

## پایش سلامتی مبتنی بر ارتعاش در تیرها با استفاده از روش‌های برازش

## منحنی، همبستگی و تعیین انحنا

مرتضی خادمی کوهی دانشجوی دکتری گروه مهندسی مکانیک و هوافضا دانشگاه فردوسی مشهد morteza.khademikouhi@ mail.um.ac.ir	یاسر امیری کارشناسی ارشد دانشکده علوم پایه دانشگاه ولایت y.amiri@velayat.ac. ir	بهزاد دژکام هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه ولایت b.dezhkam@velayat. ac.ir	سید محمد میری هیئت علمی گروه مهندسی عمران دانشگاه ولایت m.miri@velayat.ac. ir	محتشم خان احمدی* کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان mohtashamkhanahmad i@semnan.ac.ir
---	--	---	--	--

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۵

## چکیده

پایش سلامت و تشخیص آسیب در سازه‌ها برای حفظ امنیت و سلامت افراد و همچنین، مقابله با خسارت‌های اقتصادی حائز اهمیت است. این مقاله بر پایه مقایسه اطلاعات اولیه و ثانویه مودال، شامل بسامدها و شکل مودهای ارتعاشی به پایش سلامت و تشخیص آسیب در عضو سازه‌ای تیر پرداخته است. تأثیر آسیب به صورت اختلاف بین مقادیر اولیه و ثانویه بسامد و همچنین، اختلاف بین ضرایب برازشی منحنی‌های چندجمله‌ای مشاهده گردید. نیز، ضریب همبستگی پیرسون بین شکل‌های اولیه و ثانویه مود، مقداری غیر از ۱ و -۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده تأثیر آسیب بر جابه‌جایی نسبی درجات آزادی است. باین حال نمی‌توان موقعیت‌های آسیب را با روش‌های برازش منحنی، همبستگی و همچنین، مقایسه بسامدهای طبیعی شناسایی کرد؛ بنابراین، مقایسه شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی بر مبنای تعیین شاخص انحنا مرکزی انجام شد. نشان داده شد که اختلاف بین نمودارهای اولیه و ثانویه شاخص انحنا به صورت شکستگی‌های ایجاد شده در موقعیت‌های آسیب و در نمودار شاخص انحنا وضعیت ثانویه رخ می‌دهد و به این ترتیب، مکان‌های آسیب‌دیده قابل شناسایی است.

**واژگان کلیدی:** پایش سلامت، تشخیص آسیب، شکل مود ارتعاشی، ضریب همبستگی پیرسون، شاخص انحنا

## ۱. مقدمه

مرحله بعدی، ترمیم نواحی دچار خسارت می‌تواند از گسترش آسیب و انتقال آن به دیگر موقعیت‌ها جلوگیری کرد. به‌طور کلی، شناسایی آسیب در سازه‌ها شامل نوع، موقعیت و شدت آسیب و نیز پیش‌بینی رفتار آینده سازه در صورت گسترش و توسعه آسیب است. این فرایند نیازمند استفاده از روش‌های دقیق و پیشرفته‌ای مانند فناوری سنجش از دور، سنسورها، تحلیل ارتعاشات و ... است. با داشتن اطلاعات دقیق

ساختمان‌ها، پل‌ها، برج‌ها، سدها و ... از زیرساخت‌های مهم شهری و صنعتی هستند که پایش و کنترل وضعیت سلامتی در آنها و شناسایی موقعیت‌های محتمل آسیب در اعضای سازه‌ای دارای اهمیت است.

آشکارسازی موقعیت‌های آسیب‌دیده یکی از مراحل اصلی پایش سلامت سازه‌ها است. با شناسایی به موقع آسیب و در

و به روز از وضعیت سازه می‌توان برنامه‌های نگهداری و تعمیر را براساس نیازهای واقعی تنظیم کرد و از انجام عملیات نگهداری غیرضروری جلوگیری نمود و در نتیجه، هزینه‌های نگهداری را به صورت چشمگیری کاهش داد و در عین حال، پایداری و ایمنی سازه‌ها را تامین کرد.

در دو دهه اخیر، پایش سلامت و شناسایی آسیب در سازه‌ها بر پایه ارتعاش، مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده است. داده‌های دینامیکی و مشخصات مودال به مشخصات فیزیکی سازه (ماتریس‌های جرم، سختی و میرایی) وابسته است. در اثر ایجاد آسیب، تغییر در مشخصات فیزیکی سازه و در نتیجه، تغییر در مشخصات دینامیکی مودال ایجاد می‌شود [۱ و ۲]. براین اساس، روش‌های تشخیص آسیب در سازه‌های مهندسی، شامل تغییر بسامد [۳-۶]، شکل مود [۷ و ۸]، انحنای شکل مود [۹-۱۳]، پردازش سیگنال‌ها و تصاویر [۱۴-۱۸]، تابع پاسخ فرکانسی<sup>۱</sup> [۱۹-۲۲] و ... می‌شود. به عنوان مثال، می‌توان به کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> [۲۳-۲۶]، الگوریتم ژنتیک<sup>۳</sup> [۲۷-۲۹]، منطق فازی [۳۰-۳۲]، تبدیل موجک<sup>۴</sup> [۳۳-۴۲] و تبدیل کرولت<sup>۵</sup> [۴۳-۴۵] در زمینه تشخیص آسیب اشاره کرد.

در برخی از تحقیقات برای تعیین وضعیت سلامتی در سازه‌ها، مقایسه بین پاسخ‌های اولیه و ثانویه پیشنهاد شده است. به عنوان مثال، مقایسه جابه‌جایی‌های اولیه و ثانویه استاتیکی با استفاده از تبدیل موجک گسسته<sup>۶</sup> در [۴۶] و مقایسه شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی با استفاده از تبدیل موجک پیوسته<sup>۷</sup> در [۴۷] برای شناسایی آسیب در تیرها پیشنهاد گردیده است. در هر دو مطالعه، تفاوت بین سیگنال‌های خروجی در موقعیت‌های آسیب‌دیده مشاهده شد. همچنین، در [۴۸] مقایسه شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی بر مبنای ضرایب جزئیات حاصل از آنالیز موجک دو بعدی برای شناسایی آسیب در صفحه جدار نازک فولادی پیشنهاد شده

است. با استفاده از این روش، اختلاف بین نمودارهای اولیه و ثانویه ضرایب جزئیات موجک در موقعیت‌های آسیب مشاهده گردید.

در این مقاله، پژوهش انجام شده به پایش سلامتی و تشخیص آسیب در عضو سازه‌ای تیر می‌پردازد. تیرها از اعضای اصلی سازه‌های عمرانی هستند که نقش مهمی در پایداری سازه‌ها دارند؛ بنابراین، شناسایی آسیب در آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این مطالعه، مقایسه پاسخ‌های اولیه و ثانویه مودال را که شامل بسامدهای طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی می‌شود، پیشنهاد می‌کند. برای بررسی وضعیت سلامت تیر، مقایسه بسامدهای طبیعی و نیز، مقایسه شکل مودهای ارتعاشی وضعیت‌های اولیه (سالم) و ثانویه (فعلی) بر پایه ضرایب برازشی منحنی‌های چندجمله‌ای انجام شده است. همچنین، همبستگی بین شکل‌های اولیه و ثانویه مود بررسی گردیده است.

