

هنر اندازه‌گیری و مدلسازی در آزمایش مودال و مشکلات آن (بخش اول)

هدی سرپرست^۱، محمد رضا آشوری^{۲*}، محمد مهدی خطیبی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی، دانشگاه سمنان
^۲ دانشیار گروه مکانیک دانشکده مهندسی، دانشگاه سمنان- آزمایشگاه تحلیل مودال
^۳ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک- طراحی کاربردی، دانشگاه سمنان
*mr.ashory@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۴/۲۸ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۰۴

چکیده

طراحی دقیق و تعمیر و نگهداری سازه‌های گوناگون از قبیل ساختمان‌ها، پل‌ها، سدها، هواپیماها، قطارها و غیره لازم و ضروری است. یکی از الزامات طراحی و تعمیر و نگهداری سازه‌ها، تحلیل دینامیکی آنها می‌باشد. به جهت در دسترس نبودن جواب تحلیلی برای سازه‌های پیچیده، با بارگذاری‌ها و شرایط مرزی مختلف و نیز وجود خطاهایی نظیر خطاهای حاصل از به‌کارگیری فرضیات و تئوری‌های نامناسب، خطا در مدل کردن جزئیات سازه‌های پیچیده و عدم اطلاع صحیح از خواص مواد، مدل‌های تقریبی عددی نظیر روش اجزای محدود نیز با مشکلاتی مواجه می‌باشند. از این رو آزمایش مودال ابزار مناسبی برای دستیابی به خواص دینامیکی سازه شناخته می‌شود. با توجه به اینکه در مسیر انجام آزمایش مودال عواملی وجود دارد که باعث ایجاد خطا در نتایج بدست آمده می‌شود، شناسایی عوامل خطا و ارائه راه‌حل‌هایی در جهت کاستن از آنها، می‌تواند نتایج به دست آمده از آزمایش را تا حد زیادی بهبود بخشد. این موضوع در قالب دو مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. در مقاله اول مهم‌ترین عوامل خطا در آزمایش مودال معرفی شده اند و برخی از عوامل خطا نظیر اثر بارگذاری شتاب‌سنج، درگیری قطعه و لرزاننده و رفتار غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته و به منظور کاستن یا برطرف نمودن آنها راه‌حل‌هایی ارائه شده است. در مقاله دوم که مکمل این مقاله است، سایر عوامل خطا در آزمایش مودال نظیر عدم امکان اندازه‌گیری درجات آزادی چرخشی، عدم دقت در آزمایش چکش، نویز، خطای پردازش سیگنال‌ها و مودهای نزدیک به هم مطرح گردیده و راه‌حل‌هایی برای کاستن یا برطرف نمودن آنها ارائه شده است. سپس در ادامه، آزمایش مودال محیطی به عنوان روشی که می‌تواند مشکلات مربوط به یکی از این منابع خطا یعنی تحریک را در آزمایش مودال برطرف کند مطرح شده است.

واژه‌های کلیدی: آزمایش مودال، شتاب‌سنج، لرزاننده، رفتار غیرخطی

۱. مقدمه

فضایی مانند آنتن‌های ماهواره‌ای، به منظور کم کردن اثرات اینرسی حین مأموریت، کاهش وزنی در حد چند گرم نیز، دارای اهمیت فراوان است. هنگامی که ارتعاشات مد نظر است، درک بهتر مشخصات دینامیکی سازه‌ها به وسیله روش‌های تحلیلی، عددی، تجربی و یا ترکیبی از آنها و سپس مساله طراحی سازه‌ها با ملاحظات مناسب دینامیکی دارای اهمیت می‌شود. مدلسازی کامپیوتری، به تنهایی قادر به تعیین رفتار دینامیکی سازه نمی‌باشد، زیرا برخی خواص سازه مانند میرایی و یا خواص غیرخطی از قواعد معمول در مدلسازی پیروی نمی‌کنند. همچنین در اکثر موارد، مدلسازی دقیق شرایط مرزی امکان‌پذیر

در دو دهه گذشته تحلیل مودال به دانشی فراگیر با هدف تعیین، بهبود و بهینه سازی مشخصات دینامیکی سازه‌های مهندسی تبدیل شده است. تحلیل مودال نه تنها در مهندسی مکانیک و هوانوردی، بلکه در سازه‌های ساختمانی، مسائل بیومکانیک، سازه‌های فضایی، تجهیزات اکوستیک، حمل و نقل و نیروگاه‌های هسته ای نیز کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. طراحی امروزی سازه‌های پیچیده مکانیکی، هوایی و ساختمانی به گونه‌ای است که باید علاوه بر مقاومت بالا، دارای وزن کم و قابلیت انعطاف زیاد باشند. به عنوان مثال، در سازه‌های

منظور کاهش آنها راه‌حل‌هایی ارائه شده است. سرانجام در بخش ۴ نتیجه‌گیری کلی از مباحث مطرح‌شده صورت گرفته است.

