

# عیب‌یابی در صفحات کامپوزیت چندلایه با استفاده از روش تحلیلی آنالیز

## موجک

مرتضی خادمی کوهی	احمد قاسمی قلعه بهمن	مجید قلهکی*	محتشم خان احمدی
دانشجوی دکتری	دانشیار	استاد	دانشجوی دکتری
دانشکده مهندسی هوافضا	دانشکده مهندسی مکانیک	دانشکده مهندسی عمران	دانشکده مهندسی عمران
دانشگاه فردوسی مشهد	دانشگاه سمنان	دانشگاه سمنان	دانشگاه کردستان

morteza.khademikouhi@mail.um.ac.ir    ghasemi@semnan.ac.ir    mgholhaki@semnan.ac.ir    m.khanahmadi@uok.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۱۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۰

### چکیده

استفاده از مصالح کامپوزیتی در صنایع مختلف روند افزایشی چشمگیری دارد. از طرفی پایش سلامت در اعضای کامپوزیتی مورد توجه محققان است. در اثر آسیب، پاسخ‌های سازه به دلیل تغییر در خواص مکانیکی (جرم، سختی و میرایی) دچار تغییر می‌شود. از بررسی تغییرات به‌وجود آمده در پاسخ‌ها می‌توان سلامت سازه و اعضای سازه‌ای را مورد پایش قرار داد. در این مقاله، شناسایی آسیب در صفحه کامپوزیت ۸ لایه که هر دو لایه متوالی با زاویه ۹۰ درجه در اتصال با هم هستند، مورد بررسی قرار گرفت. در ابتدا، صفحه کامپوزیتی در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس<sup>۱</sup> مدل‌سازی و تحلیل فرکانسی شد و اطلاعات مودال حالت‌های آسیب و بدون آسیب استخراج گردید. سپس، شناسایی آسیب با تعریف یک سیگنال دو بعدی به‌صورت مجموع یا تفاضل شکل‌های مود سالم و معیوب به‌عنوان ورودی تبدیل موجک گسسته دو بعدی انجام شد. نتایج، آشفتگی و اغتشاش در ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری آنالیز موجک سیگنال ورودی را در محل‌های آسیب نشان داد، به‌نحوی که با یک بررسی ساده، محل‌های آسیب به‌راحتی قابل شناسایی است.

**واژگان کلیدی:** پایش سلامت سازه، صفحه کامپوزیت چندلایه، تحلیل فرکانسی، تبدیل موجک، شناسایی آسیب

### ۱. مقدمه

است و به‌عنوان مثال می‌توان به آجرهای کاه‌گلی که در ساخت آنها از تقویت‌کننده کاه استفاده شده است، اشاره نمود که نسبت به مصالح کاه و گل ماندگارتر و مقاوم‌تر هستند. مصالح کامپوزیتی نوین در بسیاری از کاربردها که کاهش وزن سازه دارای اهمیت است، جایگزین مناسبی برای مصالح فلزی محسوب می‌شوند. با توجه به پایداری بسیار زیاد کامپوزیت‌های پلیمری و مقاومت بسیار خوب آنها در

در سال‌های اخیر استفاده از مصالح کامپوزیتی در سازه‌های مهندسی روند افزایشی چشمگیری داشته است. مصالح کامپوزیتی از ترکیب چند نوع مصالح به‌منظور بهبود خواص مکانیکی تولید می‌شوند، به‌طوری که اجزا تشکیل‌دهنده آنها ویژگی‌های خود را حفظ نموده و در یکدیگر حل نمی‌شوند. استفاده از این مصالح در زمان‌های گذشته نیز مرسوم بوده

محیط‌های خورنده، استفاده از این نوع کامپوزیت‌ها در صنایع دریایی رو به افزایش است. از جمله کاربردهای کامپوزیت‌های پلیمری در صنایع دریایی می‌توان به ساخت بدنه قایق‌ها، کشتی‌ها و تأسیسات فراساحلی اشاره نمود. از دیگر کاربردهای آنها می‌توان در ساخت بدنه هواپیما، پره‌های توربین بادی و پوشش رادار هواپیما را نام برد. همچنین، در صنعت نفت و گاز به‌منظور ترمیم و تقویت لوله‌های فرسوده از مصالح کامپوزیتی استفاده می‌شود. در حوزه مهندسی عمران نیز می‌توان به نقش کامپوزیت‌هایی که به روش پالتروژن<sup>۲</sup> تولید می‌شوند، در ساخت پل‌ها اشاره کرد. استفاده از پانل‌های کامپوزیتی روش مناسبی برای کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه‌ها است و با طول عمر بالا و استحکام بیشتر، جایگزین ایده‌آلی برای مشابه فولادی خود هستند. سطوح پل‌های کامپوزیتی به‌صورت طول‌های پیوسته توسط فرایند پالتروژن طراحی و تولید می‌گردند. پل‌های کامپوزیتی اکنون به‌عنوان پل‌های دائمی برای راه‌های اصلی بسیاری از کشورهای پیشرفته به‌کار گرفته می‌شوند. این پل‌ها به میزان قابل قبولی اهداف مورد نظر طراحان را برآورده ساخته‌اند. با این وجود با گذشت زمان همواره از کارایی سازه‌ها به دلیل آسیب‌های جزئی در برخی از المان‌ها کاسته شده و سلامت سازه به خطر می‌افتد؛ بنابراین، یکی از مسائلی که توجه بسیاری از محققان را به خود جلب نموده است، شناسایی موقعیت‌های آسیب در سازه بر مبنای تحلیل پاسخ‌های ارتعاشی است [۱-۴].

در اثر آسیب، پاسخ‌های مودال (فرکانس‌ها و شکل‌های مود) دچار تغییرات می‌شود. این تغییرات به دلیل تغییر در خواص مکانیکی (جرم، سختی و میرایی) در اثر آسیب است؛ بنابراین، از تحلیل پاسخ‌ها می‌توان وجود آسیب در سازه را بررسی و موقعیت آن را شناسایی نمود. در این راستا، تبدیل موجک<sup>۳</sup> (WT) به‌عنوان یکی از ابزارهای توانمند ریاضیاتی پردازش سیگنال‌ها در اختیار است و با استفاده از تحلیل موجک شکل‌های مود ارتعاشی می‌توان ویژگی‌های شکل مود را

استخراج کرد و نقاط ناپیوستگی یا تغییرات ناگهانی را که نشان‌دهنده محل‌های آسیب است، شناسایی نمود. در ادامه، تاریخچه‌ای از تحقیقات انجام شده به کمک تبدیل موجک در حوزه پایش سلامت و تشخیص آسیب سازه‌های مهندسی ارائه گردیده است.

