

بهبود سیستم پایش سلامت سازه در شناسایی محل ترک‌های ریز تیر با استفاده از تبدیل موجک و فیلتر دیجیتال

سید امیر فرهاد قاضی میرسعید^۱، محسن معدنی^{۲*}، مهدی زارع^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۱۰/۰۸	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸	
واژگان کلیدی:	
پایش سلامت ساختمان،	
تبدیل موجک،	
فیلتر دیجیتال،	
تشخیص ترک.	

سیستم‌های پایش سلامت ساختمان با ارزیابی پارامترهای متعددی از سلامت سازه، تلاش در تشخیص زود هنگام خرابی و پیشگیری از گسترش آن دارند. یکی از مهمترین اجزای یک ساختمان، تیرهای آن است که وقوع هرگونه ترک یا آسیب در آنها می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیر مالی و جانی در پی داشته باشد. استفاده از حسگرهای جابه‌جایی و تحلیل داده‌های آن، یکی از روش‌های پایش سلامت سازه و تشخیص ترک و آسیب در آن می‌باشد. در این میان، تبدیل موجک از متداول‌ترین ابزارهای تشخیصی محسوب می‌شود، ولی به تنهایی قادر به تشخیص ترک‌های ریز (آغاز فرآیند ترک‌خوردگی) نیست. در این تحقیق، روشی مبتنی بر ترکیب تبدیل موجک گسسته و فیلتر دیجیتال جهت آشکار سازی آسیب‌های ریز تیر طره بتن مسلح پیشنهاد شده است. حالت‌های مختلف خرابی با استفاده از نرم افزار Abaqus شبیه‌سازی شده، و شکل‌های مودی حاصل به کمک نرم افزار MATLAB تحت تبدیل موجک گسسته و فیلتر دیجیتال تحلیل شده است. نتایج بیانگر عملکرد بسیار دقیق روش پیشنهادی و تشخیص ترک‌های ریز در حد میلی‌متر است که نشان‌دهنده بهبود حدود ۱۰ برابری دقت نسبت به کارهای پیشین می‌باشد.

۱- مقدمه

پیشرفت بسیاری کرده و به حد بحرانی رسیده است. تبدیل موجک، یکی از روش‌های متداول و کاربردی در تشخیص محل آسیب محسوب می‌شود که عملکرد خوبی در آشکار سازی ترک‌های عادی از خود نشان داده است، ولی به تنهایی قادر به تشخیص ترک‌های ریز در ابعاد میلی‌متری (آغاز فرآیند ترک‌خوردگی) نیست. در این مقاله، روشی برای بهبود دقت سیستم پایش سلامت سازه و تشخیص ترک‌های ریز، مبتنی بر ترکیب تبدیل موجک و فیلتر بالاگذر دیجیتال ارائه شده است. نتایج بیانگر عملکرد بسیار مناسب روش پیشنهادی، تشخیص ترک‌های ریز در حد میلی‌متر، و بهبود حدود ۱۰ برابری دقت نسبت به کارهای پیشین می‌باشد.

پایش سلامت سازه‌ها و تشخیص خرابی در بدو این فرآیند، نقش موثری در انجام به موقع اقدامات و پیشگیری از پیشرفت آن دارد. بسیاری از سازه‌های بلند مرتبه در حال تخریب تدریجی می‌باشند ولی به دلیل مجهز نبودن به سیستم پایش سلامت سازه (SHM^۲) تنها در زمان بحرانی خرابی قابل تشخیص خواهد بود. در مبحث پایش سلامت سازه‌ها، آشکار سازی محل شروع خرابی بسیار حائز اهمیت است. اندازه‌گیری جابه‌جایی سازه با استفاده از حسگرها، یکی از روش‌های ارزیابی آسیب محسوب می‌گردد. این در حالی است که معمولاً تشخیص آسیب با بررسی داده‌های خام حسگرها امکان‌پذیر نیست، مگر در شرایطی که خرابی

*پست الکترونیک نویسنده مسئول: maadani@qodsiau.ac.ir

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مخابرات سیستم، گروه برق، واحد شهرقدس،

دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲. استادیار گروه برق، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

² Structural Health Monitoring (SHM)

۲- مطالعات انجام شده:

یکی از اولین کارها در زمینه تشخیص محل و میزان ترک تیر طره‌ای با استفاده از تبدیل موجک، در سال ۲۰۰۳ توسط دوکا و همکاران به انجام رسید [۱]. در سال ۲۰۰۴، اونسوا و همکار، پایش سلامت یک تیر و قابک دهانه را تحت بار استاتیکی و دینامیکی، به کمک روش‌های مختلف تبدیل موجک مورد بررسی قرار دادند. مشاهده گردید که آسیب دیدگی سازه از داده‌های خام قابل تشخیص نیست ولی سبب اغتشاش در پاسخ سازه می‌گردد. این عدم یکنواختی را می‌توان به کمک ضرایب تبدیل موجک پیوسته یا سیگنال جزئی حاصل از تبدیل موجک گسسته مشخص کرد. نتایج بیانگر این است که موقعیت آسیب با دقت بالایی قابل تشخیص می‌باشد [۲]. در سال ۲۰۰۶، ژو و همکار روشی بر مبنای تبدیل موجک جهت بررسی تاریخچه زمانی تغییر مکان یک تیر تحت بار متحرک و تشخیص ترک خوردگی ارائه دادند. در این تحقیق مدل عددی و آزمایشگاهی یک تیر و تبدیل موجک پیوسته برای تعیین موقعیت آسیب به کار گرفته شد. علاوه بر این، شاخصی برای تخمین عمق ترک خوردگی ارائه گردید [۳]. در سال ۲۰۰۹، گوکداگ و همکار، با ترکیب تبدیل موجک پیوسته و گسسته، به آشکارسازی آسیب در تیرها پرداختند. در این روش به کمک تبدیل موجک گسسته، یک تقریب مناسب بیانگر حالت سالم سازه استخراج می‌گردد و می‌توان از اختلاف بین ضرایب تبدیل موجک پیوسته حالت آسیب دیده و تابع تقریبی متناظر با سازه سالم به عنوان شاخص مناسبی برای تخمین خسارت سازه استفاده نمود [۴].

در سال ۱۳۹۳، عزالدین و همکاران، به مطالعه بر روی تبدیل موجک و کاربرد‌های آن در تشخیص آسیب پرداختند. در این تحقیق، یک تیر دو سر ساده با ابعاد و طول مشخص، در سناریوهای مختلف خرابی مدل شد و پاسخ استاتیکی تغییر شکل قائم آن استخراج گردید. مشاهده شد که به کمک تجزیه سیگنال تغییر شکل توسط تحلیل موجک، خرابی‌ها قابل آشکارسازی می‌باشند [۵]. در سال ۱۳۹۵، عارف زاده و همکاران، مطالعه‌ای بر روی کاربرد تبدیل موجک در شناسایی آسیب‌های چندگانه تیرهای بتنی انجام دادند. در این روش، یک تیر بتن آرمه با ابعاد مشخص، در سناریوهای مختلف خرابی مدلسازی

شد و خرابی‌ها به کمک تجزیه سیگنال شکل مودی توسط آنالیز موجک آشکار شدند. همچنین مشاهده گردید که موجک گسسته نسبت به موجک پیوسته، پاسخ بهتری از خود نشان می‌دهد و با افزایش مرتبه مودی، امکان شناسایی آسیب افزایش می‌یابد [۶].

