

Localization and investigation of damage extension in reinforced concrete beams using signal processing and machine learning

Farhad Jedari Zare Zadeh¹, Masood Farzam^{2*}, Mehran Dadashzadeh³

1- Ph.D. candidate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

2- Associate Prof., Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

3- Ph.D. candidate, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

ABSTRACT

The propagation of incremental cracks in the main components of the structures is an important quandary that can cause irreparable damage in the structures over time. This study proposes a statistical method based on signal processing and machine learning to investigate crack location and propagation in reinforced concrete beams. The assumed beam with different boundary conditions is modeled in finite element software (ABAQUS) and incremental cracks are defined according to Extended Finite Element Method (XFEM) in two default locations along the length of the beam. Then, the incremental distributed load is assigned on the beam and the structure response is obtained through the loading time interval. The responses of the beam are used as a database to process with Continuous Wavelet Transform (CWT) and the wavelet coefficients are extracted in the same nodes that structure responses were. The distribution of wavelet coefficients has an effective and valuable implication to investigate the crack location and propagation. In order to consider the variation of wavelet coefficients during crack propagation, Principal Component Analysis (PCA) is used as a machine learning method. The study indicates that the first few components are highly correlated with the location of the damage. The results show that the proposed algorithm has recognized the crack propagation and localized it with high accuracy.

ARTICLE INFO

Receive Date: 30 April 2023

Revise Date: 30 July 2023

Accept Date: 08 August 2023

Keywords:

Damage detection and localization

Incremental cracks Extended finite element method

Wavelet transform

Principal component analysis

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.392857.3082>

*Corresponding author: Masood Farzam.

Email address: mafarzam@tabrizu.ac.ir

تعیین موقعیت و بررسی گسترش آسیب در تیرهای بتن آرمه با استفاده از پردازش سیگنال و یادگیری ماشین

فرهاد جداری زارعزاده^۱، مسعود فرزام^{۲*}، مهران داداشزاده^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران سازه، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار، مهندسی عمران سازه، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی عمران سازه‌های دریایی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

گسترش ترک‌های فزاینده در اجزای اصلی یک سازه یکی از اساسی‌ترین مشکلاتی است که با گذشت زمان می‌تواند موجب خسارات جبران ناپذیری در سازه‌ها شود. در پژوهش حاضر به منظور بررسی روند گسترش ترک‌های فزاینده و تعیین موقعیت آن‌ها در تیر بتن آرمه، یک روش آماری مبتنی بر پردازش سیگنال و یادگیری ماشین پیشنهاد گردید. تیر مورد نظر با شرایط تکیه‌گاهی مختلف در نرم‌افزار اجزا محدود ABAQUS مدل‌سازی شده و ترک‌های فزاینده با استفاده روش اجزا محدود گسترش یافته (XFEM) در دو موقعیت مفروض از طول تیر تعریف شد. در ادامه تیر مذکور تحت اثر بارگذاری افزایش‌یابنده قرار گرفته و پاسخ آن از نوع تغییرمکان در زمان‌های مختلف از بازه زمانی بارگذاری استخراج گردید. پاسخ‌های بدست آمده با استفاده از تبدیل موجک پیوسته (CWT) پردازش شده و ضرایب موجک در هر یک از گره‌های متناظر با نقاط سنجش پاسخ تیر اخذ شد. توزیع ضرایب موجک بدست آمده دارای مفاهیم موثر و ارزشمندی برای بررسی رشد ترک و نحوه گسترش آن دارد. سپس به منظور بررسی تغییرات ضرایب موجک در طول گسترش ترک از تجزیه مولفه‌های اصلی به عنوان یک روش یادگیری ماشین استفاده گردید. بررسی‌ها حاکی از آن است که چند مولفه اول، تناظر بالایی با موقعیت آسیب دارند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که الگوریتم پیشنهاد شده روند رشد ترک‌های فزاینده را به خوبی تشخیص داده و موقعیت آسیب را با دقت بالایی تعیین می‌نماید.

کلمات کلیدی: تشخیص و تعیین محل آسیب، ترک‌های فزاینده، روش اجزا محدود گسترش یافته، تبدیل موجک، تجزیه مولفه‌های اصلی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	https://doi.org/10.22065/jsce.2023.392857.3082	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2023.392857.3082	۱۴۰۲/۰۲/۳۱	۱۴۰۲/۰۵/۱۷	۱۴۰۲/۰۵/۱۷	۱۴۰۲/۰۵/۰۸	۱۴۰۲/۰۲/۱۰
مسعود فرزام mafazam@tabrizu.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، وقوع آسیب در سازه‌ها و عوامل موثر بر افزایش میزان آن همواره مورد بحث بوده است. پژوهشگران با بررسی تأثیر عوامل مختلف همچون زمان، شرایط محیطی، بارگذاری نامتعارف و حوادث ناگهانی مانند زلزله و سیل، رفتار سازه‌ها را کنترل نموده و بر اساس آن تمهیداتی را در زمینه شناسایی و تعیین موقعیت آسیب پیشنهاد کرده‌اند. مجموعه تحقیقات انجام شده در این زمینه، به عنوان زیرشاخه‌ای از علم پایش سلامت سازه‌ها^۱ شناخته شده است. نظارت بر کیفیت خدمت‌پذیری سازه‌ها، ارزیابی دوام و تضمین ایمنی آن‌ها از اهداف مهم پایش سلامت سازه‌ها می‌باشد که در پژوهش‌های اخیر، دستیابی به رویکردهای ابتکاری و جدید در این زمینه به منظور نیل به اهداف مذکور، جذابیت روزافزونی داشته است.

در گذشته روش‌های مبتدی در زمینه آسیب‌یابی، با بازرسی‌های چشمی از سازه‌ها انجام می‌شد که با گذشت زمان، پژوهشگران متوجه نقاط ضعفی از قبیل خطای بازرسی سازه، ایجاد خسارات عمدی در نمونه‌برداری، خطرات جانی و عدم سهولت در دسترسی به برخی نقاط از سازه‌های بزرگ شدند. همچنین این روش در بسیاری از موارد، قادر به تشخیص میزان آسیب در محل آن نبود. بنابراین روش‌هایی بر اساس بررسی خواص ذاتی سازه و ارتعاشات آن تحت اثر بارهای دینامیکی پیشنهاد گردید [۱ و ۲]. بر این اساس، آسیب در سازه به عنوان تغییر در ویژگی‌های هندسی و خواص مصالح تشکیل‌دهنده آن تعریف شد و عواملی مانند زمان و تغییر در شدت بارگذاری به عنوان اثرات افزایش‌دهنده میزان آسیب مشخص گردید [۳].

بررسی و کشف اثرات خزش و انقباض در سازه‌های بتن‌آرمه، از اولین پژوهش‌هایی بود که در زمینه آسیب‌های افزایش‌یابنده مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۱۹۰۷، هت^۲ به منظور بررسی رفتار مصالح تحت اثر بارگذاری پایدار، تیرهای بتن‌آرمه با ابعاد مختلفی ساخته و در سن ۲۸ روز تحت اثر بارگذاری ثابت سه نقطه قرار داد [۴]. پس از دو ماه از بارگذاری نمونه‌ها، بررسی خیز در تیرها نشان داد که مقادیر تغییرمکان در محل بار تقریباً دو برابر شده است. با کشف اثر خزش و انقباض در بتن، مشخص گردید که اعضای بتن‌آرمه می‌تواند در اثر گذشت زمان دچار تغییر شده و آسیب‌های رخ داده در آن‌ها افزایش یابد. علاوه بر این، با گذشت زمان و افزایش شدت آسیب، مشخصات ذاتی اعضای سازه‌ای نیز مستعد تغییر شناخته شد. به طور مثال، میرایی ذاتی سازه در پژوهش لی^۳ و همکاران به عنوان یک پارامتر متأثر از حضور ترک گزارش شد [۵]. همچنین فارار و ژورگی^۴ در طی یک مطالعه تطبیقی در اجزای سازه‌ای یک پل به این نتیجه رسیدند که تغییر در فرکانس‌های طبیعی آن می‌تواند خطاری بر وجود آسیب در سازه باشد [۶]. اما میرایی ذاتی سازه و فرکانس‌های طبیعی آن پارامترهای قابل اعتمادی برای آسیب‌یابی در سازه‌ها نمی‌باشند، زیرا اولاً در اثر شرایط محیطی مستعد تغییر بوده و ثانیاً قادر به تشخیص دقیق محل آسیب و میزان آن نمی‌باشند.

