

# تشخیص خرابی ساختمانهای فولادی با استفاده از نتایج آزمایش‌های ارتعاش محیطی

مهران پورقلی<sup>\*</sup>، مهین قنادی<sup>۱</sup>، محسن محمدزاده گیلارلو<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد سراب

۲- استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد سراب

Email: pourgholi@iausa.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۳/۳۱]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۲/۳۰]

## چکیده

از آنجایی که خرابی زیرساخت‌هایی مانند پل‌ها، ساختمان‌ها، علاوه بر تلفات و خسارات سنگین، همچنین مشکلات اجتماعی و اقتصادی فراوانی را به همراه دارد. بیشتر کشورهای صنعتی بودجه قابل توجهی را برای نظارت بر سلامت آن‌ها اختصاص می‌دهند. استراتژی‌های تشخیص خرابی و نظارت مداوم بر وضعیت سازه به ویژه پس از بلایای طبیعی و مصنوعی باعث می‌شود که اقدامات لازم در مراحل اولیه خرابی انجام گیرد و می‌تواند هزینه نگهداری و احتمال فروپاشی را کاهش دهد. روش‌های پایش سلامت سازه اغلب فرصتی را برای کاهش هزینه‌های نگهداری، تعمیر و مقاوم‌سازی در طول چرخه عمر سازه فراهم می‌کند. بیشتر روش‌های نظارت بر سلامت سازه که برای شناسایی آسیب‌های احتمالی پیشنهاد و اجرا شده‌اند به ویژگی‌های دینامیکی سازه بستگی دارند. یکی از کاربردی‌ترین مورد از این روش‌ها که با استفاده از نتایج شناسایی سیستم حوزه زمانی به تشخیص خرابی می‌پردازد، روش بردار بار خرابی (DLV) است. ایده اصلی این روش یافتن ترکیبات باری است که میدان کرنش اعضای آسیب‌دیده را در هر دو سازه سالم و آسیب‌دیده صفر کند. از آنجایی که سازه‌های خرپایی معمولاً در پل‌ها، سازه‌های با دهانه بلند و همچنین طیف گسترده‌ای از ساختمان‌های فولادی با قاب ساده و مهاربندی شده مورد استفاده قرار می‌گیرند، در این تحقیق قابلیت روش زیرفضای تصادفی برپایه تجزیه متعامد (SI-ORT) در تشخیص خرابی ساختمان‌های فولادی با روش DLV مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور، ساختمان مسکونی ۵ طبقه با قاب ساده تحت زلزله الاسترو قرار گرفت. طبق سناریوی خرابی که با کاهش مساحت مهاربندها تعریف می‌شود، سازه در طبقات دوم و پنجم دچار آسیب می‌شوند. در نتیجه بررسی‌ها مشخص شد که روش DLV به کیفیت مشخصات مودال مستخرج بسیار حساس بوده، به طوری که با افزایش نویزهای خروجی‌ها، این روش قدرت خود را در تشخیص خرابی سازه‌ها از دست می‌دهد؛ از این رو می‌توان نتیجه گرفت که نوع روش شناسایی سیستم تأثیر بسیار زیادی در نتایج حاصل از این روش دارد.

**واژگان کلیدی:** تشخیص خرابی، پایش سلامت سازه، ماتریس شکل‌پذیری، ارتعاشات محیطی، فضای حالت، زیر فضای تصادفی

## ۱- مقدمه

عیب‌یابی یکی از شاخه‌های کنترل سلامت سازه‌ها است که با توجه به لزوم تشخیص به موقع خرابی‌ها و جلوگیری از پیشرفت آن‌ها، یکی از فعال‌ترین زمینه‌های تحقیقاتی است. وقوع آسیب در سازه‌ها باعث تغییر جرم، سختی و خواص میرایی سازه شده و در پی آن پاسخ‌های استاتیکی و دینامیکی سیستم نیز تغییر می‌کند. امروزه، بیشتر تحقیقات بر اساس حداقل‌سازی اختلاف پاسخ سازه سالم و خراب، انجام می‌شود. بیشتر روش‌های نظارت بر سلامت سازه بر اساس ویژگی‌های دینامیکی سازه است که از داده‌های ارتعاش بدست می‌آید. روش DLV (Damage Localization Vectors) که توسط برنال در سال ۲۰۰۲ معرفی شد یکی از این روش‌ها است، که مبتنی بر شناسایی مجموعه‌ای از بردارها است که در صورت عدم آسیب، به سازه اعمال می‌شود، و با ایجاد تنش صفر روی مناطق آسیب‌دیده به جایابی و تشخیص آسیب کمک می‌کند [2, 3].

این روش که به صورت آزمایشی نیز تأیید شده است و برای موارد خسارتی که سازه آن‌ها قبل و بعد از واقعه آسیب خطی دیده باشد، قابل استفاده است. اجرای انواع متنوعی از این روش مانند DLV تصادفی (SDLV)، DLV دینامیکی (DDLV)، DLV دینامیکی تصادفی (SDDLVL)، به صورت تجربی فرموله و تأیید شده‌اند. کارایی روش DLV برای جایابی و تشخیص آسیب به دقت ماتریس‌های انعطاف‌پذیری فرموله شده بستگی دارد. این روش را روی سازه‌های مختلف مانند خرپای دوبعدی و سه‌بعدی، تیرهای تک دهانه و تیرهای چنددهانه می‌توان اعمال کرد و خسارتی که ایجاد می‌شود به عنوان کاهش ابعاد سطح مقطع اعضای سازه است. در این روش مشخص می‌شود که ۹۴٪ موارد خسارت با موفقیت شناسایی می‌شوند [1].

در دهه‌های اخیر، روش‌های متعددی برای تشخیص خرابی‌های سازه پیشنهاد شده است، برای نمونه، می‌توان به بررسی تحقیقات دوبلینگ و همکارانش در سال ۱۹۹۶ در آزمایشگاه ملی لس‌آلاموس، با نام شناسایی خسارت و نظارت بر سلامت

سیستم‌های سازه‌ای و مکانیکی با بهره‌گیری از تغییر در ویژگی‌های ارتعاش آن‌ها نام برد [4]. همچنین تحقیقات سان و همکاران در سال ۲۰۰۳ به بررسی متون نظارت بر سلامت سازه اشاره کرد [5].

لیو در سال ۱۹۹۵ از فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده و شکل‌های معین برای فرموله سازی اختصاصی خرپا استفاده کرد، که مشکلات آن با یک برنامه بهینه‌سازی برای شناسایی سازه و تشخیص آسیب به کمترین می‌رسد [6]. Shi و همکارانش در سال ۲۰۰۰ برای جایابی آسیب از حساسیت و روش مبتنی بر آمار به نام (معیار اطمینان) در محل آسیب چندگانه و در اشکال معین اندازه‌گیری نشده استفاده کرده و سپس از فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده برای تعیین میزان آسیب استفاده کردند [7]. Ricci در سال ۲۰۰۰ با محاسبه فاصله اقلیدسی بین حالت‌های اندازه‌گیری شده و بهترین حالت بردارهای معین قابل دستیابی، آسیب‌های سازه را تعیین کرد [8].

برنال و همکاران روش DLV مبتنی بر انعطاف‌پذیری را برای هماهنگی با نتایج تحقق تصادفی در زمینه نمایش فضای حالت اصلاح کرد و خاطرنشان کرد که فضای خالی تغییر انعطاف‌پذیری به طور ضمنی حاوی اطلاعات محلی سازی آسیب است و DLV‌ها در این فضای خالی را می‌توان بدون ماتریس انعطاف‌پذیری تخمین زد [9].

هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ مکان‌یابی آسیب سازه‌های قاب از پاسخ‌های شتاب لرزه‌ای را با استفاده از تکنیک DLV با مدل ARX برای شناسایی سیستم بررسی کردند. پتانسیل روش DLV در تشخیص آسیب‌های محلی ناشی از پاسخ‌های سازه‌ای لرزه‌ای سراسری برای سیستم‌های قاب تأیید شد [10].

