

تشخیص محل و میزان ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک

امیر عزالدین^۱، حسین نادرپور^{۲*}، علی خیرالدین^۳، غلامرضا قدرتی امیری^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>واژگان کلیدی: تشخیص آسیب، تیر، تبدیل موجک، پردازش سیگنال.</p>	<p>در سالهای اخیر روش‌های تشخیص خرابی برای سازه‌های عمران و مکانیک، در زمینه‌های مختلفی گسترش پیدا کرده‌اند. تبدیل موجک، یک ابزار نسبتاً جدید ریاضی برای پردازش سیگنال می‌باشد که اطلاعات بیشتری در سیگنال‌های غیر ایستا، که تبدیل فوری از ارائه آن‌ها عاجز بود، را فراهم می‌آورد. یکی از حوزه‌های مهم پر کاربرد تبدیل‌های ریاضی مانند موجک، تشخیص خرابی در سازه‌ها می‌باشد، به خصوص که شناسایی آسیب در مراحل اولیه شروع آن در سازه حائز اهمیت می‌باشد. در این مقاله روش ساده‌ای بر مبنای تحلیل موجک برای تشخیص محل و میزان آسیب در تیرها، بررسی شده است؛ بدین صورت که پاسخ تغییر شکل قائم تیر تحت بار استاتیکی ثابت را با استفاده از تبدیل موجک گسسته تجزیه شده و در نمودارهای تجزیه شده برای سناریوهای مختلف آسیب در تیر بحث و بررسی به عمل آمده است و در نهایت کارایی روش برای حالات مختلف ترک خوردگی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.</p>

۱- مقدمه

در سال ۲۰۰۴، Ovanesova و Soares پایش سلامت یک تیر و یک قاب یک دهانه‌ی یک طبقه، تحت بار استاتیکی و دینامیکی را به کمک روش‌های مختلف تبدیل موجک (DWT و CWT) مورد بررسی قرار دادند. روش ارائه شده بر این فرض استوار است که آسیب دیدگی سازه سبب اغتشاش در پاسخ سازه می‌گردد. ممکن است این آشفتگی، در بررسی مستقیم پاسخ سازه قابل تشخیص نباشد. اما به کمک ضرایب تبدیل موجک پیوسته یا سیگنال جزئی حاصل از تبدیل موجک گسسته، می‌توان عدم یکنواختی سیگنال را مشخص کرد. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که موقعیت آسیب با دقت بالایی قابل تشخیص است [۲].

ترک در سازه‌ها تهدیدی جدی برای عملکرد مطلوب آن‌ها ایجاد می‌کند؛ به طوری که اکثر خرابی‌های سازه‌ای از این مقوله آغاز می‌شود. به همین دلیل، روش‌هایی که منجر به تشخیص و تعیین محل ترک در سازه‌ها می‌شوند، موضوع تحقیقات گسترده‌ای در دو دهه اخیر بوده است [۱].

در سال ۲۰۰۳، Douka و همکاران به تشخیص محل و میزان ترک در تیر طره‌ای با استفاده از تبدیل موجک پرداختند [۱].

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: naderpour@semnan.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۳. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

۴. استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

خاتم و گل افشانی در سال ۲۰۰۴ نشان دادند که پی‌بردن به وجود آسیب در تیر با استفاده از طیف فوری دو پاسخ

هشت مود اول مدل عددی و آزمایشگاهی یک تیر طره پرداخت. نتایج او نشان می‌دهد که هرچه مرتبه شکل مودی مورد بررسی بالاتر باشد، جواب‌های قابل اطمینان‌تری بدست می‌آید که این نشان دهنده‌ی حساسیت موده‌های بالاتر نسبت به آسیب می‌باشد [۹].

۲- تعریف ریاضی تابع موجک

در ابتدا لازم است قبل از تعریف تبدیل موجک، تعریف مختصری از تبدیل فوریه و تبدیل فوریه زمان کوتاه داشت. تبدیل فوریه، ابزار قدرتمندی برای پیدا کردن مولفه‌های فرکانسی یک سیگنال می‌باشد. طبق تعریف، تبدیل فوریه سیگنال پیوسته در زمان $x(t)$ به صورت زیر بدست می‌آید.

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (1)$$

که در آن t ، زمان و f ، فرکانس می‌باشد.

اما محدودیت تبدیل فوریه آن است که تنها به بیان وجود و یا عدم وجود فرکانس مد نظر در سیگنال می‌پردازد و اطلاعاتی در مورد بازه زمانی متناظر با پدیداری آن فرکانس در اختیار قرار نمی‌دهد؛ که این مساله در مورد سیگنال‌های غیر ایستا کارآیی روش را کاهش می‌دهد. از این رو برای تحلیل سیگنال‌های غیر ایستا از تبدیل فوریه زمان کوتاه استفاده می‌شود. در روش تبدیل فوریه زمان کوتاه، سیگنال به بخش‌های به حد کافی کوچک تقسیم شده، به نحوی که بتوان این قسمت‌ها را ایستا فرض نمود. بدین منظور از یک تابع پنجره w استفاده می‌شود که طول آن برابر با حداقل طول مورد نیاز برای معتبر بودن فرض ایستایی قطعات جدا شده سیگنال می‌باشد. بدین ترتیب، تبدیل فوریه زمان کوتاه سیگنال $x(t)$ ، با استفاده از پنجره زمانی $w(t)$ به صورت زیر تعریف می‌گردد.

$$STFT_x^w(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot w^*(t - \tau) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (2)$$

که در آن f ، متغیر فرکانسی و τ ، متغیر زمانی می‌باشد. در تبدیل فوریه زمان کوتاه چون طول پنجره مورد استفاده متغیر می‌باشد، بحث رزولوشن در فرکانس و

تیر سالم و آسیب دیده عملاً غیر ممکن می‌باشد و نیازمند ابزاری است تا به کمک آن محلی را که در آن، عاملی سبب تغییرات اندک در محتوای فرکانسی سیگنال شده، را تعیین نمود [۳].

