

## طراحی، ساخت و آزمون سامانه پایش وضعیت جعبه‌دنده با کمک پردازش سیگنال‌های صوتی

مهدی زمانی<sup>۱</sup> - محمد ابونجمی<sup>۲\*</sup> - سید رضا حسن بیگی<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۴/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۶/۱۴

### چکیده

یکی از روش‌هایی که امروزه برای به حداقل رساندن هزینه نگهداری و تعمیرات تجهیزات صنعتی دوار به کار می‌رود، پایش وضعیت به کمک تحلیل صدا می‌باشد. در پژوهش حاضر به منظور بررسی روند تشخیص عیب و پایش وضعیت جعبه‌دنده ابتدا سامانه‌ای طراحی و سپس ساخته شد. صدای حاصل از چرخ‌دنده‌های سالم و معیوب به وسیله صداسنج اخذ و در رایانه جهت پردازش ذخیره گردید. اندازه‌گیری صدا در سه سرعت پینیون ۷۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه برای چرخ‌دنده‌های سالم، عیب شکستگی یک دندانه و ساییدگی یک دندانه انجام شد. مقایسه سیگنال‌های صوتی پردازش شده از چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده در شرایط سالم و معیوب نشان‌دهنده فرکانس درگیری چرخ‌دنده، هارمونیک‌های آن و نیز تغییرات در اثر عیوب ایجاد شده بود. نتایج حاصل از تحلیل طیف فرکانسی سیگنال‌ها در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه پینیون، عیب شکستگی یک دندانه در فرکانس درگیری چرخ‌دنده‌ها را به ترتیب برابر ۵۰۰، ۳۵۰ و ۲۵۰ هرتز نشان داد که با افزایش دامنه فرکانس مذکور ظاهر شد. عیب ساییدگی دندانه‌ها در یک چرخ‌دنده به صورت ایجاد باندهای جانبی به فاصله مساوی در اطراف فرکانس درگیری چرخ‌دنده در طیف فرکانسی سیگنال در سرعت‌های ۱۵۰۰ و ۱۰۵۰ دور بر دقیقه پینیون کاملاً قابل تشخیص بود. بررسی طیف فرکانسی سیگنال صوتی حاصل از چرخ‌دنده، بیانگر توانمندی این روش در پایش وضعیت جعبه‌دنده با دقت بالا در زمان حداقل می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** پایش وضعیت، پردازش سیگنال‌های صوتی، جعبه‌دنده، حوزه فرکانس

### مقدمه

اطمینان ماشین‌آلات از مهم‌ترین اهداف اجرای پایش وضعیت می‌باشد. اندازه‌گیری و تحلیل ارتعاشات<sup>۴</sup>، اندازه‌گیری و تحلیل صدا<sup>۵</sup>، تحلیل گرما<sup>۶</sup> و تحلیل روغن<sup>۷</sup> (طیف سنجی<sup>۸</sup>، فروگرافی<sup>۹</sup>) از متداول‌ترین روش‌ها برای پایش وضعیت یک ماشین دوار است. جعبه‌دنده به عنوان یکی از اجزای اصلی برای انتقال قدرت نقش کلیدی در کاربردهای صنعتی ایفا می‌کند. این مسئله باعث شده که بسیاری از محققان تحقیقات گسترده‌ای در این زمینه انجام دهند. نقش مهم چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها در وضعیت سلامتی جعبه‌دنده و به تبع آن دستگاه‌ها، واضح است؛ بنابراین پایش وضعیت جعبه‌دنده‌ها امری ضروری به نظر می‌رسد. از امواج ارتعاشی و صدا می‌توان در پایش وضعیت جعبه‌دنده استفاده نمود. پردازش سیگنال یکی از روش‌های امروزی برای طبقه‌بندی عیوب و پایش وضعیت است. امروزه روش‌های بسیار زیادی جهت پردازش سیگنال مورد استفاده قرار می‌گیرد. یکی از روش‌های متداول تحلیل سیگنال‌های صوتی،

یکی از مهم‌ترین مسائلی که در کاربرد تجهیزات صنعتی همواره مدنظر بوده است قابلیت اطمینان می‌باشد. پایش وضعیت مدت‌هاست که به عنوان روشی کارآمد و کم‌هزینه برای کنترل کیفی همچنین نگهداری و تعمیرات مورد توجه قرار گرفته است (Ahmadi and Mollazadeh, 2009). این روش به عنوان یکی از روش‌های مؤثر برای جلوگیری از آسیب جدی به ماشین‌های صنعتی شناخته شده است. تخمین دقیق وضعیت دستگاه موجب کاهش دفعات از کار افتادگی دستگاه و کاهش هزینه‌ی نگهداری و تعمیرات و همچنین افزایش کیفیت محصول تولیدی می‌گردد؛ بنابراین مدیریت صنایع می‌تواند به صورت بهینه از نیروی کار و تجهیزات استفاده کند (Zhan and Mechefske, 2007). به حداقل رساندن دفعات توقف ماشین‌آلات، کاهش زمان توقف ماشین‌آلات، کاهش مصرف قطعات یدکی، کاهش هزینه، افزایش کیفیت محصول و بالا بردن ضریب

- 4 -Vibration analysis
- 5- Acoustic analysis
- 6- Thermographic inspection
- 7- Oil analysis
- 8- Spectroscopy
- 9- Ferrography

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲ و ۳- دانشیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

\*- نویسنده مسئول: (Email: abonajmi@ut.ac.ir)

شد. داده‌های ارتعاشی مربوط به دوره‌های مختلف محور اخذ و پس از آن داده‌ها به کمک تبدیل فوریه تحلیل شدند. ارتباط بین تحلیل ارتعاشات و تشخیص عیب را (Heidar-Beygi *et al.*, 2007) بررسی کردند. در این بررسی، شرایط متفاوت (سالم و معیوب) یک جعبه‌دنده بررسی گردید. سپس ارتعاشات جعبه‌دنده اندازه‌گیری شده و پس از آن طیف فرکانسی مربوط به هر حالت مورد بررسی قرار گرفت. با مقایسه طیف‌های استخراج شده در حالت سالم و معیوب، عیوب جعبه‌دنده در شرایط مشابه قابل تشخیص بود. با استفاده از داده‌های ارتعاشی (Jack and Nandi, 2002) به عیب‌یابی یاتاقان پرداختند. در این پژوهش داده‌های ارتعاشی با سرعت نمونه‌گیری ۴۸ کیلوهرتز برای چندین عیب مختلف به دست آمد اما با توجه هدف تنها تشخیص سالم یا خراب بودن یاتاقان بود، به همین دلیل ۲ کلاس سالم و معیوب در نظر گرفته شد.

هدف این پژوهش، طراحی و ساخت سامانه‌ای جهت اخذ امواج صدای حاصل از جعبه‌دنده در شرایط سلامت و خرابی چرخ‌دنده و به دست آوردن ویژگی‌های مناسب جهت تشخیص عیوب مختلف می‌باشد. در طراحی و ساخت سامانه به منظور اطمینان از عدم وجود عیب در جعبه‌دنده، یک جعبه‌دنده طراحی و ساخته شد. در ضمن جعبه‌دنده طوری ساخته شد که تعویض چرخ‌دنده‌ها به سهولت انجام گیرد. همچنین با توجه به استفاده از انواع چرخ‌دنده‌ها در صنعت، جعبه‌دنده به گونه‌ای طراحی گردید تا امکان استفاده از انواع گوناگون چرخ‌دنده‌ها وجود داشته باشد.

