

# شناسایی و تشخیص آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از مشخصات مودال و شاخص تشخیصی مبتنی بر شکل های مود

مجتبم خان احمدی (دانشجوی دکتری)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه کردستان، سنندج

مجید پورامینیان\* (استادیار)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد راهسر

حمید محمدی گرقمی (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان

بهزاد دزکام (کارشناس ارشد و عضو هیئت علمی)

گروه مهندسی عمران، دانشگاه ولایت، ابراهیمپور

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۴۰۱ (دوره ۲ - شماره ۴/۲، ص. ۶۳-۵۳، پژوهشی)

پایش سلامت سازه‌ها از ضروریات اولیه نگهداری سازه و تأمین ایمنی ساکنان آن است. با شناسایی به موقع المان‌های آسیب‌دیده می‌توان تا حد ممکن از وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیر جلوگیری کرد. ستون‌ها از مهم‌ترین المان‌های سازه‌های ساختمانی و پل‌ها هستند، که آسیب در آنها می‌تواند بیش از سایر المان‌ها، سلامت کلی سازه را با مشکل مواجه سازد. در نوشتار حاضر، با هدف تعیین موقعیت آسیب ستون تحت اثر بار محوری بر اساس شکل‌های اولیه و ثانویه مودهای ارتعاشی، یک شاخص تشخیصی مبتنی بر شیب و انحنای مود پیشنهاد و کارایی آن در تعیین موقعیت آسیب ستون بررسی شده است. نتایج نشان دادند که شاخص پیشنهادی به موقعیت آسیب حساس است و با ایجاد بیشینه‌های نسبی در منطقه‌ی آسیب، موقعیت آسیب با خطای کمتر از ۱٪ قابل شناسایی است. همچنین، علی‌رغم این‌که مقدار بار محوری بر مقادیر بسامد اثرگذار است، تأثیری بر مقادیر شاخص تشخیصی آسیب ندارد.

mohtasham.khanahmadi@uok.ac.ir  
majid.pouraminian@iau.ac.ir  
h.garfamy@semnan.ac.ir  
b.dezhkam@velayat.ac.ir

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه، ایمنی سازه، شناسایی آسیب ستون، بار محوری، شاخص تشخیصی انحنای مود.

## ۱. مقدمه

در حوزه‌ی تشخیص و پایش سلامتی سازه، آسیب عبارت از هرگونه تغییر در خواص ماده یا هندسه‌ی سازه است، که می‌تواند عملکرد کلی سازه را تحت تأثیر قرار دهد و تغییراتی در پاسخ‌های سازه به وجود آورد. با فرض این‌که آسیب در سازه باعث اختلال در پاسخ‌های سازه در موقعیت‌های آسیب می‌شود، تاکنون نوشتارهای علمی ارزشمندی منتشر شده است.

پانندی<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۱)<sup>[۱]</sup> از انحنای شکل مود برای تعیین موقعیت آسیب یک تیرکنسولی و یک تیر دو سر مفصل استفاده کردند و نشان دادند که انحنای شکل مود نسبت به آسیب‌های وارده حساس است. بام<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۲)<sup>[۲]</sup> یک شاخص آسیب مبتنی بر انحنای شکل مود ارائه کردند و کارایی آن را در شناسایی آسیب صفحه‌ی آلومینیومی ترک‌خورده نشان دادند. ساهو و مایتی<sup>۳</sup> (۲۰۰۷)<sup>[۳]</sup> برای ارزیابی سلامت سازه از الگوریتم ژنتیک عصبی، بر اساس این حقیقت که آسیب تأثیر قابل توجهی در رفتار استاتیکی سازه دارد، استفاده کردند. شی<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۹)<sup>[۴]</sup> برای شناسایی آسیب، شاخص انرژی کرنشی مودال را بررسی کردند و

سازه‌های مهندسی شرایط بارگذاری و محیطی متعددی را تجربه می‌کنند. با فرسوده شدن المان‌ها در برخی موقعیت‌ها و تشدید میزان خسارت آنها تحت اثر عواملی، همچون زلزله، بهره‌برداری بیش از ظرفیت طراحی اعضا، انفجار و تغییرات دمایی، سلامت کلی سازه با مشکل مواجه می‌شود. لذا پایش و ارزیابی سلامتی سازه‌ها مورد توجه بسیاری از پژوهشگران بوده و مطالعات ارزشمندی در ارتباط با سلامتی سازه‌ها و اعضاء آنها صورت گرفته است.

در یک تقسیم‌بندی کلی، پایش سلامتی در سازه‌ها شامل ۴ مرحله است، که عبارت‌اند از: ۱- آیا در سازه آسیب وجود دارد یا خیر؟؛ ۲- اگر سازه آسیب دیده است، موقعیت آسیب کجاست؟؛ ۳- مقدار خسارت در موقعیت آسیب چگونه محاسبه شود؟ و ۴- برآورد عمر باقی‌مانده‌ی سازه‌ی محتمل آسیب.

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۴۰۱/۵/۱۲، اصلاحیه ۱۴۰۱/۷/۲۳، پذیرش ۱۴۰۱/۷/۲۷

DOI:10.24200/J30.2022.60873.3129

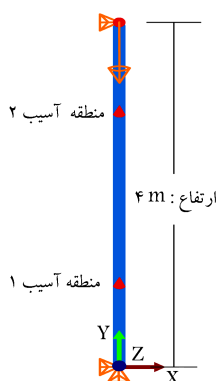
آسیب در تیرها شدند.<sup>[۲۴]</sup> حنطه<sup>۲۱</sup> و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۲۵]</sup> بر مبنای استفاده از تبدیل موجک و شکل‌های مود به شناسایی آسیب در یک سازه‌ی ساختمانی کاملاً پانلی پرداختند. محل آسیب با ایجاد جهش نسبی بیشینه‌ی و کمینه‌ی در ضرایب موجک شناسایی شد. مام عزیز و همکاران (۲۰۲۲)،<sup>[۲۷]</sup> به مطالعه‌ی اثر جداسازی بتن از فولاد در ستون‌های کامپوزیت CFST پرداختند و نشان دادند که با ایجاد جداسازی، مقدار بسامد در تمامی مودها کاهش می‌یابد. آنها شاخصی بر مبنای ضرایب جزئیات حاصل از تحلیل موجک گسسته‌ی شکل‌های مود پیشنهاد دادند و حساسیت آن را به موقعیت‌های جداسازی و شدت‌های مختلف آسیب نشان دادند. بخشی و موسوی (۲۰۲۲)،<sup>[۲۸]</sup> بر پایه‌ی یادگیری عمیق به شناسایی ترک در سازه‌های با مصالح بتایی و اعضا بتنی پرداختند و نشان دادند که روش پیشنهادی نسبت به سایر روش‌های پردازش تصویر، دقت بالایی دارد. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۳)،<sup>[۳۰]</sup> با تعریف یک سیگنال ورودی و به کارگیری تبدیل موجک پیوسته به شناسایی منطقه‌ی جداسازی در ستون‌های کامپوزیت CFST پرداختند و دریافتند که در مقیاس‌های پایین، همگرایی بیشتری از ضرایب موجک به محدوده‌ی آسیب وجود دارد؛ با این حال در مقیاس‌های بالاتر، منطقه‌ی آسیب با وضوح مناسب‌تری قابل شناسایی است.

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که به شناسایی آسیب در عضو ستون تحت اثر بار محوری با استفاده از ویژگی‌های انحنایی شکل‌های مود ارتعاشی پرداخته نشده است. از طرفی، عضو ستون تحت اثر بار محوری قرار دارد و بار محوری در داده‌های دینامیکی مودال اثرگذار است؛ بنابراین، نویسندگان نوشتار حاضر، بر مبنای استفاده از شیب و انحنای شکل‌های مود ارتعاشی به شناسایی آسیب ستون تحت اثر بار محوری پرداخته‌اند.

