

تشخیص عیوب ریخته‌گری در چدن داکتیل با روش غیرمخرب رزونانس صوتی

هومن دژنابادی^{۱*}، حامد دژنابادی^۱، ایمان ابراهیمی^۲

۱- شرکت رادروش ۲- شرکت فولادین ذوب آمل

*Hooman@EddySonix.com

چکیده

تست رزونانس صوتی^۱ یک آزمون غیرمخرب بر مبنای آنالیز مودال (پاسخ ارتعاشی) قطعات می‌باشد. در این روش ویژگی‌های دینامیکی قطعات شامل فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی تحلیل می‌شوند. از طرفی این ویژگی‌ها با خواص مکانیکی (مدول الاستیک) و ابعاد هندسی ارتباط مستقیم دارند. وجود عیب در یک قطعه منجر به تغییر خواص مکانیکی (موضعی یا کلی) و در نتیجه کاهش برخی از فرکانس‌های طبیعی و افزایش ضرایب میرایی می‌شود. با بررسی تغییرات پارامترهای فوق، و مقایسه با نمونه‌های سالم، می‌توان قطعات معیوب را شناسایی کرد. در این تحقیق قطعات سگدست پژو بررسی شدند: ۵۰۰ نمونه سالم که از شیفت‌های مختلف تولید طی ۲ ماه جمع آوری شده بودند، ۵۰ نمونه با ندولاریته پایین ۷۰٪ الی ۸۵٪، ۵۰ نمونه با ندولاریته خیلی پایین ۳۰٪ الی ۶۰٪، و ۵۶ نمونه با عیوب دیگر ریخته‌گری از قبیل سردجوشی، حفرات انقباضی، انحرافات ماهیچه و قالب. کلیه نمونه‌ها با روش اولتراسونیک تست شده و ۱۰٪ از قطعات نیز متالوگرافی شدند. آزمون رزونانس صوتی قطعات با سیستم EddySonix[®] انجام شد. ابتدا ۲۰۰ نمونه سالم به عنوان نمونه‌های مرجع به سیستم معرفی شدند و ۱۷ مود ارتعاشی هر قطعه آنالیز شدند. مودها با روش FEM در برنامه ANSYS نیز مطابقت داده شدند. با توجه به تغییرات پروسه تولید، بویژه در ابعاد و وزن قطعات، ابتدا مدل ریاضی متغیرهای ناخواسته استخراج شده و سپس اثر آنها خنثی یا جبران‌سازی شدند. برای تفکیک قطعات سالم از معیوب، معیارهای مختلف یک یا چندمتغیره تعریف شدند. با این روش ۱۰۰٪ قطعات معیوب قابل تشخیص و جداسازی بودند.

واژگان کلیدی: تست رزونانس صوتی، عیوب ریخته‌گری، چدن داکتیل

مقدمه

تست رزونانس صوتی یک آزمون غیرمخرب بر مبنای آنالیز مودال (پاسخ ارتعاشی) قطعات می‌باشد. در این روش، پس از تحریک مکانیکی قطعات، ویژگی‌های دینامیکی آنها شامل فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها محاسبه و تحلیل می‌شوند. هر جسم مودهای ارتعاشی خاص خود را دارد. هر مود بیانگر یک موج ایستا یا رزونانس در یک فرکانس طبیعی است. مودهای ارتعاشی هر جسم منحصر به فرد و همچون اثر انگشت آن می‌باشد. پس از تحریک مکانیکی قطعه با ضربه یا جاروب فرکانس، مودها تحریک شده و رفتار دینامیکی یا تابع تبدیل فرکانسی آن جسم مشخص می‌شود. در پاسخ به ضربه، تمام مودهای جسم تحریک شده و هر مود در فرکانس ویژه‌ای به صدا یا ارتعاش در می‌آید. هر مود، یک درجه آزادی ارتعاش جسم است، که به صورت سینوس میرا در فرکانس

ویژه خود ارتعاش می‌کند. ارتعاش کلی جسم، برآیند یا حاصل جمع ارتعاش همه مودها است. مدل ساده یک مود را می‌توان با ارتعاش آزاد جرم و فنر بیان کرد. فرکانس طبیعی این سیستم برابر است با $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{k/m}$ که در مدل ارتعاش سازه‌ای، k بیانگر خواص مکانیکی (مدول یانگ و خصوصیات الاستیک)، و m بیانگر چگالی و ابعاد هندسی قطعه می‌باشد. در عمل یک جسم تعداد بیشماری فرکانس طبیعی یا مود دارد، که تابعی از خصوصیات الاستیک و ابعاد هندسی جسم می‌باشند. فرکانس‌های طبیعی در پاسخ فرکانسی به صورت قله ظاهر می‌شوند. مقدار این فرکانس‌ها مستقل از محل ضربه، شدت ضربه، یا موقعیت حسگر (شتاب‌سنج، میکروفون یا پیزو) می‌باشند (البته دامنه یا انرژی هر مود تغییر می‌کند، اما مقدار فرکانس هر مود همیشه ثابت است). بصورت تئوری و با روش اجزاء محدود^۲ نیز می‌توان شکل مودها و فرکانس آنها را محاسبه کرد، که این نتایج با روش تجربی (ضربه

^۱ Acoustic Resonance Testing

^۲ Finite Element Modeling (FEM)

حذف کرده، و فرمول یا رابطه بین عیوب و تغییرات پارامترهای مودال را ارائه می‌دهند.

