

# تشخیص آسیب در قاب‌های برشی با کمک نگره وابستگی خاکستری و جابه‌جایی ایستایی تخمین زده شده با داده‌های مودال محدود

غلامرضا قدرتی امیری\* و علی زارع حسین زاده

قطب علمی پژوهش‌های بنیادین در مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۱۱/۲۳ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۳/۱۱/۰۷)

**چکیده** - در این مقاله، روشی جدید جهت تشخیص محل آسیب در قاب‌های برشی با کمک داده‌های دینامیکی، ارائه شده است. به این منظور، شاخص جدیدی براساس جابه‌جایی ایستایی تخمین زده شده با کمک داده‌های مودال محدود و نگره وابستگی خاکستری پیشنهاد شده است. به منظور بررسی کارایی روش ارائه شده، الگوهای آسیبی مختلفی بر روی سه نوع از قاب‌های برشی با تعداد طبقات متفاوت، مطالعه شده است که در آن‌ها، تأثیر عواملی نظیر وجود نوفه در داده‌های اولیه، تعداد حالت (مود)های در دسترس، الگوهای آسیبی مختلف و نامنظمی در جرم و سختی سازه، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. نتیجه‌های به دست آمده، حاکی از کارایی و دقت مناسب و قابل قبول روش ارائه شده در تعیین محل آسیب‌های رخ داده در قاب‌های برشی است. از مهم‌ترین مزایای روش پیشنهادی، می‌توان به قابلیت شناسایی آسیب‌ها تنها با داده‌های حالت (مود) اول، حساسیت بسیار کم به وجود نوفه‌ها و سرعت و دقت بالا در تشخیص محل آسیب‌ها، اشاره کرد.

واژگان کلیدی: تشخیص محل آسیب، نگره وابستگی خاکستری، داده‌های مودال، جابه‌جایی ایستایی، قاب برشی.

## Damage Identification in Shear Frames via Grey Relation Theory and Static Displacement Estimated by Limited Modal Data

G. Ghodrati Amiri\* and A. Zare Hosseinzadeh

Center of Excellence for Fundamental Studies in Structural Engineering, School of Civil Engineering,  
Iran University of Science & Technology

**Abstract:** In this paper a new vibration-based damage detection method for damage localization in shear frames is presented. For this purpose, a new damage index is proposed by means of static displacements estimated using only the first several modes data and Grey Relation Theory. The efficiency of the presented method has been demonstrated through studying several damage scenarios on three examples of shear frames with different number of stories and the effects of various situations such as the existence random noises in the recorded data, number of available modes, different damage scenarios and irregularity in the structural characteristics have been studied on the applicability of the presented method. The obtained results show the robustness and good performance of the presented method in the damage diagnosis of shear frames. Some of the most important

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: ghodrati@iust.ac.ir

advantages of the suggested method can be summarized as its ability in damage localization by means of only the first mode data, low sensitivity to the random noises and high speed and accuracy in estimating damage locations.

**Keywords:** Damage localization, Grey Relation Theory, modal data, static displacement, shear frame.

## فهرست علائم

$F$	بردار نیروی ایستایی	$u$	بردار جابه‌جایی ایستایی
FDI	شاخص محلی‌سازی آسیب براساس تغییرات ماتریس نرمی	$Y^m$	توالی مورد بررسی
GDI	شاخص تشخیص آسیب پیشنهاد شده	$Y^r$	توالی مرجع (یا مبنا)
GDI	شاخص تشخیص آسیب پیشنهادی (نرمال شده)		علائم یونانی
GRC <sub>i</sub>	ضریب وابستگی خاکستری $i$ -امین نقطه		ضریب تمایز
$K$	ماتریس سختی		سطح نوفه
$L$	ماتریس محلی‌سازی آسیب (براساس تغییرات ماتریس نرمی)		متغیر خاکستری
LGDI	شاخص پیشنهادی برای تشخیص سالم یا معیوب بودن کل سازه		ماتریس قطری مربع بسامدهای طبیعی
$I_i$	بردار پارامترهای محلی‌سازی آسیب برای طبقه $i$ -ام (براساس تغییرات نرمی)	$i^u$	بردار شکل حالت $i$ -ام سازه سالم
MAC	معیار اطمینان حالت (مودی)	$i^d$	بردار شکل حالت $i$ -ام سازه آسیب‌دیده
$N$	تعداد طبقه‌های قاب برشی		عدد تصادفی بین ۱ و -۱
$n$	شماره طبقه در قاب برشی	$i$	بسامد طبیعی نظیر حالت (مود) $i$ -ام بدون نوفه
		$i^n$	بسامد طبیعی نظیر حالت (مود) $i$ -ام با نوفه

### ۱- مقدمه

پایش سلامتی سازه‌ها، به مجموعه عملیاتی اطلاق می‌شود که با دیدی کلی، شرایط کنونی سازه را تعیین می‌کند و با ارائه توصیف‌های کیفی معنی‌دار، امکان تصمیم‌گیری مناسب به‌منظور استفاده درست و منطقی از یک سازه را فراهم می‌آورد. مهم‌ترین بخش از یک برنامه مدون سلامت سنجی سازه‌ها را می‌توان فرآیند تشخیص آسیب<sup>۲</sup> معرفی کرد؛ زیرا براساس نتیجه‌های به‌دست آمده از این بخش است که می‌توان تصویری واقعی‌تر از وضعیت سازه به‌دست آورد و پیرامون ادامه استفاده و یا تعمیر سازه تصمیم‌گیری نمود. تشخیص آسیب، فرآیندی است که هدف اصلی آن، ارائه روشی جهت آشکارسازی آسیب‌های رخ داده در سازه‌ها است. این روش‌ها، براساس سطح نتیجه‌هایی که پیرامون آسیب‌های موجود در سازه‌ها ارائه

می‌دهند، به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند [۱]:

- (۱) تشخیص معیوب بودن کل سازه
- (۲) تشخیص محل آسیب
- (۳) تشخیص شدت آسیب.

بیشتر روش‌های موجود در زمینه شناسایی آسیب، بر پایه داده‌های دینامیکی سازه‌ها (نظیر بسامدهای طبیعی<sup>۳</sup> و شکل‌های حالت یا مود<sup>۴</sup>) استوار هستند. خلاصه‌ای از این گونه روش‌ها را می‌توان در مرجع [۲] پیدا کرد. برخی از پژوهش‌گرها تنها از بسامدهای طبیعی جهت تشخیص آسیب استفاده کرده‌اند [۳-۷]. ایگزیا و هاو [۵]، با کمک بسامدهای طبیعی و با استفاده از مفهوم‌های احتمالاتی، روشی جهت تشخیص محل آسیب در سازه‌ها ارائه کردند. آن‌ها تلاش کردند تا با روش‌های آماری، خطاهای رایج در مدل‌سازی عددی سازه واریسی شده را وارد

محاسبات کنند. سورش و همکاران [۸]، با آموزش شبکه عصبی مصنوعی بر روی داده‌های مربوط به بسامدهای طبیعی چند حالت (مود) اول تیر، روشی جهت تشخیص محل و عمق ترک در تیرهای طره‌ای ارائه دادند. علی‌رغم موفقیت این روش‌ها، حساسیت کم بسامد طبیعی به آسیب‌های جزئی و متوسط، باعث استقبال کم و استفاده محدود از این شاخص شده است [۹]. به‌منظور حل این مشکل، پررا و همکاران [۱۰]، ضمن مطالعه حساسیت مربع بسامدهای طبیعی، روشی را برای تعیین محل و تخمین شدت آسیب با استفاده از تابع هدف<sup>۵</sup> مبتنی بر مربع بسامدهای طبیعی ارائه دادند. هرچند با این بهبود، کارایی شاخص بسامد طبیعی تقویت گردید، اما حساسیت آن به‌وجود نوفه‌های اتفاقی، باعث می‌شد تا در پاره‌ای موارد عملی، برخی از المان‌های سالم، به اشتباه، المان‌هایی آسیب‌دیده با سطح خرابی بالا، گزارش شوند. دسته‌ای دیگر از پژوهش‌گرها تلاش کردند تا با ارائه رابطه‌هایی ترکیبی از بسامدهای طبیعی و شکل‌های حالت، به تشخیص آسیب در سازه‌ها بپردازند [۱۱-۲۰]. جی و لوئی [۱۶]، با کمک نیروی باقی‌مانده مودال<sup>۶</sup>، روشی جهت تشخیص آسیب در سازه‌ها ارائه و کارایی روش خود را با مطالعه مثال‌های مختلف، مورد بررسی قرار دادند. قدرتی امیری و همکاران [۱۷]، به‌منظور ارائه روشی پایدار جهت تشخیص آسیب در صفحه‌ها<sup>۷</sup>، از تابع مشخصه ارتعاش آزاد استفاده کرده و با رابطه‌سازی مسأله تشخیص آسیب به‌عنوان یک مسأله بهینه‌یابی، به حل بهینه مسأله، پرداختند. یان و همکاران [۱۸]، با هدف آنالیز حساسیت انرژی کرنشی، شاخصی جهت شناسایی آسیب در تیرها ارائه دادند. آن‌ها به‌منظور مدل کردن دقیق‌تر تأثیرات نوفه‌های اتفاقی، از مدل‌های آماری استفاده کردند و توانستند الگوهای آسیبی منفرد و چندگانه مدل شده در تیر ساده مورد مطالعه را با دقت خوبی شناسایی کنند. کورهللی و همکاران [۲۱]، روشی برای تشخیص محل و شدت آسیب در سازه‌ها، با استفاده از داده‌های مودال ناقص و بهینه‌یابی جستجوی الگو<sup>۸</sup> ارائه کردند. آن‌ها، روش خود را به مدد مثال‌های مختلف عددی و آزمایشگاهی، مورد

ارزیابی قرار داده، نشان دادند که این روش، در حضور خطاهای مدل‌سازی نیز پایدار است. سید پور [۲۲]، روشی دو مرحله‌ای جهت آشکارسازی آسیب در سازه‌ها ارائه داد. مرحله اول روش وی، با ارائه شاخصی جدید براساس انرژی کرنشی مودال، به شناسایی محل آسیب اختصاص داشت و مرحله دوم، از طریق واری میزبان هم‌بستگی بسامدهای طبیعی به‌صورت یک مسأله بهینه‌یابی، شدت آسیب را در المان‌های آسیب‌دیده، تعیین می‌کرد.