در سال ۱۳۹۵، نادرپور و همکاران، روشی برای پایش سلامت سازه و شناسایی و ارزیابی خسارت پس از زلزله به کمک تبدیل موجک ارائه دادند. چهار زلزله با شدت مختلف به همراه یک نوفه سفید در ابتدا و پس از هر زلزله بر مدل سازه هفت طبقه دارای دیوار برشی وارد گردید. سپس با اعمال تبدیل موجک بر پاسخ شتاب سازه ناشی از زلزله، ارزیابی آسیب صورت گرفت [۷].

احمدنژاد و همکاران در سال ۱۳۹۷ روشی جدید مبتنی بر تبدیل موجک جهت آشکارسازی خرابی در سازه‌های صفحه‌ای (مانند پل و دیوار) ارائه دادند. در این تحقیق، با استفاده از تعداد محدودی حسگر و تحلیل انرژی موجک پیوسته، تعیین محل خرابی صورت می‌گیرد و نیازی به محاسبه اشکال مودی نمی‌باشد [۸].

در کلیه تحقیقات پیشین، تنها ترک‌ها با ابعاد عادی قابل تشخیص هستند و ترک‌های ریز ایجاد شده در آغاز خرابی آشکار نمی‌شوند. در این مقاله، روشی مبتنی بر ترکیب تبدیل موجک گسسته و فیلتر دیجیتال جهت بهبود دقت آشکارسازی ارائه شده است.

۳- تبدیل موجک و فیلتر دیجیتال

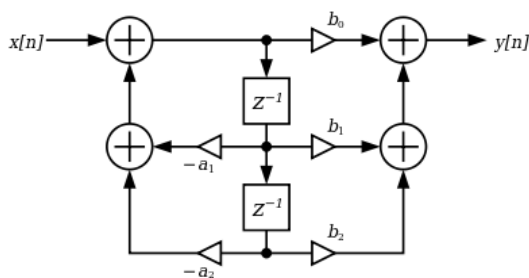
در این بخش به معرفی تبدیل موجک و فیلتر دیجیتال مورد استفاده می‌پردازیم.

۳-۱- تبدیل موجک

تبدیل موجک، یک تحلیل زمان-فرکانس است که به کمک پنجره بندی زمانی انجام می‌شود [۹]. این روش در مقایسه با روش تبدیل فوریه، اطلاعات حوزه زمان شامل لحظه وقوع تغییرات در سیگنال را از بین نمی‌برد. به این ترتیب، تبدیل موجک قادر است مشخصات سیگنال را در زمان مشخص و فرکانس معین بیان کند. این امر با بررسی ضرایب موجک محقق خواهد شد. در حالت کلی، تبدیل موجک، به دو نوع پیوسته و گسسته تقسیم می‌شود که در این مقاله، تبدیل موجک گسسته با توجه به کارایی بهتر مورد استفاده قرار گرفته است [۶]. برخی از تبدیل‌های موجک متداول در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۱- خانواده تبدیل های موجک متداول

نام کوتاه	نام کامل
'haar'	Haar
'db'	Daubechies
'sym'	Symlets
'coif'	Coiflets
'bior'	Biorthogonal
'rbio'	Reverse biorthogonal
'meyr'	Meyer
'dmey'	Discrete approximation of meyer
'gaus'	Gaussian
'mexh'	Mexican hat
'morl'	Morlet
'cgau'	Complex Gaussian
'shan'	Shannon
'fbsp'	Frequency b-spline
'cmor'	Complex morlet
'fk'	Fejer-korovkin



شکل ۵- فیلتر دیجیتال IIR [۱۲]

$$H(z) = \frac{(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots)}{(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots)} \quad (1)$$

صفرهای تابع تبدیل، باند حذف و قطب‌های آن، باند گذر فیلتر را تنظیم می‌کنند. هرچه فاصله اقلیدسی صفر/قطب نسبت به مبدا مختصات کمتر باشد، پهنای باند حذف/گذر فیلتر افزایش خواهد یافت.

در این تحقیق، به صورت تجربی و با آزمودن حالت‌های مختلف صفر و قطب در فیلترهای درجه اول (جهت حفظ سادگی محاسبات)، ملاحظه گردید که فیلتر با تابع تبدیل رابطه (۲) بهترین عملکرد را در حالات مختلف ترک‌های عادی (با ابعاد سانتی‌متر) از خود نشان می‌دهد. این فیلتر پایین‌گذر بوده، دارای قطب و صفری در 0.2 و 0.5 و فرکانس قطع $32, \pi$ است. در ادامه خواهیم دید که در ترک‌های سانتی‌متری، استفاده از فیلتر اکثراً شدت اعوجاج

لازم به ذکر است که از پردازش تصویر نیز می‌توان در تشخیص ترک استفاده کرد، ولی تبدیل موجک حجم محاسباتی بسیار کمتری از پردازش تصویر داشته، امکان تمرکز بر هر دو فضای زمان و فرکانس را به‌طور همزمان فراهم می‌کند [۱۰]. از طرفی، پردازش تصویر نیاز به حجم داده ورودی بیشتری دارد. همچنین، به کمک تبدیل موجک و نصب تعداد مناسبی از حسگرها، می‌توان محل آسیب را با دقت قابل قبولی تعیین نمود [۱۱].

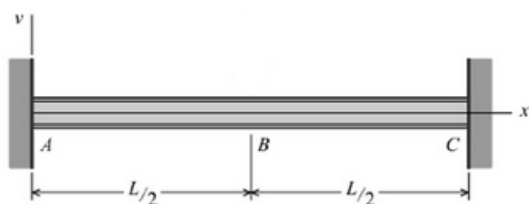
عملکرد توابع موجک در تشخیص ترک در مقالات مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است، و نتایج این تحقیقات بیانگر عملکرد موفق‌تر موجک‌های **sym2** و **db4** می‌باشد [۵] و [۶] و [۱۲]. بنابراین این موجک‌ها به عنوان پایه کار مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

۳-۲- فیلتر دیجیتال

در این تحقیق، از فیلتر پاسخ ضربه نامحدود (IIR*) استفاده شده است [۱۲]. این فیلترها، توابعی با صفر و قطب هستند که برای پایداری سیستم، تمامی قطب‌ها باید داخل دایره واحد طراحی شوند. برای آنکه فاز سیستم IIR محدود گردد باید صفرهای آن نیز داخل دایره واحد باشند. فیلترهای IIR ای که صفر و قطب آنها داخل دایره واحد باشند فیلتر دارای مینیمم فاز محسوب می‌شوند. یک فیلتر IIR به صورت شکل (۱) تعریف می‌شود و رابطه (۱) تابع تبدیل آن را نمایش می‌دهد:

* Infinite Impulse Response (IRR)

دو سر مفصل ۲ متری (L) با مدول الاستیسیته 250000 MPa ، ضریب پواسون ۰٫۲، و چگالی 2400 kg/m^3 [۵] در نرم افزار Abaqus استفاده شده است (شکل ۲). ابعاد سطح مقطع نیز در شکل (۳) ارائه شده است. ترک، طبق سناریوهای مشخص شده در جدول ۲ اعمال، و پس از اندازه‌گیری تغییر مکان، از اعمال تبدیل موجک گسسته جهت آشکارسازی آسیب استفاده می‌شود. در انتها، روشی برای بهبود آشکارسازی ترک های ریز ارائه خواهد شد.



