

# آشکار سازی عیب سایش دنده در جعبه‌دنده ۹۰ درجه بالگرد

## به کمک تبدیل موجک گسسته

میرسعید صفی‌زاده  
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
safizadeh@iust.ac.ir

هادی سعیدی  
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
h\_saeidi@mecheng.iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۶/۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۰

### چکیده

امروزه استفاده از سیستم‌های دوار در صنایع هوایی، نیروگاهی و خودرو و جز این‌ها مرسوم و متداول شده است. از جمله مشکلات اساسی در سیستم‌های هوایی، مسئله شکست قطعات به‌ویژه شکست در سیستم‌های انتقال قدرت است که عمدتاً ناشی از خستگی در اثر سایش بیش از حد مواد و تشکیل ترک‌های اولیه می‌باشد؛ ترک‌هایی که در نهایت منجر به آسیب و ازکار افتادگی کل سیستم می‌شوند. بالگرد از جمله سیستم‌های هوایی پیچیده است؛ سیستمی که ارتعاشات قطعات دوار آن اهمیت زیادی دارد. در این مقاله سیستم انتقال قدرت جعبه‌دنده ۹۰ درجه بالگرد یا به عبارتی دم بالگرد بررسی شده است. برای این منظور پنج حسگر شتاب‌سنج سه‌جهته در نقاط حساس به عیب روی سیستم شبیه‌سازی شده دم بالگرد نصب شده است. عیب شبیه‌سازی شده بر روی سیستم مورد نظر، عیب سایش روی دنده پینیون ورودی است که طی سه مرحله ایجاد شده است. سیگنال‌های ارتعاشی جمع‌آوری شده، توسط تبدیل موجک گسسته تحلیل شده و با محاسبه انرژی و برخی دیگر از شاخصه‌های آماری در زیرباندهای مورد نظر، روند حساسیت این شاخصه‌ها نسبت به عیوب در زیرباندهای گوناگون محاسبه و رسم شده است. در پایان مشخص شد که سیگنال‌های ارتعاشی حسگر نصب‌شده روی پینیون ورودی در جهت‌های شعاعی و نرمال در زیرباندهای مورد نظر نسبت به این نوع عیب حساسیت بیشتری دارد.

**واژگان کلیدی:** پایش وضعیت جعبه‌دنده، سایش دنده، جعبه‌دنده ۹۰ درجه بالگرد، تبدیل موجک گسسته

### ۱. مقدمه

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار از قبیل محورهای گرداننده، چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها از طریق تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی انجام شده است. در حال حاضر سیستم انتقال قدرت بالگرد از مباحث اصلی در ایمنی پرواز و تعمیرات محسوب می‌شود. بنابراین آمارهای به‌موجود آمده، بیش از ۳۰ درصد از هزینه‌های

در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه عیب‌یابی ماشین‌آلات دوار از قبیل محورهای گرداننده، چرخ‌دنده‌ها و یاتاقان‌ها از طریق تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی انجام

تعمیر و ۲۲ درصد از سوانح منجر به سقوط بالگرد، مربوط به سیستم انتقال قدرت آن است [۱]. به‌طور کلی، جعبه‌دنده‌ها از سه جزء اصلی تشکیل می‌شوند: چرخ‌دنده، یاتاقان‌ها و محور. جالب است بدانیم که حدود ۶۰ درصد از عیب‌های آنها در چرخ‌دنده‌ها اتفاق می‌افتد [۲]. عیب‌های متداول در جعبه‌دنده‌ها را نیز می‌توان به دو دسته عیب‌های گسترده، نظیر سایش و کندگی، و عیب‌های موضعی، نظیر ترک، تقسیم‌بندی کرد [۳].

در سال ۲۰۰۸ م، بایومی و همکاران در دو مقاله جداگانه به بررسی پایش وضعیت در سیستم‌های هوایی، از جمله بالگردها، به‌عنوان رهیافت اصلی در تغییر راهبرد نگهداری براساس زمان و واکنش سیستم<sup>۱</sup> به نگهداری براساس پیش‌بینی<sup>۲</sup> پرداختند [۴]. از روش‌های متنوع پردازش سیگنال، بسته به حوزه تحلیل آنها، مانند حوزه فرکانس، حوزه زمان و حوزه زمان - فرکانس برای مقایسه بهتر سیگنال‌های ارتعاشی و تشخیص الگو<sup>۳</sup> استفاده می‌شود. از جمله روش‌های زمان - فرکانس، روش تبدیل موجک است که به‌عنوان رایج‌ترین روش عیب‌یابی مورد استفاده در حوزه زمان - فرکانس به‌شمار می‌رود. در سال ۱۹۹۳، وانگ و مک‌فادن کاربردهای تبدیل موجک در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی چرخ‌دنده را بررسی کردند و نشان دادند که این تبدیل قابلیت تشخیص عیب در مراحل اولیه، همچنین قابلیت تشخیص انواع عیب را دارد [۵ - ۶]. در سال‌های ۱۹۹۴ و ۱۹۹۹ نیولند مقاله‌های متعددی چاپ کرد و در آنها تبدیل موجک را با گستردگی و جزئیات بیشتر جهت تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی بررسی نمود و نظریه اساسی، روش‌ها و مثال‌هایی کاربردی درباره استفاده از موجک در تحلیل سیگنال ارتعاشی ارائه نمود [۷ - ۹].