## ۲. مدل‌سازی ستون تحت اثر بار محوری

ستونی با مقطع مربعی توپُر به طول ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۴ متر، مشخصات مکانیکی مدول کشسانی  $2 \times 10^5$  مگاپاسکال، چگالی  $7850$  کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت بواسون  $0.3$  با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی، تحت اثر بار محوری با در نظر گرفتن وضعیت‌های بدون آسیب و آسیب D1، D2 و D3 در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس<sup>۲۲</sup> با استفاده از المان Wire-Beam مدل‌سازی شده است (شکل ۱).

برای اعتماد به مدل‌سازی نرم‌افزاری، مقدار بار بحرانی مودهای کمانشی ستون با ابعاد مش مختلف در نرم‌افزار اجزاء محدود محاسبه و با مقدار تئوری نظیرشان



شکل ۱. ستون تحت اثر بار محوری با شرایط تکیه‌گاهی مفصلی و موقعیت‌های آسیب.

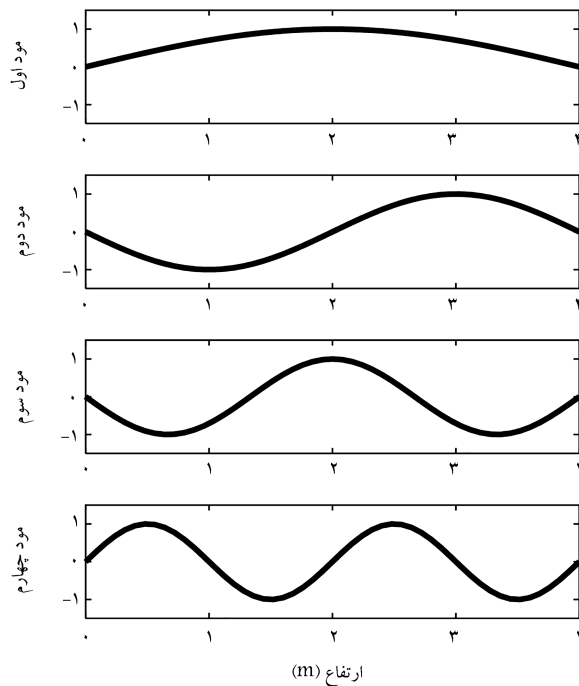
نشان دادند که با استفاده از شاخص مذکور می‌توان آسیب در شاه‌تیرها و عرشه‌ی پل‌ها را شناسایی کرد. روری و کارکاترا<sup>۵</sup> (۲۰۱۲)،<sup>[۵]</sup> از روش تجزیه‌ی تجربی مود (EMD)<sup>۶</sup> برای شناسایی آسیب سازه‌ی پل تحت بارهای عبوری استفاده کردند و موفق شدند با استخراج پالس‌ها در بسامد مود اول، آسیب را شناسایی کنند. در پژوهش دیگری، باو<sup>۷</sup> و همکاران (۲۰۱۳)،<sup>[۶]</sup> یک روش تشخیصی چندمرحله‌ی بر اساس EMD پیشنهاد دادند. ایشان با محاسبه‌ی بسامد لحظه‌ی سیگنال‌های ارتعاشی موفق به شناسایی آسیب شدند. ژو<sup>۸</sup> و همکاران (۲۰۱۳)،<sup>[۷]</sup> روشی بر مبنای انحنای نرمی پیشنهاد دادند که در آن تأثیر تفاوت طول المان‌های مجاور در نظر گرفته شده بود. آنها نشان دادند که روش مذکور قابلیت شناسایی آسیب سازه را دارد. قدرتی امیری و همکاران (۲۰۱۶)،<sup>[۸]</sup> با پردازش شتاب پاسخ ارتعاش آزاد سازه با استفاده از تبدیل هیلبرت - هوانگ، بسامدهای طبیعی و شکل‌های مود سازه را تخمین زدند و با مقایسه‌ی انحنای شکل‌های مود محاسباتی به شناسایی آسیب سازه پرداختند. سان و رن<sup>۹</sup> (۲۰۱۶)،<sup>[۹]</sup> با استفاده از تبدیل موجک به تحلیل آسیب لرزه‌ی<sup>۱۰</sup> در سد بتنی وزنی پرداختند و یک شاخص آسیب کلی<sup>۱۱</sup> پیشنهاد دادند و با استفاده از آن توانستند درجه‌ی خسارت کلی<sup>۱۲</sup> سد را تحت فعالیت‌های لرزه‌ی ایجاد شده تشخیص دهند. نوبهاری و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۱۰]</sup> یک الگوریتم جستجوی موقعیت با استفاده از اکوی صدا برای شناسایی آسیب سازه ارائه دادند و از یک تابع هدف که در برگزیده‌ی تغییرات بسامدهای طبیعی بود، استفاده کردند. یانگ<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۱۷)،<sup>[۱۱]</sup> با استفاده از یک روش ساده‌ی مبتنی بر طیف فوری، انحنای شکل مودها را محاسبه کردند و بر اساس انحنای شکل مود به شناسایی آسیب در تیرها پرداختند. یانگ و ایدجی<sup>۱۴</sup> (۲۰۱۷)،<sup>[۱۲]</sup> به شناسایی خرابی صفحات کامپوزیت چندلایه با استفاده از سطح بسامد مودال<sup>۱۵</sup> پرداختند و نشان دادند که کاهش سختی موضعی لایه‌ها باعث اختلال در سطح بسامد مودال می‌شود و با محاسبه‌ی ضرایب موجک سطح بسامد مودال می‌توان محل و شکل خرابی را مشخص کرد. درویشان (۲۰۱۹)،<sup>[۱۳]</sup> برای تشخیص آسیب سازه‌ی پل کابلی با استفاده از تحلیل دامنه‌ی بسامد و خوشه‌بندی داده‌ها، یک شاخص خسارت با محاسبه‌ی فاصله‌ی اقلیدسی مراکز خوشه‌ها ارائه داد و دریافت که شاخص پیشنهادی می‌تواند با دقت مناسبی حالت‌های سالم و آسیب را از یکدیگر تفکیک کند. لیو<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۲۰)،<sup>[۱۴]</sup> یک روش پایش آسیب آنلاین<sup>۱۷</sup> با استفاده از فیلتر موج فضایی<sup>۱۸</sup> بر اساس همخوانی بسامد<sup>۱۹</sup> برای سازه‌ها ارائه دادند و توانستند وضعیت سلامتی سازه را ارزیابی کنند. یونسی و همکاران (۲۰۱۹) و (۲۰۲۱)،<sup>[۱۶]</sup> بر اساس داده‌های مودال آزمایشگاهی به شناسایی آسیب ستون‌های فولادی پُر شده با بتن (CFST)<sup>۲۰</sup> پرداختند و موفق شدند محل جداسازی بتن از جداری فولادی را شناسایی کنند. خان احمدی و همکاران (۲۰۲۱)،<sup>[۱۷]</sup> با به کارگیری تبدیل موجک و تعریف یک سیگنال ورودی بر مبنای شکل مود به شناسایی آسیب ستون تحت اثر بار محوری پرداختند و مقادیر بار در سیگنال‌های خروجی، محل‌های آسیب را نشان داد. ایشان در پژوهش دیگری (۲۰۲۱)،<sup>[۱۸]</sup> نیز به شناسایی آسیب در صفحات فولادی پرداختند و نشان دادند که اغتشاش‌های ضرایب موجک تولید شده‌ی حالت‌های آسیب در مقایسه با ضرایب موجک تولید شده‌ی حالت سالم در موقعیت‌های مختلف آسیب چشمگیر است. همچنین، آنها با استفاده از روشی مبتنی بر موجک موفق به شناسایی آسیب در صفحات پیش‌ساخته‌ی پانلی و کامپوزیت چندلایه شدند<sup>[۱۹]</sup> و نیز با استفاده از پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی به شناسایی آسیب در تیرها پرداختند و نشان دادند که از تحلیل هر دو نوع پیوسته و گسسته‌ی تبدیلات موجک، می‌توان موقعیت‌های آسیب را شناسایی کرد.<sup>[۲۱-۲۳]</sup> ایشان در ادامه‌ی مطالعات خود نیز با معرفی یک شاخص آسیب بر مبنای ضرایب موجک موفق به شناسایی موقعیت‌های مختلف

جدول ۱. بار محوری بحرانی تئوری و مدل اجزاء محدود ستون سالم (نیوتن).