وانگ و دنگ<sup>۴</sup> [۵] با فرض اینکه آسیب در سازه باعث اختلال در پاسخ‌های آن می‌شود، با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل پاسخ‌های سازه پرداختند و نشان دادند اگرچه این اختلالات در پاسخ کلی سازه ظاهر نمی‌شود، اما اغلب از روی ضرایب موجک قابل شناسایی است.

لوتریدیس و همکاران<sup>۵</sup> [۶] با انتقال مود ارتعاشی صفحه خمشی ترک‌خورده به حوزه موجک، محل و امتداد ترک را مشخص نمودند.

گوکداک و کوپماز<sup>۶</sup> [۷] با استفاده از ترکیب تبدیل موجک پیوسته و گسسته به تشخیص آسیب در تیرها پرداختند. شکل مود ثانویه به‌صورت ترکیبی از شکل مود اولیه و عواملی چون خطای ناشی از اندازه‌گیری و آسیب‌های محلی در نظر گرفته شد. آنها با استفاده از تبدیل موجک گسسته یک تابع تقریب مناسب را که بیانگر وضعیت سالم باشد، استخراج نمودند. اختلاف بین ضرایب موجک پیوسته وضعیت آسیب و تابع تقریبی متناظر با وضعیت سالم به‌عنوان یک شاخص تخمین خسارت معرفی گردید.

ژونگ و ایادیجی<sup>۷</sup> [۸] براساس تبدیل موجک ایستا<sup>۸</sup> (SWT) و داده‌های مودال به آشکارسازی ترک در تیرها با شرایط تکیه‌گاهی ساده پرداختند و نشان دادند که از تحلیل موجک ایستای داده‌های شکل مود می‌توان محل آسیب را شناسایی نمود.

ایکسو و همکاران<sup>۹</sup> [۹] با استفاده از موجک‌های گوسی جهت‌دار دو بعدی<sup>۱۰</sup> و شکل‌های انحنای عملیاتی اسکن شده با لیزر<sup>۱۱</sup> موفق به شناسایی آسیب در صفحات شدند.

لی و همکاران<sup>۱۲</sup> [۱۰] با استفاده از روش آنتروپی موجک نسبی پیوسته<sup>۱۳</sup> (CRWE) به شناسایی آسیب در سازه‌های

پل خریابی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی قابلیت محلی سازی آسیب در سازه های پل خریابی را دارد.

کاتونین<sup>۱۴</sup> [۱۱] با استفاده از موجک های ناپایدار گوینکانکس<sup>۱۵</sup> تحت اثر انرژی های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل های مود صفحات کامپوزیتی محتمل آسیب پرداخت و نشان داد که با استفاده از این موجک ها مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می دهد.

یانگ و ایدجی<sup>۱۶</sup> [۱۲] روشی برای شناسایی آسیب در صفحات کامپوزیتی با استفاده از سطح فرکانس مودال<sup>۱۷</sup> (MFS) ارائه نمودند. آنها نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه ها باعث اختلال در سطح فرکانس مودال شده و با محاسبه ضریب موجک سطح فرکانس مودال می توان محل و شکل آسیب را مشخص نمود.

ژاو و همکاران<sup>۱۸</sup> [۱۳] با استفاده از تبدیل موجک با معرفی یک شاخص تشخیص آسیب، موفق به شناسایی آسیب در تیر بتن آرمه شدند.

قاسمی قلعه بهمن و همکاران [۱۴] با استفاده از ترکیب تبدیل موجک و مدل المان محدود به روز شده به تشخیص آسیب در صفحات کامپوزیتی چند لایه پرداختند. آنها با استفاده از تبدیل موجک، محل آسیب و سپس، با بهینه نمودن یک تابع خطای ارائه شده توسط الگوریتم ژنتیک موفق به شناسایی پارامترهای آسیب شدند.

یونسی و همکاران<sup>۱۹</sup> [۱۵] براساس داده های مودال آزمایشگاهی و استفاده از تبدیل موجک موفق شدند محل جادشگی بتن از جداره فولادی را در ستون های فولادی پر شده با بتن شناسایی نمایند.

وانگ و شی<sup>۲۰</sup> [۱۶] یک شاخص آسیب بر مبنای تبدیل بسته ای موجک<sup>۲۱</sup> (WPT) برای شناسایی آسیب در سازه ها پیشنهاد کردند. آنها پس از تجزیه سیگنال با WPT از شاخص اختلاف انرژی استفاده نمودند و نشان دادند که این شاخص به سطوح پایین آسیب حساس است.

وانگ و همکاران<sup>۲۲</sup> [۱۷] براساس تبدیل موجک و بردار نیروی باقی مانده شاخصی برای شناسایی آسیب در سازه تونلی پیشنهاد دادند. نتایج نشان داد که شاخص پیشنهادی در شناسایی آسیب سازه تونلی کارآمد است.

خان احمدی و همکاران [۱۸] با پیشنهاد روشی بر مبنای تبدیل موجک و داده های شکل مود به شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. آنها نشان دادند که با استفاده از این روش می توان محل های آسیب را با دقت بالایی شناسایی نمود. آنها در تحقیق دیگری با استفاده از تحلیل موجک شکل های مود صفحه فولادی به مقایسه ضرایب موجک حالت های سالم و معیوب پرداختند و نشان دادند که بی نظمی و اغتشاشات در ضرایب موجک تولید شده حالت های معیوب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده حالت سالم در موقعیت های مختلف آسیب چشمگیر است [۱۹]. در تحقیق دیگری براساس تبدیلات موجک پیوسته و گسسته به تشخیص آسیب در تیرهای فولادی پرداختند و نشان دادند که با استفاده از هر دو نوع تبدیلات موجک می توان از تحلیل پاسخ های استاتیکی و دینامیکی موقعیت های آسیب را شناسایی نمود [۲۰].

حظه و رضایی فر<sup>۲۳</sup> [۲۱] به شناسایی آسیب در یک سازه ساختمانی کاملاً پانلی بر مبنای تحلیل موجک شکل مود پرداختند و نشان دادند که محل آسیب با ایجاد مقادیر نسبی حداکثری و حداقلی در ضرایب موجک قابل شناسایی است. با توجه به گسترش روز افزون استفاده از مصالح کامپوزیتی در صنعت مهندسی، پایش سلامتی و تشخیص آسیب در اعضای کامپوزیتی از اهمیت ویژه ای برخوردار بوده و انجام تحقیقات در این حوزه ضرورتی انکارناپذیر است. در این مقاله، یک شاخص مکان یاب آسیب بر مبنای روش تحلیلی تبدیل موجک و ماتریس های شکل مود به منظور تعیین موقعیت آسیب پیشنهاد شده و کارایی آن برای حالت های مختلف آسیب بررسی گردیده است. در ادامه، مبانی ریاضی تبدیل موجک ارائه می گردد.