شکل ۲-تیر دو سر مفصل [۵]

شکل موج خروجی را افزایش میدهد. البته در یک مورد نیز موجب تشخیص می‌گردد.

$$H(z) = \frac{(4+2z^{-1})}{(1+0.2z^{-1})} \quad (2)$$

از طرفی جهت ترک‌های ریز میلی‌متری، فیلتر رابطه (۳) بهترین عملکرد را حاصل نمود که یک فیلتر بالاگذر با صفر و قطب ۰٫۲۵ و ۰٫۲، و فرکانس قطع $\pi 0.77$ و $\pi 1.23$ می‌باشد. این امر نشان‌گر بالابودن فرکانس ذاتی ترک‌های در حد میلی‌متر است. در ادامه خواهیم دید که این ترک‌ها تنها با استفاده از اعمال فیلتر بالاگذر پیشنهادی قابل شناسایی خواهند بود.

$$H(z) = \frac{(40+z^{-1})}{(1+0.2z^{-1})} \quad (3)$$

۴-مدل سازی و تشخیص آسیب

در سناریوی ارزیابی روش پیشنهادی، از مدلسازی یک تیر

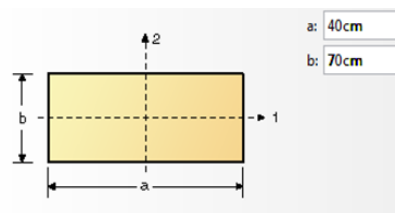
جدول ۲- سناریو های مختلف خرابی

نام مدل	عرض ترک (cm)	عمق ترک (cm)	محل ترک (cm)	نام مدل	عرض ترک (cm)	عمق ترک (cm)	محل ترک (cm)
SSB-2-4-20	۲	۴	۲۰	SSB-4-4-50	۴	۴	۵۰
SSB-2-8-20	۲	۸	۲۰	SSB-4-8-50	۴	۸	۵۰
SSB-2-16-20	۲	۱۶	۲۰	SSB-4-16-50	۴	۱۶	۵۰
SSB-4-4-20	۴	۴	۲۰	SSB-2-4-100	۲	۴	۱۰۰
SSB-4-8-20	۴	۸	۲۰	SSB-2-8-100	۲	۸	۱۰۰
SSB-4-16-20	۴	۱۶	۲۰	SSB-2-16-100	۲	۱۶	۱۰۰
SSB-2-4-50	۲	۴	۵۰	SSB-4-4-100	۴	۴	۱۰۰
SSB-2-8-50	۲	۸	۵۰	SSB-4-8-100	۴	۸	۱۰۰
SSB-2-16-50	۲	۱۶	۵۰	SSB-4-16-100	۴	۱۶	۱۰۰

تشخیص نیست. در ادامه به بررسی عملکرد تبدیل موجک و روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف می‌پردازیم.

۴-۱- ترک‌های عادی

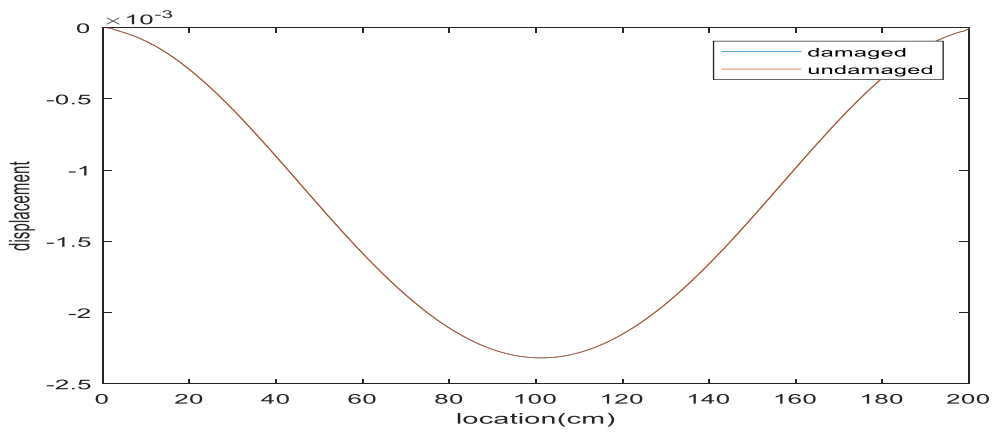
نتیجه تجزیه توسط تبدیل موجک $\text{sym}2$ تیر سالم در شکل (۵) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، هیچ اغتشاشی وجود ندارد. نتیجه اعمال تبدیل موجک به تنهایی، و به همراه فیلتر دیجیتال پیشنهادی در تیر آسیب دیده در فاصله 20 cm از تکیه گاه سمت چپ به ترتیب در شکل‌های (۶) و (۷) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، آسیب در هر دو حالت قابل تشخیص است، ولی



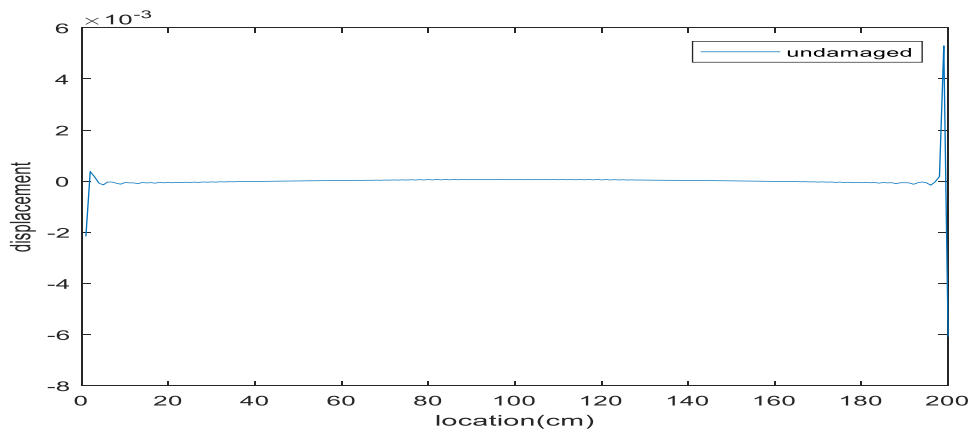
شکل ۳- مشخصات سطح مقطع تیر

شکل (۴)، جابه‌جایی اندازه‌گیری شده تیر برای دو حالت سالم و آسیب دیده به‌ازای محل، عمق و عرض ترک به ترتیب ۲، ۴ و ۲ سانتی‌متر را نشان داده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، آسیب با استفاده از داده‌های خام قابل