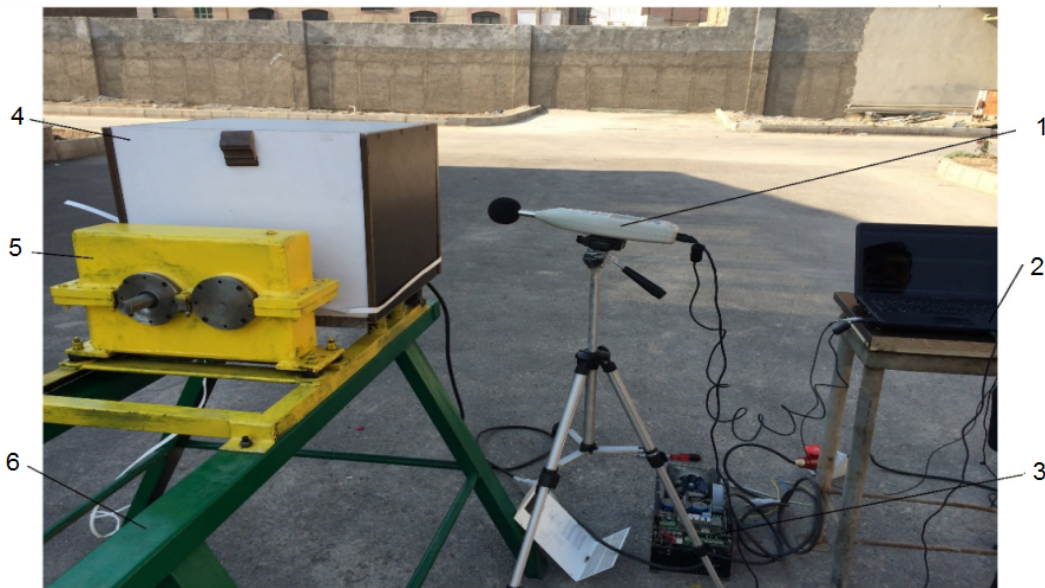
### مواد و روش‌ها

این پژوهش در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۳ در پردیس ابوریحان دانشگاه تهران اجرا گردید. جهت انجام این پژوهش ابتدا جعبه‌دنده‌ای با چرخ‌دنده‌های ساده طراحی شد. سپس جعبه‌دنده مذکور به همراه سایر اجزای تشکیل‌دهنده سامانه در نرم افزار CATIA V5-R20 به صورت سه بعدی و ابعادی مدل گردیده و سرانجام نسبت به ساخت این سامانه اقدام شد (شکل ۱). اجزای سامانه ساخته شده عبارتند از: ۱- صداسنج، ۲- رایانه، ۳- اینورتر، ۴- اتاقک آکوستیک الکتروموتور، ۵- جعبه دنده، ۶- شاسی. در ادامه جزئیات اجزای اصلی سامانه به اختصار توضیح داده می‌شوند.

### جعبه‌دنده

در این تحقیق به دلیل عدم هماهنگ بودن گشتاور و سرعت دورانی منبع تولید توان لازم است از جعبه‌دنده به‌عنوان ماشینی که می‌تواند این هماهنگی را به صورت یک واسطه برقرار کند، استفاده شود. محاسبات لازم جهت به دست آوردن مشخصات فنی چرخ‌دنده‌ها، بلبرینگ‌ها، ابعاد محورها و سایر اجزای جعبه‌دنده انجام شد.

تحلیل طیف فرکانسی است که با استفاده از تبدیل فوریه سریع قابل حصول می‌باشد تبدیل فوریه سریع تجزیه یک رشته از مقادیر به مؤلفه‌های فرکانسی آن است. در مطالعه‌ای از تحلیل سیگنال‌های صوتی جهت تشخیص عیب یاتاقان استفاده شد (Amarnath *et al.*, 2013). در این بررسی دلیل استفاده از تحلیل صوتی به جای تحلیل ارتعاشی (شتاب سنج‌ها) عنوان شد و بیان شد که استفاده از عیب‌یابی به کمک تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی در صنایع کوچک مقرون به صرفه نیست. در تحقیقی عیب‌یابی یک جعبه‌دنده هلیکال با یاتاقان‌های لغزشی از طریق تحلیل صدا و ارتعاش انجام شد (Homai and Safari, 2014). در این بررسی صدای جعبه‌دنده در حالت پایدار ضبط گردید و طیف فرکانسی آن استخراج گردید و با طیف‌های به دست آمده از تحلیل ارتعاشات مقایسه گردید. با مقایسه طیف فرکانسی ارتعاش با طیف فرکانسی صدای مربوطه مشاهده شد که هر دو طیف شکل یکسان دارند؛ بنابراین با استفاده از میکروفن و پردازش سیگنال صوتی، مانند دستگاه شتاب‌سنج و آنالایزر ارتعاشی، می‌توان پایش وضعیت جعبه‌دنده‌ها را با هزینه کمتر انجام داد. وجود عیب در موتور احتراق داخلی با استفاده از امواج صدا بررسی شد (Wu and Liu, 2008). در این تحقیق، صدای ناشی از موتور در سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه در حالت‌های بدون عیب، نشستی در سامانه ورود هوا، عدم احتراق در یک سیلندر، عدم احتراق در دو سیلندر، ایراد در میل‌لنگ و ایراد در سامانه خنک‌کننده موتور اندازه‌گیری و تحلیل شد. در تحقیق دیگری سلامت سامانه انژکتور و ورودی هوا به یک موتور احتراقی با استفاده از امواج فشار اگزوز بررسی شد (Wu *et al.*, 2010). در مطالعه‌ای صدای گازهای خروجی از اگزوز موتور چهار سیلندر برای تشخیص وجود عیب در انژکتور و سوپاپ ورودی هوا استفاده شد (Jiang *et al.*, 2008). در تحقیقی پایش وضعیت ابزار سنگ‌زنی به منظور تشخیص ابزار فرسوده از سالم با استفاده از امواج صدا انجام شد (Kanthababu *et al.*, 2008). بدین منظور برخی توابع حوزه زمان مانند Kurtosis و Skewness (ضریب عدم تقارن) استفاده گردید و طبقه‌بندی تنها با مقایسه بین مقادیر این توابع صورت گرفت. صدا و ارتعاش سامانه انتقال قدرت تسمه‌ای در حالت سالم و معیوب بررسی شد و ایرادهای مختلف به صورت آماری تحلیل گردید (Bartelmus and Zimroz, 2008). با استفاده از امواج صوتی انتشار یافته هنگام ماشین‌کاری توسط دستگاه تراش وضعیت تیغه بررسی گردید. در این تحقیق به منظور کاهش تعداد خصوصیات از روش انتخاب ویژگی استفاده شد؛ اما در نهایت حداکثر ۸۲ درصد دقت در تشخیص تیغه‌ی سالم از ناسالم به دست آمد (Ravindra *et al.*, 1997). روشی هوشمند تشخیص عیب چرخ‌دنده‌های تراکتور مسی فرگوسن ۲۸۵ با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک و سیگنال‌های ارتعاشی حاصل از جعبه‌دنده توسط (Ebrahimi *et al.*, 2013) ارائه

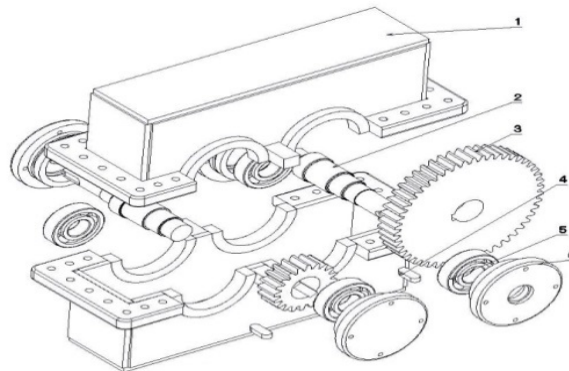


**شکل ۱- اجزای تشکیل‌دهنده سامانه پایش وضعیت طراحی و ساخته شده: (۱) صدا سنج، (۲) کامپیوتر دستی، (۳) اینورتر، (۴) اتاقک آکوستیک الکترو موتور، (۵) جعبه دنده، (۶) شاسی**

**Fig. 1. Constitutive Components of the designed and constructed condition monitoring system: (1) Sound level meter, (2) Hand- held computer, (3) Inverter, (4) Electromotor acoustic chamber, (5) Frame**

۳- چرخ‌دنده، ۴- خار، ۵- بلبرینگ و ۶- فلنج یا درپوش، می‌باشند. در طراحی تمام اجزای جعبه‌دنده با توجه به شرایط کاری تمامی پارامترهای طراحی محاسبه و لحاظ گردید.