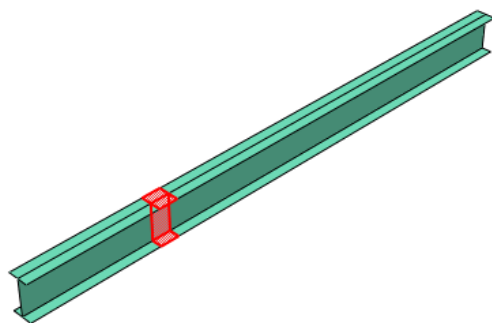
در ادامه، برای آشکارسازی مکان‌های آسیب‌دیده، مقایسه شکل‌های اولیه و ثانویه مودها را با محاسبه شاخص انحنا پیشنهاد می‌کند. خواهید دید که این روش از کارایی مطلوبی در پروسه شناسایی آسیب در تیرها برخوردار است.

## ۲. مفروضات مدل‌سازی تیر و سناریوهای خرابی

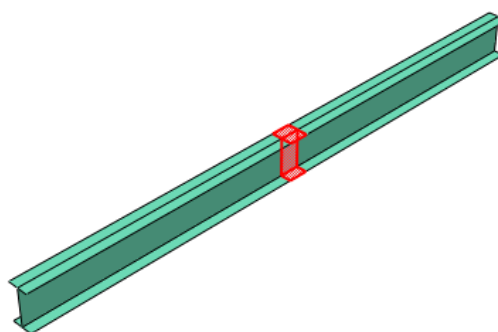
تیر با مقطع IPE180 به طول ۱/۵ متر و شرایط تکیه‌گاهی گزارش شده در جدول ۱ با مدول الاستیسیته  $2 \times 10^5$  مگاپاسکال، نسبت پواسن  $0/3$  و چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب در وضعیت سالم و وضعیت‌های آسیب‌دیده D1، D2 و D3 که در شکل‌های ۱ تا ۳ قابل مشاهده هستند، با مشخصات ابعادی ارائه شده در جدول ۲ مورد نظر است. آسیب به صورت کاهش مدول الاستیسیته به میزان ۳۰ درصد لحاظ شده است.

جدول ۱. شرایط تکیه‌گاهی تیر

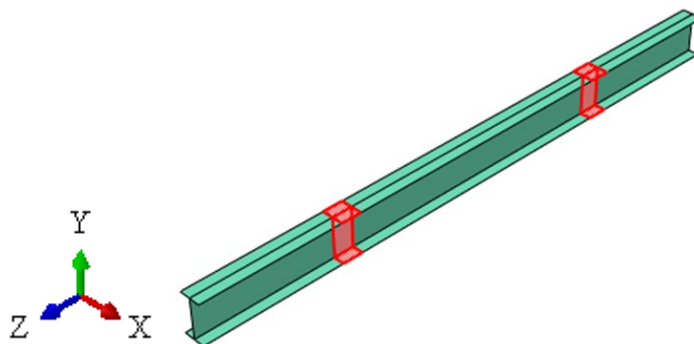
جابه‌جایی				تکیه‌گاه سمت
دورانی	انتقالی			
$z$ و $y$ , $x$	$z$	$y$	$x$	
دارد	ندارد	ندارد	ندارد	چپ
دارد	دارد	ندارد	ندارد	راست



شکل ۲. تیر با وضعیت آسیب D2



شکل ۱. تیر با وضعیت آسیب D1



شکل ۳. تیر با وضعیت آسیب D3

بسامدی شده و اطلاعات مودال (بسامدها و شکل مودهای ارتعاشی) استخراج گردیده است. شکل ۴ سه شکل مود اول تیر سالم را نشان می‌دهد و در جدول ۳ بسامدهای طبیعی وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده گزارش شده است. مشاهده می‌شود که در هر سه مود، بسامدهای طبیعی وضعیت‌های آسیب‌دیده از بسامدهای طبیعی وضعیت سالم کمتر است. نیز، مقایسه بین مقادیر بسامدی وضعیت‌های آسیب‌دیده D2 و D3 نشان می‌دهد که با اضافه شدن یک موقعیت جدید خسارت به یک وضعیت آسیب‌دیده قبلی، کاهش بیشتری در مقادیر بسامد رخ می‌دهد.

جدول ۲. مشخصات ابعادی آسیب

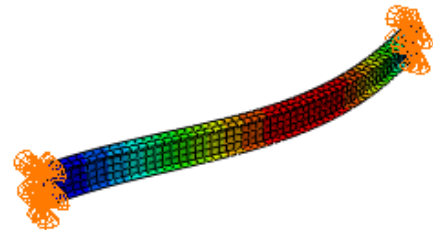
وضعیت آسیب	محدوده آسیب (سانتی‌متر)	مرکز آسیب (سانتی‌متر)
D1	از ۷۲/۵ تا ۷۷/۵	۷۵
D2	از ۳۵ تا ۴۰	۳۷/۵
D3	از ۳۵ تا ۴۰	۳۷/۵
	از ۱۱۰ تا ۱۱۵	۱۱۲/۵

### ۳. مدل‌سازی اجزاء محدودی و تحلیل بسامدی

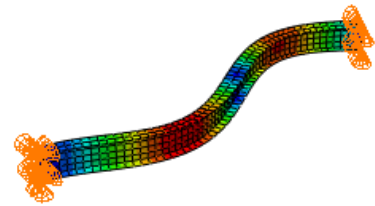
عضو سازه‌ای تیر با استفاده از المان Shell 3D در نرم‌افزار آباکوس<sup>۸</sup> مدل‌سازی و با اندازه مش ۲۵ میلی‌متر تحلیل

جدول ۳. بسامدهای طبیعی وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده

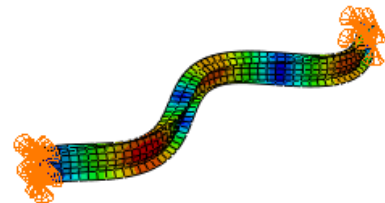
شماره مود	وضعیت تیر از نظر سلامتی			
	D3	D2	D1	سالم
	بسامد طبیعی (Hz)			
۱	۵۸/۴۵۷	۵۸/۹۸۷	۵۸/۴۳۶	۵۸/۹۹۶
۲	۱۸۶/۰۳	۱۸۸/۴۷	۱۸۹/۴۴	۱۸۹/۸۱
۳	۳۸۲/۸۶	۳۸۴/۶۰	۳۸۴/۵۰	۳۸۸/۹۳



