

## آشکار سازی خرابی در سازه های صفحه ای با استفاده از تحلیل انرژی موجه

امیر احمدنژاد زرنقی<sup>۱\*</sup>، امیر طریقت<sup>۲</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۵/۱۶	<p>به طور کلی پایش سلامت سازه ها برای تامین امنیت و یکپارچگی آنها بسیار مهم است. عاملی که این امنیت و یکپارچگی را تحت اثر خود قرار می دهد، شروع فرآیند ایجاد خرابی در سازه ها است. لذا یافتن راهی برای آشکار سازی این خرابی ها امر مهمی تلقی می گردد. در این مقاله، آشکار سازی خرابی برای سازه های صفحه ای شکل مانند عرشه پل ها و دیوارها مورد بررسی قرار گرفته است. ۹ شتابسنج برای مطالعه سیگنال های شتاب در نقاط مختلف سازه به کار گرفته شد. نهایتاً با استفاده از انجام تحلیل انرژی موجه پیوسته، دو شاخص خرابی معرفی گردید. مهمترین مزیت روش به کار گرفته شده این است که با تعداد محدودی شتابسنج می توان محدوده محل خرابی را تشخیص داد، در حالیکه نیازی به محاسبه اشکال مودی، اطلاع از مشخصات سازه و استفاده از تغییر مکان سنج های گران قیمت نیست.</p>
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۲۰	
<p><b>واژگان کلیدی:</b> پایش سلامت سازه ای، آشکار سازی خرابی، سازه های صفحه ای، شتابسنج، تحلیل انرژی موجه.</p>	

### ۱- مقدمه

خرابی در سازه ها سبب ایجاد تغییراتی در پارامترهای فیزیکی و سازه ای، تغییر در خواص مصالح و همچنین تغییر در پاسخ های دینامیکی و ارتعاشی آنها می شود که شناسایی این تغییرات راه حلی برای تمیز دادن سازه خراب از سالم است. آشکار سازی هر چه سریعتر خرابی سبب می شود که با لحاظ تمهیداتی از بروز اختلال در عملکرد سازه ای سازه ها جلوگیری کرد. از دیگر ضرورت های آشکار سازی خرابی می توان به کاهش هزینه های نگهداری، تامین امنیت و یکپارچگی سازه، افزایش کارایی و دوام بهره برداری از سازه ها و در نهایت جلوگیری از تلفات انسانی ناشی از خرابی اشاره کرد. به طور کلی یک طبقه بندی معروف در پایش سلامت سازه ای برای روند آشکار سازی خرابی وجود دارد که شامل چهار سطح است. این سطوح به ترتیب عبارتند از تشخیص وجود یا عدم وجود خرابی، تعیین محل و موقعیت

خرابی، تعیین شدت خرابی و در انتها پیش بینی عمر سازه آسیب دیده [۲۰]. طبقه بندی جامع دیگری توسط Wenzel [۳] در روند آشکار سازی خرابی معرفی شده است.

اگرچه در دهه اخیر انجام سطح سوم توجه بسیاری را به خود معطوف کرده است اما بسیاری از محققانی که در زمینه آشکار سازی خرابی فعالیت می کنند به انجام سطوح یک و دو اکتفا کرده اند. پرداختن به سطح چهارم از روند آشکار سازی خرابی اغلب در زمینه مکانیک شکست، آنالیز عمر خستگی و ارزیابی طراحی سازه ای مورد توجه محققان است [۵۴].

روش های بسیاری برای انجام فرآیند آشکار سازی خرابی توسط محققان انجام شده است که از این روش ها می توان به روش های بر اساس تغییرات فرکانس های طبیعی، تغییرات شکل مود، انحنا شکل مود، روش های بر اساس

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: amir.ahmadnejad@yahoo.com

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زلزله، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲. دانشیار، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

از آنجاییکه اکثر روش‌های آشکارسازی خرابی بر اساس تحلیل فرکانسی و تحلیل سختی سازه است، استفاده از تبدیل فوریه یکی از ابزارهای قدرتمند در این زمینه محسوب می‌شود. از جمله مهمترین نقاط ضعف تبدیل فوریه در تحلیل فرکانسی در فرآیند آشکارسازی خرابی می‌توان به از دست رفتن محتوای زمانی (یا مکانی) سیگنال اشاره کرد. برای جبران این نقص تبدیل فوریه پنجره‌ای مطرح گردید. به دلیل آنکه در تبدیل فوریه پنجره‌ای، توابع پنجره‌ای دارای یک پهنای یکسانی هستند بنابراین انتخاب یک مقیاس مناسب برای آشکارسازی خرابی امری دشوار به نظر می‌رسد. از همین رو برای رفع کمبودهای روش‌های تحلیل فوریه، روش تبدیل مویک به عنوان یک روش گسترش یافته تر از تبدیل فوریه ارائه شد.

در مهندسی عمران Newland [۲۳] جزو اولین محققانی است که از مویک در تحلیل ارتعاشی سازه‌ها استفاده کرده است. از تحلیل مویک به طور گسترده‌ای در آشکارسازی خرابی المان‌های تیری شکل استفاده شده است [۲۴-۲۶]. اخیراً از تحلیل مویک برای آشکارسازی ترک در المان تیری شکل تحت اثر بار متحرک استفاده شده است که در آن با استفاده از زمان رخداد بیشینه منحنی ضرایب مویک و سرعت بار متحرک، با دقت بالایی محل خرابی تشخیص داده شده بود [۲۷]. یکی از مزایای بسیار مهم این روش آن است که با استفاده از تنها یک سنسور می‌توان محل خرابی را تشخیص داد. از تحلیل مویک همچنین در سازه‌های دوبعدی استفاده شده است که تقریباً در اکثر آنها از منحنی شکل مود یا منحنی تغییر مکان به عنوان سیگنال ورودی مویک استفاده شده است [۲۸-۳۰]. محاسبه شکل مود به عنوان سیگنال ورودی مویک نیاز به انجام محاسبات پیچیده و انجام آزمایشات متعددی دارد. همچنین استفاده از منحنی تغییر مکان نیز نیاز به تعداد سنسورهای متعدد و متراکم خواهد داشت که نه تنها از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست بلکه ثبت تغییر مکان در یک سازه واقعی مانند پل‌ها نیاز به دقت بسیار بالایی دارد. از همین رو در این مقاله از سیگنال ثبت شده توسط شتاب‌سنج‌ها برای انجام آشکارسازی خرابی استفاده شده است. البته استفاده از شتاب‌سنج‌ها به عنوان سیگنال ورودی مویک برای سازه‌های تیری شکل در آشکارسازی ترک‌های با عمق نسبی کوچکتر از بیست درصد نسبت به عمق تیر توسط Hester و Gonzalez [۳۱] انجام شده است. اگر چه در

اندازه‌گیریهای دینامیکی نرمی، انرژی کرنشی مودال، شبکه عصبی، تابع پاسخ فرکانس، استخراج خصیصه، طیف هیلبرت و روش‌های مبتنی بر بروز رسانی مدل اشاره کرد [۵-۱۷]. یک تقسیم بندی برای روش‌های آشکارسازی خرابی توسط Sinou [۸] انجام شده است که این روش‌ها به طور کلی در آن به دو دسته روش‌های خطی و غیرخطی تقسیم شده‌اند. یک سری روش‌های سنتی و تجربی (غیر مخرب) برای آشکارسازی خرابی وجود دارند که تنها زمانی می‌تواند کارآمد باشند که محدوده محل خرابی از قبل مشخص باشد. این در حالی است که اگر با سازه‌ای پیچیده سر و کار داشته باشیم این روش‌ها کاربرد چندانی نخواهند داشت. از جمله معروفترین این روش‌ها می‌توان به روش‌های آکوستیک و اولتراسونیک، روش‌های میدان مغناطیسی، رادیوگرافی، روش‌های جریان گردابی و روش‌های حوزه حرارتی اشاره کرد [۹].

از آنجاییکه در روش‌های ارتعاش محور، پراکندگی سنسورها نسبت به وسعت سازه‌ها زیاد است لذا آشکارسازی خرابی توسط اینگونه روش‌ها به صورت کلی انجام می‌گیرد. با توجه به این قضیه می‌توان نتیجه گرفت که تنها با استفاده از این روش‌ها نمی‌توان به ارزشیابی کامل وضعیت سازه هنگامی که خرابی‌ها محلی هستند اکتفا کرد. از همین رو پیشنهاد استفاده همزمان از روش‌های کلی ارتعاش محور و روش‌های محلی غیر مخرب توسط Sohn و همکارانش [۱۰] ارائه گردید. مواردی که استفاده از پایش سلامت سازه‌ای در آنها ضرورت دارند عبارتند از زیرساخت‌ها و سازه‌های عمرانی، صنعت هوافضا و سیستم‌های مکانیکی [۱۰].