پارامتر دیگری که به منظور اهداف آسیب‌یابی مورد توجه قرار گرفت، انرژی کرنشی مودال بود. تیموری و همکاران با تعریف انرژی کرنشی مودال در سازه سالم و آسیب‌دیده به عنوان شاخص تشخیص آسیب، یک روش دو مرحله‌ای را برای تعیین محل و شدت آسیب پیشنهاد نمودند. در این روش ابتدا شاخص آسیب بر پایه انرژی کرنشی مودال با در نظر گرفتن شکل یک مود تعیین گردید و سپس شاخص‌های آسیب مذکور با استفاده از تئوری بیز^۵ ترکیب شدند تا اعضای آسیب‌دیده در سازه به صورت دقیق مشخص گردند. در نهایت تابع هدف با استفاده از روش بهینه‌یابی سیستم ذرات باردار بر اساس فرکانس طبیعی اول تعریف گردیده و میزان شدت آسیب در اعضای مشخص شده بدست آمد [۷]. در پژوهشی دیگر سمائی و قدسی از انرژی کرنشی مودال بهبود یافته و فرکانس‌های طبیعی به منظور شناسایی و تعیین محل آسیب در اعضای واقع در عرشه و ناحیه پاشش آب در زیرسازه تریپاد توربین بادی فراساحلی استفاده نمودند. نتایج بدست آمده در این روش نشان داد که آسیب‌های تکی و چندگانه با دقت خوبی تخمین زده شدند [۸].

¹ Structural Health Monitoring

² W.K. Hatt

³ H. Li

⁴ C.R. Farrar and D. Jauregui

⁵ Bayes' theorem

برای اولین بار در سال ۱۹۹۸، لیو و ونگ^۶ استفاده از تبدیل موجک را برای اهداف آسیب‌یابی در تیرها پیشنهاد کردند. بدین منظور منحنی خیز تیر تحت اثر بارگذاری ثابت استخراج گردیده و با استفاده از تبدیل موجک پردازش شد. ضرایب موجک بدست آمده در این پژوهش نشان داد که موقعیت آسیب تناظر بسیار زیادی با ضرایب موجک حداکثر در طول تیر دارد [۹]. چنگ و چن^۷ در طی پژوهشی نشان دادند که مودهای ارتعاش سازه نیز می‌توانند قابل اعتماد باشند. در این پژوهش یک مدل‌سازی عددی از تیر تیموشینکو انجام شده و مشخصات آسیب در آن با فرض عملکرد ترک عرضی، به صورت یک فنر دورانی تعریف گردید. پس از تحلیل فرکانسی عضو مذکور، مودهای ارتعاش آن استخراج گردیده و با استفاده از تبدیل موجک پردازش شدند. نتایج نشان داد که کاهش سختی در محل آسیب موجب تغییر در مودهای ارتعاش تیر می‌شود [۱۰]. روکا و وایلد^۸ در طی پژوهشی نشان دادند که از تبدیل موجک به منظور آسیب‌یابی در عناصر صفحه‌ای نیز می‌توان استفاده کرد. در پژوهش مذکور، مود اول ارتعاش یک صفحه فولادی آسیب‌دیده با شرایط تکیه‌گاهی گیردار در طی آزمایش‌های تجربی تخمین شده و با استفاده از تبدیل موجک دو بُعدی پردازش گردید. ضرایب موجک بدست آمده در فضای دو بُعدی، موقعیت آسیب را در صفحه فولادی مذکور در این پژوهش نشان دادند [۱۱]. در پژوهشی دیگر شاهسواری و همکاران مود اول ارتعاش یک تیر فولادی تحت آسیب‌های افزایشی را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش، یک تیر فولادی آسیب‌دیده در شرایط آزمایشگاهی ساخته شده و مود اول آن در طی افزایش شدت آسیب بدست آمد. در ادامه مودهای بدست آمده در هر سطح از میزان آسیب با استفاده از تبدیل موجک پردازش گردیده و با استفاده از روش‌های آماری تحلیل شد [۱۲].

در بسیاری از پژوهش‌هایی که از تبدیل موجک برای اهداف آسیب‌یابی استفاده گردید، اثرات لبه^۹ به عنوان عاملی مزاحم شناسایی گردید. در فرآیند پردازش سیگنال، اثرات لبه سیگنال‌های مزاحمی می‌باشند که نتیجه ذاتی تبدیل موجک در نقاط مرزی بوده و موجب اشتباه در تفسیر نتایج آسیب‌یابی می‌شوند [۱۳]. در راستای کاهش اثرات لبه، مسینا^{۱۰} روش‌های مختلفی را برای بسط تابع ورودی تبدیل موجک پیشنهاد داد [۱۴]. در این روش، تابع ورودی بسط داده شده با استفاده از تبدیل موجک پردازش گردید. سپس تنها ضرایب موجک متناظر با دامنه تابع ورودی اولیه به عنوان داده‌های موثر بر روند آسیب‌یابی انتخاب شد. بررسی‌های انجام شده در این پژوهش در مطالعات عددی و نتایج آزمایشگاهی نشان داد که روش‌های بسط توابع تأثیر بسزایی در کاهش اثرات لبه در خروجی تبدیل موجک دارد.

نتایج بکارگیری تبدیل موجک در داده‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که اثرات محیطی و دما می‌تواند بر مقادیر ضرایب موجک موثر باشد [۱۵]. در راستای کاهش تأثیر اثرات محیطی، ین^{۱۱} و همکاران روش آسیب‌یابی با استفاده از تجزیه مولفه‌های اصلی را تحت شرایط محیطی مختلف پیشنهاد کردند. در این روش بدون نیاز به اندازه‌گیری پارامترهای محیطی، خواص دینامیکی سازه ارزیابی شده و مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در این روش نشان داد که الگوریتم تجزیه مولفه‌های اصلی با کاهش موثر اثرات محیطی، موقعیت و میزان آسیب را بر اساس میزان همبستگی داده‌های ورودی مشخص می‌کند [۱۶]. همچنین در پژوهشی دیگر بلینو^{۱۲} و همکاران اثبات نمودند که تجزیه مولفه‌های اصلی علاوه بر سیستم‌های نامتغیر با زمان، در سیستم‌های تغییرپذیر تحت اثر تغییرات زمانی نیز کاربرد دارد. بدین منظور پاسخ دینامیکی بدست آمده از یک پل راه‌آهن در اثر بارگذاری متحرک در نظر گرفته شده و با استفاده از تجزیه مولفه‌های اصلی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اثرات منفی متغیرهایی مانند جرم و سرعت قطار عبوری به عنوان عوامل محیطی به خوبی حذف می‌گردد [۱۷].

از طرفی در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های اجزا محدود در پژوهش‌های آسیب‌یابی توسعه چشم‌گیری داشته است. گنج‌دوست و همکاران به منظور شناسایی و بررسی آسیب در اعضای کامپوزیتی از روش اجزا محدود معکوس^{۱۳} استفاده کردند. در این پژوهش، کرنش‌های معادل با تنش‌های فون‌میزز^{۱۴} بدست آمده و سپس با تعریف شاخص آسیب بر اساس کرنش‌های مذکور، سلامت سازه مورد

⁶ K.M. Liew and Q. Wang

⁷ C. Chang and L. Chen

⁸ M. Rucka and K. Wilde

⁹ Edge effects

¹⁰ A. Messina

¹¹ A. Yan

¹² A. Bellino

¹³ inverse Finite Element Method

¹⁴ Von Mises Stress

ارزیابی قرار گرفت [۱۸]. در پژوهشی دیگر، جهانگیری و احمدی یک روش مدل سازی آسیب بر اساس مفاهیم آنالیز ارتعاشات و روش اجزا محدود معرفی نمودند. در این روش به منظور تعیین محل آسیب و ارزیابی شدت آن در یک تیر فولادی از روش الگوریتم فراکاوشی ژنتیک پارتونیچ استفاده گردید [۱۹]. سینگ^{۱۵} و همکاران به منظور ارزیابی شدت آسیب در یک تیر بتنی و تعیین شاخص آسیب در آن، ترک-هایی به عمق مختلف در یک مدل اجزا محدود بتن شبیه سازی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش عمق ترک، شاخص مذکور افزایش می یابد [۲۰].