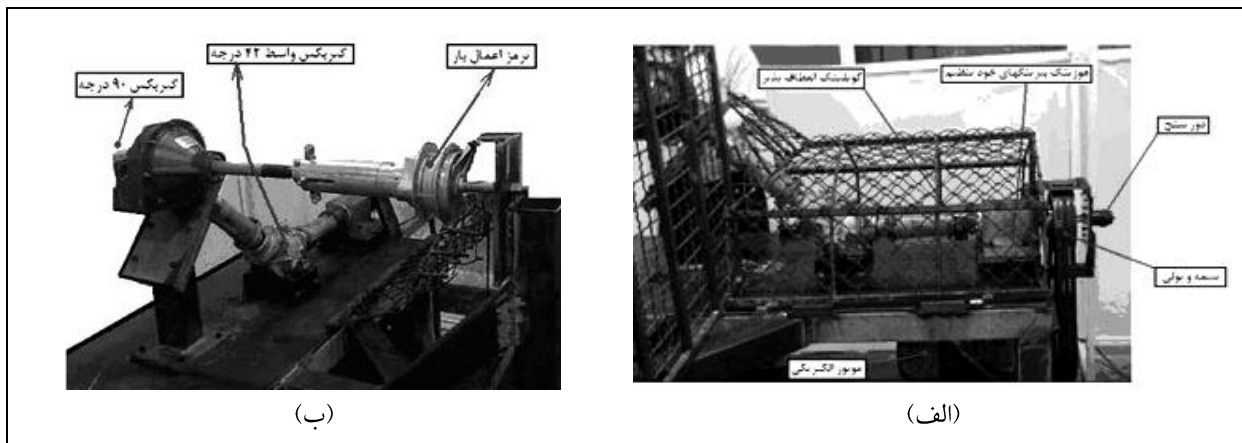
در سال ۱۹۹۷ م، بولابال و همکاران تبدیل موجک را برای تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی سیستم چرخ‌دنده دارای خستگی سطحی<sup>۴</sup> بررسی کردند [۱۰]. لیو و لینگ نیز از ضرایب تبدیل بسته موجک به‌عنوان ویژگی جهت عیب‌یابی بلبرینگ‌ها استفاده نمودند و نشان دادند که این

ضرایب به رخداد عیوب حساسیت بالایی دارند [۱۱]. در سال ۲۰۰۹ م، ساراوانان<sup>۵</sup> و همکاران با کمک تبدیل موجک گسسته، به بررسی و تشخیص عیب سایش در چرخ‌دنده مخروطی پرداختند [۱۲].

مقالات منتشرشده در این زمینه کارایی بالای تحلیل موجک را در شناسایی عیب‌ها تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که این روش بر بسیاری از روش‌های دیگر برتری دارد. در این مقاله روش تحلیل موجک، نه‌تنها برای شناسایی بلکه برای تخمین عیب سایش دنده روی پینیون ورودی از یک جعبه‌دنده واقعی دم بالگرد مطالعه می‌شود.

## ۲. مجموعه آزمایشگاهی

به‌منظور شبیه‌سازی سیستم پایش وضعیت جعبه‌دنده ۹۰ درجه دم بالگرد، یک مجموعه آزمایشگاهی با شرایط واقعی طراحی و ساخته شد. جعبه‌دنده انتخاب‌شده شامل یک جفت چرخ‌دنده مخروطی ماریچ است که هر یک از محورهای ورودی و خروجی آن توسط دو بیرینگ ساچمه‌ای و یک رولربیرینگ نگه داشته شده است. این جعبه‌دنده در قسمت دم بالگرد قرار دارد و نقش آن انتقال قدرت به پره‌های روتور دم بالگرد است. دور ورودی جعبه‌دنده در حالت مداوم ۴۳۰۰ دور در دقیقه است و نسبت‌کاهندگی ۲/۵۹ دور خروجی به ۱۶۶۰ دور در دقیقه کاهش پیدا می‌کند. در این مجموعه آزمایشگاهی سعی شده است که تمامی قطعات مطابق با شرایط واقعی نصب و آزمایش شود. توان مورد نیاز سیستم ارتعاشی توسط یک موتور سه‌فاز با قدرت ۱۴ اسب بخار و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور در دقیقه تأمین می‌شود. این توان توسط محورهای انتقال قدرت همانند بالگرد به جعبه‌دنده واسط منتقل شده و توسط جعبه‌دنده واسط، که نسبت یک‌به‌یک دارد، تغییر مسیر ۴۲ درجه‌ای داده و توسط محور انتقال قدرت وارد جعبه‌دنده ۹۰ درجه می‌شود. در شکل ۱ نمای شماتیک از سیستم آزمایشی و نمونه آزمایشگاهی ساخته‌شده نمایش داده شده است.