شماره ی	بار بحرانی کمانشی محوری (نیوتن)	درصد اختلاف
۱	$1/0.3 \times 10^6$	صفر
۲	$4/11 \times 10^6$	۰/۴۸۷
۳	$9/25 \times 10^6$	۰/۹۷۳
۴	$1/65 \times 10^7$	۲/۴۲۴

جدول ۲. مشخصات آسیب در ستون تحت اثر بار محوری.

نام آسیب	تعداد آسیب	ناحیه ی آسیب (متر)	مرکز آسیب (متر)	شدت آسیب (%)
D۱	۱	۰/۱-۹۶/۰۴	۱	۳۰
D۲	۱	۲/۳-۹۶/۰۴	۳	۲۰
D۳	۲	۰/۱-۹۶/۰۴	۱	۳۰
		۲/۳-۹۶/۰۴	۳	۲۰



شکل ۲. شکل های مود وضعیت سالم ستون تحت اثر بار محوری.

اثر آسیب، ظرفیت باربری محوری ستون کاهش می یابد و ممکن است ستون تحت اثر بار محوری کمتر از ظرفیت تعریف شده، دچار کمانش و در نتیجه ناپایداری شود. شدت آسیب منطقه ی آسیب ۲ برای وضعیت D۳ برابر ۲۰٪ مد نظر است. بار بحرانی وضعیت آسیب D۳ با شدت های آسیب ۳۰ و ۲۰ درصد در مناطق آسیب ۱ و ۲ به عنوان بار بحرانی بدترین وضعیت آسیب انتخاب شده است. در نسبت های مختلف از بار بحرانی، در صورتی که شدت آسیب مناطق آسیب ۱ و ۲ به ترتیب از ۳۰ و ۲۰ درصد بیشتر نشود، ستون پایداری خود را حفظ می کند.

#### ۴. اثر بار محوری بر مقادیر بسامد

در شکل ۲، شکل های مود ارتعاشی ستون تحت اثر بار محوری مشاهده می شود.

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

شدت آسیب (%)	بار کمانشی بحرانی ( $\times 10^6$ )
صفر	۱/۰۲۶۹
۱۰	۱/۰۲۴۶
۲۰	۱/۰۲۱۸
۳۰	۱/۰۱۸۱
۴۰	۱/۰۱۳۲
۵۰	۱/۰۰۶۴
۶۰	۰/۹۹۶۱
۷۰	۰/۹۷۹۱
۸۰	۰/۹۴۵۵
۹۰	۰/۸۴۹۱

برای وضعیت سالم ستون مقایسه شده است. نتایج نشان داد که ابعاد مش به طول ۸ سانتی متر برای ادامه ی پژوهش مناسب است (جدول ۱). مقدار تئوری بار کمانشی بحرانی مود اول مطابق رابطه ۱ محاسبه شده است:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \times 2000000 \times 10^{-4}}{42 \times 12} \approx 1/0.3 \times 10^6 N \quad (1)$$

در جدول ۲، مشخصات آسیب ارائه شده است. مدول کشسانی ناحیه ی آسیب مطابق رابطه ۲ محاسبه شده است:

$$E_d = \%(100 - d) E_u \quad (2)$$

که در آن،  $E_d$  و  $E_u$  به ترتیب مدول کشسانی نواحی سالم و آسیب و  $d$  شدت آسیب است.

#### ۳. بررسی اثر شدت آسیب بر بار محوری بحرانی

در جدول ۳، مقادیر بار بحرانی ستون با وضعیت های آسیب D۱ تا D۳ ارائه شده است؛ که مطابق آن، با افزایش شدت آسیب، مقدار بار بحرانی کاهش یافته و این دلیلی بر اهمیت و ضرورت پایش سلامتی ستون تحت اثر بار محوری بوده است. در

شاخص تشخیصی مود  $i$  ام در موقعیت  $j$ ، ذیلاً با رابطه ی ۳ تعریف می شود:

$$DI_{i,j} = \left| \left( \kappa_{i,j}^u - \kappa_{i,j}^d \right) \left( \phi_{i,j}^d \times \phi_{i,j}^d \right) + \left( \theta_{i,j}^u - \theta_{i,j}^d \right) \times \phi_{i,j}^u \right| \quad (3)$$

که در آن،  $\phi_{i,j}^d$  و  $\phi_{i,j}^u$  مقدار شکل های اولیه و ثانویه ی مود  $i$  ام در موقعیت  $j$  ام است. همچنین،  $\theta_{i,j}^d$  و  $\theta_{i,j}^u$  مقدار شیب شکل های اولیه و ثانویه ی مود  $i$  ام در موقعیت  $j$  ام است، که مطابق روابط ۴ و ۵ تعریف می شوند:

$$\theta_{i,j}^u = (\phi_{i,j+1}^u - \phi_{i,j-1}^u) / (x_{j+1} - x_{j-1}) \quad (4)$$

$$\theta_{i,j}^d = (\phi_{i,j+1}^d - \phi_{i,j-1}^d) / (x_{j+1} - x_{j-1}) \quad (5)$$

همچنین در رابطه ی ۳، پارامترهای  $k_{i,j}^d$  و  $k_{i,j}^u$  به ترتیب مقدار انحنای شکل های اولیه و ثانویه ی مود  $i$  ام در موقعیت  $j$  ام است و مطابق روابط ۶ و ۷ تعریف می شوند:

$$\kappa_{i,j}^u = 4(\phi_{i,j-1}^u - 2\phi_{i,j}^u + \phi_{i,j+1}^u) / (x_{j+1} - x_{j-1})^2 \quad (6)$$

$$\kappa_{i,j}^d = 4(\phi_{i,j-1}^d - 2\phi_{i,j}^d + \phi_{i,j+1}^d) / (x_{j+1} - x_{j-1})^2 \quad (7)$$

نرمال شده ی بردار شاخص های تشخیصی مود  $i$  ام نیز مطابق رابطه ی ۸ تعریف می شود:

$$DI_i = \max \left\{ 0, \frac{[DI_{i,j}] - 1/5\mu [DI_{i,j}]}{\max [DI_{i,j}] - \min [DI_{i,j}]} \right\} \quad (8)$$

که در آن،  $\mu [DI_{i,j}]$  مقدار متوسط بردار شاخص های شناسایی آسیب مود  $i$  ام است و ذیلاً مطابق رابطه ی ۹ تعریف می شود:

$$\mu [DI_{i,j}] = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n DI_{i,j} \quad (9)$$

محاسبات بردار شاخص های تشخیصی  $DI_i$  با انجام کدنویسی در محیط متلب <sup>۲۳</sup> (۲۰۲۱a) برای وضعیت های مختلف آسیب انجام شده است. نتایج نموداری در شکل های ۳ الی ۵، برای وضعیت های آسیب ستون تحت اثر بار محوری  $\Delta P_{cr} / \Delta P_{cr} = 0$  مقادیر بیشینه ی نسبی رخ داده در موقعیت های آسیب (که با رنگ قرمز مشخص شده است) مشاهده می شوند.