در این تحقیق به یکی از کاربردهای تست رزونانس صوتی در تشخیص عیوب ریخته‌گری در چدن داکتیل اشاره شده است. امتیاز این تحقیق نسبت به تحقیقات مشابه [۲، ۳، ۴] در بکار بردن معیارهای چند متغیره برای جبران سازی تغییرات پروسه تولید و حساسیت بسیار بالاتر در تشخیص عیوب ریخته‌گری می‌باشد.

بیشترین کاربرد چدن داکتیل در قطعات ایمنی خودرو، بویژه سیستم تعلیق و ترمز، می‌باشد. با توجه به رشد روزافزون تولیدات خودرو و رقابت در ارتقاء کیفیت و کاهش قیمت‌ها، روش رزونانس صوتی پتانسیل بالایی در تست ۱۰۰٪ قطعات ایمنی دارد.

ابزار و روش تحقیق

- سیستم تست رزونانس صوتی
آزمون و تحلیل رزونانس صوتی قطعات با سیستم EddySonix® انجام گرفت. دستگاه مکانیکی شامل فیکسچر، تکیه گاه‌ها، چکش، میکروفون، داماسنج، و سنسورهای موقعیت قطعه می‌باشد که در محفظه ایزوله صوتی قرار می‌گیرد (شکل ۱). پس از قرار دادن قطعه روی فیکسچر، قطعه توسط جک روی تکیه گاه‌های لاستیکی قرار می‌گیرد. تکیه‌گاه‌ها از جنس لاستیک مقاوم در برابر سایش با هسته چدنی می‌باشند، و حداقل سطح تماس با قطعه را دارند. به منظور حداقل سازی میرایی مودهای مورد نظر، نقاط نشست قطعه و محل ضربه بهینه سازی شده است. تحریک مکانیکی قطعه توسط ۲ چکش خودکار اینرسی (جداگانه برای قطعات اکسل چپ و راست) انجام می‌گیرد. جرم آزاد چکش و سختی سر آن تعیین کننده پهنای فرکانسی تحریک شده در قطعه می‌باشد. ضبط ارتعاشات توسط ۲ میکروفون با پهنای باند 100kHz انجام می‌گیرد. دستگاه قادر به پردازش ارتعاشات و محاسبه پاسخ فرکانسی تا 100kHz می‌باشد (فرکانس نمونه برداری 200kHz است).

مکانیکی) همخوانی دارند. همانطور که ذکر شد، فرکانس‌های طبیعی با خواص مکانیکی (مدول الاستیک) و ابعاد هندسی ارتباط دارند. بنابراین تغییر در خواص مکانیکی و هندسی قطعه خود را به صورت تغییر در پارامترهای مودال منعکس کرده و بررسی این تغییرات، نقطه شروع یافتن عیوب در قطعات می‌باشد. در اکثر موارد، وجود عیب یا خرابی در یک قطعه منجر به کاهش موضعی یا کلی k (مدول الاستیک) می‌شود، و طبق فرمول فوق فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابند. میزان کاهش یا شیف‌ت فرکانس f با استحکام شکست یا خستگی رابطه مستقیم دارد. این همبستگی شدید اساس تست غیر مخرب با روش رزونانس صوتی می‌باشد. با بررسی تغییرات فرکانس‌های طبیعی، و مقایسه با نمونه‌های سالم، می‌توان قطعات معیوب را شناسایی کرد. این روش در سال ۱۹۹۸ مورد تایید اداره استاندارد ASTM قرار گرفت [۱].

کاربردهای روش رزونانس صوتی مطابق با استاندارد ASTM-E2001 عبارتند از تست و عیب‌یابی ترک، ناخالصی، حفره، تخلخل، اکسید، سردجوشی، میزان کرویت^۱، عملیات حرارتی، تغییرات سختی، چگالی، حذف یا اشتباه شدن یک مرحله از فرایند تولید، ابعاد و اندازه در عمل و کاربرد صنعتی، معیار کاهش فرکانس به تنهایی برای تفکیک قطعات معیوب کافی نمی‌باشد، زیرا در برخی از موارد فرکانس‌های قطعات سالم و خراب همپوشانی دارند. این همپوشانی به علت تغییرات پروسه تولید در ابعاد هندسی، وزن و سختی می‌باشد. اگرچه این تغییرات در محدوده مجاز تعریف شده برای تولید قطعه می‌باشند، اثر این تغییرات روی فرکانس‌های طبیعی بیش از اثر عیب یا خرابی می‌تواند باشد. به عبارتی حساسیت فرکانس‌های طبیعی به تغییرات روند تولید بیشتر از حساسیت آنها به عیوب واقعی می‌باشد. بنابراین معیارهای یک متغیره (هر فرکانس به تنهایی) برای تشخیص عیوب کافی نیستند، و باید از معیارهای چند متغیره و آماری استفاده کرد. هدف اصلی مدل‌های چند متغیره، الگوشناسی روند تولید و جبران سازی یا خنثی سازی تغییرات روند تولید می‌باشد. به عبارت دیگر، این مدل‌ها اثر متغیرهای ناخواسته را

^۱ Nodularity



شکل ۱- سیستم رزونانس صوتی EddySonix® و دستگاه مکانیکی تست سگدست

قبیل سردجوشی، حفرات انقباضی، انحرافات ماهیچه و قالب بودند. نمونه‌های سالم از شیفت‌های مختلف تولید طی ۲ ماه جمع‌آوری شده بودند. سپس این نمونه‌ها با سیستم رزونانس صوتی تست شده و برای یادگیری به پایگاه داده سیستم معرفی شدند (شکل ۲).



