عیب‌یابی سازه‌ها به کمک داده‌های ارتعاشی

مهدی صالحی، سعید ضیایی راد*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان

*szrad@cc.iut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۱/۰۴/۲۶ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۸/۰۴

چکیده

در این مقاله سه روش عیب‌یابی نرمی، تحلیل اجزای اصلی و تحلیل اجزای مستقل معرفی خواهند شد. به علاوه، انجام آزمایش ارتعاشی به منظور استخراج پارامترهای مودال مورد بررسی قرار خواهد گرفت. اندازه‌گیری دقیق توابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای به منظور نرمالسازی شکل مودها و محاسبه ماتریس نرمی نیز به عنوان ملزومات این روش مطرح خواهند شد. در عین حال، روش تحلیل اجزای اصلی به مثابه روشی کارآمد به همراه نتایج عددی و ارائه خواهد گردید و نیز به محدودیت‌های روش تحلیل اجزای مستقل اشاره خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: عیب‌یابی، آزمون مودال، عیب‌های سازه‌ای، ماتریس نرمی، تابع پاسخ فرکانسی

۱. مقدمه

امروزه استفاده از روش‌های غیرمخرب در یافتن عیب‌های سازه‌ای مقوله‌ای بسیار پرکاربرد می‌باشد. کاربرد آزمون‌های غیرمخرب در صنایع هوایی و فضایی، تجهیزات نیروگاهی، ساختمان‌ها و سازه‌های مکانیکی است. به‌طور کلی می‌توان این موضوع را به دو بخش تشخیص عیب‌های موضعی و تشخیص عیب‌های سراسری تقسیم نمود. روش‌های تشخیص عیب‌های موضعی توسط آزمون‌های مرسوم غیرمخرب نظیر روش‌های فراصوتی، رادیوگرافی، مواد نافذ، روش‌های مغناطیسی و غیره انجام می‌شود. در این روش‌ها تنها از اطلاعات سازه معیوب استفاده می‌شود. اطلاعات مرجع یا مدل‌های تئوری از سازه سالم مورد نیاز نبوده و این موضوع از مزایای عمده چنین روش‌هایی محسوب می‌گردد. برای سازه‌های کوچک این روش‌ها کارایی بالایی دارند. اما در سازه‌های بزرگ و پیچیده که شامل بخش‌هایی با عدم امکان دسترسی هستند، استفاده از این روش‌ها با مشکلات جدی روبه‌رو است. به‌علاوه، معمولاً انتخاب روش آزمون غیرمخرب مناسب جهت مقاطع بحرانی سازه به اطلاعات طراحی و همچنین نوع بارگذاری و کارکرد قطعه نیازمند است. بنابراین استفاده از روش‌های سنتی آزمون غیرمخرب به کاربردهای خاصی محدود می‌شود. به همین دلیل برای تشخیص عیب‌ها در سازه‌های بزرگ و پیچیده از روش‌هایی موسوم به عیب‌یابی بر اساس داده‌های ارتعاشی استفاده می‌شود [۱،۲].

هر سازه به عنوان یک سیستم دینامیکی شامل مشخصات جرم، سختی و میرایی است. با ایجاد عیب‌های سازه‌ای مشخصات دینامیکی سازه تغییر می‌نمایند. از این تغییرات می‌توان به عنوان علائمی برای وجود عیب در سازه استفاده نمود. با به‌کارگیری برخط[1] چنین روشی می‌توان سلامت سازه را در طول عمر سرویس دهی آن کنترل نمود. این روش‌ها امروزه با مقوله‌های مختلف علمی نظیر دینامیک سازه، هوش مصنوعی، پردازش سیگنال و تکنیک‌های اندازه‌گیری درگیر شده است [۸-۳].

در چند دهه گذشته تحقیقات فراوانی در زمینه تشخیص عیب‌های سازه‌ای به کمک اطلاعات ارتعاشی انجام گرفته است. نقطه مشترک تمام این تحقیقات، تلاش برای به دست آوردن معیاری از وجود، موقعیت و شدت عیب موجود به کمک اطلاعات مودال سازه اعم از فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها، ضرایب میرایی و یا پاسخ‌های فرکانسی می‌باشد. اغلب این روش‌ها بر مبنای در دست بودن یک مدل معتبر اجزای محدود از سازه سالم عمل می‌کنند. با این وجود، روش‌های دیگری در مقیاس محدودتر تنها با استفاده از نتایج آزمون ارتعاشی و بدون نیاز به مدل ارائه گردیده اند که در استفاده از آنها محدودیت‌های بیشتری دیده می‌شود.

یکی از بزرگ‌ترین مزیت‌های روش‌های عیب‌یابی بر اساس ارتعاشات نسبت به روش‌های آزمون غیرمخرب، عیب‌یابی سازه بدون تمرکز روی نواحی خاصی از سازه می‌باشد. به‌عبارت دیگر، این روش‌ها می توانند ابزاری برای عیب‌یابی به صورت سراسری[۲] محسوب گردند. در صورتی که در بازبینی‌های غیرمخرب اغلب، اطلاعات قبلی در مورد نحوه کارکرد، توزیع بار، مقاطع بحرانی و در مجموع اطلاعاتی کلی از طراحی و سرویس سازه مورد نیاز می‌باشد. علاوه بر این که در روش‌های معمول آزمون غیرمخرب، ناحیه سازه‌ای مورد بازرسی باید در دسترس باشد.

بیشترین قدرت این روش‌ها در تعیین وجود و موقعیت هندسی عیب‌های نمایان‌شده است. با وجود تحقیقات فراوان در زمینه ارائه معیارهای کمّی جهت تعیین ساختار و شدت عیب‌ها، توفیق چندانی حاصل نشده است. اغلب روش‌های یاد شده بر اساس فرض خطی بودن سازه قبل و بعد از ایجاد عیب استوار است، اما مطالعاتی محدودتر نیز با در نظر گرفتن فرضیات غیرخطی انجام شده است.

در حالت کلی، روش‌های عیب‌یابی سازه بر اساس ارتعاشات را می‌توان به دو گروه مبتنی بر مدل و غیرمبتنی بر مدل تقسیم نمود. در روش‌های مبتنی بر مدل، در دست بودن یک مدل اجزای محدود معتبر ضروری است. بنابراین در این بخش لزوم به روز رسانی مدل[۳] اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

به نظر می‌رسد یکی از مشکلات اساسی که اغلب این روش‌ها با آن دست‌به‌گریبان اند، غالب شدن اثرات خطاهای آزمایشگاهی، نویز و خطاهای مرتبط با تخمین پارامترهای مودال بر حساسیت تغییرات پارامترهای دینامیکی سازه در اثر ایجاد عیب باشد. به همین دلیل از چنین روش‌هایی در حال حاضر نمی‌توان به عنوان ابزاری مطمئن و فراگیر در شناسایی تَرک‌ها و عیب‌های بسیار کوچک در سازه استفاده نمود.

