

Damage detection of plate using the wavelet-based contourlet transform method

Sobhan Rostami¹, javad Mashhadi¹, Alireza Hajizadeh^{1*}

1- Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran

ABSTRACT

The purpose of this study is to present a new method of plate damage detection using the wavelet-based contourlet transform method. The contourlet transforms developed based on the Wavelet transform is a new two-dimensional transform that overcomes the limitations of the wavelet transform. The wavelet-based contourlet transform is a new family of contourlet transforms with the same two-step characteristic introduced from the same filter banks, radial, and angular decomposition. This method is used in plate damage detection for the first time. In the first step, the plate using the wavelet transform is decomposed into four sub-bands. Then, a radius decomposition with eight bands in each sub-band of the initial image is introduced using one of the directional filter banks. The radius decomposition in different directions is known as the advantage of this method in comparison with the wavelet transform. This advantage is observed in images with curved lines. In this method, the change in the elastic modulus is considered as damage in plates. The fundamental mode shape of intact and damaged plates is first obtained from the structural frequency analysis. Then, the location, shape and approximate size of damage are obtained by applying this transform to the responses of the structure.

ARTICLE INFO

Receive Date: 29 October 2022

Revise Date: 01 February 2023

Accept Date: 20 February 2023

Keywords:

Damage detection
plate
wavelet-based contourlet
transform
mode shape
elastic modulus

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.364324.2956>

*Corresponding author: Alireza Hajizadeh.

Email address: a-hajizadeh@tvu.ac.ir

عیب‌یابی ورق با استفاده از روش تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک

سبحان رستمی^۱، جواد مشهدی^۱، علیرضا حاجی‌زاده^{۱*}

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران

چکیده

هدف از این مطالعه ارائه‌ی یک رویکرد جدید در عیب‌یابی ورق‌ها از تبدیل کانتورلت، بنام تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک می‌باشد. این تبدیل به عنوان یک تبدیل دو بعدی جدید و توسعه یافته از تبدیل موجک، برای مقابله با محدودیت‌های ذاتی موجک‌ها ارائه شده است. تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک، یک خانواده‌ی جدید دیگر از تبدیل‌های کانتورلت با همان خصوصیت دو مرحله‌ای از بانک‌های فیلتر و تجزیه‌ی شعاعی و زاویه‌ای معرفی شده‌اند. که در این مطالعه از این روش برای اولین بار در عیب‌یابی ورق استفاده شده است. در گام اول با استفاده از تبدیل موجک، ورق به چهار زیر تصویر تجزیه می‌شود. سپس با استفاده از بانک‌های فیلتر جهت‌دار، یک تجزیه‌ی شعاعی ۸ جهته در هر زیر تصویر از تصویر اولیه، به خوبی ارائه می‌شود. برتری این روش نسبت به تبدیل موجک، تجزیه‌ی شعاعی در جهت‌های مختلف با استفاده از بانک فیلتر جهت‌دار می‌باشد. این برتری در تصاویر با خطوط منحنی شکل قابل تشخیص است. در این روش عیب در ورق با تغییر در مدول الاستیسیته نمایش داده می‌شود. سپس با استفاده از تحلیل فرکانسی سازه، مد شکل اول برای سازه سالم و سازه خراب به عنوان پاسخ سازه به دست می‌آید. با اعمال تبدیل پیشنهادی بر روی پاسخ‌های سازه محل، شکل و اندازه تقریبی از عیب ورق مشخص می‌شود.

کلمات کلیدی: عیب‌یابی، ورق، تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک، مد شکل، مدول الاستیسیته.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	شناسه دیجیتال:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.364324.2956					
	10.22065/jsce.2023.364324.2956	۱۴۰۲/۰۹/۳۰	۱۴۰۱/۱۲/۰۱	۱۴۰۱/۱۲/۰۱	۱۴۰۱/۱۱/۱۲	۱۴۰۱/۰۸/۰۷
			علیرضا حاجی‌زاده		*نویسنده مسئول:	
			a-hajizadeh@tvu.ac.ir		پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

عیب‌یابی^۱ با استفاده از روش‌های کلی و غیر مخرب یکی از روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌ها برای افزایش دوام، پایداری و طول عمر سازه به شمار می‌آید. برای رسیدن به این هدف اطلاع از وضعیت سازه‌ها به جهت جلوگیری از خسارت‌های اولیه و برنامه‌ریزی مناسب برای اصلاح و برطرف کردن معایب سازه که به صورت لهیدگی، ترک، تسلیم شدگی و خوردگی در سازه اتفاق می‌افتد، مورد توجه محققین قرار گرفت. روش‌های کشف خسارت‌های کلی بر مبنای بررسی تغییر در مشخصات دینامیکی سازه، مانند مد شکل‌ها با استفاده از نتایج تحلیل سازه مانند جابجایی‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها در نقاط مختلف سازه می‌باشند.

دوبلیگ و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۶ از فرکانس‌های طبیعی، شکل مدها، نسبت‌های میرایی مودال، انرژی کرنشی مودال و غیره استفاده کردند [۱]. کاندس و دونوهو^۳ در سال ۲۰۰۰ برای اولین بار ایده‌ی یک تبدیل موجک^۴ هندسی ناهمسان، به نام ریجالت و تقسیم تصویر به چند بخش و استفاده از ریجالت برای هر بخش را ارائه کردند، که به نام تبدیل کرولت^۵ شهرت یافت [۲]. دو و وترلی^۶ در سال ۲۰۰۲ بر روی گسترش نمایش دو بعدی جدید از عکس‌ها تمرکز کردند. آن‌ها یک روشی را که بر اساس ساختار بانک فیلتر دوپل می‌باشد پیشنهاد دادند. این روش که ترکیبی از هرم لاپلاسی و بانک فیلتر جهتی می‌باشد را کانتورلت نامیدند. تبدیل کانتورلت رابطه مقیاس‌گذاری سه‌موی‌ها را دارا می‌باشد [۳]. اسلامی و رادها در سال ۲۰۰۴ به بررسی روش جدیدی از تبدیل کانتورلت بر اساس موجک پرداختند و همچنین کاربرد این تبدیل را در کدنویسی عکس‌ها بررسی کردند. هدف آن‌ها پیشنهاد یک خانواده‌ی جدید از تبدیل‌ها بود که بتواند عکس‌ها را در جهت‌های شعاعی و زاویه‌ای تجزیه کند. سپس با به کارگیری دو بانک فیلتر که کمترین اضافات و بهترین بازسازی تصویر را داشته باشد، پرداختند [۴]. سانچز^۷ در ۲۰۰۵ از مشخصات دینامیکی سازه از جمله سختی، میرایی، جرم و روش‌ها بر پایه‌ی پارامترهای مودال از جمله فرکانس‌های طبیعی و شکل مدها، استفاده کرد [۵]. روکا و وایلد^۸ در ۲۰۰۶ روشی را برای شناسایی ترک سازه‌ها با اعمال تبدیل موجک پیوسته در صفحات و تیرها ارائه کردند. آن‌ها در این روش یک تیر طره‌ای و صفحه فولادی چهار طرف گیردار را مورد آزمایش قرار دادند. مد شکل‌های تیر توسط تبدیل موجک پیوسته یک بعدی و در صفحات توسط تبدیل موجک دو بعدی مورد بررسی قرار گرفت. مکان ترک توسط یک پرش در ارتعاشات پاسخ‌های سازه به دست می‌آید. آن‌ها این روش را بر روی داده‌های آزمایشگاهی اعمال کردند، و در آخر مقایسه‌ای را بین نتایج آزمایشگاهی و عددی انجام دادند [۶]. ریاضی فر و یزدی در سال ۲۰۰۹ اثربخشی تبدیل موجک و کانتورلت را در فشردگی زیاد تبدیل کانتورلت عملکرد بهتری دارد [۷]. باقری و همکاران در سال ۲۰۰۹ اولین افرادی بودند که روشی به منظور شناسایی محل خرابی در صفحات خمشی با استفاده از کرولت ارائه دادند، آن‌ها با مدل‌سازی خرابی با درصد‌های مختلف خرابی در ناحیه میانی یک صفحه خمشی و انجام تحلیل مودال بر روی صفحه خمشی، با استفاده از مد شکل اول صفحه، دارای خرابی و صفحه سالم و دو شاخص خرابی متفاوت اقدام به پردازش اطلاعات با استفاده از روش کرولت کردند [۸]. یانگ و همکاران^۹ در سال ۲۰۱۱ تحلیل عددی با استفاده از روش اجزاء محدود برای به دست آوردن مد شکل اول صفحات مسلح خراب شده انجام دادند، سپس موقعیت خرابی با تحلیل موجک گسسته دو بعدی پیدا شد [۹]. باقری و همکاران در سال ۲۰۱۱ روشی را برای شناسایی ترک‌های خطی در صفحات با استفاده از تبدیل موجک دو بعدی بر اساس داده‌های مودال ارائه دادند. آن‌ها این روش را بر روی یک صفحه مستطیلی چهار طرف گیردار شامل ترک با طول، عرض و مکان دلخواه اعمال کردند. برای شناسایی دقت روش، داده‌های عددی و واقعی در تعیین محل ترک مورد بررسی قرار گرفت [۱۰]. نیک‌نام و همکاران در سال ۲۰۱۱ به شناسایی خرابی و حذف خطا در سازه‌های دو بعدی با استفاده از تبدیل کرولت روش راپینگ^{۱۰}