شکل ۱. نمایش شماتیک از الف) سیستم ارتعاشی جعبه‌دنده ۹۰ درجه، ب) مجموعه آزمایشگاهی

عیب سایش دنده روی سیگنال‌های ارتعاشی بررسی شود. برای دریافت سیگنال از یک سیستم داده‌برداری استفاده شده است که شامل مواردی چون شتاب‌سنج‌های سه‌جهته (برای دریافت سیگنال آنالوگ)، دستگاه تحلیلگر (برای تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال)، کامپیوتر و نهایتاً دورسنج (برای اندازه‌گیری دور موتور) می‌باشد.

### ۳. انجام آزمایش

سیگنال‌های اندازه‌گیری شده در چهار گروه با توجه به شدت عیب، مطابق جدول ۱، دسته‌بندی شده‌اند. هر گروه در دو حالت بدون اعمال بار و با اعمال بار و همچنین برای دو سرعت ۲۲۵۰ و ۴۵۰۰ دور بر دقیقه اندازه‌گیری شده است، که در مجموع ۱۶ آزمایش برای جمع‌آوری داده‌ها انجام شده است. هر گروه شامل پنج عدد شتاب‌سنج سه‌جهته می‌باشد، که در مجموع شامل ۴۸ سیگنال برای هر حسگر در چهار گروه خواهد بود. در مجموع سیگنال‌های جمع‌آوری شده برابر با ۲۴۰ سیگنال است.

### ۴. پردازش سیگنال‌ها

برای تمامی سیگنال‌ها، توابع دابوچی<sup>۶</sup> مختلف محاسبه و در نهایت تابع موجک دابوچی دوازده<sup>۷</sup> انتخاب شد. علت اصلی انتخاب این تابع موجک، حساسیت آن نسبت به مقدار افزایش عیب در دنده پینیون ورودی می‌باشد، به طوری که

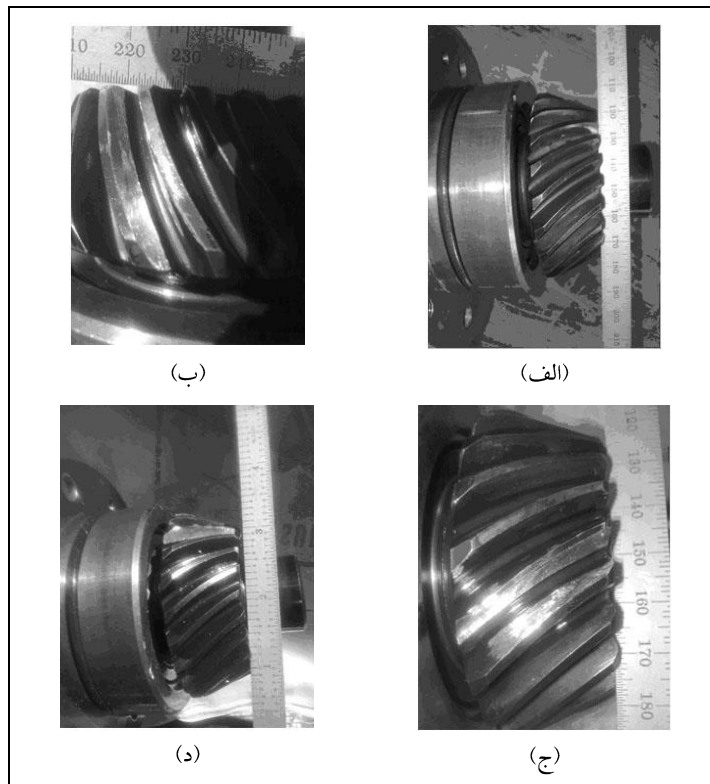
این سیستم از اجزایی به قرار زیر تشکیل شده است:

۱. الکتروموتوری با قدرت ۱۴ اسب بخار و سرعت دورانی ۱۵۰۰ دور بر دقیقه
۲. تسمه و پولی با افزایش سرعت ۳:۱ و ۳:۲
۳. تابلو کنترل برق
۴. سازه سیستم
۵. دو بیرینگ و هوزینگ جهت ایجاد تکیه‌گاه و کاهش سطح ارتعاشات
۶. ترمز جهت بارگذاری بر جعبه‌دنده
۷. محور گرداننده انتقال قدرت
۸. کولینگ انعطاف‌پذیر
۹. جعبه‌دنده ۴۲ درجه واسط
۱۰. جعبه‌دنده ۹۰ درجه
۱۱. نگاه‌دارنده آویز جهت اتصال محور و جعبه‌دنده
۱۲. دورسنج