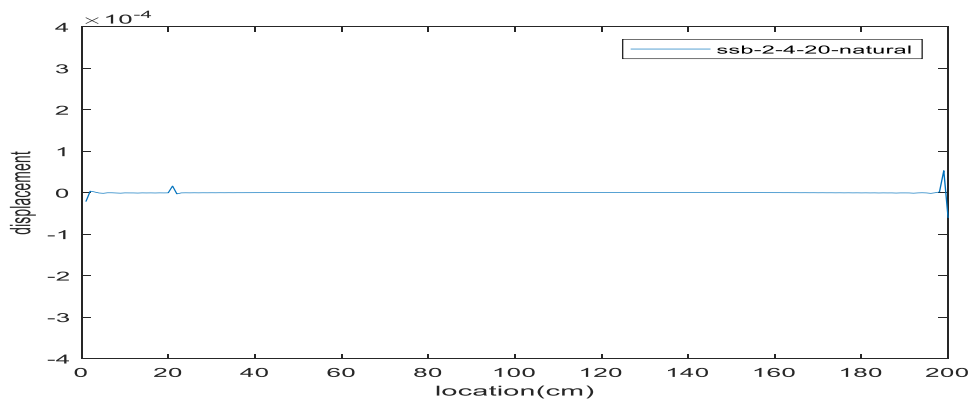
دامنه تغییرات به کمک فیلتر تقویت شده است.



شکل ۴- تغییر شکل در دو حالت سالم و آسیب دیده



شکل ۵- نمودار تجزیه شده توسط تبدیل موجک sym2 برای تیر سالم

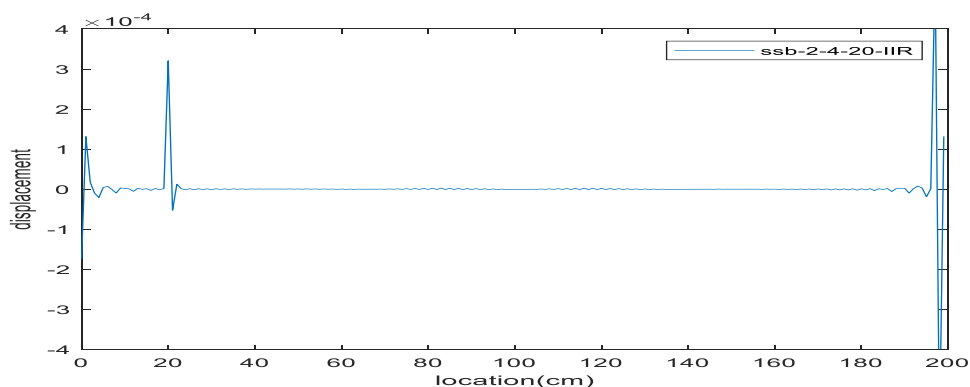


شکل ۶- نمودار تجزیه شده توسط تبدیل موجک sym2 برای تیر آسیب دیده در فاصله ۲۰ cm [۵]

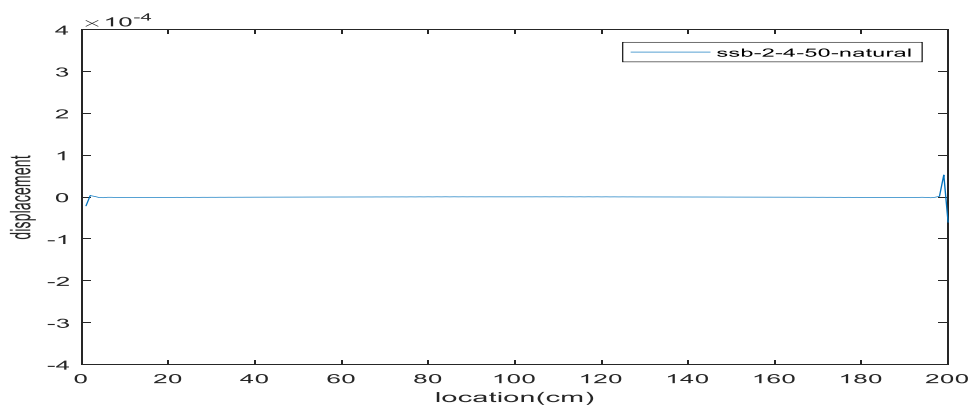
آسیب نیست [۵]، در حالی که روش پیشنهادی از قدرت تشخیص خوبی برخوردار است.

نتایج به‌ازای آسیب در میانه تیر در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) ارائه شده و برتری پاسخ روش پیشنهادی مشهود است.

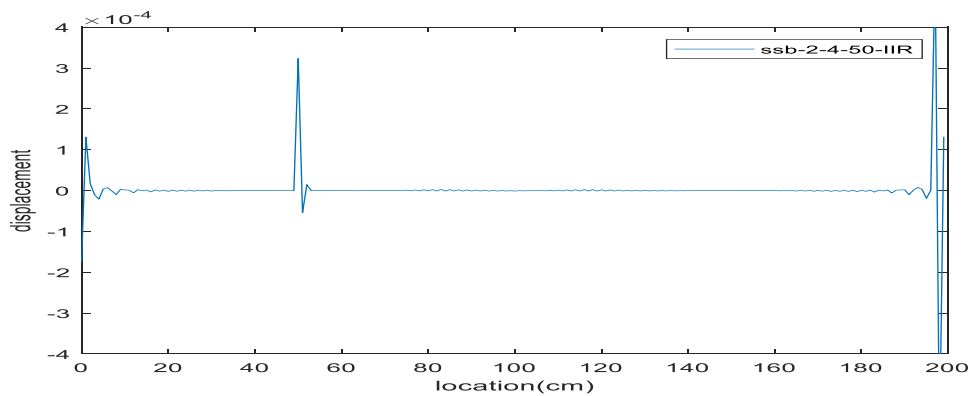
شکل‌های (۸) و (۹) به ترتیب نتیجه اعمال تبدیل موجک sym2 به تنهایی، و با اعمال فیلتر پیشنهادی در یک تیر با آسیب در فاصله ۵۰ cm را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، تبدیل موجک sym2 قادر به تشخیص