در سال ۲۰۰۶، Law و Zhu روشی بر مبنای تبدیل موجک تاریخچه زمانی تغییر مکان یک تیر تحت بار متحرک به منظور تشخیص ترک خوردگی در آن ارائه دادند. آن‌ها مدل عددی و آزمایشگاهی یک تیر را به منظور شرح این روش مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، پاسخ سازه در یک نقطه اندازه‌گیری شد و تبدیل موجک پیوسته برای تعیین موقعیت آسیب به کار گرفته شد. علاوه بر این، شاخصی برای تخمین عمق ترک خوردگی ارائه گردد. روش پیشنهادی نتایج قابل قبولی در تخمین سناریوهای مختلف آسیب دیدگی در مدل عددی ارائه می‌دهد [۴].

در سال ۲۰۰۹، Gokdag و Kopmaz با ترکیب تبدیل موجک گسسته و پیوسته به آشکار سازی آسیب در تیرها پرداختند. در این روش شکل مودی سازه‌ی آسیب دیده، به صورت ترکیبی از شکل مودی سازه‌ی سالم و عواملی همچون خطای ناشی از اندازه‌گیری و آسیب‌های محلی در نظر گرفته شده است. بنابراین یک تابع تقریبی مناسب که بیانگر حالت سالم سازه باشد، می‌تواند به کمک تبدیل موجک گسسته استخراج گردد. اختلاف بین ضرایب تبدیل موجک پیوسته‌ی حالت آسیب دیده و تابع تقریبی متناظر با سازه سالم می‌تواند به عنوان شاخص مناسبی برای تخمین خسارت سازه در نظر گرفته شود [۵].

باقری و همکاران در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ روشی جهت تشخیص آسیب در ورق‌ها، با استفاده از تبدیل گسسته‌ی موجک دوبعدی بر روی اطلاعات مودال، ارائه نمودند [۶-۸].

در سال ۲۰۱۱، Rucka اثر مرتبه‌ی مودها بر میزان قابلیت تشخیص آسیب در سازه‌ها را مورد بررسی قرار داد. او از تبدیل موجک پیوسته‌ی اشکال مودی نرمال شده، برای شناسایی آسیب استفاده کرد. برای این منظور به بررسی

رابطه فوق را می‌توان به صورت زیر معادل کرد:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0 \quad (4)$$

این ویژگی، تابع با میانگین صفر، چندان محدود کننده نبوده و توابع بسیاری را می‌توان بر اساس آن، موجک دانست. $\psi(x)$ ، تابع موجک مادر می‌باشد که توابع موجک مورد استفاده در تحلیل با دو عمل ریاضی انتقال (Shifting) و مقیاس دهی (Scaling) در طول سیگنال مورد تحلیل، تغییر اندازه و تغییر محل می‌یابند:

$$\psi_{a,b}(x) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (5)$$

در نهایت، ضرایب موجک در هر نقطه از سیگنال (b) و برای هر مقدار مقیاس (a) با رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$C_{f,\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (6)$$

که در آن a و b به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال و $\psi^*(x)$ را مزدوج مختلط تابع مادر موجک است.

برای تبدیل مقیاس به فرکانس از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$F_a = \frac{F_c}{a \cdot dt} \quad (7)$$

که F_a فرکانس متناظر با مقیاس a و F_c فرکانس اصلی هر تابع موجک و dt فاصله بین نقاط سیگنال می‌باشد.

هنگام استفاده از تبدیل موجک، خاصیت محو شوندگی ممان‌های آن از اهمیت زیادی برخوردار است. یک موجک دارای m گشتاور محو شونده (Vanishing Moment) می‌باشد، در صورتی که رابطه زیر در مورد آن صادق باشد:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x^k \psi(x) dx = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, m-1 \quad (8)$$

رابطه (۸) نشان دهنده این است که هر تابع موجک حداقل یک ممان محو شونده دارد. با توجه به رابطه (۶) می‌توان رابطه تابع $\theta(x)$ را، که تابع مقیاس کردن موجک نامیده می‌شود، به صورت زیر نشان داد:

$$\psi(x) = (-1)^m \frac{d^m \theta(x)}{dx^m} \quad (9)$$

لذا تبدیل موجک را نیز می‌توان به صورت زیر نوشت:

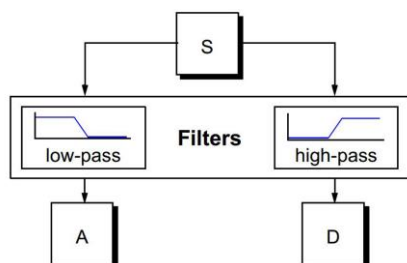
رزولوشن در زمان پیش می‌آید. به این صورت که با افزایش طول تابع پنجره، رزولوشن فرکانسی بالا و رزولوشن زمانی کم بدست می‌آید و همچنین با کاهش طول تابع پنجره، رزولوشن زمانی بالا و رزولوشن فرکانسی کم ایجاد می‌شود. مشکل رزولوشن ثابت در تبدیل فوریه زمان کوتاه، ریشه در اصل عدم قطعیت هایزنبرگ دارد. طبق این اصل نمی‌توان توصیف زمان - فرکانس یک سیگنال را به طور دقیق داشت؛ یعنی نمی‌توان فهمید که در یک سیگنال به طور دقیق چه مولفه‌های فرکانسی در چه زمان‌هایی وجود دارد، بلکه تنها می‌توان فهمید که کدام بازه‌های زمانی چه باند فرکانسی موجود است. این اصل به طور مستقیم به مفهوم رزولوشن برمی‌گردد. از این رو میتوان از یک رویکرد جایگزین برای تحلیل سیگنال‌ها استفاده نمود که اصطلاحاً تحلیل چند رزولوشن نامیده می‌شود که به عنوان سنگ بنای تبدیل موجک می‌باشد [۱۰].