علی‌رغم موفقیت روش‌های بالا در تشخیص آسیب در سازه‌ها، پژوهش‌گرها کماکان به دنبال ارائه روش‌هایی هستند که در عین داشتن دقت و سرعت بالا، اجرائی‌تر و کاربردی‌تر باشند. در این مقاله، روشی جدید جهت تشخیص محل آسیب در قاب‌های برشی با استفاده از تخمین پاسخ ایستایی سازه و نگره وابستگی خاکستری<sup>۱</sup>، ارائه شده است. نگره وابستگی خاکستری، معیاری است که از طریق آن، می‌توان میزان هم‌بستگی و تطابق نقطه‌ای دو منحنی را سنجید. از این نگره، در تعداد کمی از پژوهش‌ها، جهت تشخیص آسیب استفاده شده است. اولین بار، در سال ۲۰۰۵، چن و همکاران [۲۳]، با کمک ضریب‌های وابستگی خاکستری<sup>۱۱</sup>، توانستند محل آسیب را در تیرها شناسایی کنند. عامل اصلی در روش آن‌ها، انحنای جابه‌جایی ایستایی بود که با انجام پاره‌ای محاسبات عددی بر روی جابه‌جایی ایستایی ثبت شده از تحریک ایستایی تیرها، تعیین می‌گردید. مهم‌ترین ایراد این روش، عدم ارائه یک سیستم بارگذاری مشخص بود که باعث ایجاد سردرگمی در نحوه اجرای آن می‌شد. عبدو [۲۴]، در سال ۲۰۱۲، برای حل این مشکل، روش اشاره شده را با پیشنهاد و اعمال بار ایستایی مشخصی، اصلاح نمود. هرچند این روش‌ها می‌توانند محل آسیب را به‌خوبی تشخیص دهند، اما مشکلات اجرایی مربوط به اعمال بار ایستایی و ثبت پاسخ‌ها، باعث دشواری اجرای آن‌ها می‌گردد.

جدیدترین تحقیق انجام شده جهت تشخیص آسیب با کمک نگره خاکستری، توسط زارع حسین زاده و همکاران

[۲۵]، انجام شده است. آن‌ها، برای اولین بار، از نگره وابستگی خاکستری در مطالعه میزان انطباق داده‌های مودال استفاده کردند و بر پایه ضریب‌های وابستگی خاکستری به دست آمده از واریس شیب شکل حالت اول سازه‌ها، آسیب‌های رخ داده در قاب‌های برشی را تشخیص دادند.

در این مقاله، شاخص محلی‌ساز جدیدی جهت تشخیص محل آسیب در قاب‌های برشی، براساس واریس میزان انطباق نقطه‌ای بین جابه‌جایی ایستایی تخمین زده شده در سازه‌های سالم و آسیب‌دیده، ارائه شده است. ایده اصلی این مقاله، تلاش جهت پیشنهاد روشی است که ضمن استفاده از حساسیت بالای پاسخ‌های ایستایی به رخداد آسیب، صعوبت و زمان‌بر بودن اعمال مستقیم بارهای ایستایی و هم‌چنین، دشواری‌های ثبت جابه‌جایی‌های ایستایی، حذف گردد. بر این اساس و به منظور ارائه روشی کارآ و قابل اجرا در برنامه‌های عملی پایش سلامتی سازه‌ها، از تخمین پاسخ ایستایی به کمک داده‌های مودال سازه استفاده شده است. برای این کار لازم است تا از سازه تحت بررسی، فقط داده‌های مودال (شامل بسامد طبیعی و شکل حالت) نظیر چند حالت (مود) اول سازه در دست باشد. یادآوری می‌کند که استفاده تلفیقی از بسامدهای طبیعی و شکل‌های حالت در تخمین پاسخ ایستایی، نه تنها بر حساسیت روش در برابر درک آسیب‌ها می‌افزاید، بلکه از تأثیرات منفی استفاده تنها از بسامدهای طبیعی (نظیر تشخیص اشتباه المان‌های سالم به عنوان المان آسیب‌دیده) نیز جلوگیری می‌کند. سرانجام، با کمک نگره وابستگی خاکستری، میزان تطابق پاسخ‌های ایستایی تخمین زده شده در سازه‌های سالم و آسیب‌دیده، ارزیابی و شاخص خرابی جدیدی پیشنهاد شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی، سناریوهای آسیبی مختلفی بر روی دو مثال از قاب برشی با تعداد طبقه-های مختلف، مورد مطالعه قرار گرفته است. هم‌چنین کارایی روش ارائه شده در شرایط مختلفی نظیر وجود نوفه‌های تصادفی ارزیابی گردیده است. به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهاد شده، در مثال سوم مقایسه‌ای بین شاخص پیشنهادی و

شاخص محلی‌ساز آسیب دیگری که بر پایه تغییرات انعطاف‌پذیری مودال استوار است، صورت پذیرفته است. نتیجه‌های به دست آمده، حاکی از قابلیت روش پیشنهادی در تشخیص سریع و دقیق محل آسیب‌های احتمالی در قاب‌های برشی است.

## ۲- نگره وابستگی خاکستری

نگره وابستگی خاکستری، در سال ۱۹۸۹ توسط دنچ، ارائه شد [۲۶]. هدف اصلی این نگره، ارائه معیاری جهت بررسی میزان انطباق هندسی دو منحنی است. نظر به این که داده‌های مورد نیاز این نگره، فقط شامل دو توالی<sup>۱۲</sup> از اعداد دو منحنی مورد نظر است، بنابراین، به راحتی می‌توان از این تئوری جهت بررسی میزان تطابق دو منحنی در شرایطی که داده‌های محدودی در دست است، استفاده کرد. در این بخش ریاضی‌واره این نگره، به اختصار تشریح می‌گردد.

فرض کنید که دو توالی از نقطه‌های موجود بر روی دو منحنی به صورت زیر تعریف شده باشد:

$$\mathbf{Y}^r = \{y_1^r \quad y_2^r \quad \dots \quad y_n^r\} \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}^m = \{y_1^m \quad y_2^m \quad \dots \quad y_n^m\} \quad (2)$$

که در آن،  $\mathbf{Y}^r$  و  $\mathbf{Y}^m$ ، به ترتیب توالی مرجع (یا مبنا)<sup>۱۳</sup> و توالی مورد بررسی<sup>۱۴</sup> است. هدف اصلی، تعیین میزان تطابق توالی  $\mathbf{Y}^m$  با توالی  $\mathbf{Y}^r$  است. براساس مبانی نگره وابستگی خاکستری، میزان تطابق دو منحنی را می‌توان با استراتژی هم‌سنجی نقطه‌ای درایه‌های متناظر دو توالی، به دست آورد. این کار، به کمک محاسبه ضریب‌های وابستگی خاکستری (GRC)، صورت می‌پذیرد. این ضریب‌ها، بر پایه ثابت‌های هندسی (نظیر شیب و انحنای منحنی) طرح‌ریزی شده و به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$GRC_i = \frac{\min_m \min_i \lambda + \alpha \max_m \max_i \lambda}{\lambda + \alpha \max_m \max_i \lambda} \quad (3)$$

به طور کامل برهم منطبق هستند؛

• اگر  $0.8 < GRC_i < 0.9$ ، در این صورت دو منحنی در نقطه

i-ام به طور نسبی بر هم منطبق هستند؛

• اگر  $0.6 < GRC_i < 0.8$ ، در این صورت دو منحنی در نقطه

i-ام ارتباطی نسبی دارند، به بیان دیگر، امکان دارد برهم منطبق باشند یا ارتباط مستقیمی قابل شناسایی نباشد؛

• اگر  $GRC_i < 0.6$ ، در این صورت دو منحنی در نقطه i-ام،

هیچ نوع انطباقی ندارد و هیچ ارتباط مستقیمی بین آن‌ها قابل شناسایی نیست [۲۷].

بنابراین ملاحظه می‌شود که براساس ضریب‌های وابستگی خاکستری می‌توان به توصیف کیفی مناسبی پیرامون میزان انطباق نقطه‌ای دو منحنی دست پیدا کرد.

