

# توسعهٔ آنالیز سیگنالهای ارتعاشی برای عیب یابی سیستم های مکانیکی با استفاده از تبدیلات موجک با مراتب بالاتر

مهندس موسی رضائی  
دانشجوی دکتری

سیامک اسماعیل زاده خادم  
دانشیار

بخش مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

## چکیده

در این تحقیق امکان استفاده از تبدیلات موجک با مراتب بالاتر برای آنالیز سیگنالهای ارتعاشی به منظور استخراج پدیده های موضعی و گذرای مستتر در سیگنال های ارتعاشی بررسی شده است. چنین پدیده هایی می توانند در اثر وجود یک عیب کوچک در یک سیستم مکانیکی، از قبیل جعبه دنده، بوجود آیند. در این مقاله ناتوانی روش آنالیز طیفی (که بر اساس الگوریتم FFT عمل می کند) در شناسایی پدیده های اخیر نشان داده شده است، بنابراین روشی که توانایی ردیابی عیوب کوچک و موضعی اولیه را داشته باشد از اهمیت خاصی برخوردار است. کارهای انجام شده توسط محققان دیگر در این زمینه عمدتاً به استفاده از موجک های مراتب پایین از قبیل  $D_2$  تا  $D_8$  محدود می شود، بنابراین در این مقاله نشان داده شده است که گرچه بدست آوردن توابع موجک های مراتب بالاتر، همانند  $D_{18}$  و  $D_{20}$ ، دارای پیچیدگی خاصی است ولی این موجک ها دارای توانایی های بیشتری نسبت به موجک های مراتب پایین تر هستند. برای نشان دادن این امر، سیگنالهای متعددی با موجک های مراتب مختلف مورد تحلیل واقع شده و مقایسه ای بین نتایج حاصل صورت گرفته است. نتایج حاکی از توانایی بسیار زیاد موجک های مراتب بالاتر در ردیابی پدیده های موضعی یاد شده می باشد.

## کلمات کلیدی

عیب یابی، آنالیز ارتعاشی، آنالیز موجک

## Development of Vibration Signals Analysis in Detection of Mechanical Systems Faults Through the Application of Higher Order Wavelet Transforms

S. Esmaeilzadeh Khadem  
Associate Professor

M. Rezaee  
Ph.D. Student

Mechanical Engineering Department,  
Tarbiat Modarres University

## Abstract

*In this paper, the applicability of higher order wavelet transforms in detection of the local and transient phenomena hidden in vibration signals is investigated. Such phenomena may be caused by a small defect in a mechanical system, such as a gearbox. It is shown that the spectrum analysis, based on an FFT algorithm, is unable to detect such events. Therefore, a method for detection of initial and small defects gives certain advantages over other methods.*

*Although some researchers have investigated the fault detection problem using the wavelet transforms, their works are mainly restricted to the lower order wavelet transforms like  $D_2$  to  $D_8$ . Despite the complexity of obtaining the higher order basic wavelet functions such as  $D_{18}$  and  $D_{20}$ , in this investigation it is shown that the higher order wavelet transforms have more capabilities with respect to the lower ones. In fact, various signals have been analyzed using the different orders of wavelets, and the results have been compared. The results show the great ability of the higher order wavelets to detect the above mentioned local events.*

## Keywords

*Fault Detection, Vibration Signature Analysis, Wavelet Analysis*

تحقیقاتی نیز در زمینه آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی دریافت شده از سیستم‌های مکانیکی با استفاده از آنالیز موجک صورت گرفته است. در این تحقیقات عمدتاً از موجک‌های متعامد<sup>4</sup> با مرتبه پائین تر (حداکثر تا  $D_8$ ) استفاده شده است. Shimogo و Yan [۱۲] از تبدیل Haar برای مانیتورینگ وضعیت سیستم‌های مکانیکی استفاده کرده‌اند. تبدیل Haar را می‌توان نوع ساده‌ای از تبدیل موجک دانست که برای آنالیز سیگنال‌ها، از موجک‌های مستطیلی استفاده می‌کند. Mori و همکارانش [۱۳] تحقیقی در زمینه عیب‌یابی بلبرینگ‌ها با استفاده از اعمال تبدیل موجک گسسته (DWT)<sup>5</sup> به سیگنال‌های ارتعاشی، انجام داده‌اند. در این تحقیق از سیستم موجک‌های متعامد Daubechies با طول ۲ استفاده شده است. در مقاله دیگری Martin و Ziaei [۱۴] نیز از آنالیز موجک برای آنالیز ارتعاشات و عیب‌یابی بلبرینگ‌ها استفاده کرده‌اند. در این مقاله از موجک متعامد  $D_4$  استفاده شده است. در زمینه عیب‌یابی جعبه دنده‌ها با استفاده از آنالیز موجک می‌توان به مقاله ارائه شده توسط Lin و McFadden [۱۵] اشاره کرد. نویسندگان مقاله تبدیل موجک را برای شناسایی علائم اولیه خرابی در جعبه دنده‌ها، با استفاده از سیگنال‌های ارتعاشی چرخ دنده، بسیار مناسب می‌دانند. در این مقاله از تبدیل موجک  $D_8$  استفاده شده است. از آنجا که تحقیقات انجام شده در زمینه امکان استفاده از آنالیز موجک برای آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی به موجک‌های مراتب پائین تر (تا  $D_8$ ) محدود می‌شود و تحقیقی در زمینه امکان استفاده از موجک‌های مراتب بالاتر صورت نگرفته است و علاوه بر توجه به اینکه در تحقیقات انجام شده دلیلی برای انتخاب نوع موجک مورد استفاده ارائه نشده است و توانایی موجک‌های مراتب بالاتر در آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی پوشیده است لذا در این مقاله سعی شده است تا علی‌رغم پیچیدگی‌های موجود در آنالیز با موجک‌های مراتب بالاتر (تا  $D_{20}$ )، سیگنال‌های متعددی با استفاده از موجک‌های مراتب بالاتر مورد تحلیل قرار گیرد. برای آنکه نتیجه روشنی از تحلیل‌های اخیر بدست آید، نتایج بدست آمده از آنالیز با موجک‌های مراتب مختلف با هم مقایسه شده‌اند. در هر مورد از آنالیز سیگنال‌های نمونه، توانایی روش آنالیز طیفی با روش آنالیز موجک در مراتب مختلف نیز مقایسه شده است. نتایج حاکی از توانایی بسیار زیاد موجک‌های مراتب بالاتر در ردیابی پدیده‌های موضعی می‌باشد.

## ۱- تبدیل موجک

اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاشی یکی از مفیدترین روش‌ها برای مانیتورینگ<sup>2</sup> سیستم‌های مکانیکی و عیب‌یابی آنها می‌باشد که بوسیله آن می‌توان اطلاعات بسیار مفیدی را از نحوه عملکرد این سیستم‌ها بدست آورد. این روش‌ها در طول سالیان متمادی مورد استفاده واقع شده و با گذشت زمان تکامل یافته‌اند. با فراهم شدن امکان استفاده از کامپیوترها با سرعت بالا و معرفی الگوریتم FFT<sup>3</sup>، آنالیز طیفی به عنوان یکی از کارآمدترین روش‌های آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی دریافت شده از ماشین‌آلات مطرح شده و هنوز هم قدرتمندترین روش محسوب می‌شود و تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است. Bannister [۱]، Wong و Daadbin [۲] تحقیقی در زمینه روش‌های موجود برای مانیتورینگ رولبرینگ‌ها انجام داده‌اند که عمده این روش‌ها بر اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاشات استوار هستند و روش‌های آنالیز فرکانسی از جمله روش‌های مورد مطالعه در این مقالات هستند. McFadden [۳ و ۴] نیز از روش آنالیز ارتعاشی برای شناسایی عیوب موضعی در چرخ دنده‌ها و رولبرینگ‌ها استفاده کرده است. Gupta و Chauhan [۵] نشان داده‌اند که از آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی می‌توان به طور مؤثری برای تشخیص وضعیت روغنکاری چرخ دنده‌ها استفاده کرد. Lin و Su [۶]، Sheen, Su [۷] تحقیقاتی در زمینه عیب‌یابی رولبرینگ با استفاده از آنالیز ارتعاشی انجام داده‌اند. در این تحقیقات از روش آنالیز فرکانسی استفاده شده است. تحقیقات بسیار متنوع دیگری نیز در زمینه مانیتورینگ و عیب‌یابی سیستم‌های مکانیکی انجام شده است که عمدتاً مبتنی بر روش‌های آنالیز طیفی می‌باشند. با وجود این، روش آنالیز طیفی در مواردی دارای کارایی کافی نیست که در این مقاله چند مورد از عدم توانایی این روش نشان داده خواهد شد. بنابراین برای جبران عدم توانایی روش‌های متداول آنالیز ارتعاشی، محققان در حال بررسی امکان استفاده از آنالیز موجک در زمینه آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی هستند. روش نوظهور آنالیز موجک در فاصله کمتر از دو دهه، معرفی و توسعه یافته است. محققان متعددی در توسعه آنالیز موجک نقش داشته‌اند که از آن جمله می‌توان به Daubechies [۸] و Mallat [۹] اشاره کرد. به علت توانایی‌های بالقوه آنالیز موجک در آنالیز سیگنال‌های ناپایا، زمینه تحقیقاتی اخیر، محققان را به امکان کاربرد روش آنالیز موجک در آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی دریافت شده از سیستم‌های مکانیکی جلب کرده است و سابقه کاربرد این روش در زمینه ارتعاشات به کمتر از ده سال گذشته مربوط می‌شود که از آن جمله می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توسط Newland [۱۰، ۱۱] اشاره کرد.