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴. سه شکل مود اول تیر سالم

باید توجه داشت که لزوماً آسیب در سازه باعث کاهش مقادیر بسامدی نمی‌شود و با توجه به نوع آسیب ممکن است، تغییرات بسامدی مثبت باشد؛ در ادامه برای یک سیستم یک درجه آزادی بدون میرایی نشان داده می‌شود که تغییرات بسامدی بسته به نرخ کاهش جرم و نرخ کاهش سختی می‌تواند مثبت یا منفی باشد. رابطه ۱ معادله ارتعاش آزاد سیستم یک درجه آزادی بدون میرایی به جرم  $m$  و سختی  $k$  را نشان می‌دهد:

$$m\ddot{u} + ku = 0 \quad (۱)$$

که از حل آن با لحاظ کردن شرایط اولیه (۲-الف) و (۲-ب)  $u$  به دست می‌آید که در رابطه ۳ آمده است.

$$u(0) = u_0 \quad (۲-الف)$$

$$\dot{u}(0) = \dot{u}_0 \quad (۲-ب)$$

$$u(t) = \frac{\dot{u}_0}{\omega} \sin \omega t + u_0 \cos \omega t \quad (۳)$$

در رابطه ۳  $\omega$  بسامد طبیعی است و با رابطه ۴ تعریف می‌شود.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۴)$$

از رابطه ۴ می‌توان نوشت:

$$k = \omega^2 m \Rightarrow \Delta k = 2m\omega\Delta\omega + \omega^2\Delta m$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta k}{k} = \frac{2m\omega\Delta\omega}{\omega^2 m} + \frac{\omega^2\Delta m}{\omega^2 m}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta k}{k} = \frac{2\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta m}{m}$$

و در نتیجه، رابطه ۵ ذیلاً به دست می‌آید:

$$\Delta\omega = \frac{1}{2}\omega \left( \left| \frac{\Delta m}{m} \right| - \left| \frac{\Delta k}{k} \right| \right) \quad (۵)$$

با توجه به رابطه ۵ می‌توان نتیجه گرفت که در اثر آسیب بسته به اینکه عبارت داخل پرانتز مثبت یا منفی باشد، مقدار بسامد طبیعی به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

#### ۴. تأثیر آسیب بر شکل مودها

هرگونه تغییر ناخواسته در خصوصیات مصالح یا ابعاد هندسی را می‌توان به عنوان آسیب در نظر گرفت. تغییر در مشخصات فیزیکی سازه باعث تغییر در ویژگی‌های مودال می‌شود. این مقاله برای بررسی اثر آسیب بر شکل مودها، روش‌های برازش منحنی و همبستگی بین شکل‌های اولیه و ثانویه مود را پیشنهاد می‌کند.

#### ۴-۱. برازش منحنی‌های چندجمله‌ای

یکی از روش‌های مقایسه پاسخ‌های سازه در دو زمان متفاوت  $t_1$  و  $t_2$ ، برازش منحنی‌های چندجمله‌ای است. در این مقاله، برای مقایسه شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای اول، دوم و سوم به ترتیب از منحنی چندجمله‌ای درجه سوم، چهارم و ششم، تعریف شده با روابط ۶ تا ۸، استفاده شد و برازش منحنی‌ها در محیط EXCEL انجام گردید.

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad (۶)$$

$$y = b_0 + b_1x + b_2x^2 + b_3x^3 + b_4x^4 \quad (۷)$$

$$y = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3 + c_4x^4 + c_5x^5 + c_6x^6 \quad (۸)$$

ضریب‌های برازشی در جدول‌های ۴ تا ۶ آورده شده و منحنی چندجمله‌ای و شکل مود مربوطه در شکل‌های ۴ تا ۶ ترسیم گردیده است. مشاهده می‌شود که آسیب باعث تغییر در مقدار ضریب برازشی جملات با درجه پایین‌تر می‌شود؛ به عبارتی در اثر آسیب، شکل‌های اولیه و ثانویه مود برهم منطبق نیستند و شکل مود به‌عنوان یک مشخصه دینامیکی تغییر می‌کند. اگرچه این تغییرات جزئی است، اما شناسایی موقعیت این

تغییرات جزئی به‌عنوان موقعیت دارای آسیب ضروری است.

جدول ۴. ضرایب برازشی منحنی چندجمله درجه سوم در مود اول

برای وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده

وضعیت آسیب			سالم	ضریب برازش
D3	D2	D1		
-۰/۱۲۴۶	-۰/۱۳۱۲	-۰/۱۳۴۷	-۰/۱۳۱۴	$a_0$
-۰/۰۳۰۴	-۰/۰۳۲۲۰	-۰/۰۳۲۹	-۰/۰۳۲۳	$a_1$
-۰/۰۰۰۷	-۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۶	$a_2$
-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	$a_3$

جدول ۵. ضرایب برازشی منحنی چندجمله درجه چهارم در مود

دوم برای وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده

وضعیت آسیب			سالم	ضریب برازش
D3	D2	D1		
-۰/۳۲۷۹	-۰/۳۳۸۴	-۰/۳۲۱۶	-۰/۳۲۶۲	$b_0$
-۰/۱۱۰۱	-۰/۱۱۴۷	-۰/۱۰۷۴	-۰/۱۰۹۵	$b_1$
-۰/۰۰۰۸	-۰/۰۰۱۲	-۰/۰۰۰۶	-۰/۰۰۰۸	$b_2$
-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۱	$b_3$
-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	$b_4$

جدول ۶. ضرایب برازشی منحنی چندجمله درجه ششم در مود سوم برای وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده

وضعیت آسیب			سالم	ضریب برازش
D3	D2	D1		
-۰/۲۷۹۴	-۰/۲۷۲۱	-۰/۲۸۱۳	-۰/۲۷۵۹	$c_0$
-۰/۲۴۰۹	-۰/۲۳۶۳	-۰/۲۴۵۴	-۰/۲۳۷۰	$c_1$
-۰/۰۶۳۰	-۰/۰۶۲۴	-۰/۰۶۴۱	-۰/۰۶۲۶	$c_2$
-۰/۰۰۴۷	-۰/۰۰۴۷	-۰/۰۰۴۸	-۰/۰۰۴۷	$c_3$
-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۱	$c_4$
-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۰۲	$c_5$
-۰/۰۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۰۰۱	-۰/۰۰۰۰۰۱	$c_6$

