتیجه، برج‌های تاریخی اغلب حساسیت بالایی نسبت به اقدامات دینامیکی، مانند ارتعاشات ناشی از ترافیک، نوسان زنگ، باد و زلزله از خود نشان می‌دهند. در این زمینه، آزمایش ارتعاش محیطی و تحلیل مودال عملیاتی (OMA) ابزارهای ایده‌آلی برای ارزیابی مستقیم رفتار دینامیکی سازه یا ارائه صحت سنجی موثر و دقیق مدل‌های FE قبل از استفاده از آنها در تجزیه و تحلیل عددی مورد نیاز برای ارزیابی ایمنی می‌باشد. (جنتایل، ۲۰۱۲، ۳)

۲-۳- روش انجام آزمایش

آزمایش‌های ارتعاش محیطی توسط یک شرکت خصوصی با هدف تعریف پارامترهای مدال (فرکانس‌های طبیعی، شکل‌های مودی) و نهایتاً به روز کردن مدل عددی دودکش انجام شد. جهت انجام تست مودال عملکردی بر روی سازه مورد نظر لازم بود در اولین مرحله رینگ‌های فلزی که دور سازه جهت مقاوم‌سازی از گذشته استفاده شده است باز گردد تا فشار این رینگ‌ها از سازه برداشته شود. بعد از باز کردن

شناخت ویژگی‌های دینامیکی دودکش
بنایی صنعتی جهت بررسی‌های حفاظتی
نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی
صفیه نامی، فرهاد آخوندی

صص ۹-۱

- رینگ‌های تست مودال عملکردی با استفاده از ۱۲ شتابسنج کابلی که در فواصل ۲٫۵ متری قرار گرفته بود انجام گرفته است. مراحل انجام تست به شرح ذیل می‌باشد:
- ۱- نصب شتاب‌سنج‌ها در فواصل ۲٫۵ متری در ارتفاع دودکش
 - ۲- روشن کردن و اتصال شتاب‌سنج‌ها به دیتالاگر
 - ۳- ثبت و ذخیره داده‌های دریافتی از شتاب‌سنج‌ها توسط دیتالاگر
 - ۴- مدل‌سازی و استخراج اطلاعات و داده‌های مورد نظر



شکل ۲- مراحل انجام تست مودال
عملیاتی (مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱)

۳-۳- تجهیزات مورد استفاده در آزمایش

شتاب‌سنج

حسگرهای شتاب‌سنج که در این تست استفاده شده است حسگرهای کابلی می‌باشند. دقت حسگرهای کابلی است؛ و نرخ نمونه برداری حسگر ۲۰۰ نمونه در ثانیه می‌باشد. در شکل ۳ نمونه‌ای از نحوه نصب حسگرهای شتاب‌سنج کابلی نشان داده شده است.



شکل ۳- سنسورهای شتاب‌سنج کابلی
(مأخذ: شرکت سپاس، ۱۴۰۱)

دیتالاگر

برای ثبت داده‌های شتاب به دست آمده از حسگرهای کابلی از یک دیتالاگر دینامیکی ۳۶ کاناله استفاده شده است.

شناخت ویژگی‌های دینامیکی دودکش
بنایی صنعتی جهت بررسی‌های حفاظتی
نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی
صفیه نامی، فرهاد آخوندی

صص ۹-۱



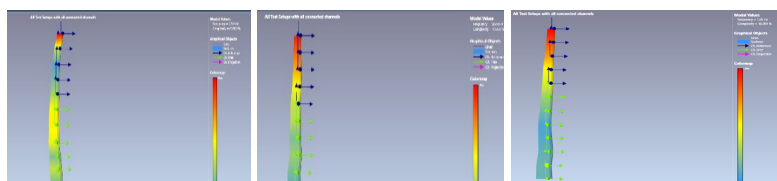
شکل ۴- نمونه‌ای از دیتالاگر (مأخذ:
شرکت سپاس، ۱۴۰۱)

۳-۴- نتایج به دست آمده از تست مودال

با استفاده از نرم‌افزار ARTEMIS ویژگی‌های مودال و فرکانس‌های سازه بر اساس انتخاب نقطه اوج دامنه فرکانس پیشرفته تجزیه شده (EFDD) شناسایی شدند. (جدول شماره ۱)

جدول ۱- فرکانس مودهای سازه به
دست آمده از تست مودال عملیاتی
(مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱)

Mode No	(Freq. (Hz EFDD Method
Mode ۱	۱.۰۵
Mode ۲	۱.۰۷۴
Mode ۳	۳.۷۱
Mode ۴	۳.۷۳
Mode ۵	۸.۲۲
Mode ۶	۹.۷۶۶
Mode ۷	۹.۸۱
Mode ۸	۱۰.۳۵
Mode ۹	۱۶.۱۶
Mode ۱۰	۱۶.۱۸



۴- به‌روزرسانی مدل عددی

شکل ۵- الف) شکل مود اول سازه ب) شکل مود دوم سازه ج) شکل مود سوم سازه (مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱)

به‌روزرسانی مدل به منظور مطابقت با فرکانس‌های طبیعی به دست آمده از تست مودال ارتعاش محیط انجام می‌شود. با توجه به تفاوت در نتایج به دست آمده از تست ارتعاش محیط و مدل‌سازی عددی که براساس خصوصیات مکانیکی حاصل از تست جک مسطح دوتایی (جدول شماره ۲) انجام شده است، تغییراتی در مدل ساخته شده ایجاد کرده تا نتایج تا حد امکان برهم منطبق شوند. به این منظور مدل‌های مختلف را با شرایط تکیه گاهی مختلف و تغییرات مدول الاستیسیته ایجاد می‌کنیم.