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \varphi(2^j t - k) \quad (5)$$

در نتیجه هر تابع  $f(t)$  متعلق به فضای  $V_j$  را می توان با رابطه زیر نشان داد:

$$f(t) = \sum_k a_k \varphi(2^j t - k), \quad k \in Zt \quad (6)$$

درحالت کلی رابطه زیر را می توان در مورد فضاهای  $V_j$  بیان کرد [۲۰]:

$$\dots \subset V_{-2} \subset V_{-1} \subset V_0 \subset V_1 \subset V_2 \subset \dots \subset L^2 \quad (7)$$

با توجه به رابطه فوق، چون  $V_0 \subset V_1$  است لذا تابع مقیاس اصلی را می توان به صورت رابطه (۸) بیان کرد:

$$\varphi(t) = \sum_n h(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n), \quad n \in Z \quad (8)$$

رابطه اخیر یک معادله برگشتی<sup>۸</sup> می باشد.

برای آنکه آنالیز دقیق تری بر روی سیگنال  $f(t)$  صورت گیرد لازم است تابع  $f(t)$ ، هم بر حسب توابع مقیاس و هم بر حسب توابع موجک بیان شود. بنابراین فضای  $V_1$  را می توان بر حسب  $V_0$  و  $w_0$  نوشت:

$$V_1 = V_0 \oplus w_0 \quad (9)$$

که در رابطه اخیر  $w_0$ ، اختلاف فضای  $V_1$  و  $V_0$  می باشد و در حالت کلی، فضای  $L^2$  را می توان به صورت زیر به یک فضای ایجاد شده توسط توابع مقیاس ( $V_0$ ) و فضاهای موجک تجزیه کرد [۲۰]:

$$L^2 = V_0 \oplus w_0 \oplus w_1 \oplus \dots \quad (10)$$

با توجه به اینکه  $V_1 \subset w_0$  است لذا تابع موجک اصلی  $\psi(t)$  را که در فضای  $w_0$  واقع است می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\psi(t) = \sum_n h_1(n) \sqrt{2} \varphi(2t - n), \quad n \in Z \quad (11)$$

و می توان توابع موجک مقیاس شده و انتقال داده شده را که در فضاهای  $w_j$  قرار می گیرند به صورت زیر نوشت:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k) \quad (12)$$

درتبدیل موجک از شیوه کاملاً متفاوتی نسبت به تبدیل فوریه استفاده می شود. درتبدیل موجک به جای آنکه یک سیگنال به هارمونیک های خود تجزیه شود، سیگنال به توابع اصلی موضعی به نام موجک ها تجزیه می شود. هر موجک دارای انرژی محدود می باشد و در موقعیت متفاوتی نسبت به موجک های دیگر در روی محور زمان قرار می گیرد و در فاصله کافی از موقعیت مرکزی خود، مقدار آن به سمت صفر می گراید. موجک ها در مقیاس های بالا، بسیار کوتاه بوده و در مقیاس های پائین، بازه زمانی نسبتاً طولانی تری را تحت پوشش قرار می دهند. این ویژگی موجک ها، در آنالیز سیگنال های ارتعاشی دریافت شده از ماشین ها بسیار مناسب می باشد چرا که رفتارهای موضعی سیگنال را آشکار می سازد. رابطه انتگرالی تبدیل موجک تابع  $f(t)$  به صورت زیر است [۱۶ و ۱۷]:

$$(W_{\psi}f)(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (1)$$

اگر تابع موجک اصلی  $\psi(t)$ <sup>۶</sup> دارای نرم واحد باشد در آن صورت می توان ثابت کرد تابع  $\psi_{j,k}$  که به صورت زیر تعریف می شود دارای نرم واحد است [۱۸]:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \psi(2^j t - k), \quad j, k \in Z \quad (2)$$

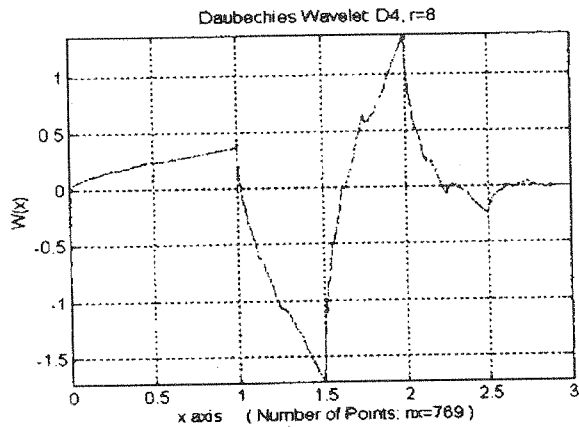
اگر  $\varphi(t)$  تابع مقیاس اصلی<sup>۷</sup> در نظر گرفته شود می توان با انتقال دادن این تابع، زیر فضائی از  $L^2(R)$  را ایجاد کرد. اگر زیر فضای ایجاد شده توسط انتقال های تابع  $\varphi(t)$  که به صورت زیر تعریف می شود:

$$\varphi_k(t) = \varphi(t-k) \quad k \in Z, \quad \varphi \in L^2 \quad (3)$$

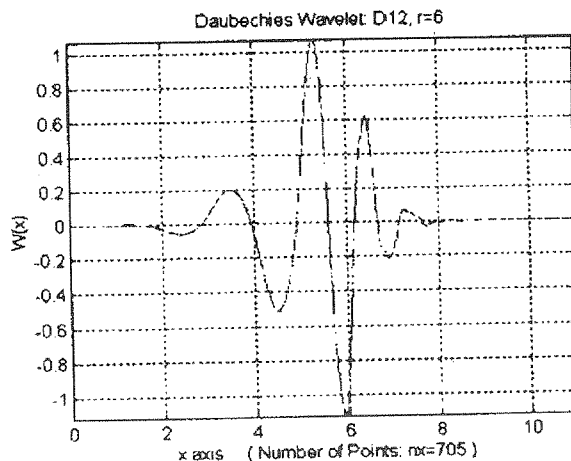
را با  $V_0$  نشان دهیم در آن صورت هر تابع  $f(t)$  را که عضوی از فضای  $V_0$  باشد می توان به صورت زیر نشان داد [۱۹]:

$$f(t) = \sum_k a_k \varphi_k(t), \quad f(t) \in V_0 \quad (4)$$

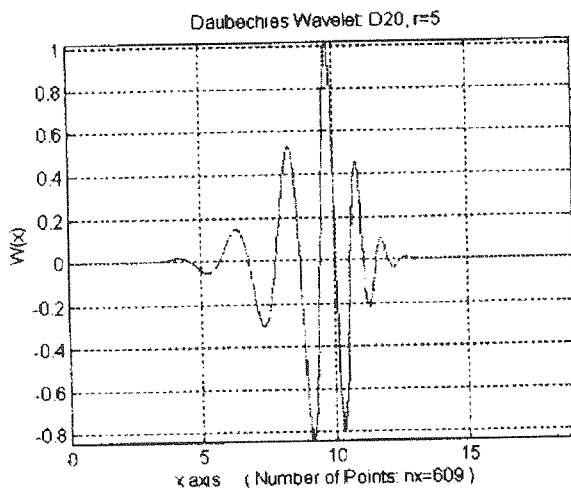
برای توسعه فضای یاد شده می توان تابع مقیاس اصلی  $\varphi(t)$  را علاوه بر انتقال، منبسط یا منقبض کرد. بنابراین فضای  $V_j$  که توسط توابع زیر ایجاد می شود محدوده بزرگتری را در برمی گیرد:



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱) توابع موجک اصلی برای تعداد ضرائب  
[۱۸] N= 4, 12, 20

یکی از مهمترین ویژگی‌های تبدیل موجک، رفتار فرکانسی آنها در مقیاس‌های مختلف می‌باشد. برخلاف تبدیل فوریه که اجزای آن فقط دارای یک فرکانس خاص هستند، اجزای

بنابراین هر تابع  $f(t)$  را که در فضای  $L^2(R)$  قرار می‌گیرد می‌توان به کمک توابع مقیاس و توابع موجک بسط داد:

$$f(t) = \sum_k c_{j_0}(k) \varphi_{j_0,k}(t) + \sum_k \sum_{j=j_0}^{\infty} d_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (۱۳)$$

