

عیب یابی مبتنی بر انحنا در ستون تحت اثر بار محوری

محترم خان احمدی^۱، حمید محمدی گرمی^۲، مجید قلهکی^{۳*}، امید رضایی فر^۴، مجید پورامینیان^۵

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، سنندج

۲- کارشناسی ارشد سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۴- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان

۵- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رامسر، دانشگاه آزاد اسلامی، رامسر

* سمنان، صندوق پستی ۳۵۱۳۱۱۹۱۱، mgholhaki@semnan.ac.ir

چکیده

پایش و کنترل سلامت سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. بی‌شک ستون‌ها از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای هستند و در مقایسه با سایر المان‌ها، گسترش آسیب‌های محلی هر چند کوچک در آن‌ها می‌تواند به تخریب زود هنگام سازه بیانجامد. یک ستون محتمل آسیب ممکن است در اثر یک نیروی محوری کمتر از بار بحرانی محوری وضعیت سالم ستون دچار ناپایداری کماتشی گردد؛ بنابراین، پایش سلامتی و تشخیص آسیب ستون تحت اثر بار محوری مورد توجه است. در این مقاله، ستون تحت اثر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی مبنا (بار بحرانی بدترین حالت آسیب) در وضعیت‌های سالم و آسیب در نرم افزار ABAQUS تحلیل فرکانسی شد و پاسخ‌های مودال استخراج گردید. بررسی‌ها نشان داد که با افزایش مقدار بار، مقادیر فرکانسی کاهش می‌یابد. نیز، در نسبت‌های باری یکسان، فرکانس وضعیت سالم از فرکانس وضعیت آسیب بیشتر است. در ادامه، انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی محاسبه شد. بر مبنای انحنای اولیه و ثانویه محاسباتی، شاخص‌های تشخیص آسیب DI1 و DI2 تعریف گردید. نتایج عیب‌یابی شاخص‌های انحنایی، عملکرد مطلوب این شاخص‌ها را در شناسایی موقعیت‌های آسیب نشان داد با این تفاوت که شاخص DI1 موقعیت‌های احتمالی آسیب را نشان می‌دهد و شناسایی با عدم قطعیت همراه است. نیز نتایج نشان داد که شاخص انحنایی تشخیص آسیب یک موقعیت آسیب از تغییرات شدت آسیب سایر موقعیت‌های آسیب متأثر نیست. همچنین، بار محوری تأثیری بر شاخص انحنایی تشخیص آسیب ندارد و این شاخص متأثر از شرایط تکیه‌گاهی، سطح مقطع و شدت آسیب است.

واژگان کلیدی

پایش و کنترل سلامت سازه، بار محوری، تحلیل فرکانسی، انحنای شکل مود، شناسایی آسیب

Curvature-based damage detection in a column under the effect of axial load

M. Khanahmadi, H. Mohammady Garfamy, M. Gholhaki, O. Rezaifar, M. Pouraminian

Abstract

Structural control and health monitoring is of particular importance. Columns are one of the most important structural elements, and compared to other elements, the spread of local damage, however small, can lead to premature destruction of the structure. A damaged column may have buckling instability due to an axial force less than the critical load of the healthy condition of the column; therefore, the column damage detection under the effect of axial load is important. In this paper, the column in healthy conditions and damage due to different ratios of base critical load were frequency analyzed in ABAQUS software and modal responses were extracted. Studies have shown that with increasing load, the frequency values decrease. Additionally, at the same load ratios, the healthy state frequency is higher than the damaged state frequency. Then, the curvature of the primary and secondary shapes of the vibration modes was calculated. Based on computational primary and secondary curvatures, DI1 and DI2 damage detection indices were defined. The damage detection results of curvature indices showed the optimal performance of these indices in detecting damage locations, with the difference that the DI1 index shows possible damage locations and the detection is associated with uncertainty. The results also showed that the curvature index of damage detection in one damage location is not affected by changes in damage severity in other damage locations. Additionally, the axial load has no effect on the curvature index of damage detection and this index is affected by support conditions, section area and damage severity.

Keywords

Structural control and health monitoring, Axial load, Frequency analysis, Mode shape curvature, Damage detection

همواره سازه‌ها در دوره خدمت‌رسانی دچار آسیب‌های جزئی می‌شوند و با گذشت زمان، تحت اثر عوامل متعددی چون زلزله، گودبرداری‌های غیراصولی و ارتعاشات حاصل از حرکت وسایل نقلیه سنگین، این آسیب‌های جزئی گسترش یافته و می‌تواند سلامت کلی سازه را دچار مشکل نماید؛ بنابراین، پایش و کنترل سلامتی سازه‌ها^۱ به خصوص سازه‌های مهمی چون بیمارستان‌ها، پمپ بنزین‌ها، پل‌ها، سکوها، دریایی، سدها، ریل قطار و مراکز نگهداری تسلیحات نظامی و غیره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

تاکنون روش‌های پایش سلامت و تشخیص آسیب متعددی معرفی شده است که به طور کلی این روش‌ها را می‌توان به دو دسته روش‌های مخرب^۲ و غیر مخرب^۳ تقسیم‌بندی نمود. در روش‌های مخرب، با تخریب بخشی از سازه به وجود یا عدم وجود آسیب پی برده می‌شود که در موارد خاص از این روش استفاده می‌گردد. از جمله این روش‌ها می‌توان، آزمون خستگی را نام برد. روش‌های غیر مخرب خود به دو دسته روش‌های محلی^۴ و روش‌های کلی^۵ تقسیم‌بندی می‌شوند. روش‌های محلی شامل روش‌هایی همچون بازرسی‌های چشمی، آزمایش آلتروسونیک^۶، روش رادیوگرافی^۷، روش ذرات مغناطیسی^۸ و ... می‌شود که معمولاً سلامتی بخش کوچکی از سازه را بررسی می‌کند. این روش‌ها بر هزینه و وقت‌گیر بوده و نیاز به در دسترس بودن المان سازه‌ای است؛ اما روش‌های کلی جایگزین مناسبی برای روش‌های محلی هستند. در روش‌های کلی، پاسخ‌های سازه مبنای مطالعه پایش سلامتی سازه است. با این تعریف که آسیب در سازه‌ها منجر به تغییر ویژگی‌های فیزیکی (جرم، سختی و میرایی) و در نتیجه، تغییر در ماتریس‌های ذاتی سازه می‌گردد و هرگونه تغییر در ماتریس‌های ذاتی بر پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی سازه‌ها اثرگذار است [۱]. در ادامه تاریخچه‌ای از تحقیقات انجام شده در حوزه پایش سلامتی سازه‌ها بر مبنای پاسخ‌های سازه بیان شده است.