جعبه‌دنده از نوع جعبه‌دنده با چرخ‌دنده‌های ساده می‌باشد که محور ورودی و خروجی آن موازی یکدیگر است، در نظر گرفته شد. نقشه انفجاری جعبه دنده در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل اجزای اصلی تشکیل‌دهنده جعبه‌دنده: ۱- پوسته، ۲- محور،



**شکل ۲- نقشه انفجاری جعبه دنده ۱- پوسته ۲- شفت ۳- دنده ۴- خار ۵- بلبرینگ ۶- درپوش بلبرینگ**

**Fig.2. Exploded view drawing of gearbox: (1) Case, (2) Shaft, (3) Gear, (4) Key, (5) Ball bearing, (6) Ball bearing case**

جذب صدای بیشتری داشته باشد، اما با توجه به هزینه قالب‌گیری و ریخته‌گری برای ساخت یک نمونه این امر امکان‌پذیر نبود. پوسته به صورت دو تکه ساخته شد و سطوحی که روی هم قرار می‌گیرند، با دقت زیاد ماشین‌کاری گردید. به منظور جلوگیری از نشت روغن، بین

#### پوسته

در پژوهش حاضر، پوسته از جنس فولاد ساختمانی St-37 با مشخصات فنی که در جدول ۱ آمده است طراحی و ساخته شد. لازم به ذکر است بهتر بود پوسته از جنس چدن ساخته می‌شد که قابلیت

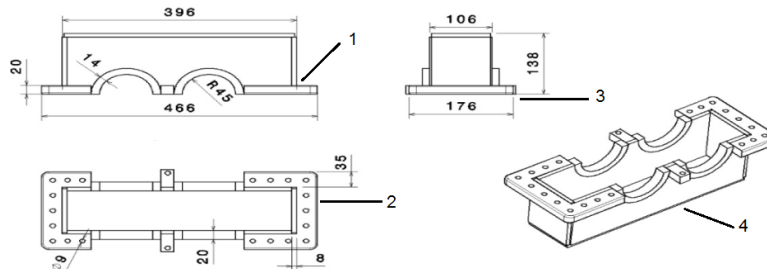
پوسته در محلی که نیروی محور را تحمل می‌کند، دارای زائده‌ای است که به منظور تقویت پوسته در تحمل تنش‌ها می‌باشد. نقشه ابعادی پوسته ساخته شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

این دو تکه، واشر مناسب قرار داده شد. ترتیب بستن پیچ‌ها به گونه‌ای انجام شد که باعث تاب برداشتن پوسته نشود. محور محورها در صفحه‌ای که دو پوسته بر روی هم قرار می‌گیرند، مستقر شد. شکل

جدول ۱- مشخصات مکانیکی فولاد St 37

Table 1- Mechanical properties of steel St 37

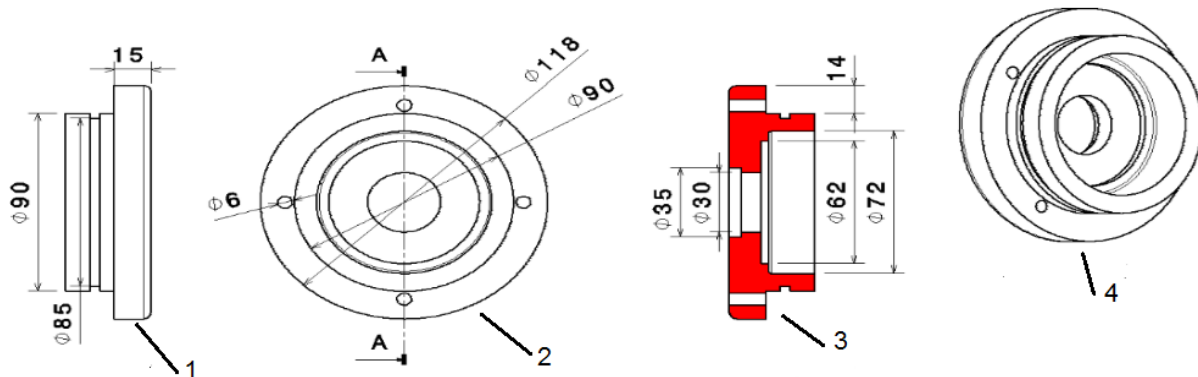
استحکام تسلیم (مگاپاسکال) Yield strength (Mpa)	استحکام کششی (مگاپاسکال) Tensile strength (Mpa)	جرم حجمی (کیلوگرم بر متر مکعب) Density ( $kg\ m^{-3}$ )	ضریب پواسن Poisson coefficient	مدول الاستیسته (پاسکال) Modulus of elasticity (GPa)
235	340-350	8000	0.3	200



شکل ۳- نقشه فنی پوسته ساخته شده جعبه‌دنده ۱- نمای روبه‌رو ۲- نمای بالا ۳- نمای سمت راست ۴- نمای ایزومتریک  
Fig. 3. Technical drawing of gearbox case: (1) Front view (2) Top view (3) Right view (4) Isometric view

محلی جهت نصب اورینگ تعبیه شد. نقشه ساخت این قطعه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

درپوش بلبرینگ (قطعه شماره ۶ در شکل ۲) به دو تکه پوسته پیچ می‌شود. در اطراف درپوش‌ها و جهت جلوگیری از نشت روغن

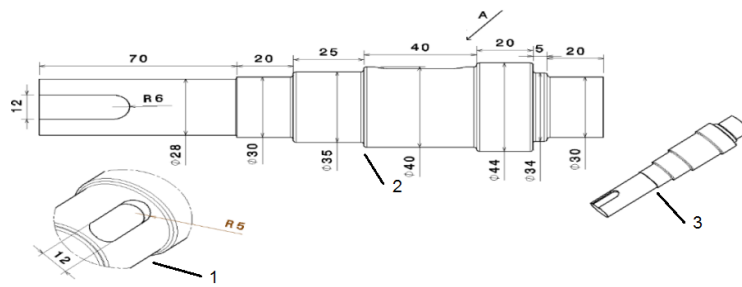


شکل ۴- نقشه فنی درپوش ساخته شده جهت نگهداری بلبرینگ‌ها ۱- نمای سمت راست ۲- نمای روبه‌رو ۳- نمای برش خورده ۴- نمای ایزومتریک  
Fig. 4. Technical drawing of mated cap for the maintenance of bearings: (1) Right view (2) Front view (3) Section view (4) Isometric view

خستگی طراحی گردید که ابعاد آن در شکل ۵ نشان داده شده است. محور از جنس فولاد MO40 و به روش ماشین‌کاری ساخته شد. (Mutabi, 2006; Ghasemzadeh, 2000).

#### محور

محور (قطعه شماره ۲ در شکل ۲) یکی از قطعات اصلی جعبه‌دنده می‌باشد که در حین فرآیند انتقال توان تحت لنگرهای خمشی و پیچشی قرار می‌گیرد. محور جعبه‌دنده با در نظر گرفتن ملاحظات



شکل ۵- نقشه فنی محور ۱- نمای جزئیات ۲- نمای روبه‌رو ۳- نمای ایزومتریک

Fig.5. Technical drawing of shaft: (1) Detail view, (2) Front view, (3) Isometric view

ابعاد جعبه‌دنده تعداد دندانه‌های چرخ‌دنده ۵۰ عدد در نظر گرفته شد؛ بنابراین قطر گام چرخ‌دنده ۲۰۰ میلی‌متر به‌دست آمد. چرخ‌دنده‌ها از جنس فولاد St-37 با استفاده از ماشین‌ها ساخته شد. به منظور تثبیت چرخ‌دنده روی محور و انتقال توان از خار مستطیلی فرم بلند با ابعاد  $8 \times 12 \times 33$  میلی‌متر مکعب مطابق با استاندارد DIN 6885 استفاده گردید. خار ابتدا در داخل جا خار محور نصب گردید و سپس جا خار توپی با خار در یک امتداد قرار داده شده و توپی به محل خود لغزانه شد.

در این پژوهش، برای تأمین توان لازم از یک الکتروموتور سه فاز مدل 100LAB ساخت شرکت موتوژن تبریز با توان اسمی ۳ کیلووات در حداکثر دور ۱۵۰۰ دور بر دقیقه استفاده گردید. جهت ایجاد تغییر در سرعت دورانی الکتروموتور مذکور از مبدل فرکانسی (اینورتر) لنز مدل ۸۳۰۰ استفاده گردید. این اینورتر سه فاز تا توان مصرفی ۳ کیلووات را پوشش می‌دهد. اینورتر دارای یک واحد کنترل کننده دیجیتال می‌باشد که شامل میکروپروسسور ۸ بیت است. جهت کالیبره کردن دور الکتروموتور در فرکانس کاری اینورتر از یک عدد دورسنج نوری - تماسی مدل Lutron DT-1236L که دارای دقتی معادل  $\pm 1 \text{rpm}$  می‌باشد، به‌صورت تماسی استفاده گردید.