شکل ۲- نمونه‌های شاهد سگدست پژو برای معرفی به پایگاه داده سیستم رزونانس صوتی

تجزیه و تحلیل داده‌ها

- آنالیز مودال عددی با مدل المان محدود در محیط نرم‌افزار ANSYS مدل هندسی قطعه مش‌بندی شده، مشخصات مکانیکی و جنس چدن داکتیل تعریف شدند. سپس تحلیل مودال انجام شده و شکل مودها و

- نمونه‌های شاهد

از آنجا که مدل‌های الگوشناسی و جبران‌سازی تغییرات تولید بر مبنای معیارهای آماری می‌باشند، نیاز به نمونه‌های شاهد یا مرجع داریم. نمونه‌های شاهد، قطعات سالم (یا معیوبی) هستند که با روش‌های دیگری در آزمایشگاه از صحت (یا خرابی) آنها اطمینان حاصل کرده‌ایم. نمونه‌های شاهد یک گروه باید از قطعات یک خط تولید مشترک انتخاب شوند و همگی پروسه‌های تولید یکسانی را گذرانده باشند. از طرفی، نمونه‌های شاهد باید تغییرات پروسه تولید را دربرگیرند، بنابراین این قطعات باید از شیفت‌های مختلف تولید طی چند ماه انتخاب شوند. لازم به ذکر است که تست ادی‌کرنٹ^۱ (سختی‌سنجی و ساختار) نیز مشابه تست رزونانس صوتی بر مبنای نمونه‌های شاهد عمل کرده، و الزامات فوق را برای تهیه نمونه‌های شاهد دارد.

در این تحقیق نمونه‌های شاهد با روش‌های دیگر شامل بازرسی چشمی^۲، اولتراسونیک، ذرات مغناطیسی^۳، متالوگرافی، و سختی‌سنجی صحه‌گذاری شدند. این نمونه‌ها شامل ۵۰۰ نمونه سالم، ۵۰ نمونه با ندولاریته پایین ۷۰٪ الی ۸۵٪، ۵۰ نمونه با ندولاریته خیلی پایین ۳۰٪ الی ۶۰٪، و ۵۶ نمونه با عیوب دیگر ریخته‌گری از

^۳ Magnetic Particle (MP)

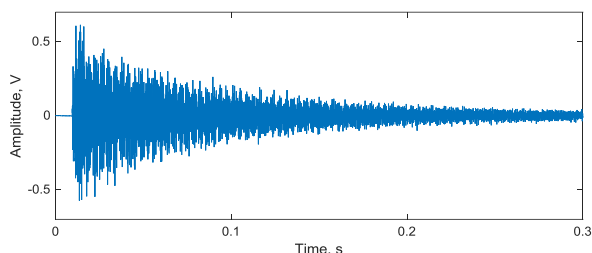
^۱ Eddy Current Testing

^۲ Visual Testing (VT)

ضربه یک نمونه را نشان می‌دهد. این سیگنال را می‌توان با حاصل جمع چند سینوس میرا مدل کرد:

$$y(t) = \sum_i A_i e^{-\sigma_i t} \sin(2\pi F_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

در این رابطه i شماره مود، A_i دامنه، σ_i میرایی، F_i فرکانس، و φ_i فاز مود i ام می‌باشند.



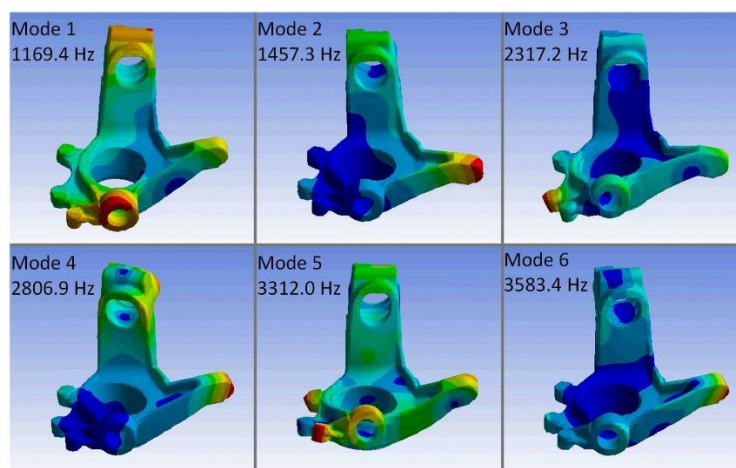
شکل ۳- پاسخ ضربه یک قطعه سگدست

فرکانس‌های طبیعی محاسبه شدند. شکل ۴ مودهای ۱ تا ۶ قطعه را نشان می‌دهد. پیچیدگی هندسی یک قطعه تعیین کننده تعداد مودهای آن می‌باشد. بعنوان مثال یک میله استوانه‌ای مودهای کمتر و ساده‌تری از یک قطعه پیچیده دارد.