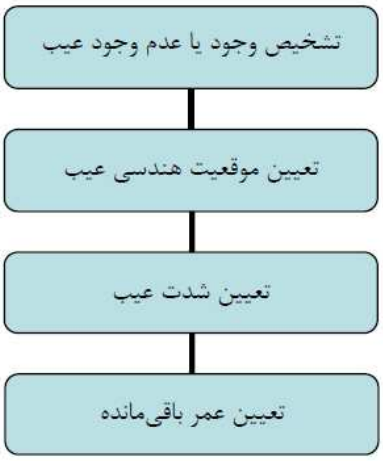
فرایند عیب‌یابی سازه‌ها را می‌توان در چهار سطح مختلف تعریف نمود (شکل ۱).

سطح چهارم عیب‌یابی یعنی تخمین عمر باقی‌مانده به تنهایی با استفاده از اطلاعات ارتعاشی امکان‌پذیر نبوده و مباحث خستگی و مکانیک شکست نیز باید در نظر گرفته شوند.

برای تعیین عیب به کمک پاسخ، اولین و مهم‌ترین مسأله، تعیین اندیس مشخصه عیب می‌باشد. برای تعیین موقعیت عیب باید از متغیرهای فیزیکی محلی استفاده نمود که دارای دو مشخصه زیر باشند [۹]:

الف. متغیر باید نسبت به عیب‌های موضعی حساس باشد.

ب. متغیر بایستی نسبت به تغییرات موقعیت عیب تابعی یکنوا[۴] باشد.



شکل ۱. سطوح عیب‌یابی سازه

به طور کلی، تعیین موقعیت عیب معادل تعیین ناحیه‌ای از سازه با کاهش سختی و ظرفیت تحمل بار با استفاده از یک کمیت قابل اندازه‌گیری می‌باشد [۱۰].

بخش کلیدی و گلوگاه تعیین عیب به کمک پاسخ ارتعاشی، تعریف اندیسی مناسب با حساسیت کافی نسبت به عیب می‌باشد. بنابراین در این روش‌ها استفاده مناسب از تکنیک‌هایی مانند پردازش سیگنال، شناسایی تحت تحریک محیطی، شناسایی بر اساس خروجی، تحلیل عدم قطعیت و رویکردهای آماری حائز اهمیت خواهد بود.

با وجود تلاش‌های فراوانی که در چند دهه اخیر در این حوزه انجام شده است، هنوز روشی سیستماتیک با قابلیت اعتماد کافی برای عیب‌یابی سازه بر اساس اطلاعات مودال سازه ارائه نگردیده و تحقیقات در این زمینه در جریان است. علل این عدم موفقیت کامل را می توان در موارد ذیل خلاصه نمود:

الف. پارامترهای مودال سازه، حاصل پردازش حجم بسیار بالای اطلاعات مربوط به پاسخ‌های زمانی نقاط مختلف سازه در آزمون مودال می باشد. به عبارت دیگر، اطلاعات حجیم پاسخ سازه در تعدادی فرکانس طبیعی، شکل مود و ضریب میرایی، فشرده و خلاصه می‌شوند. این فشرده‌سازی بر اساس این فرض که پارامترهای مودال به نوع سیگنال‌های تحریک، دامنه و محتوای فرکانسی آنها و

همچنین موقعیت نقاط اندازه‌گیری بستگی نداشته و بیانگر مشخصات ذاتی سازه هستند، انجام می شود. در عمل، طی این فرآیند فشرده‌سازی (تخمین پارامترهای مودال) اطلاعات زیادی از دست رفته و خطاهای متعددی نیز ایجاد می‌شوند. از جمله این خطاها می‌توان به نادیده گرفتن اثر مودهای بالاتر، ساده‌سازی در مدل‌سازی میرایی سازه، اثرات غیرخطی سازه، خطاهای ناشی از پردازش سیگنال‌ها، اثرات محیطی و خطاهای اندازه‌گیری و محاسباتی اشاره نمود.

ب. عیب‌های سازه‌ای عموماً پدیده‌هایی موضعی می‌باشند. تشدیدهای اولیه سازه‌ها معمولاً به شناسایی رفتار کلی منجر می‌شوند و مودهای موضعی در فرکانس‌های بالاتر رخ می‌دهند. متأسفانه اندازه‌گیری مودهای بالاتر در آزمون‌های مودال دشوار بوده و با خطاهای بیشتری همراه است. مودهای اولیه سازه که به راحتی قابل استخراج می‌باشند، حساسیت کمتری به عیب‌های سازه‌ای از خود نشان می‌دهند و در نتیجه عیب‌یابی بر اساس ارتعاشات، از این دیدگاه دارای نقطه ضعف بزرگی می باشد.

۲. عیب‌یابی سازه با استفاده از پارامترهای مودال

پارامترهای مودال سازه شامل فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و ضرایب میرایی توابعی از مشخصات فیزیکی سازه می‌باشند و با تغییر فیزیک سازه ناشی از عیب، تغییر خواهند نمود. عیب‌های سازه‌ای عموماً باعث کاهش مشخصات جرم و سختی و افزایش میرایی موضعی سازه می‌شوند. در این میان، جرم کمترین حساسیت و میرایی بیشترین حساسیت را نسبت به عیب‌های سازه‌ای از خود نشان می‌دهند. با توجه به ساختار پیچیده میرایی در سازه‌ها، استفاده از تغییرات میرایی در فرایند عیب‌یابی با مدل‌های نزدیک به واقعیت مشکل بوده و در بیشتر تحقیقات انجام شده، تلاش‌ها بر استفاده از تغییرات سختی برای این منظور متمرکز بوده است.

از مزیت‌های استفاده از فرکانس‌های طبیعی برای عیب‌یابی می‌توان به سادگیِ محاسبه تجربی فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها و همچنین بالا بودن دقت فرکانس طبیعی در مقایسه با سایر پارامترهای مودال اشاره نمود. در عین حال، تاثیر شرایط محیطی بر دقت آزمون، مشکلات مربوط به مودهای نزدیک به هم، حساسیت کم فرکانس‌های طبیعی به عیب‌های کوچک و حجم محاسباتی بالای مربوط به محاسبه حساسیت‌ها از معایب این روش محسوب می‌گردند. این روش اغلب به منظور تعیین وجود یا عدم وجود عیب مورد استفاده قرار گرفته و انجام سطوح بالاتر عیب‌یابی به این روش با مشکلات عدیده‌ای همراه می‌باشد.

به عنوان مثال یک تیر آلومینیومی ساده با مقطع مستطیلی مطابق شکل (۲) تحت آزمایش ارتعاشی قرار گرفته است. سازه توسط نیروی ضربه‌ای تحریک شده و پاسخ سازه در ۱۷ نقطه مختلف اندازه‌گیری شده است.