۲. معرفی آزمایش مودال

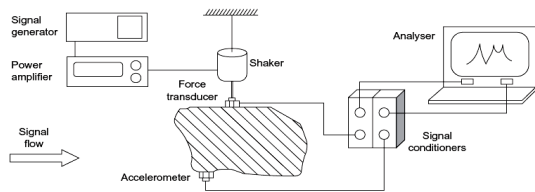
آزمایش مودال، تکنیکی تجربی برای به دست آوردن مدل دینامیکی یک سیستم ارتعاشی خطی مستقل از زمان^۳ می‌باشد. رابطه تئوری این تکنیک، به صورت نسبت پاسخ ارتعاشی در یک نقطه از سازه به تحریک در همان نقطه و یا نقاط دیگر، به صورت تابعی از فرکانس تحریک می‌باشد. این رابطه که اغلب به صورت یک تابع ریاضی مختلط می‌باشد، تابع پاسخ فرکانسی^۴ نامیده می‌شود. با در نظر گرفتن نقاط مختلف تحریک و پاسخ روی سازه، مجموعه‌ای کامل از توابع پاسخ فرکانسی تشکیل می‌شود که می‌توان آنها را در قالب ماتریس تابع پاسخ فرکانسی سیستم بیان کرد. این ماتریس، متقارن می‌باشد و بیانگر اصل جابه‌جایی ماکسول در سازه است. انجام آزمایش مودال شامل اندازه‌گیری توابع پاسخ فرکانسی و یا تابع پاسخ ضربه^۵ سازه است. اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانسی، می‌تواند به سادگی با اعمال یک نیرو (که اندازه‌گیری شده) در یک نقطه از سازه در غیاب سایر نیروهای تحریک، و اندازه‌گیری پاسخ ارتعاش در یک یا چند نقطه از سازه انجام شود [۱].

تحریک می‌تواند در یک بازه فرکانسی تعیین‌شده، سینوسی^۶، گذرا^۷ و یا تصادفی^۸ باشد. تحریک معمولاً توسط یک مبدل^۹ نیرو در نقطه اعمال نیرو اندازه‌گیری می‌شود. پاسخ نیز می‌تواند توسط شتاب‌سنج^{۱۰} یا ابزارهایی دیگر، اندازه‌گیری شود. هر دوی سیگنال‌های تحریک و پاسخ، به یک آنالایزر ارسال می‌شوند که وظیفه محاسبه توابع پاسخ فرکانسی را به عهده دارد (شکل ۱).

یکی از ملاحظات عملی در آزمایش مودال این پرسش است که چه مقدار داده تابع پاسخ فرکانسی برای استخراج مدل مودال سازه کافی می‌باشد. هنگام انجام یک آزمایش

نمی‌باشد. از روش اجزای محدود^۱ می‌توان، به عنوان یک روش مدلسازی کامپیوتری فراگیر در مواردی که تحلیل مشخصات دینامیکی سازه مورد نیاز باشد استفاده نمود. برای به دست آوردن نتایج با معنی از این ابزار عددی، به اطلاعات کاملی از تئوری دینامیک سازه نیاز است. بخش مهمی از تحلیل دینامیکی اجزای محدود را تحلیل مودال تشکیل می‌دهد. تحلیل مودال، فرایند تعیین خواص ذاتی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها و به‌کارگیری آنها به منظور ایجاد یک مدل ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم می‌باشد. این مدل ریاضی، مدل مودال سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال نامیده می‌شوند. تحلیل مودال، هر دو مبحث تئوری و تجربی را در بر می‌گیرد. تحلیل مودال تئوری، بر اساس یک مدل فیزیکی از سیستمی دینامیکی شامل خواص جرمی، سختی و میرایی می‌باشد. این خواص ممکن است به صورت معادلات دیفرانسیل پاره‌ای موجود باشند. به کمک تحلیل اجزای محدود مدرن می‌توان تقریباً هر سازه دینامیکی خطی را گسسته‌سازی کرد، که در نتیجه به طور قابل‌ملاحظه‌ای قابلیت و میدان کاری تحلیل مودال تئوریک افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، گسترش سریع توانایی‌های داده برداری و پردازش داده‌ها، در دو دهه اخیر باعث پیشرفت‌های زیادی در عرصه تحلیل مودال تجربی، که آزمایش مودال^۲ نامیده می‌شود، شده است [۱]. آزمایش مودال به عنوان یک ابزار قدرتمند برای تعیین مشخصات دینامیکی سیستم نظیر فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها به کار می‌رود. با وجود توانمندی این روش در تعیین خواص ذاتی سیستم، مشکلاتی نیز در مسیر انجام آزمایش مودال وجود دارد. بنابراین در بخش ۲ این مقاله به معرفی آزمایش مودال و برخی از مهم‌ترین کاربردهای آن پرداخته شده است. سپس در بخش ۳ انواع خطاها در آزمایش مودال معرفی شده اند و برخی از عوامل خطا نظیر؛ اثر بارگذاری شتاب‌سنج، درگیری قطعه و لرزاننده و رفتار غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته و به

تابع پاسخ فرکانسی و یا مجموعه‌ای از آنها به دست آورد [۱].



شکل ۳. مجموعه اندازه‌گیری با تحریک لرزاننده

تحلیل مودال در مجموع شامل سه مرحله آماده‌سازی برای آزمایش، اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و استخراج پارامترهای مودال می‌باشد. آماده‌سازی آزمایش شامل انتخاب تکیه‌گاه سازه، نوع تحریک، نقاط تحریک، سخت افزارهای اندازه‌گیری نیرو و پاسخ، تعیین هندسه مدل که در آن نقاط اندازه‌گیری مشخص شده است و تعیین عواملی که باعث عدم دقت در اندازه‌گیری می‌شوند می‌باشد. در طول آزمایش، یک مجموعه تابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده و ذخیره می‌شود تا در مرحله بعد به منظور تعیین پارامترهای مودال سازه، تحلیل شوند [۱].