در جدول ۶، درصد خطای شناسایی بر اساس مقدار بیشینه ی نسبی رخ داده در نمودارها و مرکز ناحیه ی آسیب محاسبه شده است (رابطه ی ۱۰):

$$e = \% \left( \frac{1}{h} |z(DI_{i,max}) - z(D)| \right) \quad (10)$$

که در آن،  $z(DI_{i,max})$  و  $z(D)$  به ترتیب موقعیت مکانی بیشترین مقدار شاخص های شناسایی آسیب (در منطقه ی آسیب) و موقعیت مکانی مرکز واقعی آسیب و  $h$  ارتفاع ستون (برابر با ۴ متر) و  $e$  درصد خطای شناسایی محاسبه شده است. بیشترین مقدار خطای شناسایی ۱٪ بوده است، که خطای ناچیزی است.

## ۱.۵. اثر سایر نسبت های باری بر بردار شاخص های شناسایی

بررسی ها برای دیگر نسبت های باری نیز انجام شده است. نتایج نشان می دهند که نسبت های باری مختلف، کمترین تأثیر را بر مقدار شاخص های شناسایی آسیب

تحلیل بسامدی ستون تحت اثر نسبت های مختلف از بار محوری بحرانی (بار بحرانی وضعیت آسیب  $D3$ ) برای وضعیت های بدون آسیب و با آسیب انجام شده و مقادیر بسامدی نظیر شکل های مود سالم و آسیب  $D1$  (به عنوان نمونه) در جدول های ۴ و ۵ ارائه شده است. مشاهده می شود که مقدار بسامد مودها در هر دو وضعیت سالم و آسیب با افزایش بار محوری کاهش یافته است. همچنین، در تمامی نسبت های باری، بسامد وضعیت آسیب از بسامد وضعیت سالم کمتر بوده است.

## ۵. شناسایی آسیب

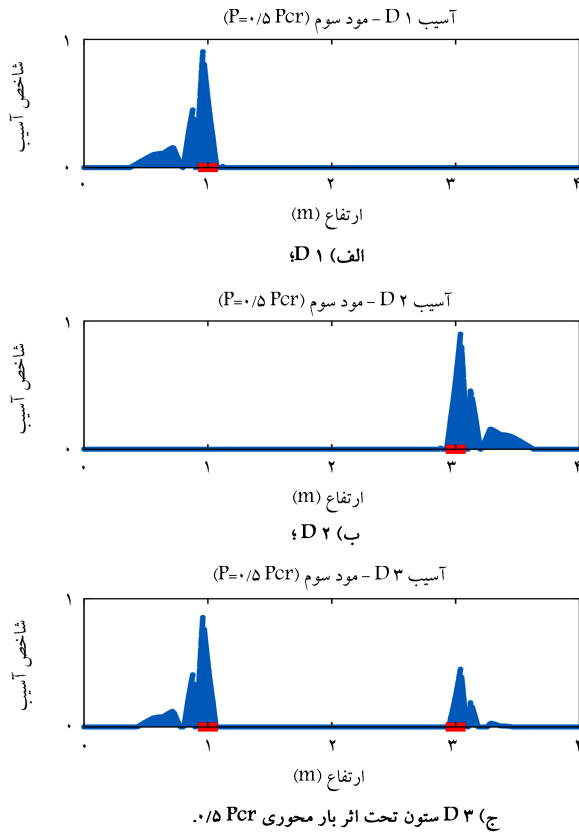
فرض اساسی در تشخیص و تعیین موقعیت آسیب این است که در اثر آسیب، پاسخ های سازه در موقعیت های خسارت، دچار اختلال و بی نظمی می شود. در بیشتر اوقات، بی نظمی های رخ داده در پاسخ ها با بررسی های چشمی قابل شناسایی و تشخیص نیست؛ بنابراین، لازم است روش های پردازشی ارائه شود، که اغلب آنها به پیشنهاد شاخص شناسایی می انجامد. در نوشتار حاضر، یک شاخص تشخیصی مبتنی بر شیب و انحنای شکل های اولیه و ثانویه ی مودهای ارتعاشی به این شرح پیشنهاد و کارایی آن در شناسایی و تعیین موقعیت های مختلف آسیب در ستون تحت اثر نسبت های مختلف از بار بحرانی بررسی شده است.

جدول ۴. اثر نسبت های مختلف بار بر مقادیر بسامد ستون سالم (Hz).

$P/P_{cr}$	بسامد طبیعی (Hz)			
	$\omega_4$	$\omega_3$	$\omega_2$	$\omega_1$
صفر	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. اثر نسبت های مختلف بار بر مقادیر بسامد ستون با آسیب  $D1$  (Hz).

$P/P_{cr}$	بسامد طبیعی (Hz)			
	$\omega_4$	$\omega_3$	$\omega_2$	$\omega_1$
صفر	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 ۵. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود سوم حالت آسیب.

دارند؛ به طوری که می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. به عنوان مثال، نتایج نموداری مود اول برای وضعیت آسیب D3 مربوط به  $0.1P_{cr}$ ،  $0.5P_{cr}$  و  $0.9P_{cr}$  در شکل ۶ مشاهده می‌شود. دلیل ناچیز بودن اثر بار محوری بر شاخص شناسایی آسیب با استفاده از معیار همبستگی مودال (MAC)  $^{24}$ ، که مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود،<sup>[۲۲ و ۲۳]</sup> بررسی شده است:

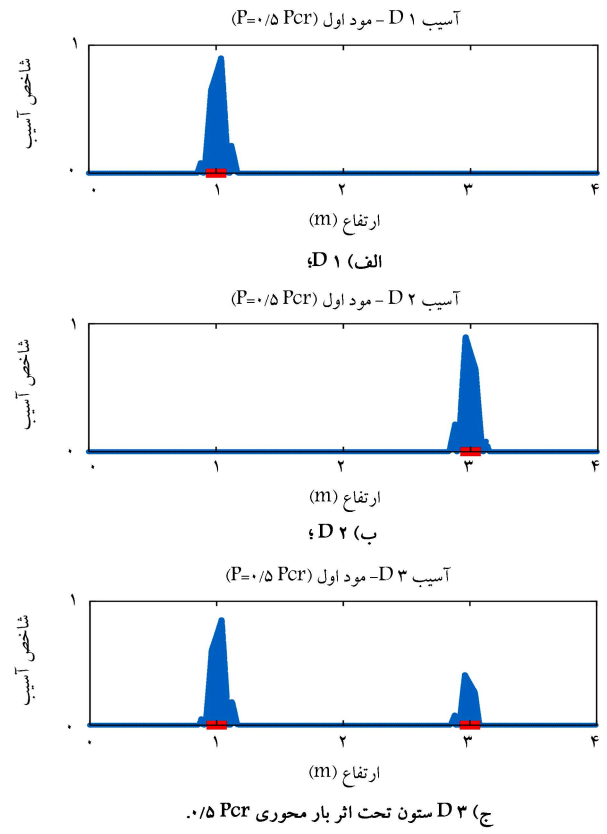
$$MAC_{i,j} = \frac{\left( \sum_{k=1}^n \left( \phi_{i,k}^{u,P_1} \times \phi_{j,k}^{u,P_2} \right) \right)^2}{\left( \sum_{k=1}^n \left( \phi_{i,k}^{u,P_1} \right)^2 \right) \left( \sum_{k=1}^n \left( \phi_{j,k}^{u,P_2} \right)^2 \right)} \quad (11)$$