Pandey و همکارانش [۲] از انحنای شکل مود برای تعیین موقعیت آسیب در یک تیر کنسولی و یک تیر دو سر مفصل استفاده نمودند و نشان دادند که انحنای شکل‌های مود نسبت به آسیب‌های وارده حساس است. **Abdel Wahab** و **Roeck** [۳] از روش انحنای شکل مود در شناسایی آسیب سازه تیر دو سر مفصل و یک پل واقعی پیش‌تنبیده استفاده کردند. در تحقیقی، **Yam** و همکارانش [۴] شاخص آسیبی بر اساس انحنای شکل مود ارائه نمودند و کارایی آن را در شناسایی آسیب یک

صفحه آلومینیومی ترک‌خورده نشان دادند. برخی دیگر از محققان، روش‌های دیگری برای شناسایی آسیب سازه‌ها پیشنهاد دادند که از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های ماتریس انتقال هندسی [۵] و توابع پاسخ فرکانسی [۶] اشاره نمود. **Sahoo** و **Maity** [۷] برای ارزیابی خرابی از یک الگوریتم ژنتیک عصبی^۹ بر اساس این حقیقت که خرابی تأثیر قابل توجهی بر رفتار استاتیکی سازه دارد، استفاده کردند. **Yan** و همکارانش [۸] شاخصی برای شناسایی آسیب تیرها بر مبنای حساسیت انرژی کرنشی پیشنهاد دادند و با استفاده از مدل‌های آماری موفق به شناسایی آسیب سازه تیر شدند. **Xu** و همکارانش [۹] روشی بر مبنای انحنای نرمی پیشنهاد دادند که در آن اثر تفاوت طول المان‌های مجاور در نظر گرفته شد. آن‌ها نشان دادند که این روش قادر به شناسایی آسیب است. در تحقیق دیگری، **Xu** و همکارانش [۱۰] بر اساس طیف انرژی مویک به شناسایی ناحیه جداشدگی بتن از جداره فولادی ستون CFST پرداختند. آن‌ها با تعبیه پیزوالکتریک‌ها در مکان‌های از پیش تعیین شده از سطح خارجی، یک روش پایش وضعیت سطح داخلی پیشنهاد دادند. تجزیه و تحلیل طیف انرژی مویک انجام شد و یک شاخص شناسایی بر پایه تغییرات وزنی تعریف گردید. نتایج نشان داد که شاخص پیشنهادی به نقص جداشدگی حساس است و سطح داخلی ستون را به طور کامل ارزیابی می‌کند. **Katunin** [۱۱] با استفاده از مویک‌های ناپایدار کونکانکس^{۱۱} تحت اثر انرژی‌های مختلف به تجزیه و تحلیل شکل‌های مود صفحات کامپوزیتی آسیب‌دیده پرداخت و نشان داد که با استفاده از این مویک‌ها مکانیسم دقیق خسارت و اجتناب از اثر مرزی رخ می‌دهد. **Yang** و همکارانش [۱۲] با استفاده از روشی مبتنی بر طیف فوری، انحنای شکل مودها را محاسبه و از آن در شناسایی آسیب تیر استفاده کردند. **Ghodrati-Amiri** و همکارانش [۱۳] با استفاده از پردازش شتاب پاسخ ارتعاش آزاد سازه به کمک تبدیل هیلبرت-هوانگ^{۱۱}، بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود سازه را تخمین زدند و با مقایسه انحنای شکل‌های مود اقدام به شناسایی آسیب سازه نمودند. در تحقیقی، **Ding** و همکارانش [۱۴] از الگوریتم رقابت استعماری^{۱۲} و روش بردار نیروی باقیمانده^{۱۳} برای تخمین شدت آسیب در سازه‌ها استفاده نمودند. **Yang** و **Oyadiji** [۱۵] یک روش شناسایی خرابی در صفحات کامپوزیتی چندلایه با استفاده از سطح فرکانس مودال^{۱۴} ارائه نمودند. آن‌ها نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح فرکانس مودال شده و با محاسبه ضرایب مویک سطح فرکانس مودال



می‌توان محل و شکل خرابی صفحات کامپوزیتی چندلایه را مشخص نمود. Darvishan [۱۶] برای تشخیص آسیب در پل‌های کابلی با استفاده از آنالیز دامنه فرکانس و خوشه‌بندی داده‌ها یک شاخص خسارت با محاسبه فاصله اقلیدسی مراکز خوشه‌ها ارائه نمود. نتایج نشان داد که شاخص پیشنهادی می‌تواند با دقت مناسبی حالت‌های سالم و آسیب را از یکدیگر تفکیک نماید. Younesi و همکارانش [۱۷ و ۱۸] بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی به شناسایی آسیب در ستون‌های فولادی پر شده با بتن پرداختند و موفق شدند محل جداشدگی بتن از جداره فولادی را شناسایی نمایند. Mirzaei و همکارانش [۱۹] در پژوهشی با استفاده از روشی دو مرحله‌ای به شناسایی آسیب در سازه خرپا با تعداد المان‌های زیاد پرداختند. آن‌ها با استفاده از تبدیل موجک^{۱۵} محل‌های آسیب را شناسایی نمودند و به این ترتیب تعداد مجهولات تابع هزینه را به تعداد موقعیت‌های شناسایی شده کاهش دادند و از طریق الگوریتم‌های بهینه‌سازی موفق به شناسایی مقدار آسیب در هر یک از المان‌ها شدند. Teimoori و Mahmoudi [۲۰] با روشی مبتنی بر انحنای مود به شناسایی آسیب در اتصالات صلب قاب‌های فولادی در ارتفاع و پلان سازه پرداختند. نتایج نشان داد که با استفاده از این روش می‌توان محل اتصال‌های آسیب دیده را شناسایی نمود. Khanahmadi و همکارانش [۲۱] با به‌کارگیری تبدیل موجک و تعریف یک سیگنال ورودی بر مبنای شکل مود به شناسایی آسیب ستون تحت اثر بار محوری پرداختند. مقادیر اوج در سیگنال‌های خروجی، محل‌های آسیب را نشان داد. این محققان در تحقیق دیگری، با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی خرابی در صفحات فولادی پرداختند و نشان دادند که اغتشاشات ضرایب موجک تولید شده حالت‌های آسیب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده حالت سالم در موقعیت‌های مختلف خرابی چشم‌گیر است و در تمامی مودها می‌توان محل‌های آسیب را شناسایی نمود [۲۲]. آنها در ادامه تحقیقات خود موفق به شناسایی آسیب در صفحات پیش ساخته 3D پانل و کامپوزیت چندلایه شدند [۲۳ و ۲۴]. همچنین، در تحقیقی مبتنی بر تبدیل موجک و شکل‌های مود ارتعاشی موفق به شناسایی موقعیت‌های مختلف آسیب در سازه تیر فولادی شدند [۲۵]. Hanteh و همکارانش [۲۶ و ۲۷] با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل شکل مود در یک سازه ساختمانی کاملاً پانلی و دچار آسیب پرداختند. در این مطالعه محل آسیب با ایجاد جهش نسبی حداکثری و حداقلی در ضرایب موجک شناسایی گردید. در برخی مراجع با استفاده از مفاهیم فرکانس به

مطالعه سایر مباحث کاربردی در سازه‌ها پرداخته شده است. این موضوع نشان می‌دهد که خواص مودال سازه‌ای نه تنها در مسائل پایش سلامت بلکه در سایر مباحث سازه‌ای نیز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به عنوان مثال، در مرجع [۲۸] به بررسی اثر اندازه چشمه سخت‌کننده‌ها بر رفتار غیرخطی دیوارهای برشی فولادی پرداخته شده است. نتایج نشان داده است که کوچک شدن اندازه زیر صفحات باعث افزایش محسوس شکل‌پذیری و ضریب رفتار می‌گردد. برای سازه با سختی زیاد (فرکانس بزرگتر از حدود ۲ هرتز) افزایش ضریب رفتار ناچیز است؛ و به طور کلی، ضریب رفتار این محدوده فرکانس، مقداری ثابت در حدود ۱۱ تا ۱۳ پیشنهاد شد. در مرجع دیگری [۲۹] با استفاده از روش تحلیل دینامیکی افزاینده نشان داده شده است که در حالت حدی، ضریب رفتار دیوار برشی فولادی با ورق نازک برای سازه‌های بلند برابر با ۸ و سازه‌های کوتاه و میان مرتبه در حدود ۹ است.