در طراحی و بهینه‌سازی فیکسچر، خصوصاً محل ضربه و تکیه‌گاه‌ها، از شکل مودها و نقاط گره استفاده گردید. پس از مطابقت دادن نتایج عددی با نتایج تجربی، مودهای مناسب برای تشخیص عیوب موضعی انتخاب شدند.

- آنالیز مودال تجربی

پس از اعمال ضربه به قطعه و ضبط پاسخ ارتعاشی آن، پارامترهای مودال شامل فرکانس‌های طبیعی و ضرایب میرایی هر مود محاسبه شدند. شکل ۳ سیگنال پاسخ



شکل ۴- شکل مودها و فرکانس‌های طبیعی ۱ تا ۶ قطعه سگدست

در این تحقیق فقط از اطلاعات فرکانس‌ها (F_i) برای تفکیک قطعات سالم از معیوب استفاده شد، و اطلاعات میرایی (σ_i) مورد استفاده قرار نگرفت. البته اطلاعات میرایی در کاربردهای دیگر، خصوصاً ترک‌یابی، استفاده می‌گردید که در این موارد فیکسچر طوری طراحی می‌شود که عامل میرایی خارجی در اثر تکیه‌گاه‌ها حداقل باشد.

در این تحقیق مودهای ۱ تا ۱۷ قطعات محاسبه شدند. نتایج مودال با روش عددی و تجربی (برای یکی از قطعات) در

جدول ۱ آورده شده است. نتایج عددی و تجربی همخوانی دارند، البته اختلاف جزئی آنها به علت تغییرات پروسه تولید و اختلاف قالب با نقشه CAD می‌باشد.

جدول ۱- پارامترهای مودال استخراج شده با روش عددی (FEM)، و تجربی برای یک قطعه

شماره مود	فرکانس (مدل FEM)، Hz	فرکانس (تست تجربی)، Hz	میرایی (تست تجربی)، 1/s
۱	1169.4	1112.2	12.6
۲	1457.3	1459.3	11.6
۳	2317.2	2229.9	12.3
۴	2806.9	2785.0	16.8
۵	3312.0	3239.8	14.0
۶	3583.4	3537.6	13.5
۷	3833.1	3680.0	14.6
۸	4177.9	4147.3	15.9
۹	4684.3	4802.3	15.0
۱۰	4942.9	4888.3	15.1
۱۱	5113.0	5285.3	15.8
۱۲	5251.9	5370.9	15.6
۱۳	5903.5	6098.8	14.9
۱۴	6044.5	6347.9	15.3
۱۵	7139.5	7234.9	16.8
۱۶	7588.3	7860.3	16.9
۱۷	8054.9	8258.0	18.7

- جبران سازی دما

فرکانس های طبیعی به دمای قطعه حساس هستند. افزایش دما باعث کاهش کلیه فرکانس ها بصورت خطی می شود. در قطعات چدنی فرکانس ها تقریباً 0.015% به ازای هر درجه سانتیگراد تغییر می کنند. بنابراین اصلاح فرکانس ها با رابطه (۲) بیان می شود.

$$F_c = F_m(1 - (T_c - T_m)/C) \quad (2)$$

در این رابطه F_c فرکانس اصلاح شده در دمای مرجع T_c (در این پروژه ۲۵ درجه سانتیگراد)، F_m فرکانس اندازه گیری شده، T_m دمای اندازه گیری شده، و C ضریب ثابت وابسته به جنس قطعه می باشد. دستگاه EddySonix® دارای یک دماسنج مادون قرمز برای اندازه گیری دمای قطعه و اصلاح فرکانس ها مطابق فرمول (۲) می باشد. فرکانس های کلیه قطعات پس از اندازه گیری اصلاح دمایی شدند.

- تحلیل آماری داده ها

محیط برنامه EddySonix® معیارها و روش های مختلفی برای مدل سازی ریاضی و آماری نمونه های شاهد در اختیار قرار می دهد. این معیارها در جدول ۲ لیست شده اند. هر یک از معیارها را می توان جداگانه فعال یا غیر فعال کرد. ترتیب لیست شدن معیارها از ساده به پیچیده می باشد. بدین معنی که اگر معیارهای ساده تر برای جداسازی قطعات معیوب کافی هستند، نیازی به فعال سازی معیارهای پیچیده تر نمی باشد. در مرحله آموزش سیستم، برای هر معیار حد مجاز بالا و پایین^۱ محاسبه می شود. این حدود از روی توزیع آماری نمونه های شاهد بدست می آیند. سپس در مرحله تست یک قطعه، معیارها محاسبه شده و با حد مجاز بالا و پایین مقایسه می شوند. اگر همه معیارها در محدوده مجاز قرار گیرند، قطعه مورد تایید است (Pass)، در غیر این صورت قطعه معیوب گزارش می شود (Fail).