با توجه به وجود کمبودهایی که در روش‌های بر مبنای ارتعاش وجود دارد، تلاش محققان برای یافتن روش‌های جدید برای رفع این کمبودها بیشتر گردید. این روش‌ها را با توجه به اینکه مدت زیادی از کاربردشان نمی‌گذرد می‌توان در حوزه روش‌های نوین تقسیم بندی کرد که از بین این روش‌ها می‌توان به روش‌های الگو شناختی [۱۱ و ۱۲] که اکثراً از الگوریتم ژنتیک [۱۳-۱۵]، شبکه عصبی مصنوعی [۱۶ و ۱۷] و منطق فازی [۱۸ و ۱۹] استفاده می‌کنند اشاره کرد. همچنین استفاده ترکیبی از روش‌های نوین برای افزایش کارآمدی تک روش‌ها توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۲۰-۲۲].

یکی دیگر از روش‌های نوینی که در زمینه پایش سلامت سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است، تحلیل مویک است.

که در آن  $a$  همان مقیاس و  $b$  عامل جابجایی موجک است. همان گونه که دیده می‌شود تبدیل موجک پیوسته جمع زمانی تمام سیگنال  $X(t)$  است که در یک شکل از موجک مادر مقیاس شده و منتقل شده ضرب شده است. این فرآیند یک ضریب موجک  $C(a,b)$  تولید می‌کند که تابعی از مقیاس و زمان (یا مکان) است.

در واقع پنج گام برای ساخت تبدیل موجک پیوسته وجود دارد که به ترتیب عبارتند از: (۱) انتخاب یک موجک مادر و مقایسه آن با یک جزء ابتدایی از سیگنال اصلی. (۲) محاسبه مقدار ضریب موجک که هرچه مقدار این مقدار بیشتر باشد شباهت فی ما بین موجک و آن قسمت از سیگنال بیشتر است. مقدار ضریب موجک خیلی به شکل موجکی که در گام اول انتخاب شده است بستگی دارد. (۳) موجک را با همان مقیاس تا انتهای سیگنال انتقال داده و گام‌های اول و دوم دوباره تکرار می‌شود. (۴) مقیاس را تغییر داده و مراحل اول تا سوم تکرار می‌شود. (۵) نهایتاً برای تمام مقیاس‌ها گام‌های اول تا چهارم انجام می‌شود. پس از انجام پنج گام، ضرایبی که به ضرایب موجک پیوسته معروفند تولید می‌شود. بدین طریق نتایج را می‌توان بصورت یک نمودار سه بعدی نمایش داد اما معمولاً به جای نمایش سه بعدی از کانتورهای رنگی استفاده می‌شود.

هنگام انجام تحلیل موجک اگر مقدار مقیاس کوچک باشد تابع موجک فشرده شده و برای مؤلفه‌های با فرکانس بالای سیگنال مورد بررسی مناسب است. به عکس هر چه مقیاس بزرگتر باشد موجک کشیده تر شده و از همین رو قسمت بیشتری از سیگنال تحت مقایسه قرار می‌گیرد که برای تغییرات آرام سیگنال مناسب‌اند. از مهمترین مزایای روش تحلیل موجک آن است که می‌تواند تحلیل محلی انجام دهد. یعنی از یک سیگنال بزرگ یک ناحیه موضعی را تحلیل می‌کند. از دیگر مزایای مهم تحلیل موجک آن است که بدون هیچ اختلال قابل توجهی در عملکردش می‌تواند سیگنال را از نویز پاکسازی کند.

نحوه عملکرد تحلیل موجک به این صورت است که مانند یک ذره بین قوی عمل می‌کند و تغییرات کوچک بوجود آمده در یک سیگنال را بطور معناداری برجسته نشان می‌دهد. در حقیقت با استفاده از تحلیل موجک دید مقایسه‌ای قدرتمندتری نسبت به روند تغییرات یک سیگنال ارائه می‌گردد. از آنجایی که خرابی‌ها باعث بوجود آمدن تغییراتی در

چند سال اخیر استفاده از مفهوم انرژی موجک توسط محققان برای سازه‌های دو بعدی به عنوان یک کارآمد مطرح شده است ولی با توجه به دانش نویسنده این مقاله تقریباً اکثر آنها از شکل مودها و یا تغییر مکان برای سیگنال ورودی موجک استفاده نموده‌اند. لذا عمده ترین تفاوت این مقاله با مطالعات دیگر در آن است که از تعداد بسیار کمی شتاب‌سنج نسبت به نمونه‌های مشابه آن و همچنین مفهوم انرژی موجک در تعیین موقعیت خرابی استفاده شده است.

## ۲- تبدیل موجک پیوسته

همانطور که از نام «موجک» مشخص است، موجک یک تابع موجی شکل با بازه موثر محدود است که میانگین مقادیر آن برابر صفر است. همانطور که تبدیل فوریه سیگنال را به عوامل موجی سینوسی آن تبدیل می‌کند، تبدیل موجک سیگنال را به موجک مادر مقیاس شده و انتقال یافته آن تبدیل می‌کند. با توجه به اینکه در این مطالعه از قسم حقیقی موجک استفاده گردیده است و قسم موهومی آن مورد بررسی نمی‌باشد لذا برای آنکه یک تابع موجی شکل بتواند به عنوان موجک شناخته شود باید شرایط زیر در آن برقرار گردد.

الف) موجک باید دارای انرژی محدود باشد [۳۲]:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty \quad (1)$$

که در آن  $\psi(t)$  همان موجک مادر است.

ب) اگر  $\hat{\psi}(f)$  تبدیل فوریه  $\psi(t)$  باشد آنگاه باید رابطه (۲) برقرار گردد [۳۲]:

$$C_g = \int_0^{\infty} \frac{|\hat{\psi}(f)|^2}{f} df < \infty \quad (2)$$

رابطه (۲) بیانگر آن است که موجک مؤلفه‌های با فرکانس صفر ندارد ( $\hat{\psi}(0) = 0$ ). به عبارتی  $\psi(t)$  متوسط صفر دارد. این شرط به شرط مقبوعیت معروف است.  $C_g$  ثابت مقبولیت گفته می‌شود که مقدار آن به شکل موجک مادر انتخابی وابسته است. به طور مثال این مقدار برای موجک مادر کلاه مکزیکی برابر عدد  $\pi$  است.

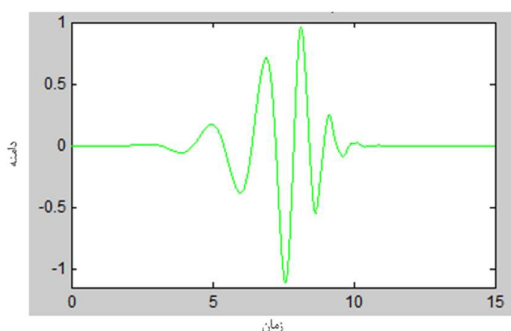
شکل کلی تبدیل موجک پیوسته به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۲]:

$$C(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int X(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad a > 0, b \in R \quad (3)$$

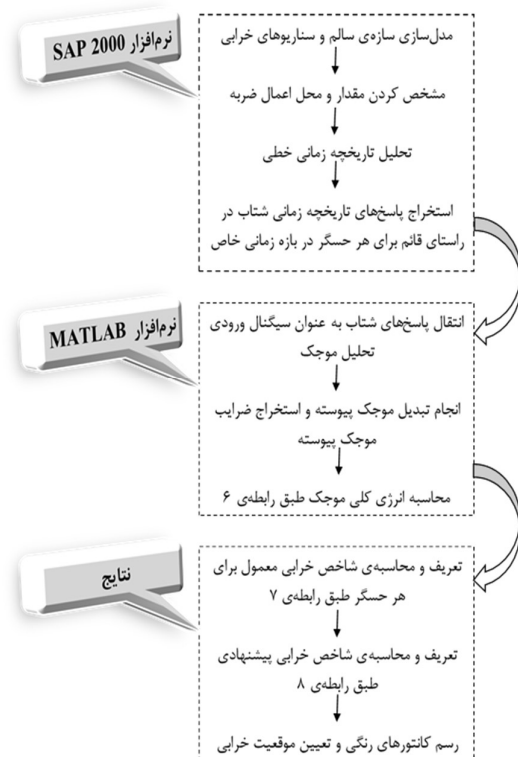
این شاخص خرابی بر اساس نسبت انرژی کلی موجک حالت آسیب دیده به حالت سالم سازه تعریف می‌شود و از آن انتظار می‌رود که برای سنسورهای نزدیکتر به خرابی احتمالی مقادیر بزرگتری نسبت به بقیه سنسورها از خود نشان دهد. این شاخص خرابی طبق رابطه (۷) تعریف می‌شود.

$$RDI = \frac{(E_T)_{\text{Damaged}}}{(E_T)_{\text{Intact}}} \quad (7)$$

که در آن صورت و مخرج کسر به ترتیب بیانگر انرژی کلی موجک حالت آسیب دیده و حالت سالم برای هر سنسور است.