با توجه به مطالعات انجام شده، به اثرات بار محوری بر داده‌های دینامیکی مودال و شناسایی آسیب در المان‌های سازه‌ای تحت اثر بار محوری کمتر پرداخته شده است. نیز این موضوع که احتمال کمانش ستون معیوب، تحت اثر بار محوری کمتر از بار بحرانی وضعیت سالم ستون وجود دارد، اهمیت پایش سلامت تحت اثر بار محوری را در المان ستون نشان می‌دهد. در این مقاله شناسایی آسیب به عنوان یکی مهم‌ترین مراحل پایش سلامتی در ستون تحت اثر بار محوری مورد توجه است.

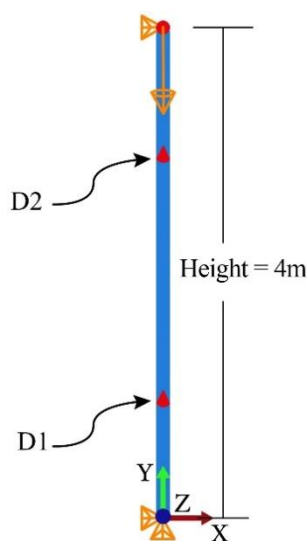
۲- مسئله تحقیق

در نوشتار حاضر، مسئله تحقیق عبارت است از ردیابی و شناسایی موقعیت‌های مختلف آسیب در حالت‌های تعریف شده آسیب در المان ستون تحت بارگذاری محوری با تأکید و تمرکز بر ویژگی انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی. لازم به ذکر است که آسیب‌ها به صورت کاهش سختی در مدول الاستیسیته مورد نظر هستند.

۳- مدل‌سازی اجزا محدود

ستون فولادی شکل (۱) به طول ۴ متر و با مقطع مربعی توپر به طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر و خصوصیات مکانیکی مدول الاستیسیته ۲۰۰۰۰۰ مگاپاسکال، چگالی ۷۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و نسبت پواسن ۰/۳ با شرایط تکیه‌گاهی دو سر مفصل و تحت اثر بار محوری با استفاده از المان Wire-Beam با در نظر گرفتن وضعیت‌های سلامتی بدون آسیب و آسیب D1 تا D3 در

نرم افزار اجزا محدود ABAQUS مدل سازی شده است.



شکل ۱- المان ستون فولادی با شرایط تکیه گاهی و موقعیت های آسیب تحت اثر بار محوری

به منظور راستی آزمایی و اعتماد به مدل نرم افزاری ستون و تصور اینکه در واقعیت به مسئله پایش سلامت سازه پرداخته شده است، مقدار بار بحرانی مودهای کمناشی حاصل از تحلیل کمناش ستون با ابعاد مشخص در نرم افزار اجزا محدود با مقدار نظیر تئوری شان در وضعیت سلامتی بدون آسیب مقایسه گردید. مقایسه مقادیر نرم افزاری و تئوری نشان می دهد (جدول ۱)) که مش بندی به طول ۸ سانتی متر برای ادامه تحقیق مناسب است.

جدول ۱- مقدار بار محوری بحرانی تئوری و مدل اجزا محدود ستون سالم (نیوتن)

شماره مود	بار بحرانی کمناشی محوری (نیوتن)		درصد اختلاف
	تئوری	ABAQUS (FEM)	
۱	$1/03 \times 10^6$	$1/03 \times 10^6$	صفر
۲	$4/11 \times 10^6$	$4/09 \times 10^6$	۰/۴۸۷
۳	$9/25 \times 10^6$	$9/16 \times 10^6$	۰/۹۷۳
۴	$1/65 \times 10^7$	$1/61 \times 10^7$	۲/۴۲۴

چگونگی محاسبه مقدار تئوری بار بحرانی کمناشی مود اول در ذیل ارائه شده است.

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 10^6 \times \frac{1}{12} \times 10^{-4}}{4^2} \approx 1.03 \times 10^6 \text{ N}$$

۴- تئوری اثر بار محوری بر اطلاعات دینامیکی مودال

معادله حرکت سیستم چند درجه آزادی را می توان از تعادل نیروهای مؤثر در هر کدام از درجات آزادی به دست آورد:

$$f_{Ii} + f_{Di} + f_{Si} = P_i(t) \quad (1)$$

شکل ماتریسی رابطه (۱) به صورت ذیل با رابطه (۲) قابل بیان است:

$$f_I + f_D + f_S = P(t) \quad (2)$$

با در نظر گرفتن اثر بار محوری در رابطه (۲) می توان نوشت:

$$f_I + f_D + f_S - f_G = P(t) \quad (3)$$

با توجه به اینکه نیروی محوری (نسبتی از بار کمناشی بحرانی) در خلاف جهت حرکت است؛ بنابراین، اثر آن منفی لحاظ گردید. در معادله (۳) f_I, f_D, f_S, f_G و $P(t)$ به ترتیب بردار نیروی اینرسی، میرایی، سختی، محوری و گرهی بوده و ذیلاً با رابطه (۴) تعریف می شوند:

$$f_I = M\ddot{U}, \quad f_D = C\dot{U}, \quad f_S = KU, \quad f_G = K_G U \quad (4)$$

که در آن U بردار جابجایی گره ها و ماتریس های M, C, K و K_G به ترتیب ماتریس جرم، میرایی، سختی و سختی هندسی (ناشی از نیروی محوری) هستند؛ بنابراین، از جایگذاری به دست می آید:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + (K - K_G)U = P(t) \quad (5)$$

با قرار دادن $\bar{K} = K - K_G$ (ماتریس سختی مرکب) معادله دینامیکی ارتعاش آزاد حرکت با صرف نظر از میرایی به صورت رابطه (۶) خواهد بود:

$$M\ddot{U} + \bar{K}U = 0 \quad (6)$$

با فرض یک جابجایی هارمونیک برای تمام درجات آزادی با زاویه فاز θ و فرکانس ω روابط (۷) و (۸) به دست می آید.

$$U(t) = \bar{U} \sin(\omega t + \theta) \quad (7)$$

$$\ddot{U}(t) = -\bar{U} \omega^2 \sin(\omega t + \theta) \quad (8)$$



که در آن $\bar{U}$ نشان‌دهنده شکل سیستم است و با زمان تغییر نمی‌کند. با جایگذاری معادلات (۷) و (۸) در (۶) معادله (۹) حاصل می‌گردد:

$$(\bar{K} - \omega^2 M)\bar{U} = 0 \quad (9)$$

دستگاه معادله بالا در صورتی جواب غیر صفر دارد که دترمینان ضرایب برابر صفر باشد؛

$$\det(\bar{K} - \omega^2 M) = 0 \quad (10)$$

بسط معادله (۱۰) منجر به یک معادله جبری درجه n (تعداد درجات آزادی) از ω^2 می‌گردد و از حل آن، فرکانس‌ها و شکل‌های مود متأثر از بار محوری به دست می‌آید. هرگونه تغییر در خواص ماده از جمله مدول الاستیسیته بر ماتریس‌های جرم و سختی سازه تاثیر گذار است و در نتیجه اثرات آن بر پاسخ‌های فرکانسی (فرکانس‌ها و شکل‌های مود) لحاظ می‌گردد؛ بنابراین، از بررسی پاسخ‌های سازه می‌توان مسئله پایش سلامتی را مورد پژوهش قرار داد.

