

روش تشخیص خرابی نوین با استفاده از تغییرات در شکل انحناى مودى با وجود نوفه برداشت اطلاعات و آسیب های جزئی

مسعود ذبیحی سامانی^{۱*}، محمد قانونی بقا^۲

۱-استادیار گروه آموزشی سازه، دانشکده فنی مهندسی، واحد پرند، دانشگاه آزاد اسلامی، پرند، ایران

۲-استادیار گروه آموزشی سازه، دانشکده فنی مهندسی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

چکیده

با افزایش جمعیت جهانی، تخریب و بازسازی سازه های قدیمی قبل از بررسی میزان خرابی موجود، به هیچ عنوان مقرون به صرفه نمی باشد. در چندسال اخیر روش های تشخیص خرابی مبتنی بر نوسان معرفی شدند. از میان روش های مبتنی بر نوسان روش های حوزه ی مودال به دلیل سادگی در عملکرد مورد توجه عمده ی محققین بوده است. از جمله ی جدیدترین این روش ها، روش انحناى شکل مودى می باشد که توانایی ذاتی این روش در شناسایی و مکان یابی آسیب بر همگان آشکار می باشد. در این پژوهش، روش جدید تشخیص خرابی بر مبنای اجزا محدود با در نظر گرفتن انحناى شکل مودى و اثرات نوفه حاصل از برداشت اطلاعات، توسعه داده شده است. دقت روش شناسایی خرابی پیشنهادی با نتایج آزمایشگاهی و عددی تحقیقات اخیر به مورد تایید گرفته است. در روش پیشنهادی، به منظور کاهش زمان تحلیل و حفظ حداقل دقت مورد نیاز، آنالیز حساسیت تعداد المان های مورد استفاده در اجزا محدود برای شناسایی دقت آسیب صورت گرفته است. درصد نوفه در هنگام برداشت اطلاعات باعث به وجود آمدن خطای زیادی در امر شناسایی آسیب در روش های سنتی می گردد. به همین در این تحقیق، روش شاخص آسیب به منظور افزایش دقت به صورت توام با روش انحناى شکل مودى به کار گرفته شده است. نتایج مدلسازی تطابق بسیار خوبی با نتایج آزمایشگاهی داشته و نشان از دقت بالای روش مورد نظر در شناسایی آسیب های دارد. روش تشخیص خرابی پیشنهادی در سناریوهای مختلف آسیب با شدت پایین و درصد نوفه بالا در اطلاعات ورودی مورد بررسی قرار گرفت، که در روش های دیگر تشخیص خرابی توانایی شناسایی آسیب با دقت بالایی را ندارد. نتایج حاکی از آن است که روش تشخیص خرابی پیشنهادی با شناسایی آسیب در مودهای بالاتر توانایی شناسایی خرابی های جزئی با درصد نوفه بالا را دارد.

کلمات کلیدی: پایش سلامتی سازه ها، مکان یابی آسیب، انحناى شکل مودى، شاخص آسیب، نوفه.

سابقه مقاله:

شناسه دیجیتال:

10.22065/jsce.2018.126372.1509	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/jsce.2018.126372.1509	۱۳۹۸/۰۶/۱۰	1397/۰۵/۱۶	1397/۰۶/۱۱	۱۳۹۷/۰۴/۱۸	۱۳۹۷/۰۱/۲۲

مسعود ذبیحی سامانی

*نویسنده مسئول:

zabih@piaou.ac.ir

پست الکترونیکی:

A new damage detection method using curvature mode shapes with considering the noise of the data transmission and minor damages

Masoud Zabihi-Samani^{1*}, Mohammad Ghanooni-Bagha²

1- Assistant professor of Structural engineering. Department of Civil Engineering, Parand Branch, Islamic Azad University, Parand, Iran

2- Assistant professor of Structural engineering. Department of Civil Engineering, Tehran-East Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

With the increasing global population in recent decades and the increasing number of construction projects in the world, researchers and scientists from various sciences are thinking about restoration of civil engineering structures, which has reached to useful life of many of these structures. The failure of part of these structures leads to the destruction of the entire structure, which results in the wasting of large amounts of capital from owners and owners of these structures. Destruction and rebuilding of such structures are not at all cost-effective. Therefore, the science of health monitoring of structures in order to solve these problems has attracted researchers in recent years. So far, various methods, including X-rays and ... have been used to find the damaged member, but these methods can only be used on members of the structure that is available. And they are not comprehensive for the whole structure. For this purpose, vibration-based methods were introduced. Among the vibration-based methods, modal field methods have been of major interest to the researchers for their simplicity in performance. One of these methods is the mode shape curvature method, whose intrinsic ability to detect and locate damage is obvious to everyone. In this study, taking into account the noise generated by the mode shape data acquisition, more careful attention is needed in the field of damage detection. For this reason, the damage index was used as an indicator of the damage. The results indicate high accuracy of the method in identifying low-intensity damage and high noise level in higher modes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 11 April 2018

Revise Date: 09 July 2018

Accept Date: 02 September 2018

Keywords:

Structure health monitoring

Locating the damage

Mode shape curvature

Damage index

Noise

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2018.126372.1509

*Corresponding author: Masoud Zabihi-Samani.

Email address: zabihi@pia.ac.ir

۱- مقدمه

با افزایش جمعیت و در نتیجه افزایش سازه‌های عمرانی در سطح جهان، بسیاری از این سازه‌ها عمر مفید خود را گذرانده و یا در وضعیت نامعلومی از نظر سلامت هستند. سیستم‌های سازه‌ای در طول عمر بهره‌برداری خود، بارها و یا آسیب‌هایی را متحمل می‌شوند که باعث کاهش و یا تردید در عملکرد آن‌ها می‌گردد. همچنین این سازه‌ها در معرض عوامل طبیعی یا غیرطبیعی می‌باشند که می‌تواند آسیب‌های موضعی موجود را تشدید کرده و باعث انهدام ناگهانی آن‌ها و در نتیجه پیامدهای ناگوار مالی و جانی شود. این موضوع روی عملکرد سازه تاثیر گذاشته و امنیت سازه را تحت الشعاع قرار می‌دهد. لذا پایش سلامت سازه‌ها و شناسایی آسیب در مراحل اولیه ایجاد خرابی و اقدام به موقع در این مرحله، افزایش اطمینان به سازه از نظر امنیت و کاهش هزینه‌ها را به دنبال دارد. در حال حاضر یکی از روش‌های کارآمد در شناسایی آسیب در سازه، سیستم‌های پایش سلامت سازه می‌باشد. سیستم پایش سلامت همچون سیستم عصبی در بدن انسان، قادر است تا عضو آسیب‌دیده در سازه را شناسایی و مکان‌یابی کند. یک سازه مدرن ضمن اینکه باید قادر به تولید اطلاعات واقعی مربوط به تغییرات وضعیت سلامت سازه‌ی خودش باشد، باید بتواند با اپراتور مسئول و سازندگانش به موقع و به صورت خودکار یا بر حسب تقاضا ارتباط برقرار کند. همانطور که انسان در طول عمر خود دچار بیماری‌ها و عوارضی می‌گردد، بدن می‌تواند علائم این بیماری را از طریق شبکه‌های عصبی به مغز منتقل کند و شخص از طریق سیستم صوتی (دهان) این علائم را بازگو کند، برای رسیدن به چنین هدفی، سازه‌ی مدرن باید به "شبکه‌ی عصبی" و "مغز" و "خطوط صوتی" که به طور مداوم در حال عمل و قادر به حس شرایط سازه‌ای هستند، مجهز باشد. این سیستم باید قادر به شناسایی خودکار آسیب و مشخصات آن بوده و آنها را گزارش نماید. اطلاعات گزارش شده از این برنامه‌ی نظارت می‌تواند در عملیات بهینه‌سازی، نگهداری، تعمیر و جایگزینی ساختار معیوب بر اساس داده‌های واقعی استفاده گردد. این نوع از سیستم، سیستم پایش سلامتی سازه نامیده می‌شود [۱]. با کمک سیستم پایش سلامت سازه می‌توان به صورت لحظه به لحظه از سلامت و عملکرد صحیح سازه اطمینان حاصل کرد و در صورت آسیب احتمالی به سرعت اقدام به بازسازی نمود. همچنین در زمان وقوع حوادث، نقاط امن سازه جهت پناه گرفتن شناسایی می‌گردد. این روش از تکنولوژی بازرسی غیر مخرب برخوردار است و در هر زمان با استفاده از حسگرها سازه را مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌دهد [۲]. پایش سلامت سازه از تخریب سازه‌ها به خصوص سازه‌های با اهمیتی نظیر هواپیما، پل‌ها و سد‌ها جلوگیری می‌کند. با یک سیستم پایش سلامت سازه‌ای رفتارهای غیر عادی سازه در مراحل اول خرابی قابل شناسایی هستند و شناسایی این رفتارها باعث کاهش ریسک خرابی ناگهانی، نجات جان انسان‌ها و جلوگیری از آسیب‌های زیست‌محیطی می‌گردد [۱]. در سالیان اخیر روش‌های شناسایی آسیب با پیشرفت‌های قابل توجهی همراه بوده است. از جمله مهمترین مراحل پایش سلامت سازه‌ها، شناسایی، مکان‌یابی محل و میزان آسیب‌ها قبل از بازسازی آن‌هاست. در حال حاضر سیستم پایش سلامت در سازه‌های مهم عمرانی چون ساختمان‌ها، پل‌ها، و... در دنیا مورد بهره‌برداری است. این علم با استفاده از روش‌های گوناگونی قابل پیاده‌سازی می‌باشد که هر روش متناسب با نوع پروژه، نرم افزارها یا سخت افزارهای مرتبط با خود را نیاز دارد. تاکنون روش‌های اشعه‌ی ایکس، اولتراسونیک و ... مورد استفاده قرار گرفته‌اند، اما این روش‌ها تنها توانایی شناسایی آسیب به صورت موضعی را داشته و نمی‌توانند بر روی تمام اعضای سازه به کار گرفته شود. به همین دلیل روش‌های مبتنی بر لرزش گسترش یافتند. از میان روش‌های مبتنی بر لرزش، روش مبتنی بر اشکال مودال از سوی جامعه‌ی محققین توجه فزاینده‌ای را به سوی خود جلب کرده است. اما جابجایی شکل مودی به تنهایی حتی با اندازه‌گیری شکل مودی با چگالی بالا برای آسیب‌های کوچک حساس نمی‌باشد. در تحقیقات بعدی، به منظور افزایش حساسیت شکل مودی نسبت به آسیب، انحنای اشکال مودال که مشتق دوم جابجایی شکل مودی می‌باشد، معرفی شد [۳].