در سال ۲۰۱۲ ونگ و همکارانش امکان‌سنجی روش DLV برای تشخیص آسیب سیستم‌های قاب فقط خروجی به صورت تجربی بر اساس پاسخ‌های دینامیکی آنها با الگوریتم SSI برای شناسایی سیستم را بررسی کردند، آنها شرایط آسیب‌های تکی و چندگانه را در مکان‌های مختلف در نظر گرفتند. آنها در این تحقیق هم سناریوی نویز سفید و هم زلزله‌السترو را به عنوان

ورودی‌های لرزه‌ای با مشاهده کامل یا جزئی بر پاسخ‌های شتاب طبقات در نظر گرفتند. این طرح در شرایط آسیب منفرد تحت تحریکات ورودی ثابت و غیر ثابت موثر و قوی است. با این حال، این طرح برای شرایط آسیب‌های متعدد زمانی که ساختار تا حدی مشاهده می‌شود، کافی نیست همانطور که در کار قبلی خود نشان دادند، در چنین شرایطی، برانگیختگی ورودی برای ارزیابی دقیق‌تر خسارت مورد نیاز است، این مطالعه بیش از پیشتری در مورد این طرح از نظر اثربخشی، استحکام، و محدودیت برای مکان‌یابی آسیب سیستم‌های قاب از داده‌های پاسخ لرزه‌ای ارائه می‌دهد [11].

امکان‌سنجی روش DLV در ارتباط با تکنیک SSI برای تشخیص آسیب قاب‌های مسطح به صورت عددی توسط وانگ و همکاران بررسی شده است. به عنوان گام بعدی برای ارزیابی این تکنیک در شرایط واقعی‌تر، یک سری آزمایش میز لرزان انجام دادند. آنها یک قاب برشی پنج طبقه با مهاربندی‌های مورب در نظر گرفتند. شرایط آسیب قاب را با برداشتن برخی از مهاربندها شبیه‌سازی کردند و شرایط آسیب‌های تکی و چندگانه در مکان‌های مختلف را در نظر گرفتند. هر دو سناریوی نوین سفید و زلزله ۱۹۴۰ السترو به عنوان ورودی‌های لرزه‌ای با مشاهده کامل یا جزئی بر روی پاسخ‌های شتاب طبقات در نظر گرفته شده است [12].

روش‌های پایش سلامت سازه بسیار وابسته به دقت مشخصات دینامیکی شناسایی شده از سازه آسیب دیده است. در این تحقیق از روش بهینه زیر فضای تصادفی برپایه کواریانس در شناسایی مشخصات مودال بهره گرفته شده است که در تحریک‌های پایین قابلیت بسیار کارآمد هستند. در نتیجه می‌توان با کاهش عدم قطعیت مشخصات مودال به ماتریس شکل‌پذیری با دقت بالاتر دست. در این پژوهش، با بکارگیری معادلات خاص به بررسی خرابی سازه‌های خرابی به روش بردار بار خرابی (DLV) پرداخته شده است. بدین صورت که با استفاده از نرم‌افزار SAP2000 یک قاب ساختمانی با مهاربند همگرا مدل‌سازی شده و با تحلیل تاریخیچه زمانی شتاب طبقات داده برداری شده است و از نتایج این داده‌ها برای شناسایی سیستم و

ساخت ماتریس شکل‌پذیری سیستم بدون آسیب استفاده شده است. سپس در قاب‌های ساختمانی مذکور آسیب‌هایی در اجزای باربر جانبی ایجاد شده و دوباره داده‌برداری تاریخیچه زمانی برای ساخت ماتریس شکل‌پذیری سیستم آسیب دیده انجام گرفته است و در نهایت با بررسی کارایی الگوریتم DLV که در نرم‌افزار Matlab کد نویسی شده است، به تشخیص آسیب این سازه‌ها پرداخته شده است. دلیل استفاده از این روش اطمینان از سلامت سازه می‌باشد و در وهله بعد در صورت معیوب بودن سازه، شناسایی محل و شدت آسیب برای رفع این عیب‌های موضعی است. با توجه به محدودیت روش‌های قدیمی (بازرسی چشمی، تست آلتراسونیک، آکوستیک و ...)، امروزه بیشتر تحقیقات براساس روش‌های مبتنی بر پاسخ‌های سازه، به عیب‌یابی آن‌ها می‌پردازند. در مسایل عیب‌یابی می‌توان با استفاده از تغییرات به وجود آمده در پاسخ‌ها، هنگام فرایندی معکوس به خرابی که موجب این تغییرات شده است دست یافت.

## ۲-۲- معادلات حاکم بر روش DLV

ایده اصلی روش DLV یافتن ترکیبات باری است که میدان کرنش اعضای آسیب‌دیده را در هر دو سازه سالم و آسیب‌دیده می‌توان نشان داد که این چنین برداری در فضای پوچی اختلاف دو ماتریس شکل‌پذیری سازه آسیب‌دیده و سالم قرار دارد. طریقه محاسبه این فضا با استفاده از روش تجزیه مقدار تکین ماتریس اختلاف شکل‌پذیری بوده و روش کار بدین صورت است که بردارهای فضای پوچی به سازه سالم اعمال شده و تنش‌های داخلی اعضا ثبت می‌شود. این تنش‌ها با استفاده از ابزارهای آماری به تنش نرمال وزن‌دار (WSI) تبدیل شده و عضوی که تنش نرمال کمتری دارد احتمال آسیب آن بیشتر است. مراحل کار به صورت گام‌به‌گام ارائه می‌شود [3]

الف) محاسبه ماتریس انعطاف‌پذیری سیستم آسیب‌دیده و سالم: برای محاسبه ماتریس انعطاف‌پذیری در مدل‌های واقعی از نتایج شناسایی سیستم استفاده می‌شود. در این پژوهش از روش زیر فضای تصادفی استفاده شده است.

(ب) محاسبه ماتریس اختلاف دو ماتریس انعطاف پذیری:

$$DF = F_D - F_U \quad (1)$$

که در آن  $F_U$  و  $F_D$  به ترتیب ماتریس انعطاف پذیری سازه آسیب دیده و سالم است.

(پ) تجزیه مقادیر تکین (SVD) برای  $DF$  ها

$$DF = USV^T \quad (2)$$

$$S = \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

به طوری که  $U$  و  $V$  عمود بر هم هستند و  $S \in R^{m \times m}$  مورب و دربردارنده مقادیر تکین ماتریس  $DF$  است. برای شرایط ایده‌ال، بردارهای  $DLV$  ستون‌های متناظر در  $V$  هستند که با  $S_2 = 0$  مرتبط هستند. اما عملاً  $S_2$  صفر نیست بنابراین معیارهایی برای تصمیم‌گیری بردارهای  $DLV$  لازم است.

(ت) بردارها به‌عنوان بار روی مدل سالم اعمال شده و برای هر بردار  $V_j$  یک تنش مشخصه  $\bar{\sigma}_i$  ( $i =$  تعداد عناصر) محاسبه می‌شود.  $\bar{\sigma}_i^2$  متناسب با انرژی کرنشی محاسبه می‌شود که برای المان‌های خرپایی همان مقدار مطلق نیروی داخلی هر عضو است.

(ث) یافتن  $\bar{\sigma}_i$  بیشترین و تعریف  $C_j$  به عنوان

$$C_j = \frac{1}{\max \max \bar{\sigma}_j} \quad \text{for } j = 1: m \quad (4)$$

که در آن  $m$  تعداد بردارها در  $V$  است.

(ج) محاسبه شاخص  $svn$

$$svn_j = \sqrt{\frac{s_j c_j^2}{s_q c_q^2}} \quad (5)$$

که در آن  $s_j$  مقدار بار مربوط به بردار  $i$ ام بوده و

$$s_q c_q^2 = \max \max (s_j c_j^2) \quad \text{for } j = 1: m \quad (6)$$

(چ) برداری می‌تواند به‌عنوان یک  $DLV$  در نظر گرفته شود که در آن

$$svn_j \leq 0.20 \quad (7)$$

(ح) برای هر  $DLV$  شاخص تنش نرمال شده به‌صورت زیر حساب می‌شود:

$$nsi_j = c_j \bar{\sigma} \quad (8)$$

(خ) یافتن شاخص استرس وزنی (WSI)

$$WSI = \frac{\sum_{i=1}^{ndl} \frac{\{nsi\}_i}{\max(svn_i \cdot 0.015)}}{n_{dlv}} \quad (9)$$

$ndl$  تعداد بردارهای  $DLV$  و  $\{nsi\}_i$  بردار مقادیر  $nsi$  برای  $i$  مین  $DLV$  است.

WSI میانگین وزنی مقادیر  $nsi$  برای هر بردار  $DLV$  به همراه اوزان دو طرفه شاخص های  $svn$  می‌باشد. حد  $0.15$  برای جلوگیری گسترده از اوزان بزرگ، زمانی که  $svn$  بسیار کوچک است، معرفی می‌شود.  $n_{dlv}$ : تعداد بردار  $DLV$  است که در مرحله (V) مشخص شده است.