¹ damage detection

² Doebing et al

³ Candes and Donoho

⁴ wavelet transform

⁵ Cuervlet transform

⁶ Do and Vetterli

⁷ Sanchez

⁸ Rucka and Wilde

⁹ Yang et al

¹⁰ Wrapping

پرداختند. آن‌ها برای بررسی قابلیت اطمینان روش پیشنهادی مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از داده‌های عددی و آزمایشگاهی انجام دادند. مطالعه موردی این تحقیق شامل دیوار برشی یک طبقه و سه طبقه است که خرابی در مکان‌های دلخواه و با سطوح خطای متفاوت در نظر گرفته شده است. نتایج، برتری این روش را به خوبی نشان می‌دهد [۱۱]. مونتاناری و همکاران^{۱۱} در سال ۲۰۱۵ تأثیرات نمونه‌برداری مکانی در شناسایی ترک در تیرها با استفاده از تبدیل موجک پیوسته را معرفی کردند. آن‌ها به دنبال این سوال‌ها بودند که (۱) آیا میزان شناسایی ترک با نمونه‌برداری پایین، کاهش می‌یابد. (۲) حداقل تعداد فواصل نمونه‌برداری برای شناسایی ترک بهینه چیست. سه مدل اول تیر طره و تیر با تکیه‌گاه ساده مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفت. در نهایت تعداد فواصل بهینه‌ی نمونه‌برداری برای شناسایی ترک به دست آمد [۱۲]. حاجی‌زاده و همکاران در ۲۰۱۶ با استفاده از تبدیل موجک گسسته عوامل تاثیرگذار پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی را برای تشخیص عیب در ورق‌ها بررسی کردند [۱۳]. همچنین حاجی‌زاده و همکاران در ۲۰۱۶ عملکرد تبدیل موجک و تبدیل کرولت را بر روی ورق‌ها ارزیابی کردند و نشان دادند که کرولت‌ها در خرابی‌های منحنی شکل عملکرد بهتری دارند [۱۴]. حمیدیان و همکاران در ۲۰۱۸ روشی را برای تشخیص آسیب در سازه‌های نامنظم دو بعدی و سه بعدی بر اساس ترکیب موجک با شبکه عصبی ارائه دادند [۱۵]. حمیدیان و همکاران در ۲۰۱۸ روشی را برای تشخیص آسیب در سدهای دو قوسی با تبدیل موجک سه بعدی و سیستم استنتاج فازی پیشنهاد دادند. روش پیشنهادی فقط به پاسخ سازه‌های آسیب دیده نیاز داشت [۱۶]. سیدپور و همکاران در ۲۰۱۸ تشخیص آسیب را با استفاده از یک الگوریتم دیفرانسیل بهبود یافته چند مرحله‌ای بررسی کردند [۱۷]. خان احمدی و همکاران در ۲۰۱۹ با در نظر گرفتن شکل مدهای دیوار پیش ساخته پانلی قبل و بعد از خرابی و با استفاده از تبدیل موجک گسسته دو بعدی به شناسایی ناحیه خرابی پرداختند. آنها نشان دادند که ماکزیمم و مینیمم پرش در ضرایب موجک، در محل وقوع خرابی‌ها اتفاق افتاده است [۱۸]. در ۲۰۲۰ آرفی و همکاران یک شاخص اصلاح شده برای تشخیص آسیب در سازه‌ها را با استفاده از روش سیستم کاهش بهبود یافته مورد استفاده قرار دادند [۱۹]. خان احمدی و همکاران در ۲۰۲۱ عیب‌یابی دیوارهای برشی فولادی را با استفاده از تحلیل موجک بررسی کردند [۲۰]. احمدی ندوشان و همکاران در سال ۲۰۲۲ یک روش جدید تشخیص آسیب دو مرحله‌ای با استفاده از انعطاف‌پذیری مودال و شاخص مبتنی بر انرژی کرنشی و الگوریتم اصلاح شده بهینه‌سازی، مبتنی بر یادگیری را پیشنهاد دادند [۲۱]. در ۲۰۲۲ جهانگیر و همکاران با استفاده از پاسخ‌های ارتعاشی حاصل از آزمایش مودال در حوزه زمان، آسیب‌های وارده به دال‌های بتنی پیش تنیده را بررسی کردند. برای این منظور ابتدا چند آسیب با اشکال هندسی مختلف در مکان‌های مختلف در یک دال بتنی پیش تنیده ایجاد شد. سپس با سه خانواده‌ی موجک محل خرابی مورد بررسی قرار گرفت [۲۲].

در این مطالعه از نرم افزار "ABAQUS" برای مش‌بندی ورق و تحلیل فرکانسی سازه برای به دست آوردن مدل‌ها به عنوان پاسخ سازه استفاده شده است. عیب در ورق با تغییر در مدول الاستیسیته به نرم افزار معرفی می‌شود. سپس پاسخ‌های سازه به عنوان ورودی در محیط متلب برای عیب‌یابی ورق مهیا شدند. در این تحقیق برای اولین بار از تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک، برای عیب‌یابی ورق استفاده شده است. تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک، یک طرح جدید و توسعه یافته از تبدیل موجک است که ساختار دو مرحله‌ای دارد. در مرحله اول، با استفاده از تبدیل موجک، تجزیه‌ی زیر تصویرها (تجزیه‌ی زیر باندها^{۱۲}) فراهم می‌شود. در این مرحله در هر سطح از تجزیه، تبدیل موجک تصویر را به چهار زیر تصویر تقسیم می‌کند. در مرحله دوم، با استفاده از بانک فیلتر جهت‌دار، تجزیه‌ی زاویه‌ای مهیا می‌شود. این تلاش منجر به معرفی بانک‌های فیلتر جهت‌دار ۸ جهته، از یک خانواده‌ی جدید از بانک‌های فیلتر جهت‌دار شد که تجزیه‌ی شعاعی ۸ جهته را به خوبی ارائه می‌کنند. این ساختار دو مرحله‌ای یک تبدیل جدید از تصویر، بنام تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک را بوجود آوردند. عیب در ورق بعد از اعمال این تبدیل بر روی مدل‌ها، مشخص می‌شود.

¹¹ Montanari et al

¹² decomposition sub-band

۲- تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک^{۱۳}

در این قسمت یک خانواده‌ی جدید دیگر از تبدیل‌های کانتورلت با همان خصوصیت تجزیه‌ی شعاعی و زاویه‌ای معرفی می‌شود. تئوری ساخت این تبدیل شامل دو مرحله از بانک‌های فیلتر است و بازسازی نیز به طور کامل انجام می‌گیرد پس نتیجه منجر به یک تبدیل مفید با بازسازی کامل بنام تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک شده است. با استفاده از تبدیل موجک به عنوان مرحله اول، بانک‌های فیلتر جهت‌دار^{۱۴} را بر ضرایب موجک اعمال می‌کنیم تا قانون مقیاس‌گذاری ناهمگن حفظ شود. از این رو طرحی جدید بنام تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک، برای کدگذاری تصویر پیشنهاد شد. که بر اساس کانتورلت یک تقسیم بندی جدیدی را ایجاد کرد [۴].

در روش تبدیل کانتورلت از هرم لاپلاس^{۱۵} برای تجزیه‌ی چند مقیاسی استفاده شده است. تجزیه‌ی هرم لاپلاس در هر مرحله دو خروجی دارد یکی موج نمونه‌برداری شده پایین‌گذر و دیگری اختلاف بین موج اصلی و حالت پیش‌بینی شده می‌باشد این فرایند می‌تواند به وسیله تجزیه در مقیاس بزرگ تکرار شود. از این رو، انتخاب بهینه برای برنامه‌های کد نویسی برای حذف تبدیل‌های غیر زاید تصویر که بر اساس بانک فیلتر جهتی با قابلیت تجزیه‌ی شعاعی و زاویه‌ای هستند احساس شد. تلاش محققین منجر به معرفی بانک‌های فیلتر جهت‌دار ۸ جهته، از یک خانواده‌ی جدید از بانک‌های فیلتر جهت‌دار شد که تجزیه‌ی شعاعی ۸ جهته را به خوبی ارائه می‌دهند. از این رو یک تبدیل غیر زاید جدید از تصویر، بنام تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک ارائه کردند. بنابراین تبدیل کانتورلت بر مبنای موجک نیز شامل دو مرحله از بانک فیلتر است. در مرحله اول، تجزیه‌ی زیر تصویر فراهم می‌شود که در روش پیشنهادی تجزیه‌ی زیر تصویرها با استفاده از تبدیل موجک انجام می‌گیرد. در مرحله دوم از این روش، بانک فیلتر جهت‌دار، تجزیه‌ی زاویه‌ای را مهیا می‌کند [۴].

۲-۱- تبدیل موجک

تبدیل موجک‌ها یک نوع فیلتر هستند که بیشترین کاربرد آنها در پردازش تصویر^{۱۶} می‌باشد. در حالت یک بعدی یک موج است که از لحاظ ریاضی همان بردار می‌باشد. در حالت دو بعدی یک ماتریس داریم که درایه‌های آن ماتریس تشکیل دهنده تصویر مورد نظر می‌باشند. در تبدیل موجک پارامترهای انتقال و مقیاس (a و b) اگر به طور مداوم تغییر کنند تبدیل موجک پیوسته CWT بوجود می‌آید [۱۴].

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

موجک مادر^{۱۷} نامیده می‌شود. برای کارآمدتر کردن روش تبدیل موجک پیوسته و انجام محاسبات کامپیوتری از نمونه‌برداری دودویی^{۱۸} برای پارامترهای a و b در فرمول (۱) استفاده شد که بصورت زیر بیان می‌شوند.

$$a = 2^j ; b = 2^j k ; j, k \in Z \quad (2)$$

که در آن Z مجموعه‌ای از اعداد صحیح است. با این تعریف یک گسسته‌سازی در تبدیل موجک صورت گرفت که باعث کاهش چشم‌گیر در محاسبات شد و تبدیل موجک گسسته (DWT) را به وجود آورد که بصورت رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۴].