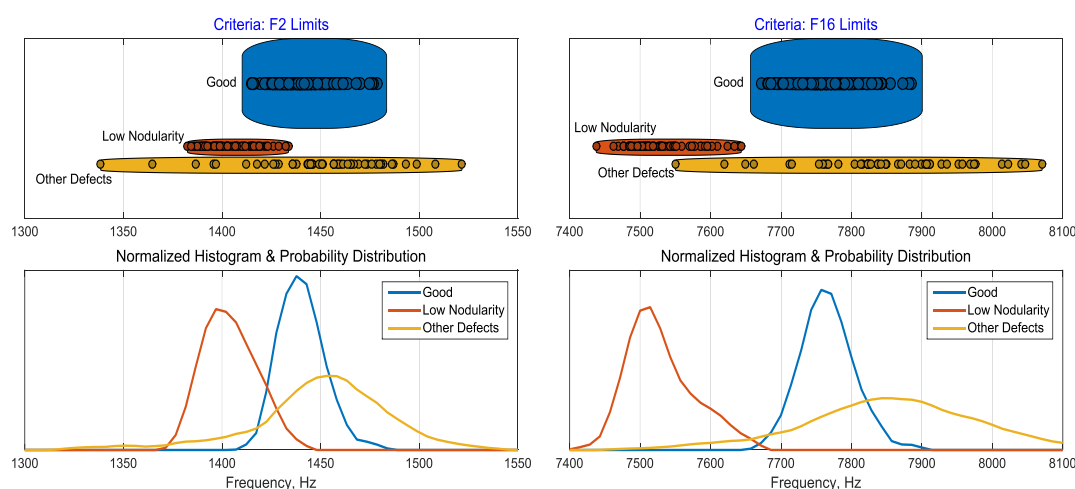
در این تحقیق نمونه ها به ۳ گروه (A) سالم، (B) میزان کروییت پایین، و (C) بقیه عیوب ریخته گری تقسیم شدند. ابتدا معیار یک متغیره F_i برای تفکیک پذیری نمونه های معیوب چک شدند. بعنوان مثال، توزیع آماری و محدوده

^۱ Acceptance Range

بالا و پایین فرکانس‌های F_2 و F_{16} در شکل ۵ آورده شده است. اگر چه فرکانس F_{16} به تنهایی قادر به تفکیک نمونه‌های کرویت پایین (B) می‌باشد، اما در هر دو فرکانس نمونه‌های گروه C و A همپوشانی دارند.

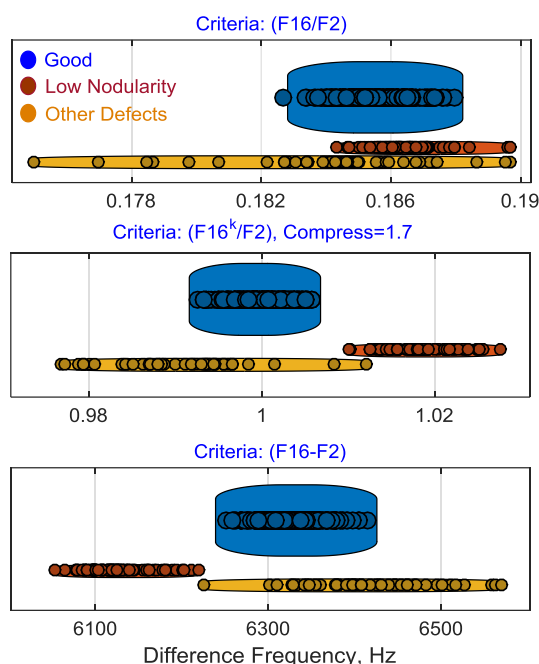
جدول ۲- معیارهای مختلف ریاضی و آماری برنامه EddySonic برای تشخیص قطعات معیوب. اندیس‌های i و j بیانگر شماره مود هستند.

ردیف	توضیح	ویژگی	معیار
۱	فرکانس (چک کردن حد مجاز بالا و پایین هر فرکانس)	ساده و یک متغیره	F_i
۲	نسبت دو فرکانس	مستقل از دما، چگالی و دیگر خواص فیزیکی کلی قطعه	F_i/F_j
۳	رابطه توانی دو فرکانس (k با رگرسیون بدست می‌آید)	جبران‌سازی ساده دو متغیره. خنثی سازی اثر یک فرکانس از روی فرکانس دیگر	F_i^k/F_j
۴	تفاضل دو فرکانس	حساس به عیب‌های موضعی	$F_i - F_j$
۵	تحلیل مؤلفه اصلی PCA	تحلیل چند متغیره، تفکیک فاکتورهای اثر گذار از یکدیگر، کاهش ابعاد متغیرهای همبسته	PC_i
۶	تخمین یک فرکانس از روی فرکانس‌های دیگر با روش رگرسیون چند متغیره، و چک کردن خطای تخمین.	بسیار قوی در خنثی کردن تغییرات پروسه تولید. بدون نیاز به معرفی نمونه‌های شاهد معیوب.	$\hat{F}_k = \sum_i a_i F_i$ $E = \hat{F}_k - F_k$
۷	طبقه بندی (Classification) با ۲ روش رگرسیون لجستیک یا شبکه عصبی	بسیار قوی در تشخیص نمونه‌های معیوب. احتیاج به معرفی نمونه‌های شاهد معیوب دارد.	Logistic Regression Neural Network
۸	خوشه بندی (Clustering)	دسته بندی اولیه نمونه‌های سالم که از قالب‌های متفاوت تولید شده‌اند.	Gaussian Mixture
۹	میرایی	استفاده در ترکیابی. نیاز به طراحی خاص تکیه‌گاه‌ها برای حداقل سازی میرایی خارجی دارد.	σ_i
۱۰	تجزیه فرکانس (تفکیک ۲ قطب مجاور یا مساوی هم)	استفاده در ترکیابی و تست تقارن محوری. نیاز به حداقل ۲ ضربه متعامد یا چرخاندن قطعه می‌باشد.	F_i Split