که در آن  $C_{j_0}(k)$  و  $d_j(k)$  ضرائب ثابتی هستند. عمده‌ترین کار در بدست آوردن معادله برگشتی (۸) برای محاسبه تابع مقیاس اصلی  $\varphi(t)$ ، تعیین پارامترهای  $h(n)$  می‌باشد. برای آنکه معادله اخیر جواب داشته باشد باید ضرائب  $h(n)$  دارای شرایط خاصی باشند. می‌توان ثابت کرد که یکی از شرایط ضروری که از شرط محدودیت سطح محصور تابع  $\varphi(t)$  و محور  $t$  ناشی می‌شود، به صورت زیر قابل استخراج است [۱۸]:

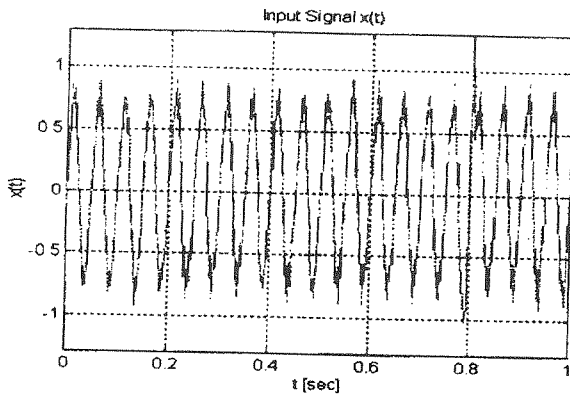
$$\sum_k h(n) = \sqrt{2} \quad (۱۴)$$

شرط دیگری که تابع مقیاس اصلی باید ارضا کند، شرط متعامد بودن  $\varphi(t)$  به انتقال‌های صحیح خود می‌باشد که مستلزم برقراری رابطه زیر برای ضرائب  $h(n)$  می‌باشد:

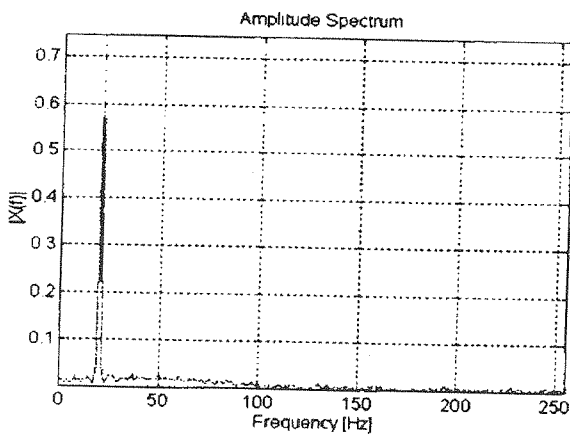
$$\sum_k h(n) h(n-2k) = \delta(k) = \begin{cases} 1 & \text{if } k=0 \\ 0 & \text{if } k \neq 0 \end{cases} \quad (۱۵)$$

که به روش مشابهی قابل اثبات است [۱۸]. شرایط یاد شده بیان می‌کنند که اگر  $\varphi(t)$  در فاصله محدودی از محور حقیقی، غیر صفر باشد و بر انتقال‌های صحیح خود متعامد باشد در آن صورت علاوه بر رابطه خطی (۱۴)، معادلات مرتبه ۲ در رابطه (۱۵) نیز باید برای پارامترهای  $h(n)$  برقرار باشد. پارامترهای  $h_1(n)$  را می‌توان براساس ارتباط موجود بین  $h(n)$  و  $h_1(n)$  تعیین کرد. این پارامترها که از معادلات همزمان خطی و مرتبه دو بدست می‌آیند برای حالات مختلف  $N$  از ۲ تا ۲۰ حل شده و توابع مقیاس و توابع موجک مربوط به هر کدام از آنها از طریق معادله برگشتی بدست آمده اند [۱۸]. این توابع که دارای تعداد ضرائب زوجی می‌باشند به توابع مقیاس و توابع موجک Daubechies معروف هستند. در شکل (۱) چند نمونه از توابع موجک اصلی برای تعداد ضرائب  $N=4, 12, 20$  رسم شده است.

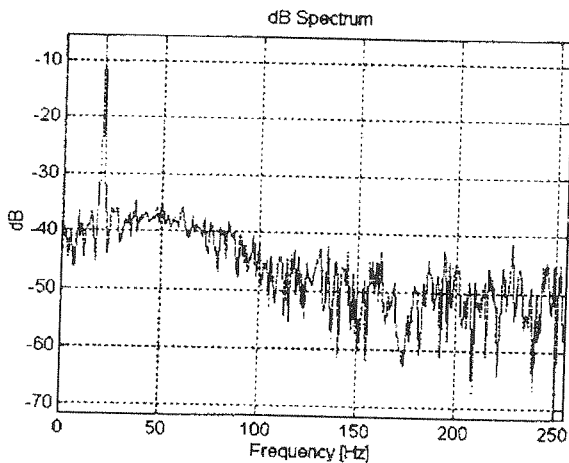
از این شکل‌ها کاملاً مشهود است که هر چه تعداد ضرائب بکار رفته افزایش می‌یابد منحنی‌های بدست آمده برای توابع موجک اصلی هموارتر می‌شوند ولی این امر مستلزم انجام محاسبات بیشتری است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۲) الف - سیگنال باند باریک سینوسی همراه با یک پالس و نویز سفید، ب - طیف دامنه، ج - طیف dB.

از این شکل مشاهده می شود که سهم عمده انرژی سیگنال در سطوح ۴ تا ۶ متمرکز است. این اطلاعات از شکل

سازنده تبدیل موجک، دربرگیرنده باند فرکانسی خاصی هستند. بررسی عملکرد موجک ها در حوزه فرکانس، امکان آنالیز دقیق تر سیگنال تحلیل شده توسط DWT را فراهم می کند. نتایج حاصل از بررسی رفتار فرکانسی موجک ها نشان می دهد که شعاع و مرکز پنجره فرکانسی موجک با افزایش مقیاس، در هر بار با ضریب ۲ افزایش می یابد [۱۸]. نکته حائز اهمیت این است که موجک ها در مقیاس های مختلف، کل بازه فرکانسی مورد نظر را تحت پوشش قرار می دهند.

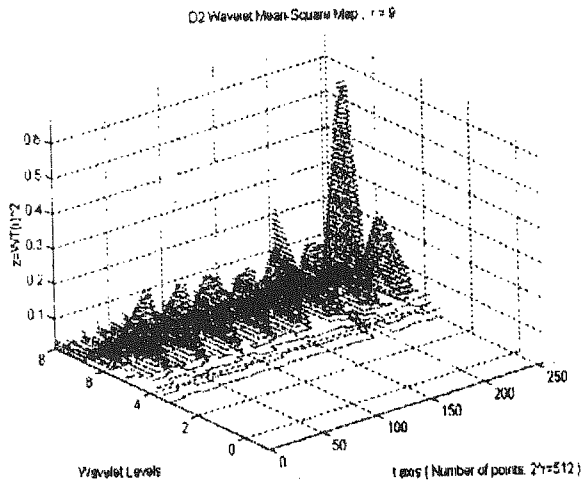
یکی دیگر از مزایای تبدیل موجک، عبارت از بازسازی سیگنال می باشد، در حالیکه این امر با استفاده از طیف توان که از طریق FFT بدست می آید امکان پذیر نیست چرا که در طیف یاد شده، اطلاعات فاز کاملاً از دست می رود، بنابراین در آنالیز فوریه که نتایج به صورت طیف فرکانسی بدست می آید فقط محدوده فرکانسی و توان (یا انرژی) مربوط به هر فرکانس خاص قابل تشخیص می باشد.

## ۲- آنالیز یک سیگنال سینوسی همراه با ترکیبی از نویز و ضربه باند پهن

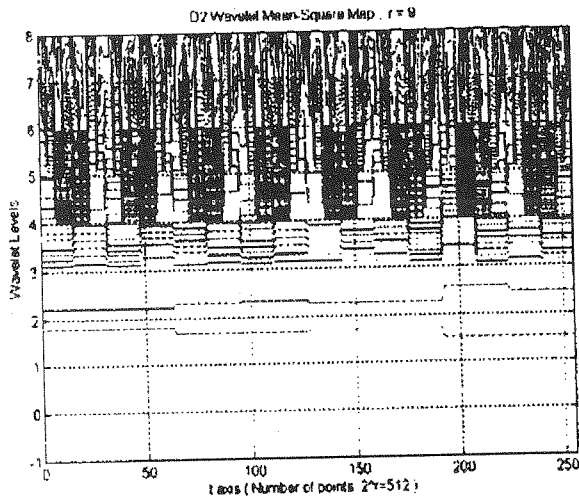
برای بررسی و مقایسه توانایی آنالیز طیفی و آنالیز موجک در مراتب مختلف، یک سیگنال باند باریک سینوسی همراه با یک پالس، که توسط نویز سفید آلوده شده است مورد تحلیل قرار گرفت، این سیگنال در شکل (۲-الف) نشان داده شده است. نتایج حاصل از آنالیز طیفی که متشکل از طیف دامنه و طیف dB هستند به ترتیب در شکل های (۲-ب) و (۲-ج) نشان داده شده اند.