شکل ۱- موجک دوبیشیز مرتبه هشتم (db8) [۳۶]



شکل ۲- الگوریتم آشکارسازی خرابی در این تحقیق

سیگنال شتاب می‌گردند انتظار می‌رود تحلیل موجک بتواند کارایی لازم را داشته باشد. پیشنهاد می‌گردد برای کسب اطلاعات بیشتر در خصوص موجک به مراجع مربوطه مراجعه گردد [۳۲-۳۴].

### ۳- فرآیند آشکارسازی خرابی

در ابتدا سیگنال بدست آمده از هر شتاب‌سنج به عنوان سیگنال ورودی موجک توسط نرم افزار SAP 2000 محاسبه می‌شود [۳۵]. سپس تبدیل موجک پیوسته با استفاده از نرم افزار MATLAB بر روی سیگنال ورودی انجام می‌شود تا ضرایب موجک برای هر مقیاس بدست آید [۳۶]. در این مطالعه از موجک مادر دوبیشیز (Daubechies) مرتبه هشتم (db8) استفاده شده است (شکل ۱).

سپس برای هر سنسور، از ضرایب موجک برای محاسبه تابع چگالی انرژی که به طیف قدرت موجک نیز معروف است استفاده می‌شود (رابطه ۴).

$$E(a,b) = |C(a,b)|^2 \quad (4)$$

در نهایت انرژی کلی موجک را که همان حجم زیر صفحه تابع چگالی انرژی است (رابطه ۵)، محاسبه کرده و از آن به عنوان یک پارامتر حساس نسبت به تغییر شرایط سازه ای در آشکارسازی خرابی استفاده می‌شود. بدین صورت که انرژی کلی موجک برای هر دو سازه سالم و آسیب دیده به طور جداگانه محاسبه شده و با تعریف دو شاخص خرابی، موقعیت خرابی آشکار سازی می‌شود.

$$E_T = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} E(a,b) da db \quad (5)$$

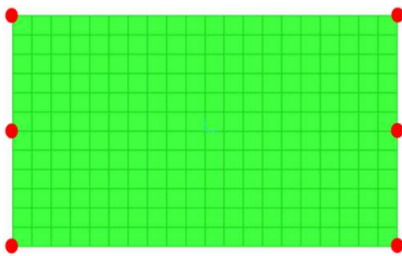
البته از آنجاییکه برای یک سیگنال خاص تمام مؤلفه‌های فرکانسی نمی‌توانند بیانگر خواص آن سیگنال باشد لذا با اعمال محدوده مقیاسی رابطه (۵) به رابطه (۶) تبدیل می‌شود. لازم بذکر است که نرم افزار MATLAB به صورت خودکار برای هر سیگنال مقدار حداکثر مقیاس را محاسبه کرده و کاربر را از آن مطلع می‌کند.

$$E_T = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{a_{\max}} E(a,b) da db \quad (6)$$

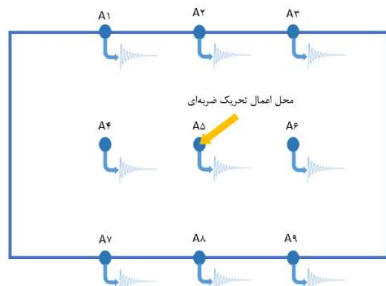
به طور کلی، شکل (۲) الگوریتم روش بکار گرفته شده در این تحقیق را نشان می‌دهد.

### ۳-۱- شاخص خرابی معمول

اعمال تحریک را نشان می‌دهد. نحوه اعمال تحریک به صورت بار ضربه ای به صورت پالس مثلثی است که در آن در محدوده زمانی ۰/۱ ثانیه مقدار بار از ۵ کیلو نیوتن به صفر کاهش می‌یابد. تعداد ۱۸ سناریوی خرابی برای بررسی کارآمدی روش بیان شده تعریف شده‌اند که می‌توان آنها را به طور کلی به چهار دسته تقسیم بندی کرد. الف) تک خرابی‌ها، ب) تک خرابی‌ها با ابعاد خرابی متفاوت (ج) خرابی‌های دوگانه و د) خرابی‌های سه‌گانه که به ترتیب در شکل‌های (۵) تا (۸) نمایش داده شده‌اند. هر سناریوی خرابی را می‌توان بوسیله کاهش مقدار سختی در ناحیه مربوط به المان‌های آسیب دیده مدل‌سازی کرد. برای انجام این کار تمامی المان‌های آسیب دیده توسط کاهش ضخامت به مقدار ۱۰ درصد مدل‌سازی شده‌اند.



شکل ۳- صفحه بتنی همراه با مش بندی با شش تکیه گاه مفصلی ساده در نقاط دایره‌ای شکل



شکل ۴- محل قرارگیری شتاب‌سنج‌ها و محل اعمال بار ضربه‌ای

همانطور که از اشکال (۵) تا (۸) دیده می‌شود ابعاد خرابی در هر سناریو متفاوت است. به طور مثال ابعاد خرابی برای سناریوی SD1 برابر 2m\*2m، در حالیکه ابعاد خرابی در سناریوی MD2 برابر 1m\*1m است. اطلاعات کامل تر در خصوص ابعاد خرابی در هر سناریو در جدول ۱ آورده شده است.

از آنجایی که در این مطالعه محل آسیب‌ها در هر سناریو معلوم است، اگر چنانچه روش اتخاذی بتواند محل آسیب‌ها را شناسایی کند مشخص می‌شود که صحت روش پیشنهادی قابل انکار نیست و در حقیقت راستی‌آزمایی آن

### ۳-۲- شاخص خرابی پیشنهادی

علیرغم آنکه مقادیر شاخص خرابی معرفی شده در بخش قبل برای سنسور(های) نزدیک به خرابی احتمالی عدد بزرگتری را نسبت به دیگر سنسورها نشان می‌داد ولی تفاوت قابل ملاحظه ای در مقدار عددی آنها وجود نداشت. همچنین بازه تولید شده فی مابین کمترین و بیشترین مقدار شاخص خرابی معمول برای هر سناریو با سناریوی دیگر متفاوت بود. لذا نیاز به تعریف یک شاخص خرابی جدید که بتواند ناحیه آسیب دیده را به طور ملموس تری نشان دهد بوجود آمد. شاخص خرابی پیشنهادی طبق رابطه (۸) قابل تعریف است. یکی دیگر از مزایای آن نسبت به شاخص خرابی معمول آن است که کمینه هر بازه از صفر شروع شده و می‌تواند دید مقایسه ای قوی تری برای حالت‌های مختلف خرابی به خواننده بدهد.

$$NDI = \frac{(RDI)_i - (RDI)_{\min}}{(RDI)_{\min}} \quad (8)$$

که در آن  $(RDI)_i$  نمایانگر شاخص خرابی معمول هر سنسور بوده و  $(RDI)_{\min}$  بیانگر حداقل شاخص خرابی معمول بین سنسورها برای سناریوی خرابی مورد بررسی است که محل این سنسور بسته به هر سناریوی خرابی متغیر است و مختص به یک سنسور خاص نیست. از دیگر مزیت این شاخص نسبت به شاخص تعریف شده در بخش (۳-۱) آن است که مقدار شاخص پیشنهادی برای دورترین سنسور از محل خرابی برابر صفر است. این موضوع به خوبی بیان کننده این حس است که خرابی در نزدیکی سنسور(هایی) که مقدار صفر را نشان می‌دهند وجود ندارد و یا حداقل تاثیر خرابی برای این محل‌ها کمتر است.