شکل ۲. آزمایش مودال تیر آلومینیومی

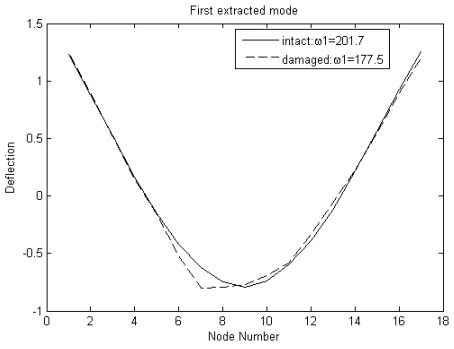
پس از آزمایش تیر سالم، شیاری به عمق ۱۰ میلی‌متر نزدیک نقطه اندازه‌گیری هفتم تیر ایجاد شده و مجدداً آزمایش تکرار می‌شود. توابع پاسخ فرکانسی به ازای هر زوج نقطه تحریک- پاسخ اندازه‌گیری شده و پارامترهای مودال شامل فرکانس‌های تشدید، شکل مودها و ضرایب میرایی توسط الگوریتم‌های مربوطه محاسبه شده اند. جدول ۱ تغییر فرکانس‌های تشدید تیرهای سالم و معیوب را نمایش می‌دهد. تغییر فرکانس‌های طبیعی ناشی از عیب به وضوح در این جدول دیده می‌شود.

جدول ۱. فرکانس‌های تشدید تیرهای سالم و معیوب

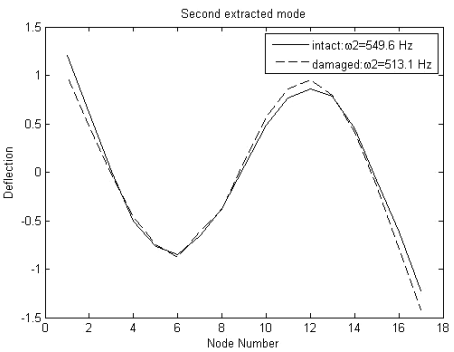
	مود اول (هرتز)	مود دوم (هرتز)	مود سوم (هرتز)
تیر سالم	۲۰۱/۷	۵۴۹/۶	۱۰۶۳/۴
تیر معیوب	۱۷۷/۵	۵۱۳/۱	۱۰۵۴/۴

یکی از راهبردهای عیب‌یابی سازه، استفاده از تفاوت الگوی تغییرشکل سازه سالم و معیوب می‌باشد. با توجه به رابطه $M = EI\,y''$، افت سختی سازه ناشی از عیب به‌صورت محلی در مقطعی خاص با افزایش موضعی انحنای تغییرشکل سازه همراه خواهد بود. این پرش موضعی در انواع تغییر شکل‌های سازه اعم از خیز استاتیک سازه معیوب تحت بار و همچنین شکل مودهای سازه‌ای قابل مشاهده خواهد بود. تعداد زیادی از روش‌های عیب‌یابی منتشرشده بر اساس اندازه‌گیری ایستایی خیز سازه‌های سالم و معیوب و مقایسه این دو می‌باشند. با وجود سادگی اندازه‌گیری تغییرشکل‌های ایستایی، مشاهده تغییرات با استفاده از تغییرشکل‌های بسیار کوچک به دلیل عدم حساسیت کافی به عیب امکان‌پذیر نبوده و اعمال بار بیش از حد به منظور ایجاد تغییرشکل‌های بزرگ‌تر نیز به تشدید عیب‌های سازه‌ای می‌انجامد. لذا با توجه به امکان استخراج شکل مودهای سازه به کمک آزمون غیرمخرب ارتعاشی، شکل مودها می‌توانند به عنوان پارامترهای حساس به عیب مد نظر قرار گیرند.

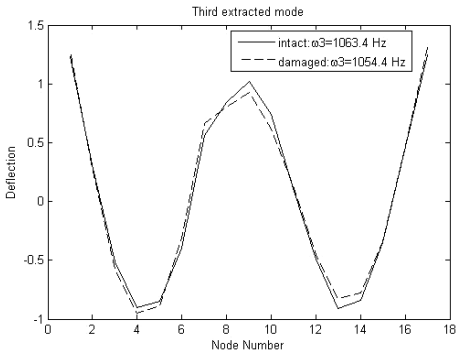
شکل (۳)، شکل مودهای تیر معیوب را در محل عیب نمایش می‌دهد. تغییر شکل مود در محل عیب، به خصوص در مورد مود اول، به خوبی قابل مشاهده می‌باشد.



(الف)



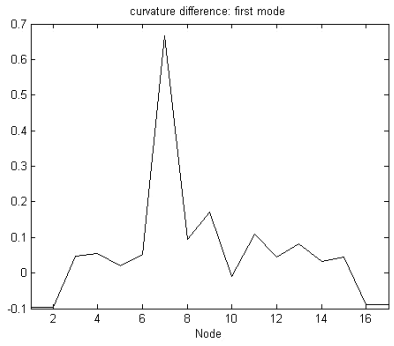
(ب)



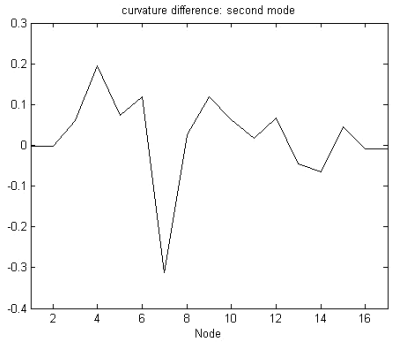
(ج)

شکل ۳. شکل مودهای تیرهای سالم و معیوب

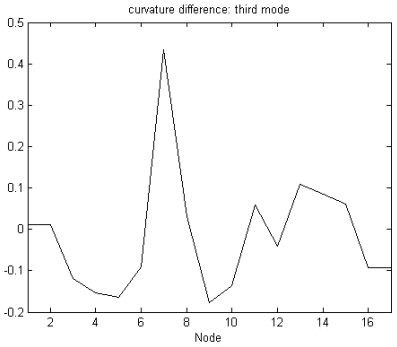
به منظور تعیین موقعیت عیب با استفاده از انحنای شکل مودهای ارتعاشی، انحنای شکل مودهای تیرهای سالم و معیوب در گره‌های اندازه‌گیری محاسبه شده و تفاضل مقادیر متناظر در شکل (۴) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)



شکل ۴. تفاضل انحنای شکل مودهای متناظر تیرهای سالم و معیوب

با توجه به شکل (۴)، وجود عیب در گره هفتم اندازه‌گیری به‌وضوح قابل تشخیص می‌باشد. در واقع، انحنای تیر معیوب در محل عیب دچار ناپیوستگی شده و این موضوع با استفاده از تفاضل انحنای تیرهای سالم و معیوب قابل تشخیص می‌باشد. هرچند که در مورد تیرهای یکنواخت این اثر با استفاده از انحنای تیر معیوب به تنهایی نیز قابل مشاهده خواهد بود.

۳. عیب‌یابی سازه با استفاده از ماتریس نرمی سازه

معمولاً استفاده از ستون‌های ماتریس نرمی به عنوان پارامتر حساس به عیب نسبت به شکل مودهای سازه به نتایج بهتری منجر می‌گردد. ماتریس نرمی سازه با استفاده از شکل مودها و فرکانس‌های تشدید توسط رابطه (۱) قابل محاسبه می‌باشد:

$$F = \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{\omega_i^2} \phi_i \phi_i^T \qquad (۱)$$

در این رابطه ω_i فرکانس‌های تشدید و ϕ_i شکل مودهای سازه می‌باشند.