۵- معرفی حالت‌های آسیب

مشخصات حالت‌های آسیب در جدول (۲) ارائه شده است. مدول الاستیسیته ناحیه آسیب عبارت است از:

$$E_d = \%(100 - d)E_u \quad (11)$$

که در آن d درصد آسیب (جدول (۲)) ناحیه آسیب مورد نظر است. در شکل (۱) موقعیت‌های آسیب با رنگ قرمز نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات آسیب در ستون فولادی شکل (۱)

آسیب	موقعیت	محدوده آسیب (متر)	مرکز (متر)	درصد آسیب
D1	۱	۰/۹۶-۱/۰۴	۱	۳۰
D2	۲	۲/۹۶-۳/۰۴	۳	۲۰
D3	۱	۰/۹۶-۱/۰۴	۱	۳۰
	۲	۲/۹۶-۳/۰۴	۳	۲۰

۶- بررسی اثر شدت آسیب بر بار بحرانی

در جدول (۳) مقادیر بار بحرانی محوری ستون با حالت‌های آسیب D1 تا D3 گزارش شده است. مشاهده می‌گردد که با

افزایش شدت آسیب ناحیه محتمل آسیب، مقادیر بار بحرانی کاهش می‌یابد و این دلیلی بر اهمیت پایش سلامتی ستون تحت بار محوری است؛ زیرا در اثر آسیب، ظرفیت باربری محوری ستون دچار تغییر کاهشی می‌شود و ممکن است ستون تحت اثر بار محوری کمتر از ظرفیت تعریف شده، دچار کماتش و در نتیجه ناپایداری شود.

جدول ۳- اثر شدت آسیب بر مقدار بار بحرانی محوری (نیوتن)

درصد آسیب	بار کماتشی بحرانی ($\times 10^6$)		
۰	۱/۰۲۶۹	۱/۰۲۶۹	۱/۰۲۱۸
۱۰	۱/۰۲۴۶	۱/۰۲۴۶	۱/۰۱۹۵
۲۰	۱/۰۲۱۸	۱/۰۲۱۸	۱/۰۱۶۷
۳۰	۱/۰۱۸۱	۱/۰۱۸۱	۱/۰۱۳۱
۴۰	۱/۰۱۳۲	۱/۰۱۳۲	۱/۰۰۸۳
۵۰	۱/۰۰۶۴	۱/۰۰۶۴	۱/۰۰۱۵
۶۰	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۶۱	۰/۹۹۱۵
۷۰	۰/۹۷۹۱	۰/۹۷۹۱	۰/۹۷۴۷
۸۰	۰/۹۴۵۵	۰/۹۴۵۵	۰/۹۴۱۵
۹۰	۰/۸۴۹۱	۰/۸۴۹۱	۰/۸۴۶۲

لازم به ذکر است که شدت آسیب ناحیه آسیب ۲ در حالت D3 برابر ۲۰٪ در نظر گرفته شد. همچنین، بار بحرانی حالت آسیب D3 با شدت‌های آسیب ۳۰٪ و ۲۰٪ به ترتیب در نواحی آسیب ۱ و ۲ به عنوان بار بحرانی مبنا (بار بحرانی بدترین حالت آسیب) برای ادامه تحقیق انتخاب گردید. قطعاً در نسبت‌های مختلف از این بار به نحوی که شدت آسیب نواحی ۱ و ۲ به ترتیب از ۳۰٪ و ۲۰٪ تجاوز ننماید، ستون پایداری خود را حفظ می‌نماید.

۷- بررسی اثر بار محوری بر مقادیر فرکانسی

در شکل (۲) شکل‌های مود ارتعاشی (۴ شکل مود اول) ستون سالم تحت اثر بار محوری نشان داده شده است. آنالیز فرکانسی ستون تحت بار محوری (نسبتی از بار محوری بحرانی مبنا) در حالت‌های بدون آسیب و با آسیب انجام شده و مقادیر فرکانسی نظیر شکل‌های مود سالم و آسیب D1 (به عنوان نمونه) در جداول (۴) و (۵) ارائه گردیده است.

مشاهده می‌گردد که مقدار فرکانس در تمام مودها در هر دو وضعیت سالم و آسیب با افزایش بار محوری کاهش می‌یابد. همچنین، از مقایسه جداول (۴) و (۵) مشاهده می‌گردد که در

تمامی نسبت‌های باری، فرکانس حالت آسیب از فرکانس سالم در تمام مودها کمتر است و این به دلیل وجود آسیب است.

۸- شاخص‌های انحنای ردیابی آسیب

انحنای مرکزی شکل مود ϕ در موقعیت z و مود i ام با رابطه (۱۲) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\kappa_{i,j} = \frac{\phi_{i,j-1} - 2 \times \phi_{i,j} - \phi_{i,j+1}}{h^2} \quad (12)$$

که در آن h مقدار ثابتی است و $\kappa_{i,j}$ مقدار انحنای مود i در موقعیت j است.

در این پژوهش برای آشکارسازی آسیب، شاخص‌های عیب‌یابی انحنای شکل مود با صرف نظر از مقدار ثابت h در رابطه (۱۲) با روابط (۱۳) و (۱۴) به صورت زیر پیشنهاد گردید:

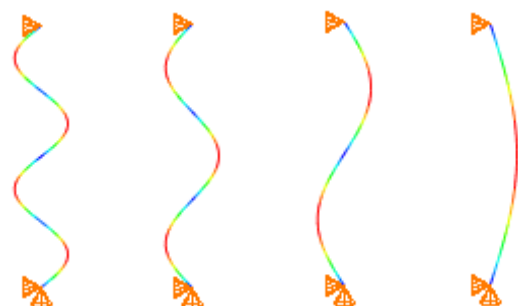
$$DI1 = \frac{\left| \left[\frac{\kappa_{i,j}^u}{\kappa_{i,j}^d} \right]_{m \times n} \right|}{\max \left| \left[\frac{\kappa_{i,j}^u}{\kappa_{i,j}^d} \right]_{m \times n} \right|} \quad (13)$$

$$DI2 = \frac{\left| \left[\kappa_{i,j}^u - \kappa_{i,j}^d \right]_{m \times n} \right|}{\max \left| \left[\kappa_{i,j}^u - \kappa_{i,j}^d \right]_{m \times n} \right|} \quad (14)$$

که در آن‌ها $\kappa_{i,j}^u$ و $\kappa_{i,j}^d$ به ترتیب مقادیر انحنای شکل مود i ام در موقعیت j مربوط به حالت‌های سالم و آسیب ستون است. همچنین، مقادیر m و n به ترتیب تعداد موقعیت‌ها و مودها را مشخص می‌نمایند.