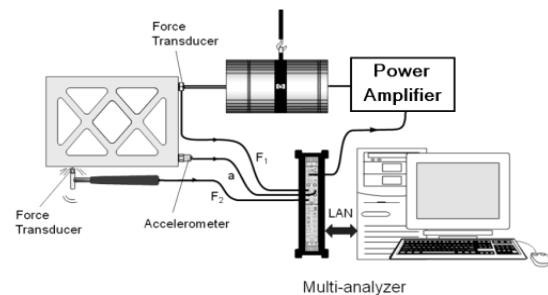
۲.۱. کاربردهای تحلیل مودال

روش تحلیل مودال تجربی در نهایت به تعیین مدل مودال سیستم دینامیکی منجر می‌شود که شامل فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها است. این مدل در مقایسه با تابع پاسخ فرکانسی و یا پاسخ ارتعاشی، تصویری از رفتارهای دینامیکی سیستم ارائه می‌دهد.

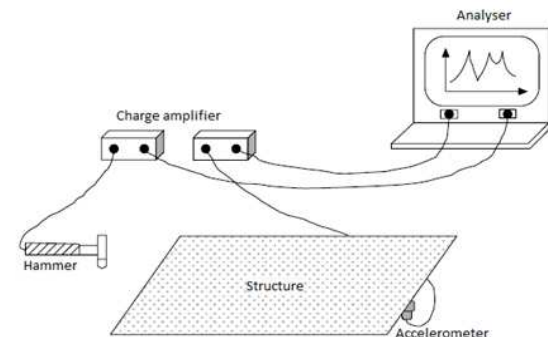


(الف)

ساده با چکش^{۱۱} (شکل ۲)، از یک نقطه اندازه‌گیری پاسخ ثابت و نقاط نیروی متحرک استفاده می‌شود.



شکل ۱. آرایش دستگاه‌ها برای اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانسی



شکل ۲. مجموعه اندازه‌گیری با تحریک چکش

در این صورت، داده‌های تابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده یک سطر از ماتریس تابع پاسخ فرکانسی را تشکیل خواهند داد. از نظر تئوری، این اطلاعات برای به دست آوردن مدل مودال کافی می‌باشند. در یک آزمایش ساده با لرزاننده^{۱۲} (شکل ۳)، نقطه اعمال نیروی تحریک ثابت است و اندازه‌گیری پاسخ در نقاط مختلف انجام می‌شود. داده‌های تابع پاسخ فرکانسی به دست آمده، یک ستون از ماتریس تابع پاسخ فرکانسی را تشکیل می‌دهند. مجدداً این داده‌ها نیز از نظر تئوری برای تحلیل سیستم کافی می‌باشند. با در دست بودن این اطلاعات کافی و به کمک یک تحلیل عددی، پارامترهای مودال به روش‌های مختلف برازش منحنی^{۱۳}، حاصل خواهند شد. این فرآیند، تحلیل مودال تجربی نام دارد. به کمک پارامترهای به دست آمده، مدل دینامیکی سازه تحت آزمایش ساخته می‌شود. پارامترهای مودال را می‌توان به کمک منحنی‌های تکی

بنابراین، کاربردهای تحلیل مودال عمدتاً در ارتباط با استفاده از مدل به دست آمده در طراحی، حل مسائل و تحلیل آنها می‌باشد که نمونه‌هایی از این کاربردها در شکل (۴) نشان داده شده است.

در روش تحلیل مودال تجربی، به کمک داده‌های مربوط به مدل پاسخ، مدل مودال ایجاد می‌شود. پس از استخراج مدل مودال، کاربردهای متعددی برای آن وجود خواهد داشت. در برخی از این کاربردها، مستقیماً از داده‌های اندازه‌گیری شده استفاده می‌شود. در حالی که در برخی دیگر از این کاربردها، این نتایج جهت تحلیل‌های بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در زیر به برخی از کاربردهای تحلیل مودال اشاره شده است [۱]:

الف. رفع اشکال فوری^{۱۴}

ب. تطابق مدل اجزای محدود با نتایج تجربی مودال^{۱۵}

ج. اصلاح سازه^{۱۶}

د. تحلیل حساسیت^{۱۷}

ه. کاهش ابعاد مدل ریاضی^{۱۸}

و. پیش‌بینی پاسخ اجباری^{۱۹}

ز. تعیین نیرو^{۲۰}

ح. پیش‌بینی پاسخ^{۲۱}

ط. جفت کردن زیرسازه‌ای^{۲۲}

ی. تشخیص عیوب سازه‌ای^{۲۳}

ک. کنترل فعال ارتعاشات^{۲۴}

۳. انواع خطاها در آزمایش مودال و راه‌حلهایی

برای کاهش آنها

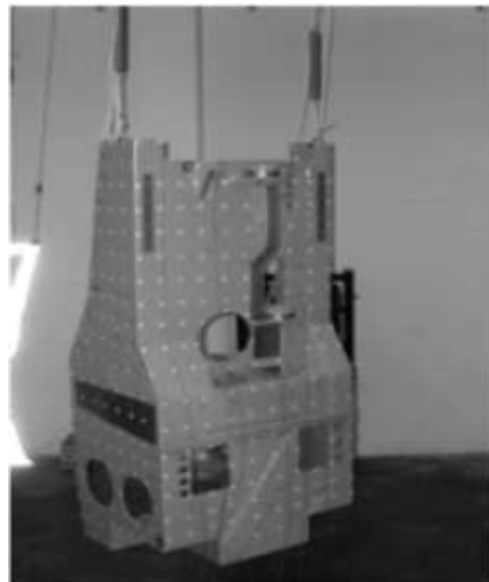
آزمایش مودال یک روش قدرتمند برای تعیین مشخصات دینامیکی سیستم نظیر فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها می‌باشد. علی‌رغم توانمندی این روش در تعیین خواص ذاتی سیستم، عواملی وجود دارد که باعث ایجاد خطا در نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش



(ب)



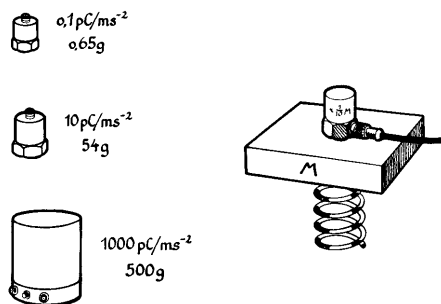
(ج)



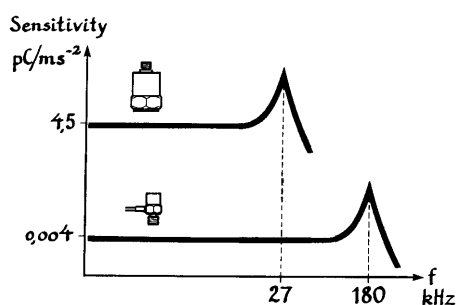
(د)

شکل ۴. مثال‌هایی از انجام آزمایش مودال: (الف) آزمایش ارتعاشات یک قاب چندتکه توسط لرزاننده، (ب) آزمایش ارتعاشات هواپیما توسط لرزاننده، (ج) آزمایش یک قطعه فلزی توسط لیزر، (د) آزمایش یک قاب توسط چکش

ترانسدیوسر ارائه شده است [۷]. البته زمانی که از شتابسنج‌های کوچک استفاده می‌شود، می‌توان از اثرات بارگذاری جرم آنها به دلیل ناچیز بودن صرف‌نظر کرد. به طور واضح، یک شتابسنج سبک اثر بارگذاری کمی روی سازه دارد. ولی مشکل آن این است که دارای حساسیت پایینی بوده و گران می‌باشد. از طرفی این نوع شتابسنج‌ها همیشه در دسترس نمی‌باشند. بنابراین از میان شتابسنج‌های موجود، شتابسنجی با جرم حداقل که قادر به اندازه‌گیری پاسخ‌های سازه در محدوده فرکانسی مورد نظر باشد، بهترین گزینه است. اثر بارگذاری شتابسنج و نمودار حساسیت شتابسنج بر حسب فرکانس به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) نشان داده شده است. علاوه بر تأثیر جرم شتابسنج در فرکانس‌های طبیعی، ممکن است شتابسنج روی بعضی از موده‌های سازه تأثیر بگذارد و روی موده‌های دیگر بدون تأثیر باشد.



شکل ۵. اثر بارگذاری شتابسنج



شکل ۶. نمودار حساسیت شتابسنج بر حسب فرکانس

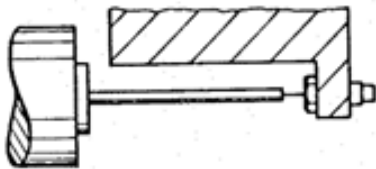
می‌شود. از مهم‌ترین عوامل ایجاد خطا در آزمایش مودال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- الف. اثر بارگذاری شتابسنج
 - ب. درگیری قطعه و لرزاننده
 - ج. رفتار غیرخطی
 - د. عدم امکان اندازه‌گیری درجات آزادی چرخشی
 - ه. عدم دقت در آزمایش چکش
 - و. نویز
 - ز. خطای پردازش سیگنال‌ها
 - ح. موده‌های نزدیک به هم
- در این مقاله سه مورد اول از عوامل ایجاد خطای مطرح شده، مورد بررسی قرار گرفته و راه‌حلی به منظور کاستن یا برطرف نمودن آنها ارائه شده است.

۳.۱. اثر بارگذاری شتابسنج

اثر بارگذاری جرم شتابسنج منبعی از خطا در آزمایش مودال می‌باشد. شتابسنج نصب‌شده روی یک سیستم ارتعاشی دینامیک سازه را تغییر می‌دهد و خطاهایی را در توابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده ایجاد می‌کند. این مشکل باعث دستیابی به نتایج غیرواقعی می‌شود، به طوری که معمولاً فرکانس‌های تشدید اندازه‌گیری شده کمتر از مقدار واقعی به دست می‌آیند. روش‌هایی که به حذف اثر جرم اضافی روی توابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده پرداخته اند برای برطرف نمودن این مشکل بکار می‌روند [۲]. روش حذف جرم برای مبدل‌ها، در نقاطی که تحریک می‌شوند توسط اِوینز^{۲۵} در مرجع [۳] شرح داده شده است. همچنین منابع محدودی درباره تعیین مقدار اثر بارگذاری جرم که توسط اندازه‌گیری شتابسنج در نقاطی غیر از نقاط تحریک ایجاد می‌شود، وجود دارد [۴ و ۵]. روش اسمورف^{۲۶} به منظور جلوگیری از مشکلات گسترش مدل مودال با هدف اصلاح سازه‌ای توسط کلوترمن^{۲۷} مطرح شده [۶] و سپس بر اساس آن یک راه حل کلی برای تصحیح اثرات بارگذاری جرم