### ۳- روش پیشنهادی

#### ۳-۱- محاسبه جابه‌جایی ایستایی با داده‌های مودال محدود

در این بخش، جزئیات روش پیشنهادی، ارائه می‌گردد. یک قاب برشی N طبقه، مانند آنچه که در شکل (۱) نشان داده شده است، در نظر گرفته می‌شود. در این قاب، هر سقف معادل با یک درجه آزادی انتقالی است و بنابراین، این قاب، N درجه آزادی دارد. رابطه بین بردار جابه‌جایی ایستایی (u)، بردار نیروی ایستایی اعمالی به صورت متمرکز در تراز هر طبقه (F) و ماتریس سختی (K) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$Ku = F \quad (5)$$

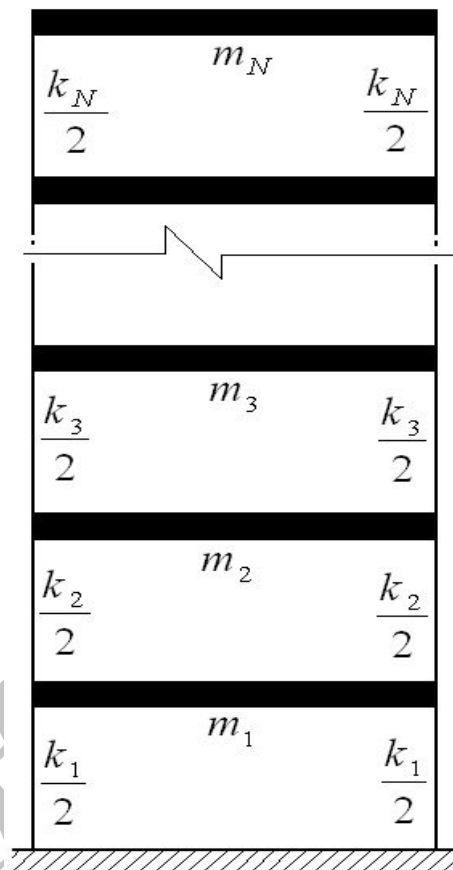
بنابراین، جابه‌جایی ایستایی سازه تحت نیروی ایستایی مشخص F را می‌توان با کمک رابطه زیر به دست آورد:

$$u = K^{-1}F \quad (6)$$

از سوی دیگر، طبق مبانی تحلیل سازه‌ها، معکوس ماتریس سختی، همان ماتریس نرمی یا انعطاف پذیری<sup>۱۷</sup> سازه است که با G نشان داده می‌شود:

$$G = K^{-1} \quad (7)$$

در این مقاله، آسیب به صورت کاهش در سختی طبقه‌ها



شکل ۱- مدل قاب برشی N طبقه

که در آن،  $GRC_i$  ضریب وابستگی خاکستری متناظر با نامین نقطه است. ، ضریب تمایز<sup>۱۵</sup> است که بسته به شرایط عمومی منحنی مبنا (نظیر شیب و ...) تعیین می‌گردد و باعث استدلال‌های متفاوت در مورد میزان تطابق دو منحنی می‌گردد. این ضریب، عددی بین ۰ و ۱ است. براساس پیشنهاد دنچ [۲۶]، انتخاب  $= 0.5$ ، می‌تواند توجیه مناسبی برای منحنی‌های تا مرتبه ۴ داشته باشد. ، متغیر خاکستری<sup>۱۶</sup> است که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\lambda_i = |y_i^f - y_i^m| \quad (4)$$

ضریب‌های وابستگی خاکستری، عددی بین صفر و یک خواهند بود و براساس مقدار آن‌ها، می‌توان پیرامون میزان هم‌بستگی و یا ارتباط نقطه‌ای دو منحنی بحث کرد. به این صورت که:

• اگر  $GRC_i > 0.9$ ، در این صورت دو منحنی در نقطه i-ام

تعریف می‌شود. بنابراین، هدف اصلی، تخمین سختی با کمک داده‌های ثبت شده از سازه پایش شده، است. از سوی دیگر، استفاده از ماتریس نرمی باعث می‌شود تا بتوان با تقریب مناسبی، تأثیرات ماتریس سختی را تنها با کمک داده‌های مودال چند حالت اول سازه، وارد رابطه (۶) کرد. به بیان دیگر، چنانچه از فرآیند واریسی<sup>۱۸</sup> سازه تحت بررسی، داده‌های مودال در چند حالت اول در دست باشد، می‌توان با کمک ماتریس نرمی، تقریب مناسبی از ماتریس سختی سازه به دست آورد. علت این امر را با در نظر داشتن تعریف ماتریس نرمی به صورت ترکیبی از داده‌های مودال می‌توان اثبات نمود. در این ارتباط داریم:

$$\mathbf{G} = -\mathbf{1} \mathbf{T} \quad (8)$$

که در آن ماتریس شکل حالت (شامل بردارهای شکل حالت) و ماتریسی قطری است که درایه‌های روی قطر اصلی آن، برابر با مربع بسامدهای طبیعی است. با توجه به قواعد ضرب ماتریس‌ها و با در نظر داشتن مرتبه ماتریس‌های شرکت‌کننده در رابطه (۸)، واضح است که می‌توان این رابطه را با کمک هر تعداد دلخواه از داده‌های حالت سازه، تولید کرد. از سوی دیگر، با توجه به این‌که ماتریس در رابطه (۸) به صورت وارونه است، لذا، بدیهی است که تأثیرات حالت (مود)های بالاتر در محاسبه انعطاف پذیری مودال کم‌تر است و بنابراین می‌توان با کمک داده‌های فقط چند حالت اول، تقریب مناسبی از ماتریس انعطاف پذیری سازه داشت.

روش پیشنهادی در این مقاله، بر مبنای محاسبه بردار جابه‌جایی ایستایی سازه با کمک تعداد محدودی از داده‌های مودال سازه استوار است. براساس آنچه که در ادبیات فنی مربوط به طرح‌های پایش سلامتی سازه‌ها وجود دارد، اعمال بار ایستایی و ثبت پاسخ‌های جابه‌جایی ایستایی سازه، به‌طور معمول در عمل با مسائل و مشکلات زیادی روبروست [۲]. به عنوان نمونه، اعمال بار ایستایی، به دلیل ماهیت مستقل از زمان آن، لازم است به آرامی صورت پذیرد و لذا، امکان دارد اعمال آن مدت زمان زیادی طول بکشد. از سوی دیگر، امکان دارد

شرایط محل اعمال بار به‌گونه‌ای باشد که نوع بار اعمالی (از نظر ماهیت تمرکز یا پخش بار) با آنچه که مورد نظر طراح روش است، متفاوت باشد که حل این مشکل نیازمند احداث سیستم‌های انتقال بار مناسب است که این قضیه علاوه بر زمان‌بر بودن، ممکن است اجرائی نباشد و یا باعث اعمال بارهای دینامیکی و احیاناً ایجاد آسیب‌های ناخواسته گردد. با این وجود، بررسی روش‌های مبتنی بر پاسخ‌های ایستایی، حاکی از آن است که حساسیت پاسخ‌های ایستایی به رخداد آسیب به‌طور نسبی زیاد است [۲۴ و ۲۸]. به‌منظور استفاده از حساسیت مناسب پاسخ‌های ایستایی و رفع مشکلات اعمال بار ایستایی، در این مقاله از روشی مبتنی بر رابطه (۶) استفاده می‌شود. به این صورت که فرض می‌شود داده‌های مودال چند حالت اول سازه پایش شده، در دست است. سپس پاسخ ایستایی در صورت اعمال بار ایستایی مشخص، محاسبه می‌گردد.

نوع بار ایستایی‌ای که بتوان با فرض آن، پاسخ ایستایی سازه را تعیین کرد، از اهمیت زیادی برخوردار است. بدیهی است که این بار باید به‌گونه‌ای باشد که بتواند تمام درجه‌های آزادی سازه را تحریک کند. خود این نکته هم دلیل مهم دیگری است بر دشواری اعمال مستقیم بارهای ایستایی به منظور تحریک سازه‌ها. در این مقاله، بار ایستایی اشاره شده (که در بخش محاسبات دفتری در نظر گرفته می‌شود)، به صورت بار واحد-متمركز بر روی هر یک از درجات آزادی سازه تعریف می‌گردد. به بیان دیگر، بردار  $\mathbf{F}$ ، به صورت زیر خواهد بود:

$$\mathbf{F} = \{1.0 \ 1.0 \ \dots \ 1.0\}_{1 \times N}^T \quad (9)$$

به این ترتیب، جابه‌جایی ایستایی سازه واریسی شده تحت نیروی  $\mathbf{F}$ ، با فرض این‌که داده‌های  $m$  حالت اول سازه از طریق داده‌های ثبت شده توسط حس‌گرها در دسترس باشد، به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mathbf{u}_m = \mathbf{G}_m \mathbf{F} \quad (10)$$

در ادامه، به معرفی شاخص پیشنهادی و تشریح مراحل مختلف الگوریتم ارائه شده، پرداخته می‌شود.