¹³ Wavelet Based Contourlet Transform (WBCT)

¹⁴ Bank Filter Directional (BFD)

¹⁵ Laplacian pyramid

¹⁶ Image Processing

¹⁷ mother wavelet

¹⁸ Dyadic

$$DWT_{f(j,k)}^{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt = 2^{-j/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi(2^{-j}t - k) dt \quad (3)$$

بنابراین بعد از اعمال تبدیل موجک دو نوع ضریب بنام ضرایب تقریب^{۱۹} و ضرایب جزئیات^{۲۰} به دست می آید. که تابع تقریب در سطح ز در فرمول (۴) نشان داده شده است.

$$A_j(t) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} cA_j(k) \phi_{j,k}(t) \quad (4)$$

$\phi_{j,k}$ تابع مقیاس^{۲۱} و $cA_j(k)$ ضرایب تقریب در سطح j می باشند. تابع جزئیات در سطح j در فرمول (۵) ارائه شده است.

$$D_j(t) = \sum_{k \in Z} cD_{j,k} \psi_{j,k}(t) \quad (5)$$

$\psi_{j,k}$ تابع موجک مادر^{۲۲} و $cD_{j,k}$ ضرایب جزئیات در سطح j می باشند. بنابراین می توان یک موج را بصورت زیر نشان داد.

$$f(t) = A_j + \sum_{j < J} D_j \quad (6)$$

همانطور که بیان شد تبدیل موجک دو بعدی تعمیم یافته موجک یک بعدی می باشد. بنابراین توابع پایه موجک دو بعدی گسسته به شکل زیر هستند. $\psi^V(x, y)$ و $\psi^H(x, y)$ و $\psi^D(x, y)$ که به ترتیب ضرایب جزئیات عمودی، افقی و قطری نامیده می شوند. که از حاصل ضرب توابع مادر و مقیاس یک بعدی به شکل زیر بوجود آمده اند.

$$\begin{aligned} \psi^V(x, y) &= \phi(x) \psi(y) \\ \psi^H(x, y) &= \psi(x) \phi(y) \\ \psi^D(x, y) &= \psi(x) \psi(y) \end{aligned} \quad (7)$$

همچنین تابع ضرایب تقریب را به شکل زیر نمایش می دهند.

$$\phi(x, y) = \phi(x) \phi(y) \quad (8)$$

بنابراین برای اعمال تبدیل موجک دو بعدی به تصویر، ابتدا تبدیل موجک یک بعدی به سطرها اعمال می شود و سپس ستونها با نرخ ۲، نمونه برداری کاهشی^{۲۳} می شوند. مجدداً تبدیل موجک یک بعدی بر ستونها اعمال می گردد. نهایتاً سطرها با نرخ ۲، نمونه برداری کاهشی می شوند. بدین ترتیب، ۴ زیر تصویر مختلف به عنوان ضرایب تبدیل موجک به دست می آیند. که ابعاد هر تصویر در سطح یک $j=1$ نصف ماتریس تصویر اولیه است (شکل ۱).

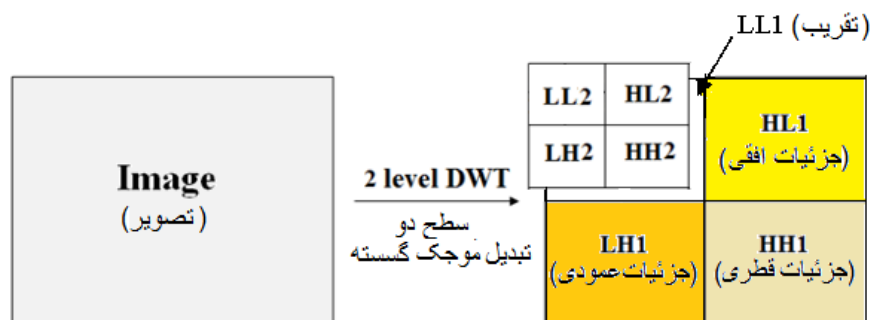
¹⁹ approximation coefficients

²⁰ detail coefficients

²¹ scaling function

²² mother wavelet

²³ Downsample

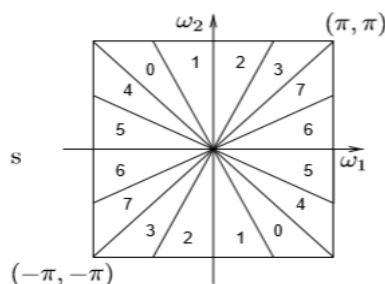


شکل ۱: تجزیه سطح دوم موجک دوبعدی گسسته

برای تجزیه در سطح دو، باید زیر تصویر سطح یک تقریب را به عنوان یک تصویر اصلی جدید در نظر گرفت و تبدیل موجک را بر روی آن اعمال کرد. در این مرحله نیز، مانند شکل بالا هر تصویر به چهار زیر تصویر تجزیه می‌شود. در این مقاله از تجزیه‌ی سطح اول استفاده شده است.

۲-۲- تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک

در سال ۱۹۹۲ بمبرگ و اسمیت، یک بانک فیلتر جهت‌دار دو بعدی را معرفی کردند که دارای ساختار تجزیه‌ی درختی ۱ سطحی است. این نوع ساختار باعث به وجود آمدن یک تصویر با ۲۱ زیر تصویر به صورت تقسیم‌بندی فرکانسی گوه‌ای شکل (جدا از هم) می‌شود. که در شکل ۲ نمایش داده شده است [۳].



شکل ۲: تقسیم‌بندی فرکانسی بانک فیلتر شده جهت‌دار که در آن $l=3$ و $2^l=8$ [۳].

ساختار اصلی بانک فیلتر جهت‌ی شامل ترکیب موج ورودی و استفاده از فیلترهای الماسی شکل است. علاوه بر این، برای به دست آوردن تقسیم‌بندی فرکانسی مناسب، استفاده از قانون گسترش درختی ضروری است. بانک فیلتر جهت‌دار که در شکل ۲ نمایش داده شده است یک صفحه فرکانسی دو بعدی را به زیر تصویرها تجزیه می‌کند. علاوه بر این، یک بانک فیلتر جهت‌دار L سطحی، می‌تواند پایه‌ی جهت‌دار محلی را برای موج گسسته تولید کند که از پاسخ فیلترهای جهت‌دار تشکیل شده است. و خانواده‌ی $\{g_k^{(l)}[n - S_k^{(l)}m]\}_{0 \leq k < 2^l, m \in Z^2}$ را ارائه می‌دهند. در این رابطه ماتریس‌های نمونه‌برداری کلی $S_k^{(l)}$ دارای شکل‌های قطری زیر هستند.

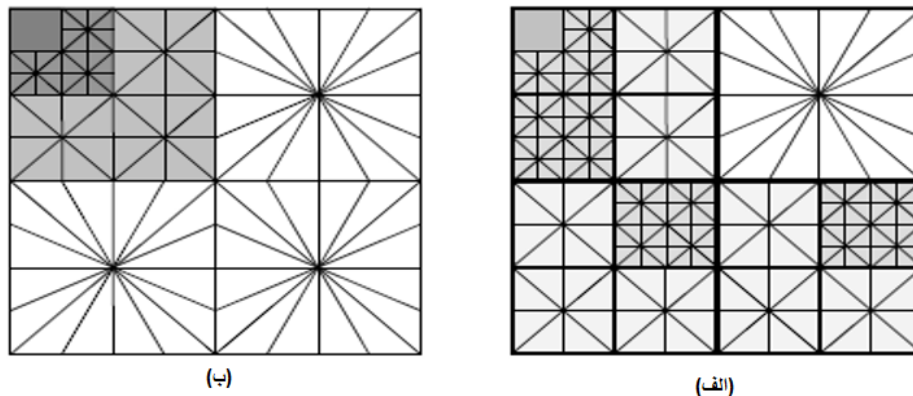
$$S_k^{(l)} = \begin{cases} \begin{bmatrix} 2^{l-1} & 0 \\ 0 & 2 \end{bmatrix} & 0 \leq k < 2^{l-1} \\ \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2^{l-1} \end{bmatrix} & 2^{l-1} \leq k < 2^l \end{cases} \quad (9)$$

بنابراین خانواده‌ی $\{\rho_{j,k,n}^{(l)}(x)\}$ در هر زیر فضا به شکل زیر تعریف می‌شود.

$$\rho_{j,k,n}^{(l)}(t) = \sum_{m \in Z^2} g_k^{(l)}[m - S_k^{(l)}n] \psi_{j,n}^{(i)}(t); \quad j \in Z, n \in Z^2 \quad (10)$$

در تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک در مرحله اول، تجزیه‌ی زیر تصویرها با استفاده از تبدیل موجک فراهم می‌شود. در مرحله دوم از این روش، بانک فیلتر جهت دار، تجزیه‌ی زاویه‌ای را مهیا می‌کند. در این مرحله، با استفاده از فیلترهای فان، بانک‌های فیلتر با ساختار درختی تکرار شده به کار گرفته می‌شوند. با اعمال تبدیل موجک در هر سطح، به سه زیر تصویر بالاگذر مرتبط با تصویرهای افقی، عمودی و قطری (HH و HL, LH) دست پیدا می‌کنیم. از اینرو به دنبال یک بانک فیلتر جهت‌دار با همان تعداد جهت در هر تصویر در یک سطح داده شده هستیم. بنابراین ماکزیمم تعداد جهات از رابطه $ND=2^l$ در کوچکترین سطح از تبدیل موجک، به دست می‌آید. وقتی از سطوح درشت ادامه می‌دهیم، تعداد جهات در هر مقیاس دوتایی دیگر کاهش می‌یابد. به این ترتیب به قانون مقیاس‌گذاری ناهمگن دست پیدا می‌کنیم [۴].