## ۲. تبدیل موجک

۱- انتگرال تابع موجک باید صفر باشد [۲۲ و ۲۳]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (2)$$

۲- انرژی آن محدود باشد [۲۲ و ۲۳]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < +\infty \quad (3)$$

۳- باید در رابطه (۵) صدق نماید [۲۲-۲۴]:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\Psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < +\infty \quad (4)$$

که در آن  $\Psi$  تبدیل فوریه  $\psi$  و  $\omega$  بیانگر بسامد است. رابطه ۳ پیشنهاد می‌کند که تابع به صورت نوسانی است. رابطه ۴ به این معنی است که بیشترین انرژی تابع موجک برای یک بازه زمانی کوتاه نامحدود نمی‌شود [۲۴].

### ۲-۲. تبدیل موجک گسسته

با در نظر گرفتن پارامترهای  $a = 2^j$  و  $b = 2^j k$  در رابطه ۲، نوع گسسته تبدیل موجک حاصل می‌گردد ( $k$  و  $j$  اعداد صحیح هستند). با جایگذاری مقادیر گسسته  $a$  و  $b$  در رابطه ۲، تابع موجک با رابطه ۶ تعریف می‌شود:

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j/2}t - k) \quad (6)$$

در این صورت جزئیات و تقریبات در مرحله  $j$  با روابط ۷ و ۸ قابل محاسبه است.

$$D_j(t) = \sum_{k \in Z} cD_j(k) \psi_{j,k}(t) \quad (7)$$

$$A_j(t) = \sum_{k \in Z} cA_j(k) \phi_{j,k}(t) \quad (8)$$

در روابط ۷ و ۸،  $Z$  مجموعه اعداد صحیح مثبت و  $cD_j$  و  $cA_j$  به ترتیب ضرایب جزئیات و تقریبات مرحله  $j$  است که با روابط ۹ و ۱۰ تعیین می‌گردد:

$$cD_j(k) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (9)$$

$$cA_j(k) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \phi_{j,k}(t) dt \quad (10)$$

در رابطه ۱۰،  $\phi$  تابع مقیاس و  $S(t)$  سیگنال مورد نظر است

تبدیل موجک یک نوع تبدیل زمان-فرکانس با رویکرد چند رزولوشنی است که به کمک آن می‌توان مشخصات فرکانسی سیگنال را در یک بازه زمانی کوتاه استخراج نمود و نشان داد که این اجزا با گذشت زمان به چه نحو تغییر می‌کند. در واقع این تبدیل مجموعی از یک سری توابع اساسی است که برای هر رزولوشن فرکانسی تغییر می‌کند و اجزا فرکانسی در رزولوشن‌های مختلف حاصل می‌گردد [۲۶]. این تبدیل جایگزین مناسبی با هدف بر طرف نمودن مشکلات مربوط به رزولوشن ثابت در تبدیل فوریه زمان کوتاه (STFT) برای تحلیل سیگنال‌ها است و به دو صورت تبدیل موجک پیوسته (CWT) [۲۵] و تبدیل موجک گسسته (DWT) [۲۶] تعریف می‌شود.

### ۱-۲. تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته سیگنال  $x(t)$  با رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$CWT_{a,b}^{\psi} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}^*(t) dt \quad (1)$$

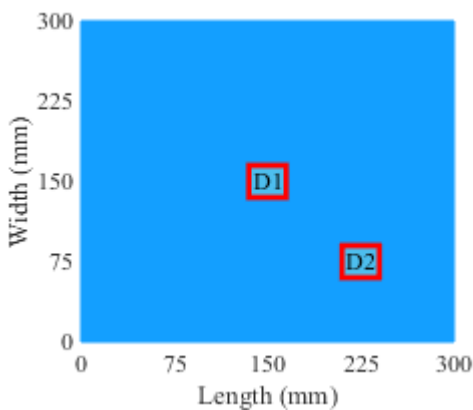
که در آن

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

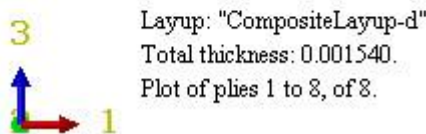
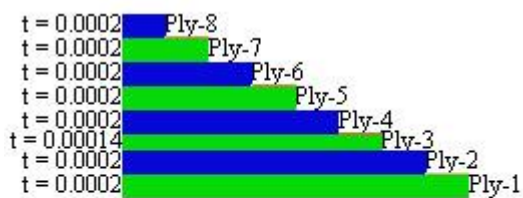
در رابطه (۲)  $a$  و  $b$  به ترتیب پارامترهای مقیاس و انتقال هستند.  $\psi_{a,b}^*$  مزدوج مختلط تابع موجک مادر  $\psi$  است. تابع نسخه انتقال یافته و مقیاس شده تابع موجک مادر است. تابع موجک مادر در آنالیز موجک با پارامتر مقیاس و انتقال تعریف شده است که این ویژگی منجر به ارائه تحلیل چندگانه سیگنال‌های غیرایستا می‌شود، به این صورت که با انتخاب مقیاس‌های کوچک و بزرگ بازه‌های کوچک و بزرگی روی سیگنال توسط تبدیل موجک برای انجام آنالیز موجک انتخاب می‌شود.

تابع موجک باید این ۳ شرط را ارضا نماید:

۲ مشاهده می‌شود.



شکل ۱. صفحه کامپوزیتی با حالت‌های آسیب D1 و D2



شکل ۲. ضخامت لایه‌های صفحه کامپوزیتی در ناحیه خرابی

جدول ۱. مشخصات مکانیکی لایه‌ها

مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)		
$E_z$	$E_y$	$E_x$
۱۵۲۰۰	۱۵۲۰۰	۵۰۰۰۰
مدول برشی (مگاپاسکال)		
$G_{xz}$	$G_{yz}$	$G_{xy}$
۴۷۰۰	۳۳۸۰۰	۴۷۰۰
نسبت پواسن		
$\nu_{xz}$	$\nu_{yz}$	$\nu_{xy}$
۰/۲۵۴	۰/۴۲۸	۰/۲۵۴

تحلیل فرکانسی صفحه کامپوزیتی با ابعاد ۱۵ میلی‌متر در هر یک از حالت‌های سالم و معیوب انجام شده و شکل موده‌های اول تا سوم سالم در شکل ۳ نشان داده شده است.