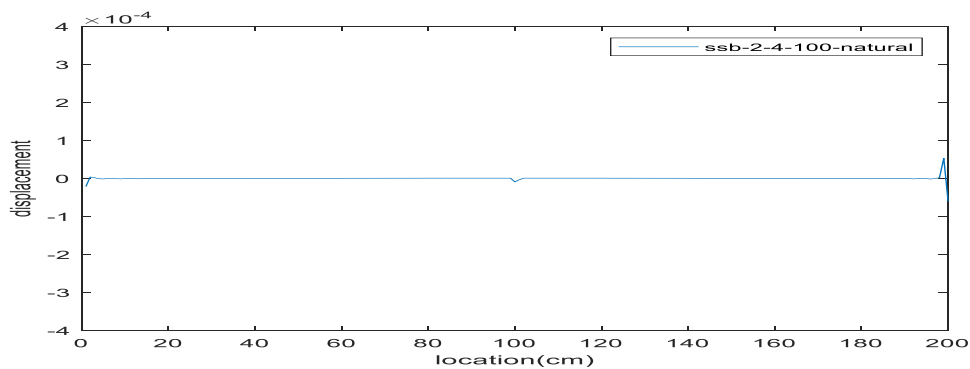
شکل ۷- اعمال فیلتر دیجیتال پیشنهادی بر تابع جزئیات موجک sym2 برای تیر آسیب دیده در فاصله ۲۰ cm



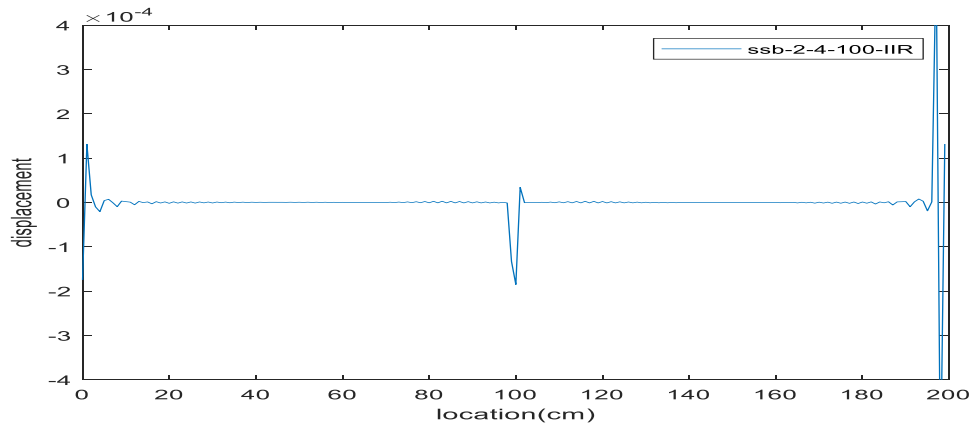
شکل ۸- نمودار تجزیه شده توسط تبدیل موجک sym2 برای تیر آسیب دیده در فاصله ۵۰ cm [۵]



شکل ۹- اعمال فیلتر دیجیتال پیشنهادی بر تابع جزئیات موجک sym2 برای تیر آسیب دیده در فاصله ۵۰ cm

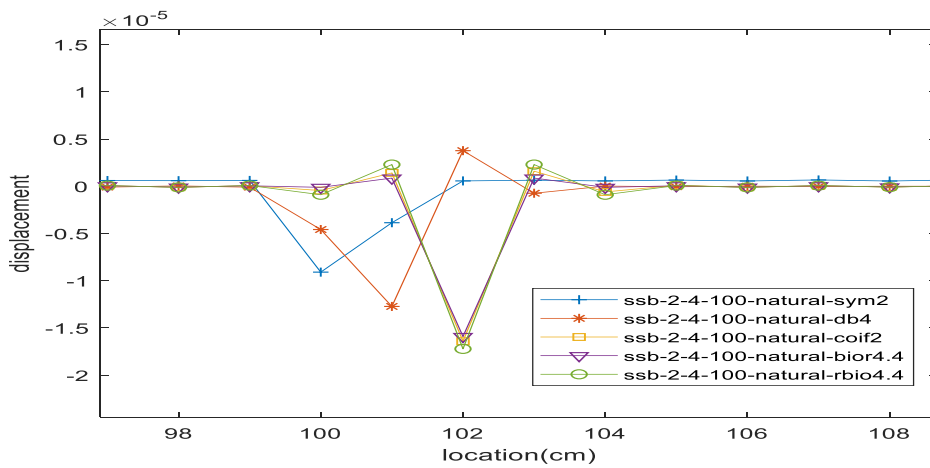


شکل ۱۰- نمودار تجزیه شده توسط موجک sym2 برای تیر آسیب دیده در فاصله ۱۰۰ cm [۵]

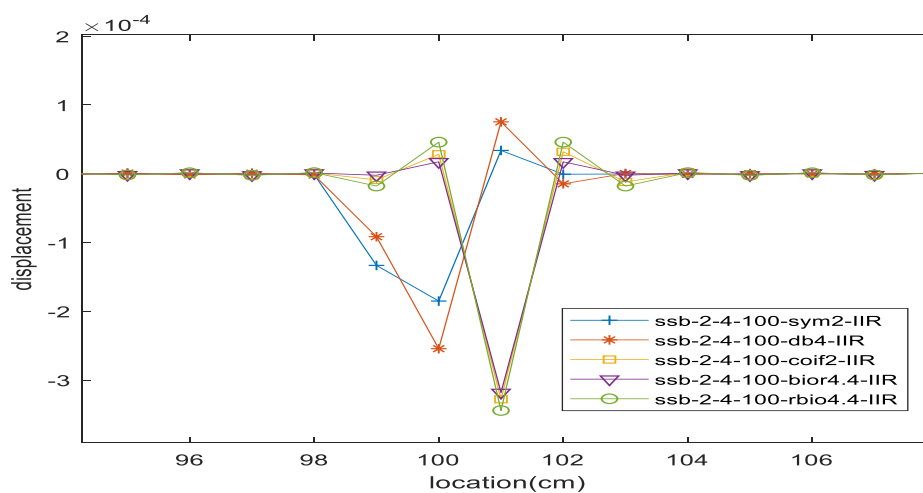


شکل ۱۱- اعمال فیلتر دیجیتال پیشنهادی بر تابع جزئیات موجک sym2 برای تیر آسیب دیده در فاصله ۱۰۰ cm

در ادامه به بررسی عملکرد سایر تبدیل‌های موجک در تشخیص آسیب می‌پردازیم. برای نمونه، آسیب میانه تیر و (۱۴) مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۳- مقایسه موجک‌های مختلف در فاصله ۱۰۰cm، برای فیلتر به تنهایی



شکل ۱۴- مقایسه موجک‌های مختلف در فاصله ۱۰۰cm، پس از اعمال فیلتر پیشنهادی

در شکل (۱۳) ملاحظه می‌شود که تنها به ازای sym2 موقعیت آسیب (۱۰۰ سانتی متر) با پیک اغتشاش تناظر دارد و به ازای سایر موجک‌ها پیک در فاصله ۱۰۱ یا ۱۰۲ سانتی متر رخ داده است. شکل (۱۴) نشان می‌دهد که با

می‌پردازیم. سناریوهای مورد بررسی در جدول ۳ ارائه شده-
اند. نتایج اعمال فیلتر به همراه موجک‌های db4, colf2, sym2 و rbio4.4 به ترتیب در شکل های ۱۵ الی ۱۸ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که هیچیک از موجک‌ها به تنهایی قابلیت تشخیص آسیب را ندارند، ولی اعمال فیلتر موجب آشکارسازی می‌گردد و پاسخ موجک db4 از همه مناسب تر است.