### ۳-۲- شاخص آسیب پیشنهادی

همان‌گونه‌که در بخش ۲ اشاره گردید، نگره وابستگی خاکستری، معیاری جهت سنجش میزان انطباق و هم‌بستگی دو منحنی به کمک اصول هندسی است. به این صورت که نقطه‌های مختلف یک منحنی به صورت یک توالی عددی در نظر گرفته می‌شود، سپس میزان انطباق این توالی با یک توالی مبنا، سنجیده شده و نتیجه به صورت عددی بین صفر و یک بیان می‌گردد که این ضریب به‌عنوان ضریب وابستگی خاکستری (GRC)، شناخته می‌شود. در این مقاله، از نگره وابستگی خاکستری به منظور سنجش میزان انطباق نقطه‌ای منحنی پاسخ ایستایی استفاده می‌شود. به این ترتیب که ابتدا، پاسخ ایستایی سازه آسیب‌دیده با کمک داده‌های  $m$  حالت اول سازه محاسبه می‌گردد؛ سپس، پاسخ ایستایی سازه سالم، با کمک محاسبات دفتری و به صورت مشابه با داده‌های  $m$  حالت اول، تخمین زده می‌شود. در نهایت، ضریب‌های وابستگی خاکستری، با فرض مبنا بودن پاسخ ایستایی سازه سالم، محاسبه می‌گردند. براساس مبانی پایه‌ای نگره وابستگی خاکستری، انتظار بر این است که ضریب وابستگی خاکستری نظیر طبقه (ها)ی آسیب‌دیده، مساوی و یا کمتر از  $0/6$  باشد. از سوی دیگر، بررسی ماهیت پاسخ ایستایی و شکل افزایشی پروفیل جابه‌جایی ایستایی طبقه‌ها (از طبقه اول تا آخر)، حاکی از آن است که ضریب‌های وابستگی خاکستری بعد از هر بار جهش به مقادیر کمتر یا مساوی  $0/6$ ، تا شناسایی آسیبی دیگر، در مقدار جهش یافته‌اش ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، جهت قضاوت پیرامون آسیب‌دیده بودن یک طبقه، لازم است دو شرط زیر به‌طور هم‌زمان ارضاء گردند:

(۱) ضریب وابستگی خاکستری طبقه مورد بررسی، عددی مساوی و یا کمتر از  $0/6$  باشد.

(۲) ضریب وابستگی خاکستری طبقه مورد بررسی نسبت به طبقه قبلی‌اش دارای یک جهش ناگهانی باشد.

لازم به ذکر است که این شرط‌ها مکمل یکدیگر هستند و لذا لازم است هر دو مورد آن‌ها به صورت هم‌زمان رخ دهند تا

بتوان طبقه‌ای را آسیب‌دیده دانست. بر این اساس و به منظور ارائه پارامتری که ضمن در نظر داشتن دو شرط فوق، بتواند محل آسیب را با وضوح بیشتری بیان کند، شاخص آسیب (GDI) به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$GDI = \begin{cases} |1.0 - GRC_n| & n = 1 \\ |GRC_n - GRC_{(n-1)}| & n \neq 1 \end{cases} \quad (11)$$

که در آن،  $n$  شماره طبقه و  $| \cdot |$  علامت قدر مطلق است. کارایی این شاخص در تعیین سلامت و یا خرابی هر طبقه، به صورت زیر است:

$$\begin{cases} GDI > 0 \Rightarrow \text{طبقات آسیب دیده} \\ GDI = 0 \Rightarrow \text{طبقات سالم} \end{cases} \quad (12)$$

در ادامه، با مطالعه مثال‌های عددی مختلف، به بررسی کارایی روش پیشنهادی پرداخته می‌شود.

### ۴- مطالعه‌های عددی

در بخش‌های پیشین، جزئیات روش پیشنهادی ارائه گردید. در این بخش، به منظور بررسی کارایی آن در شناسایی محل آسیب، دو مثال عددی شامل قاب برشی ۱۶ و ۲۴ طبقه، تحت الگوهای آسیبی مختلف، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. هم‌چنین، در سومین مثال، مقایسه‌ای بین شاخص پیشنهادی (GDI) و شاخص محلی‌ساز آسیب مبتنی بر انعطاف پذیری مودال، صورت می‌پذیرد. یادآوری می‌کند که در مثال‌های مطالعه شده، آسیب به صورت کاهش در سختی طبقه (ها)ی آسیب‌دیده، مدل‌سازی شده است.

#### ۴-۱- قاب برشی ۱۶ طبقه

به‌عنوان اولین مثال، یک قاب برشی ۱۶ طبقه در نظر گرفته می‌شود که مشخصات اصلی آن (شامل جرم و سختی طبقه‌ها) در جدول ۱ ارائه شده است. به منظور بررسی کارایی روش پیشنهادی در تشخیص آسیب در این قاب، ۴ الگوی آسیبی مانند آنچه که در جدول ۲ بیان شده است، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. الگوهای ۱ و ۲، الگوهای تک آسیبه هستند که

جدول ۱- مشخصات قاب برشی ۱۶ طبقه

شماره طبقه	جرم (ton)	سختی (KN/m)
۱ و ۲	۱۰۰	۸۰۰
۳ و ۴	۱۰۰	۷۰۰
۵ و ۶	۱۰۰	۶۰۰
۷ و ۸	۱۰۰	۵۰۰
۹ و ۱۰	۱۰۰	۴۰۰
۱۱ و ۱۲	۱۰۰	۳۰۰
۱۳ و ۱۴	۱۰۰	۲۰۰
۱۵ و ۱۶	۱۰۰	۱۰۰

جدول ۲- الگوهای آسیب در قاب برشی ۱۶ طبقه

شماره الگو	طبقات آسیب دیده	شدت آسیب (%)
(۱)	طبقه هفتم	۵٪
(۲)	طبقه دوم	۱۵٪
(۳)	طبقه چهارم و یازدهم	۱۰٪ و ۱۰٪
(۴)	طبقه سوم	۳۰٪
(۴)	طبقه دهم	۲۰٪
(۴)	طبقه چهاردهم	۳۰٪

مخالف صفر است. در نتیجه، این طبقه‌ها آسیب دیده تلقی می‌شوند. در سایر الگوهای بررسی شده هم، شاخص آسیب پیشنهادی توانسته است محل آسیب را به‌طور بسیار دقیق، شناسایی کند.

در ادامه این بخش، به ارزیابی قابلیت شاخص پیشنهادی در تشخیص معیوب بودن سازه‌ها (بدون تأکید بر تشخیص محل آسیب‌ها)، پرداخته می‌شود. همان‌گونه که در بخش مقدمه اشاره گردید، برخی از روش‌های تشخیص آسیب، به‌صورت انحصاری به منظور قضاوت پیرامون سلامت کل سازه طرح‌ریزی شده‌اند. مهم‌ترین پارامتر بسط داده شده در این زمینه، عاملی با عنوان «معیار اطمینان حالت (مودی)»<sup>۱۹</sup> است که به اختصار با MAC نمایش داده می‌شود. این پارامتر، در ابتدا به‌عنوان شاخصی جهت اطمینان از صحت داده‌های مودال به‌دست آمده از تحلیل پاسخ‌های حوزه فرکانسی<sup>۲۰</sup> بسط داده شد [۲۹ و ۳۰] و بعدها، توسط وست، در تشخیص سلامت سازه‌ها استفاده گردید [۳۱]. این ضریب، معیاری جهت ارزیابی میزان هم‌بستگی بردار شکل حالت  $i$ -ام سازه سالم ( $i^s$ ) و آسیب‌دیده ( $i^d$ ) است و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

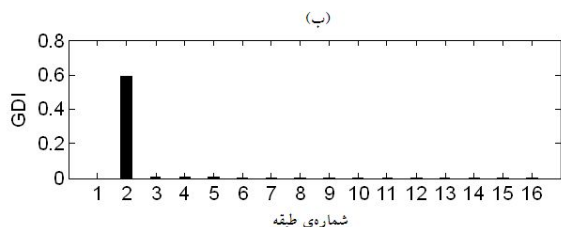
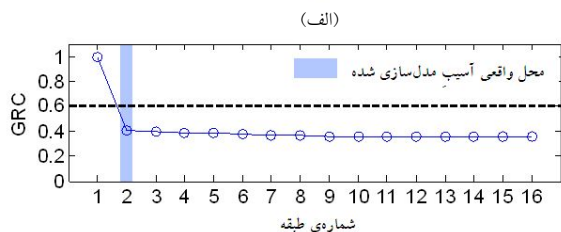
$$MAC_i = MAC\left(\begin{matrix} u \\ i \end{matrix}, \begin{matrix} d \\ i \end{matrix}\right) = \frac{\left| \left( \begin{matrix} u \\ i \end{matrix} \right)^T \begin{matrix} d \\ i \end{matrix} \right|^2}{\left( \begin{matrix} u \\ i \end{matrix} \right)^T \begin{matrix} u \\ i \end{matrix} \left( \begin{matrix} d \\ i \end{matrix} \right)^T \begin{matrix} d \\ i \end{matrix}} \quad (13)$$

اگر  $MAC$  مساوی با عدد یک باشد، سازه سالم و در غیر این صورت سازه معیوب است. ضریب‌های  $MAC$  در تمام ۱۶ مود در هر چهار الگوی مطالعه شده در قاب برشی ۱۶ طبقه،

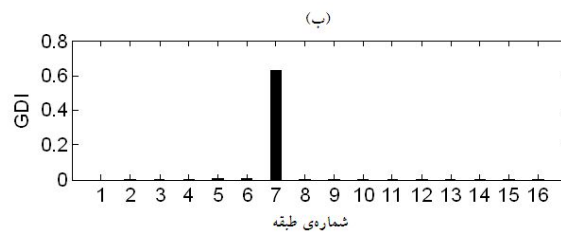
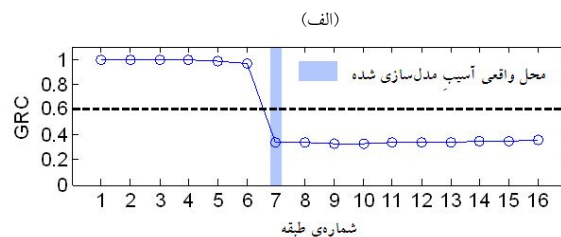
به ترتیب شامل شدت آسیب بسیار جزئی (۵٪) و متوسط (۱۵٪) هستند. الگوی ۳، الگویی دو آسیب با شدت آسیب‌های مساوی در طبقه‌های چهارم و یازدهم است. هم‌چنین الگوی ۴، الگویی است پر آسیب شامل سه طبقه آسیب‌دیده. به‌منظور آشکارسازی محل آسیب در الگوهای فوق، روش پیشنهادی پیاده‌سازی می‌شود. در این مثال فرض آن است که فقط داده‌های حالت اول سازه، در دسترس است.