#### اتاقک اکوستیک الکتروموتور

یک اتاقک جهت جلوگیری از تداخل امواج صوتی حاصل از کار کردن الکتروموتور با امواج حاصل از کار کردن جعبه دنده ساخته شد (شکل ۷). جهت عایق نمودن این جعبه از سه لایه مواد جاذب صدا به‌ترتیب نمد معمولی با ضخامت یک میلی‌متر، فوم پلی‌اتیلن با ضخامت ۱۵ میلی‌متر و فوم شانه تخم‌مرغی با ضخامت ۳۵ میلی‌متر استفاده شد. فوم پلی‌اتیلن به دلیل داشتن خواص ویژه یکی از بهترین ایزولاسیون‌ها و عایق برودت، حرارت، رطوبت و صدا می‌باشد. فوم شانه تخم‌مرغی محصولی از جنس فوم پلی‌یورتان است. این محصول معمولاً برای صداگیری استفاده می‌شود و می‌توان از آن

جا خار یک شیار طولی است که برای سوار کردن خار بر روی محور تراشیده می‌شود تا گشتاور بتواند از محور به قطعه انتقال‌دهنده توان یا برعکس منتقل شود. در این تحقیق از جای خار نوع پروفیلی با ابعاد  $8 \times 12 \times 33$  میلی‌متر استفاده شد. در این پژوهش با توجه به استفاده از جای خار نوع پروفیلی، در طراحی محور ضریب تمرکز تنش  $K_t=2$  در نظر گرفته شد. در طراحی محور در مواردی که تغییر قطر وجود دارد با توجه به شرایط بارگذاری و نوع فیلت (با شعاع یک میلی‌متر) ضریب تمرکز تنش  $K_t=1.5$  در نظر گرفته شد. به منظور تثبیت قطعات بر روی محور از حلقه‌های نگه‌دارنده استفاده شد. حلقه‌ها بعد از نگه‌داشتن قطعه در محل خود در شیارهای داخل محور نصب گردیدند. شکل شیار در نظر گرفته شده عبارت بود از یک شیار کم عمق با دیواره‌ها و کف تخت و یک فیلت کوچک در پای شیار با توجه به محاسبات نیروهای تکیه‌گاهی محور و به منظور نصب محور روی پوسته جعبه‌دنده، در این تحقیق از یاتاقان‌های ساچمه‌ای با شماره ۶۳۰۶ مطابق استاندارد DIN625-1 استفاده گردید.

#### چرخ‌دنده

چرخ‌دنده‌ها انواع گوناگونی دارند که یکی از انواع آن‌ها چرخ‌دنده‌های ساده می‌باشد. دندانه‌های این چرخ‌دنده‌ها به موازات محور دورانشان تراشیده می‌شوند. این چرخ‌دنده‌ها از نظر طراحی و ساخت در مقایسه با دیگر انواع چرخ‌دنده ساده‌تر هستند و به همین دلیل بیشتر طراحان چرخ‌دنده برای هر کاربرد معین ابتدا از چرخ‌دنده‌های ساده شروع می‌کنند و سپس در صورت لزوم به سراغ انواع دیگر چرخ‌دنده‌ها می‌روند (Sadeghi, 1979). در پژوهش حاضر، در طراحی جعبه‌دنده از چرخ‌دنده ساده با زاویه فشار ۲۰ درجه استفاده شد. با توجه به بیشینه سرعت دورانی الکتروموتور و نیز بیشینه توان انتقالی چرخ‌دنده‌های با مدول ۴ انتخاب گردید. برای جلوگیری از پدیده تداخل تعداد دندانه‌های پینیون ۲۰ عدد در نظر گرفته شد. با توجه به مدول، قطر گام پینیون ۸۰ میلی‌متر به‌دست آمد. با توجه به



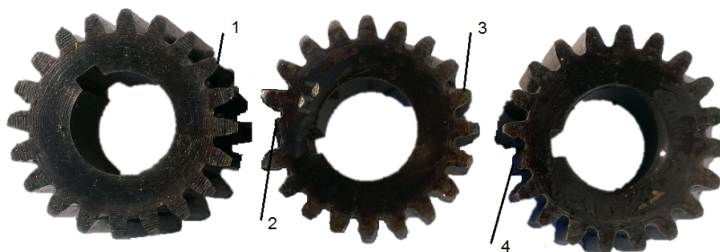
### عیوب اعمال شده

خرابی‌های بررسی شده در این پژوهش از نوع خرابی‌های مربوط به چرخ‌دنده‌ها با انواع شکستگی یک دندانه، سایش یک دندانه و شکستگی یک دندانه و سایش دندانه دیگر می‌باشند. خرابی‌ها بر روی پینیون اعمال گردید. به منظور ایجاد ساییدگی به میزان ۲ میلی‌متر از لبه یکی از دندانه‌ها به صورت مصنوعی و با استفاده از سنگ برش برداشته شد. این در حالی است که در تحقیق‌های پیشین این ساییدگی در تمامی دندانه‌ها ایجاد شده بود. ایجاد خرابی در یک دندانه امکان تشخیص عیب را کاهش می‌دهد؛ اما در صورتی که سامانه تشخیص عیب به خوبی تعریف شده باشد امکان تشخیص این عیب کوچک نشان از قدرت سامانه است. خرابی لب پریدگی نیز به صورت مصنوعی و با شکستن یکی از دندانه‌های پینیون ایجاد گردید. شکل ۷ انواع عیوب ایجاد شده بر پینیون را نشان می‌دهد.

به‌عنوان پوشش آکوستیکی داخلی دیوار، سقف و یا پشت درب مکان‌های مختلف بهره برد. بدنه این اتاقک از جنس MDF ساخته شد. نمای داخلی اتاقک عایق صوتی شده در شکل ۶ نشان داده شده است. طبق اندازه‌گیری‌های میدانی میزان کاهش صدای الکتروموتور با استفاده از این اتاقک آکوستیک حدود ۲۰ dB بود.



شکل ۶- نمای داخلی اتاقک آکوستیک  
Fig. 6. Interior acoustic chamber



شکل ۷- عیوب اعمال شده بر دنده‌ها ۱ و ۳- دندانه شکسته شده ۲ و ۴- دندانه سائیده شده

Fig.7. Imposed faults on the gears: (1), (3): Fractured gear tooth (2), (4): Worn gear tooth

نمونه‌برداری طبق معیار نایکوئیست لازم است حداقل دو برابر حداکثر فرکانس مورد بررسی باشد. با توجه به این که حداکثر فرکانسی که توسط انسان قابل شنیدن است ۱۶۰۰۰ هرتز می‌باشد (Gol-Mohammadi, 2010)؛ بنابراین در این تحقیق از سرعت نمونه‌برداری ۴۸۰۰۰ هرتز استفاده شد. به‌منظور افزایش دقت از ۲۰ ثانیه سیگنال صوتی اندازه‌گیری شده در حوزه زمان، دو ثانیه سیگنال یکنواخت که کمترین تغییرات بین قله‌ها را داشت جداسازی و ذخیره گردید. این فایل‌ها جهت پردازش‌های بعدی در نرم‌افزار MATLAB(R2015a) بارگذاری شده و با توجه به سرعت و نوع خرابی هر چرخ‌دنده در گروه‌های مجزا دسته‌بندی شدند.

### تحلیل سیگنال‌های صوتی

در این تحقیق داده‌های صوتی ثبت شده برای دستگاه در شرایط سالم به‌عنوان اطلاعات پایه در نظر گرفته شدند و داده‌های سایر شرایط نسبت به آن‌ها سنجیده شدند. تفاوت داده‌های به‌دست آمده در شرایط مختلف اندازه‌گیری با شرایط پایه نشان‌دهنده وجود عیب در چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده می‌باشد. نتایج به‌دست آمده از طریق روابط

### اخذ داده‌های صوتی

برای ضبط سیگنال‌های صوتی در این پژوهش از دستگاه صداسنج مدل HT-157 نوع ۱ ساخت کشور ایتالیا استفاده شد. میکروفن این صداسنج دارای حساسیتی معادل ۵۰ میلی‌ولت بر پاسکال بوده که مناسب کارهای تحقیقاتی می‌باشد. ولتاژ متناوب خروجی صداسنج توسط یک کابل رابط به ورودی کارت صدای یک لپ‌تاپ Lenovo-G550 که نرم‌افزار Cool Edit روی آن نصب شده بود، متصل گردید تا امکان ذخیره‌سازی سیگنال‌های صدا در حوزه زمان فراهم گردد (Hassan-Beygi et al., 2004). اندازه‌گیری صدا در دو موقعیت (Position A and B) که در شکل نشان داده شده است؛ انجام شد. برای انجام آزمایش‌ها برای هر جفت پینیون و چرخ‌دنده، عیب فقط در پینیون ایجاد شد، در ضمن برای هر جفت چرخ‌دنده و پینیون قبل از ایجاد عیب نیز داده‌های صوتی اندازه‌گیری و ذخیره گردید. داده‌های صوتی در دوره‌های ۷۵۰، ۱۰۵۰ و ۱۵۰۰ دور بر دقیقه الکتروموتور اخذ گردید. اندازه‌گیری صدا در ۴ تکرار انجام شد. برای هر آزمایش ۲۰ ثانیه صدا اندازه‌گیری و ثبت شد. سرعت

پینیون سالم در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده است. سیگنال صوتی این جفت چرخ‌دنده و پینیون به‌عنوان شاهد استفاده شد که دندانه‌های آن سالم بوده و هیچ گونه عیبی بر روی آن‌ها اعمال نشده است.