شکل ۵- توزیع آماری معیارهای F_2 و F_{16} برای کلیه قطعات

رابطه توانی، الگوی پراکندگی نمونه‌های سالم را بهتر مدل کرده و قدرت تفکیک‌پذیری بیشتری دارد، به عبارت دیگر لگاریتم فرکانس‌ها رابطه خطی با تغییرات پروسه تولید (بویژه وزن و ابعاد) دارند. در انتخاب فرکانس‌ها باید دقت کرد که یک مود با تغییرات ابعادی همبستگی بالا داشته باشد (F_2) و مود دیگر به عیوب واقعی حساس باشد (F_{16}).

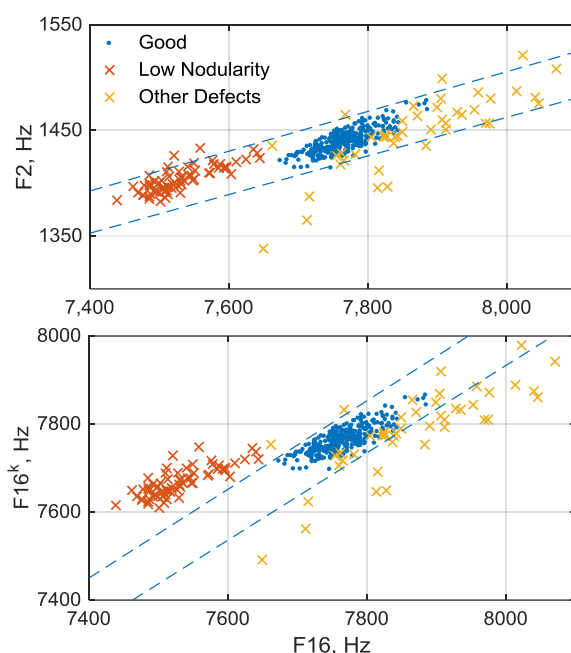


شکل ۶- معیارهای ۲ متغیره نسبت، رابطه توانی و تفاضل بین F_{16} و F_2 برای کلیه قطعات

یکی دیگر از معیارهای چند متغیره، تخمین یک فرکانس از روی رگرسیون خطی فرکانس‌های دیگر، و سپس مقایسه آن با فرکانس اندازه‌گیری شده می‌باشد. برای نمونه‌های سالم خطای تخمین (تفاضل فرکانس تخمینی با اندازه‌گیری شده) کوچک می‌باشد. این خطا در قطعات معیوب زیاد است زیرا هماهنگی^۲ بین فرکانس‌ها از بین رفته و تخمین یک فرکانس دشوار است. در این تحقیق تخمین F_{16} از روی فرکانس‌های دیگر انجام گرفت. جدول ۳ نتایج کلی تست نمونه‌های معیوب را نشان می‌دهد. در نهایت از معیارهای ردیف ۳ جدول ۳ استفاده گردید که تمام ۱۰۰٪ نمونه‌های معیوب قابل تشخیص بودند. یکی از امتیازات معیارهای استفاده شده در این است که فقط نمونه‌های سالم در آموزش سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

^۲ Coordination

در ادامه این مثال، معیارهای ۲ متغیره بین فرکانس‌های F_{16} و F_2 چک شدند. نتایج نسبت ۲ فرکانس، رابطه توانی، و تفاضل در شکل ۶ (نمودارهای سمت چپ) آورده شده است. پراکندگی ۲ بعدی داده‌ها نیز در شکل ۶ (سمت راست) نشان داده شده است. خط چین‌های موازی (آبی رنگ) محدوده مجاز معیارهای نسبت (شکل راست بالا) و رابطه توانی (شکل راست پایین) را نشان می‌دهند.



در عمل فضای عوامل اثرگذار روی فرکانس‌ها بیش از دو بعد می‌باشد. برخی از این عوامل ناشی از تغییرات پروسه تولید و برخی دیگر ناشی از عیوب مختلف ریخته‌گری می‌باشند. تحلیل مولفه‌های اصلی^۱ روشی آماری برای بررسی گروهی از متغیرهای همبسته می‌باشد. با توجه به اینکه درک و مشاهده فضای چندبعدی دشوار است، روش تحلیل مولفه‌های اصلی ابعاد داده‌ها را کاهش داده و متغیرها را دسته‌بندی می‌کند. این روش به خصوص در شرایطی که ترکیب ساختار داده‌ها مشخص نیست مفید می‌باشد. مولفه‌های بدست آمده PC_i غیرهمبسته بوده و هر یک را می‌توان به یک فاکتور اثرگذار مستقل نسبت داد. در این تحقیق معیارهای PC_1 تا PC_6 مورد استفاده قرار گرفتند.