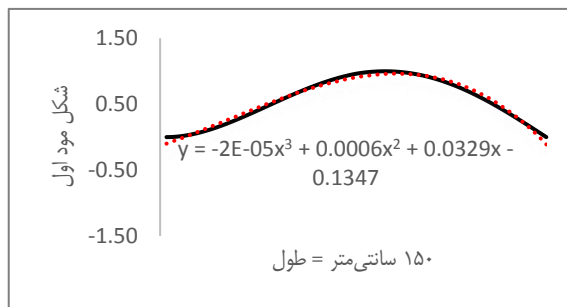
#### ۴-۲. معیار همبستگی پیرسون

بررسی انطباق یا عدم انطباق شکل‌های اولیه و ثانویه مودها یکی از روش‌های پایش سلامتی در سازه‌ها است. برای این منظور، محاسبه ضریب همبستگی پیرسون<sup>۹</sup> به‌عنوان معیاری برای تعیین انطباق یا عدم انطباق پیشنهاد شده است. اگر این ضریب برابر با ۱ یا -۱ باشد، به معنای انطباق و در غیراین‌صورت، به معنای عدم انطباق شکل‌های اولیه و ثانویه مود است. عدم انطباق شکل‌های اولیه و ثانویه مودها نشان‌دهنده تفاوت بین وضعیت‌های اولیه و ثانویه سلامت سازه است که وجود آسیب را تأیید می‌کند. ضریب همبستگی

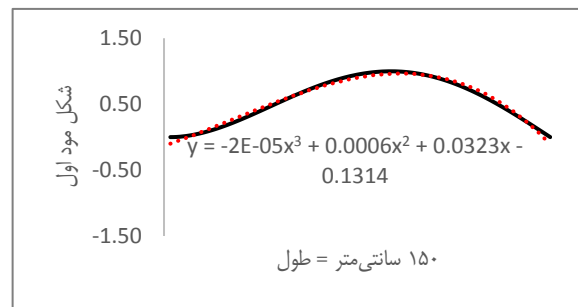
پیرسون که با  $\rho$  نشان داده می‌شود با استفاده از رابطه ۹ تعریف می‌شود.

$$\rho(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n (X(i) - \bar{X})(Y(i) - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X(i) - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y(i) - \bar{Y})^2}} \quad (9)$$

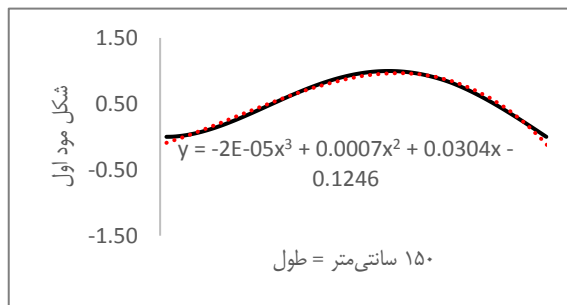
در این تعریف،  $X$  و  $Y$  به ترتیب شکل‌های اولیه و ثانویه مود و  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  مقادیر میانگین هستند. این ضرایب که در جدول ۷ گزارش شده‌اند، به دلیل وجود آسیب، مقادیری غیر از ۱ و -۱ هستند.



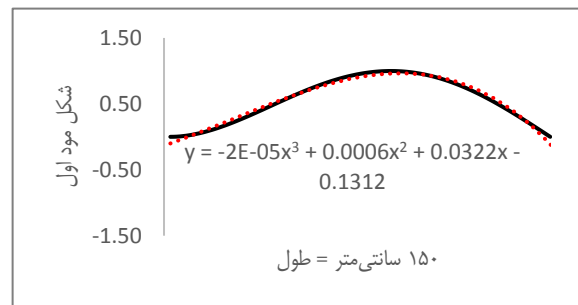
(ب)



(الف)

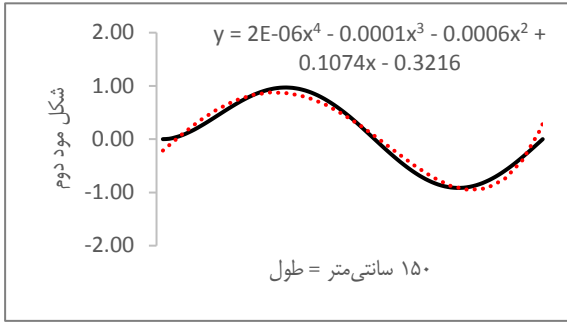


(د)

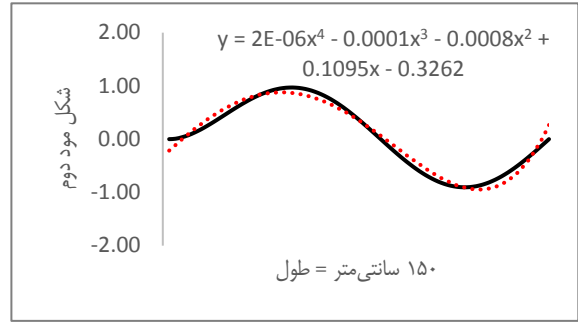


(ج)

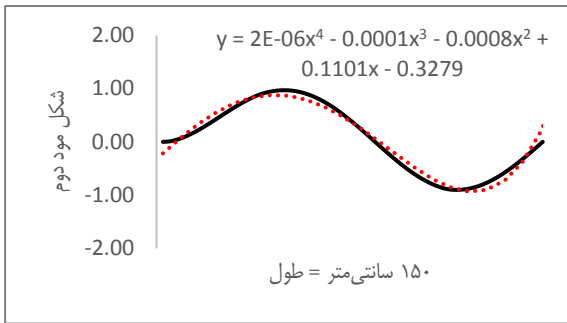
شکل ۵. نمودارهای چندجمله‌برازشی درجه سوم و شکل‌های اولیه و ثانویه مود اول؛ (الف) سالم، (ب) D1، (ج) D2 و (د) D3



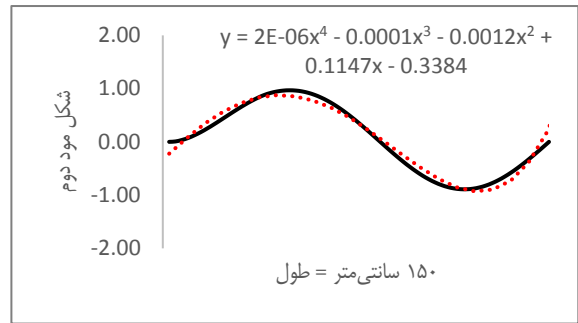
(ب)



(الف)

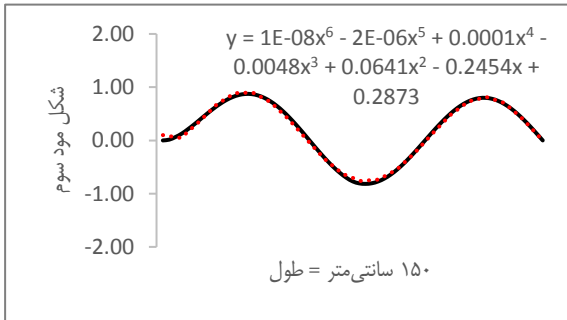


(د)

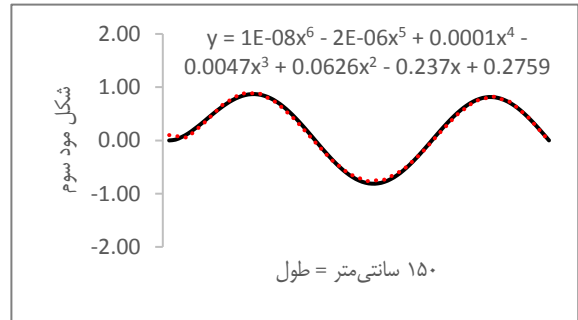


(ج)