### ۴- مدل‌سازی عددی سازه سالم و آسیب دیده

برای ارزیابی تکنیک بیان شده در آشکارسازی خرابی از یک صفحه بتنی با ابعاد ۴\*۶ متر و ضخامت ۰/۲ متر استفاده شده است. خواص مصالح حالت سالم از قبیل مدول یانگ، ضریب پواسون و چگالی جرمی به ترتیب برابر ۲۱۰۰۰ مگاپاسکال، ۰/۲ و ۲۴۰۳ کیلوگرم بر متر مکعب است. از المان‌های ۴ گرهی (مربعی) برای مدل‌سازی اجزای محدودی استفاده شده است که ابعاد هر مش مربعی ۰/۵\*۰/۵ متر است. شکل (۳) نمایی از مدل‌سازی صفحه‌ی بتنی را به همراه مش‌بندی آن نشان می‌دهد. شکل (۴) موقعیت قرارگیری سنسورهای حساس به شتاب و همچنین موقعیت

SD1 در شکل (۱۰) آورده شده است. همانطور که در بخش قبل نیز گفته شد علیرغم آنکه مقدار شاخص خرابی معمول در سناریوی SD1 برای سنسور A1 (نزدیکترین سنسور به محل خرابی) نسبت به دیگر سنسورها عدد بزرگتری را نشان می‌دهد اما تفاوت بین بزرگترین و کوچکترین مقدار در این شاخص خرابی برابر  $0.570$  است. این در حالی است که این حداکثر تفاوت در شاخص خرابی پیشنهادی برابر  $5/888$  است که مقدار قابل ملاحظه‌ای است. با توجه به اینکه مطلب فوق الذکر برای تمامی سناریوهای خرابی صدق می‌کند لذا برای اختصار در نوشتار این مطالعه و همچنین نمایش هرچه مطلوب تر نتایج، از آوردن نتایج مربوط به شاخص خرابی معمول خودداری شده و از شاخص خرابی پیشنهادی استفاده شده است. زین پس هر جا سخن از شاخص خرابی آمد منظور همان شاخص خرابی پیشنهادی است. از آنجاییکه در نقاط تکیه‌گاهی هیچ گونه شتابی وجود ندارد بنابراین میزان شاخص‌های خرابی در این نقاط برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. لذا نتایج حاصله بوسیله رسم کانتورهایی با داشتن ۱۵ شاخص خرابی در سراسر صفحه بتنی که ۹ عدد آن مربوط به سنسورها و ۶ عدد آن مربوط به نقاط تکیه‌گاهی است، صورت پذیرفته است. کانتورهای رنگی با داشتن شاخص خرابی محاسبه شده برای هر ۹ سنسور در هر سناریو، رسم می‌شوند.

توسط نتایج بدست آمده حاصل می‌گردد. در واقع، در این تحقیق روش خودصحت‌سنجی صورت پذیرفته است و نیازی به صحت‌سنجی‌های معمول پیشین نیست.

## ۵- بحث درباره نتایج حاصله از روش آشکارسازی

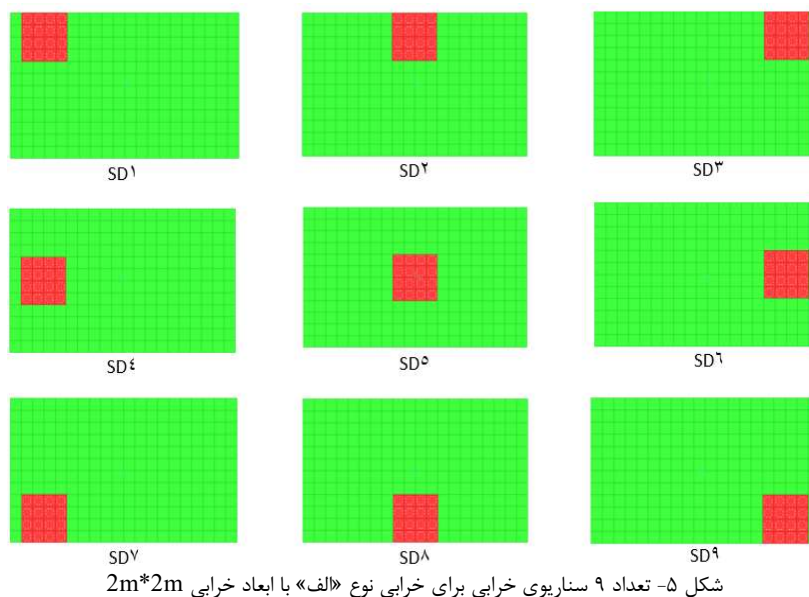
### خرابی

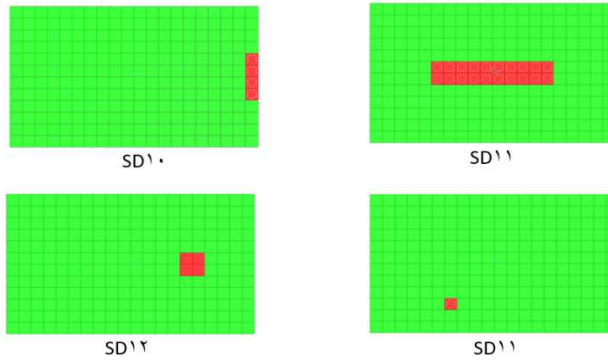
همانگونه که در ابتدای بخش ۴ گفته شد برای بکارگیری روش یاد شده، از سیگنال‌های شتاب استفاده می‌شود. با توجه به نوع اعمال تحریک، پاسخ تاریخچه زمانی شتاب از دو قسمت گذرا و پایدار تشکیل شده است لذا برای ارزیابی روش به کار گرفته شده و همچنین مقایسه نتایج، یک بار با حذف ناحیه گذرا و تنها با در نظر گرفتن بازه  $0.4$  تا  $1/2$  ثانیه از پاسخ تاریخچه زمانی و بار دیگر با در نظر گرفتن ناحیه گذرا به آشکارسازی خرابی پرداخته شده است. در شکل (۹) پاسخ‌های تاریخچه‌زمانی شتاب برای سنسور A1 نمایش داده شده است. همانطور که از شکل (۹) مشخص است تغییرات پاسخ شتاب برای سازه آسیب دیده (SD1) با حالت پیش از آسیب تفاوت چندانی ندارد و نمی‌تواند نشان دهنده خرابی باشد.

### ۵-۱- بحث درباره نتایج حاصله از در نظر نگرفتن

#### ناحیه گذرای پاسخ شتاب

نتایج مربوط به شاخص‌های خرابی برای سناریوی خرابی

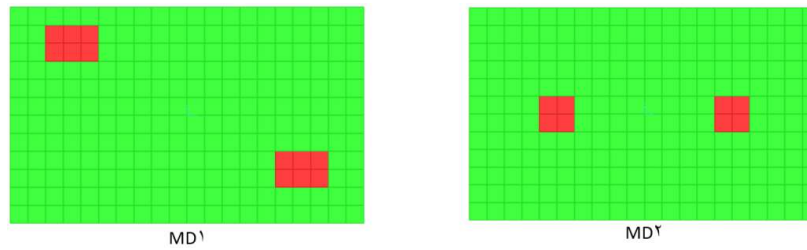




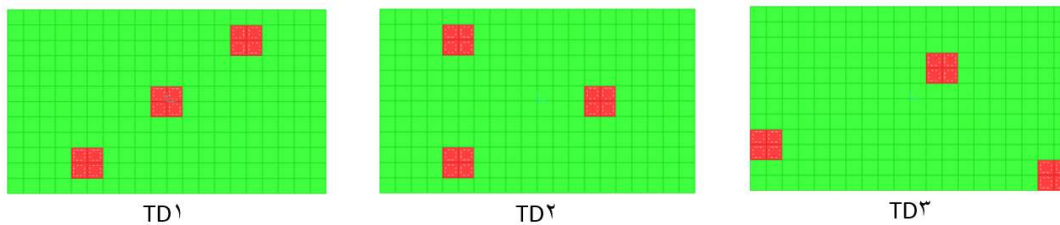
شکل ۶- تعداد ۴ سناریوی خرابی برای نوع «ب»

شاخص خرابی در سنسورهای نزدیک به خرابی بزرگتر و رفته رفته هر چه از ناحیه خرابی فاصله می‌گیریم مقدار این شاخص به صفر نزدیکتر می‌شود.