پژوهش‌های تکمیلی نشان دادند که استفاده مستقیم از تفاوت انحنای اشکال مودی سازه سالم و آسیب‌دیده می‌تواند شاخص خوبی برای نشان دادن محل آسیب باشد. برای مودهای بالاتر، تفاوت در انحنای مودال در چندین نقطه‌ی اوج به تنهایی شاخص مناسبی برای نشان دادن محل آسیب دیده نمی‌باشد. از این رو به منظور کاهش اشتباهات، تنها چند انحنای اشکال مودال اول می‌توانند برای شناسایی آسیب مورد استفاده قرار گیرند. برای مرتفع کردن این اشکال، گانجولی و همکاران [۴] و همچنین یانگ و همکاران [۵] با استفاده از ضرایب فوریه و تبدیل فضایی فوریه توانستند محل دقیق آسیب در تیرهای طره‌ای را در مودهای بالاتر نشان دهند. به منظور تلاشی برای افزایش دقت استفاده از تبدیل فضایی فوریه در اعداد موج بالاتر یانگ و همکاران [۶] از اعداد موج بزرگنمایی شده برای بدست

آوردن تبدیل فوریه استفاده کردند. سالوو و ویلیامز [۷] کارایی دو روش انحنای و جابجایی اشکال مودال را برای مکان‌یابی آسیب مقایسه کردند و MSC را به عنوان یک شاخص خرابی حساس تایید کردند. با این حال حساسیت و موثر بودن روش MSC توسط بسیاری از محققان مورد سوال بود و با آزمایش‌های متعدد نشان دادند که انحنای مودال به تنهایی قادر به مکان‌یابی آسیب‌های کوچک نمی‌باشد. نتایج نشان داد، یک مش‌بندی مناسب برای مشتق‌گیری درست از انحنای مودال در مودهای بالاتر مورد نیاز است. علاوه بر این، اولین مود بیشترین انحنای مورد اطمینان را در استفاده‌های کاربردی به دلیل تعداد کم سنسور مورد نیاز، فراهم می‌کند. در این پژوهش با در نظر گرفتن عامل نوفه، شناسایی آسیب به میزان زیادی با اختلال مواجه گردید. اویجوار و همکاران [۸] از شاخص آسیب انرژی کرنشی مودال و سپس نرمال سازی این شاخص با توجه به رویکرد فرض آماری همانند انحنای شکل مودال است استفاده کردند. رویکرد فرض آماری شامل اندازه گیری های نوسان، به منظور شاخص آسیب در سازه های مرکب یک بعدی و دو بعدی استفاده می گردد. نتایج نشان داد، این روش توانایی شناسایی، مکان‌یابی و همچنین تقریب میزان آسیب را داشته، اگرچه این روش تحت تاثیر طراحی سازه و همچنین مکان آسیب است و ضروری است که مکانیسم شکست آن از قبل مشخص شده باشد. دوراکوسکی و همکاران [۹] از همبستگی تصویر دیجیتال برای ایجاد منحنی تغییر شکل تیر طره‌ای استفاده کردند. پس از ایجاد آسیب، منحنی‌ها به کمک دو خط تراز شده و زاویه بین دو قسمت به صورت شاخص آسیب نشان داده می‌شود. دینکال و همکاران [۱۰] برای سازه‌های تیر مانند روشی برای شناسایی آسیب به کمک استفاده از تئوری اولر-برنولی ارائه کردند. این روش بر مبنای ثابت ماندن تنش‌های داخلی در سازه، قبل و بعد از آسیب است. شاخص آسیب به صورت نسبت سختی خمشی سازه در حالت سالم و آسیب‌دیده بدست. این الگوریتم با استفاده از تیر طره‌ای صحت‌سنجی شد و مکان، مقدار و شدت آن بدون خطای قابل توجه بدست آمد. کیم و همکاران [۱۱] الگوریتم شاخص آسیبی را برای تخمین میزان آسیب به کمک تغییر در انرژی کرنشی مودال ارائه نمودند. پس از آن روش حساسیت تغییرات شکل مودی در جرم یا سختی سازه به منظور ارزیابی و مکان‌یابی آسیب توسط پارلو و همکاران [۱۲] مورد استفاده قرار گرفت.

با توجه به مقدمه‌ی ذکر شده، روش انحنای شکل مودی روشی دقیق به منظور مکان‌یابی آسیب متداول بوده اما وجود ۱ تا ۵ درصد نوفه در هنگام برداشت اطلاعات باعث به وجود آمدن خطای زیادی در امر شناسایی آسیب می‌گردد. به همین در این تحقیق، روش شاخص آسیب به منظور افزایش دقت به صورت توأم با روش انحنای شکل مودی به کار گرفته شده است. ترکیب این دو روش بر روی تیر طره‌ای به منظور شناسایی و مکان‌یابی آسیب گسترش داده شد. همچنین اثرات شدت آسیب و درصد نوفه در مودهای مختلف نوسانی بررسی شد. نتایج با دقت مناسب با نتایج آزمایشگاهی تطابق دارد. بررسی های تکمیلی نشان دادند، روش تشخیص خرابی ارائه شده در این مقاله با استفاده از مودهای نوسانی بالاتر و افزایش دقت توانایی شناسایی آسیب هایی را در محیط با نوفه دارد که روش های دیگر در شناسایی آن مشکل دارند.