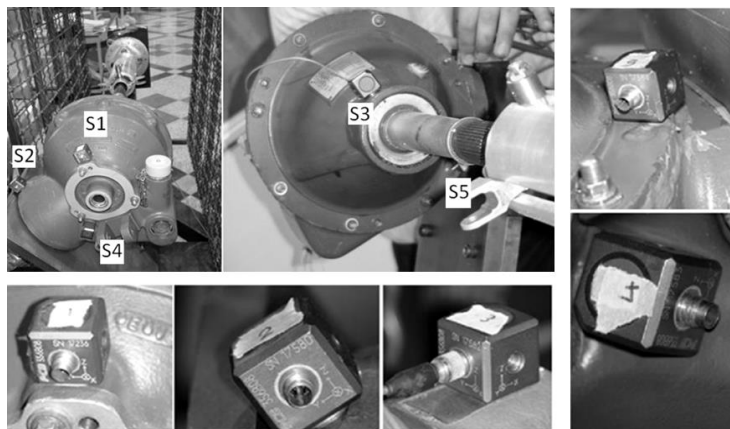
قبل از انجام آزمایش، مواردی چون تنظیم تسمه و پولی و بالانس محور گرداننده روی مجموعه آزمایشگاهی انجام شد. در نهایت عیب سایش بر روی چرخ‌دنده پینیون ورودی در چهار مرحله (سالم، عیب سایش ۲۰ درصد، ۴۰ درصد و ۶۰ درصد) مطابق شکل ۲ شبیه‌سازی شد. سیگنال‌های ارتعاشی حاصل از پنج حسگر شتاب‌سنج سه‌جهته نصب‌شده روی نقاط اصلی جعبه‌دنده مطابق شکل ۳، برای دو حالت بدون اعمال بار و با اعمال بار، جمع‌آوری شده است تا تأثیر

با افزایش مقدار سایش، هر دو مقدار پارامتر انرژی و همچنین فاکتور کشیدگی کورتیزس<sup>۸</sup> (ممان چهارم آماری) افزایش پیدا می‌کنند که به دلیل افزایش مقادیر اوج سیگنال و همچنین افزایش نوارهای جانبی اطراف هارمونیک‌های سیگنال می‌باشد. پارامترهایی که از سیگنال شتاب‌سنج‌های شماره ۱ و ۴ و ۵ استخراج شده است نسبت به عیب از روند

مشخصی پیروی نمی‌کنند و نسبت به سیگنال شتاب‌سنج‌های شماره ۲ و ۳ از حساسیت کمتری نسبت به عیب برخوردار هستند و شتاب‌سنج‌های شماره‌های ۲ و ۳ نتایج بهتری دارند. از این‌رو سیگنال شتاب‌سنج‌های شماره ۱ و ۴ و ۵ به‌خاطر خطای زیاد از چرخه تحلیل حذف شدند.



شکل ۲. نمایشی از الف) چرخ‌دنده سالم، ب) چرخ‌دنده‌ای با دندان‌ه معیوب، سایش ۲۰ درصد، ج) چرخ‌دنده‌ای با دندان‌ه معیوب، سایش ۴۰ درصد، د) چرخ‌دنده‌ای با دندان‌ه معیوب، سایش ۶۰ درصد



شکل ۳. محل نصب شتاب‌سنج‌ها

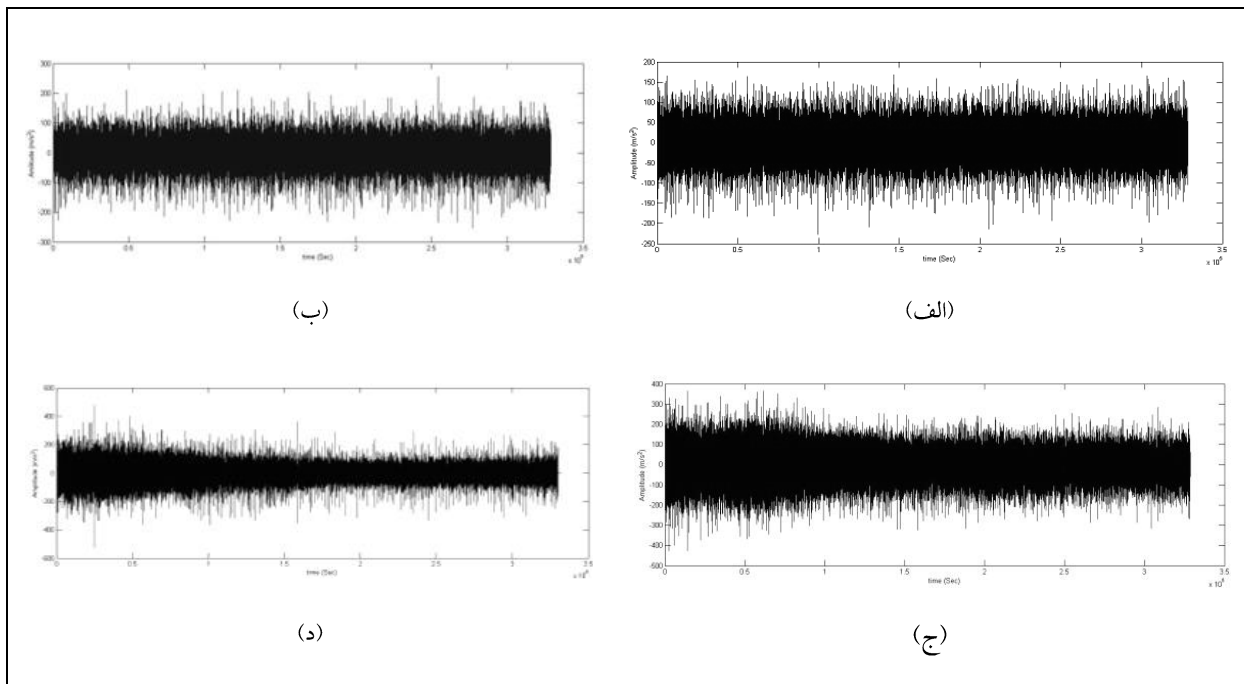
#### ۴-۱. نمودارهای حوزه زمان

شکل ۴ بیانگر نمونه سیگنال‌های ارتعاشی پنج ثانیه‌ای در حوزه زمانی است که در سرعت ۲۲۵۰ برای شتابسنج شماره ۲ در راستای Z رسم شده است.