(د) اگر  $WSI < 1$  باشد برای یک عنصر به نظر می‌رسد که احتمالاً آسیب دیده است.

### ۳- مدلسازی ارتعاش لرزه‌ای قاب فولادی

در این تحقیق با استفاده از روش  $DLV$  به آسیب‌شناسی یک ساختمان مسکونی پنج طبقه شکل (۱) پرداخته شده است. این ساختمان که در شهر سراب (آذربایجان شرقی) واقع بوده در دو جهت اصلی خود دارای قاب فولادی ساده با مهاربند  $X$  است. قابهای  $A$  و  $D$  در راستای شمالی-جنوبی و قابهای  $1$  و  $4$  در راستای شرقی-غربی مهاربندی هستند. بار مرده و زنده برای طراحی به ترتیب  $900 \text{ kg/m}^2$  و  $200 \text{ kg/m}^2$  در نظر گرفته شده است. جنس خاک محل اجرای سازه تپ II طبق آیین‌نامه  $2800$  در نظر گرفته شده است. تحلیل و طراحی این سازه در نرم افزار  $SAP2000$  براساس آیین‌نامه  $ACI318-99$  انجام

شکل ۳. نمودار شتاب سازه پنج طبقه در اثر زلزله سنترو در ترازهای ۱ و ۲.

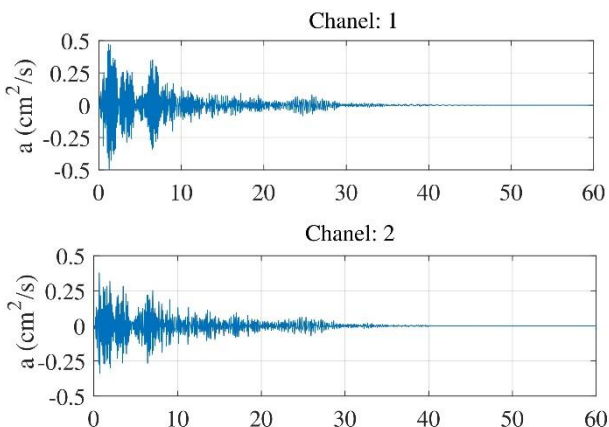


Fig. 3. Acceleration records of the five-story structure excited by the Centro earthquake for channels 1 and 2.

در نهایت قاب مهاربندی A با شتاب زمین لرزه سنترو که در طبقه دوم (گره ۲) اعمال شده با فرض میرایی ویسکوز ثابت ۵ درصد برای تمامی مودها تحریک می‌شود. نمونه برداری شتاب-های ایستگاه های ۱ و ۲ به مدت یک دقیقه در گام های زمانی 0.01 ثانیه انجام شد که در شکل (۳) مشاهده می‌شود.

در این مرحله با تعریف سناریوی خرابی، مشخصات مودال سازه سالم و آسیب‌دیده با استفاده از الگوریتم SSI-ORT [13, 14] استخراج می‌شود. سناریوی خرابی به صورت کاهش مساحت مهاربندها اعمال می‌شود که طبق رابطه ۱۰ منجر به کاهش سختی جانبی سیستم می‌شود. در این تحقیق سختی طبقات دوم و پنجم به ترتیب ۳۰٪ و ۵۰٪ کاهش داده شده‌اند.

نویزهای محیطی و اندازه‌گیری از مهمترین عوامل عدم قطعیت مشخصات مودال مستخرج در روش‌های زیرفضای تصادفی هستند. به منظور اعمال عدم قطعیت در نتایج داده برداری، نویزهای خروجی برای هر دو سیستم سالم و آسیب‌دیده طوری تنظیم شدند که جذر میانگین مربعات (RMS) آنها معادل ۷٪ RMS داده‌های سنسور در طبقه دوم باشد. در ادامه RMS کلیه نویزهای اعمالی به سیستم نسبت به RMS داده‌های سنسور دوم تنظیم می‌شود که برای اختصار به صورت زوج (خروجی، ورودی) RMS ذکر خواهد شد.

گرفته است. پس از طراحی با توجه به رعایت نکات اجرایی مقاطع تمامی مهاربندها 2UNP8 در نظر گرفته می‌شود.

پس از طراحی کل سازه، قاب مهاربندی A طبق شکل (۲) به منظور بررسی قابلیت DLV در تشخیص خرابی قاب‌های مهاربندی از سازه اصلی خارج می‌شود. در این مرحله از سختی فشاری مهاربندهای ضربدری صرف نظر کرده و همچنین فرض می‌کنیم کل بارهای جانبی توسط دو قاب مهاربندی شده تحمل می‌شود. در نتیجه سختی محوری هر مهاربند 2UNP8 برابر است با:

$$K = \frac{EI}{L} \cos^2 \alpha \quad (10)$$

$$K = \frac{2 \times 10^6 \times 22}{386} \left( \frac{2.2}{3.86} \right)^2 \approx 4000 \frac{\text{ton}}{\text{m}}$$

شکل ۱. ۱. پلان ساختمان ۵ طبقه مسکونی

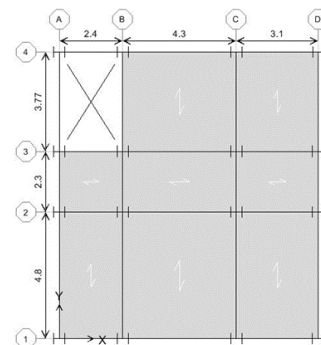


Fig. 1. 5 story residential building plan

شکل ۲. قاب مهاربندی شده

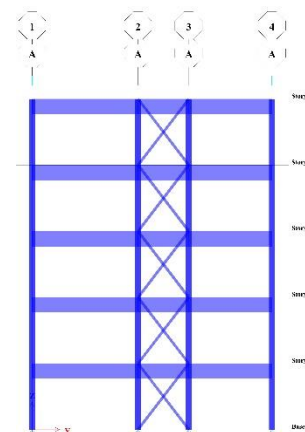


Fig. 2. braced frame section

$$[S \quad Q \quad V] = SQV(F_d - F_u) \quad (13)$$

شکل ۴. نمودار VAF برای قاب فولادی سالم با RMS(0%, 7%)

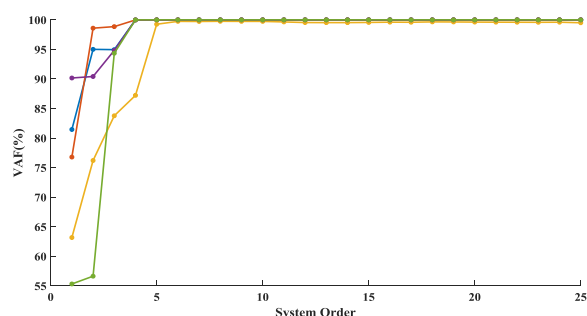


Fig. 4. Variance Account for (VAF) of undamaged building with RMS(0%,7%)

شکل ۵. نمودار پایداری قاب فولادی ۵ طبقه در حالت سالم با RMS(0%, 7%)

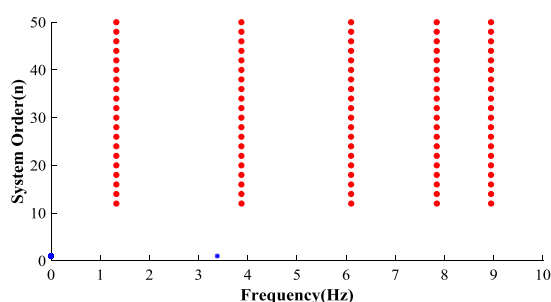


Fig. 5. Stability diagram of the 5-story steel frame in an undamaged state with RMS (0%,7%)

شکل ۶. نمودار پایداری کلاستر بندی شده قاب فولادی ۵ طبقه در حالت سالم با RMS(0%, 7%)

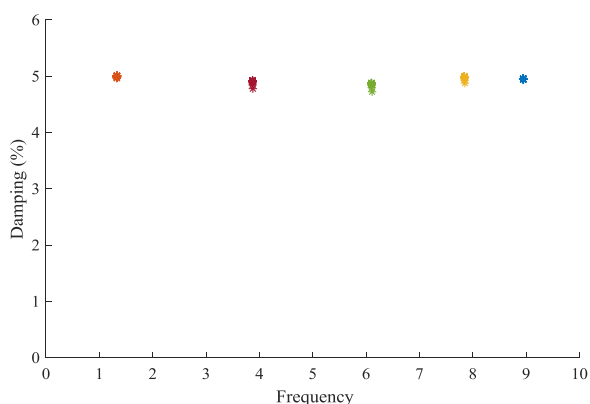


Fig. 6. DBSCAN clustering of the 5-story steel frame in an undamaged state with RMS (0%,7%).