۲- فرضیات تحقیق

در این روش با کمک حل معادله دیفرانسیل با کمک روش اجزا محدود، فرکانس‌های طبیعی سازه‌ی مورد نظر بدست می‌آید [۱۲]. سپس با استفاده از فرکانس‌های طبیعی، شکل مودی تیر طره با اعمال شرایط مرزی مرتبط با آن بدست می‌آید. رابطه‌ی کلی جابجایی تیر اولر برنولی از رابطه‌ی (۱) قابل برداشت می‌باشد [۱۳]:

$$EI(x) \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + m(x) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} = f(x,t) \quad 0 \leq x \leq L \quad (1)$$

$$EI(x) = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & 6 \times le & -12 & 6 \times le \\ 6 \times le & 4 \times le^2 & -6 \times le & 2 \times le^2 \\ -12 & -6 \times le & 12 & -6 \times le \\ 6 \times le & 2 \times le^2 & -6 \times le & 4 \times le^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$M(x) = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22 \times le & 54 & -13 \times le \\ 22 \times le & 4 \times le^2 & -3 \times le^2 & -3 \times le^2 \\ 54 & 13 \times le & 156 & -22 \times le \\ -13 \times le & -3 \times le^2 & -22 \times le & 4 \times le^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن، $m(x)$ ماتریس جرم و $EI(x)$ ماتریس سختی المان هستند که به ترتیب از روابط (۲) و (۳) بدست می‌آیند. در روابط ماتریس جرم و سختی مقادیر A مساحت سطح مقطع، L طول تیر ρ چگالی تیر و le طول المان محدود می‌باشد. همچنین با فرض کاهش سختی به منظور وارد کردن آسیب به سازه، مقدار $EI(x)$ در المان آسیب‌دیده به توجه به درصد کاهش سختی، کاهش می‌یابد. به منظور محاسبه‌ی فرکانس‌ها و شکل‌های مودی با قرار دادن مقدار $f(x,t)$ برابر صفر و مقدار $w(x,t)$ به عنوان، $w(x,t) = W(x)e^{i\omega t}$ معادله‌ی (۱) به فرم زیر ساده می‌شود:

$$\frac{d^4 W}{dx^4} - \omega^2 \frac{m}{EI} W = 0 \quad (4)$$

برای حل معادله‌ی (۴) ابتدا باید شرایط مرزی مربوط به تیر طره اعمال گردد. برای انتهای گیردار:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = 0 \quad \text{و} \quad w = 0 \quad (5)$$

برای انتهای آزاد

$$\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad \text{و} \quad \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} = 0 \quad (6)$$

سپس معادله $f(x,t)=0$ را به صورت ضرب دو تابع مستقل $v(x,t)=W(x).T(t)$ در نظر گرفته می‌شود.

$$\frac{d^4 T(t)}{dt^4} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{d^4 W(x)}{dx^4} - \gamma^4 W(x) = 0 \quad (7)$$

که در آن، ω فرکانس طبیعی و پارامتر γ در رابطه‌ی فوق به مقدار ω وابسته است و از رابطه‌ی (۸) محاسبه می‌گردد.

$$\lambda_i^4 = \frac{\rho A \omega_i^4}{EI} \quad (8)$$

رابطه‌ی $\Phi_i(x)$ بصورت زیر تعریف می‌گردد.

$$\Phi_i(x) = C_1 \sin(\gamma x) + C_2 \cos(\gamma x) + C_3 \sinh(\gamma x) + C_4 \cosh(\gamma x) \quad (9)$$

۱.۲.۳.۴. C_i ضرایب ثابت مربوطه می‌باشند. با سه بار مشتق گیری از رابطه‌ی (۹) و اعمال شرایط مرزی مقادیر فرکانس‌های طبیعی و اشکال مودی بدست می‌آید که مقدار فرکانس طبیعی برای هر مود نوسانی از رابطه‌ی (۱۰) قابل محاسبه است

$$\omega_i = \frac{(\lambda L)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}} \quad (10)$$

همچنین شکل مودی هر المان از رابطه‌ی (۱۱) قابل محاسبه است.

$$\Phi_i(x) = \left[(\cosh(\lambda_i x) - \cos(\lambda_i x)) + \frac{\cos(\lambda_i x) + \cosh(\lambda_i x)}{\sin(\lambda_i x) + \sinh(\lambda_i x)} \times (\sin(\lambda_i x) - \sinh(\lambda_i x)) \right] \quad (11)$$

که در آن، i شماره مود است. با توجه به در نظر گرفتن n مود نوسانی و m المان محدود، حاصل رابطه‌ی فوق یک ماتریس m در n می‌باشد. به منظور اعمال شرایط محیطی مانند نوبه، مقادیر ماتریس Φ به کمک رابطه‌ی (۱۲) اصلاح می‌گردد.

$$\Phi_{\text{damaged}} = \Phi_{\text{damaged}} + \alpha \text{rand}() \quad (12)$$

که در آن تابع $\text{rand}()$ برای تولید اعداد تصادفی در نرم افزار متلب و α ضریب نوبه است که توسط کاربر به صورت فرضی بین ۰ تا ۰/۰۱ (حداکثر ۱ درصد نوبه) قابل تغییر است. با توجه به مطالب ذکر شده در مقدمه جابجایی شکل مودی به تنهایی برای مکان‌یابی آسیب کاربردی نمی‌باشد، در نتیجه در روش پیشنهادی میبایست انحنای که مشتق دوم شکل مودی می‌باشد با کمک تقریب روش تفاوت مرکزی طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌گردد. کاربرد این روش بعلاوه سرعت مناسب آن می‌باشد [۱۳، ۱۴].

$$k_i = (w_{i+1} + w_{i-1} - 2w_i)/h^2 \quad (13)$$

که در آن w جابجایی مودال در نقطه‌ی i ام و h طول المان اجزا محدود می‌باشد. با توجه به وجود نوبه در برداشت اطلاعات در مسائل واقعی، همواره وجود روشی دقیق مورد نیاز است. برخی از مراجع، وجود ۱ تا ۵ درصد نوبه را مشکلی بزرگ در امر شناسایی آسیب به خصوص در مودهای با شماره‌ی کمتر بیان نموده‌اند، از این رو شاخص آسیب با بزرگنمایی محل آسیب، مقدار آسیب را با حداکثر مقدار α ، در نمودار شناسایی آسیب در هر مود نوسانی نمایان می‌سازد.

$$DI_{iMSC}^n = |(k_{dam}^n)_i - (k_{int}^n)_i| \quad (14)$$

که در آن k_{int}^n نشان‌دهنده انحنای در حالت اولیه بوده، k_{dam}^n نشان‌دهنده انحنای در حالت آسیب‌دیده است، i شماره المان، w_n شکل مودی، و n شماره‌ی مود می‌باشد. در انتها به منظور شاخص شدن آسیب در نمودار، مقادیر شاخص آسیب با استفاده از رابطه‌ی (۱۵) اصلاح می‌شوند.