تبدیل ویولت یا موجک تبدیلی است که مشخصات فرکانسی یک سیگنال را در یک بازه کوتاه بیرون کشیده و بیان می‌کند که این اجزاء فرکانسی با گذشت زمان، چگونه تغییر می‌کنند. در این تبدیل، تعدادی بردار پایه ایجاد می‌شوند که تصویر سیگنال بر این پایه‌ها معادل با جزء فرکانسی سیگنال می‌باشد. از آنجا که برای هر رزولوشن فرکانسی این بردارهای پایه تغییر می‌کنند، اجزاء فرکانسی در رزولوشن‌های مختلف به دست می‌آیند. در حوزه توابع موجک کتب و مقالات متعددی منتشر شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به منابع [۱۶-۱۱] اشاره نمود. در حقیقت در تحلیل موجک همانند تبدیل فوریه زمان کوتاه، سیگنال مورد نظر در یک تابع موجک ضرب می‌شود که همان نقش تابع پنجره را دارد. هر تابع موجک دارای دو ویژگی مهم نوسانی و کوتاه مدت بودن، می‌باشد. تابع $\psi(x)$ ، موجک است اگر و تنها اگر تبدیل فوریه آن $\Psi(\omega)$ ، در شرایط زیر صدق نماید:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{|\omega|^2} d\omega < +\infty \quad (3)$$

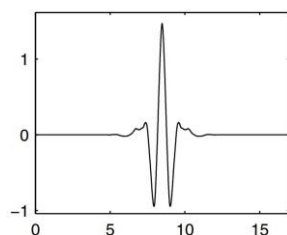
$$C_{f,\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot \frac{d}{dx} \theta^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx = \frac{d}{dx} \left\{ \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot \theta^* \left(\frac{x-b}{a} \right) dx \right\} \quad (10)$$

مقیاس یا تابع مقیاس می‌باشد و از دومی با نام فیلتر موجک یاد می‌شود (شکل ۱).

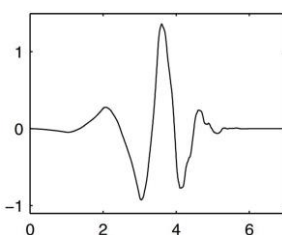


شکل ۱- تجزیه سیگنال در تراز اول [۱۷]

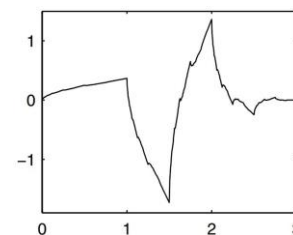
در این تحقیق از موجک مکانی استفاده شده است یعنی سیگنال، تابعی از مکان نقاط نمونه برداری تغییر مکان تیر می‌باشد. انتخاب تابع موجک مادر به عنوان اولین گام در تحلیل موجک است انتخاب این تابع بستگی به مسأله مورد نظر دارد و می‌تواند اثر قابل توجهی بر روی نتایج داشته باشد. در این تحقیق براساس بررسی مقالات متعدد از سه نوع موجک مادر sym2، db4 و bior6.8 که اشکال آن‌ها در زیر آورده شده، استفاده شده است.



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۲- اشکال تابع مادر موجک (الف) sym2، (ب) db4، (ج) bior6.8 [۱۷]

مکانیکی، نوع بارگذاری و اندازه نیروی اعمال شده برای کلیه تحلیل‌ها یکسان می‌باشند و تنها محل و اندازه خرابی در تحلیل‌های مختلف، تغییر می‌کند. بار گسترده اعمالی به تیر برای کلیه تحلیل‌ها به صورت استاتیکی و با مقدار ثابت در نظر گرفته شده است؛ با توجه به این که مقدار تنش‌ها از محدوده خطی تجاوز

در پردازش سیگنال، از فرم دیگری از تبدیل موجک با نام تبدیل موجک گسسته نیز استفاده می‌شود. در این تبدیل پارامترهای انتقال و مقیاس بطور غیر پیوسته انتخاب می‌شوند.

$$a = 2^{-j} \quad (11)$$

$$b = 2^{-j} k$$

که j و k اعداد صحیح می‌باشند. در نتیجه برای موجک انتقال یافته و مقیاس شده با جایگذاری روابط (۱۱) در رابطه (۵) خواهیم داشت:

$$\psi_{j,k}(x) = 2^{\frac{j}{2}} * \psi(2^j k - k) \quad (12)$$

تبدیل موجک گسسته سیگنال $f(n)$ برابر است با:

$$C_{f,\psi}(j,k) = \sum_{n \in \mathbb{Z}} f(n) \cdot \psi_{j,k}(n) \quad (13)$$

که در تبدیل موجک گسسته، تمامی پارامترها به صورت گسسته تغییر می‌کنند. در تبدیل موجک گسسته، دو نوع فیلتر به سیگنال اعمال می‌شود؛ نوع اول تقریبی از سیگنال را نتیجه می‌دهد و دیگری انحرافات یا جزئیات سیگنال را به خوبی نشان می‌دهد؛ که اولی به نام فیلتر

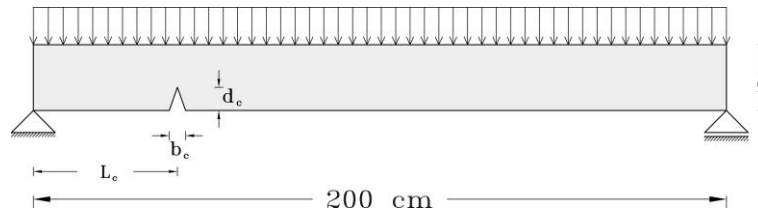
۳- مدل سازی و تشخیص آسیب

برای انجام تحلیل‌ها، یک تیر با ابعاد عمومی یکسان با شرط تکیه‌گاهی دو سر مفصل در نظر گرفته شده و نرم‌افزار SAP2000 v15.1.0 برای مدل‌سازی و محاسبه پاسخ سازه‌ای بکار رفته شده است. ابعاد، مشخصات

جهت تشخيص محل و ميزان خرابی در مدل‌ها، پاسخ تغيير مکان قائم نقاط زیر تیرها را در نرم‌افزار MATLAB و با استفاده از جعبه ابزار Wavelet تحت تبديل موجک گسسته قرار گرفته و سيگنال تجزيه می‌گردد و با استفاده از فیلتر high-pass جزئیات سيگنال تغيير شکل استاتیکی تیر استخراج می‌گردد. و بررسی‌ها بر روی نمودار جزئیات انجام می‌گیرد؛ بدین صورت که وجود خرابی باعث ایجاد اغتشاشات در نمودار جزئیات سيگنال می‌گردد و نمایان‌گر وجود خرابی در تیر می‌باشد.

نمی‌کنند، می‌توان پاسخ استاتیکی تغيير مکان تیر را در محدوده خطی و مستقل از مقدار نیروی اعمالی در نظر گرفت. بنابراین، مقدار نیروی بکار رفته در تحلیل استاتیکی، در شکل پاسخ استاتیکی تیر آسیب‌دیده و در نتیجه در تبديل موجک آن و گراف ضرایب بکار رفته برای کشف محل آسیب، بی‌تأثیر می‌باشد. مدل سازی خرابی نیز به صورت ایجاد ترک در تیر در محل مورد نظر انجام شده است.