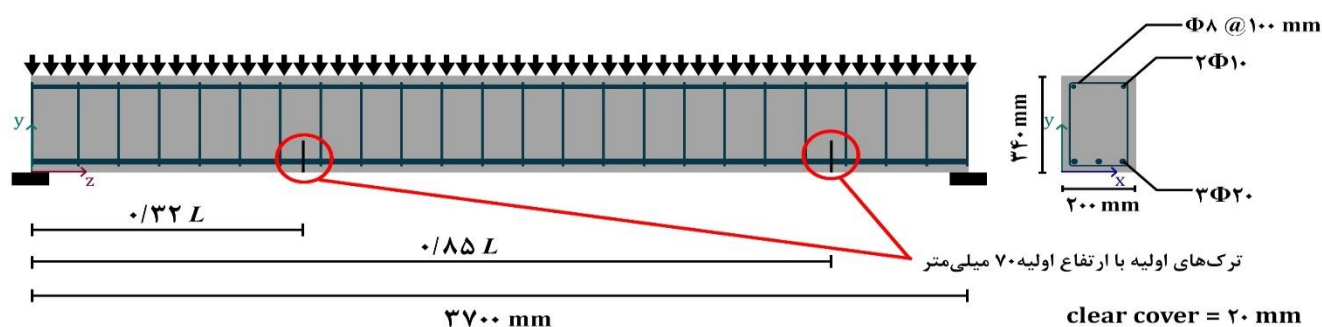
در پژوهش حاضر مدل اجزا محدود یک تیر بتن آرمه با شرایط تکیه گاهی دو سر گیردار و دو سر مفصل به منظور تشخیص موقعیت ترک و بررسی گسترش آن در نظر گرفته شده است. در مدل مذکور، شبیه سازی رشد ترک های گسترش یابنده در دو موقعیت از طول تیر با استفاده از روش اجزا محدود توسعه یافته^{۱۶} تعریف می گردد. به منظور استخراج داده های لازم در طی روند گسترش ترک، بار گسترده شبه استاتیکی بر تیر مذکور اعمال شده و پاسخ جابه جایی آن در هر گام زمانی از تحلیل به تعداد متعدد استخراج می شود. در ادامه، پیش از پردازش سیگنال، پاسخ های بدست آمده با استفاده از تابع برونیا به سمت خارج از بازه طول تیر بسط داده می شود تا اثرات لبه در نقاط تکیه گاهی در نتایج تبدیل موجک کاهش پیدا کند. پس از پردازش سیگنال با استفاده از تبدیل موجک پیوسته^{۱۷}، نتایج بدست آمده به منظور بررسی توزیع ضرایب موجک و روند گسترش ترک در طول تیر با استفاده از تجزیه مولفه های اصلی تحلیل می شود. موقعیت آسیب در طول تیر با بررسی نقاط پیک در مولفه های اصلی تعیین می گردد. در نهایت گسترش ترک از تغییر مقادیر مولفه های بدست آمده از سنجش های متعدد مشخص می شود.

۲- مشخصات مساله

۲-۱- مشخصات تیر بتن آرمه و موقعیت ترک های گسترش یابنده در آن

مطابق شکل ۱، تیر مورد بررسی در این پژوهش یک تیر بتن آرمه به طول $L = 3/7 \text{ m}$ با شرایط تکیه گاهی دو سر گیردار و دو سر مفصل می باشد. آسیب ها در تیر مذکور به صورت ترک های گسترش یابنده به ارتفاع اولیه 70 mm و به فاصله $0/32L$ و $0/85L$ به ترتیب از سمت تکیه گاه چپ در دو نقطه تعریف گردیده است. مشخصات مصالح مورد استفاده در تیر مورد بررسی از قبیل بتن و فولاد در جدول (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که مدول الاستیسیته بدست آمده برای بتن در جدول ۱، بر اساس معادله پیشنهاد شده در آیین نامه ACI 318-19 مطابق رابطه زیر بدست آمده است.

$$E_c = (3320\sqrt{f'_c} + 6900)\left(\frac{w_c}{2300}\right)^{1.5} \quad (1)$$



شکل ۱. تیر بتن آرمه مورد بررسی و موقعیت ترک های گسترش یابنده در آن

¹⁵ P. Singh

¹⁶ Extended Finite Element Method

¹⁷ Continuous Wavelet Transform

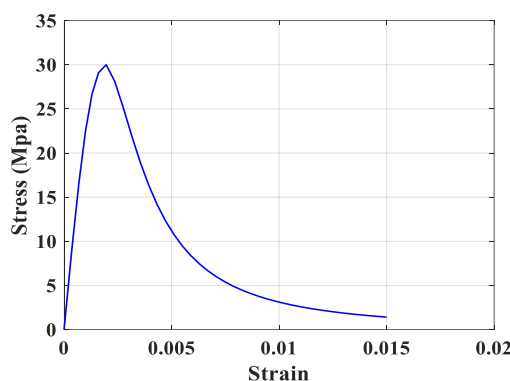
جدول ۱. مشخصات مصالح مورد استفاده در مدل سازی عددی تیر

الف) بتن				
رده بتن	مقاومت مشخصه (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
C30	۳۰	۲۴۵۰	۲۷۵۷۷	۰/۲
ب) فولاد				
نوع	تنش تسلیم (MPa)	وزن مخصوص (Kg/m ³)	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون
G 420	۴۲۰	۷۸۳۰	۲/۰۷×۱۰ ^۵	۰/۳

در رابطه ۱، E_c مدول الاستیسیته بتن، f'_c مقاومت مشخصه آن و W_c نشان دهنده وزن مخصوص می باشد. به منظور مدل سازی رفتار غیرخطی بتن، سه مدل رفتاری آن در کتابخانه نرم افزار ABAQUS پیشنهاد شده است. مدل ترک پخشی بتن^{۱۸}، ترک ترد^{۱۹} و مدل آسیب دیدگی خمیری بتن^{۲۰} مواردی می باشد که می توان از آن ها در مدل اجزا محدود استفاده نمود. در مدل رفتاری ترک پخشی بتن، معیار گسترش ترک بر پایه رسیدن مقادیر تنش به حد صفحه گسیختگی در المان های عضو مورد بررسی می باشد. این مدل در نرم افزار تنها با حلگر ضمنی قابل تحلیل بوده و مدت زمان تحلیل سازه در آن به طور قابل توجهی بالا می رود. مدل ترک ترد برای بررسی رفتار کششی در مصالح ترد شکن مورد استفاده قرار می گیرد و یکی از مهم ترین ضعف آن اغماض از آسیب فشاری در بتن می باشد. به عبارت بهتر در این مدل رفتار بتن در ناحیه فشاری به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته می شود. در مدل رفتاری آسیب دیدگی خمیری بتن نیز فرض ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری مد نظر قرار می گیرد [۲۱]. در پژوهش حاضر، با توجه به این که فرض ترک خوردگی در ناحیه فشاری بتن در نظر گرفته شده است بنابراین برای تعریف رفتار فشاری بتن در نرم افزار ABAQUS از روابط پیشنهادی تورنفلد^{۲۱} و همکاران استفاده گردیده است [۲۲]. شایان ذکر است روابط مذکور برای بتن هایی با مقاومت مشخصه ۱۵ الی ۱۲۵ مگاپاسکال به کار گرفته می شود. در روابط تورنفلد و همکاران رابطه بین تنش و کرنش متناظر با آن بر اساس رابطه ۲ بدست می آید.

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c} \frac{n}{n-1 + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon'_c}\right)^{nk}} \quad (2)$$

در رابطه ۲، f_c تنش فشاری، f'_c مقاومت نمونه بتنی استوانه ای، ε_c کرنش فشاری و ε'_c کرنش متناظر با f'_c می باشد. ضرایب n و k در رابطه فوق به ترتیب بر اساس روابط ۳ و ۴ بدست می آیند. لازم به ذکر است که مقادیر f'_c در این روابط باید بر حسب مگاپاسکال در نظر گرفته شوند. در شکل ۲، نمودار تنش - کرنش بتن در محدوده تنش فشاری بر اساس رابطه تورنفلد و همکاران نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش فشاری بتن بر اساس روابط تورنفلد و همکاران

¹⁸ Concrete Smeared Cracking

¹⁹ Brittle Cracking

²⁰ Concrete Damaged Plasticity

²¹ E. Thorenfeldt

$$n = 0.8 + \frac{f'_c}{17} \quad (3)$$

$$k = \begin{cases} 1 & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} \leq 1 \\ 0.67 + \frac{f'_c}{62} & \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_c'} > 1 \end{cases} \quad (4)$$

۲-۲- مشخصات ترک‌های گسترش‌یابنده بر اساس روش XFEM

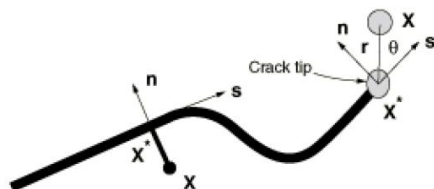
در پژوهش حاضر از روش اجزا محدود گسترش‌یافته (XFEM) برای شبیه‌سازی ترک‌های گسترش‌یابنده در تیر بتن آرمه استفاده شده است. این روش، به عنوان زیرمجموعه‌ای از روش‌های افزایش واحد^{۲۲} (PUM) بوده و به منظور مدل‌سازی ناپیوستگی‌ها در محیط‌های پیوسته به طور مستقل از مش‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عبارت بهتر شبیه‌سازی ترک در روش اجزا محدود گسترش‌یافته موجب اخلاص در نظم مش‌بندی نمی‌شود [۲۳]. به منظور شبیه‌سازی شکل گسترش ترک در این روش، از یک رابطه ریاضی متشکل از تابع شکل گره $N_I(x)$ ، تابع ناپیوستگی هوی‌ساید $H(x)$ ^{۲۳} و تابع $F_a(x)$ ، تابع مجانب بوده و برای بیان تکینگی‌ها^{۲۴} در نوک ترک استفاده شده است. رابطه ۵ معادله گسترش ترک را بر اساس توابع مذکور نشان می‌دهد.

$$u^h(x) = \sum_{I \in N} N_I(x) \cdot \left[u_I + H(x) \cdot a_I + \sum_{a=1}^4 F_a(x) \cdot b_I^a \right] \quad (5)$$

در رابطه ۵، u_I بردار درجات آزادی گرهی، a_I بیانگر بردار متغیرهای گرهی برای تعریف ناپیوستگی در جهش جابه‌جایی‌ها و b_I بردار اعمال راستای درجات آزادی در نوک ترک می‌باشد. تابع هوی‌ساید در رابطه گسترش ترک، برای بیان مقادیر جابه‌جایی سطح ترک بر اساس رابطه ۶ تعریف می‌گردد.

$$H(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x-x^*) \cdot n \geq 0 \\ -1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

مطابق شکل ۳ و رابطه ۶، X نقطه جدید در راستای گسترش ترک بوده و X^* نزدیک‌ترین نقطه موجود در دامنه گسترش ترک به نقطه نمونه جدید می‌باشد. مطابق رابطه ۵، از تابع $F_a(x)$ برای بدست آوردن تابع مجانب نوک ترک در یک ماده الاستیک همسانگرد استفاده شده است که مطابق رابطه ۷ بدست می‌آید.