از آنجایی که، عموماً جهت‌های عمودی (HL) و جهت‌های افقی (LH) در تصویر داریم، منطقی به نظر می‌رسد که از بانک فیلتر جهت‌دار برای تجزیه در جهت‌های عمودی و افقی استفاده شود. با این حال، فیلترهای موجک در تقسیم فضای فرکانسی به اجزای پایین‌گذر و بالاگذر، کامل عمل نمی‌کنند، به همین خاطر، همه‌ی جهت‌ها در تصویر را پوشش نمی‌دهند. از اینرو برای برطرف شدن این عیب تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک پیشنهاد گردید. این تبدیل با استفاده از بانک فیلتر جهت‌دار کامل برای وضوح تصویر یک تجزیه‌ی ۸ جهته در هر زیر تصویر را ارائه می‌دهد (شکل ۳). که یکی از بزرگترین فواید تبدیل کانتورلت بر مبنای موجک است. [۴].



شکل ۳: (الف) طرحی شماتیک از تبدیل کانتورلت بر مبنای موجک با استفاده از سه سطح موجک دوتایی و ۸ جهت در ریزترین سطح (ND=8) تجزیه‌ی جهت دار، زیر تصویرهای موجک را می‌پوشاند. (ب) مثالی از بسته کانتورلت بر اساس موجک [۴].

بنابراین اگر تصویر ورودی $X = a_0[n]$ باشد. خروجی بعد از اعمال تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک بصورت زیر می‌باشد.

$$a_j[n] = \langle f, \phi_{j,n} \rangle \quad (11)$$

$$d_{j,k}^{(l)}[n] = \langle f, \rho_{j,k,n}^{(l)} \rangle \quad (12)$$

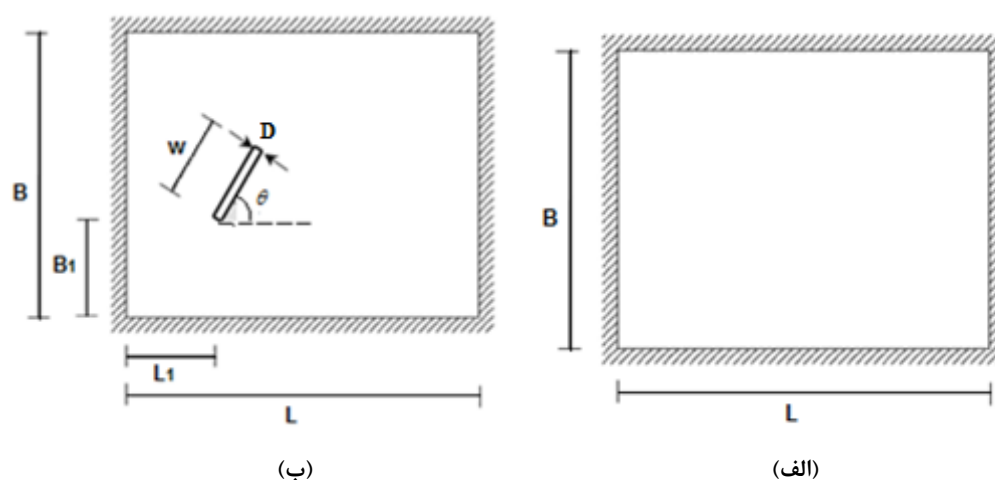
از این رو، ضرایب تبدیل کانتورلت را می توان با استفاده از معادله ۱۱ و ۱۲ به دست آورد.

۳- مراحل عیب یابی در صفحه

در این مطالعه، یک روش جدید بنام تبدیل کانتورلت بر پایه ی موجک به منظور شناسایی عیب در ورق معرفی شده است. در این روش ابتدا در نرم افزار "ABAQUS" مدل سازی ورق سالم و ورق با وجود عیب انجام می شود. سپس با استفاده از تحلیل دینامیکی پاسخ-های سازه به دست می آیند. وجود خرابی ناپیوستگی های کوچکی در پاسخ سازه ایجاد می کند که این ناپیوستگی ها اغلب قابل شناسایی نمی باشند. از این رو ضرایب کانتورلت بر پایه ی موجک می توانند این ناپیوستگی ها را مشخص و عیب سازه را نمایان کنند.

۳-۱- مدل سازی و تحلیل ورق در نرم افزار "ABAQUS":

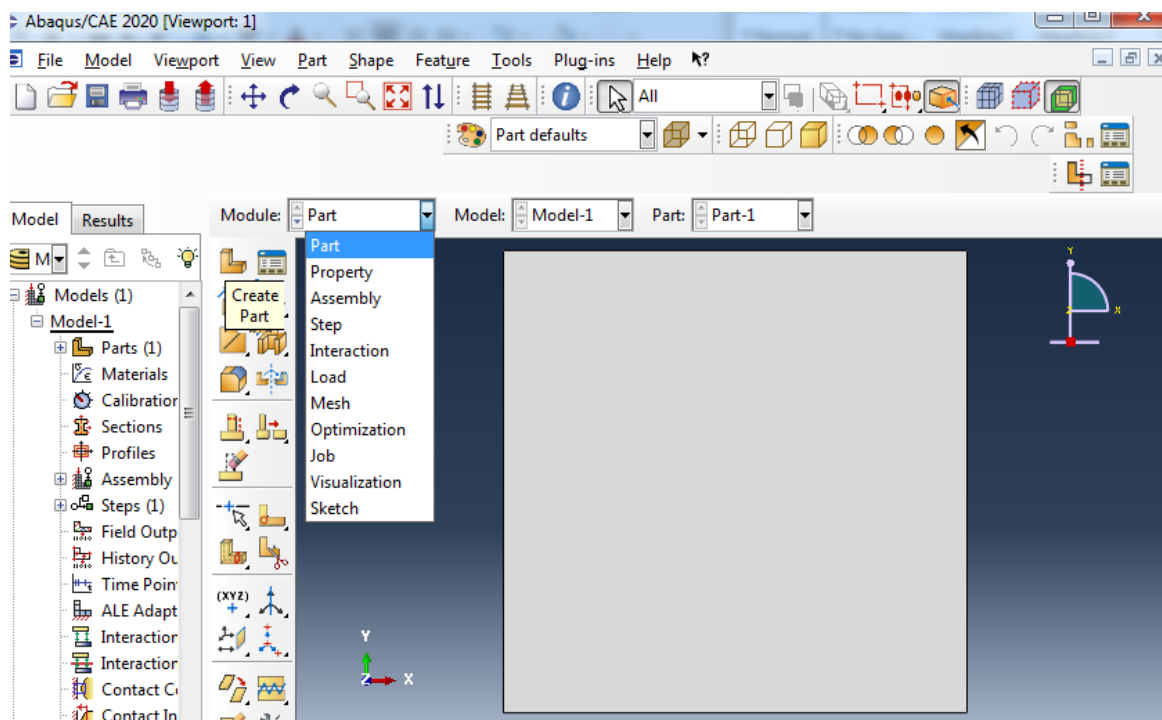
در این مطالعه برای حل مثال های عددی از یک صفحه مستطیلی به ابعاد $L \times B \times t$ با تکیه گاه گیردار به عنوان یک ورق سالم و همان صفحه با وجود عیب به عنوان یک سازه خراب (شکل ۴) استفاده شده است. خرابی به طول W و عرض D در فاصله L_1 و B_1 از لبه سمت چپ صفحه واقع شده است.



شکل ۴: نمایش ورق (الف) ورق سالم (ب) ورق خراب

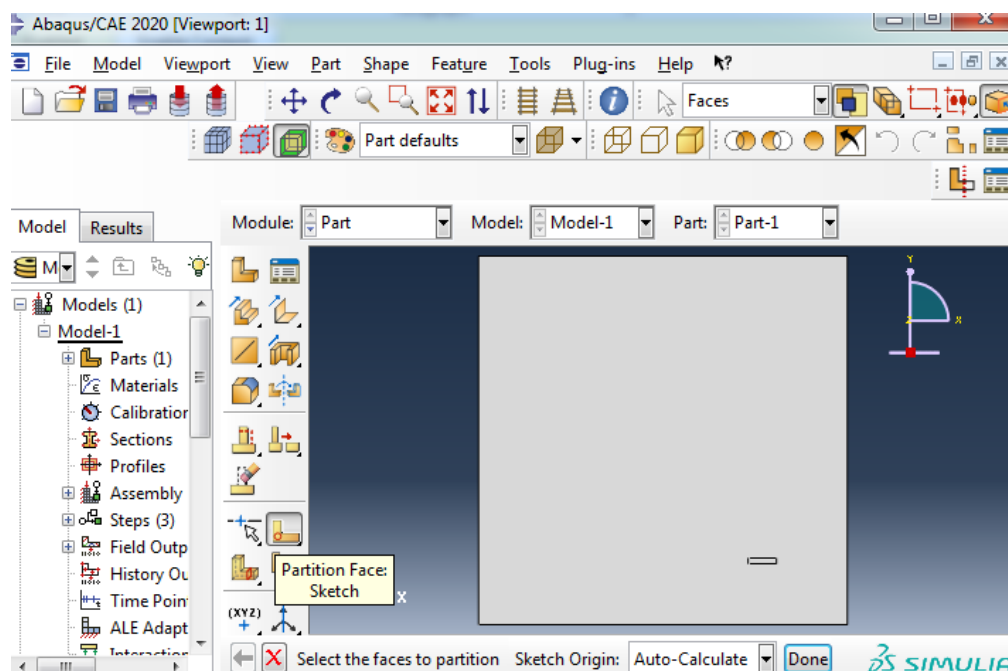
بنابراین برای ساخت و تحلیل ورق در نرم افزار "ABAQUS" مراحل زیر انجام می شود.