تیر دو سر ساده مطابق شکل ۳ با مدول الاستیسیته $2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ و ضریب پواسون 0.3 به عنوان نمونه گرفته شد.

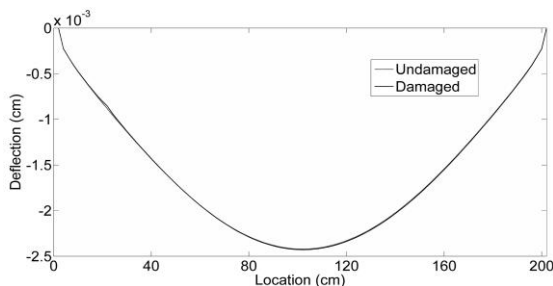


شکل ۳- مدل تیر دو سر مفصل

در جدول ۱ انواع مدل‌ها و سناریوهای مختلف خرابی آورده شده است.

جدول ۱- جزئیات مدل‌ها

نام مدل	عرض ترک (b_c)	عمق ترک (d_c)	محل ترک (L_c)	نام مدل	عرض ترک (b_c)	عمق ترک (d_c)	محل ترک (L_c)
SSB-2-4-20	2cm	4cm	20cm	SSB-4-4-50	4cm	4cm	50cm
SSB-2-8-20	2cm	8cm	20cm	SSB-4-8-50	4cm	8cm	50cm
SSB-2-16-20	2cm	16cm	20cm	SSB-4-16-50	4cm	16cm	50cm
SSB-4-4-20	4cm	4cm	20cm	SSB-2-4-100	2cm	4cm	100cm
SSB-4-8-20	4cm	8cm	20cm	SSB-2-8-100	2cm	8cm	100cm
SSB-4-16-20	4cm	16cm	20cm	SSB-2-16-100	2cm	16cm	100cm
SSB-2-4-50	2cm	4cm	50cm	SSB-4-4-100	4cm	4cm	100cm
SSB-2-8-50	2cm	8cm	50cm	SSB-4-8-100	4cm	8cm	100cm
SSB-2-16-50	2cm	16cm	50cm	SSB-4-16-100	4cm	16cm	100cm

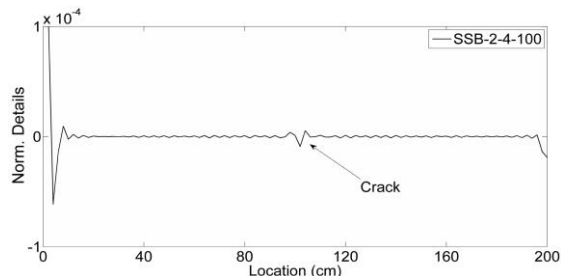


شکل ۴- تغيير شکل در دو حالت بدون آسیب و آسیب دیده

در شکل ۴ تغيير مکان در راستای قائم برای تیر سالم و تیر با ترکی به ابعاد $d_c = 4 \text{ cm}$ و $b_c = 2 \text{ cm}$ در فاصله $L_c = 20 \text{ cm}$ از تکیه‌گاه سمت چپ آورده شده است.

تشخیص محل و میزان ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک

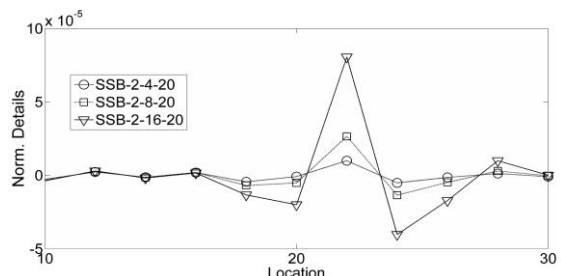
همان طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ترک در فاصله ۵۰ سانتی متری تکیه‌گاه سمت چپ به صورت واضح قابل تشخیص نمی‌باشد.



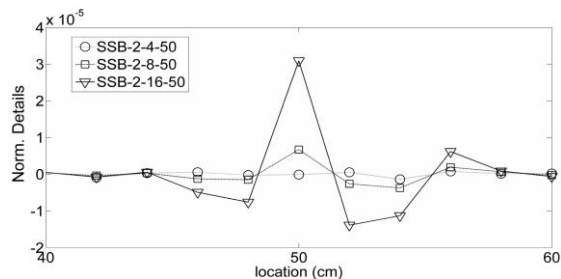
شکل ۸- نمودار تجزیه شده با sym2 تیر آسیب‌دیده ($L_c=100\text{cm}$)

چنانچه در شکل ۸ مشخص است، برای ترک‌های در وسط دهانه، sym2 به خوبی قادر به تشخیص آسیب می‌باشد. و کوچک‌ترین ترکی باعث ایجاد اغتشاشاتی در نمودار تجزیه شده می‌گردد.

جهت حساسیت سنجی و تعیین میزان ترک می‌توان نمودار تجزیه شده برای حالات مختلف ترک را رسم نمود.



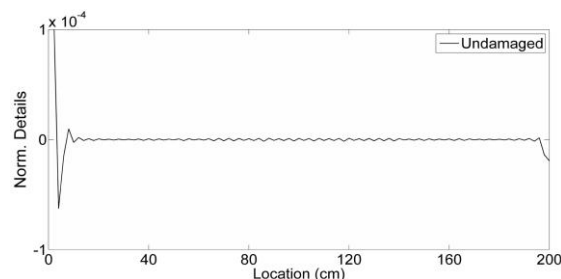
شکل ۹- نمودار جزئیات تغییر شکل با سه عمق ترک با ($L_c=20\text{cm}$) sym2



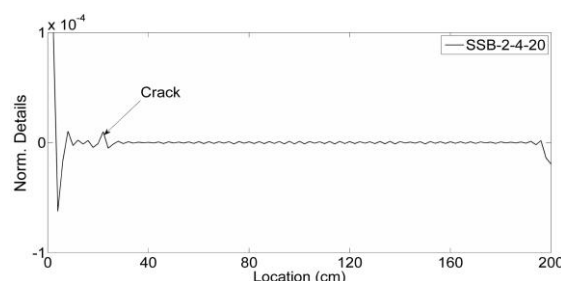
شکل ۱۰- نمودار جزئیات تغییر شکل با سه عمق ترک با ($L_c=50\text{cm}$) sym2

همان طور که در شکل ۴ مشخص است، با مقایسه این دو نمودار نمی‌توان به تشخیص آسیب پرداخت.