که در آن،  $\phi_{i,k}^{u,P_1}$  و  $\phi_{j,k}^{u,P_2}$  به ترتیب شکل‌های مود  $i$  و  $j$  از م سالم تحت اثر بار محوری  $P_1$  و  $P_2$  در موقعیت  $k$  هستند. همچنین مقادیر MAC، همواره بین صفر و ۱ قرار دارد (رابطه‌ی ۱۲):

$$LMAC = -\log(MAC) \geq 0 \quad (12)$$

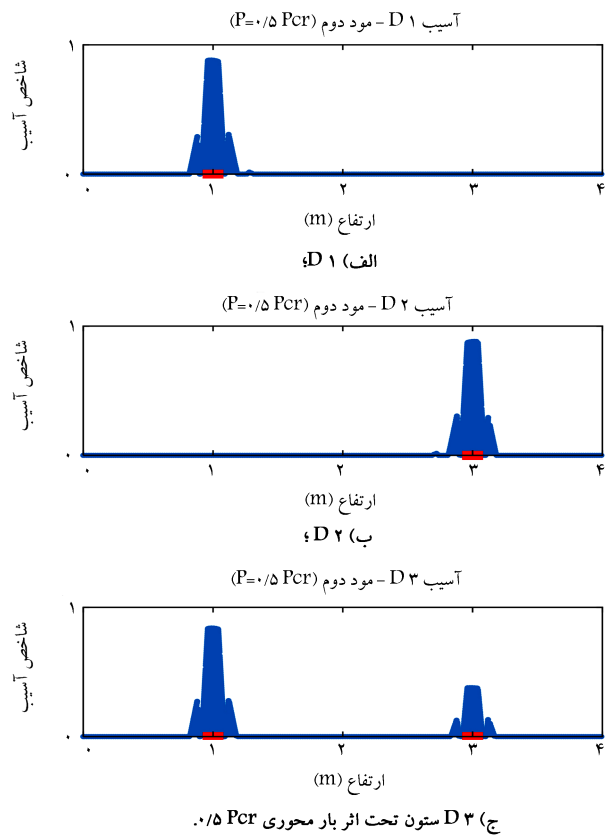
مقادیر LMAC برای حالتی که  $P_1 = P_2$  برابر با  $0.1P_{cr}$  تا  $0.5P_{cr}$  است، که در جدول‌های ۷ الی ۱۱ ارائه شده‌اند. مشاهده می‌شود که درایه‌های قطری LMAC برابر با صفر هستند. محاسبات تا  $10^0$  رقم اعشار انجام شده و همچنان، مقدار صفر برای درایه‌های قطری به دست آمده است. همچنین مشاهده می‌شود که ماتریس‌های LMAC با دقت ۳ رقم اعشار متقارن هستند؛ یعنی، اثر بار محوری بر جابه‌جایی نسبی درجه‌های آزادی شکل‌های مود ارتعاشی، بسیار ناچیز است.

دقت‌های محاسباتی با دست‌کم ۴ رقم اعشار نشان می‌دهند که ماتریس‌های LMAC کاملاً متقارن نیستند و در نتیجه، مقادیر درایه‌های قطری بسیار نزدیک به



شکل ۳. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود اول حالت آسیب.

دارند؛ به طوری که می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. به عنوان مثال، نتایج نموداری مود اول برای وضعیت آسیب D3 مربوط به  $0.1P_{cr}$ ،  $0.5P_{cr}$  و  $0.9P_{cr}$  در شکل ۶ مشاهده می‌شود. دلیل ناچیز بودن اثر بار محوری بر شاخص شناسایی آسیب با استفاده از معیار همبستگی مودال (MAC)  $^{24}$ ، که مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود،<sup>[۲۲ و ۲۳]</sup> بررسی شده است:

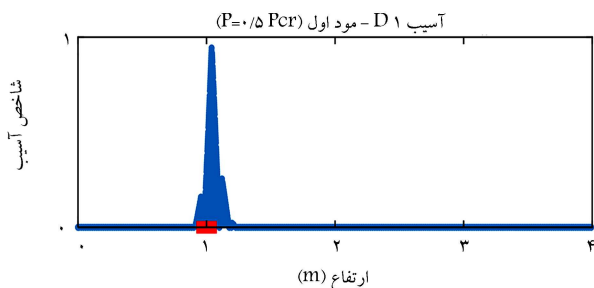


شکل ۴. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود دوم حالت آسیب.

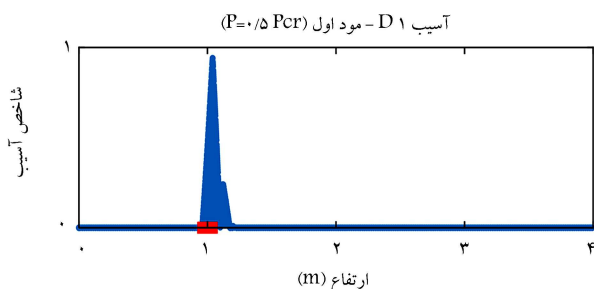
دارند؛ به طوری که می‌توان از آنها صرف‌نظر کرد. به عنوان مثال، نتایج نموداری مود اول برای وضعیت آسیب D3 مربوط به  $0.1P_{cr}$ ،  $0.5P_{cr}$  و  $0.9P_{cr}$  در شکل ۶ مشاهده می‌شود. دلیل ناچیز بودن اثر بار محوری بر شاخص شناسایی آسیب با استفاده از معیار همبستگی مودال (MAC)  $^{24}$ ، که مطابق رابطه‌ی ۱۱ تعریف می‌شود،<sup>[۲۲ و ۲۳]</sup> بررسی شده است:

جدول ۶. مقادیر درصد خطای شناسایی موقعیت‌های آسیب بر اساس بیشینه‌های نسبی و مراکز آسیب.

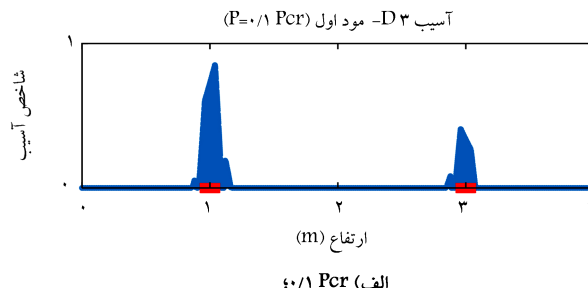
حالت آسیب	مرکز آسیب (متر)	مقدار بیشینه‌ی شاخص شناسایی			مرکز شناسایی شده‌ی آسیب			خطای شناسایی (%)		
		مود اول	مود دوم	مود سوم	مود اول	مود دوم	مود سوم	مود اول	مود دوم	مود سوم
D1	۱	۰/۹۰۲۵	۰/۸۸۲۵	۰/۹۰۴۵	۱/۰۳۹۴	۰/۹۸۳۷	۰/۹۶۰۲	۰/۹۸۵۵	۰/۴۰۶۹	۰/۹۹۵۳
D2	۳	۰/۹۰۲۵	۰/۸۸۲۰	۰/۹۰۳۹	۲/۹۶۰۶	۳/۰۱۳۹	۳/۰۳۹۸	۰/۹۸۵۵	۰/۳۴۸۱	۰/۹۹۵۳
D3	۱	۰/۸۵۳۰	۰/۸۴۰۳	۰/۸۵۹۵	۱/۰۳۹۴	۰/۹۸۳۷	۰/۹۶۰۲	۰/۹۸۵۵	۰/۴۰۶۹	۰/۹۹۵۳
	۳	۰/۴۰۸۵	۰/۳۷۸۷	۰/۴۵۴۱	۲/۹۶۰۶	۳/۰۱۳۹	۳/۰۳۹۸	۰/۹۸۵۵	۰/۳۴۸۱	۰/۹۹۵۳



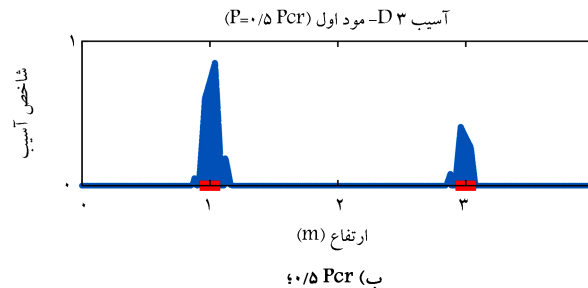
الف) مربع تو خالی؛



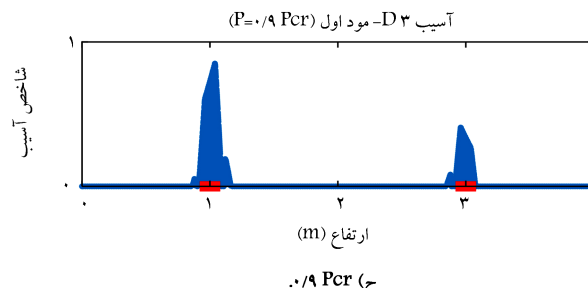
ب) دایره بی.