و می‌توان سیگنال  $S(t)$  را به صورت رابطه ۱۱ بازسازی نمود.

$$S(t) = A(t) + \sum D_j(t) \quad (11)$$

لازم به ذکر است تبدیلات موجک را می‌توان به صورت دو بعدی توسعه داد. تبدیل موجک پیوسته برای یک سیگنال دو بعدی  $f$  با رابطه ۱۲ تعریف می‌شود [۲۵].

$$2DCWT_{a,b_1,b_2}^\psi = \frac{1}{\sqrt{a \times a}} \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \psi^* \left( \frac{x-b_1}{a}, \frac{y-b_2}{a} \right) dx dy \quad (12)$$

به طور مشابه، تبدیل موجک گسسته برای سیگنال گسسته دو بعدی  $S_0$  با گسسته‌سازی پارامترهای انتقال و مقیاس در ۱۲ با رابطه ۱۳ تعیین می‌شود [۲۶].

$$S_0(n_1, n_2) = S_j(n_1, n_2) + \sum_{j<i} W_j^1(n_1, n_2) + \sum_{j<i} W_j^2(n_1, n_2) + \sum_{j<i} W_j^3(n_1, n_2) \quad (13)$$

که در آن  $S_j(n_1, n_2)$ ،  $W_j^1(n_1, n_2)$ ،  $W_j^2(n_1, n_2)$  و  $W_j^3(n_1, n_2)$  به ترتیب ضرایب تقریب و جزئیات افقی، قائم و قطری سیگنال آنالیز شده هستند.

### ۳. مدل‌سازی صفحه کامپوزیتی و آنالیز مودال

صفحه کامپوزیتی ۸ لایه با ابعاد ۳۰۰×۳۰۰ میلی‌متر و ضخامت لایه ۰/۲ میلی‌متر که لایه‌های متوالی با زاویه ۹۰ درجه در اتصال با هم هستند، با موقعیت‌های آسیب D1 و D2 به ابعاد ۳۰×۳۰ میلی‌متر در شکل ۱ آمده است، شرایط تکیه‌گاهی آزاد و مشخصات مکانیکی ارائه شده در جدول ۱ با استفاده از المان Shell 3D در نرم‌افزار اجزا محدود آباکوس مدل‌سازی شده است. آسیب به صورت ۳۰٪ کاهش ضخامت لایه سوم در ناحیه آسیب که محدوده آن با رنگ قرمز مشخص شده، تعریف گردیده است در شکل‌های ۱ و

فرکانس طبیعی (هرتز)			وضعیت سلامتی	
$f_3$	$f_2$	$f_1$		
۶۴/۶۴۴	۵۹/۵۷۳	۳۱/۲۱۸	بدون آسیب	
۶۴/۵۸۳	۵۹/۴۹۹	۳۱/۱۹۴	D1	با آسیب
۶۴/۶۱۸	۵۹/۵۴۸	۳۱/۲۰۴	D2	

#### ۴. تعیین موقعیت آسیب

برای تعیین موقعیت آسیب، سیگنال ورودی تبدیل موجک به صورت مجموع یا تفاضل شکل‌های مود سالم و آسیب براساس زاویه بین بردارهای شکل مود سالم و آسیب تعریف شده است. همچنین، تبدیل موجک گسسته دو بعدی برای نیل به این هدف انتخاب گردیده است. اگر زاویه مزبور تقریباً ۱۸۰ درجه باشد، مجموع و اگر تقریباً صفر درجه باشد، حالت تفاضل شکل‌های مود سالم و آسیب به کار گرفته می‌شود. در جدول ۳ زاویه بین بردارهای سه شکل مود اول با استفاده از رابطه ۱۴ تعیین شده است.

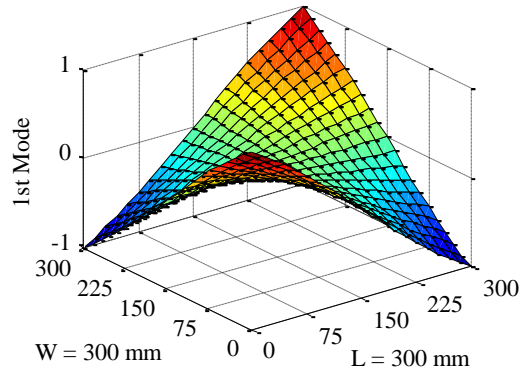
جدول ۳. زاویه بین بردارهای شکل مود سالم و آسیب (درجه)

شماره مود	سالم و آسیب D1	سالم و آسیب D2
۱	۰/۰۱۱۸	۱۷۹/۶۴
۲	۱۷۹/۹۲	۱۷۹/۹۴
۳	۰/۱۱۲۲	۰/۰۷۲۷

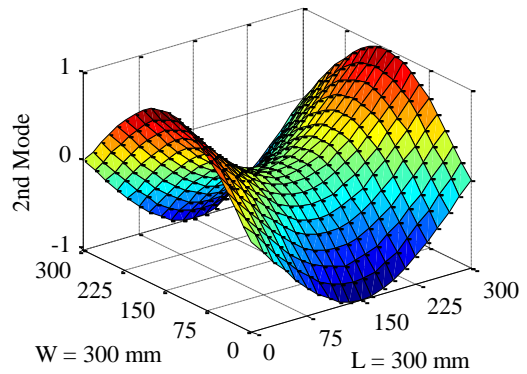
$$\theta_i^{u,d} = \frac{180^\circ}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\phi_i^u \cdot \phi_i^d}{|\phi_i^u| \times |\phi_i^d|} \right) \quad (14)$$

که در آن،  $\phi_i^d$  و  $\phi_i^u$  به ترتیب بردارهای شکل مود سالم و شکل مود آسیب هستند.

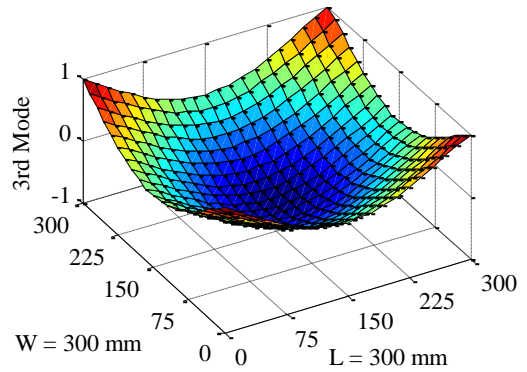
بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که جزئیات قطری حاصل از آنالیز موجک سیگنال ورودی اطلاعات سودمندی برای شناسایی و تعیین موقعیت آسیب دارد. از طرفی درون‌یابی شکل‌های مود سهم به‌سزایی در روند شناسایی ایفا می‌کند. بررسی‌ها با استفاده از توابع موجک مختلف انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که شمار زیادی از توابع موجک خانواده دابچیز<sup>۲۷</sup>، سیملتس<sup>۲۸</sup>،



(آ)



(ب)



(ج)

شکل ۳. شکل‌های مود صفحه کامپوزیتی سالم (آ) مود اول، (ب) مود دوم و (ج) مود سوم

در جدول ۲ مقادیر فرکانسی حالت سالم و هر یک از حالت‌های آسیب ارائه گردیده است. به دلیل وجود آسیب اختلاف در مقادیر فرکانسی در تمامی مودها رخ داده است.