نتایج مربوط به انواع خرابی «الف» تا «د» به ترتیب در شکل‌های (۱۱) الی (۱۴) آورده شده است. در شکل (۱۱)، مشاهده می‌گردد که موقعیت تک خرابی‌ها در تمامی موارد به خوبی تشخیص داده شده‌اند. بدین گونه که مقادیر



شکل ۷- تعداد ۲ سناریوی خرابی برای نوع «ج»



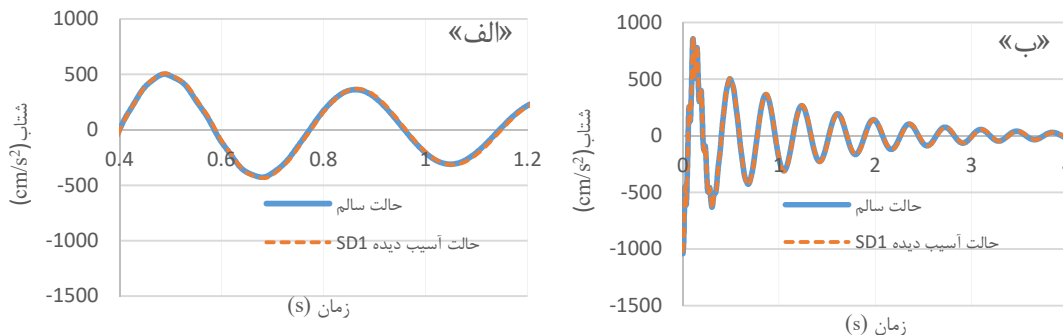
شکل ۸- تعداد ۳ سناریوی خرابی برای نوع «د»

جدول ۱- ابعاد خرابی برای هر سناریو

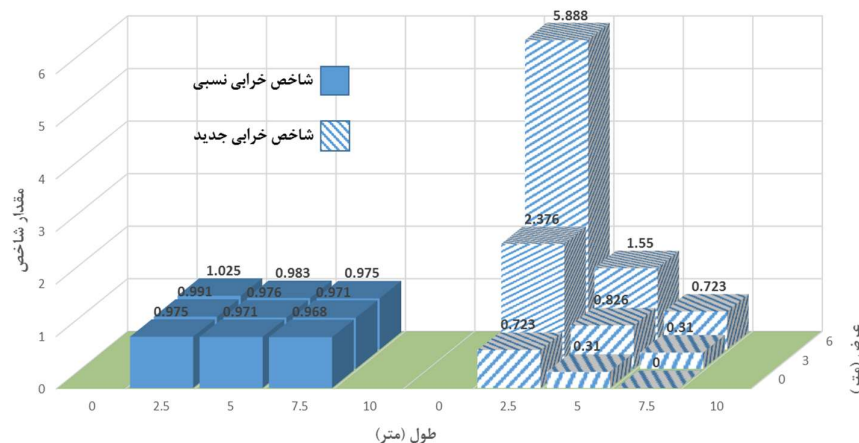
نوع خرابی	الف	ب				ج		د		
		SD1 الی SD9	SD10	SD11	SD12	SD13	MD1	MD2	TD1	TD2
ابعاد خرابی (متر)	2*2	2*0.5	1*5	1*1	0.5*0.5	1*1.5	1*1	1*1		

سازی تک خرابی‌ها علیرغم پراکندگی سنسورها و همچنین فارغ از اینکه خرابی در کدام قسمت از سازه قرار گرفته است، بسیار کارآمد است. با توجه به نتیجه بدست آمده از سناریوی SD13 می‌توان اینگونه ادعا کرد که این روش همچنین قابلیت آشکار سازی خرابی را حتی برای ابعاد خرابی کوچک دارد.

از سوی دیگر موقعیت و وسعت ابعاد خرابی‌های نوع «ب» کاملاً بطور تصادفی انتخاب شده‌اند تا بوسیله آنها بتوان از توانایی روش اتخاذ شده در آشکار سازی تک خرابی‌ها اطمینان حاصل نمود. نتایج مربوط به خرابی‌های نوع «ب» نیز در شکل (۱۲) آورده شده است. با بررسی این نتایج می‌توان این طور استنباط کرد که این تکنیک در آشکار



شکل ۹- نمونه ای از پاسخ تاریخیچه زمانی شتاب از سنسور A1 برای الف: صرفنظر از ناحیه گذرا، ب: با در نظر گرفتن ناحیه گذرا



شکل ۱۰- مقادیر شاخص‌های خرابی برای سناریوی SD1

مربوط به خرابی‌های سه گانه نمایش داده شده است. موقعیت خرابی‌ها در سناریوی TD1 به خوبی تشخیص داده شده است. در سناریوی TD2 علیرغم آنکه خرابی‌های نزدیک به سنسورهای A1 و A7 به خوبی تشخیص داده شده‌اند ولی خرابی نزدیک به سنسور A6 آنطور که باید نشان داده نشده است. در سناریوی TD3 با توجه به اینکه یکی از خرابی‌ها وسط دو سنسور A4 و A7 قرار داشته و دو خرابی دیگر در نزدیکی سنسورهای A5 و A9 واقع شده‌اند اما فقط خرابی نزدیک به سنسور A9 با تقریب نسبتاً خوبی تشخیص داده شده است. لذا می‌توان اینگونه برداشت کرد که به دلیل اثر اندرکنشی خرابی‌ها بر هم، هر چه تعداد خرابی‌ها در یک سناریوی خرابی خاص بیشتر شود کارآمدی روش اتخاذ شده نیز به همان نسبت کاهش می‌یابد. به طور کلی با توجه به اشکال (۱۱) الی (۱۴) اینگونه به نظر می‌رسد که علاوه بر قضیه تقارن خرابی‌ها، موارد دیگری نیز در شاخص خرابی معرفی شده تاثیر گذار هستند که از آنها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

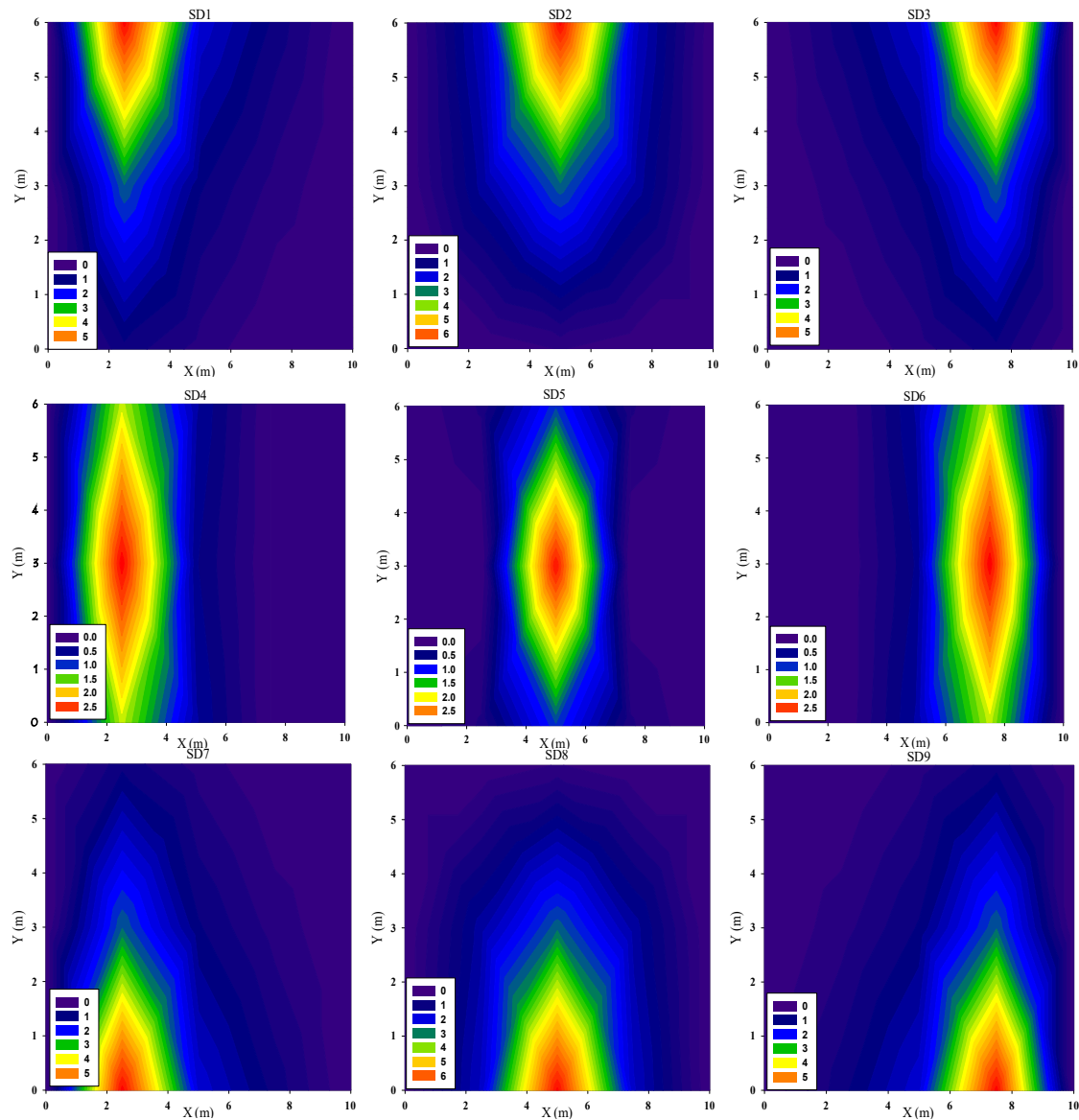
در شکل (۱۳) دیده می‌شود که موقعیت خرابی‌ها به خوبی نشان داده شده است. تنها تفاوت عمده میان سناریوی MD1 و MD2 در موقعیت قرار گیری خرابی‌ها در صفحه بتنی است. بدین صورت که در سناریوی MD1 خرابی‌ها به طور نامتقارن در صفحه توزیع شده‌اند در حالیکه در سناریوی MD2، خرابی‌ها نسبت به محور قائمی که از مرکز صفحه می‌گذرد متقارن‌اند. همانطور که در شکل (۱۳) دیده می‌شود با توجه به یکسان بودن شدت خرابی در هر سناریو مقادیر حداکثری شاخص خرابی در سناریوی MD1 برای دو موقعیت خرابی با هم متفاوت است و این موضوع به دلیل جایگاه قرار گیری خرابی‌ها است. بر خلاف مطلب ذکر شده در خصوص سناریوی MD1، در سناریوی MD2 مقادیر حداکثری شاخص خرابی برای دو موقعیت خرابی یک عدد را نشان می‌دهد. از این قضیه می‌توان نتیجه گرفت شاخص خرابی معرفی شده نسبت به جایگاه خرابی حساس است اما این توانایی را دارد تا با دقت بالایی موقعیت‌های خرابی را در خرابی‌های دو گانه تشخیص دهد. در شکل (۱۴) نتایج