از بررسی این شکل ها، محدوده فرکانسی موج سینوسی باند باریک، به وضوح قابل مشاهده است و وجود نویز نیز آشکار است در حالیکه به هیچ وجه نمی توان از طریق این آنالیز به وجود پالس و موقعیت زمانی آن پی برد.

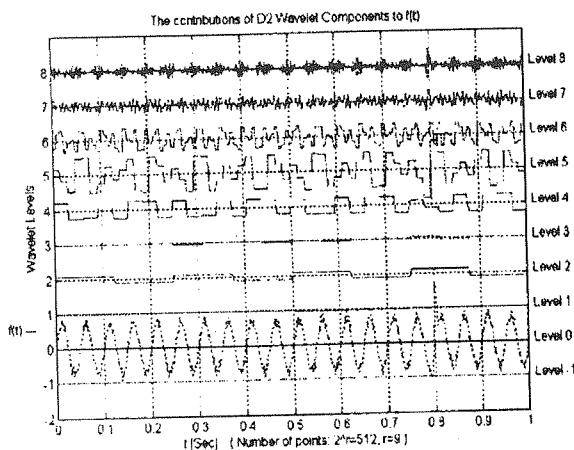
برای انجام مقایسه توانایی آنالیز طیفی و آنالیز موجک، سیگنال یا دشته توسط موجک های مختلف مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج بدست آمده از تحلیل توسط موجک های  $D_2, D_4, D_8, D_{20}$  آورده شده است [۱۸]. از آنجائیکه تبدیل موجک ماهیتاً دو بعدی است (بر خلاف DFT که یک بعدی می باشد) و این امر یکی از مزایای عمده این روش می باشد، لذا برای آنکه اطلاعات مفیدتری از این آنالیز بدست آید لازم است نتایج حاصل از آنالیز موجک، در هر دو بعد زمان و مقیاس (فرکانس) رسم شود. این کار در شکل (۲-ب) برای آنالیز با موجک  $D_2$  انجام شده است. بعد قائم این دیاگرام، عبارت از میانگین مربعات (Mean square) ضرائب تبدیل موجک می باشد.



شکل (۳) - ب



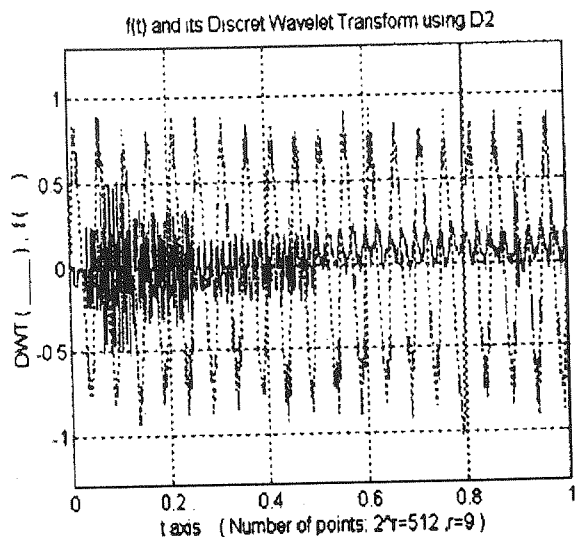
شکل (۳) - ج



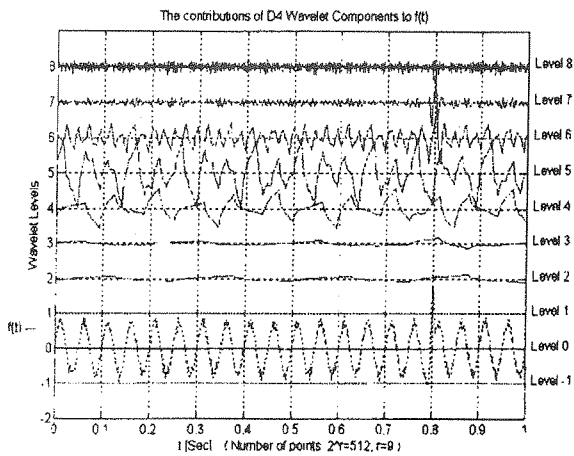
شکل (۳) - د

شکل (۳) تحلیل سیگنال بوسیله موجک  $D_2$

(۳-ج) که دیاگرام کانتور می باشد نیز قابل دستیابی است. از این شکل، موقعیت زمانی پالس نیز قابل مشاهده است. شکل های (۳-الف) تا (۳-د) نتایج تحلیل سیگنال اخیر توسط موجک  $D_2$  را به نمایش می گذارد و نتایج حاصل از آنالیز توسط موجک های  $D_8, D_4$  و  $D_{20}$  به ترتیب در شکل های (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است. از مقایسه این شکل ها، بویژه شکل های (۳-ج)، (۳-د)، (۳-ه)، (۳-و) و (۳-ز) دیده می شود که همه موجک های یاد شده، وجود نویز را آشکار می سازند، با این حال هر چه شماره موجک افزایش می یابد، وجود نویز با وضوح بیشتری قابل تشخیص است (وجود نویز در سطح ۸ ظاهر شده است). در شکلهای یاد شده، هر چه فاصله خطوط کانتور کمتر باشد (نواحی تیره تر)، که نشان دهنده وجود ارتفاع بیشتر در شکل های سه بعدی متناظر است، بیانگر وجود انرژی متمرکز در موقعیت زمانی و مقیاس (فرکانس) مرتبط با سیگنال مورد تحلیل می باشد. با مراجعه به شکل های یاد شده [و بررسی قسمت های (د) از شکل های اخیر که اجزای سیگنال در سطوح مختلف موجک رسم شده است]، موقعیت زمانی و مربوط به نتایج تحلیل بدست آمده از موجک های  $D_{20}$  و  $D_8$  هستند، پدیده اخیر با وضوح بیشتری خود نمائی می کند. از بررسی کلی این مثال، توانایی بسیار قوی تبدیل موجک در مقایسه با آنالیز طیفی مبتنی بر FFT، و نیز توان تر بودن تبدیل موجک با مراتب بالاتر نسبت به موجک های مراتب پایین تر در آنالیز نویز و پدیده های اتفاقی در سیگنال آشکار می شود.