نتیجه‌های به‌دست آمده از بررسی این الگوها در شکل‌های (۲) تا (۵) نشان داده شده است. در تمام الگوها، شکل‌های (الف)، نشان دهنده ضریب‌های وابستگی خاکستری هستند. هم‌چنین، نتایج پیش‌بینی محل آسیب براساس شاخص آسیب پیشنهاد شده، در شکل‌های (ب)، نشان داده شده است. به‌عنوان نمونه، نتیجه‌های به‌دست آمده از الگوی ۳ مورد بررسی قرار می‌گیرد. این الگو، شامل آسیب ده درصدی در طبقه‌های چهارم و یازدهم است. همان‌گونه که در شکل (۴-الف) ملاحظه می‌شود، ضریب‌های وابستگی خاکستری نظیر طبقات چهارم و یازدهم، نسبت به طبقه‌های قبل از خود، یک جهش ناگهانی داشته‌اند و بعد از این جهش، مقداری کمتر از ۰/۶ پیدا کرده‌اند. بنابراین، براساس شرط‌های مطرح شده در بخش ۳، این طبقه‌ها، دارای آسیب خواهند بود. در شکل (۴-ب)، مقادیر شاخص پیشنهادی، برای الگوی سوم نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است، شاخص  $GDI$ ، فقط در طبقه‌های چهارم و یازدهم،

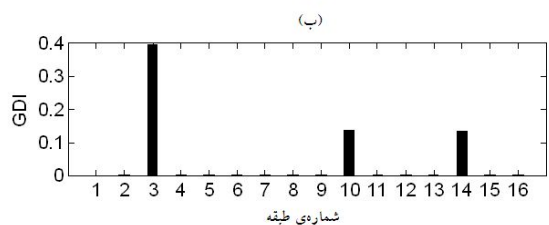
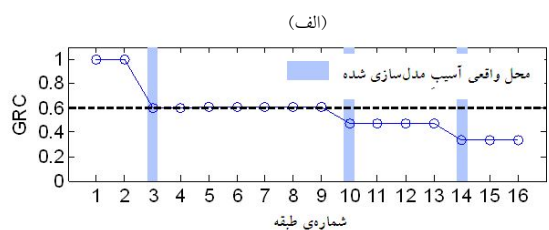




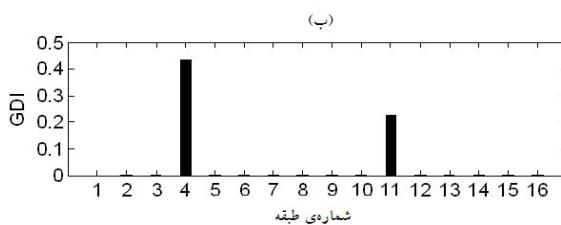
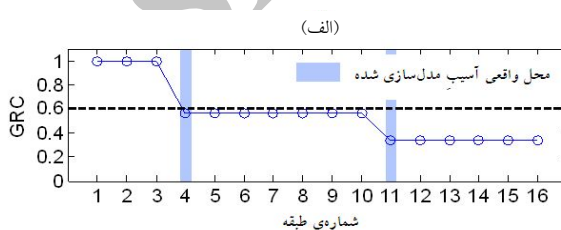
شکل ۳- نتیجه‌های مربوط به الگوی آسیب شماره (۲) در قاب برشی ۱۶ طبقه (الف) ضریب‌های وابستگی خاکستری، (ب) شاخص GDI



شکل ۲- نتیجه‌های مربوط به الگوی آسیب شماره (۱) در قاب برشی ۱۶ طبقه (الف) ضریب‌های وابستگی خاکستری، (ب) شاخص GDI



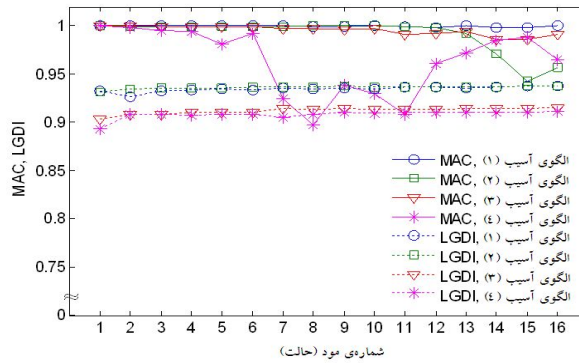
شکل ۵- نتیجه‌های مربوط به الگوی آسیب شماره (۴) در قاب برشی ۱۶ طبقه (الف) ضریب‌های وابستگی خاکستری، (ب) شاخص GDI



شکل ۴- نتیجه‌های مربوط به الگوی آسیب شماره (۳) در قاب برشی ۱۶ طبقه (الف) ضریب‌های وابستگی خاکستری، (ب) شاخص GDI

تقریب بالایی می‌توان آنها را به عدد ۱ گرد کرد و لذا معیوب بودن سازه، آشکار نمی‌گردد. با توجه به این‌که الگوی ۴ شامل آسیب‌هایی با شدت زیاد است، می‌توان نتیجه گرفت که ضریب MAC، تنها در شرایطی که سازه دارای آسیب‌های نسبتاً شدید باشد، می‌تواند وجود آسیب را آشکار سازد. هم‌چنین، به‌منظور نتیجه‌گیری دقیق‌تر، لازم است تا هم‌بستگی تعداد بیشتری از مودها مورد بررسی قرار گیرد. این در حالی است که در بیشتر

محاسبه و جهت مقایسه بهتر، در شکل (۶) به صورت خط‌های توپر، ترسیم شده‌اند. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود، در الگوهای ۱ تا ۳، ضریب‌های MAC نتوانسته‌اند معیوب بودن سازه را تشخیص دهند. این در حالی است که در الگوی ۴، ضریب‌های MAC مربوط به برخی از حالت‌(مود)های بالاتر وجود آسیب در سازه را تشخیص داده‌اند. هم‌چنین در الگوی ۲، هرچند در مودهای ۱۴ تا ۱۶، ضریب‌های MAC کمتر از یک هستند، اما با



شکل ۶- ضریب‌های MAC و LGDI مربوط به الگوهای آسیبی قاب ۱۶ طبقه

پارامتر LGDI عددی را به سازه تحت بررسی تخصیص می‌دهد که مشابه با آنچه که برای MAC گفته شد، اگر این عدد، کم‌تر از یک باشد، سازه آسیب‌دیده و در غیر این صورت، سازه سالم خواهد بود. نتیجه‌های به دست آمده از محاسبه این پارامتر جهت تعیین سلامت یا معیوب بودن قاب ۱۶ طبقه، برای هر چهار الگو، در شکل (۶)، نشان داده شده است (خط‌های نقطه‌چین). ملاحظه می‌شود در تمام موارد و با هر تعداد از داده‌های مودال، عامل پیشنهادی LGDI، توانسته است معیوب بودن سازه را تشخیص دهد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حساسیت این پارامتر بسیار بیشتر از ضریب MAC است. دلیل این امر، آن است که در LGDI، عامل هم‌بستگی سنج (که نگره وابستگی خاکستری است) بر روی جابه‌جایی ایستایی (به عنوان پارامتری تلفیقی از بسامدهای طبیعی و شکل‌های حالت) پیاده‌سازی شده است. این در حالی است که در MAC، عامل هم‌بستگی سنج (که همان رابطه هندسی تعریف MAC است)، فقط بر روی شکل‌های حالت پیاده شده است و در نتیجه، حساسیت کم بردارهای شکل حالت به رخداد آسیب‌ها، مانع از عمل‌کرد مناسب MAC در تشخیص معیوب بودن سازه می‌شود.