^۱ Principal Component Analysis (PCA)

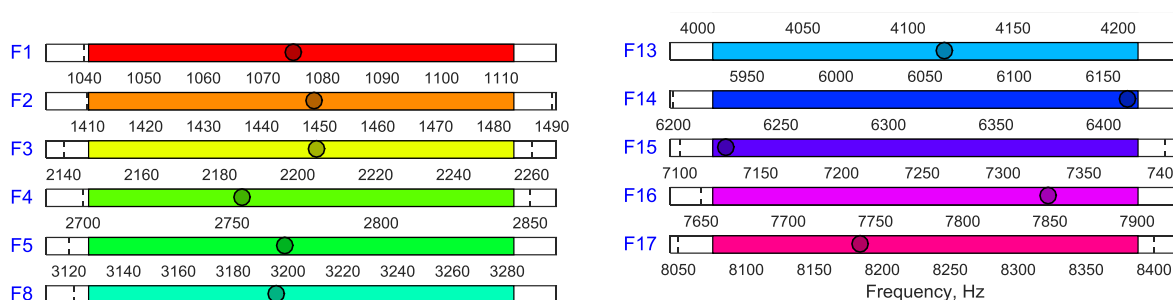
جدول ۳- مقایسه قدرت تفکیک پذیری معیارها برای نمونه‌های شاهد این تحقیق. در نهایت از معیارهای ردیف ۳ استفاده شد.

ردیف	معیارها	تفکیک گروه B (کرویت پایین)	تفکیک گروه C (بقیه عیوب ریخته‌گری)
۱	فرکانس‌ها	٪۱۰۰ (۱۰۰ از ۱۰۰ قطعه)	٪۸۲ (۴۶ از ۵۶ قطعه)
۲	فرکانس‌ها نسبت، تفاضل، رابطه توانی فرکانس‌ها	٪۱۰۰	٪۹۵ (۵۳ از ۵۶ قطعه)
۳	فرکانس‌ها نسبت، تفاضل، رابطه توانی فرکانس‌ها تحلیل مولفه اصلی تخمین فرکانس	٪۱۰۰	٪۱۰۰ (۵۶ از ۵۶ قطعه)

- تست یک قطعه

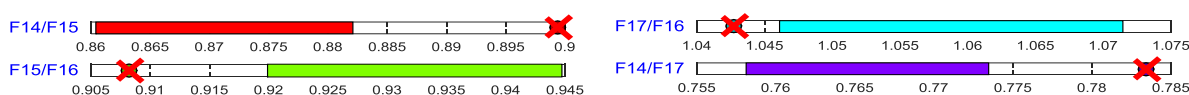
در این قسمت یک قطعه معیوب با خرابی جزئی (نمونه C0043) تست می‌گردد. شکل ۷ نتیجه تست محدوده فرکانس‌ها را نشان می‌دهد. نوارهای رنگی محدوده مجاز

هر فرکانس را نشان می‌دهند، و فرکانس قطعه تست شده با دایره مشخص شده است. همانطور که مشاهده می‌شود این معیارها برای تشخیص خرابی این قطعه خاص کافی نمی‌باشند.

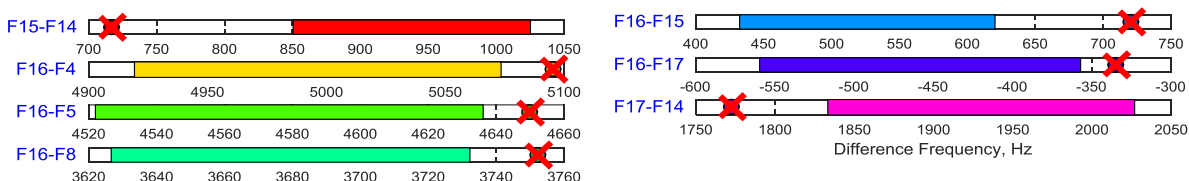


شکل ۷- نتیجه تست یک قطعه با خرابی جزئی (نمونه C0043) با معیارهای محدوده فرکانس F_i

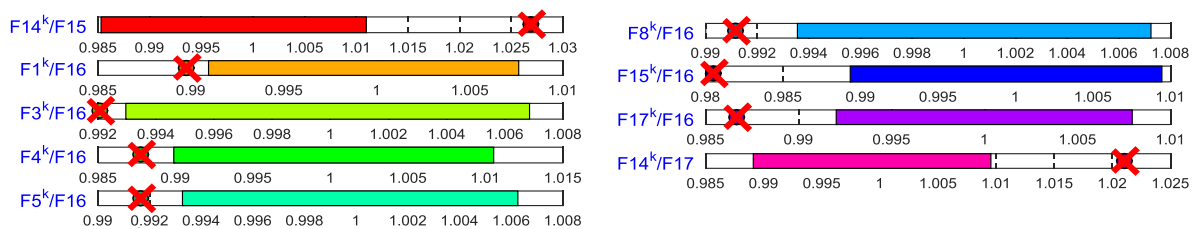
در ادامه، نتایج تست این قطعه با معیارهای دو یا چند متغیره نشان داده شده‌اند (شکل‌های ۸ الی ۱۲). این معیارها قطعه معیوب C0043 را تشخیص داده‌اند.