۹- شناسایی و ردیابی آسیب

شاخص‌های انحنای ردیابی آسیب برای سه مود اول حالت‌های آسیب $DI1$ تا $DI3$ تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ از طریق کدنویسی در محیط نرم افزار MATLAB.R2021a محاسبه و در راستای طول ستون ترسیم گردیده است. نتایج نموداری شاخص‌های انحنای آسیب $DI1$ و $DI2$ (شکل‌های (۳) تا (۵)) در تمامی مودها، ناپیوستگی‌ها را در نواحی آسیب نشان می‌دهند با این تفاوت که با استفاده از شاخص آسیب $DI1$ علاوه بر موقعیت‌های آسیب، موقعیت‌هایی شناسایی می‌گردد که محتمل آسیب نیستند. این در حالی است که با استفاده از شاخص آسیب $DI2$ تنها در موقعیت‌های آسیب ناپیوستگی ایجاد می‌گردد. هر دو شاخص در شناسایی موقعیت‌های آسیب عملکرد موفقی دارند؛ اما نتایج تشخیصی شاخص $DI2$ قابل اعتمادتر است و



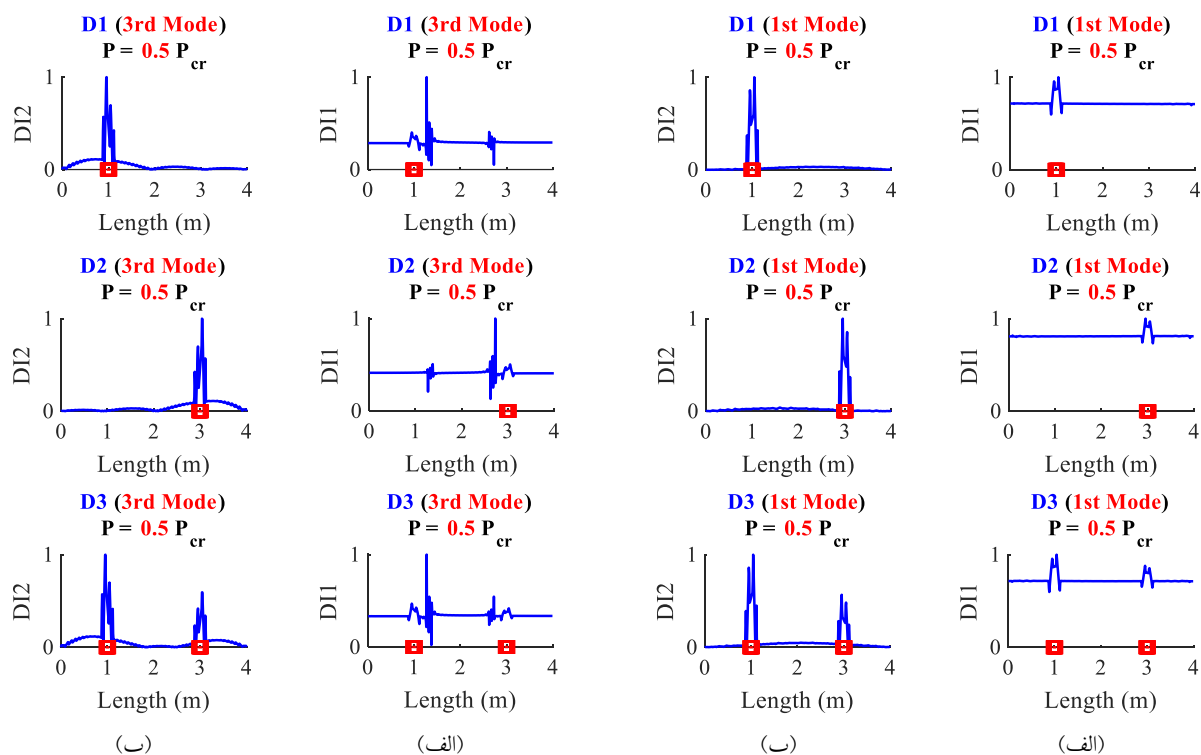
شکل ۲- شکل‌های مود ارتعاشی ستون سالم تحت بار محوری

جدول ۴- تأثیر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی بر مقادیر فرکانس ستون سالم (هرتز)

$\frac{P}{P_{cr}}$	فرکانس طبیعی (هرتز)			
	f_4	f_3	f_2	f_1
۰	۲۲۵/۳۰	۱۲۷/۶۰	۵۶/۹۹۲	۱۴/۲۹۱
۰/۱	۲۲۴/۶۰	۱۲۶/۹۰	۵۶/۲۸۶	۱۳/۵۶۹
۰/۲	۲۲۳/۹۱	۱۲۶/۲۰	۵۵/۵۷۲	۱۲/۸۰۶
۰/۳	۲۲۳/۲۲	۱۲۵/۴۹	۵۴/۸۴۸	۱۱/۹۹۴
۰/۴	۲۲۲/۵۲	۱۲۴/۷۸	۵۴/۱۱۴	۱۱/۱۲۳
۰/۵	۲۲۱/۸۲	۱۲۴/۰۷	۵۳/۳۷۱	۱۰/۱۷۸
۰/۶	۲۲۱/۱۱	۱۲۳/۳۵	۵۲/۶۱۶	۹/۱۳۶۰
۰/۷	۲۲۰/۴۱	۱۲۲/۶۲	۵۱/۸۵۰	۷/۹۵۸۰
۰/۸	۲۱۹/۷۰	۱۲۱/۹۰	۵۱/۰۷۳	۶/۵۷۱۹
۰/۹	۲۱۸/۹۹	۱۲۱/۱۷	۵۰/۲۸۴	۴/۸۰۰۷

جدول ۵- تأثیر نسبت‌های مختلف از بار بحرانی بر مقادیر فرکانس ستون محتمل آسیب $DI1$ (هرتز)

$\frac{P}{P_{cr}}$	فرکانس طبیعی (هرتز)			
	f_4	f_3	f_2	f_1
۰	۲۲۵/۲۴	۱۲۷/۰۷	۵۶/۵۱۶	۱۴/۲۳۰
۰/۱	۲۲۴/۵۵	۱۲۶/۳۷	۵۵/۸۰۴	۱۳/۵۰۴
۰/۲	۲۲۳/۸۶	۱۲۵/۶۶	۵۵/۰۸۴	۱۲/۷۳۸
۰/۳	۲۲۳/۱۶	۱۲۴/۹۵	۵۴/۳۵۳	۱۱/۹۲۱
۰/۴	۲۲۲/۴۶	۱۲۴/۲۴	۵۳/۶۱۲	۱۱/۰۴۵
۰/۵	۲۲۱/۷۶	۱۲۳/۵۲	۵۲/۸۶۱	۱۰/۰۹۲
۰/۶	۲۲۱/۰۶	۱۲۲/۸۰	۵۲/۰۹۹	۹/۰۴۰۰
۰/۷	۲۲۰/۳۶	۱۲۲/۰۷	۵۱/۳۲۶	۷/۸۴۷۵
۰/۸	۲۱۹/۶۵	۱۲۱/۳۴	۵۰/۵۴۰	۶/۴۳۷۶
۰/۹	۲۱۸/۹۴	۱۲۰/۶۱	۴۹/۷۴۳	۴/۶۱۴۹



شکل ۳- نمودارهای شاخص انحنای تشخیصی مود اول با اثر بار محوری

DI1 (الف) و DI2 (ب)؛ $0.5P_{cr}$

شکل ۵- نمودارهای شاخص انحنای تشخیصی مود سوم با اثر بار محوری

DI1 (الف) و DI2 (ب)؛ $0.5P_{cr}$

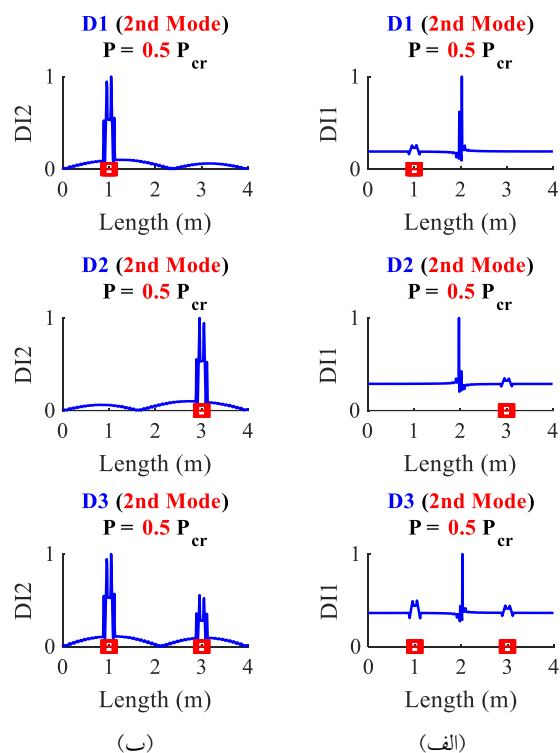
ناپوستگی‌های ایجاد شده با استفاده از این شاخص، نشان دهنده موقعیت‌های آسیب است؛ بنابراین، شاخص DI2 ترجیحاً برای شناسایی آسیب بر مبنای انحنای پاسخ شکل مود توصیه و پیشنهاد می‌گردد (نواحی آسیب واقعی با رنگ قرمز مشخص شده‌اند).