را نشان می‌دهد. محصور شدگی خرابی‌ها: بدین صورت که هرچه خرابی‌ها از محور تقارن افقی به سمت بالا یا پایین حرکت کنند، شاخص خرابی عدد بزرگتری را نشان می‌دهد.

موقعیت خرابی نسبت به سنسورها: هرچه خرابی‌ها به سنسورها نزدیک تر باشند، شاخص خرابی عدد بزرگتری را نشان می‌دهد.

موقعیت خرابی نسبت به قیود تکیه‌گاهی: هرچه خرابی‌ها از قیود تکیه‌گاهی دور تر باشند، شاخص خرابی عدد بزرگتری

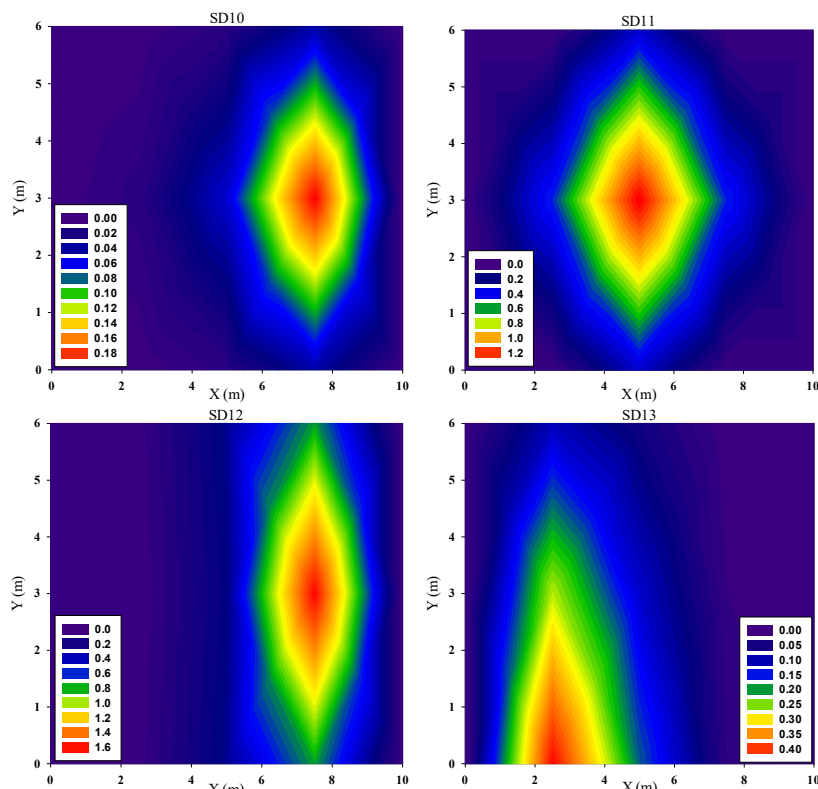


شکل ۱۱- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «الف»

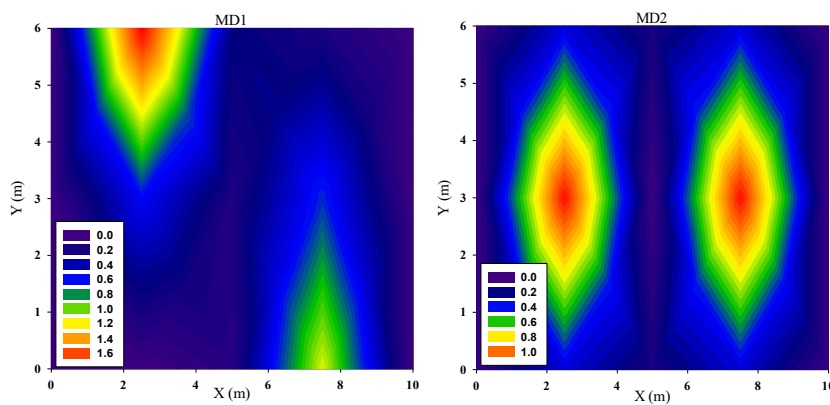
موقعیت‌های خرابی به خوبی تشخیص داده شده‌اند و نتایج تفاوت چندانی با نتایج بخش ۵-۱ ندارند بنابراین در نظر گرفتن ناحیه گذرای سیگنال در آشکارسازی خرابی توسط روش پیشنهاد شده در این مطالعه تاثیر منفی چشمگیری نخواهد داشت.

۵-۲- بحث درباره نتایج حاصله از کل پاسخ شتاب (با در نظر گرفتن ناحیه گذرا)

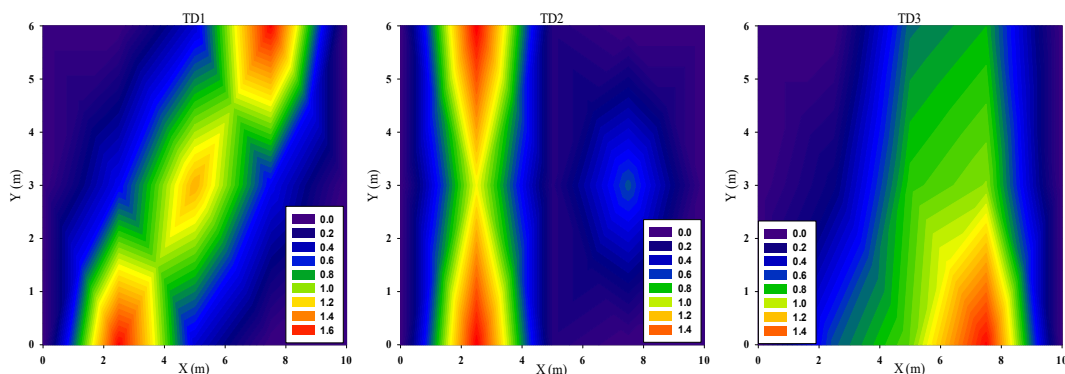
نتایج مربوط به آشکارسازی خرابی‌های نوع «الف» تا «د» به ترتیب در اشکال (۱۵) الی (۱۸) آورده شده است. همانطور که در این اشکال دیده می‌شود در اکثر موارد



شکل ۱۲- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «ب»