#### ۴-۲. تحلیل موجک<sup>۹</sup>

تحلیل موجک، تحلیلی در حوزه زمان - فرکانس است و برای مطالعه انواع موج به کار می‌رود. در این تحلیل، در هر مرحله با استفاده از دو صافی بالاگذر و پایین‌گذر، سیگنال به دو قسمت جزئیات سیگنال<sup>۱۰</sup> و سیگنال تقریبی<sup>۱۱</sup> تجزیه می‌شود. این عمل به کمک نرم‌افزار متلب<sup>۱۲</sup> انجام خواهد شد. با توجه به اینکه هر عیب در محدوده خاصی از مراحل موجک آشکار می‌شود، استفاده از این روش می‌تواند برای تشخیص هوشمند نوع عیب موجود در جعبه‌دنده مناسب باشد. همچنین جداسازی جزئیات، تصمیم‌گیری هوشمند در مورد وجود یا عدم وجود عیب در جعبه‌دنده را ساده‌تر

می‌کند؛ زیرا در این روش داده‌های مربوط به هر مرحله جداگانه با یکدیگر مقایسه می‌شوند. تحلیل موجک در دو نوع گسسته و پیوسته انجام می‌شود. موجک پیوسته، طیفی از ضرایب را در تمامی مقیاس‌ها ارائه می‌دهد و به همین دلیل دقت بالایی نسبت به موجک گسسته دارد، اما در این مقاله جهت کاهش حجم داده‌ها و عملیات از موجک گسسته از نوع تابع موجک دابوچی مرتبه دوازده در شش سطح استفاده شده است. نحوه انتخاب تابع موجک براساس نوع مسئله متفاوت خواهد بود، به طوری که با آزمایش توابع موجک دابوچی مختلف و استخراج پارامتر انرژی و فاکتور کشیدگی در زیرباند فرکانسی سیگنال چرخ‌دنده و ترسیم اطلاعات، مشاهده گردید که در تابع موجک دابوچی مرتبه دوازده پارامتر انرژی و فاکتور کشیدگی از الگوی افزایشی بهتری پیروی می‌کنند. از همین رو در این آزمایش از تابع موجک دابوچی مرتبه دوازده جهت تبدیل موجک استفاده شده است.



شکل ۴. سیگنال‌های زمانی شماره ۲ در جهت شعاعی

الف) سیگنال سالم، جهت شعاعی، دور ۲۲۵۰ با اعمال بار، ب) سیگنال با ۲۰ درصد سایش، جهت شعاعی، دور ۲۲۵۰ با اعمال بار  
ج) سیگنال با ۴۰ درصد سایش، جهت شعاعی، دور ۲۲۵۰ با اعمال بار، د) سیگنال با ۶۰ درصد سایش، جهت شعاعی، دور ۲۲۵۰ با اعمال بار

### ۴-۳. تئوری تبدیل موجک گسسته<sup>۱۳</sup>

تبدیل موجک در حقیقت اندازه‌گیری شباهت بین سیگنال و توابع پایه (موجک‌ها) و به عبارتی میزان شباهت محتوای فرکانسی سیگنال با محتوای فرکانسی موجک در هر مقیاس یا زیرباند است [۱۳ - ۱۴]. در این صورت زیرباند یا مقیاس، انرژی بیشتری را در خود جذب خواهد کرد. تبدیل‌های موجک می‌توانند به کمک یک صافی پایین‌گذر  $g$  و یک فیلتر بالاگذر  $h$  بیان شوند. موجک عادی‌سازی شده و توابع پایه مقیاس  $\varphi_{i,l}(k)$  و  $\psi_{i,l}(k)$  می‌توانند به صورت روابط ۱ تعریف شوند:

$$\varphi_{i,l}(k) = 2^{\frac{i}{2}} g_i(k - 2^i l) \quad (1)$$

$$\psi_{i,l}(k) = 2^{\frac{i}{2}} g_i(k - 2^i l)$$

به طوری که در این روابط فاکتور  $2^{\frac{i}{2}}$  یک عادی‌ساز ضرب داخلی،  $l$  و  $i$  نیز به ترتیب پارامتر جابه‌جایی و مقیاس می‌باشند. تجزیه DWT<sup>۱۴</sup> می‌تواند به صورت روابط ۲ تعریف شوند:

$$a_{i,l}(k) = (k)^* \varphi_{i,l}(k) \quad (2)$$

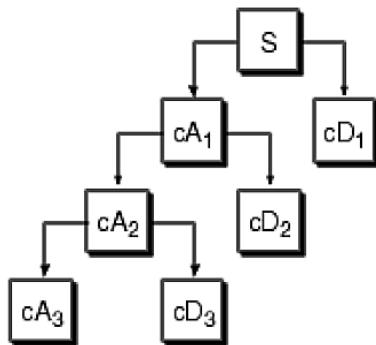
$$d_{i,l}(k) = (k)^* \psi_{i,l}(k)$$

به طوری که در این روابط  $a_{i,l}(k)$  و  $d_{i,l}(k)$  به ترتیب ضرایب تقریبی و جزئی در رزولوشن  $i$  می‌باشند. در شکل ۵ نمونه‌ای از تجزیه DWT در سه سطح نمایش داده شده است.