۳-۱-۱- مدل سازی ورق: در محیط part در قسمت create تنظیمات صفحه انجام می شود. سپس در قسمت create rectangle هندسه مدل مستطیلی در صفحه گرافیکی ایجاد می شود (شکل ۵).



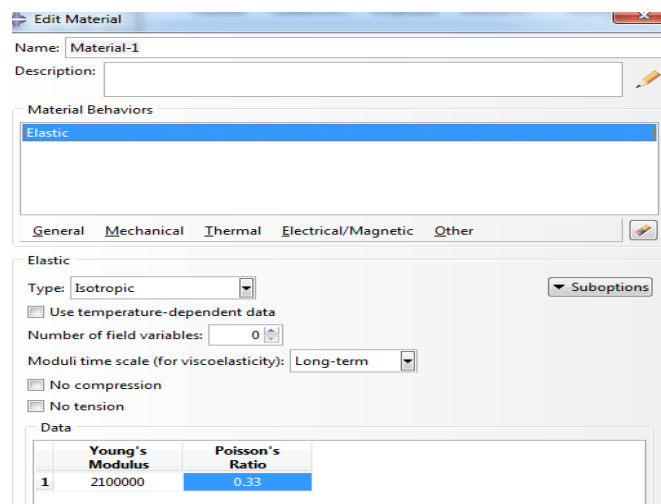
شکل ۵: ساخت هندسه‌ی ورق سالم

برای ساخت مدل ورق خراب از محیط part در قسمت partition face sketch می‌توان مکان خرابی را در صفحه ایجاد کرد (شکل ۶).



شکل ۶: ساخت هندسه‌ی ورق آسیب دیده

۲-۱-۳- خصوصیات ورق: در محیط property قسمت create material در صفحه‌ی edit material مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، چگالی و همچنین نسبت دادن خواص مواد به قطعه مورد نظر انجام می‌گیرد (شکل ۷).



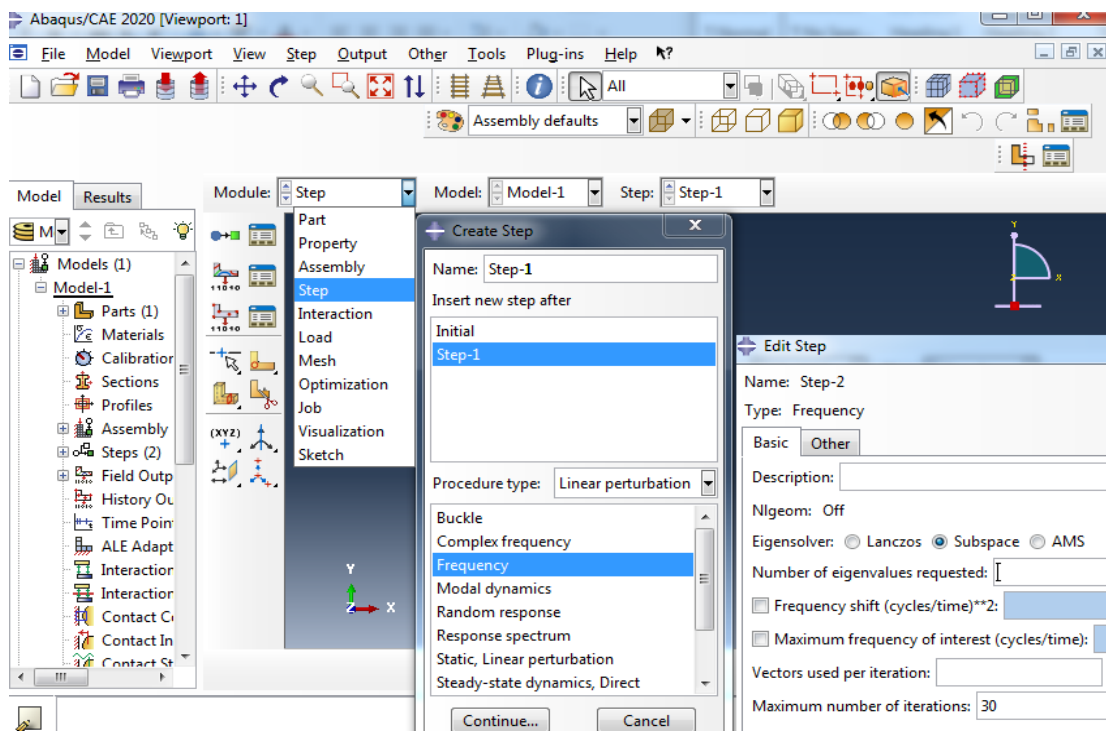
شکل ۷: معرفی مشخصات ورق

در این مطالعه، خرابی بصورت کاهش مدول یانگ تعریف می شود.

$$E_d = E_{ud} (1 - d) \quad (۱۳)$$

که در آن E_d و E_{ud} به عنوان مدول های آسیب دیده و سالم از صفحه در نظر گرفته شده است. d نشان دهنده شدت آسیب در عنصر خراب می باشد. بنابراین برای ورق آسیب دیده، خرابی بصورت کاهش در مدول، طبق رابطه ی (۱۳) در قسمت young modulus (شکل ۶) اعمال می شود.

۳-۱-۳- تحلیل ورق: برای تحلیل مودال از محیط step در صفحه ی create step تحلیل frequency و در صفحه ی edit step نوع تحلیل subspace و تعداد گامها مانند شکل ۸ مشخص می شود.



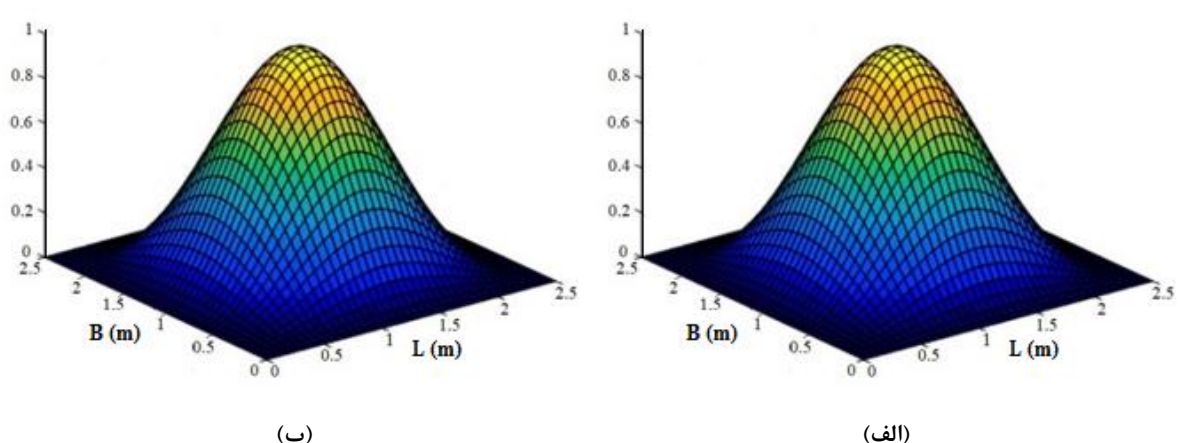
شکل ۸: تحلیل دینامیکی ورق

۳-۱-۴- بارگذاری و اعمال شرایط تکیه‌گاهی: در محیط lode قسمت create lode بارگذاری سازه و در قسمت boundary condition نوع تکیه‌گاه‌ها اعمال می‌شود.

۳-۱-۵- مش‌بندی مدل: پس از ایجاد مدل هندسی، سازه را می‌توان در محیط mash به المان‌هایی با شکل‌ها و اندازه‌های مختلف تقسیم‌بندی کرد. این کار با توجه به شکل و اندازه‌ی مش در قسمت seed part و mesh part صورت می‌گیرد.

۳-۱-۶- اجرای تحلیل: در این مرحله، از محیط job در قسمت create job تحلیل مدل آغاز می‌شود.

۳-۱-۷- مشاهده نتایج: در محیط visualization در قسمت report فایل عددی و در قسمت plot نتایج بصورت تصویری (شکل ۹) قابل مشاهده است.



شکل ۹: تصویر مد شکل ورق الف) ورق سالم ب) ورق آسیب دیده

۳-۲- اعمال تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک

با توجه به ناپیوستگی‌های کوچکی که در مد شکل سازه‌ی خراب نسبت به سازه‌ی سالم اتفاق می‌افتد، تشخیص سازه‌ی خراب و سالم از روی مد شکل غیر ممکن است (شکل ۹). از این رو با اعمال تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک بر روی مد شکل‌ها می‌توان این ناپیوستگی‌ها را برجسته و مکان‌های آسیب‌دیده را مشخص کرد. از این رو این تبدیل به صفحه سالم و آسیب دیده اعمال می‌شود که در ابتدا موجک، صفحه را به چهار زیر تصویر تجزیه می‌کند و سپس با استفاده از ساختار تجزیه‌ی زاویه‌ای کانتور، ضرایب جزئیات به دست می‌آید. که روابط آنها در معادلات (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده‌اند.

۳-۳- به دست آوردن شاخص خسارت

شاخص آسیب برای نشان دادن محل آسیب در صفحه استفاده می‌شود، که بر اساس اختلاف ضرایب تبدیل ورق سالم و ورق آسیب‌دیده محاسبه می‌شود. ضرایب برای هر گره از دو صفحه از رابطه ۱۴ به دست می‌آید.

$$DI_{i,j} = \sum_{i=1}^{i+1} \sum_{j=1}^{j+1} (C_{ud_{i,j}} - C_{d_{i,j}})^2 \quad (14)$$

C_{ud} و C_d به ترتیب ضرایب تقریب یا جزئیات تبدیل کانتورلت برای دو ورق آسیب دیده و سالم هستند که این ضرایب بر اساس معادله (۱۱) و (۱۲) محاسبه می‌شوند.