الف) Pcr 0.1؛



ب) Pcr 0.5؛



ج) Pcr 0.9؛

شکل ۷. نمودار شاخص تشخیصی مود اول ستون با آسیب D1 تحت اثر بار محوری  $P_{cr}/0.5$  و مقطع.

عنوان مثال، در شکل ۷، نتیجه‌ی نموداری برای مود اول مشاهده می‌شود، که مطابق آن، جهش در نمودار شاخص‌های شناسایی آسیب در موقعیت آسیب اتفاق افتاده است.

شکل ۶. نمودار شاخص‌های تشخیصی مود اول حالت آسیب D3 برای بار محوری.

صفر هستند. از مقایسه‌ی جدول‌های ۷ الی ۱۱ مشاهده می‌شود که ماتریس‌های محاسباتی LMAC با دقت ۳ رقم اعشار برابر هستند؛ لذا، علی‌رغم تأثیر مقدار بار محوری بر مقادیر بسامد، آثار بار بر شکل‌های مود ارتعاشی بسیار ناچیز است.

### ۳.۵. بررسی اثر شدت آسیب بر شاخص‌های شناسایی

برای بررسی تأثیر میزان شدت آسیب یک موقعیت محتمل آسیب بر شاخص‌های تشخیصی موقعیت‌های مختلف آسیب لازم است که رابطه‌ی ۸ به شکل رابطه‌ی ۱۳ تعریف شود:

$$DI_i = \max \left\{ 0, [DI_{i,j}] - 1/5 \mu [DI_{i,j}] \right\} \quad (13)$$

در این صورت می‌توان تأثیر شدت آسیب را بر بردار شاخص‌های تشخیصی بررسی کرد.

بررسی‌ها با استفاده از شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مود ارتعاشی اول برای وضعیت

آسیب D3 با تعریف مقادیر شدت آسیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در موقعیت ۱

### ۲.۵. بررسی اثر مقطع در شاخص‌های شناسایی

شناسایی آسیب ستون با مقاطع مربعی تو خالی و دایره‌یی تحت اثر بار محوری برای وضعیت آسیب D1 در مدهای مختلف انجام شده است. نتایج نموداری نشان می‌دهند که مقدار بیشینه‌ی نسبی در موقعیت آسیب اتفاق افتاده است. به

جدول ۷. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری  $P_1 = 0$  و  $P_2 = 0/1P_{cr}$ .

شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری						LMAC	
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۴/۰۴۷۹	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۱۰۶	۱۳/۸۷۳۰	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱	شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری
۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۲	
۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۳/۸۷۳۰	۳	
۱۴/۹۶۹۱	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۰۱۰۶	۴	
۱۷/۶۷۲۸	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۷۲۲۴	۱۴/۳۷۳۲	۱۵/۲۶۰۰	۵	
۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۲۶	۱۴/۹۶۹۱	۱۴/۲۵۶۰	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۰۴۷۹	۶	

جدول ۸. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری  $P_1 = 0$  و  $P_2 = 0/2P_{cr}$ .

شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری						LMAC	
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۴/۰۴۷۹	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۱۰۶	۱۳/۸۷۳۰	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱	شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری
۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۲	
۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۳/۸۷۳۰	۳	
۱۴/۹۶۹۱	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۰۱۰۶	۴	
۱۷/۶۷۲۹	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۷۲۲۳	۱۴/۳۷۳۲	۱۵/۲۶۰۰	۵	
۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۲۶	۱۴/۹۶۹۱	۱۴/۲۵۶۰	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۰۴۷۹	۶	

جدول ۹. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری  $P_1 = 0$  و  $P_2 = 0/3P_{cr}$ .

شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری						LMAC	
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۴/۰۴۷۹	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۱۰۶	۱۳/۸۷۳۰	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱	شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری
۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۲	
۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۳/۸۷۳۰	۳	
۱۴/۹۶۹۱	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۰۱۰۶	۴	
۱۷/۶۷۳۰	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۷۲۲۳	۱۴/۳۷۳۲	۱۵/۲۶۰۰	۵	
۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۲۶	۱۴/۹۶۹۱	۱۴/۲۵۶۰	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۰۴۷۹	۶	

جدول ۱۰. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری  $P_1 = 0$  و  $P_2 = 0/4P_{cr}$ .

شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری						LMAC	
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۱۴/۰۴۷۹	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۱۰۶	۱۳/۸۷۳۰	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱	شماره‌ی مود ستون بدون اثر بار محوری
۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۲	
۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۳/۸۷۳۰	۳	
۱۴/۹۶۹۱	۱۶/۸۶۳۵	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۰۱۰۶	۴	
۱۷/۶۷۳۱	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۵	۱۴/۷۲۲۳	۱۴/۳۷۳۲	۱۵/۲۶۰۰	۵	
۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۲۵	۱۴/۹۶۹۱	۱۴/۲۵۶۰	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۰۴۷۹	۶	

جدول ۱۱. مقادیر LMAC بین شکل‌های مود تحت اثر بارهای محوری  $P_1 = 0$  و  $P_2 = 0.5P_{cr}$ .

شماره‌ی مود	شماره‌ی مود ستون تحت اثر بار محوری						LMAC
	۶	۵	۴	۳	۲	۱	
۱	۱۴/۰۴۷۹	۱۵/۲۶۰۱	۱۴/۰۱۰۶	۱۳/۸۷۳۰	۱۵/۱۴۴۲	۰/۰۰۰۰	۱
۲	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۳۷۳۲	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۵۴۱۱	۰/۰۰۰۰	۱۵/۱۴۴۲	۲
۳	۱۴/۲۵۶۰	۱۴/۷۲۲۳	۱۶/۲۳۸۱	۰/۰۰۰۰	۱۴/۵۴۱۱	۱۳/۸۷۳۰	۳
۴	۱۴/۹۶۹۱	۱۶/۸۶۳	۰/۰۰۰۰	۱۶/۲۳۸۱	۱۴/۸۴۱۲	۱۴/۰۱۰۶	۴
۵	۱۷/۶۷۳۲	۰/۰۰۰۰	۱۶/۸۶۳۴	۱۴/۷۲۲۴	۱۴/۳۷۳۲	۱۵/۲۶۰۰	۵
۶	۰/۰۰۰۰	۱۷/۶۷۲۵	۱۴/۹۶۹۱	۱۴/۲۵۶۰	۱۳/۶۹۹۸	۱۴/۰۴۷۹	۶

جدول ۱۲. مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت‌های مختلف آسیب.