$$DI_{iMSC}^n = DI_{iMSC}^n / \text{Max}(DI_{iMSC}^n) \quad (15)$$

۳- مدل سازی عددی

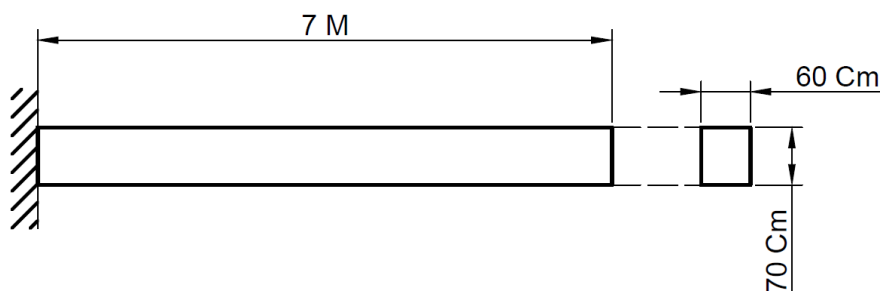
روش شناسایی آسیب پیشنهادی این مقاله بر روی مدل اجزاء محدود تیر طره‌ای همانند شکل (۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. به منظور افزایش دقت آنالیز مودال در این تیر، تعداد ۱۰۰ المان اجزاء محدود در طول ۷ متر تیر ایجاد شد. این تعداد المان بر مبنای آنالیز حساسیت بین زمان تحلیل و دقت شناسایی آسیب انتخاب شده است. به منظور آنالیز حساسیت، مدل در نظر گرفته شده با تعداد ۱۰ و ۵۰ و ۱۰۰ و ۱۵۰ المان محدود بررسی گردیده و نتایج در جدول (۱) نشان داده شد. برای مقایسه فرکانس‌های طبیعی تیر سالم را برای ۶ مود در نظر گرفته شده با این تعداد المان بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد، فرکانس طبیعی در مدهای بالاتر به شدت وابسته به تعداد المان بوده به طوری که با افزایش تعداد المان، فرکانس طبیعی محاسبه شده در مدهای بالاتر با دقت بیشتری محاسبه می‌گردد. مقدار خطای محاسبات با ۱۰۰ المان در مقایسه با ۱۵۰ المان ناچیز شده است ولی این خطا در ۵۰ المان، برای مود ششم نوسانی برابر ۱٫۵ درصد می‌باشد. این مقدار عدم دقت، خطای زیادی را شامل می‌گردد زیرا برای عدم توانایی روش پیشنهادی در مکان‌یابی آسیب تنها ۱ تا ۵ درصد نوفه کفایت ۱٫۵ درصد خطا مقدار زیادی را شامل می‌گردد. از طرف دیگر، در نظر گرفتن بیش از ۱۰۰ المان نیز تنها روند محاسباتی را بیشتر کرده که این نیز امری غیر قابل قبول است. بنابراین تعداد ۱۰۰ المان، مقداری قابل قبول و دقیق می‌باشد.

جدول ۱: آنالیز حساسیت مش بندی

		فرکانس‌های طبیعی			
		تیر با ۱۰ المان	تیر با ۵۰ المان	تیر با ۱۰۰ المان	تیر با ۱۵۰ المان
مدهای نوسانی	مود اول	۱۱/۶۰	۱۱/۶۴	۱۱/۶۴	۱۱/۶۴
	مود دوم	۷۳/۴۸	۷۲/۹۸	۷۲/۹۵	۷۲/۹۵
	مود سوم	۲۱۲/۰۳	۲۰۴/۶۲	۲۰۴/۲۷	۲۰۴/۲۷
	مود چهارم	۴۳۴/۹۸	۴۰۱/۹۳	۴۰۰/۲۸	۴۰۰/۲۰
	مود پنجم	۷۵۷/۶۸	۶۶۶/۴۵	۶۶۱/۷۰	۶۶۱/۵۹
	مود ششم	۱۱۸۶/۰۵	۱۰۰۰/۱۴	۹۸۸/۴۶	۹۸۸/۱۸

آسیب در نظر گرفته شده، به صورت کاهش سختی مدلسازی شده، مقدار سختی خمشی (EI) در المان مورد نظر مدل شد. این

مدل کاهش سختی معیار مناسبی در تحقیقات اخیر است [۱۵]. در مدل مورد بحث، مقدار مدول الاستیسته تیر $\frac{N}{M^2} \times 10^9 \times 200$ ، طول کل تیر ۷ متر و مقطع تیر دارای ارتفاع ۷۰ و عرض ۶۰ سانتیمتر می‌باشد. المان‌های تیر با یکدیگر به صورت گیردار متصل هستند. آنالیز مودال تیر مذکور توسط کد نویسی در فضای MATLAB با استفاده از تئوری اولر- برنولی انجام گشت.



شکل ۱: مدل تیر

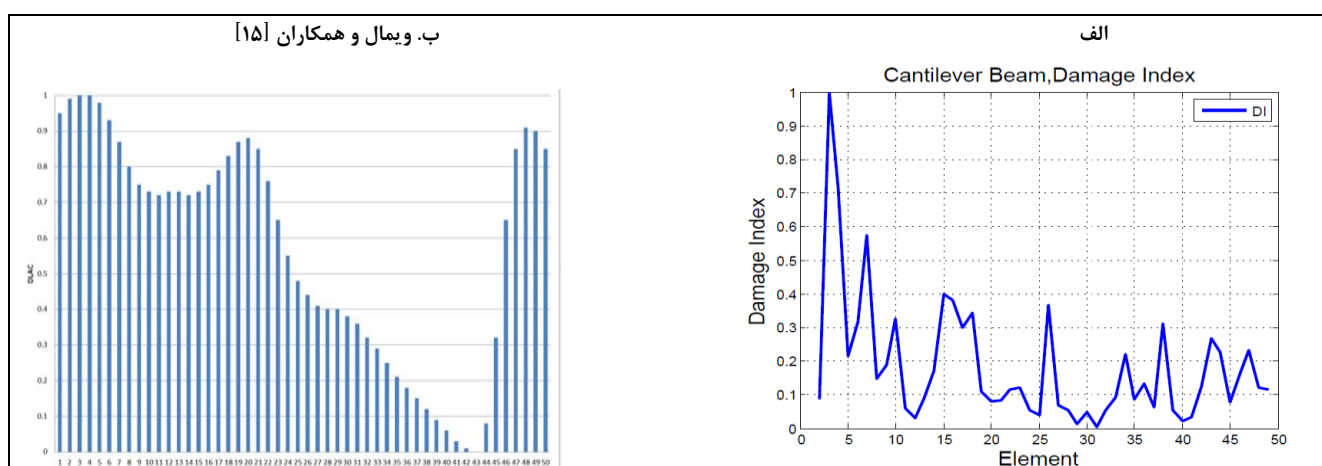
۴- صحت سنجی

مطالعات ویمال موهان و همکاران [۱۵] به بررسی معیار اطمینان شاخص آسیب (DLAC) و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی پرداخته‌اند. این محققین شاخص DLAC را شاخص حساس و در عین حال کاربردی به منظور مکانیابی آسیب معرفی کردند. مقطع مورد استفاده تیر طره با مدول یانگ $E=2.1 \times 10^5 \frac{N}{M^2}$ ، طول ۱ متر متشکل از ۵۰ المان محدود و ابعاد 35×75 سانتیمتر مربع بود که به منظور مدلسازی آسیب با کاهش ۲۵ سانتیمتر از ارتفاع تیر مقطع به ابعاد 35×50 سانتیمتر مربع تغییر شکل یافته بود. در پژوهش حاضر به منظور ایجاد آسیب در مدل‌سازی انجام شده از روش کاهش سختی استفاده شده است. به همین دلیل مقدار کاهش سختی معادل با کاهش مقطع برابر است با:

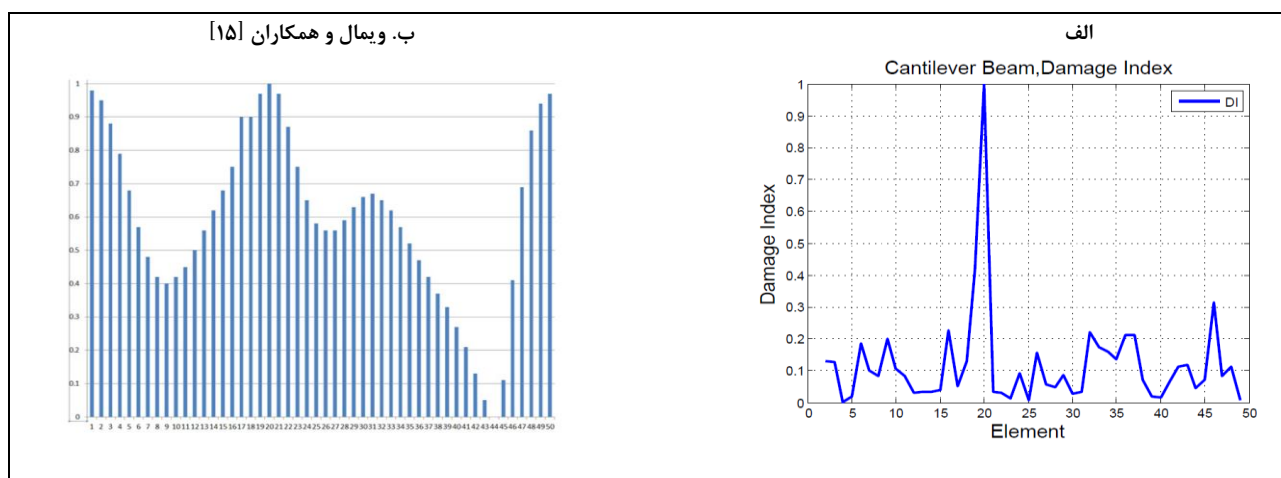
$$\text{reduce in EI} = \frac{E \frac{1}{12} b h_1^3 - E \frac{1}{12} b h_2^3}{E \frac{1}{12} b h_1^3} \times 100 = 70.37.37\%$$

که در آن b عرض مقطع که همواره ثابت بوده و h_1 ارتفاع مقطع در حالت سالم و h_2 ارتفاع مقطع در حالت آسیب‌دیده می‌باشد.