#### ۲-۴- قاب برشی ۲۴ طبقه

در این مثال، یک قاب برشی ۲۴ طبقه مورد مطالعه قرار می‌گیرد. مشخصات در نظر گرفته شده برای این قاب، در جدول ۳ ارائه شده است. همان‌گونه که از این جدول معلوم است، مشخصات سازه (اعم از جرم و سختی)

جدول ۳- مشخصات قاب برشی ۲۴ طبقه

شماره طبقه	جرم (ton)	سختی (MN/m)
۱، ۲، ۳، ۴ و ۵	۱۰۰	۵۰۰
۶	۱۰۰	۴۰۰
۷، ۸ و ۹	۱۰۰	۷۰۰
۱۰	۱۰۰	۴۰۰
۱۱، ۱۲، ۱۳ و ۱۵	۱۰۰	۳۰۰
۱۴	۲۰۰	۳۰۰
۱۶، ۱۷، ۱۹ و ۲۰	۱۰۰	۲۰۰
۱۸	۵۰۰	۲۰۰
۲۱، ۲۲، ۲۳ و ۲۴	۱۰۰	۱۰۰

برنامه‌های عملی پایش سلامتی سازه‌ها، به دلیل محدودیت‌های موجود، امکان دسترسی دقیق به حالت (مود)های بالاتر وجود ندارد. با توجه به نتیجه‌های به دست آمده از شاخص پیشنهادی در این مقاله (GDI)، انتظار می‌رود که بتوان با انجام برخی محاسبات ریاضی، به عامل حساس‌تری در قیاس با MAC، جهت قضاوت پیرامون سلامت کل سازه، دست پیدا کرد. به این منظور، ابتدا، شاخص‌های GDI محاسبه شده در تمام طبقات، به عدد ۱ نرمال‌سازی می‌شوند:

$$\hat{GDI}_i = \frac{GDI_i}{\max \{GDI_1, GDI_2, \dots, GDI_N\}}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

سپس، عامل تعیین سلامت کل سازه (LGDI)، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$LGDI = \frac{\sum_{i=1}^N (1 - \hat{GDI}_i)}{N} \quad (15)$$

جدول ۴- الگوهای آسیب در قاب برشی ۲۴ طبقه

شماره الگو	طبقات آسیب دیده	شدت آسیب (%)
(۱)	طبقه دوم؛ و	۱۰٪؛ و
	طبقه شانزدهم	۱۵٪
(۲)	طبقه سوم	۵٪
	طبقه پنجم	۱۰٪
	طبقه نهم	۲۰٪
	طبقه نوزدهم	۲۰٪
	طبقه بیست و سوم	۳۰٪

نوفه نوع (۱): وجود صفر درصد نوفه در بسامدهای طبیعی (شرایط ایده آل)؛

نوفه نوع (۲): وجود ۳٪ نوفه تصادفی در بسامدهای طبیعی؛

نوفه نوع (۳): وجود ۶٪ نوفه تصادفی در بسامدهای طبیعی.

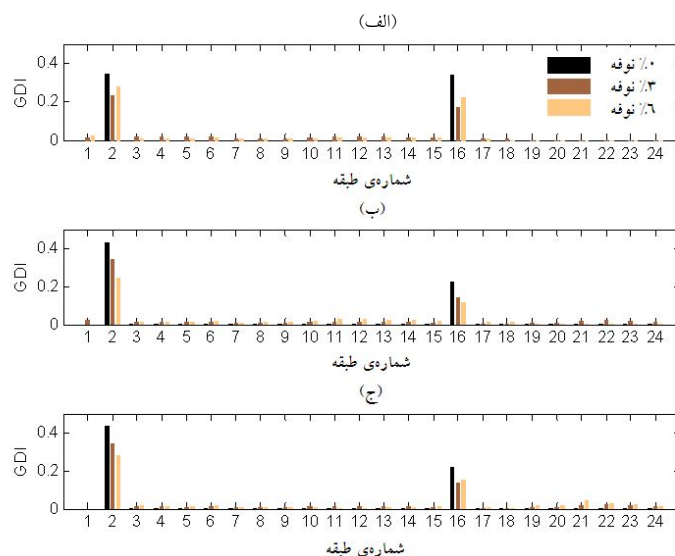
لازم به توضیح است که نوفه‌ها، به صورت زیر مدل سازی شده‌اند:

$$\omega_i^n = \omega_i (1 + \beta \chi_i) \quad (16)$$

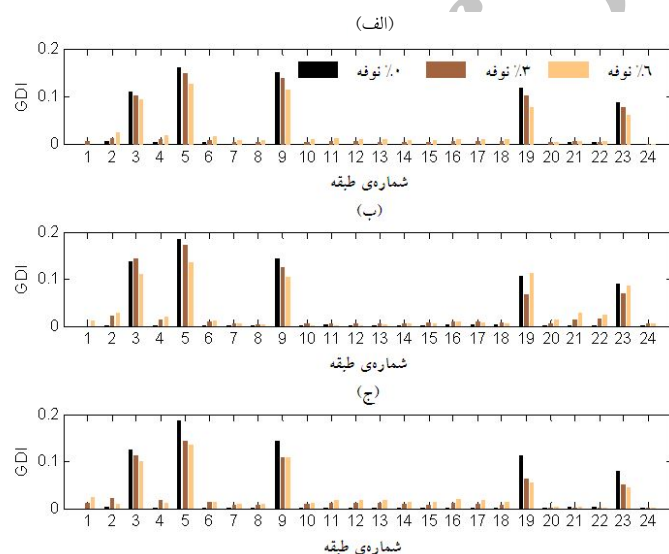
که در آن،  $i$  و  $i^n$ ، به ترتیب بسامد طبیعی نظیر حالت (مود)  $i$  - ام بدون نوفه و با نوفه، سطح نوفه و  $i$  عدد تصادفی بین ۱ و -۱ است.

نتیجه‌های به دست آمده از بررسی الگوی شماره ۱ در شکل (۷) نشان داده شده است. همان گونه که ملاحظه می‌گردد، روش پیشنهادی توانسته است آسیب را در شرایط مختلف (از نظر تعداد حالت‌ها و سطح نوفه‌ها) با دقت بالایی تشخیص دهد. شکل (۸) نتیجه‌های مربوط به سناریوی دوم را نشان می‌دهد. دیده می‌شود علی‌رغم وجود سطوح آسیبی مختلف (آسیب بسیار جزئی ۵ درصدی در طبقه سوم در کنار آسیب نسبتاً شدید ۳۰ درصدی در طبقه بیست و سوم)، هیچ گونه خطایی در شرایط مختلف مطالعه شده، به وجود نیامده است و تمام طبقات آسیب دیده، به درستی شناسایی شده‌اند. البته به دلیل وجود نوفه، شاخص پیشنهادی در برخی از طبقه‌های سالم مخالف صفر است؛ لیکن مقدار این شاخص بسیار نزدیک به صفر است و هیچ گونه قضاوت نادرستی پیرامون سلامت طبقه‌ها، رخ نمی‌دهد. نظیر این مورد، در برخی از مثال‌های بدون نوفه نیز، به صورت بسیار خفیف، اتفاق می‌افتد که این امر به تعداد حالت (مود)های استفاده شده مربوط می‌شود؛ زیرا با افزایش تعداد حالت‌ها، این مورد به صورت کامل منتفی می‌گردد. یادآوری می‌کند که این مقادیر بسیار کوچک هستند (بسیار کمتر از مقادیر مشاهده شده در شرایط نوفه‌دار) و لذا خللی در کارآمدی روش در صورت استفاده از داده‌های فقط حالت اول،

به صورت نامنظم در نظر گرفته شده است تا تأثیرات احتمالی نامنظمی بر روی کارایی روش پیشنهادی، بررسی گردد. دو الگوی آسیبی، مانند آنچه که در جدول ۴ بیان شده است، مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است. الگوی اول، یک الگوی دو آسیبه است؛ اما الگوی دوم، یک الگوی پرآسیب با پنج طبقه آسیب دیده است که سطوح مختلفی از شدت آسیب را شامل می‌شود. به منظور بررسی تأثیر تعداد حالت‌ها بر روی کارایی روش پیشنهادی، فرض می‌شود که داده‌های یک، چهار و شش حالت اول سازه در دسترس باشد. مسأله مهم دیگری که در این مثال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، میزان موفقیت روش پیشنهادی، در حضور نوفه‌های اتفاقی است. در حالت کلی، در برنامه‌های عملی پایش سلامتی سازه‌ها، داده‌های ثبت شده توسط حسگرها، به دلیل عوامل مختلفی نظیر شرایط جوی، قدیمی بودن تجهیزات به کار برده شده و ...، ممکن است با خطا همراه باشند. در مثال‌های عددی، به منظور مدل سازی شرایط واقعی، این خطاها را می‌توان با افزودن نوفه‌های تصادفی به داده‌های مربوط به سازه آسیب دیده، وارد محاسبات کرد. بدیهی است روشی که بتواند با دقت بیشتر و خطای کمتری اجزای آسیب دیده را تشخیص دهد، حساسیت کمتری به نوفه‌های اتفاقی خواهد داشت و بالطبع قابلیت استفاده در موارد عملی را خواهد داشت. در مطالعات این بخش، سه نوع نوفه مختلف به منظور بررسی تأثیرات نوفه‌های اتفاقی در نظر گرفته می‌شود:



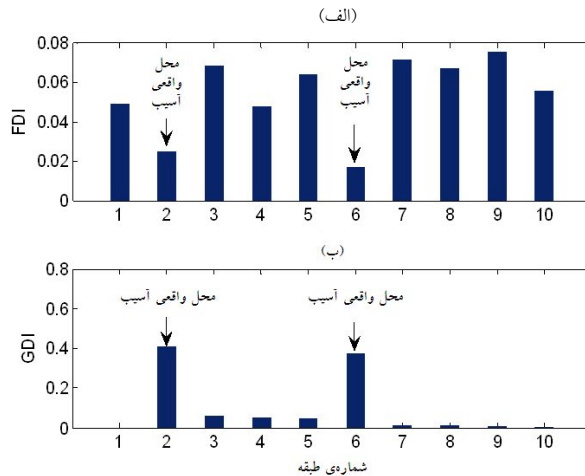
شکل ۷- نتیجه‌های مربوط به آشکارسازی آسیب در الگوی شماره ۱ در قاب ۲۴ طبقه (الف) در صورتی که فقط از داده‌های حالت اول استفاده شود (ب) در صورتی که از داده‌های چهار حالت اول استفاده شود (ج) در صورتی که از داده‌های شش حالت اول استفاده شود