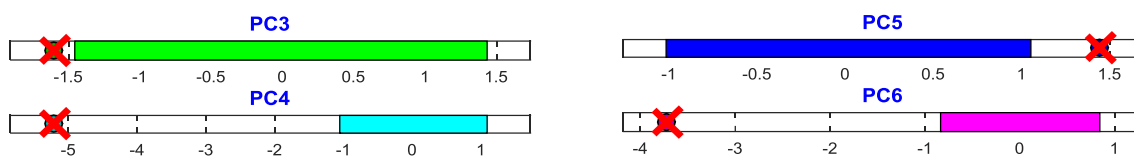
شکل ۸- نتیجه تست نمونه C0043 با معیارهای نسبت دو فرکانس



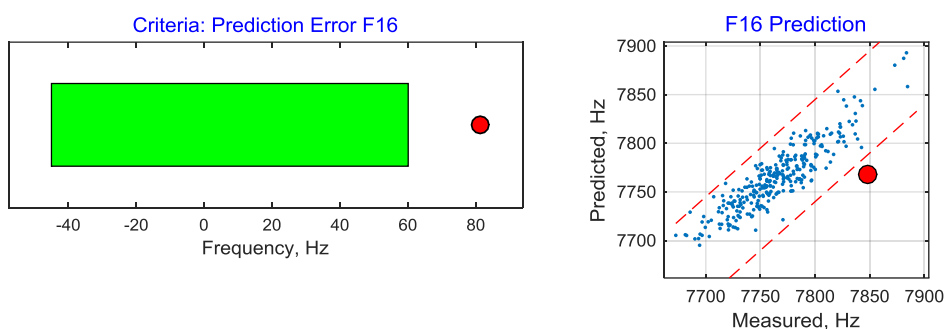
شکل ۹- نتیجه تست نمونه C0043 با معیارهای تفاضل دو فرکانس



شکل ۱۰- نتیجه تست نمونه C0043 با معیارهای رابطه توانی دو فرکانس



شکل ۱۱- نتیجه تست نمونه C0043 با معیارهای تحلیل مولفه اصلی



شکل ۱۲- نتیجه تست نمونه C0043 با معیار تخمین فرکانس F16

رزونانس صوتی سراسر حجم قطعه را تست میکند و استحکام کلی قطعه را تعیین می کند. این روش برای عیب یابی سازه های پیچیده نیز مناسب می باشد. روش های دیگر غیرمخرب مانند بازرسی چشمی، ذرات مغناطیسی، اولتراسونیک، و جریان گردابی (ترک یاب)، در دسته عیب یابی موضعی قرار دارند، بدین معنی که با مرور کردن^۱ قطعه، وجود و محل خرابی را گزارش می دهند.

تست رزونانس صوتی روشی دقیق، سریع و با صرفه برای تولید انبوه و کنترل ۱۰۰٪ قطعات می باشد. این تست نیازی به آماده سازی و تمیز کردن سطح ندارد، نیازی به مواد مصرفی و مایع کوپلنت ندارد، و به سادگی قابلیت اتوماسیون دارد. در دو دهه اخیر بسیاری از تأمین کنندگان جهانی قطعات ایمنی اتومبیل به تست رزونانس صوتی روی آورده اند. در ایران نیز برخی از تولید کنندگان قطعات ایمنی از دستگاه رزونانس صوتی EddySonix®

نتیجه گیری

روش رزونانس صوتی همزمان به ویژگی ها و فاکتورهای مختلفی حساس است. برخی از این ویژگی ها مربوط به عیوب قطعه و برخی دیگر مربوط به تغییرات پرو سه تولید و شرایط تست می باشد. به منظور تشخیص صحیح عیوب، خصوصاً عیوب کوچک، باید اثر فاکتورهای ناخواسته را حذف کرد. بدین منظور باید مجموعه متنوع و بزرگی از نمونه ها را تجزیه و تحلیل کرده، و رابطه بین فرکانس های مختلف را مدلسازی کرد. مراحل راه اندازی صنعتی تست رزونانس صوتی برای یک نوع قطعه شامل طراحی فیکسچر، تهیه نمونه های شاهد، و تنظیم پارامترها و معیارهای برنامه برای تفکیک نمونه های معیوب می باشد. چنانچه تست های غیر مخرب را به دو دسته عیب یابی موضعی و کلی تقسیم کنیم، روش رزونانس صوتی در دسته عیب یابی کلی قرار میگیرد. بدین معنی که روش

^۱ Scanning

International Journal of Fatigue, Vol. 29, No. 3, 2007, pp. 499-507.

- 3- R.W. Bono and G.R. Stultz, "Resonant inspection applied to 100% testing of nodularity of cast ductile iron", Tech. Rep., SAE, Paper No. 2008-01-2577, Warrendale, PA, 2008.
- 4- I. Hertlin, D. Schultze, "Acoustic resonance testing: the upcoming volume-oriented NDT method, 3rd Pan-American Conference for Nondestructive Testing", Brazil, 2003.

برای تست ۱۰۰٪ قطعات سیستم تعلیق و ترمز استفاده می‌کنند.

مراجع

- 1- ASTM Standard E2001-13, "Standard Guide for Resonant Ultrasonic Spectroscopy for Defect Detection in Both Metallic and Non-metallic Parts", 2013.
- 2- A. N. Damir, A. Elkhatib and G. Nassef, "Prediction of Fatigue Life Using Modal Analysis for Grey and Ductile Cast Iron,"