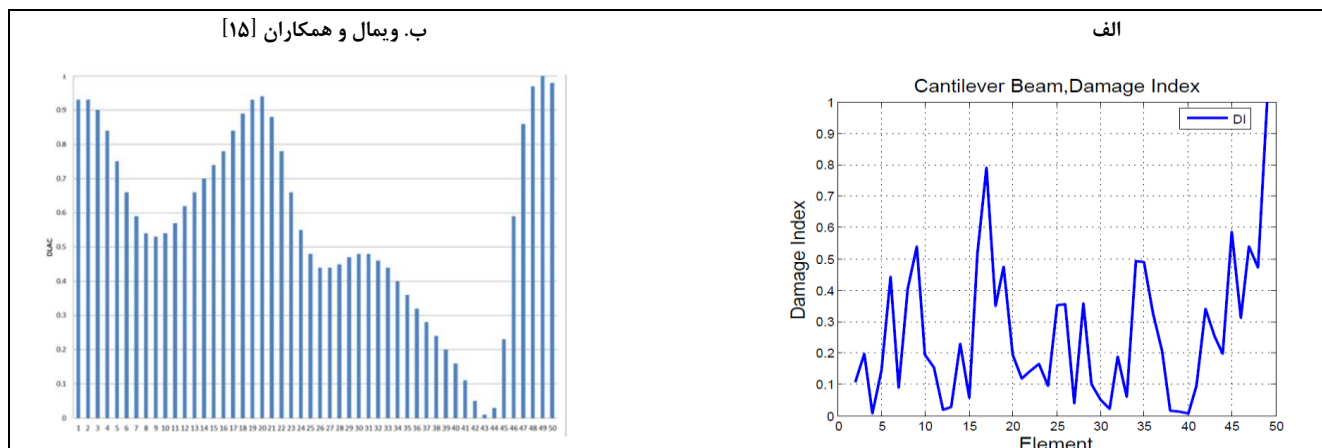
آسیب مذکور در المان‌های ۴، ۲۰ و ۴۹ بررسی گشت مطابق شکل ۲ و محل آن به صورت قله ای با عدد DLAC یا DI برابر ۱ مشاهده می‌گردد. نتایج مقایسه‌ی روش پیشنهادی با روش مورد استفاده در پژوهش ویمال و همکاران در نمودارهای ۱ تا ۳ قابل مشاهده می‌باشد.



نمودار ۱: الف: مقادیر DI ب: مقادیر DLAC برای المان آسیب‌دیده ۱۴ام



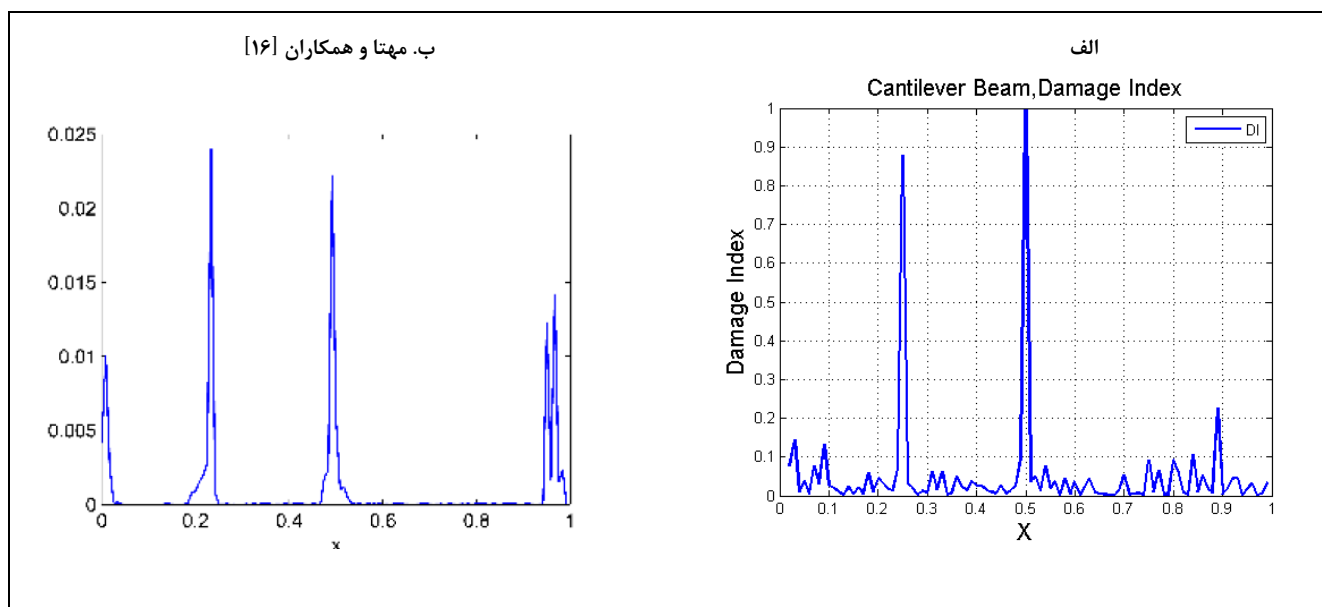
نمودار ۲: الف: مقادیر DI ب: مقادیر DLAC برای المان آسیب‌دیده ۲۰ام



نمودار ۳: الف: مقادیر DI ب: مقادیر DLAC برای المان آسیب دیده ۴۹ام

همانطور که در نمودارهای ۱ تا ۳ قابل مشاهده است، روش پیشنهادی دارای دقت بیشتری نسبت به روش موهان و همکاران در مکانیابی آسیب می باشد. همچنین، روش پیشنهادی بسیار حساس تر به آسیب در برابر عوامل محیطی مانند نوفه عمل کرده و حتی در نقاط ابتدایی و انتهایی تیر نشان دهنده‌ی محل آسیب در تیر می باشد.

در پژوهش مهتا و همکاران [۱۶]، روش تبدیل موجک مورد استفاده قرار گرفت. محققین اذعان داشتند که روش به کار گرفته شده در شناسایی و مکان‌یابی آسیب از دقت کافی برخوردار می باشد. با توجه به بررسی به عمل از مقایسه‌ی روش مورد استفاده در پژوهش مهتا و همکاران و روش پیشنهادی نمودار ۴ بدست آمد. آسیب در نمودار به صورت مقدار ماکزیمم قابل مشاهده می باشد.