### ۴-۴. تعیین عیب‌های سیستم چرخ‌دنده به کمک DWT

در این قسمت قابلیت روش DWT در تشخیص عیب با داده‌های آزمایشگاهی را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری ۶۵ کیلوهرتز و فرکانس دور ۳۷/۵ هرتز برای سرعت ۲۲۵۰ دور بر دقیقه و ۷۵ هرتز برای سرعت ۴۵۰۰ دور بر دقیقه و با توجه به تعداد دندانه پینیون ورودی، که برابر با ۲۲ دنده می‌باشد، فرکانس‌های درگیری<sup>۱۵</sup> عبارت‌اند از ۸۲۵ و ۱۶۵۰ هرتز که

در طیف سیگنال‌ها قابل مشاهده‌اند. با توجه به فرکانس نمونه‌برداری و درگیری دندانه‌ها از تحلیل موجک گسسته تا شش سطح استفاده کرده‌ایم، که محدوده فرکانسی هر سطح در جدول ۲ آورده شده است. همچنین یک نمونه از تجزیه سیگنال نیز در شکل ۶ مشاهده می‌شود.



شکل ۵. زیرباندهای فرکانسی DWT

پس از محاسبه ضرایب در زیرباندهای فرکانسی مختلف دو ویژگی از سیگنال استخراج کردیم که عبارت‌اند از:

الف) محاسبه مقدار انرژی در زیرباندهای مختلف

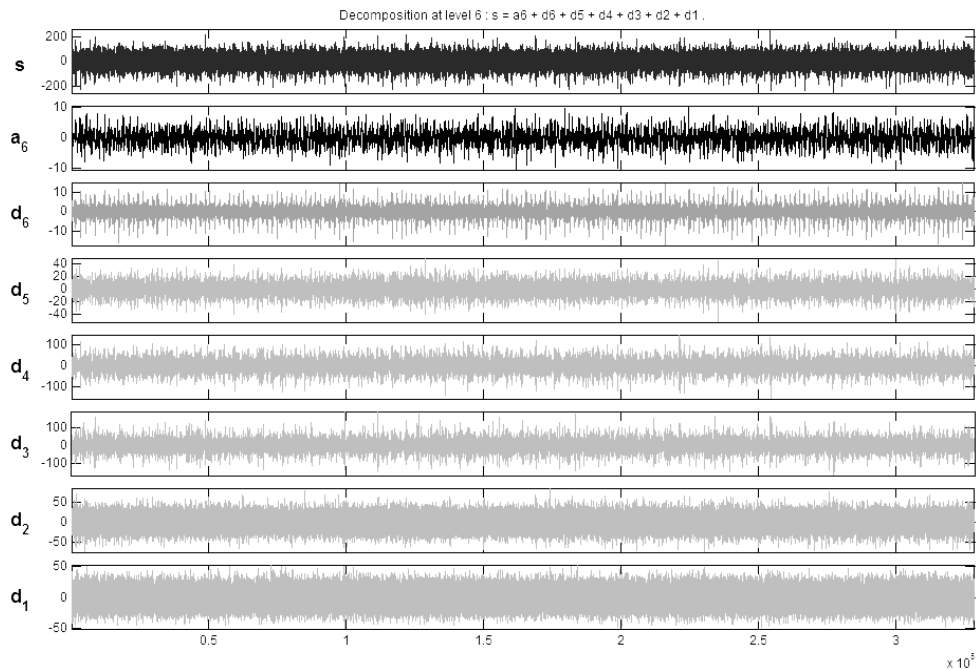
ب) محاسبه فاکتور کشیدگی

پس از محاسبه این پارامترها مشخص شد که در زیرباندهای چهارم و پنجم مقادیر انرژی و فاکتور کشیدگی به صورت افزایشی رشد می‌کنند که نشان‌دهنده رشد عیب در چرخ‌دنده است. علت افزایش مقدار پارامترهای انرژی و کشیدگی در زیرباندهای چهارم و پنجم وجود هارمونیک‌ها و باندهای جانبی اطراف آنهاست که با افزایش مقدار سایش، مقادیر آنها نیز افزایش می‌یابد. در جدول ۳ مقادیر عادی‌سازی شده<sup>۱۶</sup> پارامترهای فوق برای سرعت ۲۲۵۰ دور بر دقیقه و با اعمال بار بر سیستم آورده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش مقدار عیب سایش دنده، با توجه به افزایش دامنه اوج‌ها و انرژی کلی سیگنال مقادیر انرژی و کشیدگی افزایش پیدا می‌کنند.