همان‌گونه که از قسمت‌های مختلف شکل ۹ مشاهده می‌شود، تشخیص ویژگی‌های صوتی چرخ‌دنده‌ها از قبیل فرکانس درگیری در حوزه در طیف فرکانسی تراز فشار صدا مشکل است. در صورتی که فرکانس درگیری به وضوح در طیف فرکانسی تراز سرعت ذره مشخص است؛ لذا از آوردن نمایش سیگنال‌های حوزه زمان و طیف فرکانسی تراز فشار صدا برای موارد دیگر خودداری شده و فقط طیف فرکانسی تراز سرعت ذره بررسی می‌شود. در مورد تشخیص عیب شکستگی ذکر این نکته حائز اهمیت می‌باشد که عیب شکستگی یک دندانه در فرکانس درگیری چرخ‌دنده‌ها که به ترتیب برابر ۵۰۰، ۳۵۰ و ۲۵۰ هرتز می‌باشد و با افزایش دامنه فرکانس مذکور ظاهر می‌شود. در مطالعه‌ای که به بررسی و عیب‌یابی جعبه‌دنده‌ها به کمک روش نوین EMD پرداخته شد. نتایج حاصل از تحلیل فرکانسی فوریه نشان داد که در فرکانس ۲۵۹ هرتز عیبی مشاهده نمی‌گردد و تحلیل فرکانسی برای عیوب پیشرفته‌تر قابل مشاهده است. این نتایج پس از تحلیل فرکانسی بر روی سیگنال چرخ‌دنده معیوب در حوزه زمان بعد از اعمال روش EMD نشان داد، دامنه بالایی در فرکانس ۲۵۹ هرتز که مربوط به فرکانس خرابی است بعد از آن دامنه‌ها کاهش می‌یابد و این روش کارایی خوبی در عیب‌یابی چرخ‌دنده‌ها دارد (Mazrui-Sabdani, 2009).

شکل ۱۰ و ۱۱ نمایش مربوط به حوزه فرکانس سیگنال به‌دست آمده از چرخ‌دنده سائیده شده قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که پیش از این نیز عنوان گردید عیب سائیدگی دندانه‌ها در یک چرخ‌دنده به‌صورت ایجاد باندهای جانبی به فاصله مساوی در اطراف فرکانس درگیری چرخ‌دنده در طیف فرکانسی سیگنال ظاهر می‌شود. با توجه به توضیحات داده شده و بررسی طیف فرکانسی مخصوصاً در سرعت‌های ۱۵۰۰ و ۱۰۵۰ دور بر دقیقه پینیون این عیب کاملاً قابل تشخیص می‌باشد. اما در سرعت‌های کمتر تشخیص این عیب کمی سخت‌تر می‌شود. در بررسی عیب یاتاقان از طریق تجزیه سیگنال‌های صوتی؛ افزایش دامنه در فرکانس درگیری چرخ‌دنده و هارمونیک‌های آن را گزارش کردند (Safari and Homai, 2014).

در ادامه، شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مربوط به نمایش حوزه فرکانس چرخ‌دنده‌ای که دارای عیب شکستگی و سائیدگی به‌صورت هم‌زمان آورده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۳ و ۱۴ کاملاً مشخص است، افزایش دامنه در فرکانس درگیری چرخ‌دنده که مربوط به عیب شکستگی یک دندانه می‌باشد و نیز ایجاد باندهای جانبی در اطراف همین فرکانس که مربوط به سائیدگی یک دندانه می‌باشد، قابل تشخیص می‌باشد.

موجود در دوره‌های مختلف جعبه‌دنده محاسبه و از نظر عیوب احتمالی طبقه‌بندی شدند. داده‌های صوتی ناشی از عیوب چرخ‌دنده‌ها معمولاً در فرکانسی برابر با فرکانس درگیری چرخ‌دنده<sup>۱</sup> (GMF) به‌وجود می‌آیند که از حاصل ضرب تعداد دندانه‌ها (n) در سرعت دورانی چرخ‌دنده معیوب (N) بر حسب دور بر دقیقه محاسبه می‌گردد:

$$GMF = n \times N \quad (1)$$

افزایش بیش از حد این فرکانس یا ایجاد باندهای جانبی در اطراف این فرکانس به‌طور معمول نشان‌دهنده عیب در چرخ‌دنده است. تراز فشار صدا<sup>۲</sup> (SPL) و تراز سرعت ذره<sup>۳</sup> (PVL) به شکل زیر محاسبه می‌گردد (Homai and Safari, 2014):

$$SPL \text{ (dB)} = 10 \times \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \times \log \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

$$PVL \text{ (dB)} = 20 \text{ Log}_{10} \frac{U}{U_0} \quad (3)$$

$$SPL = PVL \rightarrow U \left( \frac{m}{s} \right) 10^{20} \times 5 \times 10^{-8} \quad (4)$$

که در این روابط مقدار فشار مینا و سرعت مینا به ترتیب:  $U_0 = 2 \times 10^{-8}$  و  $P_0 = 2 \times 10^{-5}$  می‌باشند.

### تبدیل فوریه سریع

در عمل سیگنال زمانی که به‌وسیله تجهیزات الکترونیکی ثبت شده است جهت پردازش به‌صورت گسسته نمونه‌برداری می‌شود. اگر سیگنال زمانی، یک سیگنال گسسته باشد، تبدیل فوریه آن نیز گسسته خواهد بود و انتگرال آن تبدیل به یک سری خواهد شد. در این حالت تبدیل فوریه به شکل زیر قابل بیان خواهد بود:

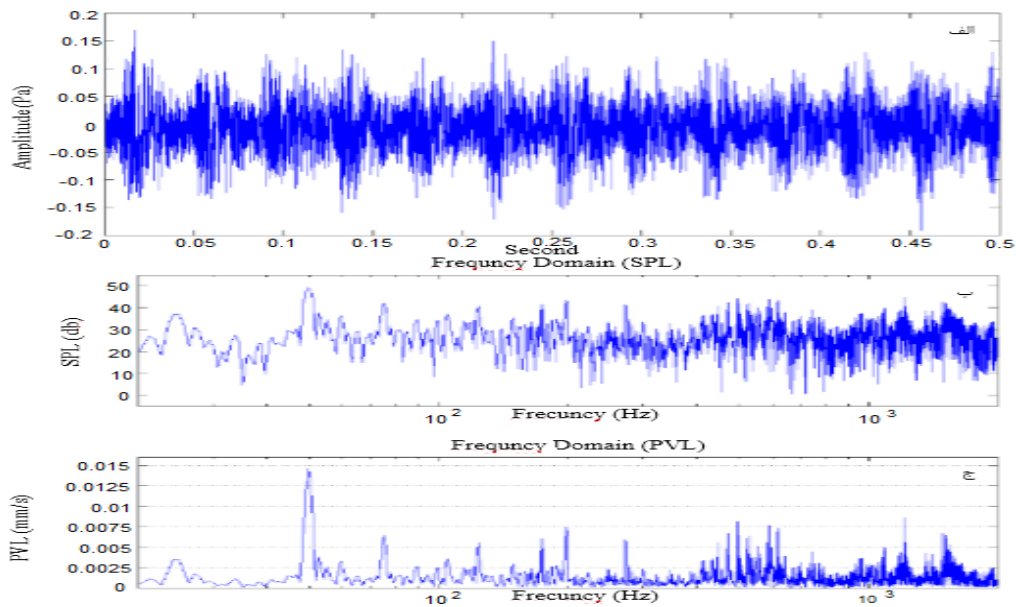
$$G(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g(t_n) e^{-j2\pi \frac{kn}{N}} \quad (5)$$

در رابطه فوق k یک عدد  $f_k = k/T$  بیانگر فرکانس و N تعداد تقسیمات یک سیگنال است. تبدیل فوریه سریع (FFT) همان تبدیل فوریه (FT) است که با سرعت سریع‌تری انجام می‌شود. در این حالت تعداد نمونه‌برداری‌ها به‌صورت توانی از دو به صورت  $2^N$  انتخاب شده و تبدیل فوریه با الگوریتم خاصی محاسبه می‌گردد که حجم محاسبات را به شدت کاهش می‌دهد. در نتیجه سرعت پردازش افزایش می‌یابد (Dayani, 2013).