شکل ۳. تابع جهش ناپیوستگی در سطح ترک (هوی‌ساید)

²² Partition-of-Unity Method

²³ Heaviside

²⁴ Singularity

$$F_a(x) = \left[\sqrt{r} \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \sin \frac{\theta}{2}, \sqrt{r} \sin \theta \cos \frac{\theta}{2} \right] \quad (7)$$

بر اساس شکل ۳ در رابطه ۷، مبدأ دستگاه مختصات قطبی در نوک ترک در نظر گرفته شده و در مختصات $\theta = 0$ مماس بر آن می‌باشد.

در روش اجزا محدود گسترش یافته، پس از تعریف شکل گسترش ترک در تیر مورد نظر، شاخص آسیب تعریف می‌گردد. تعریف شاخص آسیب در مدل اجزا محدود این امکان را فراهم می‌کند که مکانیزیم شکست را بتوان به سادگی در نرم‌افزار اعمال نمود. مکانیزیم شکست در نرم‌افزار ABAQUS بر اساس دو جز معیار شروع آسیب و تکامل آن تعریف می‌شود. معیارهای گسترش و تکامل ترک عبارتند از معیار تنش اصلی حداکثر (MAXPS)^{۲۵}، معیار کرنش اصلی حداکثر (MAXPE)^{۲۶}، معیار تنش حداکثر اسمی (MAXS)^{۲۷}، معیار کرنش حداکثر اسمی (MAXE)^{۲۸}، معیار اندرکنش درجه دوم کشش (Quads)^{۲۹} و معیار اندرکنش درجه دوم جدادگی (Quade)^{۳۰} [۲۴]. در پژوهش حاضر از معیار تنش اصلی حداکثر (MAXPS) به عنوان معیار شروع و گسترش ترک در بتن استفاده شده است.

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\sigma_{max}^0} \right\} \quad (8)$$

در رابطه ۸، σ_{max}^0 بیانگر تنش اصلی مجاز حداکثر و $\langle \sigma_{max} \rangle$ نشان دهنده مقدار تنش فشاری نهایی است که در آن هنوز آسیب رخ نداده است. همچنین با توجه به معیارهای شروع و گسترش ترک، افزایش آسیب در عضو بر اساس نرخ آزادسازی انرژی در سه مود ممکن است اتفاق بیفتد [۲۵] که مقادیر آن در پژوهش حاضر برای بتن مطابق محاسبات ردیبر^{۳۱} در هر یک از مودهای اول، دوم و سوم برابر N/m^{۳۲} ۱۹/۵۸ لحاظ گردیده است [۲۶].

۲-۳- مدل سازی اجزا محدود تیر بتن آرمه و بارگذاری آن

تیر بتن آرمه مورد بررسی در پژوهش حاضر در نرم‌افزار ABAQUS نسخه ۲۰۲۲ مدل شده است. شبیه‌سازی اجزای تیر در سه المان در فضای سه بعدی به تفکیک تیر بتنی، آرماتورهای طولی و عرضی و ترک‌های اولیه به ترتیب به حالت Solid، Wire و Shell تعریف گردید. مشخصات مصالح مطابق جدول ۲ در نظر گرفته شد و مونتاژ تیر مطابق هندسه فرض شده در شکل ۱ انجام گرفت. لازم به توضیح است که در این مدل شکل هندسی ترک به صورت صفحه فاقد جنس تعریف شده و ماهیت آن در بخش مونتاژ المان به عنوان ترک مشخص گردید. سپس مش‌بندی تیر بتنی با استفاده از المان‌های هشت گرهی (C3D8R) به ابعاد $25 \times 25 \times 25$ mm^۳، میلگردهای طولی و عرضی با المان دو گرهی (B31) به طول ۲۵ mm اعمال شد. لازم به ذکر است که مطابق الگوریتم تعریف ترک به روش اجزا محدود گسترش یافته اولاً مش‌بندی اجزا تیر مستقل از ترک بوده و ثانیاً نیاز به مش‌بندی المان صفحه‌ای ترک نمی‌باشد.

پیش از بارگذاری عضو، ظرفیت مقطع برای بدست آوردن میزان بار به صورت گسترده سطحی یکنواخت بر اساس شکل ۱ مطابق جدول ۲ محاسبه گردید. سپس در مرحله بارگذاری، پس از تعریف شرایط تکیه‌گاهی، مقادیر بار گسترده سطحی یکنواخت بر یال فوقانی تیر مطابق نمودار نشان داده شده در شکل ۴ به صورت تابعی از زمان اعمال شد. در ادامه به منظور استخراج پاسخ جابه‌جایی تیر، تحلیل آن به صورت تحلیل دینامیکی ضمنی در مرحله گام تحلیل نرم‌افزار تعریف شده و مدت زمان آن برای ۴۵ میلی‌ثانیه در ۷۵ گام زمانی تنظیم گردید. پس از تحلیل سازه، مقادیر جابه‌جایی از ۱۴۹ گره در یک مسیر^{۳۲} مستقیم از یال تحتانی تیر در هر گام زمانی بدست آمد. پاسخ

²⁵ Maximum Principal Stress criterion

²⁶ Maximum Principal Strain criterion

²⁷ Maximum nominal Stress criterion

²⁸ Maximum nominal Strain criterion

²⁹ Quadratic traction-interaction criterion

³⁰ quadratic separation-interaction criterion

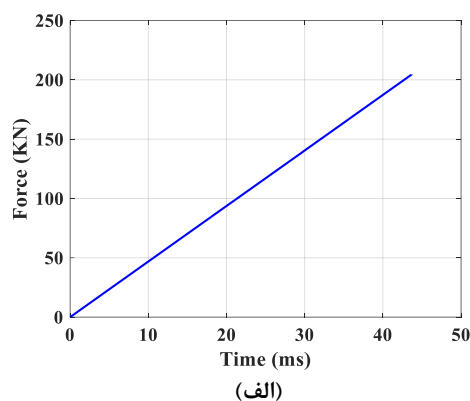
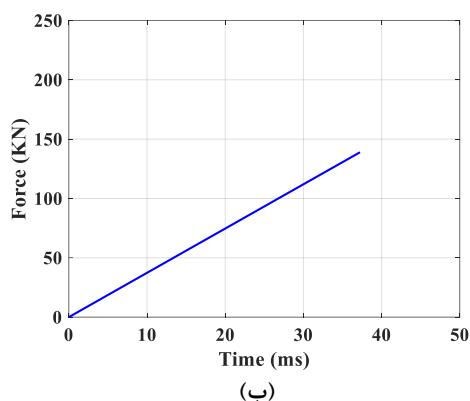
³¹ M.K.M Reddiar

³² Path

جابه‌جایی اخذ شده در هر مرحله به صورت یک ماتریس $m \times n$ مطابق رابطه ۹ ثبت گردید. در ماتریس مذکور، $m = 75$ برابر تعداد گام‌های زمانی تعریف شده و $n = 149$ تعداد نقاط مش‌بندی است که از آن پاسخ جابه‌جایی اخذ شده است.