در نهایت مقدار پارامترهای انرژی و کشیدگی برای سیگنال‌های به دست آمده از حسگر شماره ۲ در دو جهت

جدول ۴ آورده شد. در شکل ۷ یک نمونه از مقادیر پارامترهای کشیدگی و انرژی برای سرعت ۲۲۵۰ و با اعمال بار در حسگر شماره ۲ در جهت z (شعاعی) آورده شده است.

برای دو سرعت مختلف، با در نظر گرفتن بار و بدون در نظر گرفتن بار در گروه‌های مختلف (سالم، سایش ۲۰، ۴۰ و ۶۰ درصد)، محاسبه شد و صحت روند افزایشی پارامترها با افزایش عیب در هر حالت مورد بررسی قرار گرفت و در



شکل ۶. یک نمونه از تجزیه سیگنال در شش سطح، به کمک تحلیل موجک گسسته

جدول ۱. دسته‌بندی سیگنال‌های ارتعاشی

مقدار پیشرفت عیب سایش (درصد)	گروه
۰	۱
۲۰	۲
۴۰	۳
۶۰	۴

جدول ۲. محدوده فرکانسی سطوح برای سرعت ۲۲۵۰ دور بر دقیقه

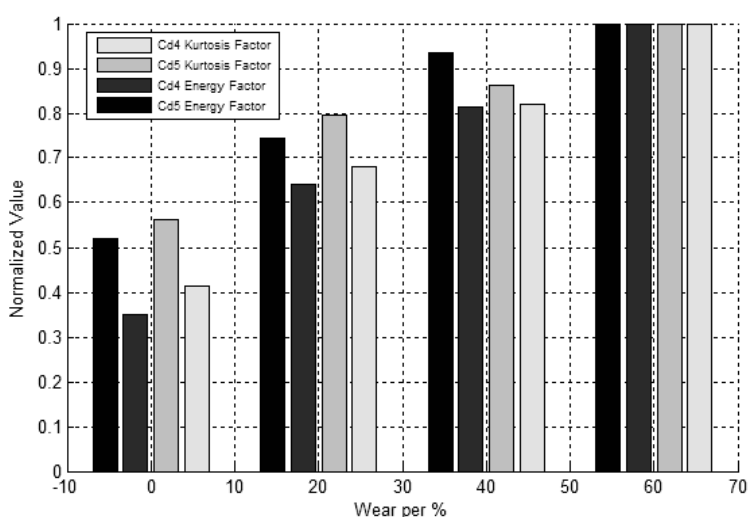
cd1	40f1~20f1
cd2	20f1~10f1
cd3	10f1~5f1
cd4	5f1~2.55f1
cd5	2.5f1~1.25f1
cd6	1.25f1~0.625f1
ca6	0f1~1f1

جدول ۳. پارامترهای محاسبه شده برای سیگنال شماره ۲ در دو جهت، برای دور ۲۲۵۰ و با اعمال بار

Energy		Kurtosis		پارامترهای آماری	جهت شعاعی (z) حسگر شماره ۲
cd5	cd4	cd5	cd4	زیرباند فرکانسی	
۰/۵۲۰۷۷۴۵۴۴	۰/۳۵۰۲۴۰۷۸۶	۰/۵۶۰۹۷۱۷۶۴	۰/۴۱۲۳۵۲۳۸۶	دنده سالم	
۰/۷۴۴۰۵۱۶۴۳	۰/۶۴۲۲۰۷۸۵۱	۰/۷۹۴۲۰۰۷۸۴	۰/۶۷۹۲۵۳۳۵۷	۲۰ درصد سایش	
۰/۹۳۴۱۳۹۹۳۲	۰/۸۱۳۸۵۵۰۸	۰/۸۶۰۹۹۲۹۴۸	۰/۸۲۰۶۱۶۱۷	۴۰ درصد سایش	
۱	۱	۱	۱	۶۰ درصد سایش	
۰/۳۷۵۰۳۵۸۹۱	۰/۴۴۳۸۶۱۱۵۲	۰/۴۲۰۸۹۲۴۶	۰/۳۱۹۵۱۴۴۷	دنده سالم	جهت نرمال (x) حسگر شماره ۲
۰/۴۶۸۲۷۷۹۵۷	۰/۸۴۴۰۷۸۵۶۸	۰/۶۸۴۲۴۹۰۳۱	۰/۵۹۷۸۱۵۷۸۶	۲۰ درصد سایش	
۰/۷۶۷۶۳۹۷۷۴	۰/۹۱۵۸۲۷۳۷۷	۰/۸۰۳۱۹۹۲۸۶	۰/۷۵۴۱۲۳۳۱۶	۴۰ درصد سایش	
۱	۱	۱	۱	۶۰ درصد سایش	

جدول ۴. بررسی درستی تغییرات پارامترهای انرژی و کشیدگی در رده های مختلف با مقدار افزایش عیب