در گام نخست با پیاده‌کردن الگوریتم برای سازه سالم، همان‌طور که در نمودار و شکل (۴) Varianced account for (VAF) مشاهده می‌شود سازه از مود ۵ ام به ۱۰۰٪ همگرا شده است. این همگرایی نشان دهنده این مطلب است که خطای تخمین پاسخ‌های سیستم پیش‌بینی نسبت به داده‌های اندازه‌گیری شده از مرتبه (2 × 5)، صفر شده است. به عبارتی سیستم تخمینی از داده‌های اندازه‌گیری شده شامل ۵ مود ارتعاشی بوده که به خوبی با سیستم واقعی هماهنگی دارد. فرکانس‌های این ۵ مود را می‌توان در نمودار پایداری شکل (۵) و نسبت‌های میرایی آنها را نیز با توجه در شکل (۶) مشاهده کرد. مشابهاً برای سازه آسیب‌دیده نیز الگوریتم-SSI ORT اجرا شده و مشخصات مودال آن با استفاده از شکل‌های (۷ تا ۹) استخراج شده است. خلاصه نتایج شناسایی هر دو سیستم در جدول (۳) ارائه شده است.

پس از شناسایی مشخصات مودال سازه نوبت به استخراج ماتریس‌های شکل‌پذیری است. در نخستین گام با توجه به مرتبه (۵×۲) سیستم، ماتریس‌های حالت سازه سالم (Au, Bu, Cu) و سازه آسیب‌دیده (Ad, Bd, Cd) را استخراج شده و سپس ماتریس نرمی سازه سالم (F<sub>u</sub>) و آسیب‌دیده (F<sub>d</sub>) محاسبه می‌شود:

$$F_d = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0.0007 & 0.0009 & 0.0009 & 0.0009 \\ 0.0007 & 0.0022 & 0.0024 & 0.0028 & 0.0029 \\ 0.0009 & 0.0024 & 0.0033 & 0.0033 & 0.0038 \\ 0.0009 & 0.0028 & 0.0033 & 0.0040 & 0.0044 \\ 0.0009 & 0.0029 & 0.0038 & 0.0044 & 0.0055 \end{bmatrix} \quad 11$$

$$F_u = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0.0005 & 0.0006 & 0.0006 & 0.0007 \\ 0.0005 & 0.0009 & 0.0011 & 0.0013 & 0.0014 \\ 0.0006 & 0.0011 & 0.0016 & 0.0018 & 0.0019 \\ 0.0006 & 0.0013 & 0.0018 & 0.0023 & 0.0024 \\ 0.0007 & 0.0014 & 0.0019 & 0.0024 & 0.0027 \end{bmatrix} \quad 12$$

با تجزیه مقادیر تکین (F<sub>d</sub> - F<sub>u</sub>) طبق رابطه (۱۳) بردارهای فضای پوچی این فضا به‌عنوان بردارهای بارگذاری خرابی (DLV) مطرح می‌شود.

شکل ۹. نمودار پایداری کلاستر بندی شده قاب فولادی ۵ طبقه در حالت

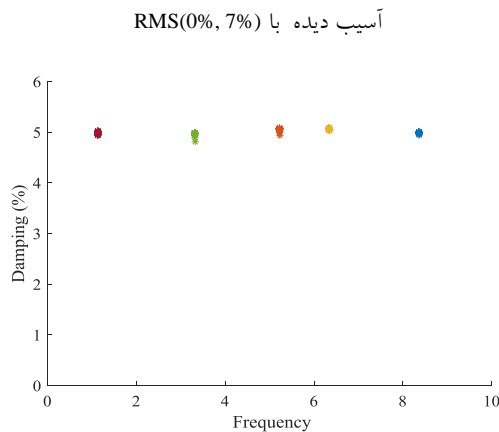


Fig. 9. DBSCAN clustering of the 5-story steel frame in an undamaged state with RMS (0%, 7%)

جدول ۳. مشخصات مودال سازه ۵ طبقه بر اساس مدل ریاضی با RMS(0%, 7%)

Mode No.	Frequency (Hz)		Damping (%)	
	Undam.	Damage.	Undam.	Damage.
	Model	Model	Model	Model
1	1.32	1.133	5.00	5.03
2	3.87	3.31	5.00	4.95
3	6.1	5.21	5.00	4.96
4	7.84	6.33	5.00	4.98
5	8.94	8.36	5	4.97

Table 3. Modal properties of 5-story building based numerical model with RMS (0%, 7%).

جدول ۵. استخراج بردارهای مکان یابی خرابی از نتایج داده های

لرزه ای ریاضی با RMS(0%, 7%)

SVD	1	2	3	4	5
$S_i$	0.001	0.00017	$6.28 \times 10^{-6}$	$5.4 \times 10^{-6}$	$1.21 \times 10^{-6}$
$S_j$	$\frac{1}{3.33}$	$\frac{1}{1.34}$	$\frac{1}{1.27}$	$\frac{1}{1.07}$	$\frac{1}{1.08}$
$S_j C_j^2$	0.0884	0.0995	0.0039	0.0047	0.0017
$S_q C_q^2$	-	1	-	-	-
snv	0.9672	1	0.2031	0.223	0.1341
-	-	-	DLV	DLV	

Table 5. Steps to Extract DLVs from Seismic Data with RMS (0%, 7%).

شکل ۷. نمودار VAF برای قاب فولادی آسیب دیده با RMS(0%, 7%)

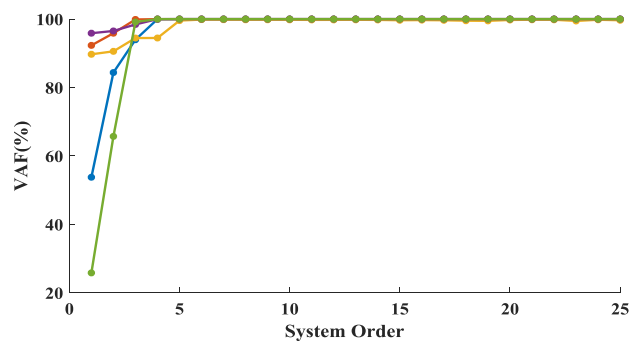


Fig. 7. Variance Account for (VAF) of damaged building with RMS (0%, 7%).

با اعمال بردارهای ماتریس V به عنوان بارگذاری در سازه طبق شکل (۵) در نرم افزار SAP2000، نیروهای بادبندها استخراج شده که در جدول (۵) به بیشترین نیروی هر بارگذاری اشاره شده است. با محاسبه بیشترین نیروی هر بردار خرابی معکوس آنرا ( $C_j$ ) برای تمام DLV ها محاسبه شده و در نهایت  $svn_j$  های کوچکتر از ۲۰ درصد به عنوان DLV انتخاب می شود. کمترین  $snv$  طبق توضیحات برنال 0.015 در نظر گرفته شده است [3]. بر همین اساس بردارهای سوم و پنجم که  $snv$  آنها کمتر از 0.015 بوده، به عنوان بردارهای بار خرابی انتخاب می شود. با انجام فرآیندهای ذکر شده نتایج در جدول (۶) آمده است. همانطور که مشاهده می شود اعضای دوم و پنجم اعضای آسیب دیده احتمالی تحت اثر زمین لرزه هستند.

شکل ۸. نمودار پایداری قاب فولادی ۵ طبقه در حالت آسیب دیده با RMS(0%, 7%)

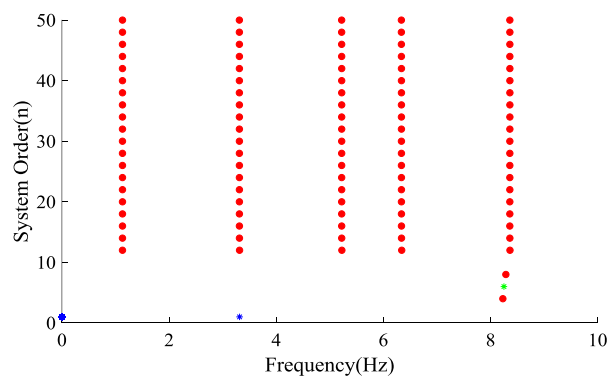


Fig. 8. Stability diagram of the 5-story steel frame in a damaged state with RMS (0%, 7%).