جدول ۲. مشخصات مقطع تیر بتن آرمه

شرایط تکیه‌گاهی	ابعاد مقطع (mm)	فولاد کششی (%)	فولاد فشاری (%)	ارتفاع موثر (mm)	حداکثر شدت بار گسترده سطحی (KN/m)
دو سر گیردار	۲۰۰×۳۴۰	۱/۵۶	۰	۳۰۲	۲۰۳/۳
دو سر مفصل	۲۰۰×۳۴۰	۱/۵۶	۰/۲۶	۳۰۲	۱۳۵



شکل ۴. تغییر شدت بارگذاری سطحی در تیر (الف) دو سر گیردار و (ب) دو سر مفصل در مدت زمان تحلیل

$$[U] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & u_{13} & \dots & u_{1n} \\ u_{21} & u_{22} & u_{23} & \dots & u_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ u_{m1} & u_{m2} & u_{m3} & \dots & u_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

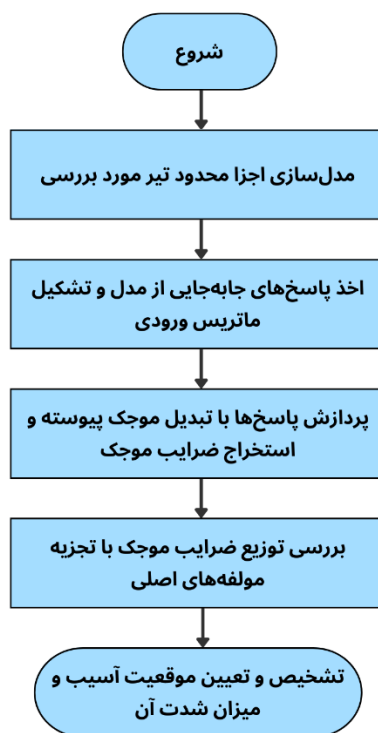
۳- الگوریتم آسیب‌یابی

در پژوهش حاضر، پس از مدل‌سازی اجزا محدود تیر مورد بررسی، روند تشخیص و تعیین موقعیت آسیب در آن با استفاده از روش پردازش سیگنال و یادگیری ماشین انجام شد. بدین منظور از تبدیل موجک پیوسته به عنوان یک راهبرده مطلوب در فرآیند پردازش سیگنال برای تشخیص و تعیین موقعیت آسیب در طول تیر استفاده گردید. سپس روند تغییر توزیع ضرایب موجک با استفاده از تجزیه مولفه‌های اصلی به عنوان یکی از روش‌های یادگیری ماشین برای بررسی میزان شدت آسیب در محل برآورد شده، اجرا گردید. فلوچارت روند انجام تحقیق در شکل ۵ آورده شده است. کاربرد هر یک از روش‌های تبدیل موجک پیوسته و تجزیه مولفه‌های اصلی در پژوهش حاضر به شرح ذیل می‌باشد.

۳-۱- تبدیل موجک پیوسته

تبدیل موجک پیوسته، یک روش پردازش سیگنال می‌باشد که از آن برای نگاشت تابع ورودی در فضای زمان یا مکان به فضای فرکانس- زمان یا مکان استفاده می‌شود [۲۷]. به عبارت بهتر تابع ورودی به عنوان یک سیگنال در نظر گرفته شده و با پردازش آن به وسیله یک سری توابع موجک پایه، ضرایب موجک در مقیاس‌های مختلف حاصل می‌گردد. به مجموعه توابع موجک پایه در مقیاس‌های

مختلف، تابع موجک مادر گفته می‌شود که بسته به نوع کاربردشان می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند [۲۸]. در رابطه ۱۰ شکل عمومی تابع موجک مادر آورده شده است.



شکل ۵. الگوریتم آسیب یابی با استفاده از تبدیل موجک و تجزیه مولفه های اصلی

$$\Psi_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{x-b}{a}\right) \quad (10)$$

مطابق رابطه ۱۰، a بیانگر پارامتر مقیاس و b نشان دهنده پارامتر شیفت مکانی تابع موجک در سیگنال ورودی است. در پژوهش حاضر از تابع موجک مادر مورلت مختلط^{۳۳} برای اهداف آسیب یابی استفاده شد. تابع موجک مورلت مختلط از خانواده توابع گاوسی می‌باشد که رابطه ریاضی آن در رابطه ۱۱ نشان داده شده است [۲۹].

$$\Psi^*(x) = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f_b}} \cdot e^{2\pi i \cdot f_c \cdot x} \cdot e^{-\frac{x^2}{f_b}} \quad (11)$$

در رابطه ۱۱، f_a و f_b به ترتیب نشان دهنده پهنای باند و فرکانس مرکزی تابع موجک بوده و نماد * بیانگر مختلط بودن تابع $\Psi(x)$ می‌باشد. پس از تعیین نوع تابع موجک مادر، سیگنال ورودی تبدیل موجک بر تابع موجک مادر در مقیاس های مختلف ضرب شده و مقادیر ضرایب موجک در هر مقیاس مطابق رابطه ۱۲ بدست می‌آید.

$$\Psi_{f,\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot \Psi^*\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (12)$$

مطابق روند ارائه شده در شکل ۵ سیگنال های ورودی تبدیل موجک، جابه جایی های بدست آمده در طول تیر می‌باشند. با توجه به اینکه پارامتر مذکور به عنوان یک تابع ریاضی طول محدودی دارد بنابراین پردازش آن با تبدیل موجک موجب تولید اثرات لبه در نتایج می‌گردد [۳۰]. اثرات لبه در نقاط تکیه گاهی اغتشاشاتی را بوجود می‌آورد که می‌تواند اثرات آسیب را پوشش داده و موجب اشتباه در تفسیر

³³ Complex Morlet

نتایج گردد. در پژوهش حاضر به منظور کاهش اثرات لبه در نتایج، از روش گسترش سیگنال ورودی با استفاده از برونمایی اسپیلاین مکعبی^{۳۴} استفاده شد.

۳-۲- تجزیه مولفه‌های اصلی

روش تجزیه مولفه‌های اصلی به عنوان یک تحلیل آماری چند متغیره، به منظور کاهش بُعد و استخراج ویژگی مجموعه داده‌ها می‌باشد [۳۱]. اساس روش تجزیه مولفه‌های اصلی بر دو مرحله کلی بنا نهاده شده است [۳۲]، در مرحله اول مدل‌سازی پایه از داده‌ها و در مرحله دوم فرآیند آسیب‌یابی انجام می‌گردد. در پژوهش حاضر، ماتریس ضرایب موجک از پردازش ماتریس بدست آمده از رابطه ۹ حاصل شد. بنابراین در مرحله اول، ماتریس [C] در رابطه ۱۳ به عنوان ماتریس ضرایب موجک تعریف شده و فرآیند مدل‌سازی پایه از داده‌ها انجام گردید.

$$[C] = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ماتریس مدل مرجع [C] حاوی اطلاعات کاملی از تغییرات سختی در طول گسترش ترک در دو نقطه از طول تیر می‌باشد و مرحله آسیب‌یابی در تجزیه مولفه‌های اصلی با نگاشت خطی داده‌های مدل مرجع از فضای بُعد اصلی به فضا با بُعد کمتر آغاز می‌شود.

$$[X] = [C][T] \quad (14)$$

در رابطه ۱۴، $[X]_{m \times n}$ ماتریس امتیاز و $[T]_{n \times n}$ ماتریس نگاشت نامیده می‌شود. ماتریس نگاشت از تجزیه ماتریس همبستگی^{۳۵} داده‌های مرجع به مقادیر و بردارهای استثنایی حاصل می‌گردد. لازم به ذکر است که ماتریس همبستگی بین چند متغیر برداری، ارتباط آن‌ها را با توجه به پراکندگی‌شان نسبت به میانگین نشان می‌دهد. در رابطه ۱۵ ماتریس همبستگی داده‌های مرجع با استفاده از روش تجزیه مقادیر منفرد برای بدست آوردن ماتریس نگاشت به m بردار و مقدار ویژه تجزیه شده است.

$$[C_{cov}]^T [C_{cov}] = [U][S][U]^T \quad (15)$$

$[C_{cov}]$ ، $[S]$ و $[U]$ در رابطه ۱۵ به ترتیب بیانگر ماتریس همبستگی، ماتریس مقادیر ویژه و بردارهای ویژه می‌باشند. مطابق تجزیه مولفه‌های اصلی، ستون‌های ماتریس بردارهای ویژه متناظر با مقادیر ویژه به صورت نزولی مرتب شده و بردارهایی که مقادیر ویژه بسیار بزرگ‌تری نسبت به سایر بردارها دارند، به عنوان مولفه‌های اصلی مدل مرجع نامیده می‌شوند. هر یک از بردارهای ویژه بدست آمده در توزیع داده‌های مرجع سهم مشارکتی دارند که بر اساس مقادیر ویژه متناظر مطابق رابطه ۱۶ محاسبه می‌گردد.

$$\eta_i = 100\% \cdot \left(\frac{\sigma_i}{\sum_{i=1}^m \sigma_i} \right) \quad (16)$$

در رابطه ۱۶، η_i سهم مشارکت بردار ویژه i ام از m بردار ویژه در توزیع داده‌های مدل مرجع می‌باشد. بنابراین بردارهای ویژه‌ای که بیشترین سهم مشارکت را دارند، به عنوان مولفه‌های اصلی انتخاب شده و سایر بردارها از دایره فرآیند آسیب‌یابی حذف می‌شوند.