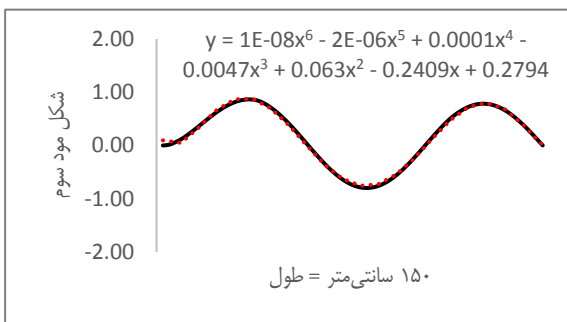
شکل ۶. نمودارهای چندجمله برآزشی درجه چهارم و شکل های اولیه و ثانویه مود دوم؛ (الف) سالم، (ب) D1، (ج) D2 و (د) D3



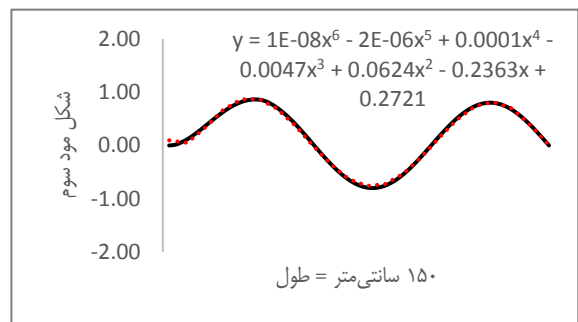
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۷. نمودارهای چندجمله برآزشی درجه ششم و شکل های اولیه و ثانویه مود سوم؛ (الف) سالم، (ب) D1، (ج) D2 و (د) D3

جدول ۷. ضریب همبستگی پیرسون بین شکل‌های اولیه و ثانویه مود

شماره مود	$\rho(U, D1)$	$\rho(U, D2)$	$\rho(U, D3)$
۱	-.۹۹۹۹۶۵۱۳۸۳۰۷۲۵۵	-.۹۹۹۹۹۶۲۸۶۲۵۱۵۷	-.۹۹۹۸۷۶۸۵۳۰۰۴۱۶۲
۲	-.۹۹۹۹۸۵۴۷۹۰۶۲۴۷۶	-.۹۹۹۹۳۴۰۰۴۹۱۶۳۲۱	-.۹۹۹۹۷۲۲۱۱۸۷۷۳۸۴
۳	-.۹۹۹۸۵۳۴۳۶۸۳۷۸۴۵	-.۹۹۹۸۰۳۵۸۳۵۴۹۲۳۷	-.۹۹۹۸۳۷۹۱۶۸۶۰۱۹۲

### ۵. شناسایی و تعیین موقعیت آسیب

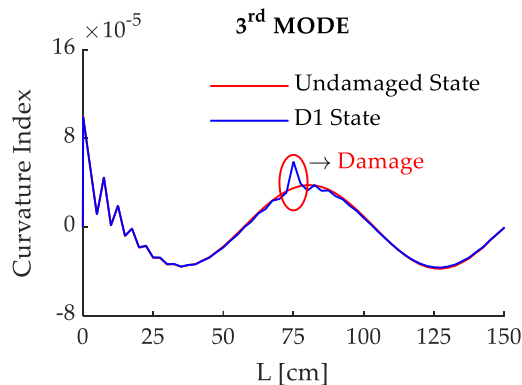
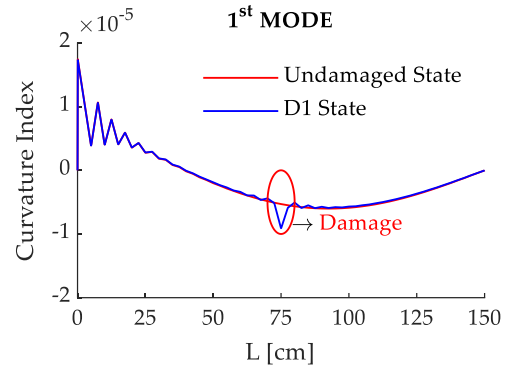
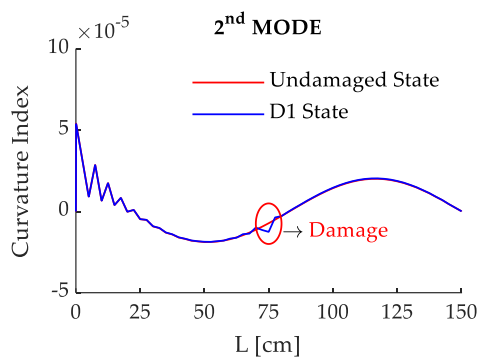
این مطالعه، برای آشکارسازی مکان‌های آسیب‌دیده، مقایسه شکل‌های اولیه و ثانویه مودها را به روش تعیین انحنای مرکزی پیشنهاد می‌کند. شاخص انحنای شکل مود  $\Delta m$  در موقعیت  $z$  با رابطه ۱۰ تعریف می‌شود:

$$\kappa_{i,j} = \varphi_{i,j-1} - 2\varphi_{i,j} + \varphi_{i,j+1} \quad (10)$$

که در آن  $\varphi_{i,j}$  و  $\kappa_{i,j}$  به ترتیب، جابه‌جایی مودال و شاخص

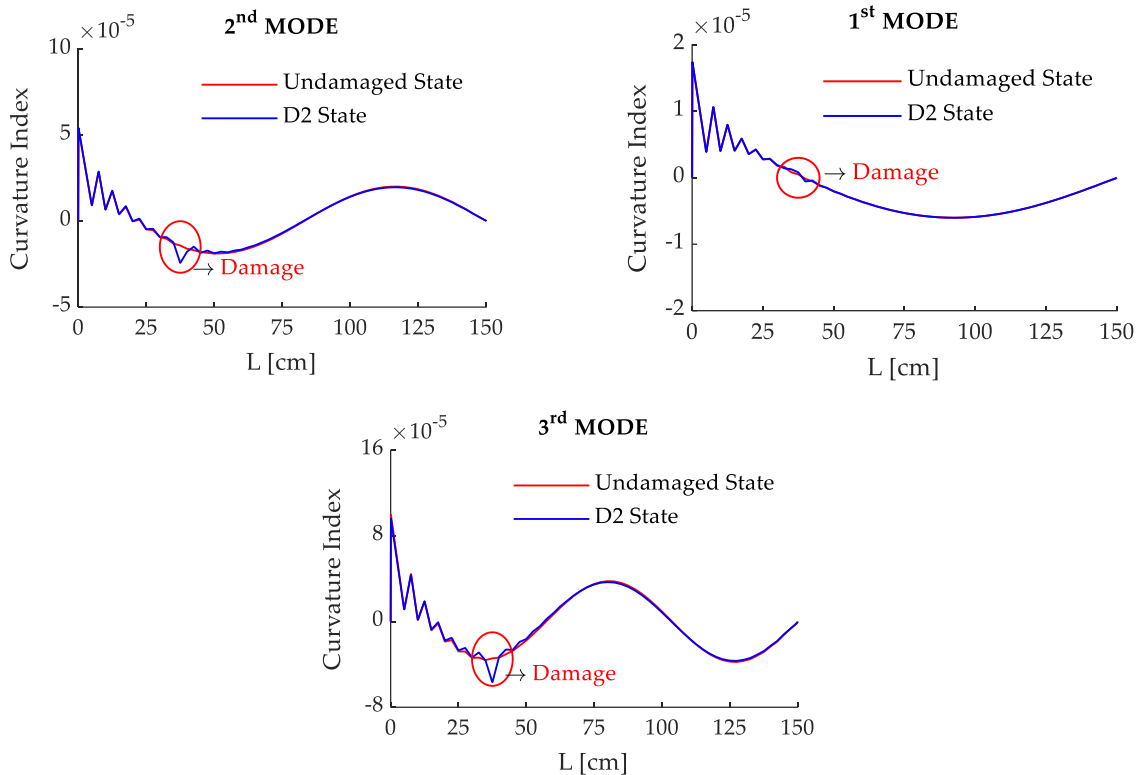
انحنای مرکزی مود  $\Delta m$  در موقعیت  $z$  (برای المانی به طول واحد) هستند.

در شکل‌های ۸ تا ۹ نمودار شاخص انحنایی شکل مودهای اول تا سوم برای وضعیت اولیه و هر یک از وضعیت‌های ثانویه (تیر با وضعیت‌های آسیب D1، D2 و D3) ترسیم شده است. مشاهده می‌گردد که تفاوت بین نمودارهای اولیه و ثانویه شاخص انحنای در موقعیت آسیب رخ داده و برجسته‌تر است و به این صورت، موقعیت‌های آسیب‌دیده قابل شناسایی هستند.

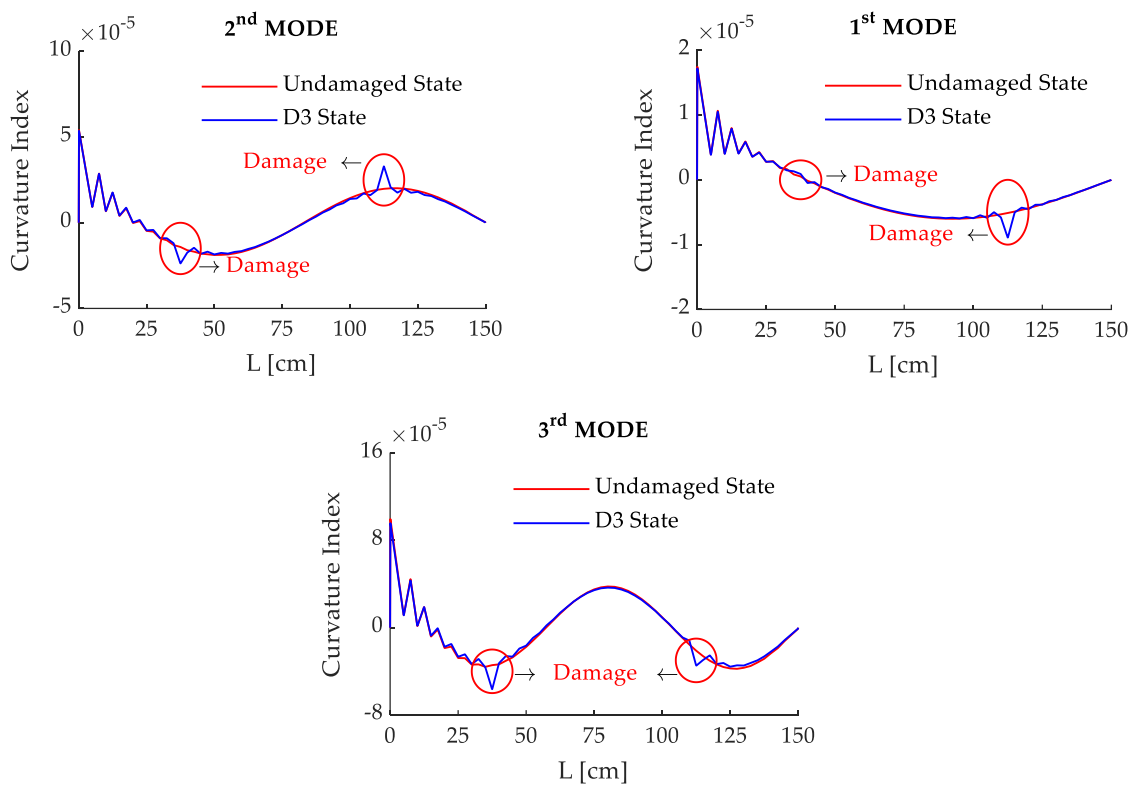


شکل ۸. نمودارهای شاخص انحنای وضعیت‌های اولیه (سالم) و ثانویه (آسیب‌دیده D1)





شکل ۹. نمودارهای شاخص انحنا برای وضعیت‌های اولیه (سالم) و ثانویه (آسیب‌دیده D2)



شکل ۱۰. نمودارهای شاخص انحنا برای وضعیت‌های اولیه (سالم) و ثانویه (آسیب‌دیده D3)

## ۶. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

سازه‌ها با گذشت زمان ممکن است شرایط متعدد نامطلوبی را تجربه کنند و آسیب‌های موضعی در برخی از المان‌های آنها رخ دهد. گسترش و انتقال آسیب‌های موضعی به دیگر اعضای سازه می‌تواند باعث خسارت کلی و حتی تخریب نابه‌هنگام شود؛ بنابراین، ارزیابی وضعیت سلامتی در سازه‌ها و اعضای آنها دارای اهمیت است.