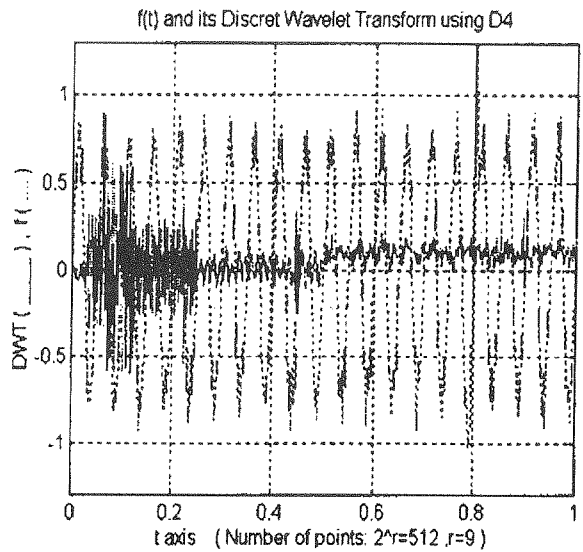


شکل (۳) - الف

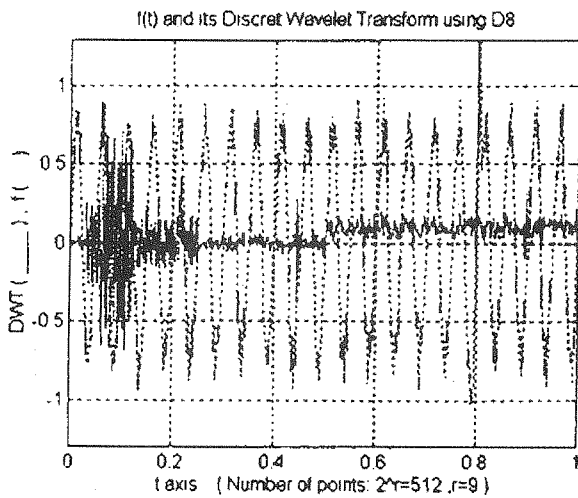


شکل (۴) - د

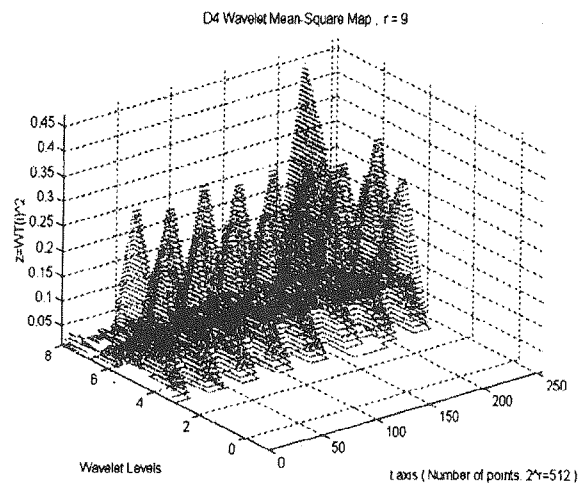
شکل (۴) تحلیل سیگنال بوسیله موجک  $D_4$



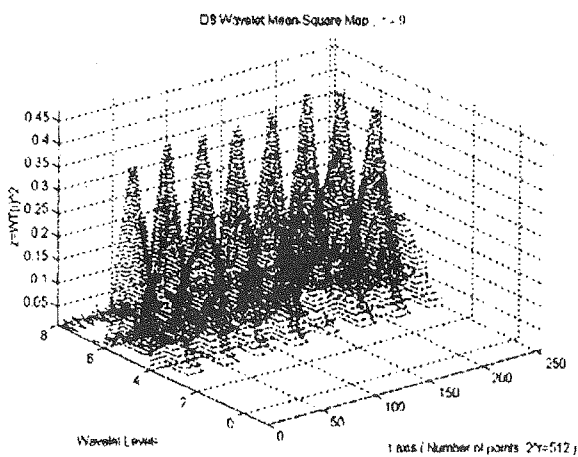
شکل (۴) - الف



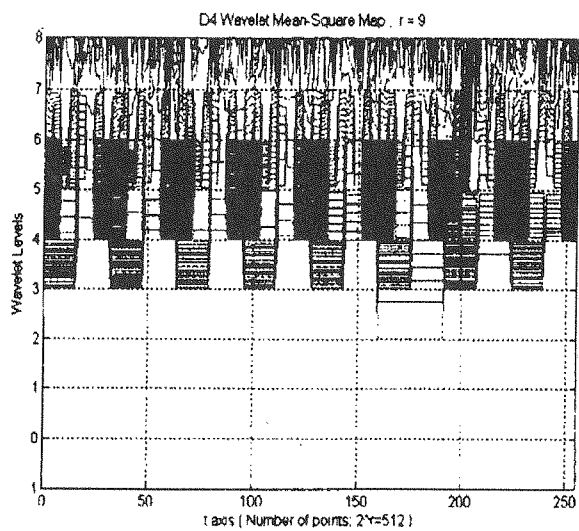
شکل (۵) - الف



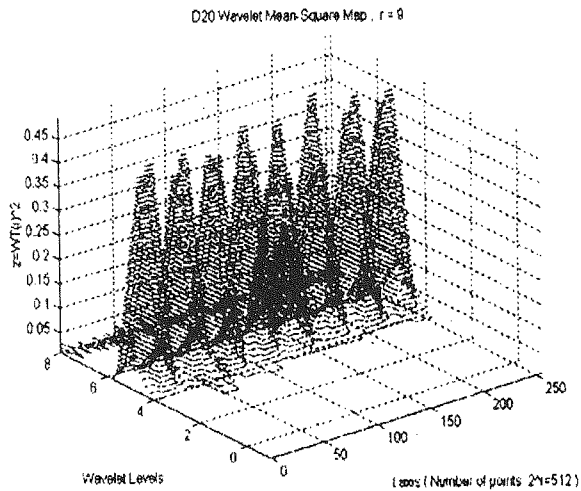
شکل (۴) - ب



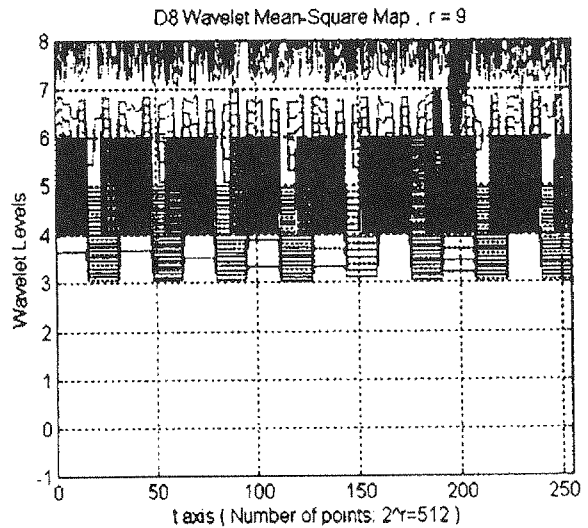
شکل (۵) - ب



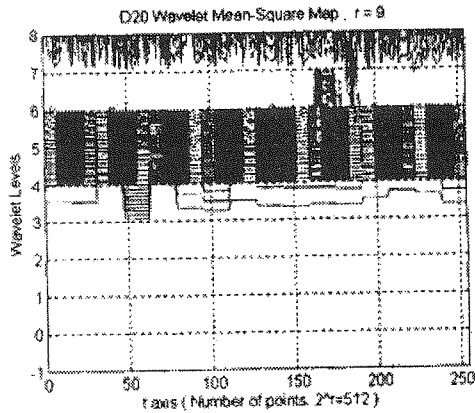
شکل (۴) - ج



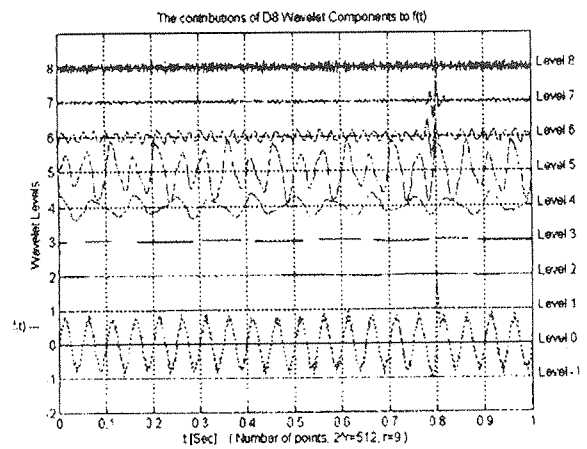
شکل (۶-ب)



شکل (۵-ج)

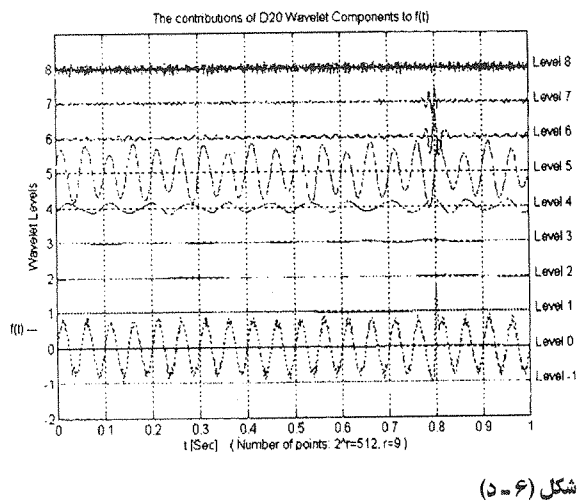


شکل (۶-ج)



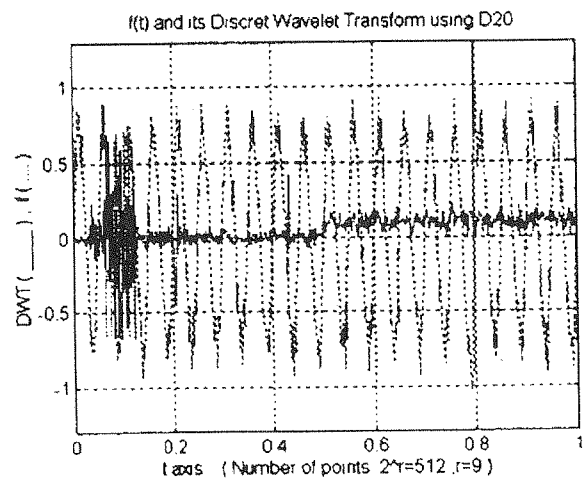
شکل (۵-د)

شکل (۵) تحلیل سیگنال بوسیله موجک  $D_8$



شکل (۶-د)

شکل (۶) تحلیل سیگنال بوسیله موجک  $D_{20}$

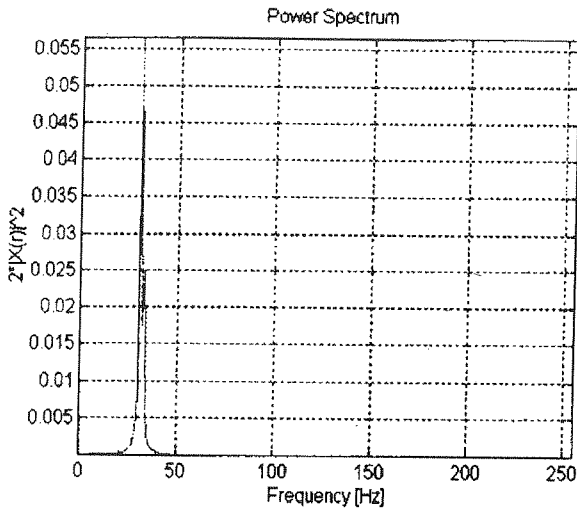


شکل (۶-الف)