نمودار ۴: الف: مقادیر DI ب: مقادیر تبدیل موجک برای آسیب‌های فرضی

آسیب به صورت نقاط اوج در نمودار ۴-ب قابل مشاهده می باشد. در نقاط ابتدایی و انتهایی تیر نیز نقاط اوجی مشاهده می گردد که این نقاط به دلیل شرایط گیرداری ابتدا و آزاد انتها در بدست آوردن روابط تبدیل موجک ایجاد گردیده است. این نقاط در نمودار ۴-الف که مربوط به روش پیشنهادی در این مقاله است، مشاهده نشده است. نتایج نه تنها نشان‌دهنده‌ی دقت بالاتر و خطای کمتر بوده، بلکه کارایی روش پیشنهادی در طول کل تیر را نشان می دهد. نتایج نشان می دهد الگوریتم ارائه شده بخوبی با نتایج تحلیلی و آزمایشگاهی محققین قبلی تطابق دارد و می توان نسبت به نتایج آن اطمینان داشت.

۵- نتایج عددی

به منظور بررسی دقیق کارایی روش پیشنهادی در شرایط سخت محیطی با وجود نوفه، ۳ سناریوی آسیب با شدت‌ها و مقادیر مختلف نوفه در ۶ مود اول نوسانی تیر طره مورد ارزیابی قرار گرفت. در تمامی سناریوها به دلیل بررسی بیشتر دقت روش مورد نظر، آسیب در قسمت میانی تیر در نظر گرفته شده است، تحقیقات نشان دادند شناسایی آسیب در میان تیر دارای خطای بیشتری نسبت به ابتدا و انتهای آن دارد [۱۶]. سناریوهای خرابی تیر در جدول (۲) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۲: سناریوهای فرضی خرابی

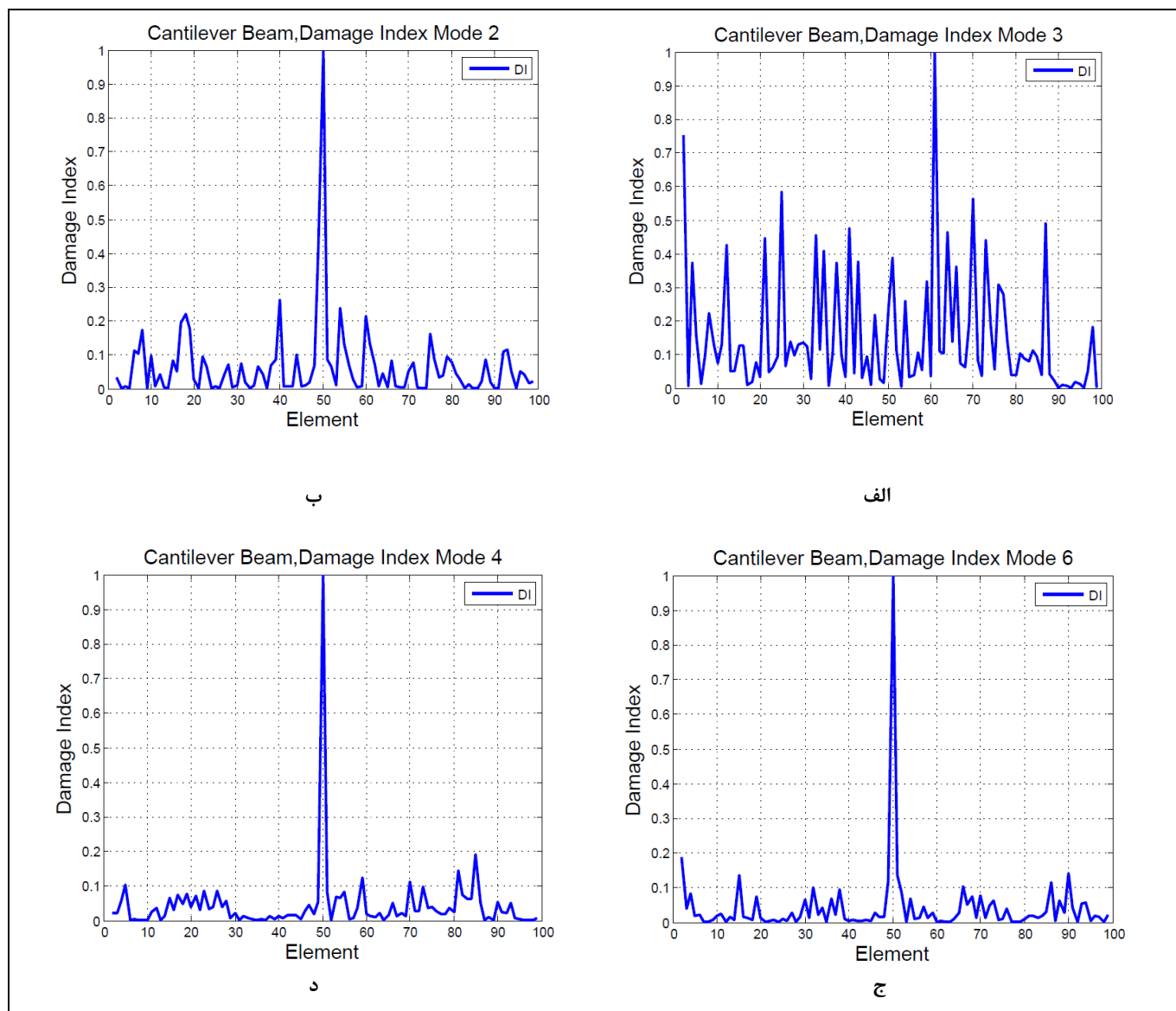
	کاهش سختی %	نوفه موجود %
۱	۵۰	۰,۵
۲	۳۰	۰,۵
۳	۳۰	۱

مقادیر فرکانس‌های طبیعی تیر سالم و آسیب‌دیده برای هر ۳ سناریو در ۶ مود اول نوسانی در جدول (۳) قابل مشاهده می‌باشد.

جدول ۳: مقادیر تغییرات فرکانس‌های طبیعی برای سناریوهای آسیب فرضی

	فرکانس تیر سالم	سناریو اول		سناریو دوم		سناریو سوم	
		فرکانس تیر آسیب‌دیده	درصد تغییرات	فرکانس تیر آسیب‌دیده	درصد تغییرات	فرکانس تیر آسیب‌دیده	درصد تغییرات
مود اول	۱۱/۶۴	۱۱/۶۳۶	۰/۰۴	۱۱/۶۳۹	۰/۰۱۷	۱۱/۶۳۹	۰/۰۱۷
مود دوم	۷۲/۹۵	۷۲/۵۳	۰/۵۷	۷۲/۷۷	۰/۲۵	۷۲/۷۷	۰/۲۵
مود سوم	۲۰۴/۲۷	۲۰۲/۰۱	۱/۱۰	۲۰۳/۲۹	۰/۴۸	۲۰۳/۲۹	۰/۴۸
مود چهارم	۴۰۰/۲۸	۳۹۹/۰۵	۰/۳۱	۳۹۹/۷۴	۰/۱۴	۳۹۹/۷۴	۰/۱۴
مود پنجم	۶۶۱/۷۰	۶۶۰/۸۲	۰/۱۳	۶۶۱/۳۲	۰/۰۵۷	۶۶۱/۳۲	۰/۰۵۷
مود ششم	۹۸۸/۴۶	۹۷۹/۵۷	۰/۹۰	۹۸۴/۵۶	۰/۴۰	۹۸۴/۵۶	۰/۴۰