در حالت مطلوب استیتر با یک سختی محوری بالا و سختی عرضی پایینی داشته باشد تا بتواند نیرو را در جهت محوری منتقل کند و کمترین درگیری‌ها را در درجات آزادی دیگر داشته باشد [۳]. اما به هر حال نیروها و ممان‌هایی غیر از نیروی تحریک محوری ممکن است تولید شوند که در پاسخ‌های اندازه‌گیری شده تأثیرگذار خواهند بود. این امر باعث ایجاد خطای سیستماتیک یا انحرافی^{۳۳} در اندازه‌گیری‌ها می‌شود. انتشارات چندانی در خصوص میزان تأثیر استیتر روی توابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده وجود ندارد و معمولاً انتخاب استیتر با سعی و خطا یا به صورت تجربی انجام می‌شود. اتصال لرزاننده به سازه را می‌توان با استفاده از مدل‌های ساده شبیه‌سازی نمود، سپس بر اساس این شبیه‌سازی، استیتر را به گونه‌ای طراحی کرد که اثر آن روی توابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده کمینه شود. مدل‌های مختلفی برای این شبیه‌سازی در مراجع [۸-۱۰] پیشنهاد شده است. یکی از اشکالاتی که این مدل‌ها دارند این است که در اغلب آنها مشخصات دینامیکی سازه آزمایش در نظر گرفته نمی‌شود و معمولاً شرایط مرزی سازه و لرزاننده به صورت لولا یا گیردار فرض می‌شود. این ساده‌سازی‌ها باعث کاهش دقت مدل شده و از اعتبار نتایج به دست آمده می‌کاهد. شکل (۸) نشان دهنده نمونه‌ای از این اتصال می‌باشد [۳].



شکل ۸. نمونه‌ای از نحوه اتصال سازه با استیتر

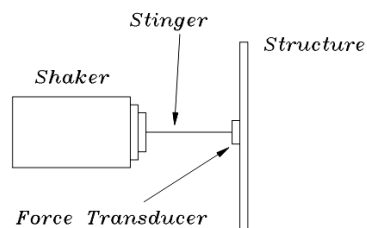
برای محاسبه تأثیر اصلی نحوه اتصال استیتر بر روی نتایج اندازه‌گیری شده از آزمایش، روش اسمورف قابل استفاده می‌باشد [۲]. باید توجه کرد که طول استیتر تأثیر قابل توجهی بر توابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری

بنابراین اگر شتاب‌سنج در یک مود ارتعاشی سازه نزدیک گره قرار گیرد، اثرپذیری آن مود کمتر است و تصحیح اثر بارگذاری جرم شتاب‌سنج ضرورت کمتری دارد و در مقابل اگر شتاب‌سنج نزدیک پادگره^{۲۸} یعنی جایی در یک مود ارتعاشی که بیشترین حرکت را دارد قرار گیرد، حذف جرم اهمیت ویژه‌ای می‌یابد [۲].

راه‌حل دیگری که برای حذف اثر بارگذاری جرم شتاب‌سنج می‌توان پیشنهاد کرد، استفاده از لیزر به جای شتاب‌سنج در آزمایش سازه‌های کوچک است. لیزر قابلیت حذف اثر بارگذاری جرم شتاب‌سنج را دارد، زیرا بدون تماس با قطعه می‌تواند اندازه‌گیری را انجام دهد. همچنین امکان اندازه‌گیری از فواصل دور و اندازه‌گیری پیوسته^{۲۹} توسط لیزر فراهم می‌شود. در مواردی که قطعه داغ است و نمی‌توان شتاب‌سنج را به طور مستقیم روی قطعه قرار داد نیز می‌توان از لیزر استفاده کرد. یکی دیگر از مزیت‌های لیزر امکان اندازه‌گیری چند درجه آزادی به طور همزمان در یک نقطه می‌باشد. البته لیزر دارای معایبی نیز می‌باشد که از مهم‌ترین آنها می‌توان به هزینه بر بودن، محاسبات بیشتر و حساسیت به نویز در فرکانس‌های پایین اشاره کرد [۳].

۳.۲. درگیری قطعه و لرزاننده

زمانی که از لرزاننده برای تحریک یک سازه استفاده می‌شود، به طور متداول یک میله رابط بین لرزاننده و مبدل نیرو که به سازه آزمایش متصل است، قرار می‌گیرد (شکل ۷) که به آن پوش‌راد^{۳۰}، استیتر^{۳۱} یا درایو رود^{۳۲} می‌گویند.



شکل ۷. تماس لرزاننده با سازه

روش‌هایی وجود دارد که به برخی از آنها در این قسمت اشاره شده است [۳].

الف. یکی از روش‌های شناسایی رفتار غیرخطی در یک سیستم، از طریق بررسی تابع پاسخ فرکانسی می‌باشد. به این صورت که اگر با تغییر سطح نیرو، تابع پاسخ فرکانسی تغییر کند سیستم دارای رفتار غیرخطی است زیرا در یک سیستم خطی با چندبرابر کردن نیرو، پاسخ نیز به همان نسبت چندبرابر می‌شود و بنابراین تابع پاسخ فرکانسی تغییری نمی‌کند.