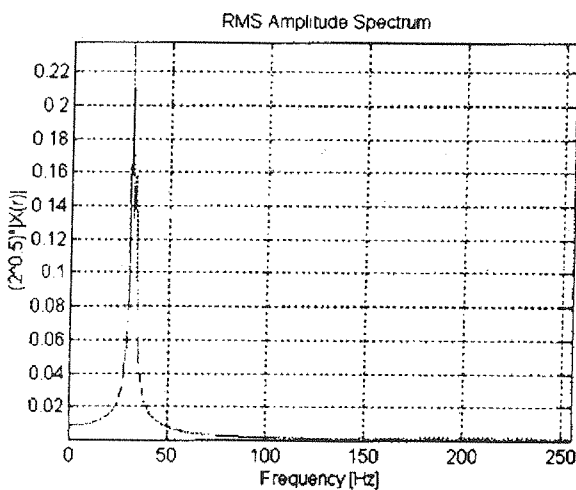


### ۳- آنالیز یک سیگنال باند باریک که با یک سیگنال گذرا باند پهن ترکیب شده است

سیگنال دیگری که دارای دامنه متغیر با زمان بوده و با یک سیگنال گذرای باندپهن واقع در موقعیت زمانی  $t = 0.6$  [Sec] ترکیب شده است مورد آنالیز قرار گرفت. این سیگنال در شکل (۷الف) نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از آنالیز طیفی که شامل طیف توان و طیف RMS می باشد در شکل های (۷ب) و (۷ج) ارائه شده است، از این شکل ها نمی توان به وجود سیگنال گذرا (اعم از موقعیت زمانی و فرکانس مرکزی آن) پی برد. سیگنال اخیر توسط موجک های متعدد مورد تحلیل قرار گرفت که نتایج بدست آمده از آنالیز توسط موجک های  $D_6, D_{12}, D_{18}$  ارائه شده اند [۱۸]. شکل (۸) نتایج آنالیز توسط موجک  $D_6$ ، و شکل های (۹) و (۱۰) به ترتیب نتایج حاصل از آنالیز توسط موجک های  $D_{12}$  و  $D_{18}$  را نشان می دهند. در این شکل ها (بر خلاف آنالیز طیفی) موقعیت زمانی و فرکانس سیگنال گذرا در هر سه نوع دیاگرام کانتور، سه بعدی و تجزیه سیگنال به سطوح مختلف موجک، کاملاً مشهود است. ولی از مقایسه این شکل ها [بویژه قسمت های (ج) و (د)] دیده می شود که سیگنال باندپهن در شکل (۱۰)، مربوط به موجک  $D_{18}$ ، که در موقعیت زمانی  $t = 0.6$  [Sec] و در سطح ۸ ظاهر شده است، نسبت به شکل های قبلی که مربوط به آنالیز با موجک های مراتب پایین تر هستند با سهولت بیشتری قابل تشخیص است. اثر سیگنال گذرا در قسمت های (ب) و (ج) از شکل های اخیر، در سطح ۸، و در روی زمان که بر حسب تعداد نقاط بیان شده است، در موقعیت ۱۵۰ قابل مشاهده است.

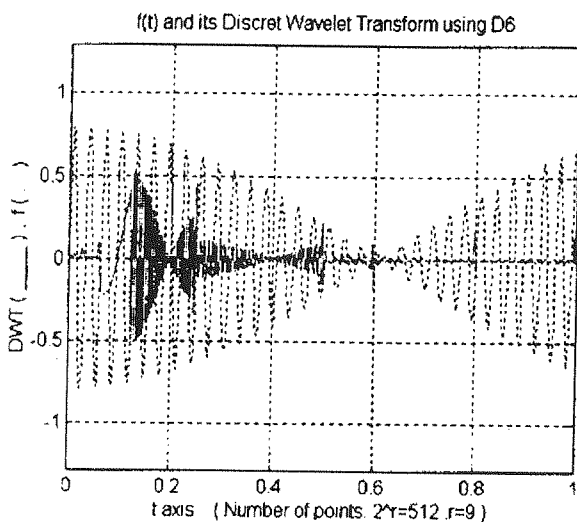


شکل (۷) - ب

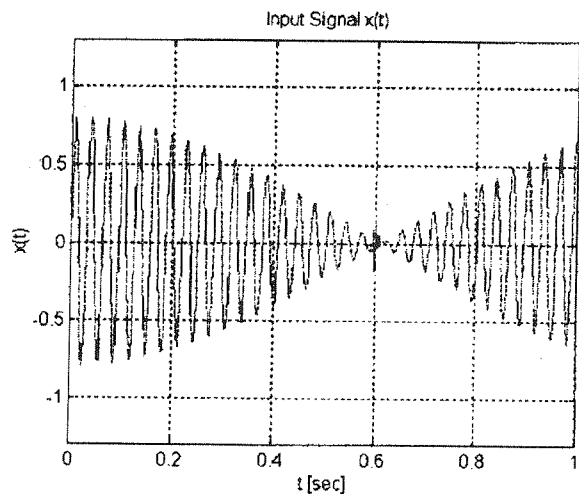


شکل (۷) - ج

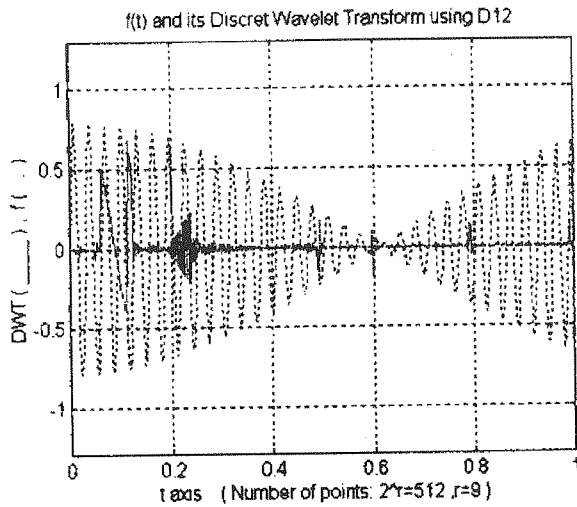
شکل (۷) الف - سیگنال با دامنه متغیر نسبت به زمان و ترکیب شده با یک سیگنال گذرای باندپهن، ب - طیف توان، ج - طیف RMS.



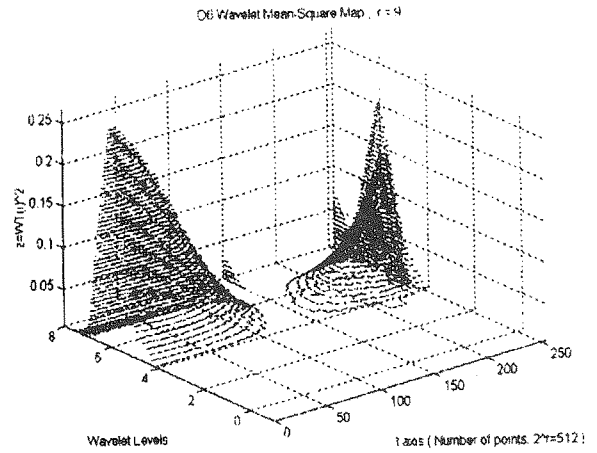
شکل (۸) - الف



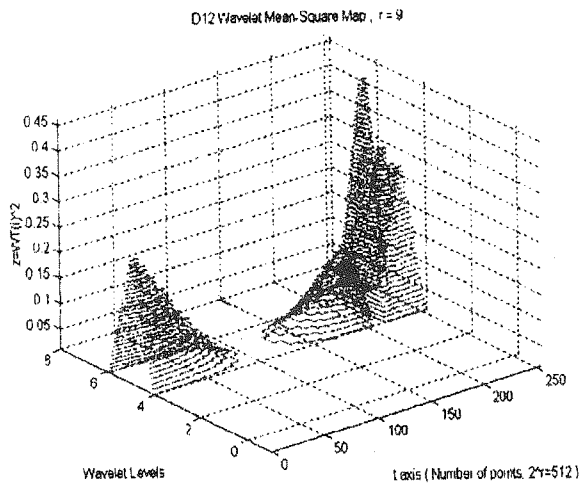
شکل (۷) - الف



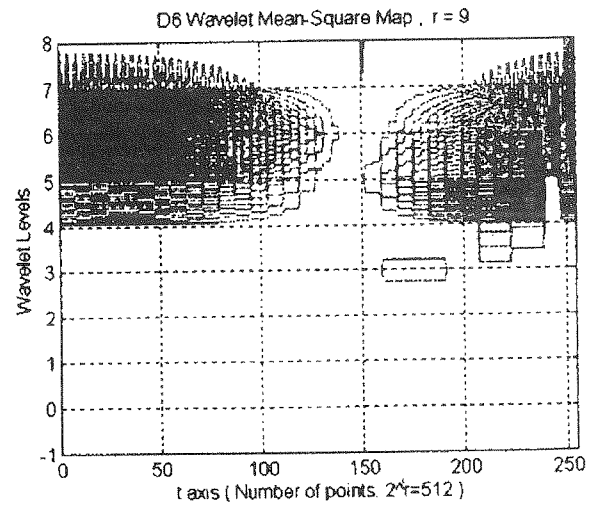
شکل (۹ - الف)