مصلح	مدول الاستیسیته MPa	جرم مخصوص Kg/m ^۳	نسبت پواسون	مقاومت فشاری MPa	مقاومت کششی MPa
	مصلح بنایی ۱۰۱۳،۴۵ ۱۹۰۰		۰،۲۵	۱،۰۰۱	۰،۱۰۰۱

جدول ۲- مشخصات مکانیکی استفاده شده در مدل عددی (مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱)

با توجه به نتایج تحلیل اولیه و کمتر بودن فرکانس مودها نسبت به نتایج آزمایش ارتعاش محیط انجام شده و نیز با در نظر گرفتن این موضوع که غالباً مدول الاستیسیته در حالت دینامیکی از مدول حاصل از آزمایشات استاتیکی (تست جک مسطح دوتایی) بیشتر می‌باشد؛ مدول الاستیک پارامتری بود که برای کالیبراسیون در نظر گرفته شد که بین مقادیر معقول برای انواع مختلف سازه بنایی آن را افزایش داده تا تاثیر آن را مشاهده کرده و نتایج حاصل از مدلسازی را به نتایج تست نزدیک شود. با در نظر گرفتن مدول الاستیسیته به مقدار MPa ۲،۳۴ نتایج حاصل با درصد خطای قابل چشم پوشی با نتایج حاصل از تست دینامیکی منطبق می‌شود.

Experimental modes		Numerical modes		
Mode	Freq. [[Hz	Mode	Freq. [[Hz	(%)Error
1	1.05	1	1.07	1.9
2	1.074	2	1.07	-0.3
3	3.71	3	4.51	21.5
5	3.73	4	4.51	20.9
6	8.22	5	8.86	7.7
7	9.766	6	9.95	1.88
7	9.81	7	9.95	1.42
8	10.35	8	10.40	0.48
9	16.16	9	16.29	0.8
10	16.18	10	16.29	0.6

جدول ۳- مقایسه فرکانس‌های حاصل از آزمایش ارتعاش محیط و فرکانس‌های مدل عددی به‌روزرسانی شده (مأخذ: نگارنده، ۱۴۰۱)

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک مطالعه سازه‌ای دینامیکی بر روی دودکش صنعتی تاریخی انجام شده است. هیچ اطلاعات اساسی در مورد سازه مورد بررسی وجود نداشته است، بنابراین تمام پارامترهای مورد استفاده در این بررسی از طریق آزمایشات مربوطه تعیین شده است.

بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش ارتعاش محیط و همانطور که در جدول شماره یک آمده است باتوجه به تقارن محوری در دودکش مورد بررسی مودهای خمشی سازه به صورت جفت فرکانس‌های نزدیک به هم اما در جهات عمود بر هم ایجاد می‌شود که این مورد در ارتباط با نتایج حاصل از تحلیل عددی نیز صادق است.

از دیگر نتایج به دست آمده در این پژوهش می‌توان عنوان کرد، باتوجه به روند طی شده در بخش به‌روزرسانی مدل عددی و تغییر پارامترهای مختلف از جمله مدول الاستیسیته و شرایط تکیه‌گاهی جهت همگام‌سازی فرکانس‌های حاصل از مدل عددی با فرکانس‌های آزمایش ارتعاش محیط، مدول الاستیسیته سازه در حالت استاتیک و دینامیکی متفاوت بوده و می‌تواند به عنوان پارامتری مهم و تاثیرگذار جهت به‌روزرسانی مدل عددی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

۱. آصفی مازیار و رادمهر مهسا (۱۳۹۳)، «ارتقای بهسازی میراث کالبدی، در حوزه فنی و مرمت معماری با رویکرد تفاهم بخشی دو دیدگاه»، شهر ایرانی اسلامی، شماره ۱۶، ص ۲۹ - ۴۱
۲. صالحی مهدی، اورک محمد، قربانی مهدی و احمدی بلوطکی محمد (۱۳۹۷)، «مطالعه تجربی عملکرد روش‌های مختلف آنالیز مودال محیطی با تحریک همزمان تصادفی و هارمونیک»، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، دوره ۲۰، شماره ۲، ص ۵۴ - ۷۱
۳. نژاد ابراهیمی احد، فرخی شهین و شهابنگ مهسا (۱۳۹۷)، «الگو شناسی معماری کارخانه‌های صنعتی پهلوی اول در تبریز»، نقش جهان، دوره ۹، شماره ۱، ص ۳۳ - ۴۴
4. Bru David, Reynau Ricardo, Baeza F. Javier, Ivorra Salvador. (2018). Structural damage evaluation of industrial masonry chimneys. *Materials and Structures*, 51: 34, pp 1-16.
5. Gentile Carmelo, Saisi Antonella, Cabboi Alessandro. (2012). Dynamic monitoring of a masonry tower. *Proc. of the Int. Conf. SAHC 2012*.
6. Ghalishooyan Morteza, Shooshtari Ahmad. (2015). Operational modal analysis techniques and their theoretical and practical aspects: A comprehensive review and introduction. 6th International Operational Modal Analysis Conference
7. Rainieri Carlo, Fabbrocino Giovanni. (2011). Operational modal analysis for the characterization of heritage structures. *GEOFIZIKA*, 28, pp 109-125

شناخت ویژگی‌های دینامیکی دودکش
بنایی صنعتی جهت بررسی‌های حفاظتی
نمونه موردی دودکش کارخانه چرم خسروی
صفیه نامی، فرهاد آخوندی

صص ۱-۹