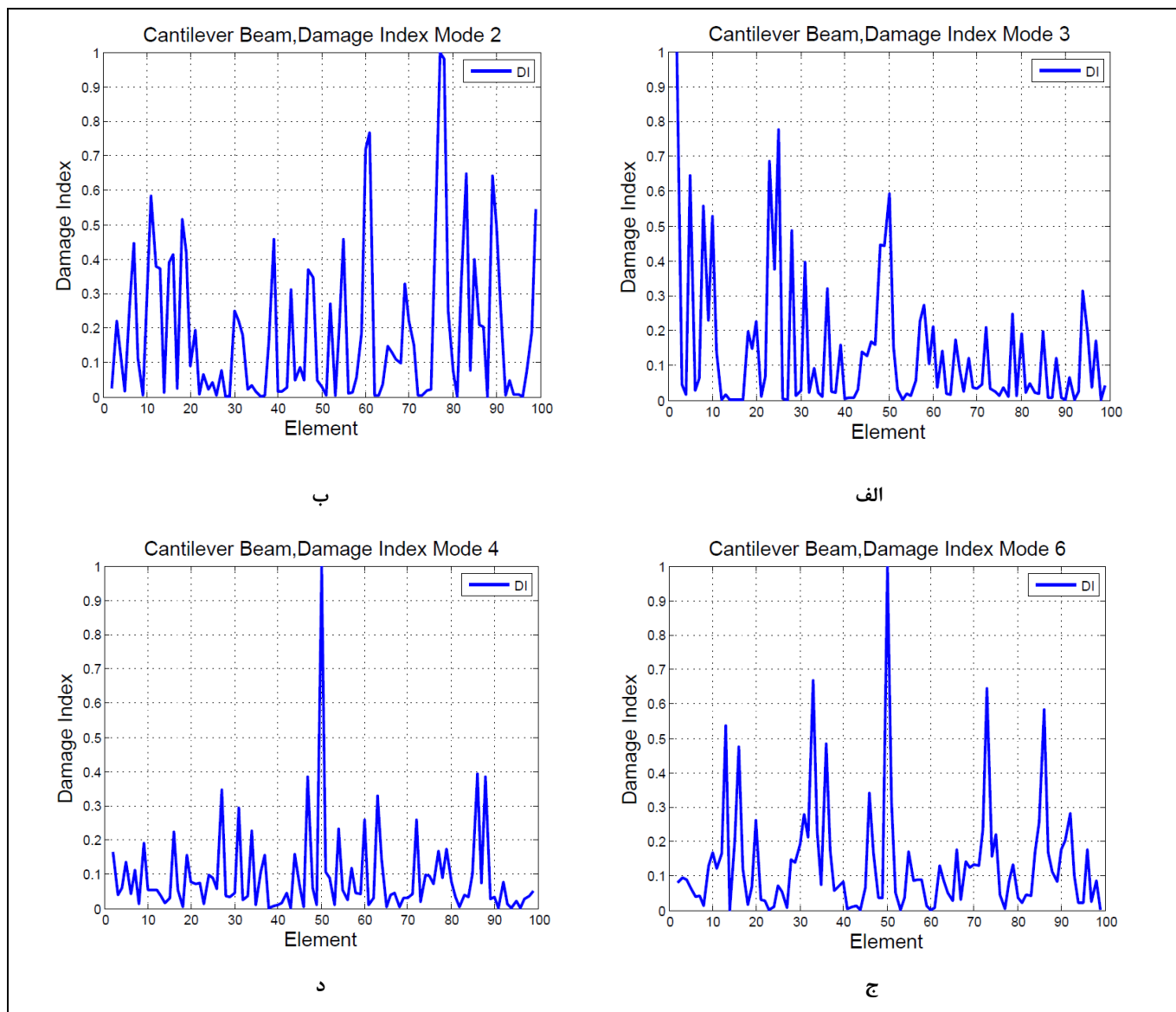
با توجه به جدول فوق بیشترین تغییرات فرکانس‌های طبیعی مربوط به مودهای دوم، سوم، چهارم و ششم می‌باشد. دلیل برابری فرکانس‌های آسیب‌دیده سناریوهای دوم و سوم برابری درصد کاهش سختی المان آسیب‌دیده بوده که با توجه به روابط ذکر شده در بخش فرضیات پژوهش به منظور بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی تیر آسیب‌دیده، نوفه دخیل نبوده و این عامل طبق رابطه (۱۲) مستقیماً بر روی اشکال مودی تاثیرگذار می‌باشد. حال با توجه به بیشترین درصد تغییرات فرکانس‌های طبیعی انتظار می‌رود مکان آسیب در این مودها نسبت به سایر مودها شاخص تر باشد اما عامل نوفه نیز در این فرضیه نقش اساسی را داراست. به همین جهت، نمودارهای شاخص آسیب در ادامه برای مودهای نوسانی مذکور قابل مشاهده می‌باشد.



نمودار ۵: شاخص آسیب سناریوی اول خرابی برای مودهای الف: دوم، ب: سوم، ج: چهارم، د: ششم

با توجه به نمودار (۵) روش پیشنهادی به کمک شاخص آسیب پیشنهاد شده، در مود دوم و چهارم و ششم محل آسیب را به درستی نشان داده است. علت عدم نمایش صحیح آسیب در مود سوم نوسانی، تاثیرات نطفه بوده که امکان مکان‌یابی آسیب را در مود سوم دشوار کرده است.

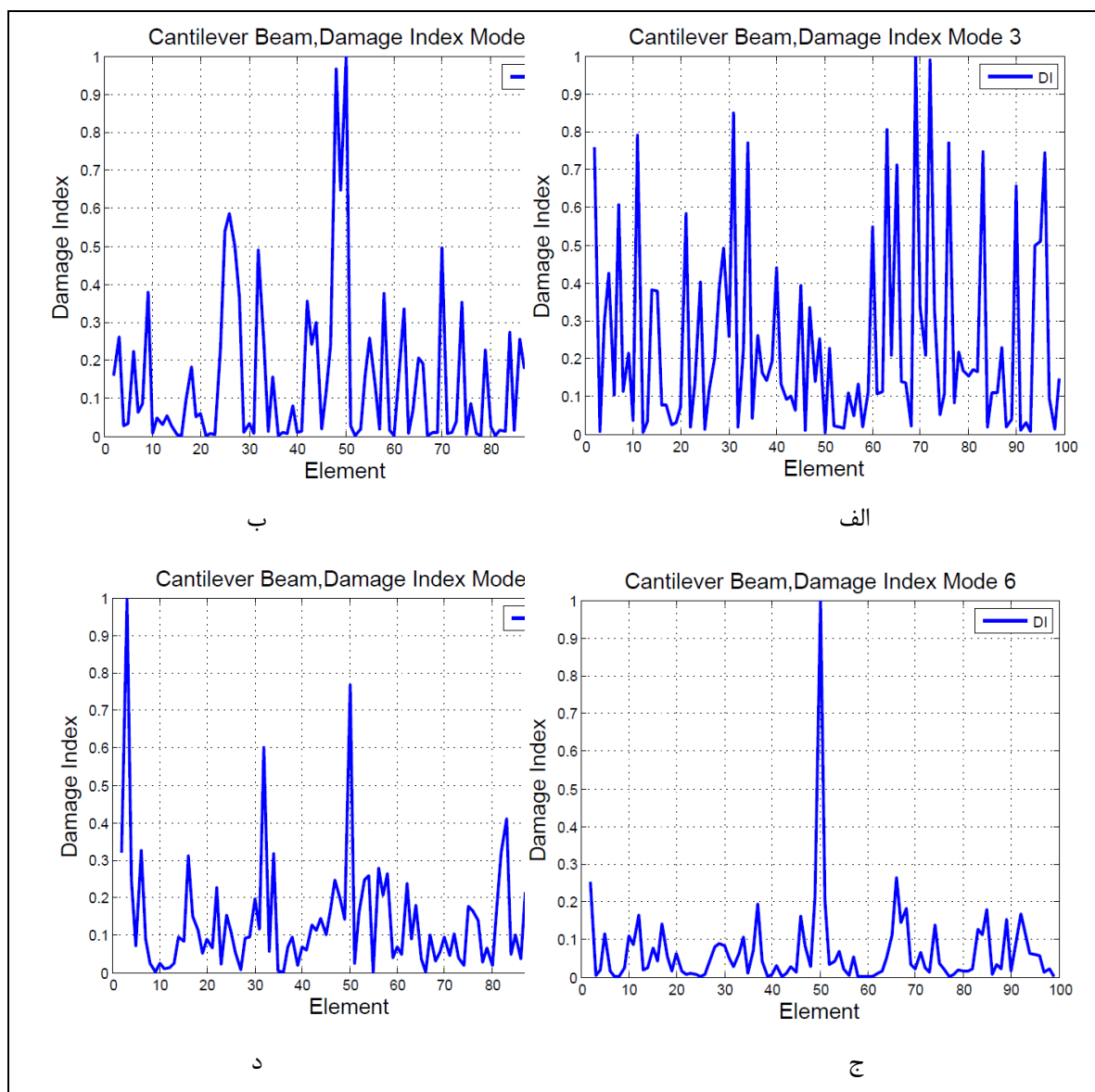
مقدار ۵۰ درصد کاهش سختی مقدار بسیار بزرگی از آسیب را شامل شده که در سناریوهای واقعی آسیب امری بعید به نظر می‌آید. به منظور دقت روش تشخیص خرابی پیشنهادی، سناریوهای دوم و سوم کاهش سختی ۳۰ درصدی را شامل می‌گردد که شناسایی چنین آسیبی با وجود مقادیری از نطفه در بسیاری از روش‌های قبلی تشخیص خرابی امری بعید تلقی می‌گردد.