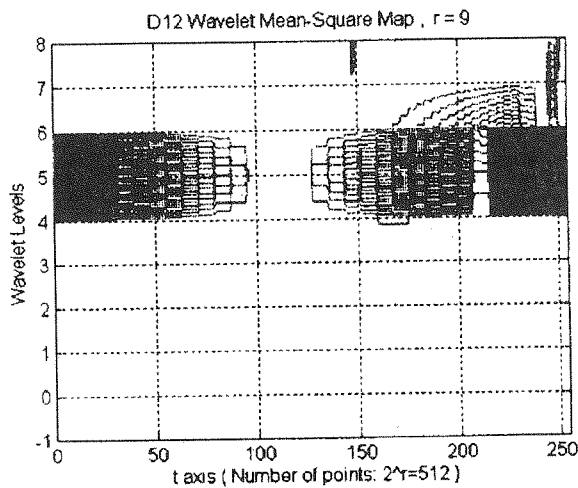
شکل (۸ - ب)



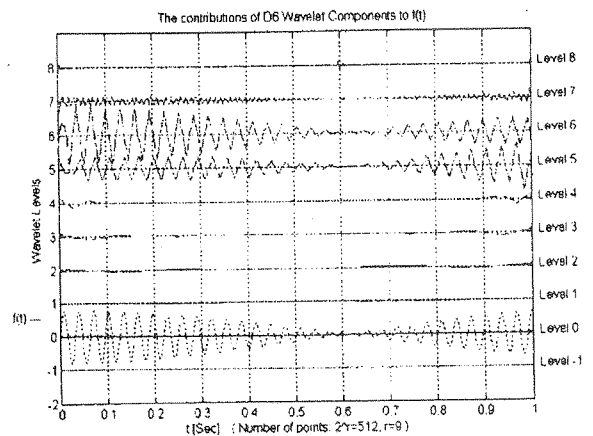
شکل (۹ - ب)



شکل (۸ - ج)

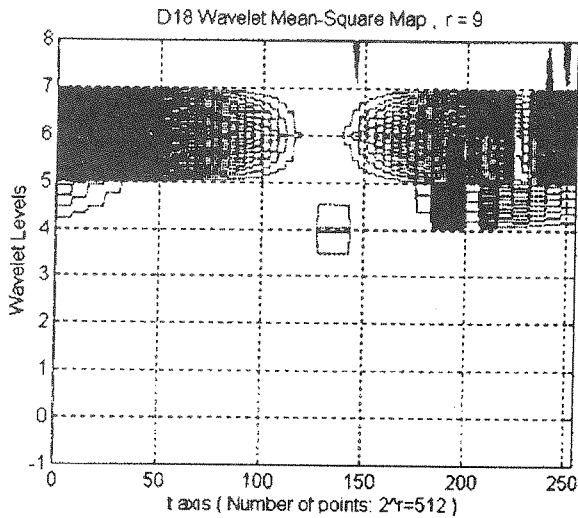


شکل (۹ - ج)

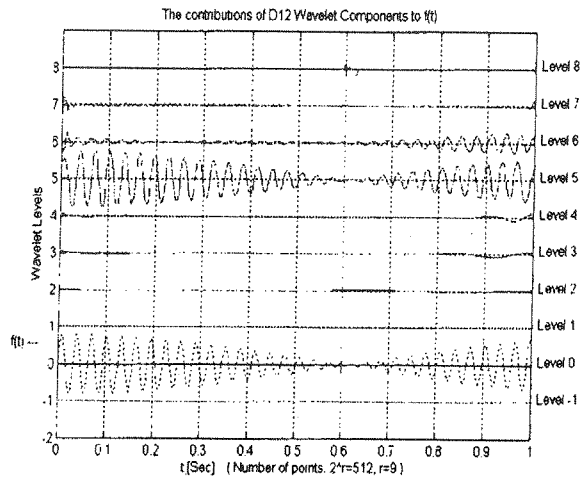


شکل (۸ - د)

شکل (۸) تحلیل سیگنال بوسیله موجک  $D_6$

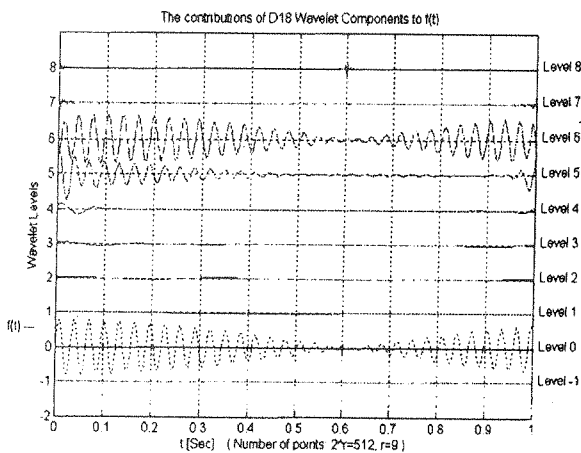


شکل (۱۰ - ج)



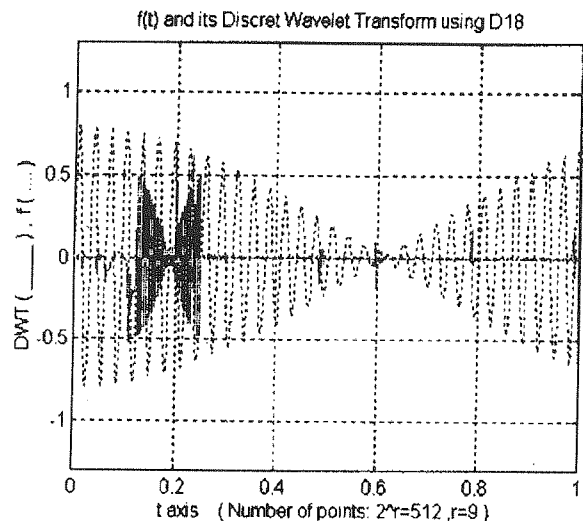
شکل (۹ - د)

شکل (۹) تحلیل سیگنال بوسیله موجک  $D_{12}$



شکل (۱۰ - د)

شکل (۱۰) تحلیل سیگنال بوسیله موجک  $D_{18}$

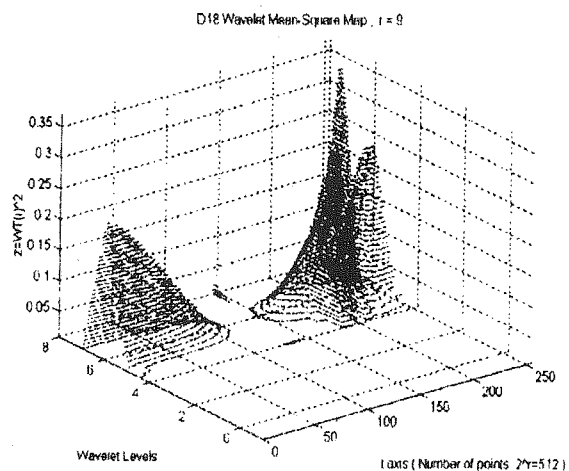


شکل (۱۰ - الف)

## ۴- بحث و نتیجه گیری

چنانچه قبلاً نیز ذکر شد به علت نوظهور بودن روش آنالیز موجک در تحلیل سیگنال‌های ارتعاشی، بسیاری از جنبه‌های روش یاد شده هنوز کاملاً شناخته نشده‌اند و تحقیقاتی که تاکنون با استفاده از این روش در زمینه آنالیز سیگنال‌های ارتعاشی صورت گرفته است عمدتاً به موجک‌های مراتب پایین‌تر محدود می‌شوند. بعلاوه هر یک از تحقیقات انجام شده فقط یک موجک خاصی را برای آنالیز سیگنال ارتعاشی بکار برده‌اند.