با توجه به رابطه معکوس نرمی با مربعات فرکانس‌های رزونانس، ماتریس نرمی در مودهای اولیه حساسیت نسبتاً خوبی به تغییرات سازه ای از خود نشان می‌دهد. مزیت دیگر استفاده از ماتریس نرمی، حساسیت کمتر آن به تغییرات جرمی نسبت به ماتریس سختی می‌باشد. با توجه به این که محاسبه ماتریس نرمی بر اساس شکل مودهای نرمال شده با جرم بوده و اطلاعات جرمی به‌خصوص در آزمون‌های با تحریک محیطی موجود نمی‌باشد، تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از آزمون‌های ایستایی برای محاسبه ماتریس نرمی انجام شده است. از اشکالات استفاده از این روش می‌توان به نیاز به قید و بند برای آزمون ایستایی، احتمال تشدید عیب در طول آزمون و عدم امکان اجرای آزمون در شرایط مرزی آزاد اشاره نمود. ماتریس نرمی را می‌توان به کمک بُردارها و مقادیر ویژه سیستم به کمک رابطه (۱) محاسبه نمود. با توجه به این که تعداد مودهای اندازه‌گیری شده محدود می‌باشد، ماتریس نرمی به‌دست‌آمده ناکامل خواهد بود و همین امر باعث نقصان مرتبه این ماتریس و عدم امکان محاسبه ماتریس سختی از طریق ماتریس معکوس خواهد بود. غالب بودن اثر مودهای اولیه در ماتریس نرمی در رابطه اخیر کاملاً مشهود است.

ماتریس سختی سیستم مشابه را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$K = \sum_{i=1}^{p} \omega_i^2 M \phi_i \phi_i^T M \qquad (۲)$$

با مقایسه دو رابطه اخیر مشخص می‌شود که اگرچه شکل مودهای مورد استفاده در محاسبه ماتریس نرمی با جرم نرمال شده اند، ولی اثر تغییرات جرمی در ماتریس نرمی بسیار کمتر از این اثر در ماتریس سختی می‌باشد. مزیت دیگر ماتریس نرمی این است که تمام سختی‌های موضعی در تمام درایه‌های آن مشارکت دارند. به عبارت دیگر، محاسبه ماتریس نرمی از نظر تئوری مستقل از تعداد نقاط اندازه‌گیری می باشد. دلیل این امر این است که ماتریس نرمی معکوس ماتریس سختی بوده و تمام درایه‌های آن به صورت کسری با مخرج معادله مشخصه ماتریس سختی می باشند که تمام سختی‌های موضعی در آن مشارکت دارند. بنابراین همه سختی‌های موضعی درجات آزادی مختلف در همه درایه‌های ماتریس نرمی قابل تشخیص می باشند، اما ماتریس سختی چنین وضعیتی ندارد.

ساده ترین روش ارائه‌شده بر مبنای ماتریس نرمی بر اساس تفاضل ماتریس‌های نرمی قبل و بعد از آسیب سازه می‌باشد. ماتریس ناکامل و منفرد نرمی توسط رابطه (۳) قابل محاسبه است:

$$[F] = [\Phi]_{n\times m} [\Lambda]^{-1}_{m\times m} [\Phi]^T_{m\times n} \qquad (۳)$$

در رابطه اخیر، n تعداد درجات آزادی سیستم و m تعداد مودهای اندازه‌گیری شده می‌باشد.

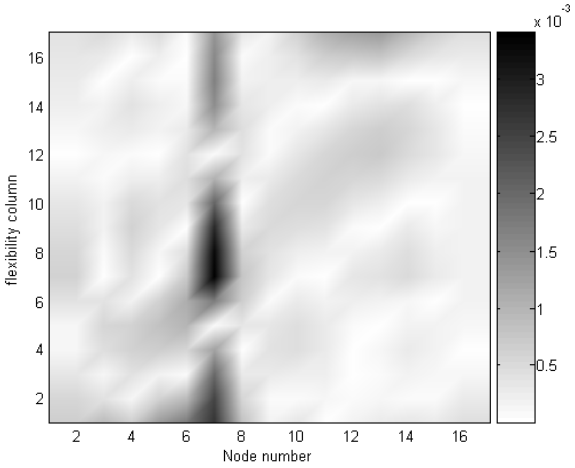
اگر ماتریس نرمی سازه معیوب با $[F^*]$ نمایش داده شود، رابطه (۴) معیاری از محل عیب سازه را ارائه می‌دهد:

$$\delta_j = \max_i \left| \delta_{ij} \right| \qquad (۴)$$

در رابطه فوق، δ_{ij} درایه‌های ماتریس $[\Delta] = [F] - [F^*]$ می‌باشند.

هریک از ستون‌های ماتریس نرمی در واقع الگوی تغییر شکل سازه به ازای اعمال نیروی واحد در درجه آزادی

متناظر با آن ستون می‌باشد. بررسی ناپیوستگی انحنا به منظور تعیین محل عیب را می‌توان روی ستون‌های ماتریس نرمی نیز اعمال نمود. انحنای تفاضل ستون‌های متناظر ماتریس نرمی تیرهای سالم و معیوب در مثال قبل محاسبه شده و در شکل (۵) رسم شده اند. وجود عیب در نقطه اندازه‌گیری هفتم در این شکل به خوبی قابل تشخیص می‌باشد.



شکل ۵. انحنای تفاضل ستون‌های ماتریس نرمی سازه‌های سالم و معیوب

یکی از محدودیت‌های روش عیب‌یابی به کمک ماتریس نرمی این است که شکل مودهای مورد استفاده در تخمین ماتریس نرمی، باید با جرم نرمال شده باشند. در مورد برخی سازه‌ها نظیر پل‌های بزرگ تحریک مصنوعی سازه امکان‌پذیر نبوده و لازم است سازه تحت نیروهای محیطی آزمایش شود. در چنین شرایطی شکل مودهای حاصل از آزمایش نرمال شده با جرم نبوده و برای تخمین ماتریس نرمی قابل استفاده نمی‌باشند.