شکل ۸- نتیجه‌های مربوط به آشکارسازی آسیب در الگوی شماره ۲ در قاب ۲۴ طبقه (الف) در صورتی که فقط از داده‌های حالت اول استفاده شود (ب) در صورتی که از داده‌های چهار حالت اول استفاده شود (ج) در صورتی که از داده‌های شش حالت اول استفاده شود

۳-۴- قاب برشی ۱۰ طبقه: مقایسه شاخص پیشنهادی با یک شاخص محلی ساز آسیب مبتنی بر انعطاف پذیری مودال در بخش‌های پیشین، کارآیی روش پیشنهاد شده با بررسی مثال‌هایی از قاب‌های برشی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر عوامل مختلفی نظیر شدت آسیب‌ها، تعداد حالت‌های استفاده شده، نوبه‌ها و ...، مطالعه گردید. در این بخش، به‌منظور

به‌وجود نمی‌آید. بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی، حساسیت کمی نسبت به نوبه‌های تصادفی داشته و قادر است محل آسیب‌های احتمالی را با دقت بسیار بالایی تشخیص دهد. هم‌چنین، ملاحظه شد که وجود نامنظمی در مشخصات فیزیکی قاب برشی، خللی در کارآیی روش ارائه شده به‌وجود نمی‌آورد.



شکل ۹- شناسایی آسیب در قاب ۱۰ طبقه در صورت استفاده از داده‌های چهار حالت اول، با ۵٪ نوبه در بسامدهای طبیعی (الف) براساس روش یانگ و لیو [۳۲]، (ب) براساس روش پیشنهادی

$$FDI_i = \sum_{j=1}^N |L(j, i)| = \sum_{j=1}^N |l_i(j)| \quad (18)$$

که در آن، منظور از  $L(j, i)$  درایه  $ij$ -ام ماتریس  $L$  است. کارایی این شاخص، به این صورت است که اگر در المانی صفر (یا نزدیک به صفر) باشد، آن المان آسیب‌دیده تلقی می‌شود. در غیر این صورت، سالم خواهد بود.

در این بخش، به منظور اعتبارسنجی روش پیشنهادی، مثال قاب برشی ۱۰ طبقه بررسی شده در مرجع [۳۲] با کمک شاخص معرفی شده در مقاله مذکور (شاخص FDI) و شاخص پیشنهادی در مقاله حاضر (شاخص GDI)، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. مشخصات این قاب، به صورت زیر است:

$$m_i = 80, k_i = 1600, i = 1, 2 \quad (19)$$

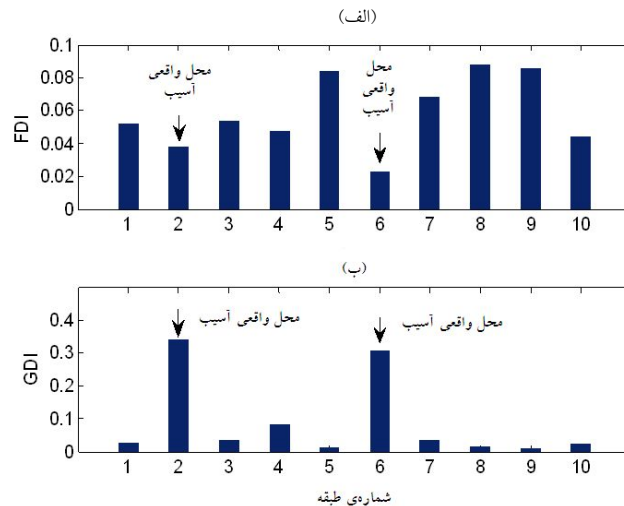
$$m_j = 40, k_j = 900, j = 3, 4, \dots, 10$$

الگوی آسیب‌ی مطرح شده، به صورت ۱۵٪ آسیب در طبقه دوم و ۲۰٪ آسیب در طبقه ششم است. در مرجع [۳۲]، از داده‌های ۴ مود اول، در شرایطی که ۵٪ نوبه در فرکانس‌های طبیعی وجود داشته باشد، استفاده شده است. لذا، در اولین مطالعه، شاخص‌های FDI و GDI در چنین شرایطی محاسبه می‌شود. خاطر نشان می‌شود که جهت قیاس شاخص‌ها در یک شرایط مساوی، نوبه‌های یکسانی به داده‌های ارتعاشی سازه افزوده شده است. نتیجه‌های به دست آمده، در شکل (۹) نشان

صحت‌سنجی روش پیشنهاد شده، مقایسه‌ای بین شاخص پیشنهاد شده در این مقاله و شاخص محلی‌ساز آسیب دیگری که توسط یانگ و لیو در سال ۲۰۰۹ [۳۲] پیشنهاد شده است، صورت می‌گیرد. یانگ و لیو [۳۲]، روشی دو مرحله‌ای جهت تشخیص محل و شدت آسیب در سازه‌ها ارائه دادند که در یک قاب برشی  $N$  طبقه، شکل کلی ماتریس پیشنهاد شده در مرحله اول به منظور محلی‌سازی آسیب‌ها به صورت زیر است:

$$L = [I_1 \ I_2 \ \dots \ I_N]_{N \times N} \quad (17)$$

این ماتریس براساس داده‌های  $m$  مود اول سازه تشکیل شده است و در آن، بردار  $I_i$  بیانگر پارامترهای محلی‌ساز آسیب برای طبقه  $i$ -ام است که صفر بودن چند مورد از درایه‌های این بردار، بیانگر آسیب‌دیده بودن طبقه  $i$ -ام است. گفتنی است رابطه (۱۷) براساس اختلاف ماتریس انعطاف‌پذیری در حالات سازه سالم و آسیب‌دیده و با کمک مبانی تجزیه مقادیر ویژه، تعریف گردیده است. جزئیات بیشتر پیرامون آن را می‌توان در مرجع [۳۲] پیدا کرد. سرانجام، شاخص آشکارکننده آسیب در طبقه  $i$ -ام ( $FDI_i$ )، براساس جمع قدرمطلق درایه‌های هم‌ستون ماتریس  $L$ ، به صورت زیر ارائه شده است:



شکل ۱۰- شناسایی آسیب در قاب ۱۰ طبقه در صورت استفاده از حالت اول، با ۲٪ نوفه در بسامدهای طبیعی و ۲٪ نوفه در شکل‌های حالت (الف) براساس روش یانگ و لیو [۳۲] (ب) براساس روش پیشنهادی

هم‌بستگی پاسخ ایستایی تخمین زده شده (با کمک داده‌های چند حالت اول) در سازه سالم و آسیب‌دیده، از طریق مفاهیم اصلی نگره وابستگی خاکستری استوار است. جابه‌جایی ایستایی، حساسیت بالایی نسبت به رخ‌داد آسیب دارد، اما مقایسه مستقیم آن برای سازه‌های سالم و آسیب‌دیده، نمی‌تواند نتیجه واضح و دقیقی پیرامون آسیب‌های رخ‌داده ارائه نماید. این در حالی است که نگره وابستگی خاکستری، با شفافیت بیشتری می‌تواند این مقایسه را انجام دهد. از طرفی، تحریک ایستایی سازه دشواری‌هایی نظیر مشکلات اجرایی دارد. تخمین پاسخ‌های ایستایی، که با کمک داده‌های چند حالت اول سازه صورت می‌پذیرد، در عین حال که امکان استفاده از عامل جابه‌جایی ایستایی (به‌عنوان پارامتری تلفیقی از بسامدهای طبیعی و شکل‌های حالت) را فراهم می‌آورد، مشکلات و دشواری‌های تحریک و ثبت داده‌های ایستایی سازه را منتفی می‌کند. به‌منظور آشکارسازی دقیق‌تر محل خرابی، شاخص آسیب GDI، براساس ضریب‌های وابستگی خاکستری پیشنهاد شد. این شاخص، بر پایه تعریف دو شرط اصلی به‌منظور قضاوت پیرامون سلامت طبقات سازه، استوار است. به‌منظور بررسی کارایی روش پیشنهاد شده، دو نمونه قاب برشی ۱۶ و ۲۴ طبقه، تحت الگوهای آسیبی مختلف مطالعه شد. هم‌چنین،

داده شده است. ملاحظه می‌شود که هر دو شاخص به‌خوبی توانسته‌اند محل آسیب‌ها را تشخیص دهند. البته، مقادیر شاخص پیشنهادی GDI، به گونه‌ای است که راحت‌تر و با اطمینان بیشتری می‌توان پیرامون سلامت طبقات اظهار نظر کرد. به‌عنوان مطالعه‌ای دیگر، الگوی فوق، با استفاده از داده‌های فقط مود اول و در شرایطی که ۲٪ نوفه در بسامدهای طبیعی و ۲٪ نوفه در شکل‌های حالت وجود داشته باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. گفتنی است که نوفه شکل‌های حالت هم با رویکرد مطرح شده در رابطه (۱۶)، تولید شده است. نتیجه‌های به‌دست آمده از این مطالعه، در شکل (۱۰) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که در شرایط یاد شده، شاخص پیشنهادی GDI توانسته است با دقت و وضوح بیشتری محل آسیب را تشخیص دهد. این در حالی است که در شاخص FDI تفاوت مشخصی بین مقادیر مربوط به طبقه‌های سالم و آسیب‌دیده، وجود ندارد و قضاوت پیرامون سلامت طبقه‌ها، به‌صورت نسبی صورت می‌پذیرد.