۱۰- اثر بار محوری بر شاخص انحنای آسیب

جهت بررسی اثر تغییر بار بر شاخص انحنای آسیب DI2، شاخص انحنایی تشخیص آسیب D3 برای نسبت‌های ۰/۱ و ۰/۹ از بار محوری بحرانی محاسبه و ترسیم شده است (شکل ۶). مشاهده می‌گردد که اثرات بار محوری بر مقدار شاخص انحنای تشخیص آسیب ناچیز بوده و قابل چشم پوشی است.

۱۱- اثر شدت آسیب بر شاخص انحنای آسیب

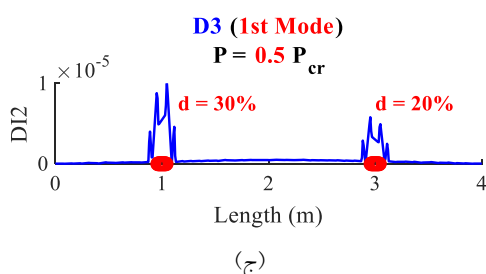
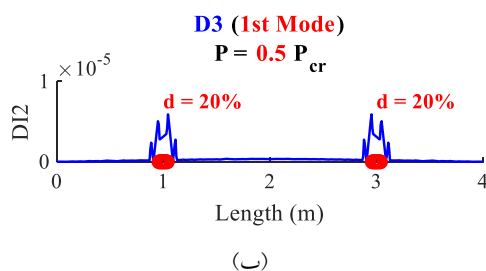
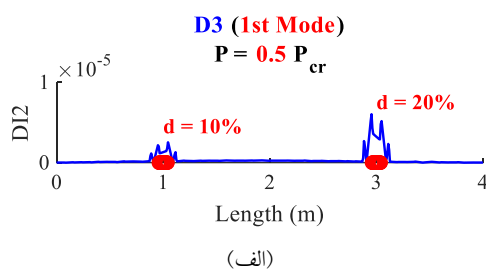
جهت بررسی اثر شدت آسیب بر شاخص آسیب DI2، شدت آسیب موقعیت آسیب ۲ برابر مقدار ثابت ۲۰ درصد و شدت آسیب موقعیت آسیب ۱ برابر با ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد مورد بررسی واقع گردید. لازم به ذکر است که برای این منظور، مخرج کسر در رابطه (۱۴) برابر واحد در نظر گرفته شد تا



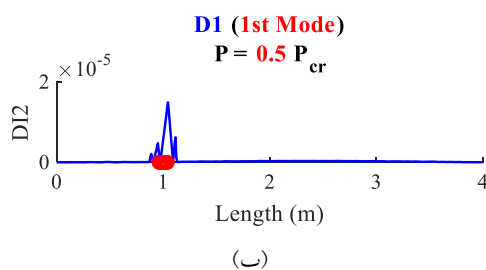
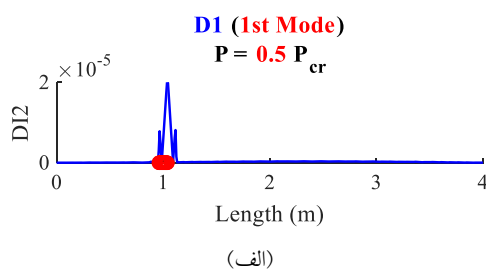
شکل ۴- نمودارهای شاخص انحنای تشخیصی مود دوم با اثر بار محوری

DI1 (الف) و DI2 (ب)؛ $0.5P_{cr}$

شده است.

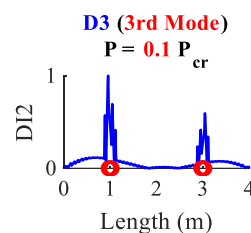
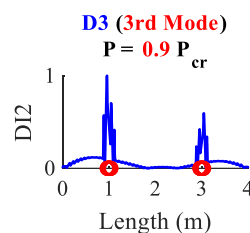
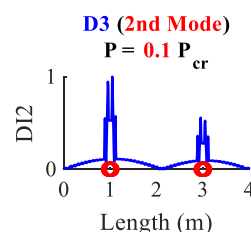
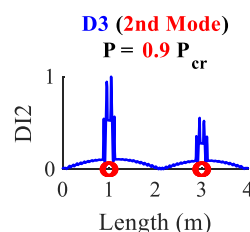
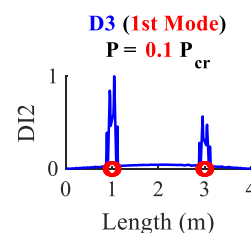
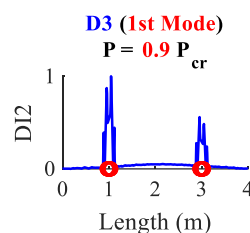


شکل ۷- نمودار شاخص انحنای تشخیصی آسیب D3 در مود اول با شدت آسیب ۲۰٪ در موقعیت آسیب ۲ و شدت آسیب (الف) ۱۰٪، (ب) ۲۰٪ و (ج) ۳۰٪ در موقعیت آسیب ۱



شکل ۸- نمودار شاخص انحنای تشخیصی آسیب D1 در مود اول تحت اثر بار محوری با مقطع (الف) مربعی توخالی و (ب) دایره‌ای توپر

حساسیت شاخص آسیب به شدت آسیب مشاهده گردد. مقایسه نتایج نموداری حالت آسیب D3 (شکل ۷) برای مقادیر مختلف شدت آسیب در موقعیت آسیب ۱ نشان می‌دهد که افزایش شدت آسیب باعث افزایش مقدار شاخص انحنای تشخیص تنها در موقعیت آسیب ۱ شده است و تأثیری بر مقدار شاخص انحنای تشخیص موقعیت آسیب ۲ ندارد؛ به عبارتی، شاخص انحنای تشخیص هر یک از موقعیت‌های آسیب تنها متأثر از شدت آسیب آن موقعیت آسیب است.