به منظور روشن شدن جنبه‌هایی از روش آنالیز موجک، در این مقاله طیف وسیعی از انواع موجک‌ها که شامل موجک‌های مراتب بالاتر نیز می‌شود ( $D_2$  تا  $D_{20}$ ) برای آنالیز سیگنال‌هایی که به طور تحلیلی تولید شده‌اند و پدیده‌های



شکل (۱۰ - ب)

## فهرست علائم و اختصارات

b و a	اعدادی که معرف مقیاس و انتقال موجک هستند
$a_k$	ضرائب ثابت
$f(t)$	سیگنال وابسته به زمان
$h(n)$	ضرائب معادله برگشتی برای محاسبه تابع مقیاس
$h_1(n)$	ضرائب معادله برگشتی برای محاسبه تابع موجک
j, k	اعداد صحیح
$L^2$	فضای سیگنالها با انرژی محدود
n	عدد صحیح مثبت
N	تعداد معادلات همزمان
t	پارامتر زمان
$w_0$	فضای ایجاد شده توسط انتقال های صحیح موجک اصلی
$w_j$	فضای ایجاد شده توسط تابع موجک $\Psi_{j,k}$
$\delta(k)$	دلتای کرونکر
$v_0$	فضای ایجاد شده با انتقالهای صحیح تابع مقیاس اصلی
$v_j$	فضای ایجاد شده توسط تابع مقیاس $\phi_{j,k}$
$\varphi(t)$	تابع مقیاس اصلی
$\varphi_{j,k}$	تابع مقیاس
$\Psi(t)$	تابع موجک اصلی
$\Psi_{j,k}$	تابع موجک

## زیر نویس ها

- 1-Wavelet Transforms
- 2-Monitoring
- 3-Fast Fourier Transform
- 4-Orthogonal Wavelets
- 5-Discrete Wavelet Transform
- 6-Basic Wavelet Function
- 7-Basic Scaling Function
- 8-Recursive Equation

مختلفی در آنها گنجانده شده است مورد مطالعه قرار گرفت. با آنکه آنالیز توسط موجک های مراتب بالاتر مستلزم محاسبات پیچیده تر و بیشتری است ولی برای دستیابی به بعضی از رفتارهای مفید موجک ها برای آنالیز سیگنال ها، مقیاس متناظر با پالس موجود در سیگنال مورد نظر در همه شکل های اخیر [به غیر از شکل (۳) که به آنالیز با موجک  $D_2$  مربوط می شود، این کار به سختی امکان پذیر است]، قابل تشخیص است (در موقعیت زمانی  $t=0.8$  [Sec] و در سطوح 7 و 8)، ولی در شکل های (۵) و (۶) که به ترتیب لازم است از موجک های مراتب بالاتر استفاده شود.

برای آنکه یک جمع بندی کلی از نتایج تحلیل توسط موجک های مختلف صورت گیرد، و مقایسه ای نیز بین توانایی روش آنالیز طیفی با آنالیز موجک انجام شود، سیگنال های آزمایشی با روشهای یاد شده مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل حاکی از این است که همه موجک ها با هر مرتبه خاصی، در استخراج رفتار پدیده های موضعی سیگنال نسبت به آنالیز طیفی بر مبنای FFT بسیار توانا تر می باشند و در بسیاری از موارد، آنالیز طیفی در شناسایی چنین پدیده هایی کاملاً ناتوان است.

مقایسه بین موجک ها با مراتب مختلف در آنالیز سیگنال های تحلیلی مورد مطالعه، نشان می دهد که موجک  $D_2$  نسبت به موجک های مراتب بالاتر دارای توانایی کمتری می باشد بویژه وجود نویز در سیگنال (که در عمل اجتناب ناپذیر است)، عمل تحلیل به منظور استخراج مشخصه های سیگنال را با مشکل مواجه می کند و طیف فرکانسی نویز، با فرکانس های بالاتر موجود در سیگنال به سختی قابل تمایز هستند (شکل ۳). با افزایش مرتبه موجک، وجود مشخصه های موضعی در سیگنال بوسیله آنالیز سیگنال به موجک ها در سطوح مختلف بوضوح قابل تشخیص است. همچنین نویز موجود در سیگنال که در باند فرکانسی بالاتری نسبت به بالاترین فرکانس موجود در سیگنال اصلی که حاوی اطلاعات مربوط به پدیده های موجود در سیگنال هستند قابل تمایز می باشند (شکل ۶).

وجود نویز و پدیده های موضعی را می توان با استفاده از دیاگرامهای Mean Square Map که به صورت سه بعدی و نیز کانتور دو بعدی رسم شده اند به سهولت تشخیص داد. نتایج نشان می دهند که در حالت کلی موجک های مراتب بالاتر در کشف پدیده های یا دشده، کار آمدتر از موجک های مراتب پائین تر هستند بنابراین نباید به خاطر پیچیدگی روش بدست آوردن موجک های مراتب بالاتر، توانایی آنها را نادیده گرفته و از موجک های مراتب پائین تر استفاده کرد.

- [1] R. H. Bannister, ≤ A review of Rolling Element Bearing Monitoring Techniques ≤, Condition Monitoring of Machinery and Plant, The Institution of Mechanical Engineers, London, 6 June 1985, pp. 11-24.
- [2] A. Daadbin and J.C.H. Wong, ≤ Different Vibration Monitoring Techniques and their Application to Rolling Element Bearings ≤, International Journal of Mechanical Engineering Education, 1991, 19 (4), pp. 295-304.
- [3] P. D. McFadden, ≤ Condition Monitoring of Rolling Element Bearings by vibration Analysis ≤, Machine Condition Monitoring The Institution of Mechanical Engineers, London 1990, pp. 46-54.
- [4] P. D. McFadden, ≤ Detecting Fatigue Cracks in Gears by Amplitude and phase Demodulation of the Meshing Vibration ≤, Journal of Vibration, Acostics, Stress, and Reliability in Design, 1986, 108, pp. 165-170.
- [5] D. P. S. Chauhan & K. N. Gupta, ≤ Diagnosis of Lubrication Failure in Gear Systems by Vibration Analysis ≤, Proceedings of the 3rd International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Dublin/Ireland 3-5 September 1997, pp. 449-453.
- [6] Y.-T. Su and S.-J. Lin, ≤ On Initial fault Detection of a Tapered Roller Bearing: Frequency Domain Analysis ≤, Journal of Sound and Vibration, 1992, 155 (1), pp. 75-84.
- [7] Y-T Su and Y-T Sheen, ≤ On the Detectability of Roller Bearing Damage by frequency Analysis ≤, Institution of mechanical Engineers Proceedings. Part C: Journal of mechanical Engineering Science, 1993, 207(1), pp. 23-32.
- [8] I. Daubechies, ≤ The Wavelet Transform, Time-Frequency localization and Signal Analysis ≤, IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36, pp. 961-1005.
- [9] Staphane G. Mallat, ≤ A Theory for Multiresolution signal Decomposition: The Wavelet Representation ≤, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intellignce, 1989, 11(7), pp. 674-693.
- [10] D.E. Newland, ≤ Wavelet Analysis of Vibration, Part 1: Theory ≤, Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116, pp. 409-416.
- [11] D.E. Newland, ≤ Wavelet Analysis of Vibration, Part 2: Wavelet Maps ≤, Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116, pp. 417-425.
- [12] Yulin Yan and Taro Shiomogo, ≤ The Application of Haar Transform in Signature Extraction and Condition Monitoring of Mechanical Systems ≤, JSME International Juornal, Series III, 1990, 33(2), pp. 191-197.
- [13] K. Mori, N. Kasashima, T. Yoshiola and Y. Ueno, ≤ Prediction of Spalling on a Ball Bearing by Vibration the Discrete Wavelet Transform to Application Signals ≤, Wear, 1996, 195 (1-2), pp. 162-168.
- [14] H.R. Martin & S. Ziaei, ≤ Wavelet Analysis Applied to Bearing Vibration Detection ≤, Proceedings of the 3rd International Conference on Modern Practice in Stress and Vibration Analysis, Dublin/Ireland 3-5 September 1997, pp. 455-461.
- [15] S. T. Lin & P. D. McFadden, ≤ Vibration Analysis of Gearboxes by the Linear Wavelet Transform ≤, Second International Confreence on Gearbox Noise, Vibration, and Diagnostics, IMechE Conference Transactions, 16-17 November 1995, pp. 59-72.
- [16] Charles K. Chui, An Introduction to wavelets, Academic Press, 1992.
- [17] J.C. Goswami & A.K. Chan, Fundamentals of Wavelets, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [18] رضائی، موسی، توسعه تحلیل و بررسی تجربی سیگنال های ارتعاشی برای عیب یابی بوسیله طراحی سیستم های موجک های متعامد دوگانه و چندگانه، گزارش سمینار رساله دکتری (منتشر نشده)، دانشگاه تربیت مدرس ۱۳۷۹.
- [19] C. Sidney Burrus, Ramesh A. Gopinath and Haitao Guo, Introduction to Wavelets and Wavelet transforms, Prentice Hall, 1998.
- [20] Stephane Mallat, A Wavelet Tour of Signal Processing, Academic Press, 1998.