نمودار ۶: شاخص آسیب سناریوی دوم خرابی برای مودهای الف: دوم، ب: سوم، ج: چهارم، د: ششم

با توجه به کاهش مقدار آسیب فرضی شناسایی آسیب در مودهای دوم و سوم با مشکل مواجه شده و روش شاخص آسیب پیشنهادی در این تحقیق در این مودها توانایی شناسایی و مکان‌یابی آسیب را دارا نیست. محل آسیب در مودهای ۴ و ۶ به درستی نشان داده شده است که نشان از شایستگی کامل روش پیشنهادی می‌باشد.

به منظور بررسی دقیق‌تر روش پیشنهادی، سناریوی سوم آسیب با فرض حداکثر نوبه قابل ایجاد در نمودار (۷) بررسی شد.



نمودار ۷: شاخص آسیب سناریوی سوم خرابی برای مدهای الف: دوم، ب: سوم، ج: چهارم، د: ششم

با توجه به نمودار (۷) شاخص آسیب پیشنهادی در مود ششم نوسان توانایی شناسایی و مکان‌یابی آسیب را داراست که این امر با درصد نوفه یک درصد در بسیاری از روش‌ها اصلاً ممکن نیست.

نتایج بررسی‌ها نشان دادند، روش پیشنهادی در هر سه سناریوی آسیب حتی در قسمت میانی تیر با وجود کاهش مقدار آسیب و افزایش مقدار نوفه در تیر در شناسایی آسیب بسیار موفق عمل می‌کند.

به طور کلی با توجه به نمودارهای ۵، ۶ و ۷ می‌توان گفت با کاهش مقدار آسیب و افزایش مقدار نوفه، شناسایی آسیب در مدهای پایین‌تر بسیار مشکل خواهد بود و دارای دقت پایینی می‌باشد. در نتیجه به منظور شناسایی محل آسیب در آسیب‌ها با شدت پایین و یا با اطلاعات نوفه‌ای با درصد بالا، با استفاده از مودهای بالاتر آسیب با دقت قابل قبولی قابل شناسایی است. نتایج با توجه به عدم توانایی سایر روش‌ها در شناسایی آسیب در این حالت چشمگیر است.

بصورت کلی، به منظور پیدا کردن مود مناسب جهت مکان‌یابی دقیق آسیب می‌توان از تغییرات فرکانس‌های طبیعی کمک گرفت. بدین صورت که بیشترین تغییرات، بیشترین مقدار انحنای بررسی شده و در نتیجه بهترین شماره مود برای شناسایی شاخص آسیب حاصل می‌گردد.

۶- نتیجه گیری

در سال‌های اخیر علم پایش سلامتی سازه‌ها و به ویژه روش‌های حوزه‌ی مودال از این علم، مورد توجه بسیاری از محققان و دانشمندان این رشته بوده است. اشکال مودی خام بدست آمده از سازه توانایی مکان‌یابی آسیب را به دقت مطلوب ندارند. به همین دلیل در روش پیشنهادی شناسایی آسیب در این مقاله از انحنای اشکال مودی، که مشتق دوم اشکال مودی می‌باشد، استفاده شده است. درصد نوفه در هنگام برداشت اطلاعات باعث به وجود آمدن خطای زیادی در امر شناسایی آسیب در روش‌های سنتی می‌گردد. به همین در این تحقیق، روش شاخص آسیب به منظور افزایش دقت به صورت توأم با روش انحنای شکل مودی به کار گرفته شده است. در این پژوهش با در نظر گرفتن نوفه حاصل از برداشت اطلاعات شکل مودی و درصد خرابی کم، دقت روش مکان‌یابی آسیب به دقت مورد بررسی قرار گرفته است. روش شاخص آسیب در ارتباط با انحنای شکل مودی برای سازه تیر طره که مطالعات آزمایشگاهی متعددی روی آن انجام شده، گسترش داده شد. نتایج حاصل از این روش که با ۳ سناریوی آسیب مورد بررسی قرار گرفت، حاکی از دقت روش پیشنهادی در شناسایی آسیب‌های با شدت پایین و نوفه تا حداکثر ۱ درصد بوده است. نتایج نشان می‌دهد این روش پیشنهادی به منظور شناسایی آسیب‌های جزئی با نوفه بالا، مودهای بالاتری نیاز دارد. در حالیکه شناسایی آسیب با سایر روش‌ها در این حالت از دقت بسیار کمی برخوردار است. روش پیشنهادی نه تنها بسیار ساده و کاربردی است بلکه از دقت و عملکرد بسیار زیادی در آسیب‌ها با شدت پایین‌تر برخوردار می‌باشد.

مراجع

- [1] Lopez-Higuera, J.M., et al. (2011). *Fiber Optic Sensors in Structural Health Monitoring*. Journal of Lightwave Technology, 29(4). 587-608.
- [2] Carden, E.P. and P. Fanning. (2004) *Vibration Based Condition Monitoring: A Review*. Structural Health Monitoring. 3(4). 355-377.
- [3] Wenzel, H. (2008) *Health Monitoring of Bridges*. John Wiley & Sons.
- [4] Ganguli, R. and S. Gouravaraju. (2016). *Damage detection in cantilever beams using spatial Fourier coefficients of augmented modes*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. 230(20). 3677-3690.
- [5] Yang, Z.-B., et al. (2017). *Fourier spectral-based modal curvature analysis and its application to damage detection in beams*. Mechanical Systems and Signal Processing. 84. 763-781.
- [6] Yang, Z.-B., et al. (2016). *Scale-wavenumber domain filtering method for curvature modal damage detection*. Composite Structures. 154. 396-409.
- [7] Salawu, O. and C. Williams. (1994). *Damage location using vibration mode shapes*, In: *Proceedings of the 12th International Modal Analysis*. 933.
- [8] Ooijevaar, T., et al. (2016). *Impact damage identification in composite skin-stiffener structures based on modal curvatures*. Structural Control and Health Monitoring. 23(2). 198-217.
- [9] Dworakowski, Z., et al. (2016) *Vision-based algorithms for damage detection and localization in structural health monitoring*. Structural Control and Health Monitoring. 23(1). 35-50.

- [10] Dincal, S. and N. Stubbs. (2014). *Nondestructive damage detection in Euler–Bernoulli beams using nodal curvatures—Part II: Field measurements*. Structural Control and Health Monitoring. 21(3). 331-341.
- [11] Kim, J.-T., et al. (2003) *Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method*. Engineering Structure. 25(1). 57-67.
- [12] Parloo, E., P. Guillaume. (2003). and M. Van Overmeire, *Damage assessment using mode shape sensitivities*. Mechanical systems and signal Processing. 17(3). 499-518.
- [13] Fan, W. and P. Qiao. (2011). *Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study*. Structural Health Monitoring. 10(1). 83-111.
- [14] Pandey, A., M. Biswas, and M. Samman. (1991). *Damage detection from changes in curvature mode shapes*. Journal of sound and vibration. 145(2). 321-332.
- [15] Mohan, V., et al. (2014). *Studies on damage detection using frequency change correlation approach for health assessment*. Procedia Engineering. 86: p. 503-510.
- [16] Mehta, P., et al. (2017). *Detection of Cracks in a Cantilever Beam Using Signal Processing and Strain Energy Based Model*. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 12008.