شکل ۹- نمودار شاخص انحنای تشخیصی آسیب D3 در سه مود اول تحت اثر بار محوری (الف) $0.1 P_{cr}$ و (ب) $0.9 P_{cr}$

۱۲- اثر تغییر مقطع بر شاخص انحنای آسیب

برای بررسی تأثیر تغییر مقطع بر مقدار شاخص انحنای تشخیصی D12، ستون شکل (۱) تحت اثر بار محوری $0.5 P_{cr}$ برای مود اول حالت آسیب D1 با مقاطع مربعی توخالی (ضخامت ۲ سانتی‌متر) و دایره‌ای توپر به ترتیب به طول ضلع ۲۵ و قطر ۲۰ سانتی‌متر مورد پایش سلامتی واقع گردید. نتایج نموداری شاخص انحنای تشخیص آسیب (شکل ۸) در هر دو حالت مقطع تعریف شده، توانمندی D12 را در شناسایی موقعیت آسیب ۱ نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که بار بحرانی حالت آسیب D1 برای مقاطع مربعی توخالی و دایره‌ای توپر به ترتیب برابر با 1.92278×10^7 و 1.51044×10^8 نیوتن محاسبه



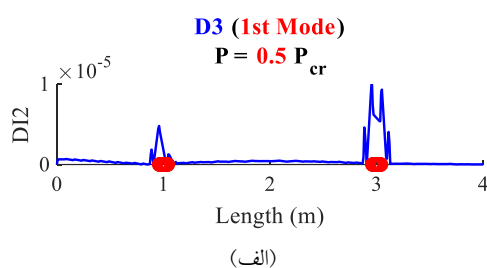
۱۳- تأثیر شرایط تکیه‌گاهی بر شاخص انحنای آسیب

شناسایی آسیب ستون با مقطع مربعی به طول ضلع ۱۰ سانتی‌متر و تحت اثر بار محوری $0.5P_{cr}$ برای حالت آسیب D3 با دیگر شرایط تکیه‌گاهی (شکل ۹)) با استفاده از شاخص انحنای تشخیصی DI2 انجام شده است. در جدول ۶ مقدار بار بحرانی ستون، نظیر هر یک از شرایط تکیه‌گاهی شکل ۹) محاسبه گردیده است.

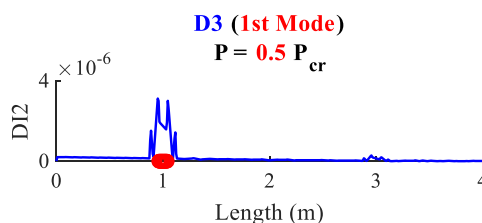
جدول ۶- بار کمانش بحرانی ستون با آسیب D3 با شرایط تکیه‌گاهی

مختلف (نیوتن)

شرایط تکیه‌گاهی	بار بحرانی (نیوتن)
گیردار-مفصلی	2.0777×10^6
گیردار-آزاد	2.0287×10^6



(الف)



(ب)

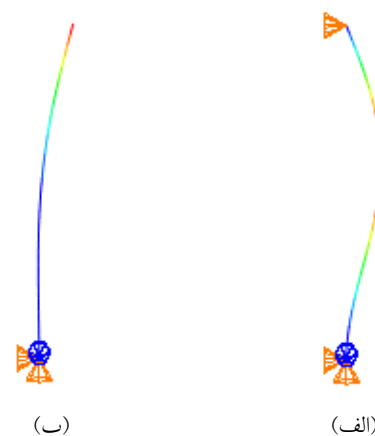
شکل ۱۰- نمودار شاخص انحنای تشخیصی آسیب D3 در مود اول با شرایط تکیه‌گاهی (الف) گیردار-مفصلی و (ب) گیردار-آزاد

هزینه‌های احتمالی را به حداقل رساند.

بی شک ستون‌ها از مهم‌ترین المان‌های سازه‌ای هستند و انتظار می‌رود آخرین اعضای آسیب دیده سازه‌ها از ستون‌ها باشد. از آنجایی که ستون‌ها تحت اثر بار محوری هستند، در اثر آسیب ممکن است عضو ستون تحت اثر بار محوری کمتر از بار بحرانی حالت سالم دچار ناپایداری کمانشی شود. به طوری که مطالعات انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که در اثر آسیب، بار محوری بحرانی ستون کاهش می‌یابد و به عبارتی، ستون تحت اثر یک بار محوری تعریف شده بین بارهای بحرانی وضعیت‌های سالم و آسیب دچار کمانش خواهد شد؛ بنابراین، بررسی مسئله پایش سلامت و تشخیص آسیب در ستون تحت اثر بار محوری مورد توجه است. بررسی‌های اولیه تشخیص آسیب در این مقاله نشان داد:

- ۱- در اثر بار محوری مقادیر فرکانسی ستون در تمامی مودها در هر دو وضعیت بدون آسیب و با آسیب کاهش می‌یابد.
- ۲- فرکانس حالت آسیب از فرکانس حالت بدون آسیب در تمامی مودها در نسبت‌های باری یکسان کمتر است.
- ۳- با افزایش شدت آسیب، بار بحرانی ستون در هر دو وضعیت سالم و آسیب کاهش می‌یابد.

در ادامه برای تعیین موقعیت آسیب، بر اساس انحنای شکل‌های مودی سالم و آسیب دیده، شاخص‌های انحنای تشخیصی DI1 و DI2 تعریف گردید. از بررسی‌های تشخیص آسیب با شاخص‌های مزبور نتایج زیر حاصل شد:



شکل ۹- شکل مود ارتعاشی اول ستون با شرایط تکیه‌گاهی (الف) گیردار-مفصلی و (ب) گیردار-آزاد

نتایج نموداری شکل ۱۰) نشان می‌دهد که شناسایی آسیب ستون تحت اثر بار محوری با دیگر شرایط تکیه‌گاهی، با استفاده از شاخص انحنای تشخیصی DI2 موفق‌آمیز است؛ اما در حالت گیردار-آزاد شناسایی آسیب‌های نزدیک به انتهای آزاد با حساسیت شاخص انحنای تشخیصی کمتری انجام می‌گردد (شکل ۱۰-ب)).

۱۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

پایش و کنترل سلامت در سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. گسترش آسیب‌های محلی و هرچند کوچک می‌تواند به تخریب کلی سازه بیانجامد. ضروری است آسیب‌های محلی به طریقی شناسایی گردد و با اتخاذ تصمیم‌گیری‌های مناسب