شکل ۱۲. بردارهای خرابی اعمالی به قاب فولادی ۵ طبقه در مدل ارتعاش لرزه‌ای با RMS(0%, 7%)

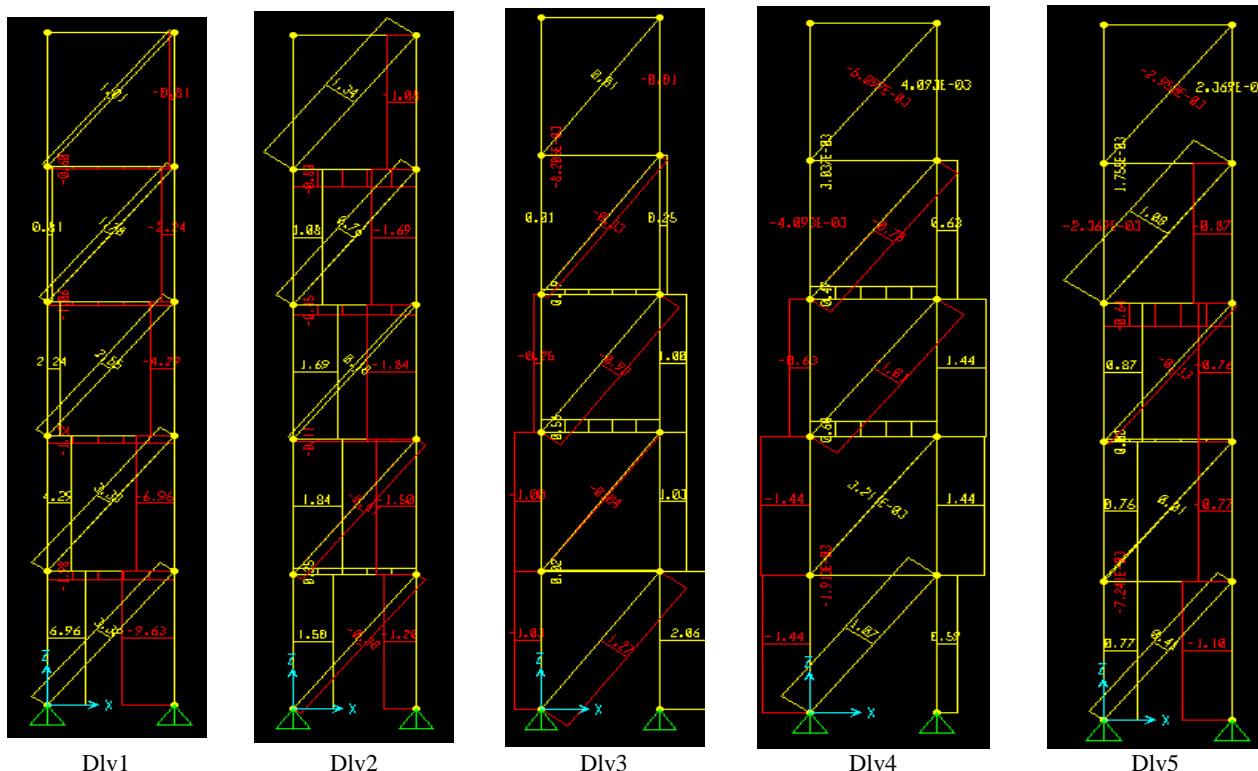


Fig. 12. Applied DLVs to the 5-story steel frame in the seismic vibration model with RMS (0%,7%).

۵- تاثیر نویزهای محیطی بر تشخیص خرابی با DLV

به منظور بررسی تأثیر نویزهای ورودی و خروجی بر نتایج مستخرج از روش DLV، Rms نویزهای ورودی ۰.۵٪، ۱.۰٪ و ۲.۰٪ تراز تحریک در نظر گرفته می‌شود. در حالی که Rms نویزهای خروجی بین ۰.۵٪ تا ۲.۰٪ Rms پاسخ اندازه‌گیری شده در تراز طبقه دوم در فرآیند شناسایی اعمال می‌شود. مراحل انجام کار به این صورت است که ابتدا Rms نویزهای ورودی ۰.۵٪ و Rms خروجی‌ها بین ۱۰-۲۰٪ با گام های ۰.۵٪ افزایش داده می‌شود که مشخصات مودال مستخرج در جدول (۷) ذکر شده است. سپس Rms نویزهای ورودی ۱.۰٪ و Rms خروجی‌ها بین ۱۰-۲۰٪ با گام‌های ۰.۵٪ افزایش داده می‌شود که نتایج آن نیز در جدول (۸) ارائه شده و در نهایت Rms نویزهای ورودی ۲.۰٪ و Rms خروجی‌ها بین ۱۰-۲۰٪ با گام های ۰.۵٪ افزایش داده شده خلاصه نتایج در جدول (۹) ذکر شده است. در گام نخست که Rms ورودی‌ها ۰.۵ درصد و Rms

جدول ۶. بردارهای نرمال تنش قاب فولادی ۵ طبقه ریاضی با

RMS(0%, 7%)

Story	nsi(1)	nsi(2)	$\frac{nsi(1)}{snv(1)}$	$\frac{nsi(2)}{snv(2)}$	Wsi
1	$\frac{1.27}{1.27} = 1$	$\frac{0.41}{1.08} = 0.37$	$\frac{1}{0.20} = 5$	2.71	3.86
2	0	0	0	0	0
3	$\frac{0.93}{1.27} = 0.73$	$\frac{0.13}{1.08} = 0.12$	$\frac{0.73}{0.20} = 3.6$	0.89	2.45
4	$\frac{0.33}{1.27} = 0.26$	$\frac{1.08}{1.08} = 1$	$\frac{0.26}{0.20} = 1.3$	9.6	5.45
5	0	0	0	0	0

Table 6. Normal stress vectors of 5-story steel frame with RMS (0%, 7%).



		(Hz)				
10%		1	1.31	5.00	1.33	4.95
		2	3.31	5.04	3.87	5.00
		3	5.21	4.96	6.1	4.95
		4	6.33	5.06	7.84	4.96
		5	9.36	4.98	8.94	4.99
10%	15%	1	1.12	4.94	1.32	5.03
		2	3.31	4.99	3.87	4.99
		3	5.21	4.98	6.1	4.97
		4	6.33	5.06	7.84	4.97
		5	8.36	4.97	8.94	5.02
20%		1	1.11	4.92	1.31	5.06
		2	3.31	4.95	3.77	4.89
		3	5.21	4.98	6.12	4.90
		4	6.23	5.10	7.82	4.95
		5	8.34	4.97	8.92	5.05

**Table 8.** Modal properties of the five stor building for input RMS of 10%

جدول ۹. مشخصات مودال سازه ۵ طبقه برای (RMS (20%, 10%)

RMS		Mode		Damaged		Undamaged		
In.	Out.	No.	Frq. (Hz)	Input	Output			
10%		1	1.1327	5.1774	1.33	4.95		
		2	3.31	4.95	3.87	4.83		
		3	5.22	4.8	6.10	5.00		
		4	6.34	4.93	7.85	4.96		
		5	8.36	4.92	8.95	4.89		
20%		1	1.13	4.971	13.2	5.08		
		2	3.31	5.03	3.87	5.10		
		3	5.22	5.00	6.10	4.92		
		4	6.34	5.10	7.84	4.85		
		5	8.36	4.94	8.94	4.94		

خروجی‌ها ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در جدول (۷) مشاهده می‌شود در نتیجه عدم قطعیت‌های اعمالی و آسیب سازه، فرکانس‌های سیستم دچار بیشترین اختلاف ۱۰ درصدی شده‌اند در حالیکه این اختلاف در میرایی‌ها  $\pm 1$  درصد است. پس از استخراج DLVها و اعمال آن به سازه در شکل (۱۳) دو بردار ۳ و ۵ به‌عنوان بردارهای بار خرابی انتخاب می‌شوند.