جدول ۲. فرکانس‌های طبیعی وضعیت‌های سلامتی بدون آسیب و با آسیب (هرتز)

کویفلتس<sup>۲۹</sup> و توابع موجک بیورتوگونال<sup>۳۰</sup> در تولید ضرایب موجک بهینه برای تعیین موقعیت آسیب، عملکرد مطلوب دارند. براساس نتایج تحلیلی توابع موجک، شاخص‌های مکان‌یاب آسیب<sup>۳۱</sup> (DDI) به صورت نسبت قدرمطلق ضرایب موجک حاصل از جزئیات قطری به ماکزیمم مقادیر قدرمطلق ضرایب موجک محاسبه گردیده و در سطح صفحه توزیع شده است. در جداول ۴ و ۵ مقدار ماکزیمم قدرمطلق ضرایب موجک از انجام آنالیز توسط توابع موجک بهینه محاسبه شده است. مشاهده می‌گردد که (به‌طور کلی) در مودهای بالاتر، ماکزیمم قدرمطلق ضرایب موجک بزرگتری به دست می‌آید؛ بنابراین، با ایجاد حساسیت بیشتری در ضرایب موجک تولیدی می‌توان به تشخیص موقعیت آسیب پرداخت. تشخیص آسیب حالت‌های خرابی D1 و D2 با استفاده از توابع موجک بهینه جداول ۴ و ۵ انجام شده است و در متن مقاله، نتایج شناسایی هر یک از توابع در شکل‌های ۴ و ۵ ارائه گردیده است. مشاهده می‌گردد که با ایجاد قله‌هایی در نمودار توزیع شده شاخص مکان‌یاب آسیب در سطح صفحه، موقعیت‌های آسیب به درستی و با دقت بالایی شناسایی شده‌اند.

جدول ۴. ماکزیمم قدر مطلق ضرایب حاصل از جزئیات قطری

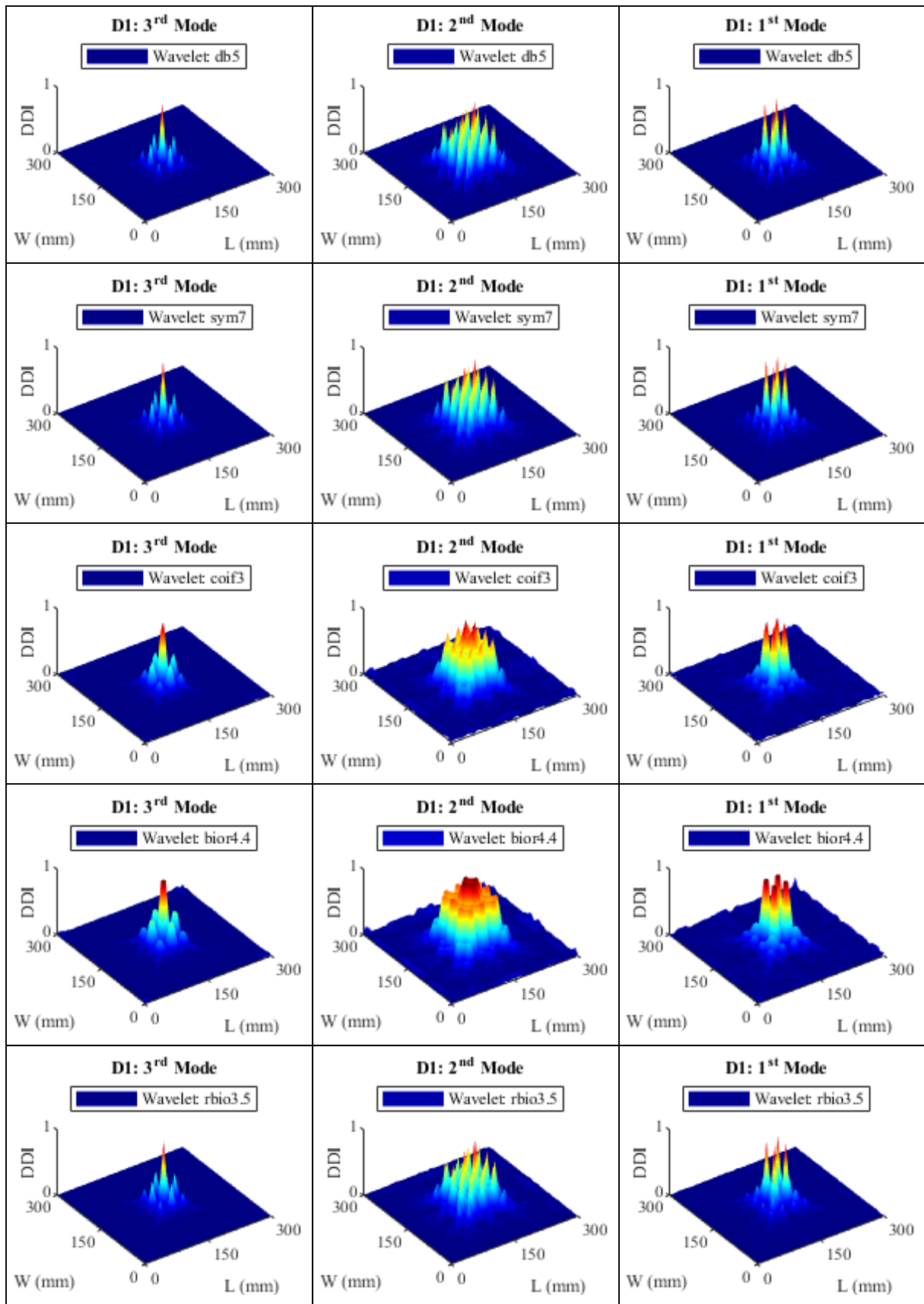
آنالیز موجک حالت آسیب D1

تابع موجک	شماره مود		
	۱	۲	۳
	ماکزیمم قدر مطلق ضرایب موجک (۱۰ <sup>-۷</sup> )		
Db5	۴/۰۲۱۵	۴/۴۱۷۷	۲۸/۳۷۱۱
Sym7	۱۲/۲۶۷۵	۱۳/۱۰۸۰	۸۶/۶۵۳۶
Coif3	۱/۷۹۳۷	۱/۸۰۹۷	۱۲/۶۰۷۰
Bior4.4	۱/۲۱۸۳	۱/۲۱۶۸	۸/۵۷۴۲
Rbio3.5	۲۳/۳۳۵۶	۲۵/۴۶۴۴	۱۶۴/۳۷۳۴