ب. روش دوم نیز به تابع پاسخ فرکانسی سیستم مربوط می‌شود. به این ترتیب که اگر محل نیرو و پاسخ در یک سیستم عوض شود (مثلاً یک بار محل تحریک نقطه ۱ و محل اندازه‌گیری پاسخ سیستم نقطه ۲ می‌باشد و بار دیگر تحریک از نقطه ۲ انجام شده و پاسخ در نقطه ۱ اندازه‌گیری شود) و این مسأله باعث تغییر تابع پاسخ فرکانسی شود این به معنای غیرخطی بودن رفتار سیستم است. به عبارت دیگر در یک سیستم خطی ماتریس تابع پاسخ فرکانسی متقارن می‌باشد.

ج. روش سوم برای تشخیص رفتار غیرخطی یک سیستم استفاده از تبدیل هیلبرت^{۳۵} است. به این صورت که اگر بخش حقیقی تبدیل هیلبرت تابع پاسخ فرکانسی با بخش موهومی تابع پاسخ فرکانسی برابر شود یا بخش موهومی تبدیل هیلبرت تابع پاسخ فرکانسی با بخش حقیقی تابع پاسخ فرکانسی برابر شود رفتار سیستم خطی است و در غیر این صورت رفتار سیستم غیرخطی می‌باشد.

با توجه به این که تمامی سازه‌ها تا حدی دارای رفتار غیرخطی می‌باشند، لازم است جهت بررسی رفتار غیرخطی در آزمایش‌های دینامیکی، برخی از خواص مهم که وابسته به رفتار غیرخطی سازه‌ها می‌باشند شناخته شوند.

در بیشتر مواقع رفتارهای غیرخطی مشاهده شده در نتایج آزمایش، ناشی از رفتار غیرخطی سازه نمی‌باشد، بلکه ناشی از چیدمان آزمایش، نوع تحریک یا مشکلات ناشی از تجهیزات اندازه‌گیری (مانند اشباع شدن یا نحوه نصب

شده در محدوده فرکانسی پایین دارد. به طوری که با کاهش طول استینگر، فرکانس‌های مودهای صلب در محدوده فرکانسی پایین افزایش می‌یابند. بنابراین در فرکانس‌های پایین‌تر استینگر باید باریک‌تر و طولی‌تر یا به عبارت دیگر انعطاف‌پذیرتر باشد. همچنین کاهش قطر استینگر با در نظر گرفتن طول ثابت برای آن باعث افزایش سطح رسپتانس^{۳۴} استینگر و پایین آمدن تشدیدها و ضدتشدیدها می‌شود. از آنجایی که در طراحی استینگر هدف اصلی اجتناب از ضدتشدیدهای آن می‌باشد، گام‌هایی برای طراحی آن با در نظر گرفتن این هدف در مرجع [۲] ارائه شده است. البته نامیزانی نیز از عواملی است که روی عملکرد استینگر تأثیرگذار می‌باشد [۲]. با این تفاسیر بهترین راه طراحی استینگر این است که ابتدا با قطر کمینه طراحی شود و سپس طول آن بر اساس کمینه و بیشینه فرکانس‌های طراحی تعیین گردد.

۳.۳ رفتار غیرخطی

وجود انواع رفتارهای غیرخطی در آزمایش‌های دینامیکی امری غیر قابل اجتناب است. رفتار غیرخطی با روش‌های معمولی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد و تا حدی برای بعضی افراد ناشناخته است، تا آنجایی که اغلب، رفتارهای غیرخطی، در آزمایش‌های دینامیکی به کیفیت پایین نتایج یا پدیده‌های پیش‌بینی‌نشده منجر می‌شود. همچنین در بیشتر موارد، عدم رعایت دقت در چیدمان آزمایش یا مشکلاتی در تجهیزات اندازه‌گیری به وجود رفتار غیرخطی می‌انجامد. عواملی از قبیل عدم هم‌محوری، لقی، لرزه کابل‌ها، تأثیرات دما، عدم تطابق آمپدانس و نصب نامناسب حسگرها از این قبیل می‌باشد. رفتارهای غیرخطی مشاهده شده می‌توانند وابسته به دامنه، سرعت و یا فرکانس باشند. در اغلب سازه‌های سرهم‌شده با پیچ، پرچ یا نقطه‌جوش، وقتی سازه تحت بارگذاری ارتعاشی قرار می‌گیرد، مخصوصاً اگر دامنه تحریک بزرگ باشد، رفتار تغییر مکان یا سرعت غیرخطی است. برای شناسایی رفتار غیر خطی در یک سیستم

غیرخطی می‌باشد، بسیاری از پدیده‌های غیرخطی را آشکار می‌سازد. این تحریک به طور همزمان قادر به تمرکز تمام انرژی یک فرکانس و اعمال پهنای گسترده‌ای از دامنه تحریک می‌باشد.