³⁴ Cubic spline extrapolation
³⁵ Covariance

۴- نتایج و بحث

۴-۱- صحت‌سنجی مدل اجزا محدود

نتایج الگوریتم آسیب‌یابی پیشنهاد شده در این پژوهش بر اساس داده‌های بدست آمده از مدل اجزا محدود بررسی گردید. به منظور بررسی صحت مدل اجزا محدود مورد نظر از نتایج تحلیل فرکانسی تیر بتن‌آرمه و روابط تحلیلی در دینامیک سازه‌ها استفاده شد. بدین منظور ابتدا مدل اجزا محدود تیر مذکور تحلیل فرکانسی شده و فرکانس طبیعی اول آن با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل و دو سر گیردار بدست آمد. سپس فرکانس اول تیر دو سر مفصل و دو سر گیردار به ترتیب مطابق روابط ۱۷ و ۱۸ محاسبه گردید.

$$\omega_1 = \pi^2 \sqrt{\frac{E_c I}{mL^4}} \quad (17)$$

$$\omega_1 = 22.37 \sqrt{\frac{E_c I}{mL^4}} \quad (18)$$

در روابط فوق، E_c مدول الاستیسیته بتن، I گشتاور اینرسی مقطع که بر اساس مقطع نشان داده شده در شکل ۱ محاسبه شده، L طول تیر و m وزن واحد طول تیر می‌باشد. در جدول ۳ مقادیر فرکانس طبیعی اول تیر در حالت سالم با استفاده از روابط تحلیلی و مدل اجزا محدود آورده شده است. مطابق نتایج بدست آمده در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد که مقادیر فرکانس طبیعی اول بدست آمده از مدل اجزا محدود اختلاف ناچیزی با مقادیر بدست آمده از روابط تحلیلی دارد که بیانگر قابل اعتماد بودن نتایج بدست آمده از مدل اجزا محدود می‌باشد.

جدول ۳. مقادیر فرکانس طبیعی اول بدست آمده از روابط تحلیلی و مدل اجزا محدود تیر سالم

شرایط تکیه‌گاهی	فرکانس اول از روابط تحلیلی (هرتز)	فرکانس اول از مدل اجزا محدود (هرتز)	درصد اختلاف دو روش
تیر دو سر مفصل	۳۷/۷۸	۳۶/۶۶	۲/۹۶
تیر دو سر گیردار	۸۵/۶۳	۸۲/۲۳	۳/۹۸

۴-۲- بررسی نتایج پردازش سیگنال با تبدیل موجک

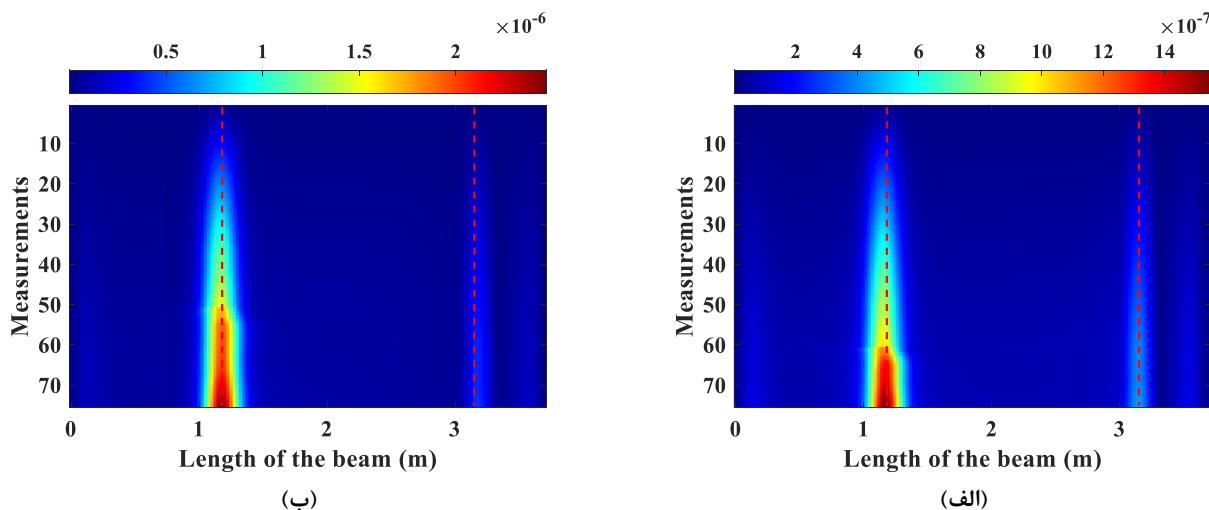
پس از احراز صحت مدل اجزا محدود، تیر بتن‌آرمه مورد بررسی مطابق شکل ۴ با شرایط تکیه‌گاهی دو سر گیردار و دو سر مفصل بارگذاری شده و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج بدست آمده از تحلیل به صورت پاسخ جابه‌جایی عضو از ۱۴۹ گره در ۷۵ گام مطابق رابطه ۹ در یک ماتریس 75×149 تنظیم گردید. پیش از پردازش پاسخ‌ها با تبدیل موجک، به منظور کاهش اثرات لبه در نقاط تکیه‌گاهی، هر کدام از آن‌ها با استفاده از تابع اسپیلاین مکعبی به تعداد ۴۰ نقاط داده به سمت بیرون از بازه طول تیر برونیابی شدند. سپس توابع بدست آمده با استفاده از تبدیل موجک پیوسته با تابع مادر مورلت مختلط پردازش گردیده و در نتیجه آن ضرایب موجک در ۵۰ مقیاس مختلف به صورت اعداد مختلط بدست آمد. ترتیب مقیاس‌ها در نتایج بدست آمده از تبدیل موجک از بزرگترین فرکانس به کوچکترین آن می‌باشد و وضوح افت سیگنال در اثر آسیب در فرکانس‌های بزرگتر با وضوح بیشتری بوده و رفته‌رفته کم‌رنگ‌تر می‌گردد. بنابراین در پژوهش حاضر، مقیاس با بزرگترین فرکانس برای اهداف آسیب‌یابی انتخاب شد. در شکل ۶ اندازه ضرایب موجک مختلط در تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل نشان داده شده است. در این شکل موقعیت ترک‌های مفروض با خط‌چین قرمز نمایش داده شده است. مطابق شکل ۶ ملاحظه می‌گردد که مقادیر اندازه ضرایب موجک در محل ترک‌ها رفته‌رفته در طول ۷۵ پاسخ افزایش یافته و مقادیر آن‌ها در موقعیت $0.32L$ بسیار بزرگتر از $0.185L$ می‌باشد. با توجه به اندازه ضرایب موجک در شکل ۶ مشاهده می‌گردد که ترک در موقعیت $0.32L$ با افزایش شدت بارگذاری شروع به رشد کرده اما در موقعیت $0.185L$ در ارتفاع اولیه ثابت باقی مانده است. به منظور بررسی بیشتر، کانتور توزیع ترک از مدل اجزا محدود در

موقعیت‌های مفروض استخراج شده و در شکل ۷ آورده شده است. مطابق شکل ۷ ترک تنها در موقعیت $0/32L$ در تیر دو سرگیردار و دو سر مفصل رشد کرده است.

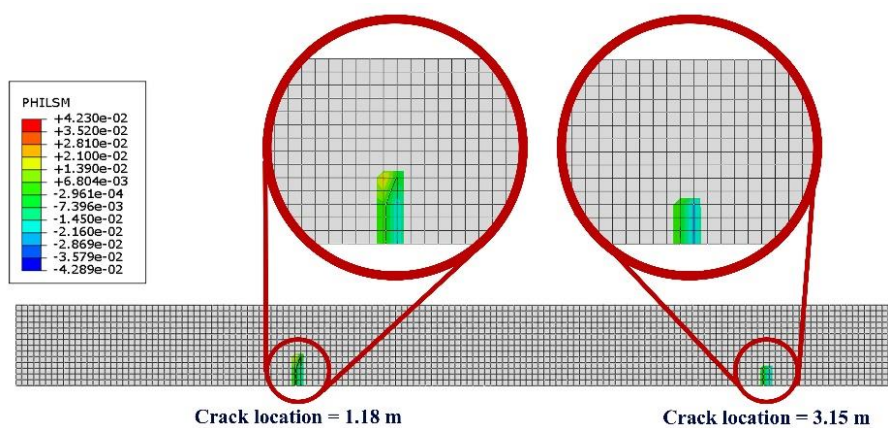
۴-۳- ارزیابی ضرایب موجک با تجزیه مولفه‌های اصلی

در این گام ضرایب موجک به عنوان داده‌های ورودی تجزیه مولفه‌های اصلی در نظر گرفته شد. در ابتدا ماتریس همبستگی ضرایب موجک محاسبه شده و سپس مطابق رابطه ۱۵ به مقادیر و بردارهای ویژه تجزیه گردید. سپس به منظور بررسی مشارکت هر یک از بردارهای ویژه بر فرآیند آسیب‌یابی، سهم مشارکت هر یک از آن‌ها بر اساس مقادیر ویژه متناظرشان مطابق رابطه ۱۶ محاسبه شد. در شکل ۸ میزان مشارکت هر یک از بردارهای ویژه در تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که تنها یک مولفه (بردار ویژه) بر فرآیند آسیب‌یابی موثر بوده و میزان مشارکت سایر مولفه‌ها صفر می‌باشد. بنابراین بردار ویژه متناظر با بیشترین مقدار ویژه برای ادامه روند آسیب‌یابی در تیر دو سر گیردار و دو سر مفصل انتخاب گردید. در شکل ۹ مقادیر حداکثر مولفه‌های بردار ویژه انتخاب شده، موقعیت ترک‌ها را در طول تیر با دقت خوبی نشان می‌دهد. در این شکل موقعیت ترک‌های مفروض با خط‌چین سیاه نشان داده شده است. شکل ۹ مقادیر حداکثر در مولفه‌های بردار ویژه انتخاب شده موقعیت ترک‌ها را در طول تیر با دقت خوبی نشان می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌گردد که مجدداً مقادیر مولفه‌های بدست آمده در موقعیت $0/32L$ بسیار بزرگتر از $0/85L$ می‌باشد که این امر حاکی از گسترش ترک در موقعیت $0/32L$ می‌باشد.