این مطالعه برپایه مقایسه مشخصات ارتعاشی شامل بسامدهای طبیعی و شکل مودهای وضعیت اولیه (سالم) و وضعیت‌های ثانویه (آسیب‌دیده) به پایش سلامتی در عضو سازه‌ای تیر پرداخت. نشان داده شد که در آسیب باعث ایجاد تغییر در مشخصات مودال می‌شود؛ مقدار بسامد مودها تغییر می‌کند. همچنین، عدم انطباق شکل‌های اولیه و ثانویه مودها رخ می‌دهد. این موضوع با مقایسه ضرایب برازشی منحنی

## ۷. مأخذ

چندجمله‌ای وضعیت‌های اولیه و ثانویه نشان داده شد. نیز، ضرایب همبستگی پیرسون به دلیل تأثیر آسیب بر شکل مودها، مقادیری غیر از ۱ و -۱ محاسبه گردید که این موضوع نیز، عدم انطباق شکل‌های اولیه و ثانویه مودها را نشان می‌دهد. در ادامه، برای شناسایی موقعیت‌های دارای خسارت جزئی، مقایسه شکل‌های اولیه و ثانویه مودها با استفاده از تعیین شاخص انحنای مرکزی پیشنهاد گردید. نشان داده شد که مکان‌های آسیب‌دیده با ایجاد شکستگی در نمودار ثانویه شاخص انحنای در مقایسه با نمودار اولیه شاخص انحنای، قابل شناسایی است و این شناسایی در مودهای دوم و سوم نسبت به مود اول به دلیل اینکه اختلاف بین منحنی‌های اولیه و ثانویه انحنای در مودهای دوم و سوم نسبت به مود اول در مکان‌های آسیب‌دیده نمایان‌تر است، راحت‌تر می‌باشد.

- [1] Farrar, Charles R., Scott W. Doebling, and David A. Nix, "Vibration-based structural damage identification", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2001, Vol.359, no.1778, pp.131-149.
- [2] Montalvao, Diogo, Nuno Manuel Mendes Maia, and António Manuel Relógio Ribeiro, "A review of vibration-based structural health monitoring with special emphasis on composite materials", *Shock and vibration digest*, 2006, Vol.38, no.4, pp.295-324.
- [3] Chatterjee, Animesh. "Structural damage assessment in a cantilever beam with a breathing crack using higher order frequency response functions", *Journal of Sound and Vibration*, 2010, Vol.329, no.16, pp.3325-3334.
- [4] Majumdar, Aditi, Dipak Kumar Maiti, and Damodar Maity, "Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization", *Applied mathematics and computation*, 2012, Vol.218, no.19, pp.9759-9772.
- [5] Rezaifar, Omid, and Mohammadi Mr Doost, "Damage detection of axially loaded beam: A frequency-based method", 2016, pp.165-172.
- [6] Talebsafa, Pourya, Omid Rezaifar, and Hosein Naderpour, "Dynamic parameters identification of 3D sandwich wall panels from phase-based video measurement via smartphones camera", *Engineering Structures*, 2023, Vol.293, p.116653.
- [7] Yazdanpanah1a, O., and S. M. Seyedpoor, "A new damage detection indicator for beams based on mode shape data", *Structural Engineering and Mechanics*, 2015, Vol.53, no.4, pp.725-744.
- [8] Abbasnia, Reza, Borhan Mirzaei, and Seyedmohadmahdi Yousefbeck, "A two-step method composed of wavelet transform and model updating method for multiple damage diagnosis in beams", *Journal of Vibroengineering*, 2016, Vol.18, no.3, pp.1497-1513.
- [9] Cao, Maosen, Maciej Radziński, Wei Xu, and Wiesław Ostachowicz, "Identification of multiple damage

- in beams based on robust curvature mode shapes", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, Vol.46, no.2, pp.468-480.
- [10] Pooya, Seyed Majid Hosseini, and Ali Massumi, "A novel and efficient method for damage detection in beam-like structures solely based on damaged structure data and using mode shape curvature estimation", *Applied mathematical modelling*, 2021, Vol.91, pp.670-694.
- [11] Gomes, Guilherme Ferreira, and Rafael Simões Giovani, "An efficient two-step damage identification method using sunflower optimization algorithm and mode shape curvature (MSDBI-SFO)", *Engineering with Computers*, 2022, Vol.38, no.2, pp.1711-1730.
- [12] Khanahmadi, Mohtasham, Majid Pouraminian, Hamid Mohammady Garfamy, and B. Dezhkam, "Damage Detection and Identification in a Column under the Effect of Axial Load Using Modal Properties and Mode Shape-based Detection Index", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2023, Vol.38, no.4.2, pp.53-62.
- [13] Khanahmadi, Mohtasham, and Masoud Khalighi, "Interfacial Debonding Detection in Concrete-Filled Steel Tubular (CFST) Columns with Modal Curvature-Based Irregularity Detection Indices", *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2023, p.2450148.
- [14] Beheshti Aval, Seyed Bahram, Vahid Ahmadian, Mohammad Maldar, and Ehsan Darvishan, "Damage detection of structures using signal processing and artificial neural networks", *Advances in Structural Engineering*, 2020, Vol.23, no.5, pp.884-897.
- [15] Farhang, Seyyed Hamed, Omid Rezaifar, Mohammad Kazem Sharbatdar, and Alireza Ahmady Fard, "Evaluation of different methods of machine vision in health monitoring and damage detection of structures", *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2021, Vol.9, no.4, pp.93-132.
- [16] Khanahmadi, Mohtasham, Majid Gholhaki, Omid Rezaifar, and Behzad Dezhkam, "Signal processing methodology for detection and localization of damages in columns under the effect of axial load", *Measurement*, 2023, Vol.211, p.112595.
- [17] Khanahmadi, Mohtasham, Omid Rezaifar, Majid Gholhaki, and Adel Younesi, "Detection of debonding damage location of the concrete core from the steel tube of concrete-filled steel tube (CFST) columns using wavelet analysis analytical method", *Modares Civil Engineering journal*, 2023, Vol.22, no.1, pp.129-142.
- [18] Khanahmadi, Mohtasham, Borhan Mirzaei, Gholamreza Ghodrati Amiri, Majid Gholhaki, and Omid Rezaifar, "Vibration-based damage localization in 3D sandwich panels using an irregularity detection index (IDI) based on signal processing", *Measurement*, 2024, Vol.224, p.113902.
- [19] Liu, X., N. A. J. Lieven, and Ponciano Jorge Escamilla-Ambrosio, "Frequency response function shape-based methods for structural damage localisation", *Mechanical systems and signal processing*, 2009, Vol.23, no.4, pp.1243-1259.
- [20] Bandara, Rupika P., Tommy HT Chan, and David P. Thambiratnam, "Frequency response function-based damage identification using principal component analysis and pattern recognition technique", *Engineering Structures*, 2014, Vol.66, pp.116-128.
- [21] Shadan, Fariba, Faramarz Khoshnoudian, and Akbar Esfandiari, "A frequency response-based structural damage identification using model updating method", *Structural Control and Health Monitoring*, 2016, Vol.23, no.2, pp.286-302.
- [22] Esfandiari, Akbar, Mansureh-Sadat Nabiyan, and Fayaz R. Rofooei, "Structural damage detection using principal component analysis of frequency response function data", *Structural Control and Health Monitoring*, 2020, Vol.27, no.7, p.e2550.
- [23] Bakhary, Norhisham, Hong Hao, and Andrew J. Deeks. "Substructuring technique for damage detection using statistical multi-stage artificial neural network", *Advances in Structural Engineering*, 2010, Vol.13, no.4, pp.619-639.
- [24] Shu, Jiangpeng, Ziyi Zhang, Ignacio Gonzalez, and Raid Karoumi, "The application of a damage detection method using Artificial Neural Network and train-induced vibrations on a simplified railway bridge model", *Engineering structures*, 2013, Vol.52, pp.408-421.