### نتایج و بحث

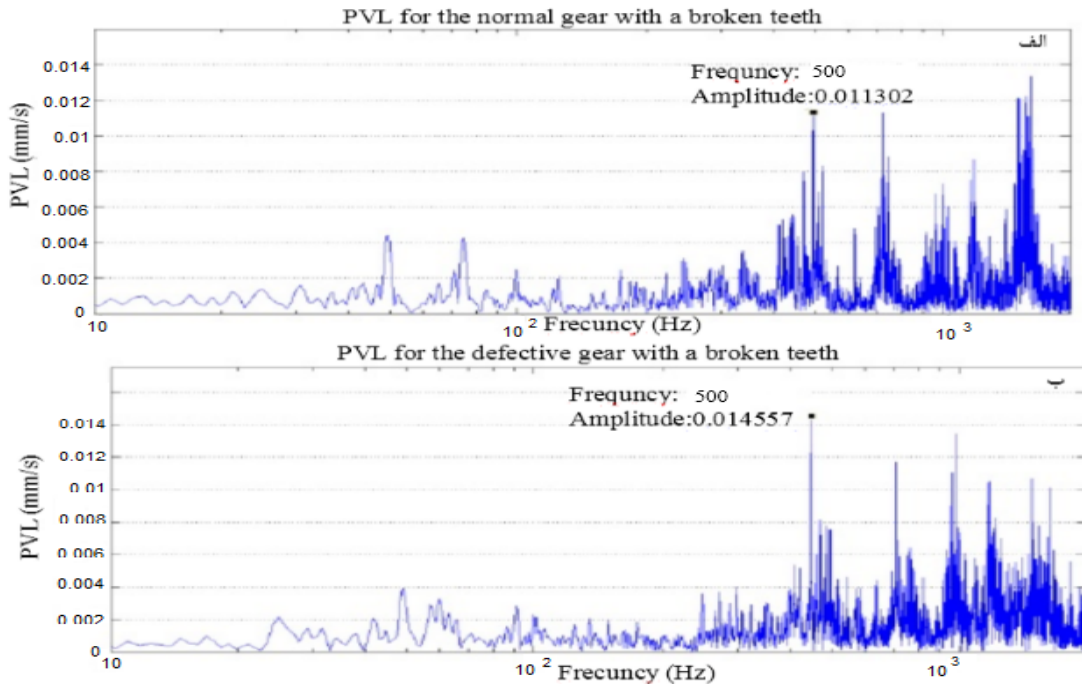
در شکل ۸ نمایش سیگنال‌های صوتی در حوزه طیف فرکانسی تراز فشار صدا و طیف فرکانسی تراز سرعت ذره برای چرخ‌دنده و

- 1- Gear mesh frequency
- 2- Sound pressure level
- 3- Particle velocity level



شکل ۸- نمایش سیگنال‌های صوتی برای چرخ‌دنده و پینیون سالم در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه: الف- حوزه زمان، ب- طیف فرکانسی تراز فشار صدا و ج- طیف فرکانسی تراز سرعت ذره

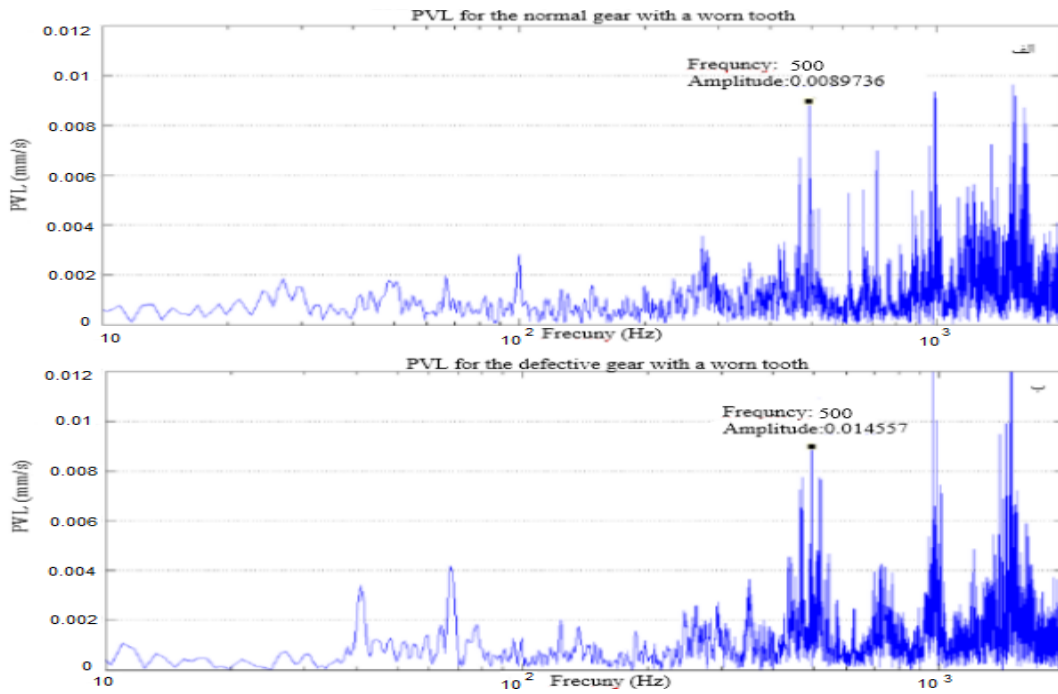
Fig.8. View the audio signal to the pinion gear and control the speed of 1500 rpm: (a) Time domain, (b) Frequency spectrum and (c) The frequency spectrum of the sound pressure level particle speed



شکل ۹- نمایش و مقایسه طیف فرکانسی تراز سرعت ذره در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه پینیون: الف- قبل از اعمال عیب شکستن یک دندانه و ب- بعد از اعمال عیب شکستن یک دندانه

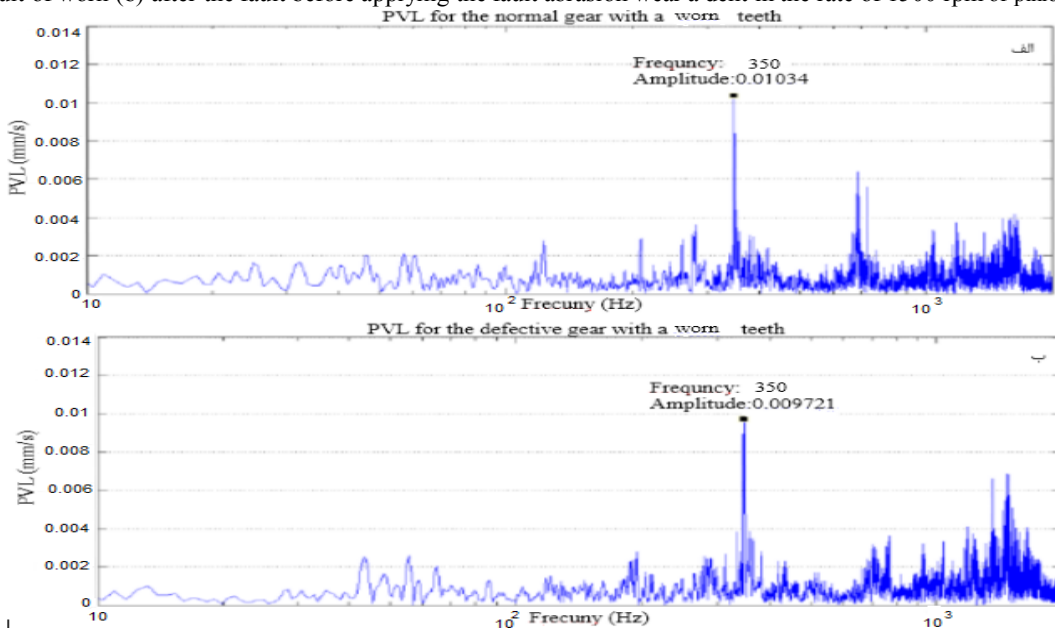
Fig. 9. Preview and compare of the frequency spectrum level at a speed of 1500 rpm particle speed pinion: (a) before applying fracture on tooth and (b) after imposing fracture on tooth