۳-۴- ترسیم و نمایش عیب

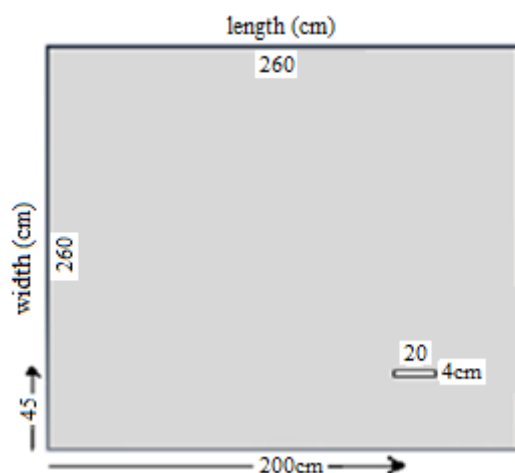
در نهایت، آسیب سازه با رسم نمودار مشخص می‌شود. در این مطالعه ضرایب سطح اول از تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک استفاده شده است. از این رو ابعاد سازه‌ی صفحه مورد مطالعه نصف سازه اولیه می‌باشد.

۴- مثال‌ها

در این قسمت می‌خواهیم با استفاده از مثال‌های عددی توانایی تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک را نشان دهیم. از این رو با استفاده از تحلیل مودال و اعمال تبدیل بر پاسخ‌های سازه، وجود، شکل و محل عیب در سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. خصوصیات ماده مورد استفاده عبارتست از $\nu=0.33$ ، $E=2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ ، $\rho=0.00785 \text{ kg/cm}^3$ که به ترتیب ضریب پواسون، مدول الاستیسیته و وزن مخصوص می‌باشند. همچنین خرابی در سازه با درصدهای مختلف کاهش در سختی، مدل‌سازی شده است.

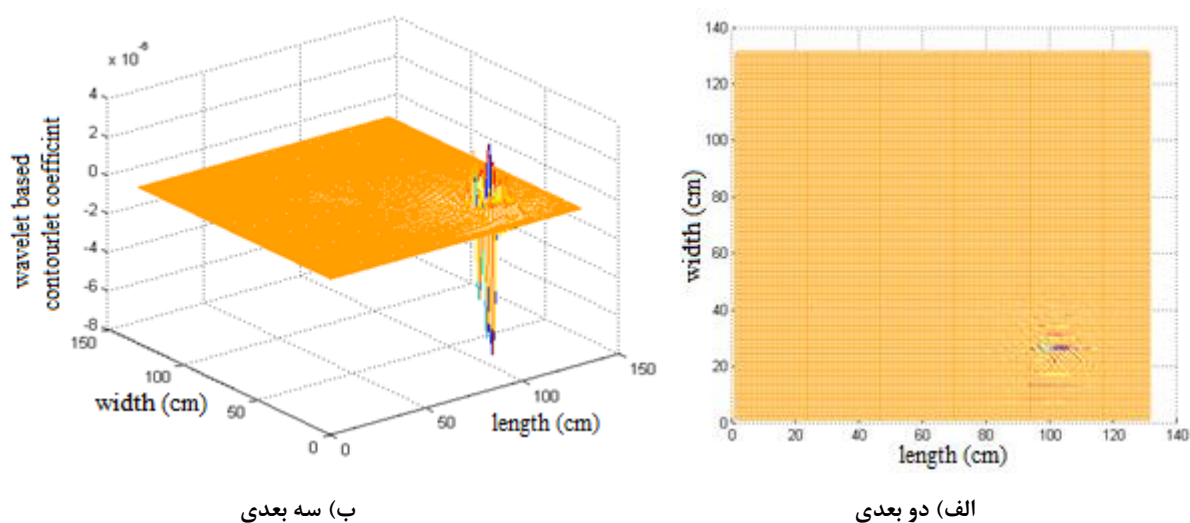
۴-۱- مثال ۱: خط مستقیم افقی

ورق نشان داده شده در شکل ۵ برای اولین مثال در نظر گرفته شده است. ابعاد ورق 260×260 cm به ضخامت ۷ cm دارای تکیه‌گاه گیردار در چهار طرف می‌باشد. خرابی با ۱۲ درصد کاهش در مدول الاستیسیته بصورت خط مستقیم با ابعاد 20×4 cm در فاصله مشخص از لبه صفحه (شکل ۱۰) مدل‌سازی شده است.



شکل ۱۰: مدل‌سازی و محل هندسی خرابی افقی در ورق

بعد از تحلیل فرکانسی ورق، از مد شکل به عنوان پاسخ سازه جهت عیب‌یابی ورق با تحلیل کانتورلت موجکی استفاده شده است. که نتایج در شکل ۱۱ ارائه شده است.

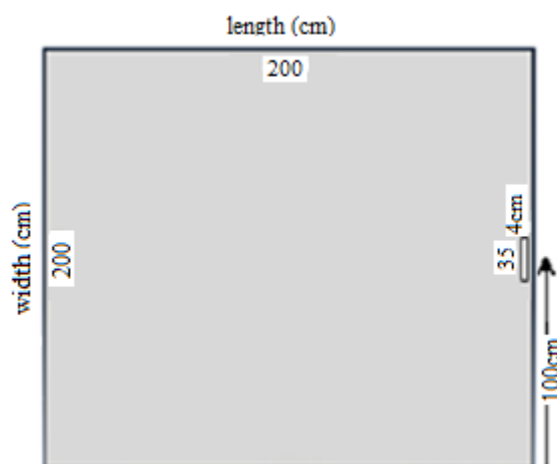


شکل ۱۱: زیر تصویری از کانتورلت بر پایه‌ی موجک بصورت دو بعدی و سه بعدی برای خرابی افقی

هدف از این مثال بررسی خرابی‌های افقی در صفحه می‌باشد. از این رو زیر تصویر دو بعدی و سه بعدی از ضرایب کانتورلت موجکی در شکل ۱۱-الف و ب ارائه شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود در شکل دو بعدی (۱۱-الف) مکان و تا حدودی شکل و ابعاد تقریبی خرابی مشخص است. و در شکل سه بعدی (۱۱-ب) در محل خرابی پرش اتفاق افتاده است.

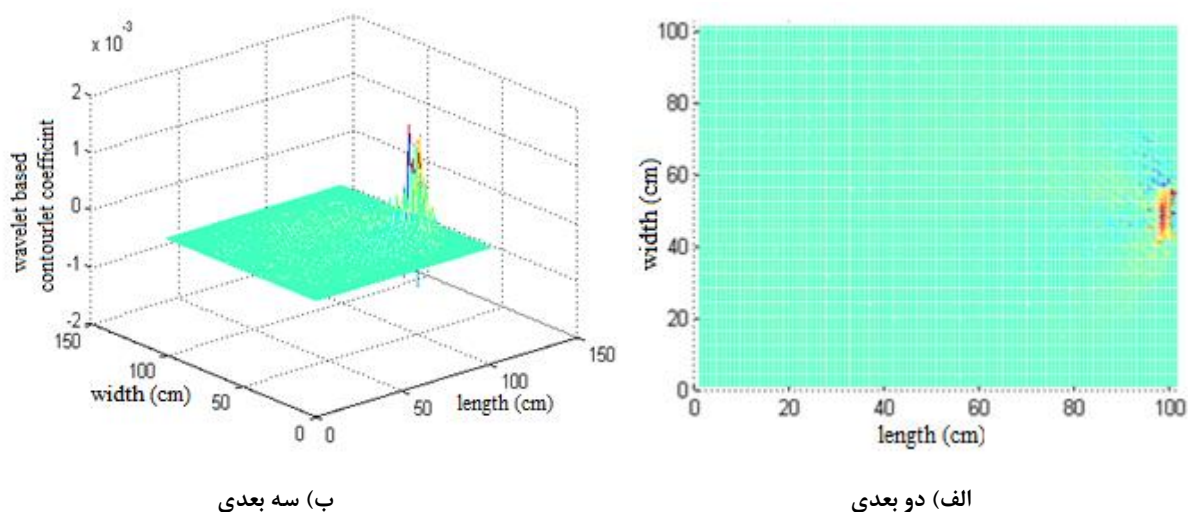
۲-۴- مثال ۲: خط مستقیم عمودی

مثال دوم بصورت یک خرابی با ۱۰ درصد کاهش در مدول الاستیسیته به شکل خط مستقیم عمودی، به ابعاد 35×4 cm در لبه سمت راست یک ورق، به ابعاد 200×200 cm مانند شکل ۱۲ مدل‌سازی شده است.



شکل ۱۲: مدل‌سازی و محل هندسی خرابی عمودی در ورق

نتایج عیب‌یابی ورق با استفاده از تحلیل کانتورلت موجکی در شکل ۱۳ قابل مشاهده است.