لازم به ذکر است که برای ترک‌های ریز، فیلتر بالاگذر رابطه (۳) مورد استفاده قرار گرفته است.

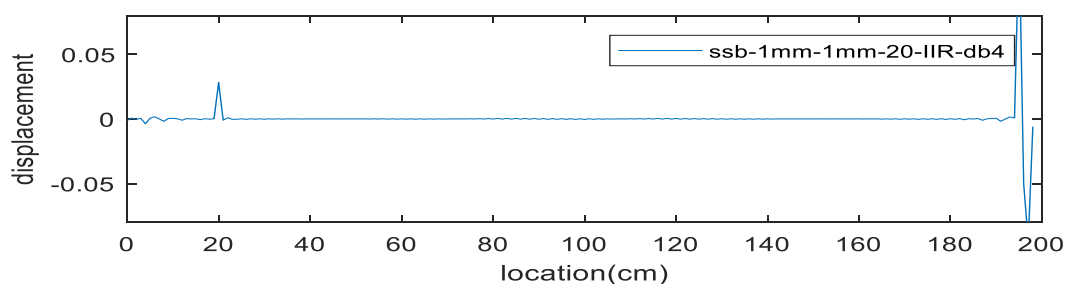
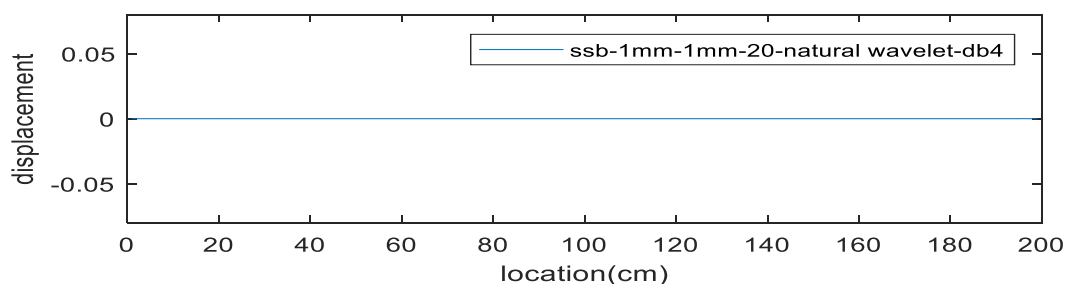
اعمال فیلتر پیشنهادی، پیک نتیجه موجک sym2 و db4 در محل آسیب است و خطای سایر موجک‌ها نیز به ۱ سانتی‌متر کاهش یافته است. رفتار در سایر فواصل آسیب نیز مشابه است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که دو موجک db4 و sym2 با ترکیب فیلتر دیجیتال بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهند.

۴-۲- ترک‌های ریز

در ادامه، به بررسی قابلیت تشخیص ترک‌های ریز میلی‌متری توسط تبدیل موجک و روش پیشنهادی

جدول ۳- سناریوهای مختلف خرابی‌های ریز

نام مدل	عرض ترک (mm)	عمق ترک (mm)	محل ترک (cm)
SSB-1mm -1mm -20	۱	۱	۲۰
SSB-1mm -1mm -50	۱	۱	۵۰
SSB-1mm-1mm-100	۱	۱	۱۰۰



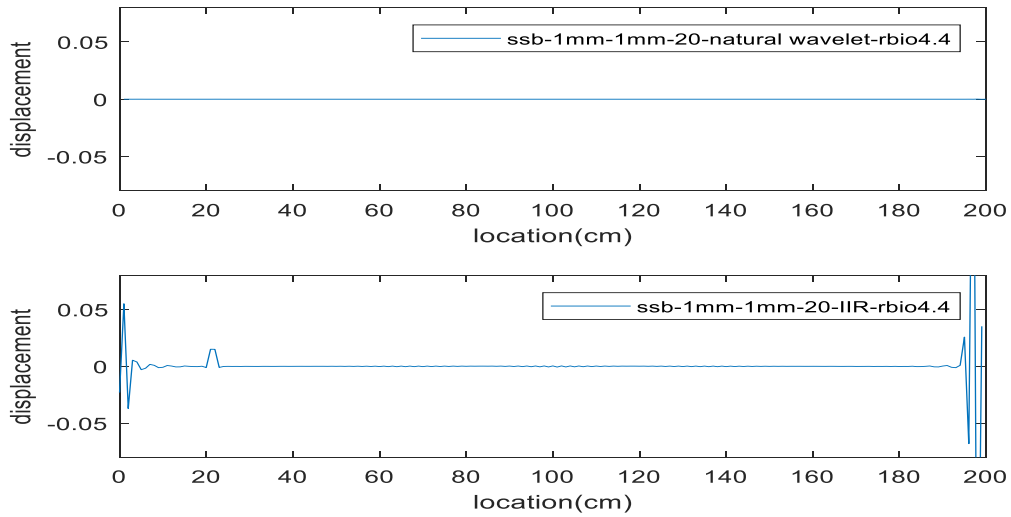
شکل ۱۵- تاثیر فیلتر بر آشکارسازی خرابی طبق جدول ۳ در فاصله ۲۰ cm به‌ازای db4

محل آسیب اختلالی ایجاد نکرده است. اما با تعداد بیشتر نقاط نمونه برداری، دقت تعیین محل آسیب افزایش می‌یابد.

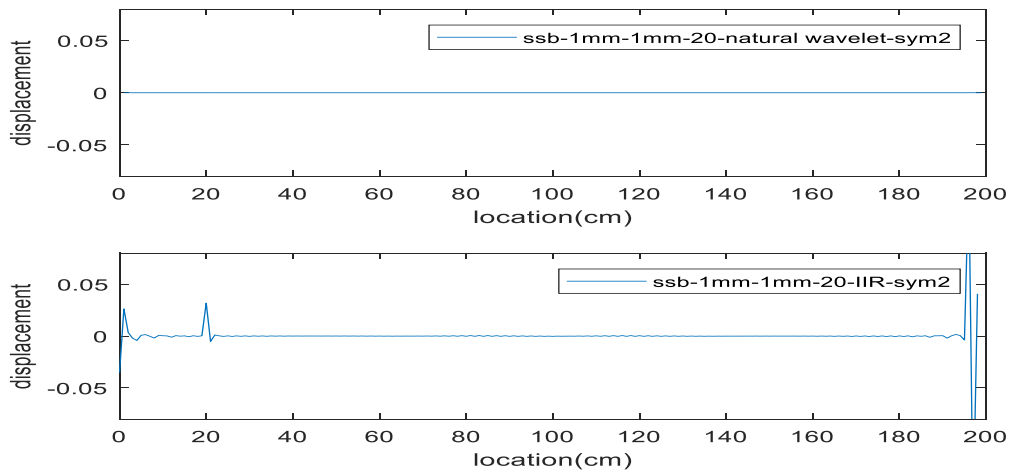
اثر تغییر عرض ترک در شکل (۲۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که افزایش عرض ترک، تاثیر چندان زیادی در قابلیت تشخیص آسیب ندارد، تنها کمی دقت تشخیص محل آسیب را کاهش می‌دهد.