جدول ۵. ماکزیمم قدرمطلق ضرایب حاصل از جزئیات قطری

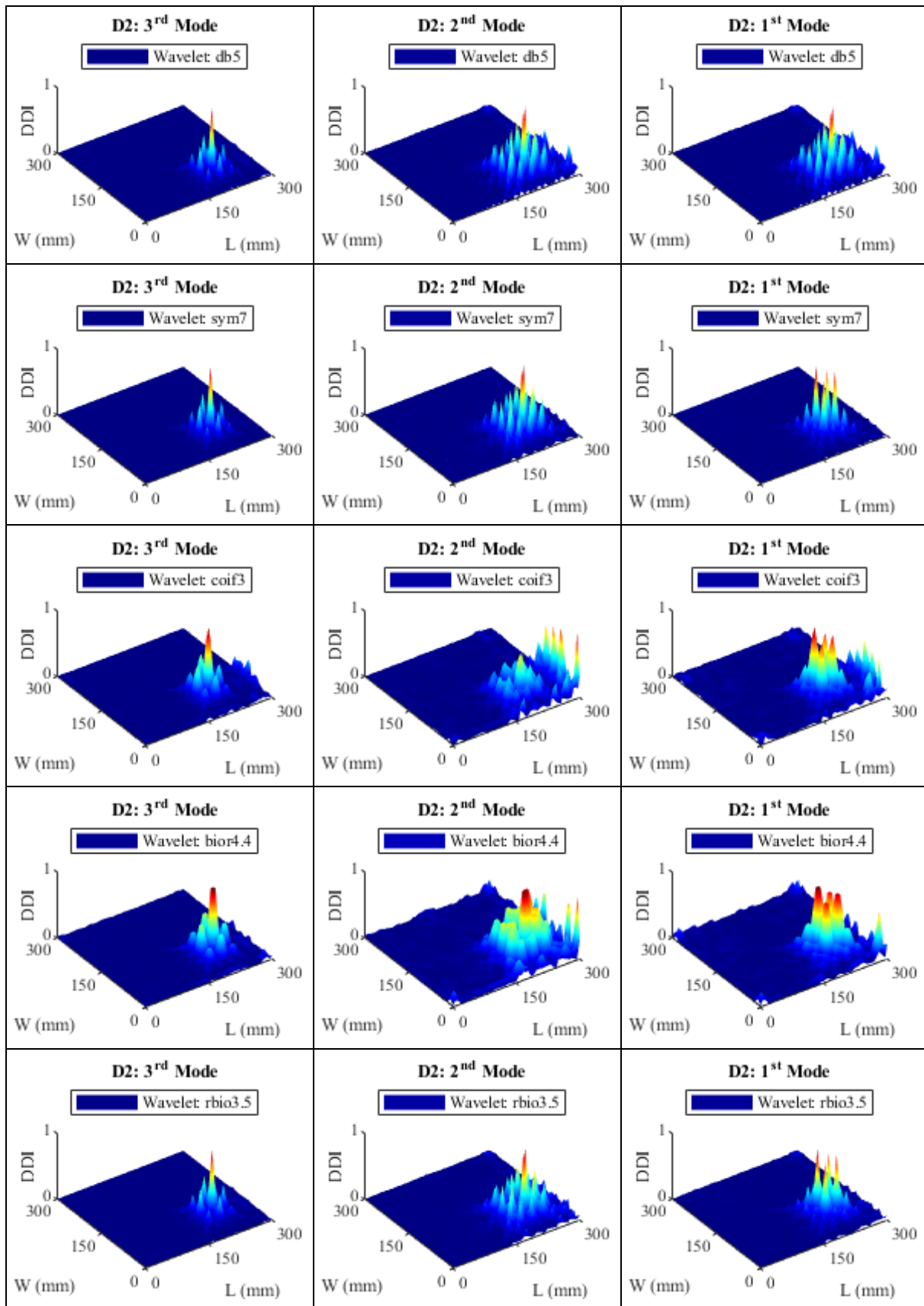
آنالیز موجک حالت آسیب D2

تابع موجک	شماره مود		
	۱	۲	۳
	ماکزیمم قدر مطلق ضرایب موجک (۱۰ <sup>-۷</sup> )		
Db5	۳/۵۱۱۳	۳/۷۷۴۳	۱۴/۹۲۵۵
Sym7	۱۰/۹۶۹۸	۱۱/۳۸۷۶	۴۵/۷۹۸۵
Coif3	۱/۶۲۹۷	۲/۷۰۰۹	۶/۶۶۶۲
Bior4.4	۱/۱۰۳۵	۱/۱۵۳۹	۴/۵۳۵۲
Rbio3.5	۲۰/۶۳۷۹	۲۲/۱۷۹۶	۸۶/۷۶۸۷