نام آسیب	بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی آسیب در موقعیت آسیب (مرکز آسیب برابر با ۳ متر)	بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی آسیب در موقعیت آسیب (مرکز آسیب برابر ۱ متر)
D3-10-20	۰/۰۳۳۵۶۷۶	۰/۰۱۰۶۴۹۳
D3-20-20	۰/۰۳۰۵۹۰۳	۰/۰۳۰۵۹۰۴
D3-30-20	۰/۰۲۶۹۳۳۱	۰/۰۵۶۲۴۳۷

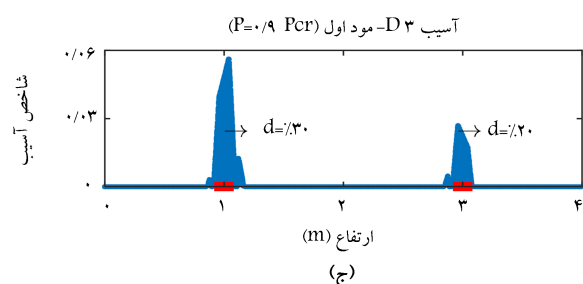
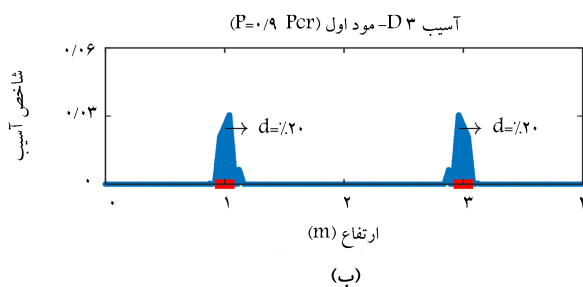
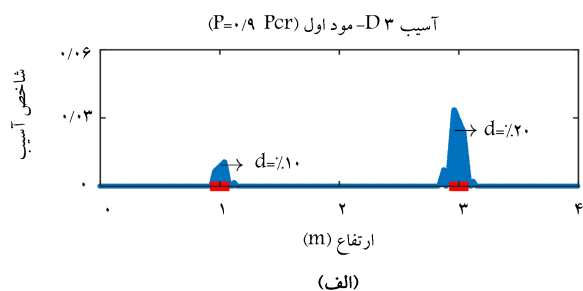
۲، از شدت افزایش مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت ۱ کمتر بوده است. همچنین، مشاهده می‌شود در صورتی که شدت آسیب در هر دو موقعیت آسیب برابر باشد، مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی یکسانی در موقعیت‌های آسیب ایجاد می‌شود.

## ۶. نتیجه‌گیری

ارزیابی سلامتی از ضروریات اولیه‌ی نگهداری سازه و تأمین ایمنی است. با شناسایی به موقع اعضاء آسیب‌دیده و ترمیم آنها می‌توان تا حد امکان از وقوع خسارت‌های جبران‌ناپذیر جلوگیری کرد. همواره ارزیابی سلامتی در سازه‌ها با عنوان پایش سلامت سازه در گرایش‌های مختلف مهندسی عمران، مکانیک و هوافضا مورد توجه بوده است. در یک تقسیم‌بندی کلی، پایش سلامتی بر مبنای پاسخ‌های ارتعاشی سازه، شامل چهار مرحله است: در مرحله اول، به مسئله‌ی وجود آسیب در سازه پرداخته می‌شود. در صورتی که وجود آسیب در سازه تأیید شود، در مرحله دوم، به تعیین موقعیت آسیب پرداخته می‌شود. در مرحله سوم، به تعیین مقدار آسیب از نظر شدت، عمق و یا سطح خسارت پرداخته می‌شود. در مرحله چهارم، که کامل‌ترین سطح مطالعه‌ی پایش سلامت سازه است، به تخمین طول عمر سازه‌ی محتمل آسیب پرداخته می‌شود.

در نوشتار حاضر، با هدف تعیین موقعیت آسیب در ستون تحت اثر نسبت‌های مختلف بار محوری بحرانی، شاخص تشخیصی مبتنی بر شیب و انحنای شکل‌های اولیه و ثانویه‌ی مودهای ارتعاشی پیشنهاد و کارایی آن در تعیین موقعیت آسیب بررسی شده و این نتایج به دست آمده است:

- ۱- بردار شاخص‌های تشخیصی به موقعیت آسیب، حساس است و موقعیت آسیب با ایجاد بیشینه‌ی نسبی در منطقه‌ی آسیب با خطای کمتر از ۱٪ قابل شناسایی است.
- ۲- علی‌رغم این‌که مقدار بار محوری بر مقادیر بسامد اثرگذار است، اما تأثیری بر مقادیر شاخص تشخیصی آسیب ندارد. این موضوع با محاسبه‌ی ماتریس‌های



شکل ۸. نمودار شاخص‌های تشخیصی حالت آسیب D3 با شدت‌های آسیب ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در موقعیت ۱ و شدت آسیب ۲۰ درصد در موقعیت ۲.

و مقدار شدت آسیب ثابت ۲۰ درصد در موقعیت ۲ انجام شده است. در جدول ۱۲، بیشینه‌ی مقدار شاخص‌های تشخیصی موقعیت‌های آسیب محاسبه و در شکل ۸، نمودار شاخص‌های تشخیصی به دست آمده از رابطه‌ی ۱۳ ارائه شده است:

مشاهده می‌شود که مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی با افزایش شدت آسیب موقعیت ۱ افزایش یافته است، که نشان‌دهنده‌ی حساس بودن شاخص‌های تشخیصی به شدت آسیب موقعیت ۱ است. این در حالی است که با افزایش شدت آسیب در موقعیت ۱، مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی آسیب در موقعیت ۲ کاهش یافته و این شدت کاهش مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت



- ۶- در صورتی که مقدار شدت آسیب در دو موقعیت آسیب ۱ و ۲ برابر باشد، آنگاه مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی یکسانی در موقعیت‌های آسیب ۱ و ۲ ایجاد می‌شود؛ به عبارتی، موقعیت‌های آسیب با هم سطحی مناسب‌تری از مقادیر شاخص‌های تشخیصی قابل شناسایی است.
- همچنین، از بررسی‌های انجام شده در نوشتار حاضر، این نتایج به دست آمده است:
- ۷- در تمامی مودها در اثر آسیب و تحت اثر بار محوری یکسان، بسامد وضعیت سالم با بسامد وضعیت آسیب اختلاف داشته و اختلاف مذکور با افزایش شدت آسیب، افزایش یافته است.
- ۸- مقدار بسامد در تمامی مودها برای هر دو وضعیت اولیه (سالم) و ثانویه (محتمل آسیب) با افزایش مقدار بار محوری کاهش یافته است.
- در پایان، روش پیشنهادی به عنوان روشی کارآمد در شناسایی موقعیت‌های آسیب در المان‌های تیرمانند (با و یا بدون اثر بار محوری) پیشنهاد می‌شود. البته برای شناسایی موقعیت‌های آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با شرایط تکیه‌گاهی گیردار - آزاد توصیه نمی‌شود.

معیار همبستگی مودال بررسی شده است. تقارنی بودن ماتریس‌های LMAC تا دقت سه رقم اعشار نشان داد که بار محوری، کمترین تأثیر را بر جابه‌جایی درجه‌های آزادی (شکل‌های مود ارتعاشی) دارد.

۳- شناسایی آسیب در ستون تحت اثر بار محوری با مقاطع مربعی توپر، مربعی توخالی و دایره‌یی انجام شد. نتایج نموداری نشان داد که بردار شاخص‌های تشخیصی برای تعیین موقعیت آسیب ستون تحت اثر بار محوری با مقطع دلخواه، کارآمد و قابل اعتماد است.