- [25] Tran-Ngoc, H., Samir Khatir, G. De Roeck, T. Bui-Tien, and M. Abdel Wahab, "An efficient artificial neural network for damage detection in bridges and beam-like structures by improving training parameters using cuckoo search algorithm", *Engineering Structures*, 2019, Vol.199, p.109637.
- [26] Zenzen, Roumaissa, Samir Khatir, Idir Belaidi, Cuong Le Thanh, and Magd Abdel Wahab, "A modified transmissibility indicator and Artificial Neural Network for damage identification and quantification in laminated composite structures", *Composite Structures*, 2020, Vol.248, p.112497.
- [27] Chou, Jung-Huai, and Jamshid Ghaboussi, "Genetic algorithm in structural damage detection", *Computers & structures*, 2001, Vol.79, no.14, pp.1335-1353.
- [28] Hao, Hong, and Yong Xia, "Vibration-based damage detection of structures by genetic algorithm", *Journal of computing in civil engineering*, 2002, Vol.16, no.3, pp.222-229.
- [29] Gomes, H. M., and N. R. S. Silva, "Some comparisons for damage detection on structures using genetic algorithms and modal sensitivity method", *Applied Mathematical Modelling*, 2008, Vol.32, no.11, pp.2216-2232.
- [30] Chandrashekhar, M., and Ranjan Ganguli, "Damage assessment of structures with uncertainty by using mode-shape curvatures and fuzzy logic", *Journal of Sound and Vibration*, 2009, Vol.326, no.3-5, pp.939-957.
- [31] Alexandrino, Patricia da Silva Lopes, Guilherme Ferreira Gomes, and Sebastião Simões Cunha Jr., "A robust optimization for damage detection using multiobjective genetic algorithm, neural network and fuzzy decision making", *Inverse Problems in Science and Engineering*, 2020, Vol.28, no.1, pp.21-46.
- [32] Mousavi, Asma Alsadat, Chunwei Zhang, Sami F. Masri, and Gholamreza Gholipour, "Damage detection and localization of a steel truss bridge model subjected to impact and white noise excitations using empirical wavelet transform neural network approach", *Measurement*, 2021, Vol.185, p.110060.
- [33] Beale, Christopher, Christopher Niezrecki, and Murat Inalpolat, "An adaptive wavelet packet denoising algorithm for enhanced active acoustic damage detection from wind turbine blades", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, Vol.142, p.106754.
- [34] Jeon, Jun Young, Duhwan Kim, Gyuhae Park, Eric Flynn, To Kang, and Soonwoo Han, "2D-wavelet wavenumber filtering for structural damage detection using full steady-state wavefield laser scanning", *NDT & E International*, 2020, Vol.116, p.102343.
- [35] Khanahmadi, M., H. Mohammady Garfamy, M. Gholhaki, B. Dejkam, and M. E. Miri, "Wavelet-based damage detection of steel beam-structures", *Journal of Structure & Steel*, 2021, Vol.16, no.33, pp.15-27.
- [36] Khanahmadi, Mohtasham, Omid Rezayfar, and Majid Gholhaki, "Comparative study on steel beams damage detection based on continuous and discrete wavelet transforms of static and dynamic responses", *Journal of Structural and Construction Engineering*, 2021, Vol.8, no.9, pp.166-183.
- [37] Wu, Jun, Xuebing Xu, Cheng Liu, Chao Deng, and Xinyu Shao, "Lamb wave-based damage detection of composite structures using deep convolutional neural network and continuous wavelet transform", *Composite Structures*, 2021, Vol.276, p.114590.
- [38] Rezaifar, Omid, Majid Gholhaki, Mohtasham Khanahmadi, and Yaser Amiri, "A review of structural health monitoring and damage detection using wavelet transform: The case study of damage detection in cantilever beams", *Journal of Vibration and Sound*, 2022, Vol.11, no.21, pp.157-171.
- [39] Mamazizi, Arman, Mohtasham Khanahmadi, and Kamran Nobakht Vakili, "Debonding damage detection and assessment in a CFST composite column using modal dynamic data", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2022, Vol.38, no.3.1, pp.53-63.
- [40] Khanahmadi, Mohtasham, Majid Gholhaki, Ahmad Ghasemi-Ghalebahman, and Morteza Khademi-Kouhi, "Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method", *Journal of Vibration and Sound*, 2022, Vol.10, no.20, pp.144-156.
- [41] Rezaifar, Omid, Majid Gholhaki, Mohtasham Khanahmadi, Adel Younesi, and Behzad Dejkam, "Damage detection and localization in steel plates using modal dynamic data and two-dimensional wavelet

- analysis", *Modares Civil Engineering journal*, 2023, Vol.23, no.1, pp.135-152.
- [42] Mamazizi, Arman, and Mohtasham Khanahmadi, "Damage identification in steel plates using a detection algorithm based on 1D continuous wavelet transform and 2D vibration mode shapes", *Sharif Journal of Civil Engineering*, 2023, Vol.39, no.1, pp.59-69.
- [43] Nicknam, A., M. H. Hosseini, and A. Bagheri, "Damage detection and denoising in two-dimensional structures using curvelet transform by wrapping method", *Archive of Applied Mechanics*, 2011, Vol.81, pp.1915-1924.
- [44] Katunin, Andrzej, and Sandris Ručevskis, "Assessment of Internal Damage in Sandwich Structures by Post-Processing of Mode Shapes Using Curvelet Transform", *Materials*, 2021, Vol.14, no.16, p.4517.
- [45] Vafaie, Sepideh, and Eysa Salajegheh, "A Comparative Study of Shearlet, Wavelet, Laplacian Pyramid, Curvelet, and Contourlet Transform to Defect Detection", *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 2023, Vol.7, no.2, pp.1-42.
- [46] Ezzodin, Amir, Hosein Naderpour, Ali Kheyroddin, and Gholamreza Ghodrati Amiri, "Damage Localization and Quantification of Beams Using Wavelet Transform", *Journal of Modeling in Engineering*, 2015, Vol.12, no.39, pp.1-11.
- [47] Khanahmadi, Mohtasham, Majid Gholhaki, Omid Rezaifar, and Behzad Dejkam, "Damage identification in steel beam structures based on the comparison of analytical results of wavelet analysis", *Civil Infrastructure Researches*, 2023, Vol.8, no.2, pp.173-183.
- [48] Khanahmadi, Mohtasham, Omid Rezayfar, and Majid Gholhaki, " 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*, 2021, Vol.8, no.5, pp.198-214.

پی نوشت

- 
1. Frequency Response Function
  2. Artificial Neural Network
  3. Genetic Algorithm
  4. Wavelet Transform
  5. Curvelet Transform
  6. Discrete Wavelet Transform
  7. Continuous Wavelet Transform
  8. ABAQUS
  9. Pearson's Correlation Coefficient