انرژی	کشیدگی	اعمال بار	سرعت (دور بر دقیقه)	جهت حسگر شماره ۲ (نصب شده روی پینیون ورودی)
✓	✓	با اعمال بار	۲۲۵۰	شعاعی (z)
✓	x	با اعمال بار	۴۵۰۰	
✓	✓	بدون اعمال بار	۲۲۵۰	
✓	✓	بدون اعمال بار	۴۵۰۰	
✓	✓	با اعمال بار	۲۲۵۰	نرمال (x)
x	✓	با اعمال بار	۴۵۰۰	
✓	✓	بدون اعمال بار	۲۲۵۰	
x	✓	بدون اعمال بار	۴۵۰۰	



شکل ۷. مقادیر ضریب عادی سازی کشیدگی و انرژی



## ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت روش تحلیل موجک گسسته در تشخیص و تخمین عیب سایش دنده با اعمال آن روی داده‌های ارتعاشی به‌دست آمده از مجموعه آزمایشگاهی جعبه‌دنده ۹۰ درجه دم بالگرد مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به پیچیدگی بیش از حد سیستم انتقال قدرت دم بالگرد و درصد نویز بالا در سیگنال‌های جمع‌آوری شده، استفاده از پارامترهای آماری در حوزه زمان با خطای زیاد همراه خواهد بود. لذا این مشکل با استفاده از تبدیل موجک گسسته، که در آن سیگنال به مؤلفه‌هایی در زیرباندهای

فرکانسی متفاوت تجزیه می‌شود و با محاسبه پارامترهای انرژی و کشیدگی این زیرباندها، برطرف می‌گردد. مزیت عمده استفاده از روش مذکور این است که به‌هنگام تجزیه سیگنال، موقعیت زمانی پدیده‌های موجود در سیگنال حفظ می‌شود. این خاصیت از این حیث مهم است که می‌تواند محل عیب را در سیستم‌های مکانیکی مشخص کند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش بسیار امیدوارکننده است و با وجود پیچیده‌بودن سیستم آزمایش و شباهت بسیار آن به سیستم واقعی بالگرد، روش پیشنهادی تنها در حدود ۱۸ درصد خطا دارد.

## ۶. مأخذ

- [1] Bayoumi, A., et al. "Examination and Cost-Bene Analysis of the CBM Process", Technical Specialists Meeting On Condition Based Maintenance, Huntsville, AL 2008.
- [2] Bayoumi A., N. Goodman, R. Shah, L. Eisner, L. Grant and J. Keller. "Integration of Maintenance Management Systems and Health Monitoring Systems through Historical Data Investigation." *Technical Specialists' Meeting on Condition Based Maintenance*, Huntsville, 2008.
- [3] Bhaumik S. K., M. Sujata, M. S. Kumar, M. A. Venkataswamy and M. A. Parameswara. "Failure of an intermediate gearbox of a helicopter." *Engineering Failure Analysis*, (2007):85-100.
- [4] Bayoumi A., et al. "Aircraft Components Mapping and Testing For CBM." *Technical Specialists Meeting On Condition Based Maintenance*, Huntsville, AL: 2008.
- [5] Wang W.J., P.D. Mcfadden. "Application Of The Wavelet Transform To Gearbox Vibration Analysis." *American Society of Mechanical Engineers Petroleum Division*, (1993):13-20.
- [6] Wang W.J., P.D. Mcfadden. "Application of Wavelets to Gearbox Vibration Signals for Fault Detection." *Journal of Sound and Vibratin*, vol. 192, (1996):927-939.
- [7] Newland D.E. "Wavelet Analysis of Vibration-1, Theory." *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 116, (1994):409-416.
- [8] Newland D.E. "Wavelet Analysis of Vibration-2, Wavelet Maps." *Journal of Vibration and Acoustics*, vol.116, (1994):417-425.
- [9] Newland D.E. "Ridge and Phase Identification in the Frequency Analysis of Transient Signals by Harmonic Wavelets." *Journal of Vibration and Acoustics*, vol. 121, (1999):149-155.
- [10] Boulahbal, D., M.F. Golnaraghi and F. Ismail, DETC97/VIB- 4009, *Proceedings of DETC97, ASME Design Engineering Technical Conference*, 1997.
- [11] Liu & Ling. "Machinery Diagnostic Based On Wavelet Packets." *Journal of Vibration and Control*, vol. 3, (1993):517.

- [12] Saravanan, N., K.I. Ramachandran. "Fault diagnosis of spur bevel gear box using discrete wavelet features and Decision Tree classification." *Expert Systems with Applications*, vol. 36, (2009):9564–9573.
- [13] Qian SH., D. Chen. *Joint time-frequency analysis; methods and applications*, Prentice Hall PTR, 1996.
- [14] Subasi A. "EEG signal classification using wavelet feature extraction and a mixture of expert model." *Expert Systems with Applications*, vol. 32, (2007):1084-1093.

پی نوشت

- 
1. time- and reaction based maintenance
  2. predictive and proactive based maintenance
  3. pattern recognition
  4. pitting
  5. saravanan
  6. Daubechies
  7. db12
  8. Kurtosis
  9. wavelet analysis
  10. signal detail
  11. signal approximate
  12. MATLAB ®
  13. Discrete wavelet transform
  14. Discrete wavelet transform (DWT)
  15. Mesh frequency
  16. Normalized Value