علاوه بر موارد بالا، بررسی اثر مقدار شدت آسیب در روند شناسایی و تشخیص آسیب نشان داد که:

- ۴- با افزایش شدت آسیب در موقعیت آسیب ۱، مقدار بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی در موقعیت‌های آسیب ۱ و ۲ به ترتیب افزایش و کاهش یافته است.
- ۵- با افزایش مقدار شدت آسیب در موقعیت آسیب ۱، شدت افزایش بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی موقعیت آسیب ۱ از شدت کاهش بیشینه‌ی شاخص‌های تشخیصی موقعیت آسیب ۲ قابل ملاحظه‌تر است.

## پانویس‌ها

1. Panedy
2. Yam
3. Sahoo & Maity
4. Shih
5. Roveri & Carcaterra
6. empirical mode decomposition (EMD)
7. Bao
8. Xu
9. Sun & Ren
10. seismic damage analysis
11. global damage index
12. overall damage degree
13. Yang
14. Yang & Oyadiji
15. modal frequency surface
16. Liu
17. online damage monitoring
18. spatial-wavenumber filter
19. frequency aliasing
20. concrete filled-steel tube
21. Hanteh
22. ABAQUS
23. MATLAB
24. modal assurance criterion (MAC)

## منابع (References)

1. Pandey, A., Biswas, M. and Samman, M. "Damage detection from changes in curvature mode shapes", *Journal of Sound and Vibration*, **145**(2), pp. 321-332 (1991).
2. Yam, L., Li, Y. and Wong, W.O. "Sensitivity studies

of parameters for damage detection of plate-like structures using static and dynamic approaches", *Engineering Structures*, **24**(11), pp. 1465-1475 (2002).

3. Sahoo, B. and Maity, D. "Damage assessment of structures using hybrid neuro-genetic algorithm", *Applied Soft Computing*, **7**(1), pp. 89-104 (2007).
4. Shih, H.W., Thambiratnam, D. and Chan, T. "Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach", *Journal of Sound and Vibration*, **323**(3-5), pp. 645-661 (2009).
5. Roveri, N. and Carcaterra, A. "Damage detection in structures under traveling loads by Hilbert-Huang transform", *Mechanical Systems and Signal Processing*, **28**, pp. 128-144 (2012).
6. Bao, C., Hao, H. and Li, Z.-X. "Multi-stage identification scheme for detecting damage in structures under ambient excitations", *Smart Materials and Structures*, **22**(4), pp.1-22 (2013).
7. Xu, X.F., Zhang, F. and Zhu, W.X. "Damage detection of continuous box girder based on modal flexibility curvature method", *Advanced Materials Research*, **671-674**, pp. 1016-1020 (2013).
8. Amiri, G., Talebi, M., Talebi, M. and et al. "Damage assessment in connections of moment resistant frames using hilbert-huang transform", *Sharif Journal of Civil Engineering*, **32.2**(1.1), pp. 3-11 (2016).
9. Sun, D. and Ren, Q. "Seismic damage analysis of concrete gravity dam based on wavelet transform", *Shock and Vibration*, **2016**(9), pp. 1-8 (2016).
10. Nobahari, M., Ghasemi, M.R. and Shabakhty, N. "A novel heuristic search algorithm for optimization with

- application to structural damage identification”, *Smart Structural Systems*, **19**(4), pp. 449-461 (2017).
11. Yang, Z.-B., Radzienski, M., Kudela, P. and et al. “Fourier spectral-based modal curvature analysis and its application to damage detection in beams”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, **84**, pp. 763-781 (2017).
  12. Yang, C. and Oyadiji, S.O. “Delamination detection in composite laminate plates using 2D wavelet analysis of modal frequency surface”, *Computers & Structures*, **179**, pp. 109-126 (2017).
  13. Darvishan, E. “Damage detection of cable-stayed bridges using frequency domain analysis and clustering”, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, **51**(4), pp. 767-780 (2019).
  14. Liu, B., Liu, T., Zhao, J. and et al. “Frequency aliasing-based spatial-wavenumber filter for online damage monitoring”, *Shock and Vibration*, **2020**, pp. 1-10 (2020).
  15. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. “Structural health monitoring of a concrete-filled tube column”, *Magazine of Civil Engineering*, **85**(1), pp. 136-145 (2019).
  16. Younesi, A., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. “Active interface debonding detection of a concrete filled tube (CFT) column by modal parameters and continuous wavelet transform (CWT) technique”, *Structural Monitoring and Maintenance*, **8**(1), pp. 69-90 (2021).
  17. Khanahmadi, M., Gholhaki, M. and Rezaifar, O. “Damage identification of column under the axial load based on wavelet transform and modal data”, *Journal of Modeling in Engineering*, **18**(63), pp. 51-64 (2021).
  18. Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. “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*, **8**(5), pp. 198-214 (2021).
  19. Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. “Damage detection of prefabricated walls (panel 3D plates) based on wavelet transform detection algorithm”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(8), pp. 289-309 (2021).
  20. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Ghasemi-Ghalebahman, A. and et al. “Damage detection in laminated composite plates using wavelet analysis analytical method”, *Journal of Vibration and Sound*, **10**(20), pp. 144-156 (2022).
  21. Khanahmadi, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. “Comparative study on steel beams damage detection based on continuous and discrete wavelet transforms of static and dynamic responses”, *Journal of Structural and Construction Engineering*, **8**(9), pp. 166-183 (2021).
  22. Khanahmadi, M., Gholhaki, M., Rezaifar, O. and et al. “Damage identification in steel beam structures based on the comparison of analytical results of wavelet analysis”, *Civil Infrastructure Researches*, **8**(2) (2023).
  23. Rezaifar, O., Gholhaki, M., Khanahmadi, M. and et al. “A review of structural health monitoring and damage detection using wavelet transform: the case study of damage detection in cantilever beams”, *Journal of Vibration and Sound*, **11**(21), pp.157-171 (2022).
  24. Khanahmadi, M., Mohammady Garfamy, H., Gholhaki, M. and et al. “Wavelet-based damage detection of steel beam-structures”, *Journal of Structure & Steel*, **15**(33), pp. 15-27 (2021).
  25. Hanteh, M. and Rezaifar, O. “Damage detection in precast full panel building by continuous wavelet analysis analytical method”, *Structures*, **29**, pp. 701-713 (2021).
  26. Hanteh, M., Rezaifar, O. and Gholhaki, M. “Selecting the appropriate wavelet function in the damage detection of precast full panel building based on experimental results and wavelet analysis”, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, **11**(4), pp. 1013-1036 (2021).
  27. Mamazizi, A., Khanahmadi, M., and Nobakht Vakili, K. “Debonding damage detection and assessment in a CFST composite column using modal dynamic data”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(3.1), pp.53-63, (In Persian) (2022).
  28. Bakhshi, A. and Mousavi, M. “Crack detection in masonry structures using computer vision based on deep learning”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(2.1), pp. 99-108 (2022).
  29. Bakhshi, A. and Mousavi, M. “Crack detection in concrete members using encoder-decoder models based on deep learning”, *Sharif Journal of Civil Engineering*, **38.2**(2.2), pp. 79-88, (In Persian) (2022).
  30. Khanahmadi, M., Rezaifar, O., Gholhaki, M. and et al. “Detection of debonding damage location of the concrete core from the steel tube of concrete-filled steel tube (CFST) columns using wavelet analysis analytical method”, *Modares Civil Engineering Journal*, **22**(1), pp. 129-142 (2023).
  31. Rezaifar, O., Kabir, M.Z., Taribakhsh, M. and et al. “Dynamic behavior of 3D-panel single-story system using shaking table testing”, *Engineering Structures*, **30**(2), pp. 318-337 (2008).
  32. Kabir, M.Z. and Rezaifar, O. “Shaking table examination on dynamic characteristics of a scaled down 4-story building constructed with 3D-panel system”, *Structures*, **20**, pp. 411-424 (2019).