۴. عیب‌یابی سازه با استفاده از توابع پاسخ فرکانسی سازه

استفاده از پارامترهای مودال حاصل از آزمون به منظور عیب‌یابی سازه با وجود نتایج قابل قبول، دارای معایبی می‌باشد. استخراج پارامترهای مودال از توابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده مستلزم صرف زمان و هزینه بوده و خطای ناشی از عدم استخراج دقیق این پارامترها نیز یک عامل منفی محسوب می‌گردد. استخراج پارامترهای مودال با در نظر گرفتن یک مدل خطی از سازه با الگوی میرایی از پیش فرض شده انجام می‌شود. خطاهای عددی برازش منحنی نیز عامل دیگری در انحراف پارامترهای به دست آمده از مقدار واقعی می‌باشد. خطای استخراج فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای سازه‌ای می‌تواند به ترتیب تا پنج و پانزده درصد باشد. علاوه بر این که تحلیل مودال داده‌های تجربی، فرایندی پر هزینه و زمان‌بَر می‌باشد. در صورت استفاده از الگوریتم‌های عیب‌یابی سازه مبتنی بر توابع پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده این مشکلات حذف خواهند شد. از سوی دیگر، پارامترهای مودال سازه عمدتاً با استفاده از اطلاعات پاسخ فرکانسی در نواحی تشدید به دست می‌آیند. حتی در روش‌های تحلیل مودال یک‌درجه‌آزادی، داده‌های نواحی دور از تشدید نادیده انگاشته شده یا نهایتاً به عنوان ترم‌های مانده در محاسبات لحاظ می‌شوند. در صورت استفاده از روش‌های عیب‌یابی بر مبنای توابع پاسخ فرکانسی می‌توان از اطلاعات مربوط به تمامی نواحی فرکانسی آزمون به منظور عیب یابی بهره برد.

تابع پاسخ فرکانسی یک سیستم خطی n درجه آزادی با میرایی سازه‌ای توسط رابطه (۵) بیان می‌شود:

$$\alpha_{jk}(\omega)=\sum_{r=1}^{n}\frac{\phi_{jr}\phi_{kr}}{\omega_r^2-\omega^2+i\eta_r\omega_r^2} \qquad (۵)$$

در این رابطه ϕ_{jr} درایه j-اُم از شکل مود r-اُم سیستم، ω_r فرکانس تشدید r-اُم، η_r ضریب میرایی مودال r-اُم و ω فرکانس کاری می‌باشد. می‌توان ثابت نمود که می‌توان بردار توزیع مکانی توابع پاسخ فرکانسی سازه بر حسب شکل مودهای سازه‌ای نوشت. بنابراین، انتظار می‌رود روش‌های عیب‌یابی مبتنی بر شکل مودهای سازه، در صورت استفاده از توزیع توابع پاسخ فرکانسی نیز نتایج مطلوبی داشته باشد. از سوی دیگر، ماتریس توابع پاسخ فرکانسی سازه تعمیمی از ماتریس نرمی سازه در فرکانس‌های غیرصفر می‌باشد. بنابراین استفاده از از توابع پاسخ فرکانسی به نوعی تعمیم روش نرمی نیز محسوب می‌گردد. اما بزرگ‌ترین مشکل در استفاده از توابع پاسخ فرکانسی به منظور عیب‌یابی، حجم بالای این اطلاعات و لزوم استخراج پارامترهای کم‌حجم و در عین حال حساس به عیب می‌باشد. روش‌های گوناگونی به منظور استخراج چنین پارامترهایی از اطلاعات پاسخ فرکانسی ارائه شده

است. در بخش بعدی دو روش برای کاهش داده‌ها موسوم به تحلیل اجزای اصلی و تحلیل اجزای مستقل مورد بحث قرار خواهند گرفت.

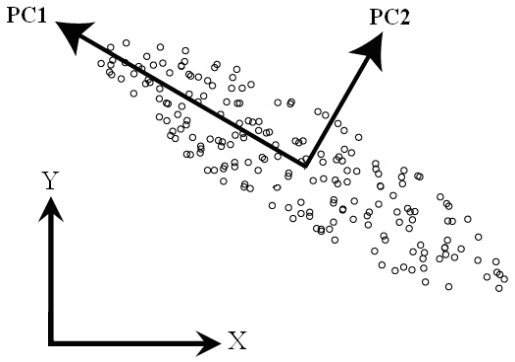
۵. عیب‌یابی سازه با استفاده از تحلیل اجزای اصلی توابع پاسخ فرکانسی

تحلیل اجزای اصلی یا تبدیل *PCA* یک تکنیک ریاضی به منظور کاهش ابعادی داده‌ها می‌باشد. این روش کاربردهای زیادی در بسیاری از زمینه‌های متنوع علمی پیدا کرده است. کاربردهای زیادی از تحلیل اجزای اصلی در زمینه‌های مختلف مهندسی از جمله مکانیک سیالات، پردازش تصویر، اقیانوس‌شناسی و ارتعاشات مکانیکی گزارش شده است.

فرض کنیم مجموعه‌ای حجیم از داده‌های چندبُعدی حاصل از آزمایش در دست باشد. چنین مجموعه‌ای از داده‌ها اغلب دارای افزونگی مرتبه[۵] بوده و استنتاج از روی آنها بسیار مشکل است. به همین دلیل روش‌های مختلف آماری به منظور کاهش ابعادی داده‌ها و استخراج پارامترهای مشخصه مورد استفاده قرار می‌گیرند. تحلیل اجزای اصلی، یکی از رایج‌ترین روش‌های کاهش ابعادی داده‌ها می‌باشد. در این روش، داده‌ها به صورت بهینه غیرهمبسته می‌شوند. غیرهمبسته نمودن مجموعه‌ای از داده‌ها روشی یکتا ندارد اما در تحلیل اجزای اصلی این کار به صورت بهینه انجام می‌شود. بهینه بودن این تبدیل بدان معناست که داده‌های کاهش یافته بیشترین اطلاعات ممکن از داده‌های اصلی را در بر دارند. به عبارت دیگر محورهای مختصات موجود، تحت یک تبدیل خطی به گونه‌ای تغییر می‌کنند که مشارکت داده‌ها در راستای محورهای جدید بیشترین مقدار ممکن را داشته باشد.

محورهای مختصات جدید مورد نظر، بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس داده‌ها می‌باشند. بردارهای ویژه متناظر، معیاری از میزان تصویر داده‌ها روی پایه مورد نظر می‌باشند. به این ترتیب، میزان اهمیت بردارهای ویژه در بازسازی داده‌ها توسط مقدار ویژه متناظر آن‌ها تعیین می‌شود.

ثابت می‌شود که مقادیر ویژه به دست آمده با واریانس داده‌ها در راستای بردار ویژه متناظر متناسب است. به بیان دیگر، داده‌ها در راستای اولین بردار ویژه بیشترین واریانس را داشته و این مقدار برای بردارهای بعدی به ترتیب کاهش می‌یابد. از نظر هندسی می‌توان بردارهای ویژه را جهاتی با بیشترین پراکندگی داده‌ها در نظر گرفت. شکل (۶) راستای دو بردار پایه بهینه را برای مجموعه‌ای از داده‌های دو بعدی نمایش می‌دهد.