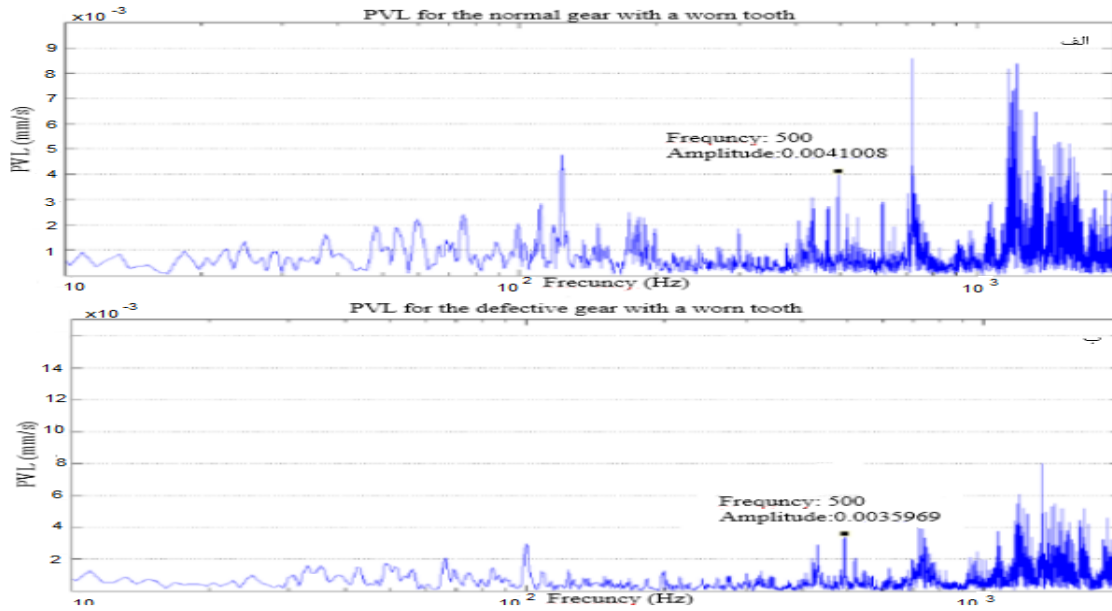
شکل ۱۰- نمایش و مقایسه طیف فرکانسی سطح سرعت ذره به دست آمده از چرخ‌دنده، الف- قبل از اعمال عیب سائیدگی و ب- بعد از اعمال عیب سائیدگی یک دندانه در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه پینیون

Fig.10. Preview and compare the frequency spectrum of the particle speed obtained from the gears, (a) before applying the fault of worn (b) after the fault before applying the fault abrasion wear a dent in the rate of 1500 rpm of pinion speed



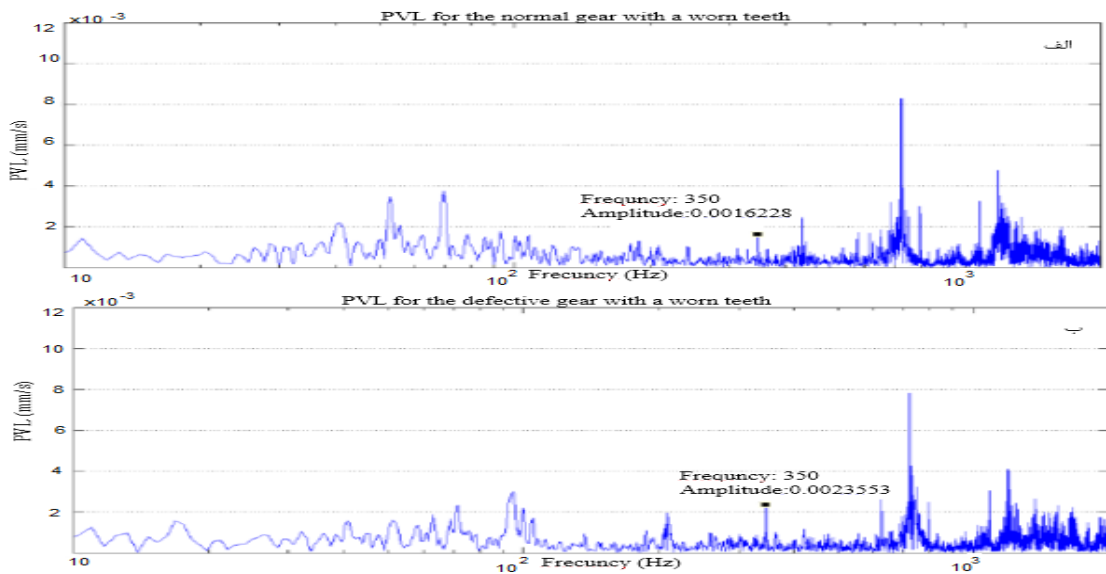
شکل ۱۱- نمایش و مقایسه طیف فرکانسی سطح سرعت ذره به دست آمده از چرخ‌دنده، الف- قبل از اعمال عیب سائیدگی و ب- بعد از اعمال عیب سائیدگی یک دندانه در سرعت ۱۰۵۰ دور بر دقیقه پینیون

Fig.11. Preview and compare the frequency spectrum of the particle speed from the gears, (a) before applying fault (b) after the fault abrasion wear a dent in the rate of 1050 rpm of pinion speed



شکل ۱۲- نمایش و مقایسه طیف فرکانسی سطح سرعت ذره به‌دست آمده از چرخ‌دنده، الف- قبل از اعمال عیب سائیدگی یک دندانه و شکست در دندانه دیگر و ب- بعد از اعمال عیب سائیدگی یک دندانه و شکست در دندانه دیگر در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه پینیون

**Fig.12.** Preview and compare the frequency spectrum of the particle speed obtained from gears (a) before imposing a tooth wear defect and the fracture of another tooth and (b) after imposing a tooth wear defect and the fracture of another tooth in 1500 rpm of pinion speed



شکل ۱۳- نمایش و مقایسه طیف فرکانسی سطح سرعت ذره به‌دست آمده از چرخ‌دنده، الف- قبل از اعمال عیب سائیدگی یک دندانه و شکست در دندانه دیگر و ب- بعد از اعمال عیب سائیدگی یک دندانه و شکست در دندانه دیگر در سرعت ۱۰۵۰ دور بر دقیقه پینیون

**Fig.13.** Preview and compare of the particle speed of the frequency spectrum obtained from gears (a) before imposing a tooth wear defect and the fracture of another tooth and (b) after imposing a tooth wear defect and the fracture of another tooth in 1050 rpm of pinion speed

معیوب مشاهده گردید که اثر اعمال عیب با توجه به نوع عیب به صورت افزایش دامنه فرکانس درگیری و هارمونیک‌های آن یا ایجاد باندهای جانبی در اطراف فرکانس درگیری چرخ‌دنده قابل رؤیت می‌باشد. همچنین نتایج نشان‌دهنده کاهش دقت تشخیص عیب با توجه به کاهش سرعت پینیون بودند. در روند تشخیص عیب مشاهده گردید که بعد از تلفیق عیوب بر روی یک چرخ‌دنده دقت تشخیص عیب کاهش پیدا می‌کند و رفتار سیگنال به دست آمده کاملاً شبیه به زمانی که هر عیب به صورت منفرد وجود داشت نمی‌باشد. بررسی طیف فرکانسی تراز سرعت ذره در مورد سیگنال صوتی حاصل از چرخ‌دنده، بیانگر توانمندی این روش در مقابل تراز سطح فشار جهت پایش وضعیت جعبه‌دنده با دقت بالاتر و در زمان حداقل می‌باشد. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش می‌توان پایش وضعیت جعبه‌دنده‌ها را با استفاده از تراز سرعت ذره با دقت بالایی انجام داد.

از مقایسه داده‌های به دست آمده در شرایط سالم و معیوب و نیز مقایسه طیف فرکانسی سیگنال‌های حاصله از آن‌ها، در صورت وجود عیب در چرخ‌دنده‌ها، تغییراتی در طیف فرکانسی قابل مشاهده و تشخیص است. این تغییرات به صورت افزایش قله (در مورد عیب شکستگی) و ایجاد باندهای جانبی (در مورد عیب سائیدگی) قابل تشخیص می‌باشد (Heydar-Beygi *et al.*, 2007).

## نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر از سیگنال‌های اکتسابی از امواج صدای تولید شده از جعبه‌دنده ساخته شده به منظور بررسی و تشخیص عیب استفاده گردید. سیگنال ضبط شده در حوزه زمان و فرکانس پردازش شده و سپس ویژگی‌های استخراج شده از سیگنال در حوزه فرکانس جهت تشخیص عیوب مورد تحلیل قرار گرفت. با مقایسه سیگنال‌های صوتی پردازش شده از چرخ‌دنده‌های جعبه‌دنده در شرایط سالم و