شکل ۴. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب حالت خرابی D1



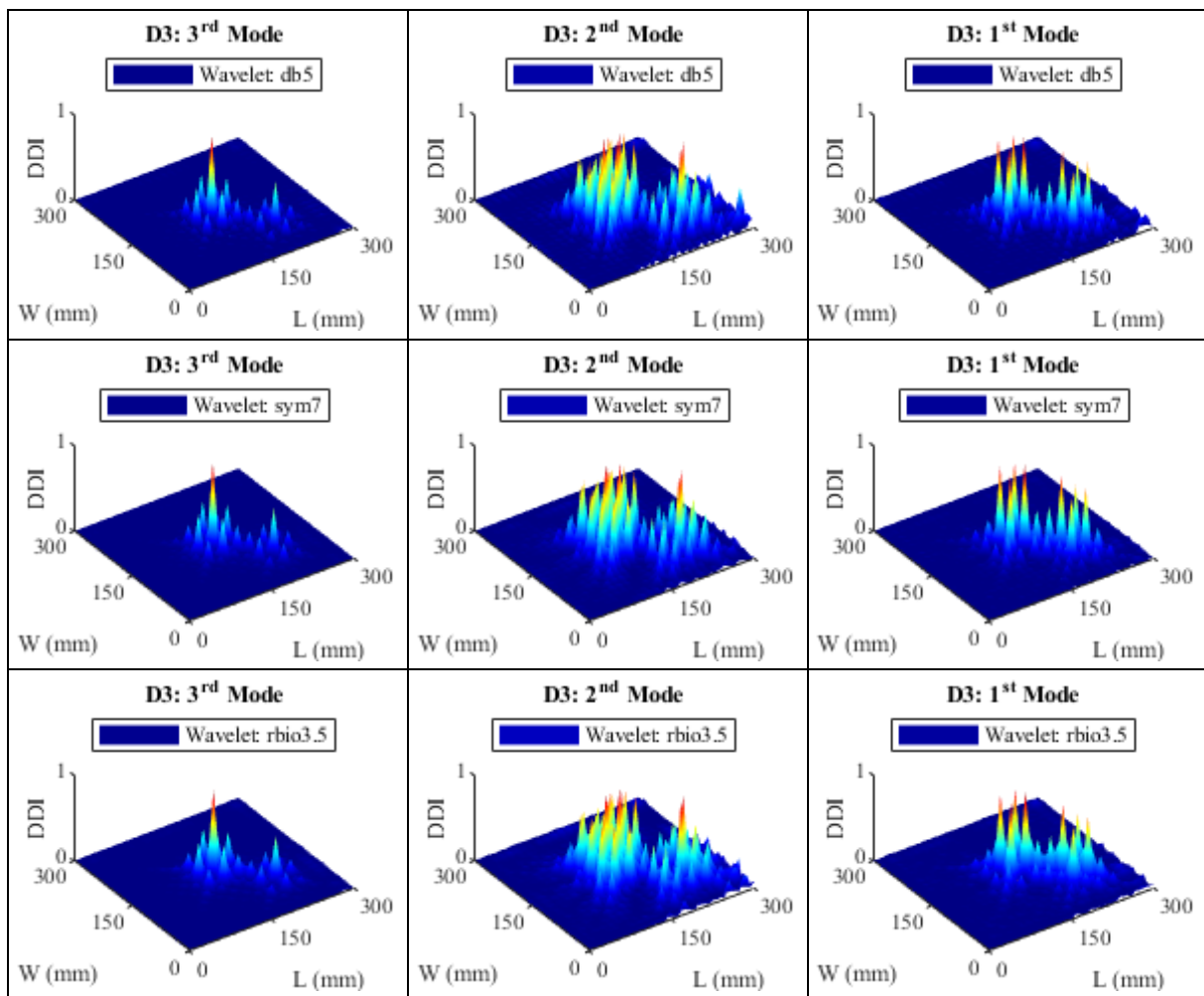


شکل ۵. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب‌خراهی D2

## ۵. آشکارسازی هم‌زمان چند موقعیت آسیب

روش پیشنهادی تحلیل سیگنال متشکل از شکل‌های مود وضعیت‌های سلامتی سالم و آسیب بر مبنای تبدیل موجک دو بعدی برای حالت آسیب D3 که به صورت مجموع دو حالت آسیب D1 و D2 تعریف شده است، در سه مود اول

با استفاده از توابع موجک db5، sym7 و rbio3.5 انجام شد. نتایج نموداری شاخص مکان‌یاب آسیب در شکل ۶ نشان می‌دهد که این روش در تشخیص دو موقعیت آسیب (به‌طور هم‌زمان) کارآمد است و نتایج شناسایی موفق و قابل اعتمادی حاصل می‌گردد.



شکل ۶. نمودارهای شاخص مکان‌یاب آسیب حالت خرابی D3

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

مواد کامپوزیت به دلیل داشتن خواص ویژه از قبیل نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی، قابلیت شکل‌پذیری و استحکام حرارتی بالا استفاده گسترده‌ای در صنایع مختلف از قبیل هوایی، دریایی، ساختمانی دارند. از طرفی، با توجه به اهمیت سازه‌ها و هزینه‌های بالای نگهداری

از آنها، پایش و کنترل سلامتی سازه‌ها بسیار مهم و حائز اهمیت است. در اثر آسیب، پاسخ‌های سازه اعم از استاتیکی و دینامیکی دچار تغییر می‌شود؛ بنابراین، از بررسی تغییرات به‌وجود آمده در پاسخ‌ها می‌توان سلامتی سازه و المان‌های سازه‌ای را مورد پایش قرار داد. در این مقاله، با توجه به اینکه در سال‌های اخیر استفاده از مصالح کامپوزیتی در سازه‌های مهندسی روند

افزایشی چشمگیری داشته است، شناسایی آسیب در صفحه کامپوزیت چندلایه (در اینجا، به طور خاص صفحه کامپوزیت ۸ لایه که هر دو لایه متوالی با زاویه ۹۰ درجه در اتصال با هم هستند) برای دو موقعیت آسیب تعریف شده انجام شد. صفحه کامپوزیت مورد نظر در نرم افزار اجزا محدود آباکوس مدل سازی و تحلیل فرکانسی شد و اطلاعات مودال شامل فرکانسها و شکل های مود وضعیت های سلامتی سالم و آسیب استخراج گردید. اختلاف در مقادیر فرکانسی دو وضعیت سلامتی سالم و آسیب نشان داد که در اثر آسیب، مقدار فرکانس به عنوان یکی از مشخصه های مودال تغییر می کند. در ادامه، با تعریف یک سیگنال به صورت دو بعدی به عنوان ورودی تبدیل موجک به

شناسایی موقعیت های آسیب در صفحه کامپوزیت ۸ لایه پرداخته شد. نتایج نشان داد که ضرایب حاصل از جزئیات قطری آنالیز موجک دارای اطلاعات سودمندی جهت آشکارسازی موقعیت آسیب است و با توزیع شاخص مکان یاب آسیب در سطح صفحه، موقعیت های آسیب با ایجاد بی نظمی و اغتشاش در ناحیه آسیب به راحتی قابل شناسایی است. نتایج عیب یابی حاصل شده با توابع موجک متعدد، کارآمدی و توانمندی این روش را در مکان یابی آسیب در صفحات کامپوزیت چندلایه نشان می دهد و به عنوان یک روش قابل اعتماد در کارهای عملی پیشنهاد می گردد.