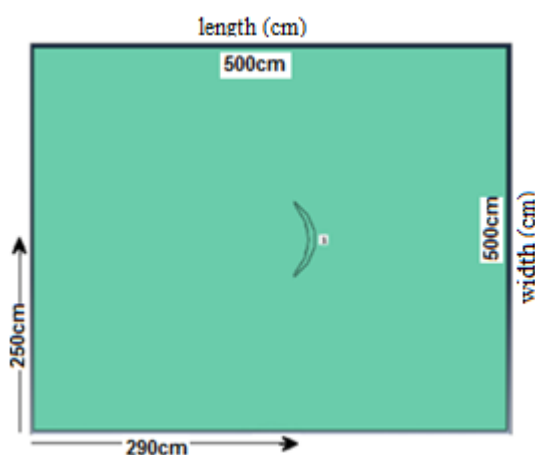


شکل ۱۳: زیر تصویری از کانتورلت بر پایه‌ی موجک بصورت دو بعدی و سه بعدی برای خرابی عمودی

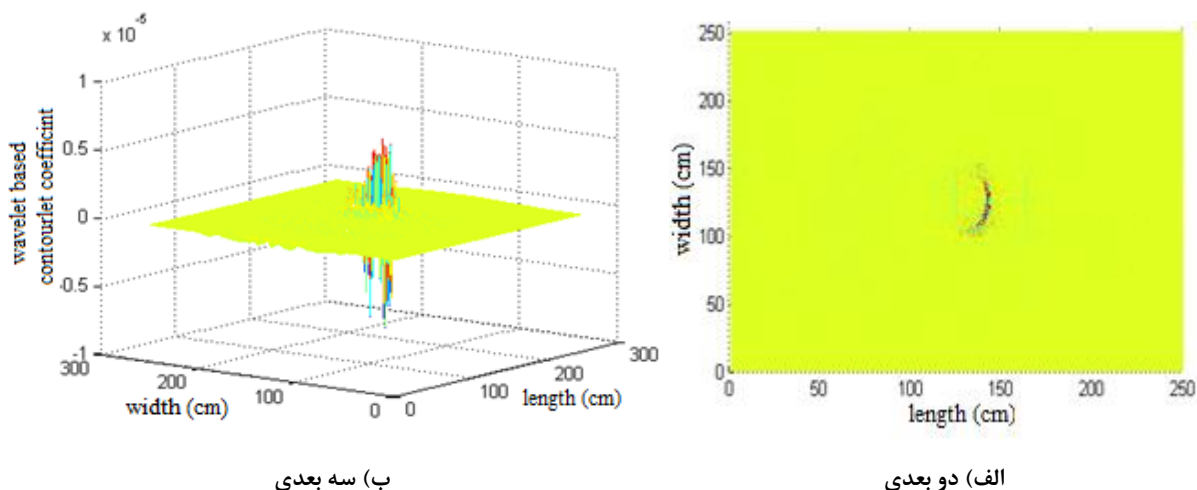
این مثال به بررسی خرابی‌های عمودی که در محل تکیه‌گاه اتفاق افتاده، می‌پردازد. همانطور که در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود در شکل دو بعدی مکان، شکل و ابعاد تقریبی خرابی مشخص است. و در شکل سه بعدی در محل خرابی پرش اتفاق افتاده است. بنابراین تبدیل کانتورلت موجکی می‌تواند خرابی‌هایی که در نزدیکی تکیه‌گاه‌ها اتفاق می‌افتد را بخوبی نمایش دهد.

۳-۴- مثال ۳: کمانی از دایره

برای راستی‌آزمایی و ارزیابی این روش، مثال ۳ مانند مثال مرجع [۱۴] انتخاب شده است. از این‌رو یک خرابی به شکل کمانی از دایره به ابعاد $5\text{cm} * 60\text{cm}$ در سمت راست ورق و در فاصله 290cm در جهت x و 250cm در جهت y مطابق شکل ۱۴ در ورقی به ابعاد $500\text{cm} * 500\text{cm}$ مدل‌سازی شده است. ۱۰ درصد کاهش در مدول الاستیسیته بیانگر خرابی در صفحه است. این مثال با استفاده از روش پیشنهادی و روش موجک حل شده است. نتایج عیب‌یابی در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ ارائه شده است.

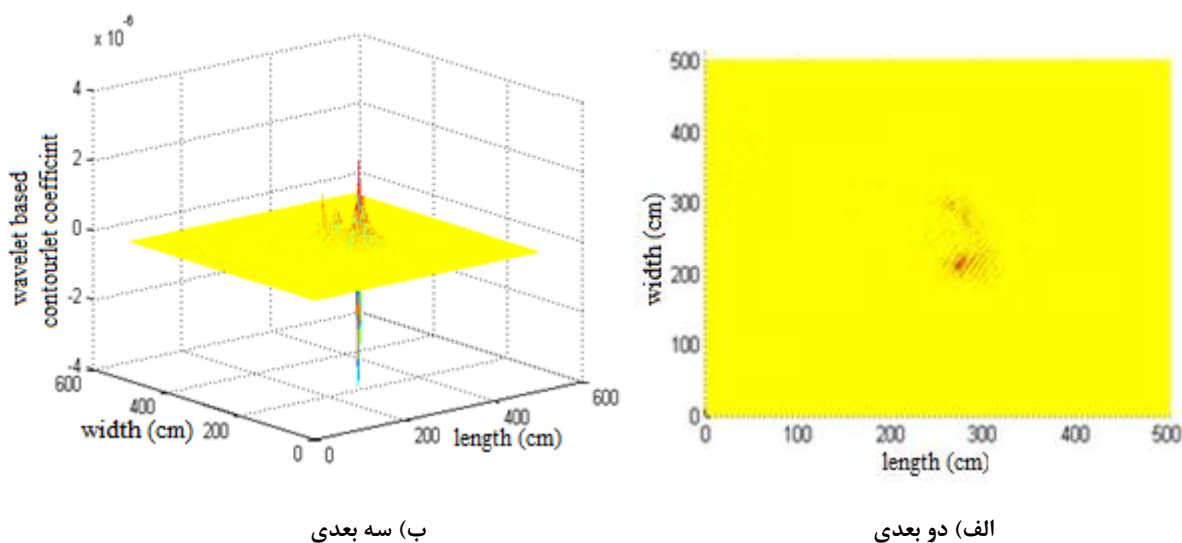


شکل ۱۴: مدل‌سازی و محل هندسی خرابی قوسی در ورق



شکل ۱۵: زیر تصویری از کانتورلت بر پایه‌ی موجک بصورت دو بعدی و سه بعدی برای خرابی قوسی

هدف از این مثال بررسی خرابی‌های منحنی شکل در ورق می‌باشد. از این رو یک خرابی قوسی شکل در صفحه ایجاد شده است و بعد از اعمال تبدیل مورد نظر، نتایج در شکل ۱۵ ارائه شده‌اند. نتایج بیانگر دقت و قدرت بالای این روش در نمایش محل و شکل خرابی در ورق می‌باشد.

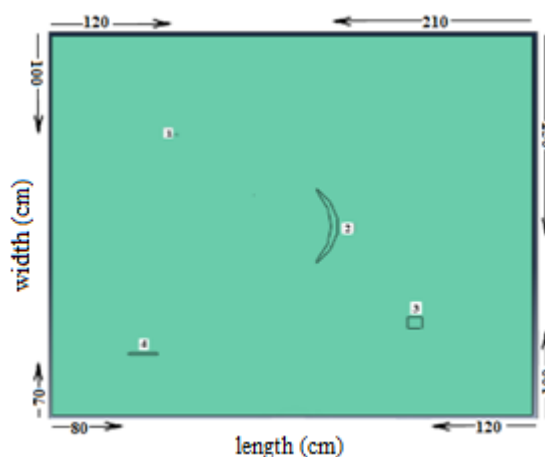


شکل ۱۶: زیر تصویری از موجک بصورت دو بعدی و سه بعدی برای خرابی قوسی

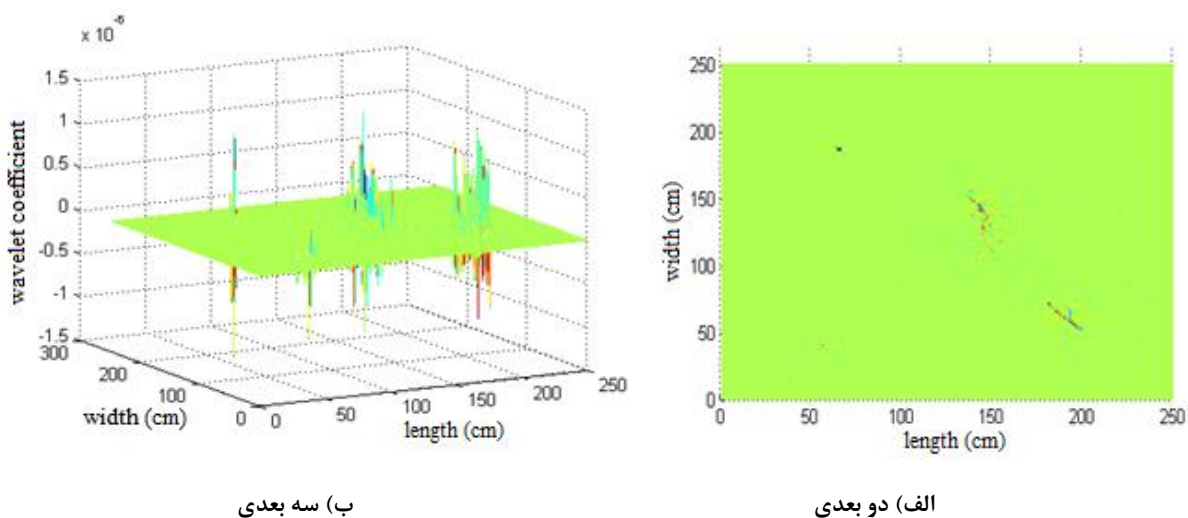
برای ارزیابی روش پیشنهادی، مثال ۳ با وجود یک خرابی منحنی شکل با روش تبدیل کانتورلت موجکی و روش تبدیل موجک حل گردید. نتایج نشان می‌دهد در روش کانتورلت موجکی (شکل ۱۵) محل و شکل خرابی بخوبی قابل تشخیص است. ولی در روش موجک در شکل ۱۶ همانطور که مشاهده می‌شود فقط محل خرابی قابل تشخیص است و شکل خرابی مشخص نیست. این موضوع به دلیل ماهیت تبدیل موجک است. موجک‌ها قادرند تصویر را در راستای افقی، عمودی و قطری به خوبی نمایش دهند. ولی در برابر خطوط منحنی شکل ضعیف عمل می‌کنند. از این رو روش کانتورلت که بعد از موجک‌ها آمدند این عیب موجک رو پوشش دادند. و خرابی‌های منحنی شکل را به خوبی نمایش می‌دهند. با توجه به حل این مثال با دو روش موجک و کانتورلت بر پایه‌ی موجک، همچنین مثال حل شده در مرجع [۱۴] و نتایج به دست آمده، می‌توان با اطمینان از این روش بعنوان یک روش قدرتمند در حل مسائل عیب‌یابی استفاده کرد.