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، روشی جدید به‌منظور تشخیص محل آسیب در قاب‌های برشی ارائه شد. این روش، بر پایه بررسی میزان

مودال محدود (قابلیت محلی سازی آسیب با کمک داده‌های حالت اول سازه)

۴- حساسیت کم به نوفه‌های تصادفی موجود در داده‌های مودال

۵- قابلیت توسعه شاخص پیشنهادی به صورت پارامتری جهت قضاوت پیرامون سلامت کل سازه.

بر این اساس، می‌توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی در این مقاله، قابلیت استفاده در موارد عملی پایش سلامتی سازه‌ها را داشته و قادر است محل آسیب‌های رخ داده در قاب‌های برشی را با داده‌های مودال محدود، آشکار سازد.

مقایسه‌ای بین شاخص پیشنهادی و شاخص ارائه شده توسط یانگ و لیو [۳۲]، از طریق بررسی یک قاب برشی ۱۰ طبقه صورت پذیرفت. مهم‌ترین مزایای روش پیشنهادی براساس الگوهای مطالعه شده به صورت زیر خلاصه می‌گردد:

۱- سرعت و دقت بالا در آشکارسازی آسیب در انواع قاب‌های برشی با تعداد طبقه‌های مختلف و مشخصات فیزیکی منظم و یا نامنظم

۲- حساسیت بالا به رخداد الگوهای آسیبی مختلف (از نظر تعداد محل‌های آسیب‌دیده و شدت آن‌ها)

۳- توانایی آشکارسازی محل آسیب با کمک داده‌های

## واژه‌نامه

- |                                       |                                 |                                     |
|---------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1. structural health monitoring (SHM) | 8. plates                       | 16. grey variant                    |
| 2. damage detection                   | 9. pattern search optimization  | 17. flexibility matrix              |
| 3. natural frequencies                | 10. grey relation theory        | 18. monitoring                      |
| 4. mode shapes                        | 11. grey relation coefficients  | 19. modal assurance criterion (MAC) |
| 5. objective function                 | 12. sequence                    | 20. frequency domain response       |
| 6. noise                              | 13. reference sequence          |                                     |
| 7. modal residual force               | 14. test sequence               |                                     |
|                                       | 15. distinguishable coefficient |                                     |

## مراجع

1. Rytter, A., "Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures", Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark, 1993.
2. Fan, W., and Qiao, P., "Vibration-Based Damage Identification Methods: A Review and Comparative Study", *Structural Health Monitoring*, Vol. 10, No. 1, pp. 83-111, 2011.
3. Kim, J-T., Ryu, Y-S., Cho, H-M., and Stubbs, N., "Damage Identification in Beam-type Structures: Frequency-Based Method vs Mode-Shape-Based Method", *Engineering Structures*, Vol. 25, No. 1, pp. 57-67, 2003.
4. Kim, J-T., and Stubbs, N., "Crack Detection in Beam-Type Structures using Frequency Data", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 259, no. 1, pp. 145-160, 2003.
5. Xia, Y., and Hao, H., "Statistical Damage Identification of Structures with Frequency Changes", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 263, pp. 853-870, 2003.
6. Zhu, H-P., He, B., and Chen, X-Q., "Detection of Structural Damage through Changes in Frequency", *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, Vol. 10, no. 6, pp. 1069-1073, 2005.
7. Yang, Z., and Wang, L., "Structural Damage Detection by Changes in Natural Frequencies", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 21, No. 3, pp. 309-319, 2010.
8. Suresh, S., Omkar, S. N., Ganguli, R., and Mani, V., "Identification of Crack Location and Depth in A Cantilever Beam using A Modular Neural Network Approach", *Smart Materials and Structures*, Vol. 13, pp. 907-915, 2004.
9. Salawu, O. S., "Detection of Structural Damage through Changes in Frequency: A Review", *Engineering Structures*, Vol. 19, no. 9, pp. 718-723, 1997.
10. Perera, R., Fang, S-E., and Ruiz, A., "Application of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithms to Multiobjective Damage Identification Inverse Problems with Modelling Errors", *Meccanica*, Vol. 45, pp. 723-734, 2010.
11. Hu, N., Wang, X., Fukunaga, H., Yao, Z. H., Zhang, H. X., and Wu, Z. S., "Damage Assessment of Structures using Modal Test Data", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 28, pp. 3111-3126, 2001.
12. Duan, Z., Yan, G., Ou, J., and Spencer, B. F.,

- “Damage Detection in Ambient Vibration using Proportional Flexibility Matrix with Incomplete Measured DOFs”, *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 14, No. 2, pp. 186–196, 2007.
13. Jaishi, B., and Ren, W. X., “Finite Element Model Updating Based on Eigenvalue and Strain Energy Residuals using Multiobjective Optimization Technique”, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 21, pp. 2295–2317, 2007.
  14. Yang, Q. W., and Liu, J. K., “Structural Damage Identification Based on Residual Force Vector”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 305, pp. 298–307, 2007.
  15. Kang, F., Li, J. J., and Xu, Q., “Damage Detection based on Improved Particle Swarm Optimization using Vibration Data”, *Applied Soft Computing*, Vol. 12, pp. 8, pp. 2329–2335, 2012.
  16. Ge, M., and Lui, E. M., “Structural Damage Identification using System Dynamics Properties”, *Computers & Structures*, Vol. 83, no. 27, pp. 2185–2196, 2005.
  17. Ghodrati Amiri, G., Seyed Razaghi, S. A., and Bagheri, A., “Damage Detection in Plates Based on Pattern Search and Genetic Algorithms”, *Smart Structures and Systems*, Vol. 7, no. 2, pp. 117–132, 2011.
  18. Yan, W.-J., Ren, W.-X., and Huang, T.-L., “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, 2012.
  19. Limongelli, M. P., “The Interpolation Damage Detection Method for Frames under Seismic Excitation”, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 330, No. 22, pp. 5474–5489, 2011.
  20. Tabrizian, Z., Afshari, E., Ghodrati Amiri, G., Hosseinali Beigy, M., and Pourhoseini Nejad, S. M., “A New Damage Detection Method: Big Bang-Big Crunch (BB-BC) Algorithm”, *Shock and Vibration*, Vol. 20, pp. 633–648, 2013.
  21. Kourehli, S. S., Ghodrati Amiri, G., Ghafory-Ashtiany, M., and Bagheri, A., “Structural Damage Detection Based on Incomplete Modal Data using Pattern Search Algorithm”, *Journal of Vibration and Control*, Vol. 19, pp. 821–833, 2012.
  22. Seyedpoor, S. M., “A Two Stage Method for Structural Damage Detection using A Modal Strain Energy based Index and Particle Swarm Optimization”, *International Journal of Non-Linear Mechanics*, Vol. 47, pp. 1–8, 2013.
  23. Chen, X.-Z., Zhu, H.-P., and Chen, C.-Y., “Structural Damage Identification using Test Static Data based on Grey System Theory”, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A*, Vol. 6A, No. 8, pp. 790–796, 2005.
  24. Abdo, M. A. B., “Parametric Study of using Only Static Response in Structural Damage Detection”, *Engineering Structures*, Vol. 34, pp. 124–131, 2012.
  25. Zare Hosseinzadeh, A., Bagheri, A., and Ghodrati Amiri, G., “Two-Stage Method for Damage Localization and Quantification in High-Rise Shear Frames Based on the First Mode Shape Slope”, *International Journal of Optimization in Civil Engineering*, Vol. 3, no. 4, pp. 653–672, 2013.
  26. Deng, J. L., “Introduction to Grey System Theory”, *Journal of Grey System*, Vol. 1, No. 1, pp. 1–24, 1989.
  27. Fu, C. Y., and Zheng, J. S., “Application of Grey Relational Analysis for Corrosion Failure of Oil Tubes”, *Corrosion Science*, Vol. 43, No. 5, pp. 881–889, 2001.
  28. Seyedpoor, S. M., and Yazdanpanah, O., “An Efficient Indicator for Structural Damage Localization using the Change of Strain Energy Based on Static Noisy Data”, *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, pp. 2661–2672, 2014.
  29. Allemang, R. J., and Brown, D. L., “A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis”, *1<sup>st</sup> International Modal Analysis Conference*, pp. 110–116, 1982.
  30. Randall, J. A., “The Modal Assurance Criterion—Twenty Years of Use and Abuse”, *Sound and Vibration*, pp. 14–21, August 2003.
  31. West, W. M., “Illustration of the Use of Modal Assurance Criterion to Detect Structural Changes in An Orbiter Test Specimen”, *Proceedings of Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*, pp. 1–6, 1984.
  32. Yang, Q.-W., and Liu, J.-K., “Damage Identification by the Eigenparameter Decomposition of Structural Flexibility Change”, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 78, pp. 444–459, 2009.