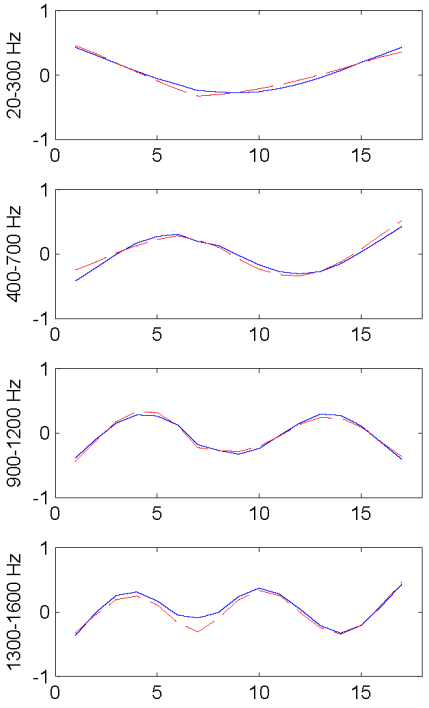
شکل ۶. راستای بردارهای ویژه ماتریس کوواریانس مجموعه ای از داده‌های دو بعدی

بدیهی است که برای کاهش ابعاد داده‌های شکل (۶) از دو بعد به یک بعد، می‌توان از بعد جدید دوم یعنی راستای *PC2* صرفنظر نمود.

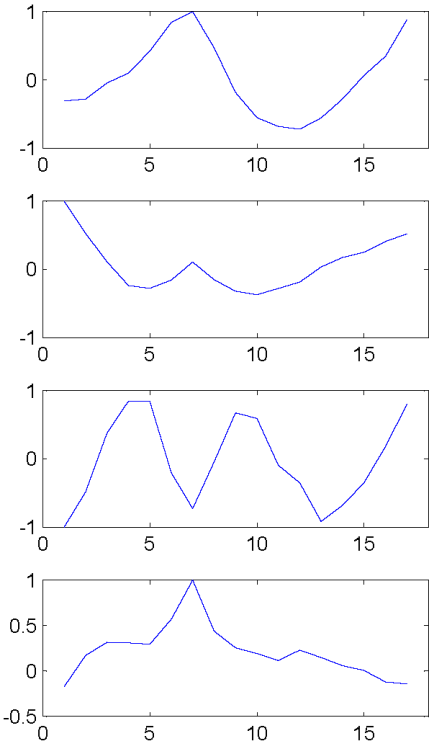
به منظور استفاده از تحلیل اجزای اصلی در عیب‌یابی اطلاعات مکانی- فرکانسی توابع پاسخ فرکانسی مستقیماً توسط تحلیل اجزای اصلی به چند بردار ویژه کاهش داده می‌شوند. تعداد و شکل بردارهای ویژه بسته به بازه فرکانسی انتخاب شده متغیر می‌باشد. به عنوان مثال، در صورت انتخاب محدوده فرکانسی نزدیک به یک تشدید خاص، بردار ویژه حاصله مشابه شکل مود متناظر خواهد بود. به عبارت دیگر بردارهای ویژه بر خلاف شکل مودهای ارتعاشی سراسری نبوده و وابسته به داده‌های ورودی می‌باشند. به طور خلاصه، در این روش ابتدا بازه فرکانسی مورد نظر انتخاب شده و پس از تحلیل اجزای اصلی تعداد مناسبی بردار ویژه در حالت‌های سالم و معیوب انتخاب می‌شوند. با بررسی ناپیوستگی انحنای تفاضل هر یک از بردارهای متناظر حال‌های سالم و معیوب، موقعیت عیب روی سازه مشخص خواهد شد.

در مثال قبل، برای عیب یابی به این روش، چهار بازه ۲۰ تا ۳۰۰، ۴۰۰ تا ۷۰۰، ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز در نظر گرفته شده است. در هر بازه، اولین بردار ویژه کوواریانس توابع پاسخ فرکانسی سازه‌های سالم و معیوب و همچنین تفاضل آنها محاسبه شده پیوستگی انحنای

نقاط مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. شکل (۷) بردارهای مورد بحث را نمایش می‌دهد.



سری (الف)



سری (ب)

شکل ۷. بردار ویژه اول متناظر با تیر سالم (خط پر) و معیوب (خط چین) (سری الف) و تفاضل بردارهای متناظر سالم و معیوب (سری ب) برای بازه‌های ۲۰ تا ۳۰۰، ۴۰۰ تا ۷۰۰، ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ و ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز (از بالا به پایین)

وجود ناپیوستگی انحنا در گره معیوب، یعنی گره هفتم (نقطه هفتم اندازه‌گیری)، به خوبی قابل تشخیص می‌باشد. با محاسبه انحنای بردارهای تفاضل مشاهده شده است که مقدار انحنای مربوط به گره معیوب در بازه‌های اول تا چهارم به ترتیب ۶۰، ۳۰، ۶۰ و ۶۵ درصد بیشتر از بالاترین انحنای سایر نقاط بوده است.

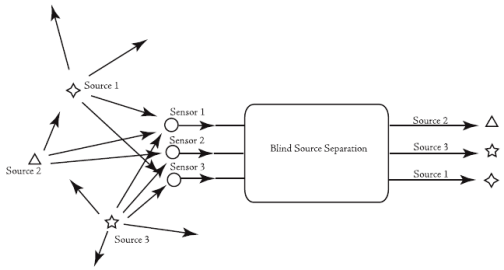
۶. عیب‌یابی سازه با استفاده از تحلیل اجزای مستقل توابع پاسخ فرکانسی

تحلیل اجزای مستقل یا *ICA* [۶] یک تکنیک آماری به منظور آشکارسازی ساختار پنهان داده‌ها می‌باشد. در این تکنیک، داده‌های چند بعدی به‌صورت ترکیب خطی از چندین متغیر مجهول فرض می‌شوند. این متغیرها، مستقل و غیرگاوسی فرض شده و به اجزای مستقل داده‌های مشاهده موسوم اند. تحلیل اجزای مستقل را می‌توان به نوعی بسط تحلیل اجزای اصلی در نظر گرفت. این تکنیک نسبت به تحلیل اجزای اصلی پیچیده‌تر و در عین حال قوی‌تر می‌باشد. این تکنیک در پردازش داده‌های مختلف مانند نتایج آزمایش، تصاویر دیجیتال، داده‌های اقتصادی یا سیگنال‌های صوتی کاربرد دارد. ایده این تکنیک نسبتاً جدید بوده و برای اولین بار در دهه ۸۰ در مدلسازی شبکه عصبی مطرح گردید و در دهه ۹۰ توسط تیم‌های مختلف تحقیقاتی گسترش داده شد.

یکی از مثال‌های کلاسیک از کاربرد تحلیل اجزای مستقل، پدیده مهمانی [۷] است. در صورتی که در یک جمع چندین نفر به‌صورت همزمان مشغول صحبت بوده و صدای ایجاد شده توسط چند میکروفن در نقاط مختلف ضبط گردد، با استفاده از تحلیل اجزای مستقل می‌توان صدای هر شخص را از ترکیب صداها جدا نمود.