عملکرد ترکیب db4 و فیلتر در فواصل ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متر به ترتیب در شکل‌های (۱۹) و (۲۰) ارائه شده است. ملاحظه می‌شود که روش پیشنهادی به خوبی از عهده تشخیص بر آمده است.

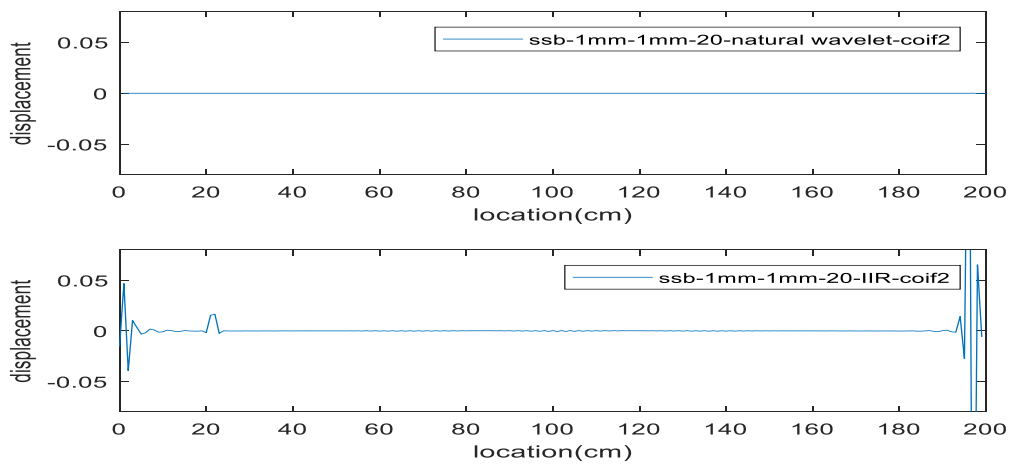
شکل (۲۱)، قابلیت تشخیص خرابی روش پیشنهادی در فواصل مختلف را به‌ازای کاهش تعداد نمونه‌ها به ۵۰ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که این امر در قابلیت تشخیص



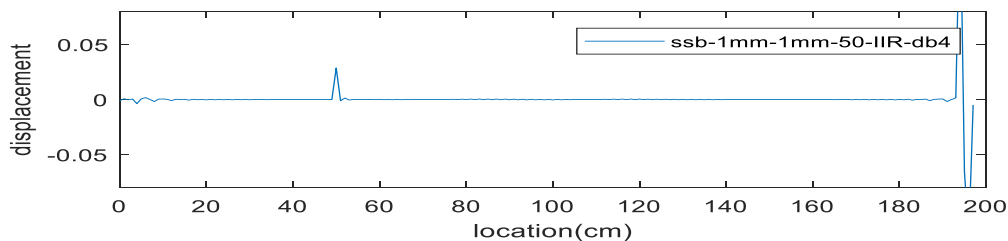
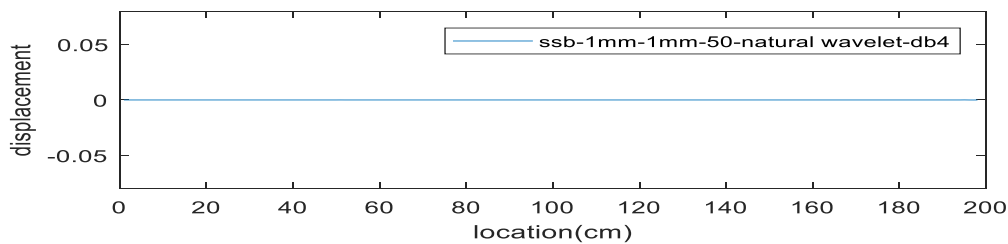
شکل ۱۶- تاثیر فیلتر بر آشکار سازی خرابی طبق جدول ۳ در فاصله ۲۰cm به ازای rbio4.4



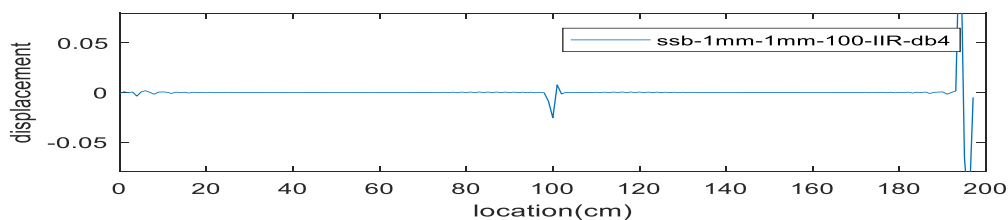
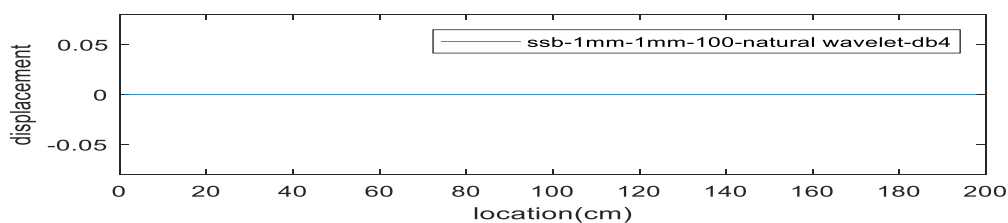
شکل ۱۷- تاثیر فیلتر بر آشکار سازی خرابی طبق جدول ۳ در فاصله ۲۰cm به ازای sym2