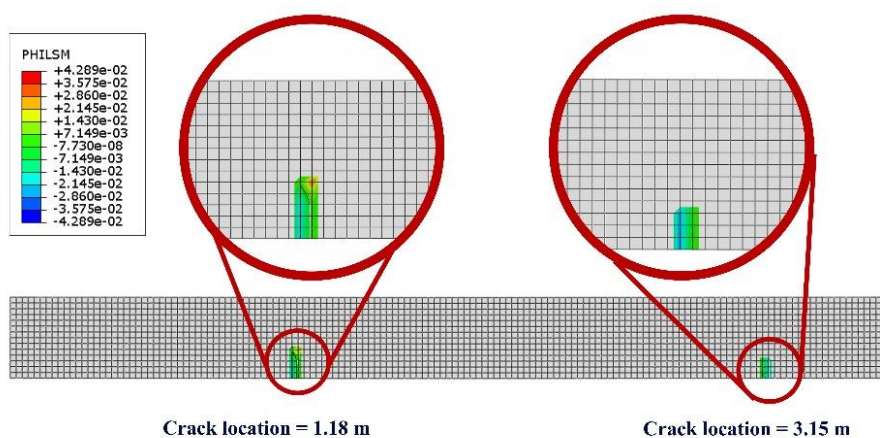
پس از انتخاب مولفه اصلی، مطابق رابطه ۱۴ ماتریس ضرایب موجک بر آن ضرب و به فضای جدید نگاشت داده شد. داده‌های بدست آمده در فضای جدید، امتیازات متناظر با مولفه‌های اصلی نامیده می‌شود. مقادیر امتیازات در تجزیه مولفه‌های اصلی بیانگر میزان شدت آسیب در هر یک از تیرهای دو سر گیردار و دو سر مفصل می‌باشد. در شکل ۱۰ مقادیر امتیازات متناظر با مولفه اصلی نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۰ ملاحظه می‌گردد که مقادیر امتیازات در طول ۷۵ سنجش در تیر دو سر مفصل با شیب بیشتری افزایش پیدا کرده است. بنابراین گسترش میزان سطح آسیب در تیر دو سر مفصل بیشتر از تیر دو سر گیردار می‌باشد.



شکل ۶. اندازه ضرایب موجک در تیر الف) دو سر گیردار و ب) دو سر مفصل

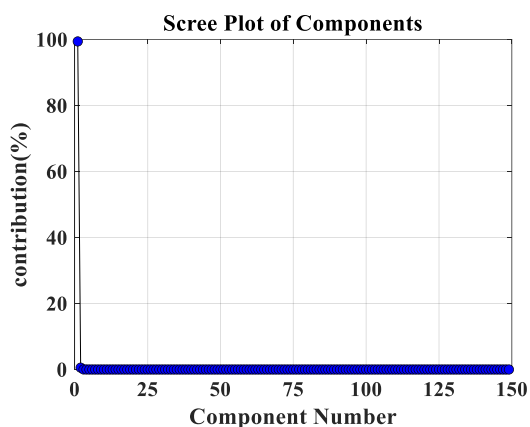


(الف)

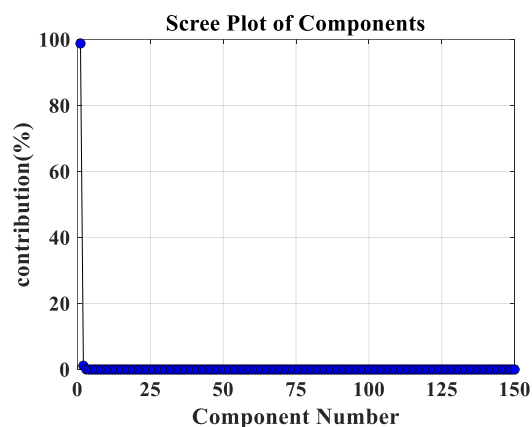


(ب)

شکل ۷. کانتور توزیع ترک در موقعیت‌های مفروض آسیب در تیر الف) دو سر گیردار و ب) دو سر مفصل

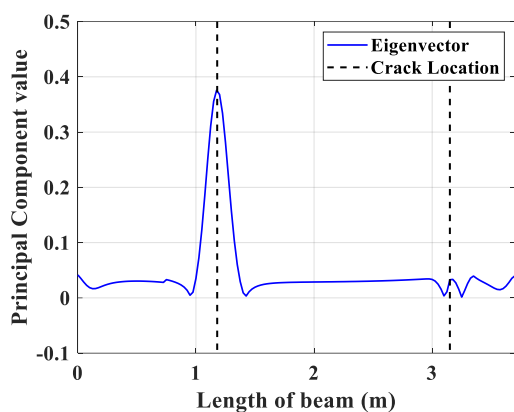


(ب)

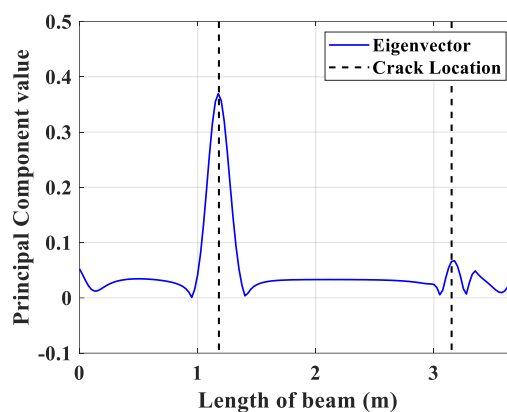


(الف)

شکل ۸. میزان مشارکت مولفه‌ها بر اساس مقادیر ویژه متناظرشان در تیر الف) دو سر گیردار و ب) دو سر مفصل

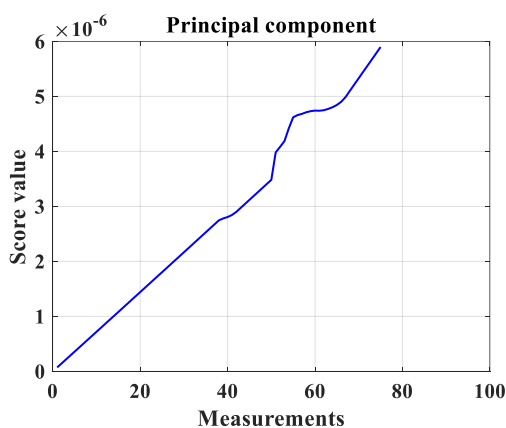


(ب)

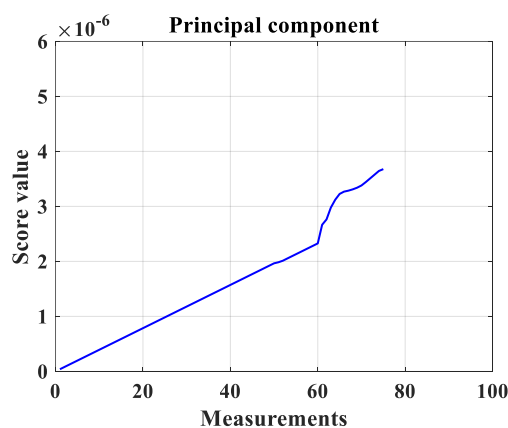


(الف)

شکل ۹. مولفه اصلی انتخاب شده در تیر الف) دو سر گیردار و ب) دو سر مفصل



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. مقادیر امتیازات متناظر با مولفه اصلی انتخاب شده در تیر الف) دو سر گیردار و ب) دو سر مفصل

۵- نتیجه گیری

هدف از پژوهش حاضر تشخیص و تعیین محل ترک‌ها در تیر بتن‌آرمه و بررسی گسترش آن‌ها در محل پیش‌بینی شده می‌باشد. بنابراین مدل اجزا محدود تیر بتن‌آرمه در نرم‌افزار ABAQUS مدل شده و ترک‌های گسترش‌یابنده در آن با استفاده از روش اجزا محدود توسعه یافته تعریف گردیدند. سپس عضو مدل شده تحت اثر بار گسترده یکنواخت شبه استاتیکی قرار گرفت و پاسخ آن به صورت جابه‌جایی در یک مسیر مستقیم از طول تیر در گام‌های متعدد زمانی استخراج شد. به منظور تعیین موقعیت آسیب در طول تیر و ارزیابی کیفیت آن، پاسخ‌های اخذ شده با استفاده از تبدیل موجک پردازش گردید. به منظور بررسی توزیع ضرایب موجک در سنجش‌های متعدد، ارزیابی شدت آسیب و کاهش حجم داده‌های مورد بررسی از تجزیه مولفه‌های اصلی استفاده شد. نتایج بدست آمده از الگوریتم آسیب‌یابی یاد شده به طور خلاصه در نکات ذیل قابل بیان است:

۱. ضرایب موجک در مقیاس‌های متعدد از پردازش سیگنال با تبدیل موجک پیوسته بدست آمدند. اندازه ضرایب موجک حاصل شده در مقیاسی که دارای بیشترین فرکانس بود، محدوده محل آسیب را در طول تیر نشان داد. تغییر اندازه ضرایب موجک در طول سنجش‌های متعدد حاکی از تغییر شدت آسیب در محل معین شده بود.