نمودار تیر سالم و تیر آسیب دیده تجزیه شده با تبدیل موجک در شکل ۵ آورده شده است.



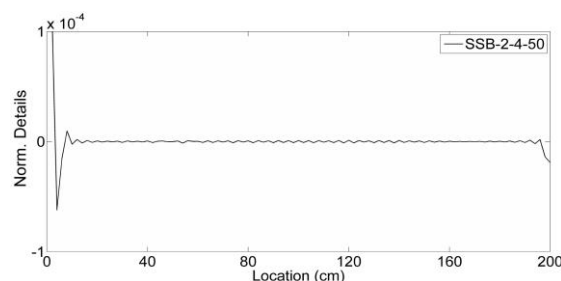
شکل ۵- نمودار تجزیه شده با sym2 برای تیر بدون آسیب



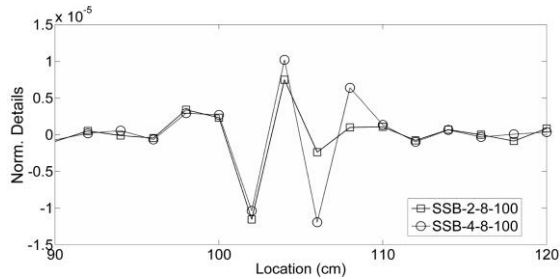
شکل ۶- نمودار تجزیه شده با sym2 برای تیر آسیب‌دیده

همانطور که مشاهده می‌شود ترک در ۲۰ سانتی‌متری تکیه‌گاه سمت چپ به صورت آشفتگی در مقادیر جزئیات سیگنال تجزیه شده، نمایان شده است.

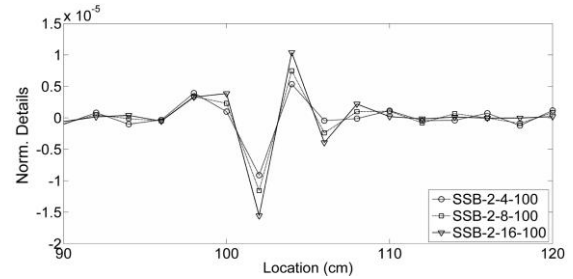
جهت تاثیر محل وقوع ترک در تشخیص آسیب می‌توان نمودارهای جزئیات سیگنال تغییر مکان را در مدل‌های دیگر رسم نمود.



شکل ۷- نمودار تجزیه شده با sym2 تیر آسیب‌دیده ($L_c=50\text{cm}$)

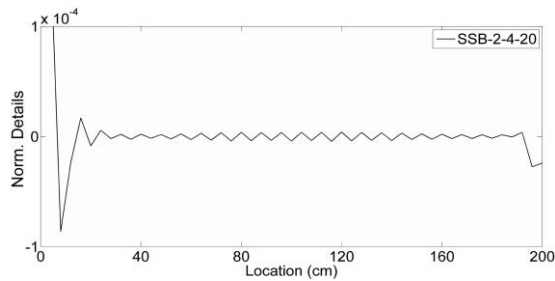
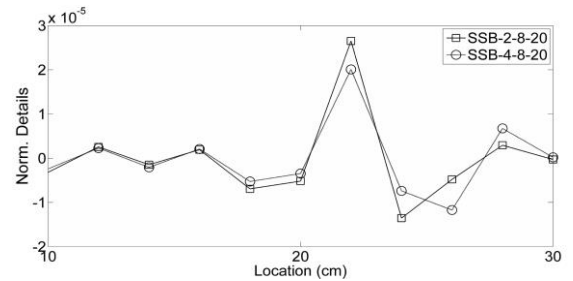


شکل ۱۴- نمودار جزئیات با دو عرض ترک در وسط دهانه

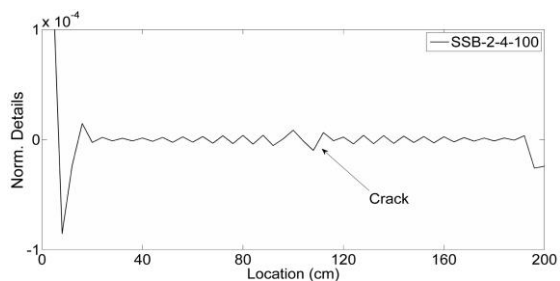
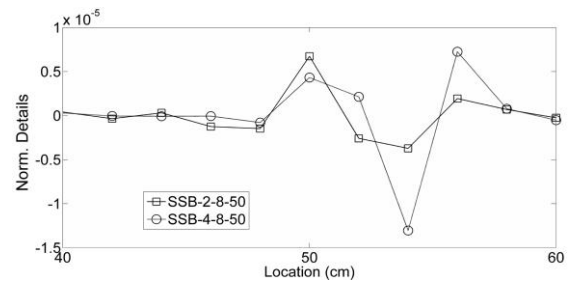
شکل ۱۱- نمودار جزئیات تغییر شکل با سه عمق ترک با $L_c=100\text{cm}$ (sym2)

شکل ۱۲ تا ۱۴ نشان‌دهنده این هستند که افزایش عرض ترک تأثیر چندانی در اغتشاشات نمودار ندارد و همان‌طور که مشاهده شد، تأثیر افزایش عمق ترک بیشتر از تأثیر افزایش عرض ترک می‌باشد.

نمودارهای فوق برای تعداد نقاط نمونه‌برداری برابر با ۱۰۰ عدد می‌باشد؛ از آنجایی که در عمل تغییر مکان نقاط مختلف تیر با استفاده از سنسورهای تغییر مکان سنج (LVDT) بدست می‌آید، و فراهم نمودن تعداد زیاد سنسور مشکل می‌باشد، حداقل تعداد نقاط نمونه‌برداری مهم می‌باشد. برای بررسی این موضوع نمودارهای مویک برای ۵۰ نقطه نمونه‌برداری رسم شده‌اند.