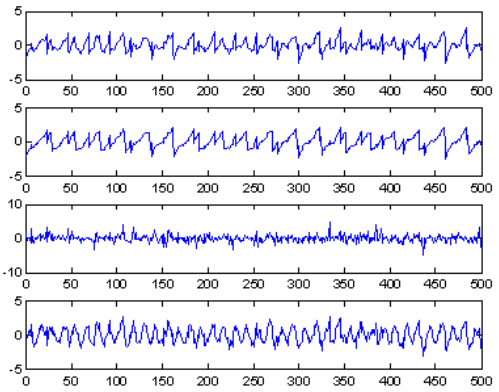
در این بخش، از این تکنیک به منظور پردازش داده‌های پاسخ فرکانسی سازه و در نهایت عیب‌یابی سازه استفاده می‌گردد. تحلیل اجزای اصلی که در بخش قبل به آن پرداخته شد، به یک مسأله مقدار ویژه منجر می‌گردد، اما تحلیل اجزای مستقل روشی آماری بوده و حل بسته ریاضی برای آن وجود ندارد. با توجه به این که در تحلیل اجزای اصلی پردازش داده‌ها بر مبنای ماتریس کوواریانس آنها انجام شده و پارامترهای آماری مرتبه بالاتر در آن مشاهده نمی‌شود، برای پرداختن به داده‌هایی با توزیع گاوسی ایده‌آل می‌باشد. در صورتی که داده‌ها دارای توزیع

غیرگاوسی باشند، تحلیل اجزای مستقل به عنوان ابزاری قدرتمند می‌تواند برای پردازش داده‌ها مورد استفاده قرار گیرد. فرض کنید مجموعه‌ای از منابع به طور همزمان سیگنال‌هایی فیزیکی تولید می‌کنند و این سیگنال‌ها توسط چند حسگر، مطابق شکل (۸)، برداشت می‌شوند.

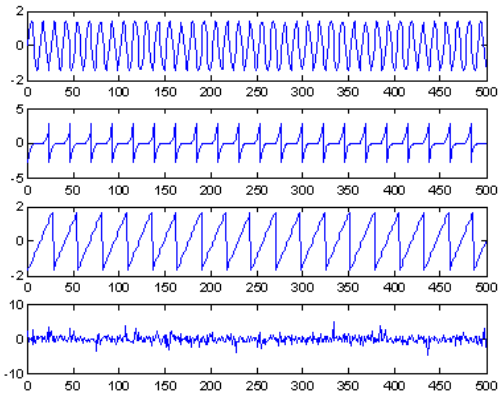


شکل ۸. مدل تحلیل اجزای مستقل

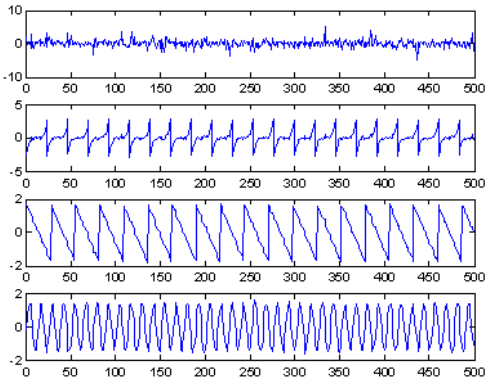
با فرض مستقل بودن منابع تولید سیگنال، تحلیل اجزای مستقل قادر است سیگنال‌های مربوط به هریک از منابع را بازسازی نماید. به عنوان مثال، اگر چهار سیگنال مختلف توسط چهار منبع متفاوت تولید شده و ترکیبی خطی از آن‌ها توسط چهار حسگر اندازه‌گیری شود، تحلیل اجزای مستقل قادر است سیگنال‌های مستقل اولیه را به کمک سیگنال‌های ترکیب شده بازسازی نماید. شکل (۹) خروجی الگوریتم *ICA* را برای این مثال نمایش می‌دهد.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹. سیگنال‌های اصلی تولید شده (الف)، ترکیب سیگنال‌های اصلی (ب) و سیگنال‌های تخمین زده شده توسط *ICA* (ج)

مدل ریاضی حاکم بر تحلیل اجزای مستقل خطی توسط رابطه (۶) بیان می‌شود:

$$\mathbf{x} = \mathbf{As} \qquad (۶)$$

که در آن $\mathbf{x}$ ماتریس داده‌های مشاهده، $\mathbf{s}$ ماتریس منابع مستقل و $\mathbf{A}$ ماتریس ترکیب[۸] می‌باشد. تنها مقادیر داده‌های $\mathbf{x}$ در دست بوده و مقادیر $\mathbf{A}$ و $\mathbf{s}$ باید شناسایی گردند. فرضیات اصلی تحلیل اجزای مستقل شامل موارد زیر است:

الف- اجزا مستقل فرض می شوند.

ب- اجزا دارای توزیع غیرگاوسی فرض می‌شوند.

مستقل بودن اجزا هرچند شرط محدودکننده‌ای به نظر می‌رسد اما در اکثر سیستم‌های مهندسی کم‌وبیش برقرار است. در صورتی که منابع دارای توزیع گاوسی باشند، جداسازی منابع توسط *ICA* امکان‌پذیر نخواهد بود. در حقیقت در چنین شرایطی تحلیل اجزای مستقل، اطلاعاتی بیشتر از تحلیل اجزای اصلی به دست نخواهد داد. نقطه ضعف قابل توجه *ICA* در مقایسه با *PCA* این است که واریانس اجزای مستقل قابل محاسبه نمی‌باشند. به‌عبارت دیگر میزان اهمیت هریک از اجزای اصلی مشخص نمی‌باشد. علت این موضوع آن است که مطابق رابطه (۵) مقادیر $\mathbf{A}$ و $\mathbf{s}$ هردو مجهول بوده و با ضرب هریک از منابع در یک عدد ثابت می‌توان ستون متناظر ماتریس ترکیب را بر آن عدد تقسیم نمود.

روش‌های مختلفی برای تخمین ماتریس ترکیب و اجزای مستقل ارائه شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به

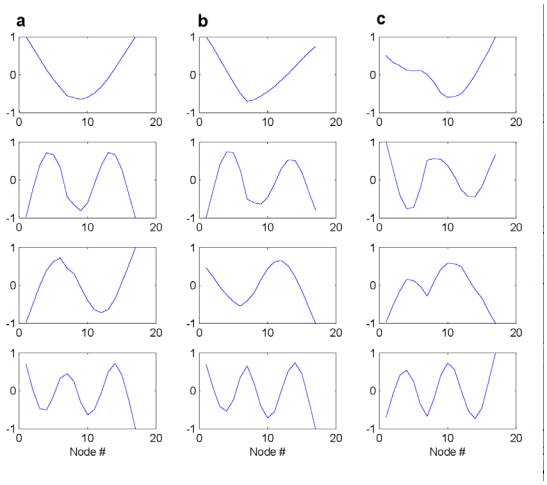
بیشینه احتمال[9]، اطلاعات مشترک[10] و روش‌های تانسوری اشاره نمود.

برای تخمین اجزا، تعداد بردارهای مشاهده نباید از تعداد منابع کمتر باشد. ماتریس ترکیب در رابطه (۵) فرم خاصی نداشته و باید تمام درایه‌های آن تعیین گردد.