## ۷. مآخذ

- [1] Dimarogonas, Andrew D., "Vibration of cracked structures: a state-of-the-art review", *Engineering fracture mechanics*, 1996, Vol.55, no.5, pp.831-857.
- [2] Salawu, O. S., "Detection of structural damage through changes in frequency: a review", *Engineering structures*, 1997, Vol.19, no.9, pp.718-723.
- [3] Doebling, Scott W., Charles R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz, "A review of damage identification methods that examine changes in dynamic properties", *Shock and Vibration Digest*, 1998, Vol.30, no.2, pp.91-105.
- [4] Sabnavis, Giridhar, R. Gordon Kirk, Mary Kasarda, and Dane Quinn, "Cracked shaft detection and diagnostics: a literature review", *Shock and Vibration Digest*, 2004, Vol.36, no.4, p.287.
- [5] Wang, Quan, and Xiaomin Deng, "Damage detection with spatial wavelets", *International journal of solids and structures*, 1999, Vol.36, no.23, pp.3443-3468.
- [6] Loutridis, Spyridon, Evanthia Douka, L. J. Hadjileontiadis, and Athanasios Trochidis, "A two-dimensional wavelet transform for detection of cracks in plates", *Engineering structures*, 2005, Vol.27, no.9, pp.1327-1338.
- [7] Gökdağ, Hakan, and Osman 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*, 2009, Vol.324, no.3-5, pp.1158-1180.
- [8] Zhong, Shuncong, and S. Olutunde Oyadiji, "Crack detection in simply supported beams using stationary wavelet transform of modal data", *Structural Control and Health Monitoring*, 2011, Vol.18, no.2, pp.169-190.
- [9] Xu, Wei, Maciej Radziński, Wiesław Ostachowicz, and Maosen Cao, "Damage detection in plates using two-dimensional directional Gaussian wavelets and laser scanned operating deflection shapes", *Structural Health Monitoring*, 2013, Vol.12, no.5-6, pp.457-468.
- [10] Lee, Soon Gie, Gun Jin Yun, and Shen Shang, "Reference-free damage detection for truss bridge structures by continuous relative wavelet entropy method", *Structural Health Monitoring*, 2014, Vol.13, no.3, pp.307-320.

- [11] Katunin, A., "Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2015, Vol.15, no.1, pp.251-261.
- [12] Yang, Chen, and S. Olutunde Oyadiji, "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Computers & Structures*, 2017, Vol.179, pp.109-126.
- [13] Zhao, Ying, Mohammad Noori, Wael A. Altabey, and Seyed Bahram Beheshti-Aval, "Mode shape-based damage identification for a reinforced concrete beam using wavelet coefficient differences and multiresolution analysis", *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, Vol.25, no.1, p.e2041.
- [14] Ashory, Mohammad-Reza, Ahmad Ghasemi-Ghalebahman, and Mohammad-Javad Kokabi, "Damage identification in composite laminates using a hybrid method with wavelet transform and finite element model updating", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2018, Vol.232, no.5, p.815-827.
- [۱۵] رضایی فر، ا.، یونسی، ع.، قلهکی، م.، و اسفندیاری، ا.، "شناسایی آسیب جداولی در ستون‌های فولادی پر شده با بتن براساس داده‌های مودال آزمایشگاهی"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۳۹۷، دوره ۶، شماره ویژه ۴، ص. ۹۳-۱۰۶.
- [16] Wang, Pengbo, and Qinghe Shi, "Damage identification in structures based on energy curvature difference of wavelet packet transform", *Shock and Vibration*, 2018.
- [17] Wang, Shengnan, Jun Li, Hui Luo, and Hongping Zhu, "Damage identification in underground tunnel structures with wavelet based residual force vector", *Engineering Structures*, 2019, Vol.178, pp.506-520.
- [۱۸] خان احمدی، م.، قلهکی، م. و رضایی فر، ا.، "عیب‌یابی در المان ستون تحت اثر نیروی محوری مبتنی بر تبدیل موجک و داده‌های مودال"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، ۱۳۹۹، دوره ۱۸، شماره ۶۳، ص. ۵۱-۶۳.
- [۱۹] خان احمدی، م.، رضایی فر، ا. و قلهکی، م.، "عیب‌یابی صفحات فولادی مبتنی بر مقایسه نتایج تحلیلی تبدیل موجک گسسته دو بعدی شکل مودهای اولیه و ثانویه"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۴۰۰، دوره ۸، شماره ۵، ص. ۱۹۸-۲۱۴.
- [۲۰] خان احمدی، م.، رضایی فر، ا. و قلهکی، م.، "مطالعه مقایسه‌ای آشکارسازی خرابی تیرهای فولادی مبتنی بر تبدیلات موجک پیوسته و گسسته پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی"، نشریه مهندسی سازه و ساخت، ۱۴۰۰، دوره ۸، شماره ۹، ص. ۱۶۶-۱۸۳.
- [21] Hanteh, Mojtaba, and Omid Rezaifar, "Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method", In *Structures*, 2021, Elsevier, Vol.29, pp.701-713.
- [22] Douka, E., S. Loutridis, and A. Trochidis, "Crack identification in beams using wavelet analysis", *International Journal of solids and structures*, 2003, Vol.40, no.13-14, pp.3557-3569.
- [23] Zhong, Shuncong, and S. Olutunde Oyadiji, "Detection of cracks in simply-supported beams by continuous wavelet transform of reconstructed modal data", *Computers & structures*, 2011, Vol.89, no.1-2, pp.127-148.
- [24] Kim, Hansang, and Hani Melhem, "Damage detection of structures by wavelet analysis", *Engineering structures*, 2004, Vol.26, no.3, pp.347-362.
- [25] Abdulkareem, Muyideen, Norhisham Bakhary, Mohammadreza Vafaei, Norhazilan Md Noor, and Khairul H. Padil, "Non-probabilistic wavelet method to consider uncertainties in structural damage detection", *Journal of Sound and Vibration*, 2018, Vol.433, pp.77-98.
- [26] Hoseini Vaez, Seyed Rohollah, Ehsan Dehghani, and Vahid Babaei. "Damage Detection in Post-Tensioned Slab Using 2D Wavelet Transforms", *Journal of Rehabilitation in civil Engineering*, 2017, Vol.5, no.2, pp.22-35.

1. ABAQUS
2. Pultrusion
3. Wavelet Transform
4. Wang & Deng
5. Loutridis et al
6. Gokdag & Kopmaz
7. Zhong & Oyadiji
8. Stationary Wavelet Transform (SWT)
9. Xu et al
10. Two-dimensional directional Gaussian wavelets
11. Laser scanned operating deflection shapes
12. Lee et al
13. Continuous Relative Wavelet Entropy (CRWT)
14. Katunin
15. Quincunx
16. Yang & Oyadiji
17. Modal Frequency Surface (MFS)
18. Zhao et al
19. Younesi et al
20. Wang & Shi
21. Wavelet Packet Transform (WPT)
22. Wang et al
23. Hanteh & Rezaifar
24. Short Time Fourier Transform (STFT)
25. Continuous Wavelet Transform (CWT)
26. Discrete Wavelet Transform (DWT)
27. Daubechies
28. Symlets
29. Coiflets
30. Biorthogonal
31. Damage Detection Index (DDI)