جدول ۷. مشخصات مودال سازه ۵ طبقه برای نویز ورودی ۵٪

RMS		Mode		Damaged		Undamaged		
In.	Out.	No.	Frq. (Hz)	Damp. (%)	Frq. (Hz)	Damp. (%)		
10%		1	1.13	5.1	1.32	5.1		
		2	3.31	4.92	3.87	4.92		
		3	5.21	4.90	6.10	4.90		
		4	6.33	4.95	7.84	4.95		
		5	8.36	5.00	8.95	5.00		
5%	15%	1	1.13	4.91	1.32	4.94		
		2	3.31	4.99	3.87	5.1		
		3	5.22	5.04	6.10	5.01		
		4	6.34	4.95	7.84	5.04		
		5	8.35	4.99	8.94	4.99		
20%		1	1.13	4.86	1.32	4.98		
		2	3.21	5.04	3.87	5.03		
		3	5.22	5.03	6.10	4.99		
		4	6.32	5.12	7.84	5.03		
		5	8.36	4.90	8.94	4.99		

**Table 7.** Modal properties of the five stor building for input RMS of 5%

جدول ۸. مشخصات مودال سازه ۵ طبقه برای نویز ورودی ۱۰٪

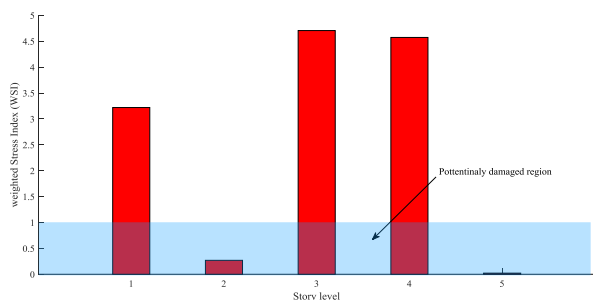
RMS		Mode		Damaged		Undamaged	
In.	Out.	No.	Frq.	Input	Output		

خروجی ها به ۲۰٪، DLV سوم در شکل (۲۳) از لیست بارهای خرابی با توجه به افزایش snv بیش از ۲۰٪ خارج شد. در نتیجه WSI در طبقه چهارم طبق شکل (۲۴) نسبت به دو سیستم قبل حدود ۵۰٪ کاهش یافته است. اما از آنجا که میزان WSI بیش از ۱٪ بوده، در این سیستم هم طبقات احتمالی خرابی به درستی تشخیص داده شده است.

1	1.13	5.06	1.32	4.84
2	3.31	5.04	1.73	5.10
20%	3	5.22	5.01	6.11
4	6.35	5.20	7.86	4.80
5	8.36	4.96	8.95	4.94

**Table 9.** Modal properties of the five stor building for RMS (20%, 10%)

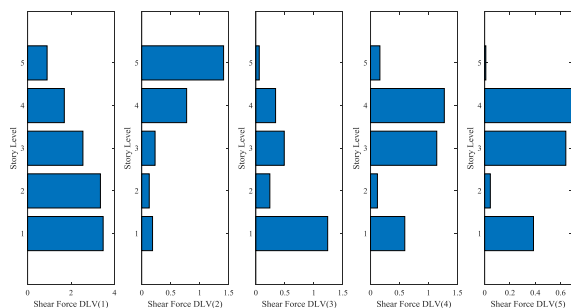
شکل ۱۴. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (5%, 10%) RMS



**Fig. 14.** WSI for each brace of steel frame floors for (5%, 10%)

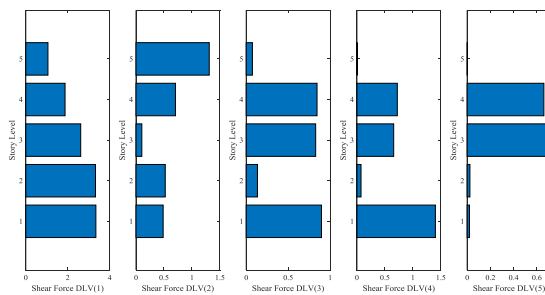
پس از محاسبه WSI حاصل از این دو بار خرابی همانطور که در شکل (۱۴) مشاهده می شود، اعضای ۲ و ۵ به عنوان مولفه های احتمالی خرابی پیشنهاد می شوند. برای خروجی با نویز  $Rms=15\%$  هم طبق شکل های (۱۵) و (۱۶) نتایج مشابهی استخراج می گردد. با افزایش RMS نویزهای خروجی به ۲۰٪ مشاهده می شود که اینبار DLV های چهارم و پنجم snv زیر ۲۰٪ دارند. با اعمال این بارهای خرابی به سازه، مجددا مشاهده می شود که با وجود افزایش شدت نویزهای ورودی روش پیشنهادی به خوبی ناحیه آسیب دیده را شناسایی کرده است.

شکل ۱۵. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (5%, 15%) RMS



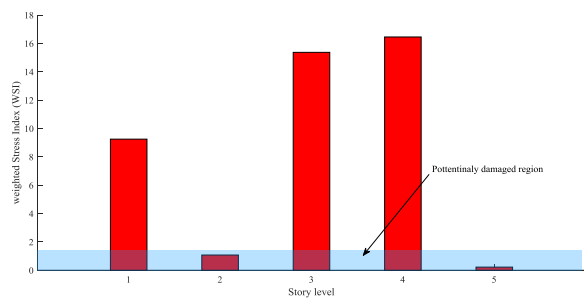
**Fig. 15.** Axial forces at bracing frame floors for RMS (5%, 15%).

شکل ۱۳. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (5%, 10%) RMS



**Fig. 13.** Axial forces at bracing frame floors for RMS (5%, 10%).

شکل ۱۶. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (5%, 15%) RMS



**Fig. 16.** WSI for each brace of steel frame floors for (5%, 15%)

حال با افزایش Rms نویزهای ورودی به ۱۰٪ و سپس ۲۰٪ مراحل قبلی برای تخمین طبقات آسیب دیده تکرار می شود. در سیستم با RMS نویزهای ورودی ۱۰٪ و RMS خروجی های تا ۱۵٪، DLV های ۳، ۴ و ۵ به عنوان بارهای خرابی تعیین شدند. همانطور که در شکل های (۱۹ تا ۲۲) مشاهده می شود به راحتی طبقه های دوم و پنجم به عنوان ناحیه های احتمالی آسیب دیده مشخص می شوند. اما با افزایش RMS نویزهای

شکل ۲۰. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (10%, 10%) RMS

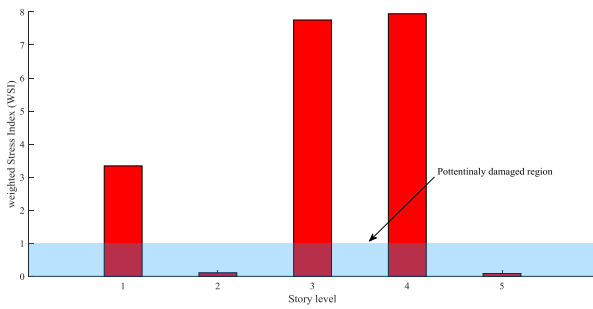


Fig. 20 WSI for each brace of steel frame floors for (10%, 10%)

شکل ۱۷. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (5%, 20%) RMS

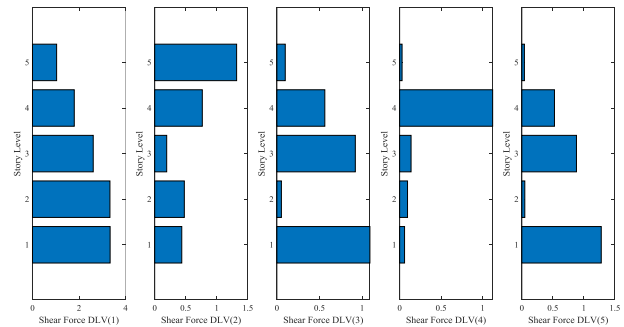


Fig. 17. Axial forces at bracing frame floors for RMS (5%, 20%).

شکل ۲۱. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (10%, 15%) RMS

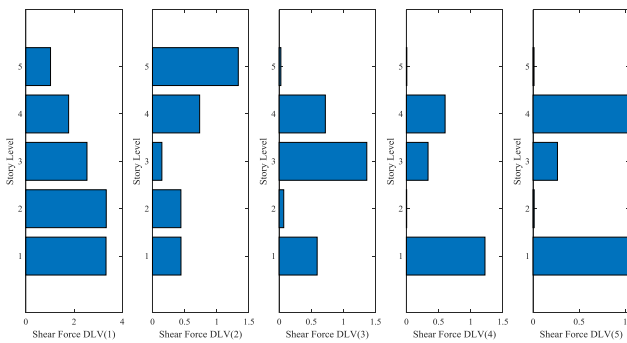


Fig. 21. Axial forces at bracing frame floors for RMS (10%, 15%).