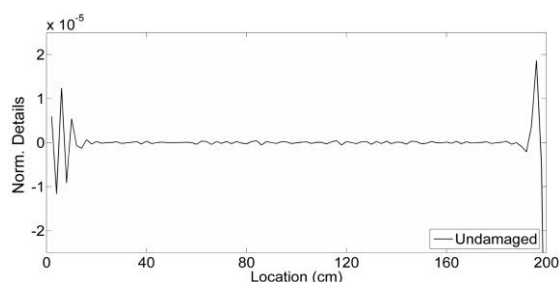
شکل ۱۵- نمودار تجزیه شده با sym2 تیر آسیب‌دیده $L_c=20\text{cm}$ برای ۵۰ نقطه نمونه برداری

شکل ۱۲- نمودار جزئیات با دو عرض ترک در محدوده ۲۰ سانتیمتری از تکیه‌گاه

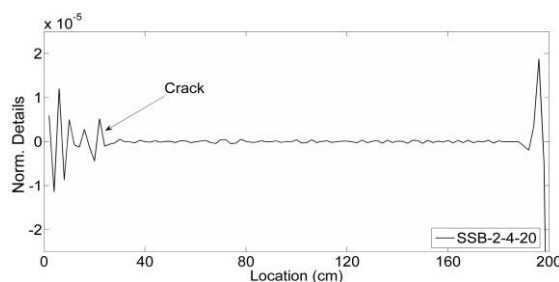
شکل ۱۶- نمودار تجزیه شده با sym2 تیر آسیب‌دیده $L_c=100\text{cm}$ برای ۵۰ نقطه نمونه برداری

شکل ۱۳- نمودار جزئیات با دو عرض ترک در فاصله ۵۰ سانتیمتری از تکیه‌گاه

لذا تعداد نقاط نمونه‌برداری بسیار مهم می‌باشد چون از طرفی نداشتن تعداد کافی از نقاط باعث کاهش کارایی روش می‌گردد و از سویی دیگر افزایش بیش از اندازه تعداد نقاط در کارهای عملی باعث افزایش هزینه طرح تشخیص خرابی و پایش سلامت می‌گردد. جهت بررسی اثر نوع تابع موجک مادر بر فرآیند تشخیص ترک در تیر، تجزیه سیگنال تغییر شکل استاتیکی تیر توسط تابع db4 نیز انجام شده است.



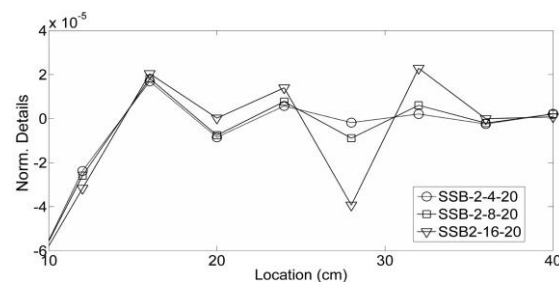
شکل ۱۹- نمودار تجزیه شده با db4 تیر بدون آسیب



شکل ۲۰- نمودار تجزیه شده با db4 تیر آسیب‌دیده

همانطور که از مقایسه شکل ۲۰ با شکل ۶ پیداست، عوض شدن تابع موجک مادر از sym2 به db4 باعث شد تشخیص آسیب در ترک نزدیک تکیه‌گاه آسان‌تر شود. حال اگر ترک در فاصله $L_c=50\text{cm}$ و $L_c=100\text{cm}$ بررسی شود، این نتیجه حاصل می‌شود که در db4 تشخیص وجود آسیب نسبت به sym2 آسان‌تر می‌باشد چراکه اغتشاشات نمودار db4 در محل آسیب دیدگی بیشتر از اغتشاشات sym2 می‌باشد. اما در مورد تشخیص محل آسیب، دقت این دو تابع در حد هم می‌باشند (شکل ۲۱ و ۲۲).

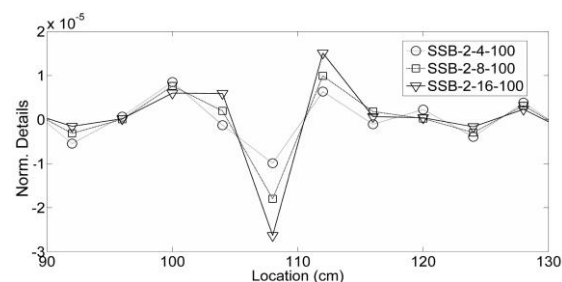
همان‌طور که در شکل ۱۵ دیده می‌شود، با کاهش تعداد نقاط نمونه‌برداری تغییر مکان قائم تیر از ۱۰۰ نقطه به ۵۰ نقطه، با تجزیه سیگنال تغییر شکل استاتیکی با استفاده از sym2 نمی‌توان به وجود یا عدم وجود ترکی به ابعاد $b_c = 2\text{cm}$ و $d_c = 4\text{cm}$ در نزدیکی تکیه‌گاه ($L_c = 20\text{cm}$) آگاهی یافت. ولی مطابق شکل ۱۶ ترکی با همین ابعاد در وسط دهانه با ۵۰ نقطه نمونه‌برداری و با استفاده از یک سطح تجزیه سیگنال تغییر شکل استاتیکی توسط موجک sym2 قابل تشخیص می‌باشد.



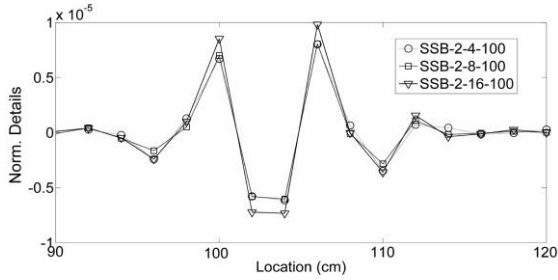
شکل ۱۷- نمودار جزئیات تغییر شکل با سه عمق ترک با $L_c=20\text{cm}$ توسط ۵۰ نقطه نمونه‌برداری (sym2)

در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود در صورتی که تعداد نقاط نمونه‌برداری به ۵۰ کاهش داده شود، تشخیص دقیق محل آسیب‌های نزدیک تکیه‌گاه به راحتی ممکن نخواهد بود و همانطور که روشن است sym2 آسیب را در حدود ۳۰ سانتی‌متری مشخص نموده است در صورتی که در مدل سازی اجزا محدود، ترک در ۲۰ سانتی‌متری از تکیه‌گاه سمت چپ مدل شده است.