۴-۴- مثال ۴: خرابی چندگانه

در این مثال ترکیبی از چهار خرابی با شکل‌های متفاوت به صورت نقطه، قوس به ابعاد 5×60 cm، ناحیه مربعی به ابعاد 15×15 و خط مستقیم به ابعاد 1×25 cm در صفحه 500×500 cm مدل‌سازی شده است (شکل ۱۷). خرابی‌ها با ۸ درصد کاهش در مدول الاستیسیته مشخص شده‌اند. نتایج عیب‌یابی در شکل ۱۸ ارائه شده است.



شکل ۱۷: مدل‌سازی و محل هندسی خرابی‌ها در ورق



شکل ۱۸: زیر تصویری از موجک بصورت دو بعدی و سه بعدی برای خرابی‌های چندگانه

در این مثال ترکیبی، چندین خرابی با هم در صفحه مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل دو بعدی (۱۸-الف) به خوبی محل خرابی‌ها قابل تشخیص است. و در شکل سه بعدی (۱۸-ب) نیز پرش‌های اتفاق افتاده، محل‌های خرابی را نشان می‌دهند. بنابراین تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک قدرت لازم برای نمایش چندین خرابی با اشکال متفاوت به صورت هم‌زمان را دارد.

۶- بحث

در حقیقت وجود خرابی در سازه، یک ناپیوستگی کوچک در پاسخ سازه در محدوده خرابی ایجاد می‌کند. که با مشاهده پاسخ سازه این ناپیوستگی‌ها آشکار نیستند ولی با اعمال تبدیل بر روی پاسخ‌ها این ناپیوستگی‌ها به وضوح قابل مشاهده هستند. عامل آشکار شدن این ناپیوستگی‌ها توزیع ضرایب تبدیل می‌باشند. که باعث ایجاد پرش‌هایی در محل خرابی ورق می‌شوند. بنابراین ما می‌توانیم با توجه به توزیع ضرایب این تبدیل‌ها و مشاهده پرش‌ها، به وجود و محل خرابی در ورق پی ببریم. با مشاهده مثال‌های حل شده در این مقاله، می‌توان به قدرت تبدیل کانتورلت در نمایان کردن عیب سازه در حالت‌های مختلف پی برد. می‌توان در صورت وجود خطا با شدت زیاد از روش‌های حذف خطا استفاده کرد. یا با استفاده از روش‌های بهینه‌ساز شدت خرابی را به دست آورد. همچنین می‌توان از ترکیب روش‌های تقریب‌ساز با روش‌های عیب‌یابی، در حل بعضی مسائل عیب‌یابی استفاده کرد.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق، روشی برای شناسایی آسیب در سازه‌های صفحه‌ای با استفاده از مد شکل سازه پیشنهاد شده است. برای دستیابی به این هدف، از تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک که یک طرح توسعه یافته جدید از تبدیل موجک است برای عیب‌یابی ورق استفاده شده است. این تبدیل، ساختار دو مرحله‌ای دارد. در مرحله اول موجک‌ها در هر سطح، تصویر را به چهار زیر تصویر تجزیه می‌کنند. و در مرحله دوم، بانک‌های فیلتر جهت‌دار تجزیه‌ی شعاعی ۸ جهته را به خوبی ارائه کرده‌اند. این ساختار باعث ارائه یک تبدیل جدید بنام تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک می‌شود. که با اعمال این تبدیل بر روی مد شکل‌ها، ضرایب تبدیل در محل عیب با هم جمع می‌شوند و باعث پرش در محل عیب می‌شوند.

از این‌رو برای بررسی عملکرد تبدیل پیشنهادی مثال‌های متفاوتی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که این روش قادر است به خوبی وجود، مکان و شکل تقریبی عیب را در ورق تشخیص دهد. علاوه بر این، نتایج زیر را می‌توان از این مطالعه به دست آورد.

- ۱) روش پیشنهادی قادر به تشخیص انواع خرابی‌ها بصورت افقی، عمودی و منحنی شکل در صفحه و همچنین در نزدیکی تکیه‌گاه می‌باشد.
- ۲) این روش همچنین وجود چند آسیب بطور هم‌زمان و با شکل‌های مختلف در ورق را به خوبی نمایان می‌کند.
- ۳) برای راستی‌آزمایی و ارزیابی برتری عملکرد روش تبدیل کانتورلت موجکی، مثالی که دارای یک خرابی قوسی شکل است با روش پیشنهادی و روش تبدیل موجک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد در روش موجک فقط محل خرابی قابل تشخیص است و شکل خرابی مشخص نیست. ولی در روش کانتورلت موجکی علاوه بر محل آسیب، شکل خرابی نیز به خوبی نمایش داده شده است. این موضوع بیانگر برتری روش تبدیل کانتورلت بر پایه‌ی موجک نسبت به روش‌های قبل می‌باشد.

مراجع

- [1] Doebling, SW. Farrar, CR. Prime, RM. Shevitz, DW. (1996). Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics. *A Literature Review*, ESA – EA, Los Aiamos.
- [2] Candes, E. Donoho, D. (2000). Curvelets a surprisingly effective nonadaptive representation for objects with edges. *ICSF, Vanderbilt Univ*, 105-20.
- [3] Do, MN. Vetterli, M. (2002). Contourlets a directional multiresolution image representation in image processing. *Image Processing*.
- [4] Eslami, R. Radha, H. (2004). Wavelet – based contourlet transform and its application to image coding, *Image Processing*. [5] Sanchez, j. (2005). Evaluation of structural damage identification method based on dynamic characteristic. *Doctor of Philosophy in Civil Engineering*, Puertorico.

- [6] Rucka, M. Wilde, K. (2006). Application of continuous, wavelet transform in vibration based damage detection method for beams and plates. *J Sound and Vibration*, 536-50.
- [7] Riazifar, N. Yazdi, M. (2009). Effectiveness of contourlet vs wavelet transform on medical image compression: a comparative study. *World Academy of Science Engineering and Technology Journal*, 49, 837-42.
- [8] Bagheri, A. Ghodrati Amiri, G. Seyed Razzaghi, SA. (2009). Vibration-based damage identification of plate structures via curvelet transform. *J Sound and Vibration*, 327, 593-603.
- [9] Yang, JM. Yang, ZW. Tseng, CM. (2011). Damage detection in stiffened plates by wavelet transform. *J Analytical and Experimental Modal Analysis*, 3, 126-35.
- [10] Bagheri, A. Ghodrati, AG. Khorasani, M. Bakhshi, H. (2011). Structural damage identification of plates based on modal data using 2D discrete wavelet transform. *J Structural Engineering and Mechanics*, 40, 13-28.
- [11] Nicknam, A. Hosseini, M. Bagheri, A. (2011). Damage detection and denoising in two dimensional structures using curvelet transform by warpping method. *J Archive of Applied Mechanics*, 81, 1915-24.
- [12] Montanari, L. Spagnoli, A. Iswajit, B. Broderick, B. (2015). On the effect of spatial sampling in damage detection of cracked beams by continuous wavelet transform. *J Sound and Vibration*, 345, 233 - 49.
- [13] Hajizadeh, AR. Salajegheh, J. Salajegheh, E. (2016). 2-D Discrete wavelet-based crack detection using static and dynamic responses in plate structures. *Asian Journal of Civil Engineering*, 17(6), 713-35.
- [14] Hajizadeh, AR. Salajegheh, J. Salajegheh, E. (2016). Performance evaluation of wavelet and curvelet transforms based-damage detection of crack types in plate structures. *Structural Engineering and Mechanics*, 60(4), 667-691.
- [15] Hamidian, D. Salajegheh, E. Salajegheh, J. (2018). Irregular Continuum Structures Damage Detection Based on Wavelet Transform and Neural Network. KSCE, Published Online
- [16] Hamidian, D. Salajegheh, E. Salajegheh, J. (2018). Damage detection technique for irregular continuum structures using wavelet transform and fuzzy inference system optimized by particle swarm optimization. *Structural Engineering and Mechanics*, 67(5), 457-464.
- [17] Seyedpoor, SM. Norouzi, E. Ghasemi, S. (2018). Structural damage detection using a multi-stage improved differential evolution algorithm (Numerical and experimental). *Smart Structures and Systems*, 21(2), 235-248.
- [18] Khanahmadi, M. Rezayfar, O. Gholhaki, M. (2019). Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(8), 288-309.
- [19] Arefi, Sh. L. Gholizad, A. Seyedpoor, S. M. (2020). A modified index for damage detection of structures using improved reduction system method. *Smart Structures and Systems*, 25(1), 1-22.
- [20] Khanahmadi, M. Rezayfar, O. Gholhaki, M. (2021). Damage Detection in Steel Plates Based on Comparing Analytical Results of the Discrete 2-D Wavelet Transform of Primary and Secondary Modes Shape. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(5), 198-214.
- [21] Ahmadi-Nedushan, B. Fathnejat, H. (2022). A modified teaching-learning optimization algorithm for structural damage detection using a novel damage index based on modal flexibility and strain energy under environmental variations. *Eng Comput*, 38, 847-874.
- [22] Jahangir, H. Khatibinia, M. Mokhtari Masinaei, M. (2022). Damage detection in prestressed concrete slabs using wavelet analysis of vibration responses in the time domain. *J Rehabil Civ Eng*, 10(3), 37-63.