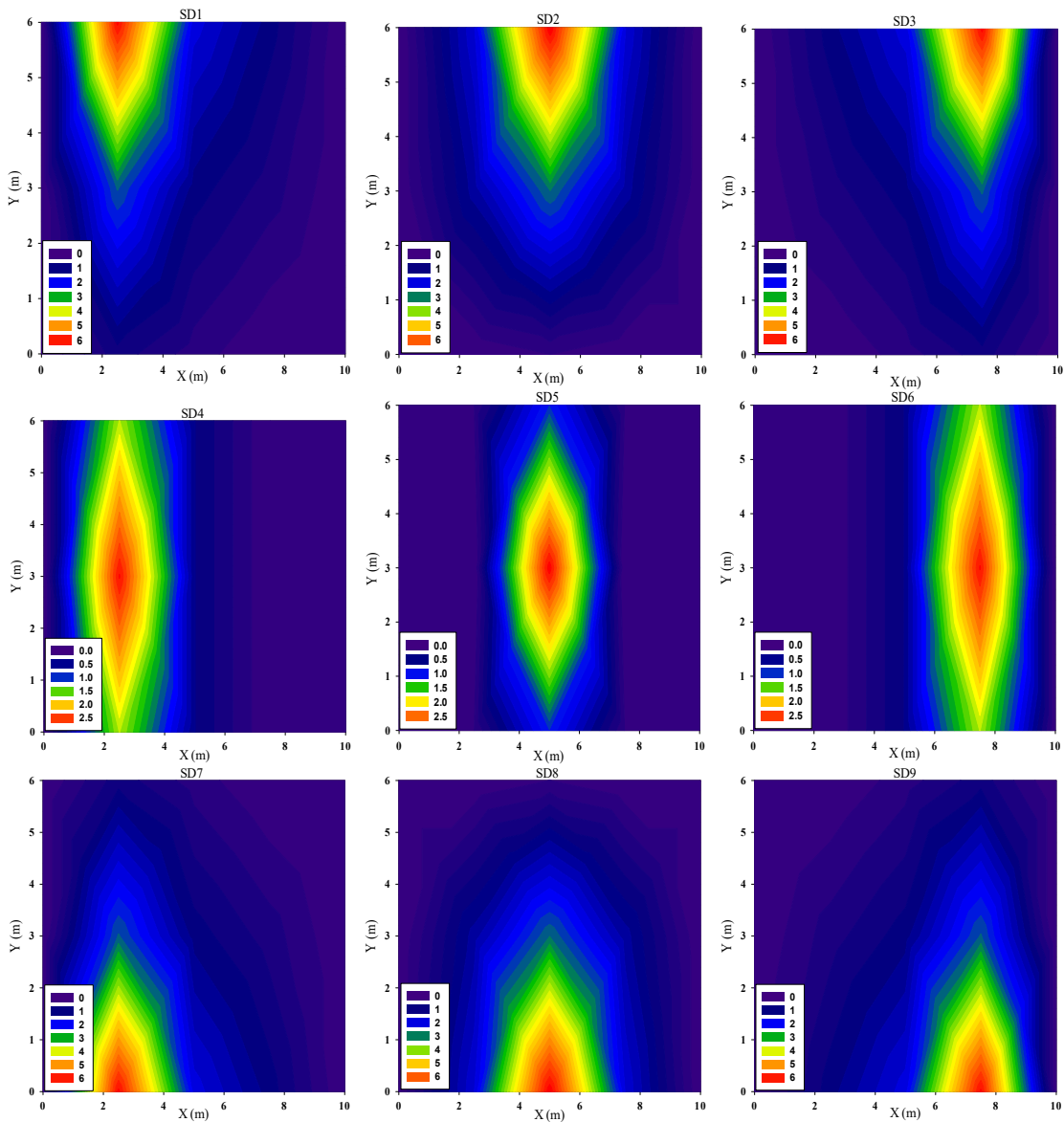
شکل ۱۳- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «ج»



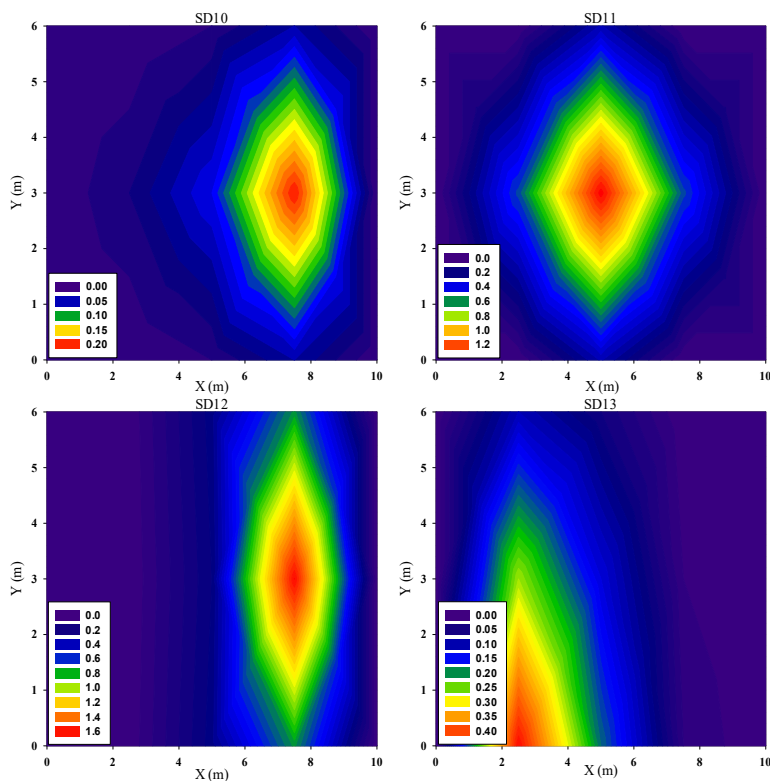
شکل ۱۴- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «د»

باشد. البته باید یاد آور شد که با مقایسه اشکال (۱۴) و (۱۸) ، آشکارسازی خرابی نزدیک به سنسور A6 در سناریوی TD2 نسبت به بخش ۵-۱ بهتر صورت گرفته است. بنابراین به طور کلی برای مواقعی که ثبت تمام پاسخ شتاب مقدر نیست توصیه می شود که با حذف ناحیهی گذرای سیگنال و در نظر گرفتن جزئی از آن به آشکارسازی خرابی پرداخته شود زیرا این فرآیند سبب می شود تا مقدار محاسبات تا حد زیادی کاهش یابد.

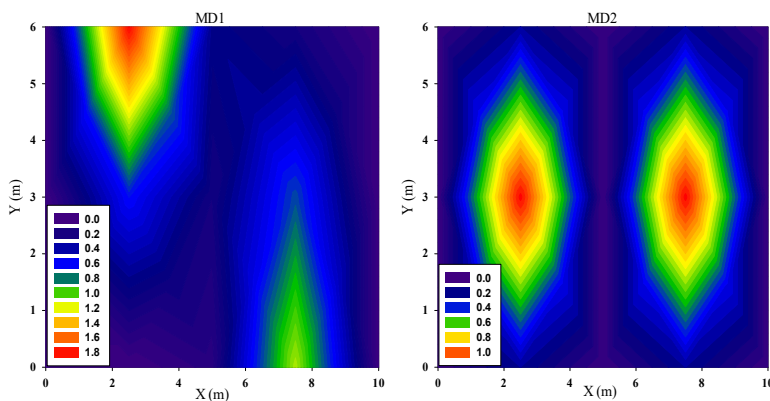
شکل (۱۹) مقادیر بیشینه شاخص خرابی را برای دو حالت تحلیل کل سیگنال و تحلیل حالت پایدار سیگنال نشان می دهد. بیشترین درصد اختلاف ۲۶/۵٪ است که مربوط به سناریوی SD10 است. علاوه بر این در بعضی سناریوها بیشینه شاخص خرابی در حالت تحلیل کل سیگنال مقادیر کمتری را نسبت به زمانی که بازه ای از سیگنال مورد بررسی است نشان می دهد که این موضوع نشان دهندهی آن است که تحلیل کل سیگنال همواره نمی تواند بهترین انتخاب



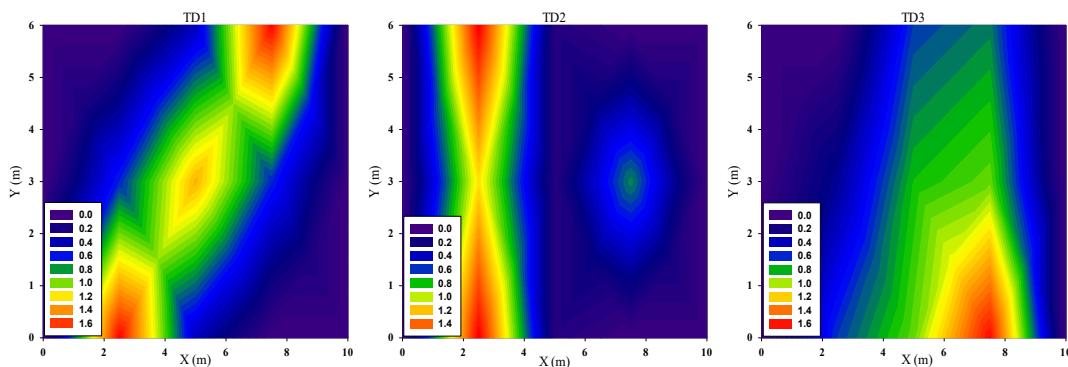
شکل ۱۵- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «الف»