همچنین در ترک‌های وسط دهانه هم به همین صورت است که علی‌رغم این که تشخیص وجود یا عدم وجود امکان پذیر می‌باشد ولی مکان دقیق آسیب قابل دستیابی نیست (شکل ۱۸).



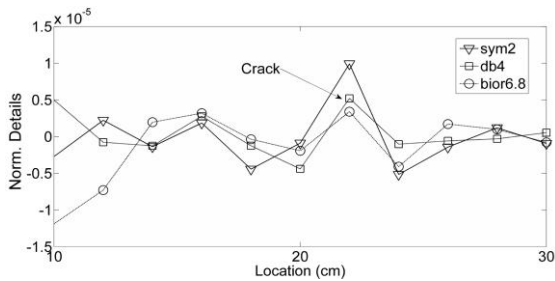
شکل ۱۸- نمودار جزئیات تغییر شکل با سه عمق ترک با $L_c=100\text{cm}$ توسط ۵۰ نقطه نمونه‌برداری (sym2)



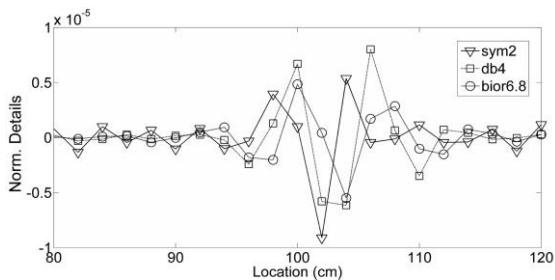
شکل ۲۴- نمودار جزئیات تغییر شکل با سه عمق ترک با
(db4) $L_c=100\text{cm}$

اما در ترک‌های وسط دهانه تیر دو سر ساده، حساسیت عمق ترک به میزان اغتشاشات کمتر می‌باشد. شکل ۲۴ نمودار تجزیه شده سیگنال تغییر شکل استاتیکی تیر که با ۱۰۰ نقطه نمونه برداری شده است را نشان می‌دهد و چون نمودارهای برای سه عمق مختلف ترک تقریباً بر روی هم افتاده‌اند لذا می‌توان گفت تابع db4 در امر تشخیص میزان ترک خوردگی در این نقطه موثر واقع نمی‌شود.

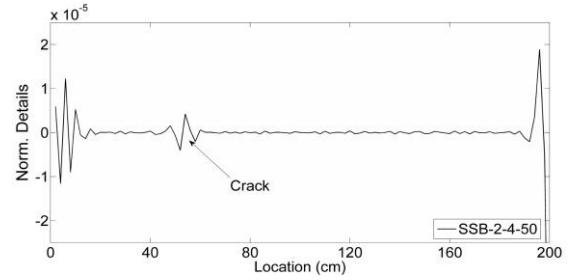
نهایتاً برای مقایسه بهتر سه تابع موجک، نمودارهای تجزیه شده با استفاده از سه موجک شکل ۲ رسم شده‌اند.



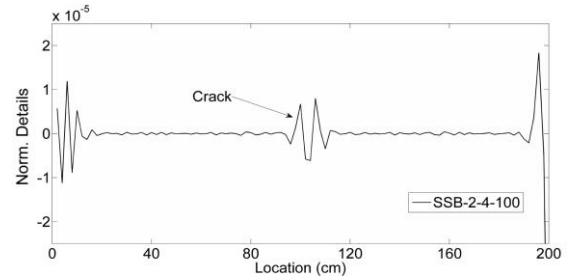
شکل ۲۵- نمودار جزئیات تغییر شکل
($L_c=20\text{cm}$ و $d_c=4\text{cm}$ و $b_c=2\text{cm}$)



شکل ۲۶- نمودار جزئیات تغییر شکل
($L_c=100\text{cm}$ و $d_c=4\text{cm}$ و $b_c=2\text{cm}$)

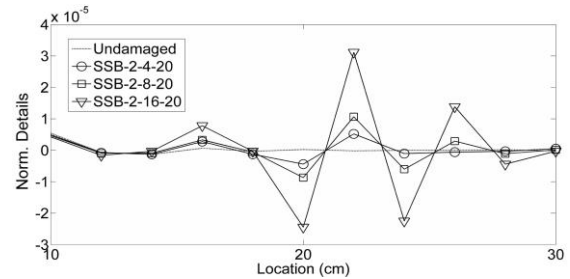


شکل ۲۱- نمودار تجزیه شده با db4 تیر آسیب‌دیده
($L_c=50\text{cm}$)



شکل ۲۲- نمودار تجزیه شده با db4 تیر آسیب‌دیده
($L_c=100\text{cm}$)

اگر نمودار تجزیه شده براساس موجک db4 در مقادیر مختلف عمق ترک رسم گردد، حساسیت میزان عمق ترک بر اغتشاشات نمودار را می‌توان تعیین نمود.

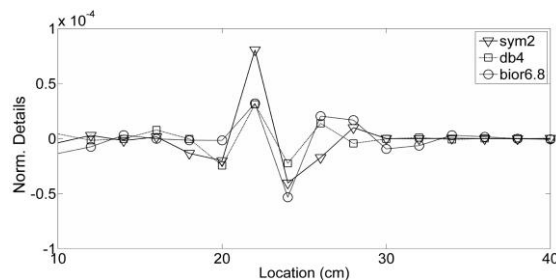


شکل ۲۳- نمودار جزئیات تغییر شکل با سه عمق ترک با
(db4) $L_c=20\text{cm}$

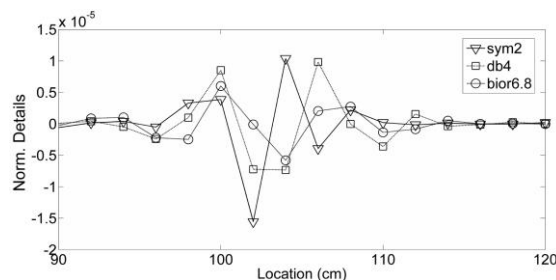
همانطور که در شکل ۲۳ نیز مشخص است در تبدیل db4 هم مانند تبدیل sym2 با افزایش عمق ترک، میزان اغتشاشات افزایش می‌یابد که این موضوع شدت خرابی را تخمین می‌زند.