ب. تحریک ضربه: تحریک ضربه به عنوان یک تحریک گذرا شناخته شده است که تحریکی کاربردی و مناسب می‌باشد. این تحریک به صورت آنی پاسخ سیستم را افزایش می‌دهد که در نهایت با افزایش زمان کاهش می‌یابد. این بدان معنی است که سختی از یک مقدار زیاد شروع شده و سپس با کاهش پاسخ نسبت به زمان، کاهش می‌یابد و این مشابه با نرم‌شوندگی سختی می‌باشد. تحریک ضربه به ندرت می‌تواند برای آزمایش دینامیکی سازه‌های غیرخطی استفاده شود، زیرا اولاً دوره اعمال ضربه و سطح نیروی ضربه اعمال شده با یکدیگر سازگار نیست. بنابراین کنترل آنها دشوار خواهد بود. ثانیاً نیروی به کار رفته محدود به یک مکان مشخص است [۱۲].

ج. تحریک سینوسی جاروبی: پاسخ فرکانسی این نوع تحریک در شکل (۹-ت) نشان داده است. تحریک اعمال شده یک تحریک سینوسی جاروبی میان ۰ تا ۲ هرتز می‌باشد که در ۵۰ ثانیه اعمال شده است. پاسخ فرکانسی در دو قله در اطراف فرکانس طبیعی سیستم شکسته است. این جداسازی تشدید، تأثیر رفتار سیگنال تحریک بر پاسخ فرکانسی می‌باشد. پاسخ‌هایی از این قبیل در سازه‌های خطی دارای میرایی کم، هنگامی که زمان تغییرات فرکانس برای رسیدن سازه به یک حالت پایدار کم باشد نیز اتفاق می‌افتد.

د. تحریک تصادفی: تحریک تصادفی به طور گسترده در آزمایش دینامیک خطی استفاده می‌شود. زیرا روش سریعی برای به دست آوردن تشدید یک سازه در یک محدوده فرکانسی پهن می‌باشد. اهمیت قابل‌ملاحظه سیگنال تصادفی این است که تخمین قابل قبولی از انواع تحریک‌هایی که در محیط واقعی اتفاق می‌افتد دارد [۱۳]. بنابراین چهار پاسخ متفاوت براساس چهار تحریک متفاوت در سازه‌های دارای رفتار غیرخطی به وجود می‌آید (شکل

حسگرها) می‌باشد. در این خصوص بایستی در زمان مشاهده رفتار غیرخطی در آزمایش، با بررسی کردن برخی پارامترها از قبیل همگنی یا عمل متقابل از وجود رفتار غیرخطی در سازه مطمئن گردید. جهت فهم رفتار غیرخطی بایستی پاسخ‌های سازه تحت تحریک‌های مختلف بررسی گردد. تا کنون انواع مختلفی از تحریک در آزمایش‌های ارتعاشی به کار گرفته شده است، که برخی از این نمونه‌ها در مرجع [۱۱] مطرح شده است. عموماً چهار نوع تحریک در آزمایش‌های دینامیکی استفاده می‌گردد: تحریک سینوسی^{۳۶} ضربه^{۳۷}، سینوسی جاروبی^{۳۸} و تحریک تصادفی^{۳۹}. در ادامه، تأثیر این تحریک‌ها بر نتایج به‌دست‌آمده در آزمایش برای یک سازه دارای رفتار غیرخطی بررسی می‌گردد.

الف. تحریک سینوسی: این نوع تحریک یکی از رایج‌ترین روش‌ها برای به دست آوردن توابع پاسخ فرکانسی است. مزیت ابتدایی استفاده از تحریک سینوسی این است که نسبت سیگنال به نویز بیشتری را در همه اندازه‌گیری‌های پاسخ و نیرو ارائه می‌دهد. برای این نوع تحریک سطح نیروی تحریک یا سطح پاسخ را می‌توان با شدت سیگنال تحریک در هر نقطه فرکانسی کنترل نمود، که این در ارزیابی موفق سازه غیرخطی تعیین‌کننده است. در تحریک سینوسی، فرکانس می‌تواند به صورت پله‌ای افزایش یا کاهش یابد. ولی اگر فرکانس به صورت پیوسته در محدوده مورد نظر تغییر کند، امکان کنترل بیشتری بر روی پاسخ سازه فراهم می‌شود. این روش در آزمایش غیر خطی از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد [۱۲].

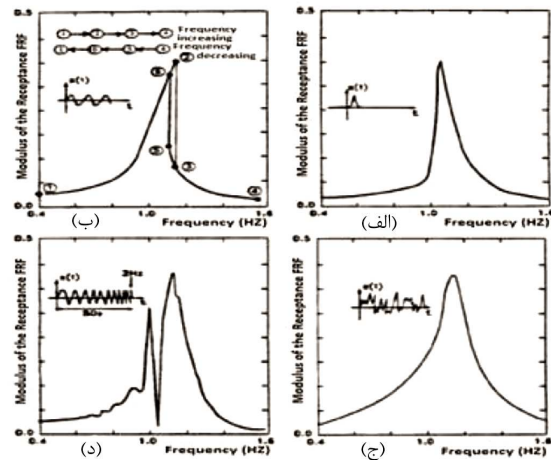
نکته بسیار مهم، درک این مفهوم است که تحریک سینوسی سیستم‌های غیرخطی می‌تواند باعث انحراف تابع پاسخ فرکانسی مانند خمش به سمت چپ و راست و ایجاد پدیده جهش گردد (که خمش ایجاد شده وابسته به نوع بخش غیرخطی می‌باشد). همچنین زمان موردنیاز برای به دست آوردن تابع پاسخ فرکانسی با تحریک سینوسی بسیار بیشتر از روش‌های دیگر تحریک است. به هر حال، تحریک سینوسی در زمانی که سازه دارای رفتار

است. با توجه به این که نوع تحریک سازه، اهمیت بسزایی در بُروز رفتار غیرخطی در نتایج آزمایش دارد، انواع تحریک و نقش هر یک از آنها در پاسخ به دست آمده از سازه دارای رفتار غیرخطی، شرح داده شد. بررسی‌های انجام شده درباره نوع تحریک نشان می‌دهد که تحریک سینوسی می‌تواند پدیده‌های غیرخطی را در سازه‌های دارای رفتار غیرخطی آشکار سازد ولی تحریک تصادفی این کار را با صرف زمان کمتری انجام می‌دهد. بنابراین تحریک تصادفی ترجیح داده می‌شود.