اگر $\mathbf{x}$ داده‌های مشاهده بوده و $\mathbf{y}=\mathbf{b}^T\mathbf{x}=\mathbf{b}^T\mathbf{A}\mathbf{s}$ ترکیبی خطی از این داده‌ها باشد، طبق قضیه حد مرکزی آماری y از هریک از اجزای $\mathbf{s}$ گاوسی‌تر است مگر این که بر یکی از آنها منطبق باشد. مطابق قضیه حد مرکزی، مجموع متغیرهای تصادفی مستقل غیرگاوسی به توزیع گاوسی نزدیک‌تر است. بنابراین برای یافتن اجزای مستقل باید بردار $\mathbf{b}$ به گونه‌ای تعیین شود که $\mathbf{y}$ به صورت بیشینه، غیرگاوسی گردد. در این صورت $\mathbf{y}=\mathbf{b}^T\mathbf{x}$ برابر با یکی از اجزای مستقل خواهد بود.

معیارهای مختلفی به منظور کمّی‌سازی مقدار گاوسی بودن داده وجود دارد. یکی از این معیارها کشیدگی[11] می‌باشد. با انتخاب یک حدس اولیه برای $\mathbf{b}$ و کمینه‌سازی کشیدگی $\mathbf{y}=\mathbf{b}^T\mathbf{x}$ یکی از اجزای اصلی حاصل خواهد شد.

با توجه به این که پارامتر عیب‌یابی باید دارای توزیع مکانی باشد، از ستون‌های ماتریس ترکیب، موسوم به مودهای مستقل به عنوان پارامترهای عیب‌یابی استفاده می‌شود. به منظور بررسی روش ارائه شده به صورت تجربی از نتایج آزمایش ارتعاشی تیر آلومینیومی استفاده می‌شود. چهار مود مستقل سازه‌های سالم و معیوب و همچنین تفاضل مودها در شکل (۱۰) نمایش داده شده اند.



شکل ۱۰. مودهای مستقل تیر سالم (چپ)، معیوب (وسط) و تفاضل مودها (چپ)

با بررسی شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که در مورد هر چهار مود، تفاضل مودهای مستقل در گره هفتم اندازه‌گیری دارای ناهمواری می‌باشد. همانگونه که قبلاً توضیح داده شد، چنین نقاطی که در آنها ناپیوستگی انحنا وجود دارد کاندیدای نقاط معیوب سازه می‌باشند. این اثر، به خصوص در مودهای مستقل دوم و سوم به وضوح قابل مشاهده می‌باشد.

۷. نتیجه گیری

در این مقاله سه روش عیب‌یابی نرمی، تحلیل اجزای اصلی و تحلیل اجزای مستقل معرفی شدند. به نظر می‌رسد کارکرد روش نرمی در تعیین موقعیت عیب از سایر روش‌ها بهتر باشد ولی در عین حال باید توجه شود که این روش نیازمند استخراج مدل مودال از داده‌های آزمون می‌باشد و این فرایند می‌تواند پرهزینه و زمان‌بر باشد. به علاوه، انجام آزمایش ارتعاشی به منظور استخراج پارامترهای مودال نیازمند توجه به نکاتی مانند چیدمان دقیق درجات آزادی تحریک و اندازه‌گیری، انتخاب دقیق بازه فرکانسی آزمون و انتخاب راهکارهای مناسب جهت استخراج مودهای نزدیک به هم می‌باشد. اندازه‌گیری دقیق توابع پاسخ فرکانسی نقطه‌ای به منظور نرمالسازی شکل مودها و محاسبه ماتریس نرمی نیز از ملزومات این روش می‌باشد در حالی که این کار به دلیل ملاحظات عملی در برخی موارد بسیار دشوار می‌باشد.

روش تحلیل اجزای اصلی روشی کارآمد و مبتنی بر حل دقیق ریاضی می‌باشد. نتایج عددی و تجربی به دست آمده از این روش تأییدکننده کارایی مناسب آن می‌باشد. اما همانگونه که قبلاً اشاره گردید، این روش بر مبنای آمار مرتبه دوم بوده و فرض محدودکننده توزیع گاوسی داده‌ها در آن اعمال شده است. این قید در روش تحلیل اجزای مستقل حذف شده و نتایج حاصله در شبیه‌سازی عددی بهبود فرایند عیب یابی را نشان می‌دهد.

روش تحلیل اجزای مستقل به رغم کلیت بیشتر و ریاضیات پیچیده‌تر، دارای محدودیت‌های بیشتری می‌باشد. یکی از مشکلات این روش، حساسیت بالای آن به نویز می‌باشد. وجود نویز اندازه‌گیری باعث می‌شود، الگوریتم بهینه‌سازی اجزای مستقل در نقاط کمینه غیرواقعی ناشی از نویز همگرا شده و جواب‌های غیر واقعی حاصل شود. محدودیت دیگر تحلیل اجزای مستقل، نیاز

به حجم بالای داده به منظور محاسبات دقیق‌تر می‌باشد زیرا در الگوریتم *ICA* از ممان‌های آماری مرتبه بالا استفاده می‌شود و برای تخمین دقیق چنین ممان‌هایی باید حجم بالایی از داده‌ها موجود باشد.

پی‌نوشت

1. Online
2. Global
3. Model Updating
4. Monotone Function
5. Redundancy
6. Independent Component Analysis
7. Cocktail Party
8. Mixing Matrix
9. Maximum Likelihood
10. Mutual Information
11. Kurtosis

مراجع

[۱] صالحی، مهدی، توسعه روش‌های عددی و تجربی در عیب‌یابی سازه‌ها بر اساس مشخصات ارتعاشی آن‌ها، پایان‌نامه دکترا، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۰

[2] E.P. Carden, P. Fanning, Vibration based condition monitoring: A review, *Structural Health Monitoring*, Vol. 3, No. 4, pp. 355–377, 2004.

[3] J.T. Kim, Y.S. Ryu, H.M. Cho, N. Stubbs, Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs. mode shape based method, *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 1, pp. 57–67, 2003.

[4] S. Ziaei-Rad, M. Imregun, On the accuracy required of experimental data for finite element model updating, *Journal of Sound and Vibration*, pp. 323-336, 1996.

[5] J. He, Z.F. Fu, *Modal Analysis*, Butterworth-Heinemann, 2001.

[6] G. Kerschen, J. Golinval, A. Vakakis, The method of proper orthogonal decomposition for dynamical characterization and order reduction of mechanical systems, *Nonlinear Dynamics*, Vol. 41, pp. 147- 169, 2005.

[7] U. Galvanetto, C. Surace, A. Tassotti, Structural damage detection based on proper orthogonal decomposition: experimental verification, *AIAA Journal*, Vol. 46, pp. 1624-1630, 2008.

[8] M. Kirby, *Geometric data analysis: an empirical approach to dimensionality reduction and the study of patterns*, John Wiley, 2001.

[9] A. Hyvarinen, J. Karhunen, E. Oja, *Independent component analysis*, John Wiley, 2001.

[10] C. Zang, M.I. Friswell, M. Imregun, Structural damage detection using independent component analysis, *Structural Health Monitoring*, Vol. 3, pp. 69–83, 2004.