- [۱] خان احمدی، م. (۱۳۹۷)، "مقایسه عیب‌یابی در ورق فولادی و دیوار پیش ساخته پانلی در قاب فولادی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.
- [2] Pandey, A.K., Biswas, M. and Samman, M.M. (1991), "Damage detection from changes in curvature mode shapes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 145, pp. 312-332.
- [3] Abdel Wahab, M.M. and Roeck, G. (1999), "Damage detection in bridges using modal curvatures: application to a real damage scenario", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 226, pp. 217-235.
- [4] Yam, L., Li Y. and Wong, W. (2002), "Sensitivity studies of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches", *Engineering Structures*, Vol. 24, pp. 1465-1475.
- [5] Escobar, J.A., Sosa, J.J. and Gómez, R. (2005), "Structural damage detection using the transformation matrix", *Computers & Structures*, Vol. 83, pp. 357-368.
- [6] Huynh, D., He, J. and Tran, D. (2005), "Damage location vector: A non-destructive structural damage detection technique", *Computers & Structures*, Vol. 83, pp. 2353-2367.
- [7] Sahoo, B. and Maity, D. (2007), "Damage assessment of structures using hybrid neuro-genetic algorithm", *Applied Soft Computing*, Vol. 7, pp. 89-104.
- [8] Yan, W.-J., Ren, W.-X. and Huang, T.-L. (2012), "Statistic structural damage detection based on the closed-form of element modal strain energy sensitivity", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 28, pp. 183-194.
- [9] Xu, X.F., Zhang, F. and Zhu, W.X. (2013), "Damage detection of continuous box girder based on modal flexibility curvature method", *Advanced Materials Research*, Vol. 671-674, pp. 1016-1020.
- [10] Xu, B., Zhang, T., Song, G. and Gu, H. (2013), "Active interface debonding detection of a concrete-filled steel tube with piezoelectric technologies using wavelet packet analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 36, pp. 7-17.
- [11] Katunin A. (2015), "Stone impact damage identification in composite plates using modal data and quincunx wavelet analysis", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 251-261.
- [12] Yang, Z.B., Radzienski, M., Kudela, P. and Ostachowicz, W. (2016), "Fourier spectral-based modal curvature analysis and its application to damage detection in beams", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 84, pp. 763-781.
- [۱۳] قدرتی امیری، غ.ر.، طالب‌زاده، م.، طالبی، م. و تبریزیان، ز. (۱۳۹۵)، "ارزیابی آسیب در اتصالات قاب‌های خمشی به کمک تبدیل هیلبرت-هوانگ"، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۲-۳۲، شماره ۱/۱، ص. ۱۱-۳.
- [14] Ding, Z., Yao, R., Huang, J., Huang, M. and Lu, Z. (2017), "Structural damage detection based on residual force vector and imperialist competitive algorithm", *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 62, pp. 709-717.
- [15] Yang, C. and Oyadiji, S.O. (2017), "Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface", *Journal of Computers and Structures*, Vol. 179, pp. 109-126.
- ۱- هر دو شاخص انحنایی در شناسایی و تعیین موقعیت آسیب‌ها عملکرد شناسایی موفقی دارند.
- ۲- در شناسایی آسیب با استفاده از شاخص انحنایی DI1 علاوه بر موقعیت‌های آسیب، موقعیت‌های دیگری به عنوان آسیب معرفی گردید که در آن موقعیت‌ها در اصل آسیبی وجود ندارد؛ بنابراین، با استفاده از شاخص انحنایی DI1 تنها می‌توان گفت که در موقعیت‌های شناسایی شده احتمال آسیب وجود دارد؛ به بیان دیگر، مکان‌یابی آسیب مبتنی بر شاخص انحنایی DI1 با عدم قطعیت شناسایی همراه است.
- ۳- هر یک از مکان‌های شناسایی شده با شاخص انحنایی DI2 یک موقعیت محتمل آسیب را نشان می‌دهد؛ به بیان دیگر، با اطمینان می‌توان گفت در تمامی مکان‌های شناسایی شده با شاخص انحنایی DI2 آسیب وجود دارد و مکان‌یابی آسیب بر مبنای DI2 با قطعیت شناسایی همراه است.
- ۴- با اینکه مقادیر بار محوری بر مقادیر فرکانسی اثرگذار است، با این وجود شاخص‌های انحنایی پیشنهادی در روند شناسایی آسیب متأثر از مقدار بار محوری نیستند؛ و این یک امتیاز مثبت در روند شناسایی و تعیین موقعیت آسیب محسوب می‌گردد. به عبارتی، در یک مسئله واقعی تشخیص آسیب در عضو سازه‌ای ستون با استفاده از شاخص‌های DI1 و DI2 دیگر نباید نگران اثرگذاری مقدار بار محوری بر نتایج شناسایی آسیب بود.
- ۵- با افزایش شدت آسیب یک موقعیت آسیب، مقدار شاخص انحنایی تشخیصی آسیب سایر موقعیت‌های آسیب دچار تغییر نمی‌شود و تنها مقدار شاخص انحنایی تشخیص آسیب آن موقعیت آسیب افزایش می‌یابد.
- ۶- با تغییر مقطع ستون، همچنان نتایج شناسایی و مکان‌یابی موفقی حاصل می‌گردد. همچنین، مقادیر شاخص انحنایی تشخیص آسیب متأثر از سطح مقطع ستون است.
- ۷- بررسی‌های شرایط تکیه‌گاهی نشان می‌دهد که شاخص انحنایی تشخیص آسیب همچنان نتایج شناسایی و مکان‌یابی موفقی دارد. همچنین، شرایط تکیه‌گاهی بر مقدار شاخص انحنایی تشخیص آسیب در موقعیت‌های آسیب اثرگذار است؛ به طوری که در نواحی انتهایی آزاد، شناسایی با ایجاد پرس کمتری در موقعیت آسیب انجام می‌شود.
- شاخص‌های DI1 و DI2 به ترتیب به عنوان شاخص مکان‌یاب احتمالی وجود آسیب و شاخص مکان‌یاب قطعی آسیب مبتنی بر انحنای در مسائل واقعی پایش سلامتی سازه‌ها با عملکرد شناسایی کارآمد پیشنهاد می‌گردد.

- [۱۶] درویشان، ا. (۱۳۹۸)، "تشخیص آسیب دیدگی در پل‌های کابلی با استفاده از آنالیز دامنه فرکانس و خوشه‌بندی داده‌ها"، نشریه مهندسی عمران امیرکبیر، دوره ۵۱، شماره ۴، ص. ۷۶۷-۷۸۰.
- [۱۷] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and Esfandiari, A. (2019), "Structural health monitoring of a concrete-filled tube column", Magazine of Civil Engineering, Vol. 85, pp. 136-145.
- [۱۸] Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and Esfandiari, A. (2021), "Active interface debonding detection of a concrete filled tube (CFT) column by modal parameters and continuous wavelet transform (CWT) technique", Structural Monitoring and Maintenance, Vol. 8, pp. 69-90.
- [۱۹] Mirzaei, B., Nasrollahi, K., Yousefibeik, S., Ghodrati Amiri, G. and Zare Hosseinzadeh, A. (2019), "A two-step method for damage identification and quantification in large trusses via wavelet transform and optimization algorithm", Journal of Rehabilitation in Civil Engineering, Vol. 7, pp. 1-20.
- [۲۰] تیموری، ط. و محمودی صاحبی، م. (۱۳۹۹)، "شناسایی آسیب در اتصالات صلب قاب‌های فولادی در ارتفاع و پلان سازه‌ها با استفاده از روش انحنای مودی اصلاح شده"، نشریه مهندسی عمران شریف، دوره ۳۲-۳، شماره ۱/۱، ص. ۱۱-۳.
- [۲۱] Khanahmadi, M., Gholhaki, M. and Rezaifar, O. (2021), "Damage identification of column under the axial load based on wavelet transform and modal data", Journal of Modeling in Engineering, Vol. 18, pp. 51-64.
- [۲۲] Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. (2021), "Damage detection in steel plates based on comparing analytical results of the discrete 2-D wavelet transform of primary and secondary modes shape", Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 8, pp. 198-214.
- [۲۳] Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. (2021), "Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm", Journal of Structural and Construction Engineering, Vol. 8, pp. 289-309.
- [۲۴] Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalebahman, A. and Khademi-Kouhi, M. (2022), "Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method", Journal of Vibration and Sound, Vol. 10, pp. 144-156.
- [۲۵] خان احمدی، م.، محمدی گرامی، ح.، قلعه‌کی، م.، دژکام، ب. و میری، م. ا. (۱۴۰۰)، "رديابی آسیب مبتنی بر موجک در المان سازه‌ای تیر فولادی"، نشریه علمی و پژوهشی سازه و فولاد، دوره ۱۵، شماره ۳۳، ص. ۲۷-۱۵.

پی نوشت

- ¹ Structural control and health monitoring
- ² Destructive damage detection
- ³ Non-destructive damage detection
- ⁴ Local methods
- ⁵ Global methods
- ⁶ Ultrasonic test
- ⁷ Radiographic method
- ⁸ Magnetic particle test
- ⁹ Neuro-genetic algorithm
- ¹⁰ Quincunx
- ¹¹ Hilbert-Huang transform
- ¹² Imperialist competitive algorithm
- ¹³ Residual force vector
- ¹⁴ Modal frequency surface
- ¹⁵ Wavelet transform