## References

- Ahmadi, H., and K. Mollazade. 2008. A practical approach to electromotor fault diagnosis of Imam Khomeini silo by vibration condition monitoring. *African Journal of Agricultural Research* 4: 383-388.
- Amarnath, M., V. Sugumaran, and H. Kumar. 2013. Exploiting sound signals for fault diagnosis of bearings using decision tree. *Measurement* 46: 1250-1256.
- Bartelmus, W., and R. Zimroz. 2008. Belt conveyor driving system vibro-acoustic severity reduction by condition based maintenance. *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały* 123: 5-16.
- Dayani, A. 2013. *Signals and Systems*. Nas. Publishers, Tehran.
- Ebrahimi, E., P. Javadikia, N. Astan, M. Heydari, M. Bavandpour, M. H. Jalili, and A. Zarei. 2013. Developing an intelligent fault diagnosis of MF285 tractor gearbox using genetic algorithm and vibration signals. *Journal of Modern Mechanical Engineering* 3: 152-160.
- Ghasemzadeh, H. 2000. *Mechanical design components of the machine*. Tabriz University Press. Tabriz.
- Gol-Mohammadi, R. 2010. *Sound and vibration engineering*. Student publishers. Hamadan.
- Hasan Beygi, S. R., B. Ghobadian, and N. Kamalian. 2004. Prediction model of a power tiller noise Level at rural dirt road. *Journal of Agriculture Science* 10: 47-58.
- Heydar-beigi, K., H. Ahmadi, S. A. Tabatabai-Far, and O. Mahmud. 2007. Massey Ferguson tractor gearbox vibration condition monitoring. Second technical conference condition monitoring and troubleshooting machines. Sharif University of Technology, Iran.
- Homai, H., and K. Safarai. 2014. Sound feasibility analysis for troubleshooting a helical gear box with sliding bearings. Fourth International Conference on Acoustics and Vibration. Tehran, Iran.
- Jiang, J., F. Gu, R. Gennish, D. Moore, G. Harris, and A. Ball. 2008. Monitoring of diesel engine combustions based on the acoustic source characterisation of the exhaust system. *Mechanical Systems and Signal Processing* 22: 1465-1480.
- Kanthababu, M., M. Shunmugam, and M. Singaperumal. 2008. Tool condition monitoring in honing process using acoustic emission signals. *International Journal of Automation and Control* 2: 99-112.
- Mazrui-Sabdani, M. 2009. EMD new method for troubleshooting gearboxes. 4<sup>th</sup> Technical Conference condition monitoring and troubleshooting machines. Sharif University of Technology, Iran.
- Mutabi, H. 2003. *Design component of the machine*. Ashina. Tabriz.

15. Ravindra, H., Y. Srinivasa, and R. Krishnamurthy. 1997. Acoustic emission for tool condition monitoring in metal cutting. *Wear* 212: 78-84.
16. Wu, J. D., C. K. Huang, Y. W. Chang, and Y. J. Shiao. 2010. Fault diagnosis for internal combustion engines using intake manifold pressure and artificial neural network. *Expert Systems with Applications* 37: 949-958.
17. Wu, J. D., and C. H. Liu. 2008. Investigation of engine fault diagnosis using discrete wavelet transform and neural network. *Expert Systems with Applications* 35: 1200-1213.
18. Zhan, Y., and C. K. Mechefske. 2007. Robust detection of gearbox deterioration using compromised autoregressive modeling and Kolmogorov–Smirnov test statistic-Part I: Compromised autoregressive modeling with the aid of hypothesis tests and simulation analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21: 1953-1982.

## Design, development and test of the gearbox condition monitoring system using sound signal processing

M. Zamani<sup>1</sup>- M. Aboonajmi<sup>2\*</sup>- S. R. Hassan-Beygi<sup>3</sup>

Received: 24-06-2014

Accepted: 05-09-2015

### Introduction

One of the ways used for minimizing the cost of maintenance and repairs of rotating industrial equipment is condition monitoring using acoustic analysis. One of the most important problems which always have been under consideration in industrial equipment application is confidence possibility. Each dynamic, electrical, hydraulic or thermal system has certain characteristics which show the normal condition of the machine during function. Any changes of the characteristics can be a signal of a problem in the machine. The aim of condition monitoring is system condition determination using measurements of the signals of characteristics and using this information for system impairment prognostication. There are a lot of ways for condition monitoring of different systems, but sound analysis is accepted and used extensively as a method for condition investigation of rotating machines. The aim of this research is the design and construction of considered gearbox and using of obtaining data in frequency and time spectrum in order to analyze the sound and diagnosis.

### Materials and Methods

This research was conducted at the department of mechanical biosystem workshop at Aboureihan College at Tehran University in February 15<sup>th</sup> 2015. In this research, in order to investigate the trend of diagnosis and gearbox condition, a system was designed and then constructed. The sound of correct and damaged gearbox was investigated by audiometer and stored in computer for data analysis. Sound measurement was done in three pinions speed of 749, 1050 and 1496 rpm and for correct gearboxes, damage of the fracture of a tooth and a tooth wear.

**Gearbox design and construction:** In order to conduct the research, a gearbox with simple gearwheels was designed according to current needs. Then mentioned gearbox and its accessories were modeled in CATIA V5-R20 software and then the system was constructed.

Gearbox is a machine that is used for mechanical power transition from a productive source of power to a consumer, for torque meeting and for rotating speed needed for the consumer. In fact, gearbox is an interfere between power source and power consumer which produces a flexible communication between power source and power consumer. Needing to a gearbox as a machine which can generate harmony as an interface is unavoidable due to lack of harmony of torque and rotating speed of production source of power. So necessary calculations in order to attain to technical characteristics of gearwheels, bearings, shaft dimensions and other accessories of gearbox were done. This gearbox is from kinds of simple gearwheel which its input and output shaft are parallel to each other.

Main accessories of gearbox are: 1.crust 2.shaft 3.gearwheel 4.thorn 5.bearing 6.cover. All of the design parameters were calculated and considered in designing of all of the accessories of gearbox.

**Electromotor rotating calibration:** For this aim, a light-contact telemeter in model of Lutron was used as contact.

**Acoustic module of electro motor:** A module was constructed in order to prevent from sound waves interaction resulting from an electromotor function with waves of gearbox function. Three layers of sound absorbent including common felt with 1mm width, polyethylene foam with 15 mm width and shoulder foam egg with 35 mm width were used for the module insulation. Material used for the body of this module was MDF. Based on field measurement, level of electromotor sound decrement using the acoustic module was 20dB. Investigated malfunctions in this research are relevant to gearwheel with one tooth fracture, one worn tooth and one tooth fracture and other worn tooth.

1- M.Sc graduated student, Agro-technology Dept, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Associate professor, Agro-technology Dept, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Associate professor, Agro-technology Dept, College of Abouraihan, University of Tehran, Tehran, Iran

(\*- Corresponding Author Email: abonajmi@ut.ac.ir)

Collection and storage of acoustic data: In this research, an audiometer in model of HT-157 made in Italy in order to obtain acoustic data and a laptop with a model of Lenovo-G550 for data storage and processing was used. Cool Edit Pro 2.0 software was used for data processing. Data storage was in PCM format and MATLAB R2014a software used for data processing.

**Data processing:** Signal processing method in the frequency domain is used in order to reveal the defects.

**Fast Fourier Transform:** Fast Fourier Transform FFT for application in electronic equipment specially analyzers have great importance. In this condition, sampling number is chosen exponentially as  $2N$  which decreases the calculation volume significantly.

**Determination of defect kind of gearwheel using frequency spectrum analysis:** In mentioned gearwheel, errors were generated synthetically. Defect kind of these errors was generated in separate gearwheels in order to investigate the defects more precisely and a gearwheel was considered as control gearwheel. Despite of this, the sound of all of the gearwheels in correct condition was stored.

## Results and Discussion

Comparison of processed acoustic signals from gearwheels of gearbox in two correct and incorrect conditions was indicative of gearwheel involvement, frequency, their harmony and the changes resulted from defects. Gearwheel defect detection tests showed that at the speeds of 1496, 1050 and 749 rpm, investigated defects are recognizable with a comparison of the frequency spectrum of obtained signals in correct and incorrect conditions and according to the involvement frequency of gearwheel, its harmony and sided spectrum. Results of the frequency spectrum of signal analysis in speed of 1496 rpm pinion showed the defect of one tooth fracture in involvement frequency of gearwheels by 489, 350 and 249 Hz respectively which became apparent with a mentioned frequency domain increment. A worn tooth defect in a gearwheel was completely determinable as sided bands with equal distance around gearwheel involvement frequency in the signal frequency determination of the speeds of 1496 and 105 rpm pinion, but became a bit harder in less speeds. Investigation of frequency spectrum of acoustic signal resulted from gearwheel, is indicative of the ability of this method in gearbox condition investigation with high precision and minimum time. So the gearbox condition investigation is reached by investigation of the frequency spectrum of acoustic signal resulted from gearwheel.

## Conclusions

In current research, acquisitive signals resulted from produced sound waves of constructed gearwheel were used for investigation and diagnosis. Recorded signal in time domain and processed frequency and exploited characteristics of signal in frequency domain for diagnosis were analyzed. Obtained results of this research can be summarized as follow:

1. Precision level in the diagnosis decreased by increasing in pinion speed.
2. There will be a decrement in gearwheel diagnosis after defects integration and signal behavior won't be completely similar to the defect as individual.
3. Proper placement of audiometer is effective in diagnosis trend.
4. In frequency spectrum of obtained signals, particle velocity level is more efficient in diagnosis than the sound pressure level.

**Keywords:** Condition monitoring, Frequency domain, Gearbox, Sound signal processing