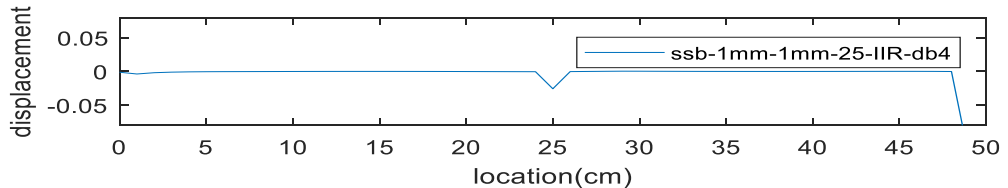
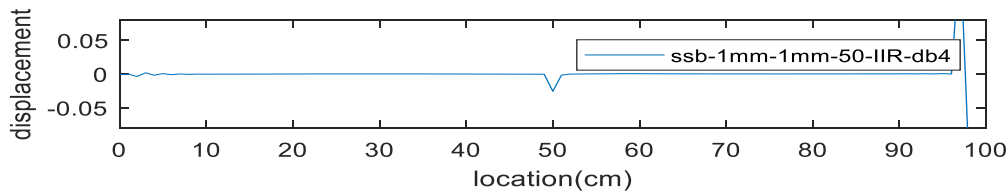
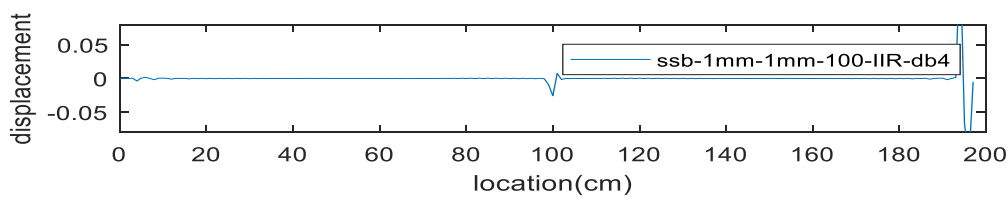
شکل ۱۸- تاثیر فیلتر بر آشکار سازی خرابی طبق جدول ۳ در فاصله ۲۰cm به ازای coif2



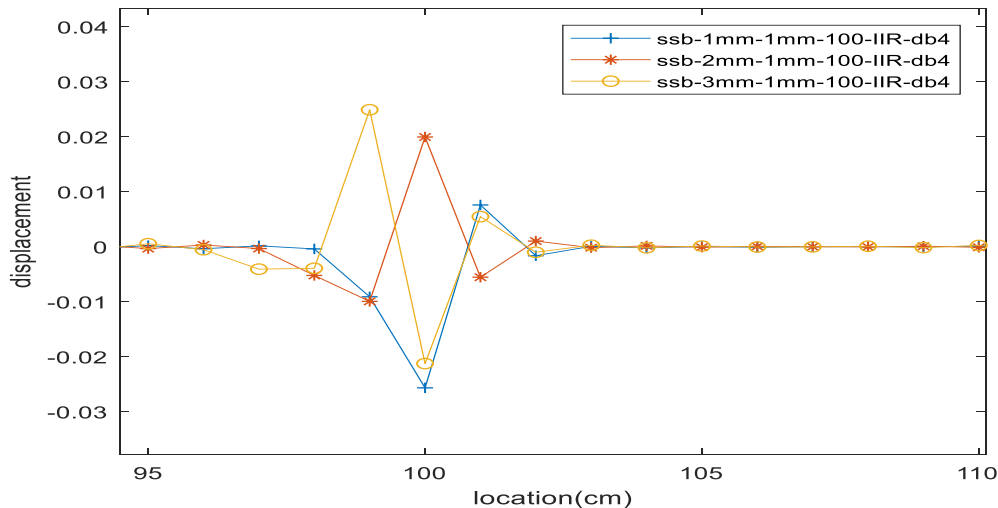
شکل ۱۹- تاثیر فیلتر بر آشکار سازی خرابی طبق جدول ۳ در فاصله ۵۰ cm به ازای db4



شکل ۲۰- تاثیر فیلتر بر آشکار سازی خرابی طبق جدول ۳ در فاصله ۱۰۰ cm به ازای db4



شکل ۲۱- اثر کاهش نقاط نمونه برداری



شکل ۲۲- اثر تغییر عرض ترک

۵- نتیجه گیری:

می‌باشد. به این ترتیب می‌توان خرابی را در مراحل بسیار اولیه تشخیص داد و از گسترش آن جلوگیری نمود. ملاحظه گردید که با ترکیب فیلتر و موجک sym2 و یا db4، محل خرابی با دقت بیشتری قابل تشخیص است.

در این تحقیق، به کمک ترکیب تبدیل موجک و فیلتر دیجیتال، روشی جهت تشخیص محل ترک در سازه ارائه شد که در مقایسه با روش‌های پیشین، دامنه تغییرات بیشتری داشته و قادر به تشخیص ترک‌های ریز میلی متری

مراجع:

- [1] E. Douka, S. Loutridis, and A. Trochidis, "Crack identification in beams using wavelet analysis," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, No. 13-14, pp. 3557-3569, 2003.
- [2] A. Ovanesova and L. E. Suarez, "Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures," *Engineering structures*, Vol. 26, No. 1, pp. 39-49, 2004.
- [3] X. Zhu and S. Law, "Wavelet-based crack identification of bridge beam from operational deflection time history," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 43, No. 7-8, pp. 2299-2317, 2006.
- [4] H. Gökdağ and O. Kopmaz, "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, No. 3-5, pp. 1158-1180, 2009.
- [۵] امیر عزالدین، حسین نادرپور، علی خیرالدین، و غلامرضا قدرتی امیری، "تشخیص محل و میزان ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۹، زمستان ۱۳۹۳، صفحه ۱-۱۲.
- [۶] طاهره عارف زاده، واعظ حسینی، حسین نادرپور، و امیر عزالدین، "شناسایی موقعیت و شدت ترک‌های چندگانه در تیر طره‌ی بتن‌آرمه با استفاده از تحلیل مودال و آنالیز موجک"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره سوم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۷۲-۸۳.
- [۷] حسین نادرپور، محمد کاظم شربتدار، فاطمه خادمیان، "تشخیص الگوی آسیب دیوارهای برشی بتن‌آرمه با استفاده از تبدیل‌های ریاضیاتی"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، دوره سوم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۷۹-۹۶.
- [۸] امیر احمدنژاد زرنقی و امیر طریقت، "آشکارسازی خرابی در سازه‌های صفحه‌ای با استفاده از تحلیل انرژی موجک"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۶، شماره ۵۳، تابستان ۱۳۹۷، مقاله ۲۵.
- [9] L. Debnath and F. A. Shah, "The Wavelet Transforms and Their Basic Properties," in *Wavelet Transforms and Their Applications*, ed: Springer, 2015, pp. 337-373.

[۱۰] جواد صابریان، محمدرضا ملک، "تبدیل موجک و کاربردهای آن در GIS"، هفدهمین همایش ژئوماتیک، اردیبهشت ۱۳۸۸، صفحه ۸-۱.

[۱۱] عاطفه عموزاده، محمدرضا فدوی امیری، علی زارع حسین زاده، و غلامرضا قدرتی امیری، "پردازش پاسخ سازه ها با کمک تبدیل موجک برای تشخیص آسیب های رخ داده در اثر زلزله"، مجله علمی پژوهشی مهندسی عمران مدرس، دوره ۱۶، شماره ۲۰، سال ۱۳۹۵، صفحه ۱۰۳-۱۱۷.

[۱۲] مهدی یوسفی، آزاد یزدانی، و مرتضی بسطامی، "بررسی اثر محتوی فرکانسی زمین لرزه در ضریب شکل پذیری سازه ها با استفاده از تبدیل موجک"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، اردیبهشت ۱۳۹۰، صفحه ۸-۱.

[13] K. D. Rao and M. Swamy, "IIR Digital Filter Design," in Digital Signal Processing, ed: Springer, 2018.