شکل ۱۸. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (5%, 20%) RMS

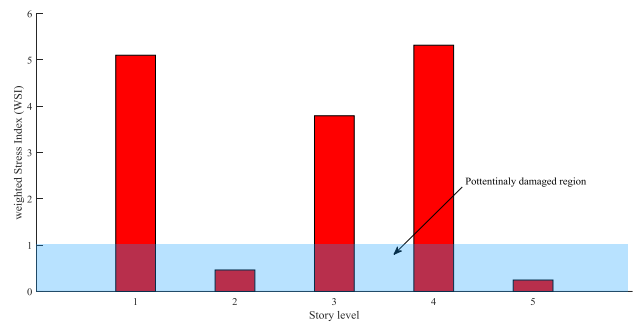


Fig. 18. WSI for each brace of steel frame floors for (5%, 20%)

شکل ۲۲. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (10%, 15%) RMS

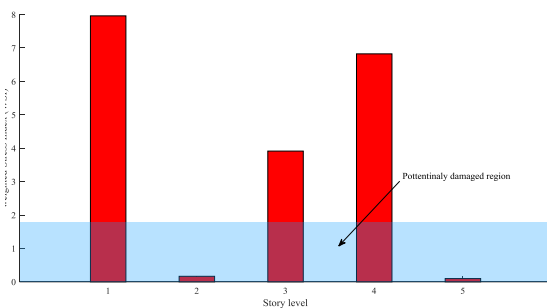


Fig. 22. WSI for each brace of steel frame floors for (10%, 15%)

شکل ۱۹. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (10%, 10%) RMS

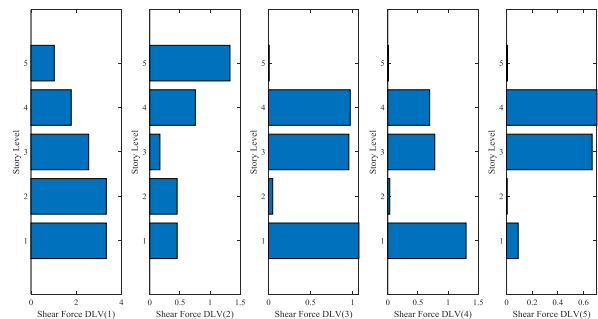


Fig. 19. Axial forces at bracing frame floors for RMS (10%, 10%).

شکل ۲۶. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (20%, 10%) RMS

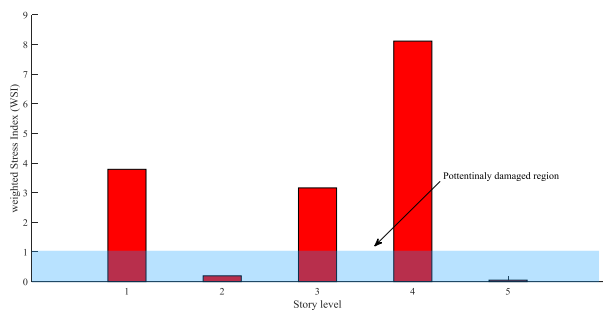


Fig. 26. WSI for each brace of steel frame floors for (20%, 10%)

شکل ۲۳. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (10%, 20%) RMS

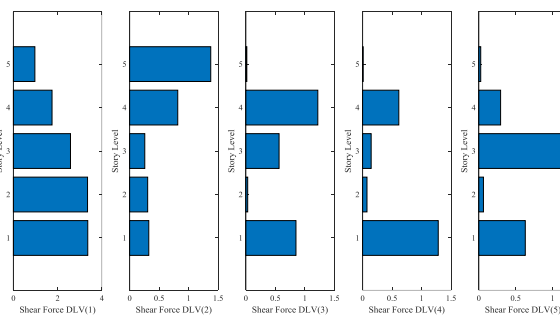


Fig. 23. Axial forces at bracing frame floors for RMS (10%, 20%).

شکل ۲۷. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (20%, 15%) RMS

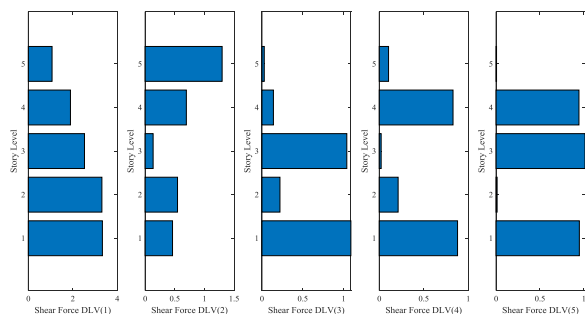


Fig. 27. Axial forces at bracing frame floors for RMS (20%, 15%).

شکل ۲۴. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (10%, 20%) RMS

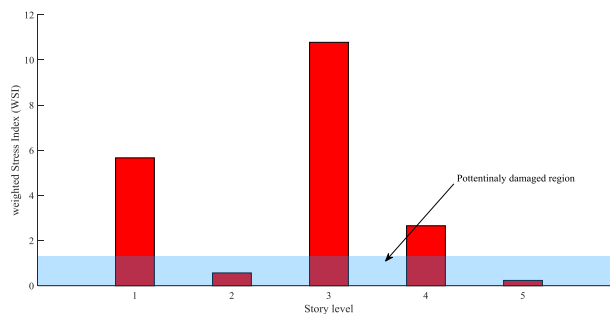


Fig. 24. WSI for each brace of steel frame floors for (10%, 20%)

شکل ۲۸. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای (20%, 15%) RMS

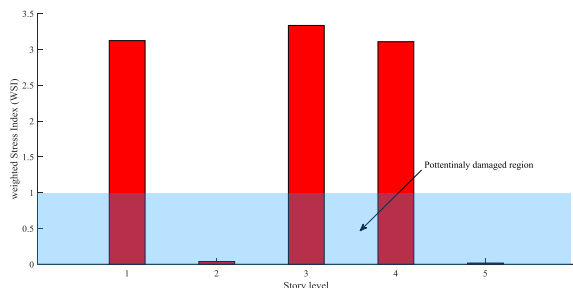


Fig. 28. WSI for each brace of steel frame floors for (20%, 15%)

شکل ۲۵. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای (20%, 10%) RMS

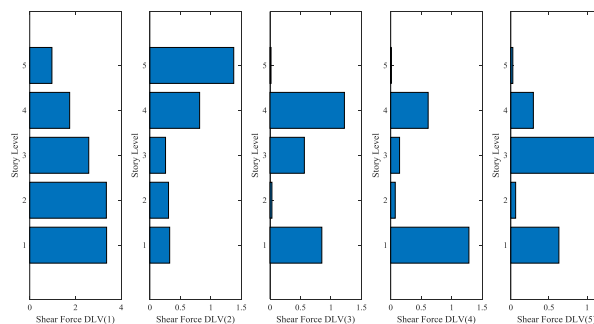


Fig. 25. Axial forces at bracing frame floors for RMS (20%, 10%).

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق برای بررسی قابلیت روش DLV در آسیب شناسی، سازه مسکونی ۵ طبقه با قاب فولادی ساده تحت اثر زلزله النسترو قرار گرفت که طبق سناریوی خرابی تعریف شده طبقات دوم و پنجم در این زلزله به عنوان طبقات آسیب دیده معرفی شدند. این آسیب دیدگی به صورت کاهش سطح مقاطع مهاربندها در طبقات دوم و پنجم به میزان ۳۰٪ و ۵۰٪ اعمال شده است.

به منظور اعمال عدم قطعیت در نتایج داده برداری، ۵٪ تا ۲۰٪ جذر میانگین مربعات داده های سنسور دوم به عنوان نویزهای خروجی و ۱۰٪ تا ۲۰٪ تراز تحریک ورودی به عنوان نویزهای ورودی به سیستم اضافه شد. در نتیجه این عدم قطعیت ها، خطای میرایی بین ۵٪ تا ۱۰٪ در سازه آسیب دیده و سالم نشان داده شده است.

بردهای بار خرابی مستخرج حساسیت کمتری به شدت نویزهای ناشی از ورودی ها داشتند به طوریکه با افزایش RMS ورودی ها تا ۲۰٪ حداقل دو بار خرابی برای سیستم ها تشخیص داده شد که بخوبی نواحی آسیب دیده را شناسایی کردند. اما با افزایش RMS نویزهای خروجی به ۲۰٪، تعداد بارهای خرابی کاهش یافته که در نتیجه آن طبقه چهارم هم به عنوان تراز آسیب دیده معرفی شد. در بررسی دلایل این خطا می توان چنین گفت که با افزایش شدت نویزهای خروجی ها، خطای تخمین ماتریس های حالت و در نتیجه مشخصات مودال مستخرج افزایش می یابد. در نتیجه ماتریس های شکل پذیری استخراج شده، دقت کافی را نداشته و کیفیت بردارهای DLV مستخرج کاهش می یابد. به عبارتی می توان گفت با افزایش دقت تشخیص مودهای فیزیکی از مودهای نویزی با استفاده از تکنیک های مختلف در روش های SSI، همچون ماتریس های وزن می توان مدل دقیق تری از سیستم سازه ای تخمین زد که منجر به بهبود روش DLV در تشخیص خرابی سازه ها نیز می شود.