پی‌نوشت

1. Finite Element Method (FEM)
2. Modal testing
3. Linear time-invariant vibratory system
4. Frequency Response Function (FRF)
5. Impulse response
6. Sinusoidal
7. Transient
8. Random
9. Transducer
10. Accelerometer
11. Hammer
12. Shaker
13. Curve-Fitting
14. Troubleshooting
15. Correlation of finite element model and experimental results
16. Structural modification
17. Sensitivity analysis
18. Reduction of mathematical models
19. Forced response prediction
20. Force identification
21. Response prediction
22. Substructure coupling
23. Structural damage detection
24. Active vibration control
25. Ewins
26. Structural Modifications Using experimental frequency Response Functions (SMURF)
27. Klosterman
28. Anti node
29. Scanning
30. Pushrod
31. Stinger
32. Drive rode
33. Bias or systematic error
34. Receptance
35. Hilbert transform
36. Sine excitation
37. Impact excitation
38. Swept sine excitation
39. Random excitation

۹. در حالی که در سیستم‌های خطی عموماً توابع پاسخ فرکانسی، به نوع تحریک وابسته نیستند.



شکل ۹. تأثیرات نوع تحریک بر پاسخ سازه: (الف) تحریک ضربه، (ب) تحریک سینوسی، (ج) تحریک تصادفی، (د)

تحریک سینوسی جاروبی

عموماً در آزمایش‌های دینامیکی برای بررسی وجود رفتار غیرخطی از تحریک تصادفی و برای بررسی دقیق رفتار غیرخطی از تحریک سینوسی استفاده می‌شود.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا به معرفی آزمایش مودال و کاربردهای آن پرداخته شد. سپس خطاهایی که در مسیر انجام آزمایش مودال وجود دارند معرفی و راه‌حلهایی برای کاستن یا برطرف نمودن آنها ارائه شد. یکی از عوامل ایجاد خطا اثر بارگذاری جرم شتاب‌سنج می‌باشد که بهترین راه به منظور برطرف کردن آن استفاده از لیزر است. عامل دیگر خطا مربوط به درگیری قطعه و لرزاننده است. با طراحی دقیق استینگر یعنی انتخاب قطر و طول مناسب برای آن می‌توان تا حد زیادی از ورود ضدتشدهای استینگر به پاسخ اندازه‌گیری شده از قطعه مورد آزمایش اجتناب نمود. رفتار غیرخطی سازه از دیگر عواملی است که باعث ایجاد خطا در آزمایش مودال می‌شود. در این مقاله روش‌هایی که برای تشخیص غیرخطی بودن رفتار یک سیستم وجود دارد مطرح شده

مراجع

- [1] J. He, Z.F. Fu, *Modal Analysis*, Butterworth-Heinemann, 2001.
- [2] M.R. Ashory, *High Quality Modal Testing Methods*, Thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy, Dynamics Section Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science, Technology and Medicine London, 1999.
- [3] D.J. Ewins, *Modal Testing: Theory and Practice*, John Willy & Sons, London, 1984.
- [4] O. Dossing, Prediction of Transducer Mass-Loading Effects and Identification of Dynamic Mass, *Proceedings of the 9th International Modal Analysis Conference*, pp. 306-312, 1991.
- [5] G.M. McConnell, *Vibration Testing: Theory and Practice*, Jhon Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [6] A. Klosterman, *On the Experimental Determination and Use of Modal Representations of Dynamic Characteristics*, PhD Dissertation, University of Cincinnati, 1971.
- [7] M.R. Ashory, Correction of Mass Loading Effects of Transducers and Suspension Effects in Modal Testing, *Proc. of the 16th Int. Modal Analysis Conference*, pp. 815-828, 1998.
- [8] L.D. Mitchell, K.B. Elliott, A Method for Designing Stingers for Using Mobility Testing, *Proc. of the 2nd Int. Modal Analysis Conference*, pp. 872-876, 1984.
- [9] G.M. Hieber, Non-Toxic Stingers, *Proc. of the 6th Int. Modal Analysis Conference*, pp. 1371-1379, 1984.
- [10] J.C. Lee, Y.F. Chou, The Effects of Stingers on Modal Testing, *Proc. of the 11th Int. Modal Analysis Conference*, pp. 293-299, 1993.
- [11] K.G. McConnell, *Vibration Testing: Theory and Practice*, John Wiley & Sons Inc., 1995.
- [12] S. Huang, *Dynamic Analysis of Assembled Structures with Nonlinearity*, Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Mechanical Engineering Imperial College London August, 2007.
- [13] N.M.M. Maia, J.M.M. Silva, et. al., *Theoretical and Experimental Modal Analysis*, Research Studies Press Ltd., 1997.