تشخیص محل و میزان ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک

که یک تیر دو سر ساده با ابعاد و طول مشخص با سناریوهای مختلف خرابی مدل شده و پاسخ استاتیکی تغییر شکل قائم آن استخراج گردید. مشاهده شد که با مقایسه مستقیم پاسخ سازه سالم و آسیب دیده نمی‌توان به وجود و یا عدم وجود خرابی در تیر پی برد. ولی با تجزیه سیگنال تغییر شکل توسط تحلیل موجک خرابی‌ها آشکار می‌گردند. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌ها، عدم نیاز به پاسخ سازه سالم می‌باشد؛ چون در صورت وجود خرابی، در نمودار تجزیه شده تغییر شکل استاتیکی توسط موجک، اغتشاشاتی ایجاد می‌شوند؛ که بیانگر وجود خرابی در آن محل می‌باشند. نتایج نشان داد، که فاصله ترک احتمالی از تکیه‌گاه بسیار حائز اهمیت است؛ به طوری که هرچه ترک از تکیه‌گاه دور و به وسط دهانه نزدیک‌تر باشد، تشخیص وجود یا عدم وجود آسیب آسان‌تر است. ولی روش در تشخیص مقدار ترک‌های نزدیک تکیه‌گاه کارایی بیشتری دارد. همچنین براساس نتایج حاصل از تحلیل‌ها می‌توان گفت تاثیر افزایش عمق ترک بیشتر از عرض آن می‌باشد. از دیگر نکات مهم در این بحث، تعداد حداقل نقاط نمونه‌برداری برای تعیین تغییر شکل تیر می‌باشد؛ به طوری که در صورت نداشتن تعداد کافی نقطه نمونه‌برداری، این روش عملاً قادر به تشخیص ترک‌های نزدیک تکیه‌گاه نخواهد بود و همچنین تشخیص محل دقیق آسیب نیز به راحتی امکان پذیر نیست. در نهایت نتایج نشان می‌دهد که از میان سه تابع موجک بکار گرفته شده، تابع sym2 در شناسایی آسیب، کارایی بیشتری دارد.



شکل ۲۷- نمودار جزئیات تغییر شکل
($L_c=20\text{cm}$ و $d_c=16\text{cm}$ و $b_c=2\text{cm}$)



شکل ۲۸- نمودار جزئیات تغییر شکل
($L_c=100\text{cm}$ و $d_c=16\text{cm}$ و $b_c=2\text{cm}$)

شکل ۲۵ تا ۲۸ نشان دهنده آن است که در تمام حالات، تابع sym2 بیشترین اغتشاشات را در محدوده آسیب در نمودار ایجاد کرده است که می‌توان نتیجه گرفت که تابع sym2 تابع مناسبی برای آگاهی یافتن از وجود یا عدم وجود خرابی در سازه تیر مدل شده و همچنین مکان‌یابی آسیب‌های احتمالی در تیر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق مطالعه‌ای بر روی تبدیل موجک و کاربرد آن در تشخیص آسیب در تیرها انجام شد؛ بدین صورت

۵- مراجع

- [1] Douka, E., Loutridis, A., Trochidis, A. (2003). "Crack Identification in Beams Using Wavelet Analysis". Journal of Solids and Structures, Vol. 40, pp. 3557–3569.
- [2] Ovanesova, A.V., Soares, L.E. (2004). "Application of Wavelet Transform to Damage Detection in Frame Structures". Journal of Engineering Structure, Vol. 26, pp. 39–49.
- [3] Khatam, H., Golafshani, A.A. (2004). "Damage Detection in Beam Using Wavelet Transform". M.Sc. Dissertation, Sharif University of Technology (in Persian).
- [4] Zhu, X.Q., Law, S.S. (2006). "Wavelet-Based Crack Identification of Bridges Beam from Operational Deflection Time History". Journal of Solids and Structures, Vol. 43, pp. 2299–2317.

- [5] Gokdag, H., Kopmaz, O. (2009). "A New Damage Detection Approach for Beam-Type Structures Based on the Combination of Continuous and Discrete Wavelet Transforms". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 324, pp. 1158–1180.
- [6] Bagheri, G., Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M. (2010). "Structural Damage Identification of Plates Based on Modal Data Using 2d Discrete Wavelet Transform". *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 40, pp. 13–28.
- [7] Bagheri, G., Ghodrati Amiri, G., Seyed Razzaghi, S.A. (2009). "Vibration - Based Damage Identification of Plates Structure via Curvelet Transform". *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 327, pp. 593–603.
- [8] Ghodrati Amiri, G., Bagheri, G., Seyed Razzaghi, S.A., Asadi, A. (2009). "Structural Damage Detection in Plates Using Wavelet Transform". *Proceedings of the Fifth International Structural Engineering and Construction Conference (ISEC-5)*, Las Vegas, USA, Sept. 22-25.
- [9] Rucka, M. (2011). "Damage Detection in Beam Using Wavelet Transform on Higher Vibration Modes". *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, Vol. 49, pp. 399–417.
- [10] Rao, K.R., Kim, D.N., Hwang, J.J. (2005), "Fast Fourier Transform: Algorithms and Applications". Springer, Berlin Heidelberg.
- [11] Daubechies, I. (1990). "The Wavelet Transform, Time – Frequency Localization and Signal Analysis". *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 36, pp. 961–1005.
- [12] Chui, C.K. (1992), "An Introduction to Wavelets". Academic Press, San Diego, CA.
- [13] Newland, D.E. (1993), "An Introduction to Random Vibration, Spectral & Wavelet Analysis". Dover Publication, Inc., Mineola, NY.
- [14] Burrus, C.S., Gopinath, R.A., Guo, H., (1998), "Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms". Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey.
- [15] Stark, H.G. (2005), "Wavelets and Signal Processing an Application-Based Introduction". Springer, Berlin Heidelberg.
- [16] Mallat, S. (2009), "A Wavelet Tour of Signal Processing The Sparse Way". Academic Press, San Diego, CA.
- [17] Misiti, M., Misiti, Y., Oppenheim, G., Poggi, J.M. (2002), "Wavelet Toolbox for Use with MATLAB". The Math Works, Inc., Hill Drive Natick, MA.