۲. با توجه به اینکه نتایج بدست آمده از تبدیل موجک پیوسته قادر به ارائه نتیجه شفاف و دقیق از محل آسیب و کیفیت آن نبود، از تجزیه مولفه‌های اصلی برای شناسایی الگوی ضرایب موجک و بررسی تغییرات در توزیع آن‌ها در طول روند ترک‌های گسترش‌یابنده استفاده گردید. نتایج نشان داد که مولفه اصلی در این گام از الگوریتم آسیب‌یابی، محل آسیب را با دقت قابل قبولی تشخیص می‌دهد و میزان شدت آن را برآورد می‌کند. همچنین در این روش، مقادیر مولفه‌های اصلی، ترک گسترش‌یابنده را از بین سایر آسیب‌ها تمییز داد.

۳. با توجه به دقت نتایج بدست آمده در این پژوهش، مشخص گردید که روش پیشنهاد شده در این پژوهش می‌تواند برای بررسی نقاط مستعد آسیب تحت اثر بارگذاری‌های مختلف در اعضای سازه‌های بزرگ مورد استفاده قرار گیرد.

در پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌گردد که اثرات محیطی از قبیل تغییرات دمایی بر پاسخ‌های بدست آمده از عضو مورد بررسی قرار گرفته و به ارزیابی تأثیر مقادیر نسبت توان سیگنال مزاحم به توان سیگنال اصلی در تابع ورودی تبدیل موجک پرداخته شود. همچنین پیشنهاد می‌گردد روش‌هایی برای انتخاب نوع تابع موجک مادر و مقیاس مناسبی از ضرایب آن جهت ارائه الگوی مشهودتری از آسیب بررسی گردد.

مراجع

- [1] Farrar, C.R., Baker, W.E., Bell, T.M., Cone, K.M., Darling, T.W., Duffey, T.A., Eklund, A. and Migliori, A. (1994). *Dynamic characterization and damage detection in the I-40 bridge over the Rio Grande*. NM (United States): Los Alamos National Lab.
- [2] Jedari Zarezadeh, F., Farzam, M. and Dadashzadeh, M. (2022). Wavelet-based analysis of dynamic response for damage localization in reinforced concrete beams using machine learning. In: 6th International Conference on Structural Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.
- [3] Giordano, P.F., Quqa, S. and Limongelli, M.P. (2023). The value of monitoring a structural health monitoring system. *Structural Safety*, 100, 102280.
- [4] Hatt, W.K. (1907). *Notes on the effect of time element in loading reinforced concrete beams*. Proc. ASTM, 7, 421-433.
- [5] Li, H.U., Li, S.H., Ou, J. and Li, H.O. (2009). Modal identification of bridges under varying environmental conditions: Temperature and wind effects. *Structural Control and Health Monitoring*, 17(5), 495-512.
- [6] Farrar, C.R. and Jauregui, D. (1998). Comparative study of damage identification algorithms applied to a bridge: I. Experiment. *Smart Material and Structures*, 7(5), 704-719.
- [7] Teimouri, H., Davoodi, M.R. and Mostafavian, S.A. (2018). Detecting damage location and severity in a double layer grid using modal strain energy method and data fusion. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 7(3), 35-54.
- [8] Samaei, S.R. and Ghodsi Hassanabad, M. (2022). Damage location and intensity detection in tripod jacket substructure of wind turbine using improved modal strain energy and genetic algorithm. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(4), 182-202.
- [9] Liew, K.M. and Wang, Q. (1998). Application of Wavelet Theory for Crack Identification in Structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 7, 124-152.
- [10] Chang, C. and Chen, L. (2003). Vibration damage detection of a Timoshenko beam by spatial wavelet-based approach. *Applied Acoustics*, 64, 1217-1240.
- [11] Rucka, M. and Wilde, K. (2006). Application of continuous wavelet transform in vibration-based damage detection method for beams and plates. *Journal of Sound and Vibration*, 297, 536-550.
- [12] Shahsavari, V., Chouinard, L. and Bastien, J. (2017). Wavelet-based analysis of mode shapes for statistical detection and localization of damage in beams using likelihood ratio test. *Engineering Structures*, 132, 494-507.
- [13] Alvandi, A., Bastien, J., Gregoire, E. and Jolin, M. (2009). Bridge integrity assessment by continuous wavelet transforms. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 9(1): 11-43.
- [14] Messina, A. (2008). Refinements of damage detection methods based on wavelet analysis of dynamical shapes. *International Journal of Solids and Structures*, 45, 4068-4097.

- [15] Tjirkallis, A. and Kyprianou, A. (2016). Damage detection under varying environmental and operational conditions using Wavelet Transform Modulus Maxima decay lines similarity. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 66-67, 282-297.
- [16] Yan, A.M., Kerschen, G., Boe, P.D. and Golinval, J.C. (2005). Structural damage diagnosis under varying environmental conditions-Part I: A linear analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19, 847- 864.
- [17] Bellino, A., Fasana, A., Garibaldi, L. and Marchesi Ello, S. (2010). PCA-based detection of damage in time-varying systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24, 2250-2260.
- [18] Ganjdoust, F., Kefal, A. and Tessler, A. (2023). A novel delamination damage detection strategy based on inverse finite element method for structural health monitoring of composite structures. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 192, 110202.
- [19] Jahangiri, M. and Ahmadi Nedushan B. (2017). Performance Investigation of Metaheuristic Niched-Pareto Genetic Algorithm for Imperfection Assessment of Structures. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 5(4), 179-194.
- [20] Singh, P., Ansu, A.K. and Kumari, P. (2022). Finite element modelling and analysis of damage detection in concrete beams using piezoelectric patches. *Materialstudy: Proceedings*, 63, 520-526.
- [21] Ehsani, R. and Zibaei Aliabad, R. (2022). Numerical study of progressive failure mechanism in steel frames with CFST columns. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 9(1), 54-76.
- [22] Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. and Jensen, J.J. (1987). *Mechanical properties of high-strength concrete and application in design*. Proceedings of the Symposium on Utilization of High-Strength Concrete. Tapir, Trondheim, Norway. 149-159.
- [23] Babuska, I. and Melenk, J.M. (1997). The Partition of Unity Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 40, 4, 727-758.
- [24] Dassault-Systems (2012). *Abaqus Analysis User's Guide 6.13*, U.S.A.
- [25] Rybicki, E.F. and Kanninen, M.F. (1977). A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. *Engineering Fracture Mechanics*, 9(4), 931-938.
- [26] Reddiar, M.K.M. (2009). *Stress-Strain model of unconfined and confined concrete and stress block parameters*. M.S. Thesis. Publication Series of the Office of Texas A&M University.
- [27] Akansu, A. and Haddad, R.A. (2001). *Multiresolution Signal Decomposition*. Second edition. Cambridge, Massachusetts, Academic Press, 391-442.
- [28] Nourani, V., Dadashzadeh, M., Eslamian, S. (2022). *Application of Integral Transforms in Flood Studies*. In Eslamian S, Eslamian F (Ed.). *Flood Handbook: Analysis and Modeling*. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [29] Bussow, R. (2007). An algorithm for the continuous Morlet wavelet transform. *Mechanical system and signal processing*, 21, 2970-2979.
- [30] Montanari, L., Spagnoli, A., Basu, B. and Broderick, B. (2015). On the effect of spatial sampling in damage detection of cracked beams by continuous wavelet transform. *Journal of Sound and Vibration*, 345, 233-249.
- [31] Mardia, K.V., Kent, J.T. and Bibby, J.M. (2003). *Multivariate Analysis*, London: Academic Press.
- [32] Lu, S., Jiang, M., Wang, X. and Yu, H. (2019). Damage detection method of CFRP structure based on fiber Bragg grating and principal component analysis, *Optik*: 178, 858-867.