شکل ۲۹. نمودار نیروهای داخلی قاب ۵ طبقه ساده برای RMS (20%,20%)

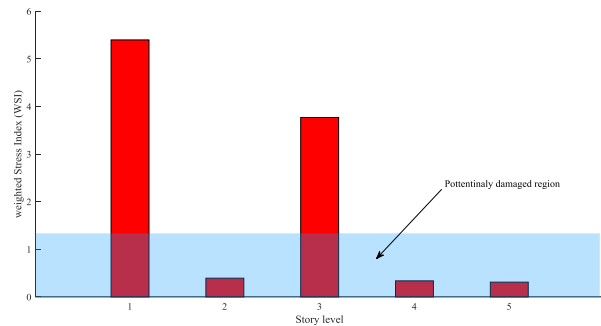


Fig. 29. Axial forces at bracing frame floors for RMS (20%, 20%).

شکل ۳۰. نمودار WSI قاب ۵ طبقه ساده برای RMS (20%,20%)

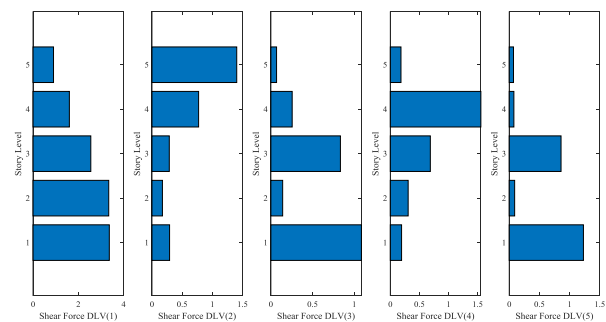


Fig. 30. WSI for each brace of steel frame floors for (20%, 20%)

در سیستم با RMS نویزهای ورودی ۲۰٪، مشابه حالت های قبل تا RMS نویزهای خروجی ۱۵٪ طبق اشکال (۲۰ تا ۲۸) نواحی آسیب دیده به خوبی شناسایی شده اند اما با افزایش RMS نویزهای خروجی به ۲۰٪ مشاهده می شود که تنها DLV پنجم snv زیر ۲۰٪ دارد. با اعمال این بار خرابی به سازه، WSI برای ۳ عضو ۲، ۴، ۵ کوچکتر از ۱ می شود. همان طور که ملاحظه می شود با اعمال نویزهای بیشتر از ۱۵٪ در خروجی ها، روش DLV کیفیت خود را در شناسایی مناطق آسیب دیده از دست می دهد.

## مراجع

Journal of engineering mechanics, vol. 126, pp. 656-660, 2000.

[8] S. Ricci, "Best achievable modal eigenvectors in structural damage detection," *Experimental mechanics*, vol. 40, pp. 425-429, 2000.

[9] D. Bernal, "Flexibility-based damage localization from stochastic realization results," *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 132, pp. 651-658, 2006.

[10] M. C. Huang, Y. P. Wang, and C. L. Lee, "Damage localization of frame structures using seismic acceleration response data," in *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1094-1098.

[11] W. Yen-Po, L. Yi-Ting, and H. Gang, "Damage Localization of Output-Only Systems by DLV Method."

[12] Y. P. Wang, Y. T. Lin, and G. Huang, "Damage localization of output-only frame systems using stochastic subspace identification," in *Advanced Materials Research*, 2012, pp. 1352-1359.

[13] T. Katayama, *Subspace methods for system identification*. Germany: Springer-Verlag London Ltd, 2006.

[14] R. Tarinejad, M. Pourgholi, and S. Yaghmaei-Sabegh, "Signal Processing of Dynamic Tests Results using Subspace Identification based on Orthogonal Decomposition Technique (SI-ORT)," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 15, pp. 104-116, 2016.

[1] M. Basseville, L. Mevel, and M. Goursat, "Statistical model-based damage detection and localization: subspace-based residuals and damage-to-noise sensitivity ratios," *Journal of sound and vibration*, vol. 275, pp. 769-794, 2004.

[2] D. Bernal, Q. Ma, R. Castro-Triguero, and R. Gallego, "Sensor Placements for Damage Localization with the SDLV Approach," in *Special Topics in Structural Dynamics, Volume 6*, ed: Springer, 2014, pp. 347-353.

[3] D. Bernal, "Load vectors for damage location in systems identified from operational loads," *Journal of engineering mechanics*, vol. 136, pp. 31-39, 2010.

[4] S. W. Doebling, C. R. Farrar, M. B. Prime, and D. W. Shevitz, "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review," 1996.

[5] H. Sohn, C. R. Farrar, F. M. Hemez, D. D. Shunk, D. W. Stinemates, B. R. Nadler, et al., "A review of structural health monitoring literature: 1996–2001," *Los Alamos National Laboratory, USA*, vol. 1, p. 16, 2003.

[6] P.-L. Liu, "Identification and damage detection of trusses using modal data," *Journal of structural engineering*, vol. 121, pp. 599-608, 1995.

[7] Z. Shi, S. Law, and L. Zhang, "Damage localization by directly using incomplete mode shapes,"

# Detecting Damage in Steel Buildings through Ambient Vibration Tests

Mehran Pourgholi 1\*, Mahin Ghannadi 2, Mohsen Mohammadzadeh Gilarlue3

1. Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Islamic Azad University, Sarab, Iran
2. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Sarab, Iran.

## Abstract

Infrastructures such as bridges, buildings, pipelines, marine structures, etc., play an important role in human life. Since major disasters in these structures, such as the collapse of bridges or buildings, often result in many casualties, damages, and social and economic problems, most industrialized countries allocate significant funds to monitor their health. Failure detection strategies and continuous monitoring of the structure's condition, especially after natural and manufactured disasters, make necessary measures to be taken in the early stages of failure and can reduce the cost of maintenance and the possibility of collapse. Structural health monitoring methods often provide an opportunity to reduce maintenance, repair, and retrofit costs during the structure's life cycle. Most of the structural health monitoring methods proposed and implemented to identify possible damages depend on the structure's dynamic characteristics. One of the most practical methods, which uses the results of time domain system identification to detect failure, is the damage locating vector (DLV) method. The DLV method aims to identify load combinations that result in zero strain fields for damaged members in both healthy and damaged structures. To accomplish this, we find a vector in the null space of the difference between the plasticity matrices of the two structures. The singular value analysis method is used on the plasticity difference matrix to calculate this space. The method involves applying the space vectors to the healthy structure and recording the internal stresses of the members, which are then converted into weighted normal stress (WSI) using statistical tools. The member with a lower WSI is more likely to be damaged. Since truss structures are usually used in bridges, long-span structures, as well, as a wide range of steel buildings with simple and braced frames, this research uses the covariance-based random subspace optimal method in identifying the modal characteristics, which is very efficient in low excitations, has been taken into consideration to check and monitor health during operation. To investigate the capability of the DLV method in the damage detection of these structures, a 5-story residential building with a simple steel frame was subjected to the Centro earthquake. According to the desired damage scenario, the second and fifth floors were introduced as the damaged floors in this earthquake by applying a 30 and 50% reduction in the cross-section. To account for uncertainty in the data collection, we included the mean root square of the second sensor's data in the results for sensors 3 and 5. As a result of this uncertainty, the damping error between 5 and 10% has been shown in the damaged and healthy structure. Using the method (SSI\_ORT), it was observed that two DLV vectors were extracted. Further, with the increasing uncertainty of the random vibration test results, it was observed that the extraction DLVs could extract the possible damaged elements with high accuracy. Next, the effect of input and output noises on the results obtained from the DLV method was investigated. This study found that by increasing the SNR of the outputs by 15% while increasing the error of the extracted modal characteristics, the extracted DLVs also lose sufficient accuracy in diagnosing structural damage.

**Keywords:** Damage Detection, Structural Health Monitoring (SHM), Ambient vibrations, State Space, Damage Locating Vector (DLV)