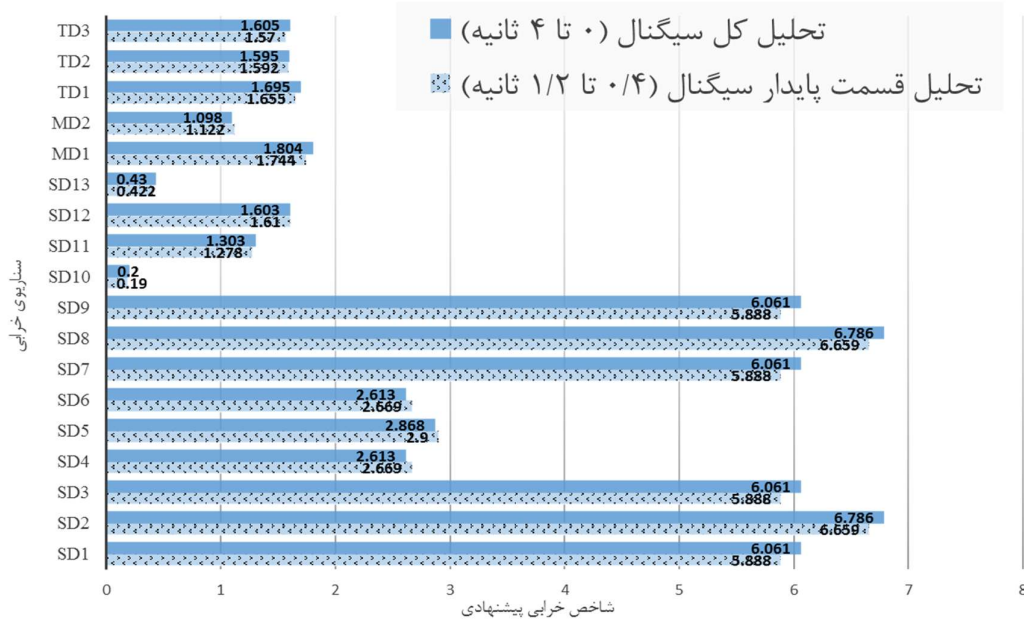
شکل ۱۶- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «ب»



شکل ۱۷- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «ج»



شکل ۱۸- شاخص خرابی پیشنهادی برای خرابی نوع «د»



شکل ۱۹- مقادیر بیشینه شاخص خرابی برای دو سیگنال ورودی با بازه زمانی متفاوت

روش معرفی شده بر خلاف دیگر روش‌های آشکارسازی خرابی، مدل محور نیست لذا بدون آگاهی قبلی از حدود خرابی می‌توان موقعیت خرابی را تشخیص داد.

با توجه به پراکندگی زیاد شتاب‌سنج‌ها نسبت به ابعاد سازه، محل‌های خرابی با کاربرد شاخص پیشنهادی به خوبی تشخیص داده شده‌اند. با این وجود، هرچه تعداد شتاب‌سنج‌ها بیشتر باشد کارآمدی روش پیشنهادی بیشتر می‌شود.

این روش علاوه بر تک خرابی‌ها، توانایی آشکارسازی خرابی‌های چند گانه را نیز دارد.

اغتشاشات ناشی از ناحیه گذرای سیگنال تاثیر منفی در روند آشکارسازی آسیب ندارد.

با توجه به اینکه استفاده از تعداد زیاد سنسور از لحاظ اقتصادی به صرفه نیست لذا انجام آزمایشات غیر مخرب و یا بازبینی‌های در محل، پس از تعیین محدوده‌ی خرابی توسط روش پیشنهادی می‌تواند به تشخیص هرچه بهتر و محلی‌تر موقعیت خرابی منجر شود.

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، یک روش جدید بر اساس انرژی موجک سیگنال شتاب برای پایش سلامت سازه‌ای در سازه‌های دو بعدی معرفی شد. بدین طریق که پس از محاسبه انرژی‌های موجک، دو شاخص معرفی گردید که نسبت به خرابی حساس هستند. چندین سناریوی خرابی مختلف برای ارزیابی قدرت روش مذکور بکار گرفته شد تا بوسیله آنها بتوان نقاط ضعف و قدرت آن را مشخص کرد. نتایج نشان مدهد که شاخص‌های خرابی معرفی شده چه با در نظر گرفتن ناحیه گذرای سیگنال و چه با صرف نظر کردن از آن می‌توانند محل‌های خرابی را با دقت قابل قبولی تشخیص دهند. به طور کلی نتایج حاصله را می‌توان در موارد زیر خلاصه کرد:

در این روش نیازی به آگاهی پیشینی از مشخصات سازه‌ای نیست و تنها با داشتن تاریخچه زمانی شتاب در محل شتاب‌سنج‌ها، می‌توان به آشکارسازی خرابی پرداخت. نیازی به محاسبه فرکانس‌ها و اشکال مودی نیست.

## مراجع

[1] T. Stepinski, T. Uhl, and W. Staszewski, Advanced Structural Damage Detection: From Theory to Engineering Applications, John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

- [2] A. Rytter, *Vibration Based Inspection of Civil Engineering Structures*, PhD thesis Aalborg University, Denmark, 1993.
- [3] H. Wenzel, *Health Monitoring of Bridges*, John Wiley & Sons, Ltd, 2009.
- [4] S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, "A Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods", *Shock and Vibration Digest*, Vol. 30, NO. 2, March 1998, pp. 91 – 105.
- [5] C. R. Farrar, H. Sohn, F. M. Hemez, M. C. Anderson, M. T. Bement, P. G. Cornwell, S. D. Doebling, N. Lieven, A. N. Robertson, and J. F. Schultze, "Damage Prognosis: Current Status and Future Needs", Los Alamos National Laboratory, LA 176, July 2003, pp. 177 – 178.
- [6] S. W. Doebling, C. R. Farrar, and M. B. Prime, and D. W. Shevitz "Damage Identification Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review", Los Alamos National Laboratory Report, LA-13070-MS, 1996.
- [7] L. Wang, and T. H. Chan "Review of Vibration Based Damage Detection and Condition Assessment of Bridge Structures Using Structural Health Monitoring", The second infrastructure theme postgraduate conference: rethinking sustainable development: planning, engineering, design and managing urban infrastructure, Queensland University, 2009.
- [8] J. J. Sinou, *Review of Damage Detection and Health Monitoring of Mechanical Systems from Changes in the Measurement of Linear and Non-linear Vibrations*, Robert C. Sapri (Ed.), *Mechanical Vibrations: Measurement, Effects and Control*, 2009, PP. 643-702.
- [9] C. J. Hellier, *Handbook of Nondestructive Evaluation*". The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 2003.
- [10] H. Sohn, C. R. Farrar, F. Hemez, D. Shunk, D. Stinemat, and B. Nadler, *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13967-MS, USA, 2004.
- [11] R. P. Bandara, T. H. T. Chan, and D. P. Thambiratnam, "Frequency Response Function Based Damage Identification Using Principal Component Analysis and Pattern Recognition Technique", *Engineering Structures*, Vol. 66, May 2014, pp. 116 – 128.
- [12] O. R. De Lautour, and N. Omenzetter, "Damage Classification and Estimation in Experimental Structures Using Time Series Analysis and Pattern Recognition", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 24, NO. 5, July 2010, pp. 1556 – 1569.
- [13] M. Mehrjoo, N. Khaji, and M. Ghafouri-Ashtiany, "Application of Genetic Algorithm in Crack Detection of Beam-Like Structures Using a New Cracked Euler-Bernoulli Beam Element", *Applied Soft Computing*, Vol. 13, NO. 2, February 2013, pp. 867 – 880.
- [14] M. A. Rao, J. Srinivas, and B. S. N. Murthy, "Damage Detection in Vibrating Bodies Using Genetic Algorithms", *Computers and Structures*, Vol. 82, NO. 11-12, May 2004, pp. 963 – 968.
- [15] C. G. Koh, and M. J. Perry, *Structural Identification and Damage Detection using Genetic Algorithms*, Structures and Infrastructures Book Series, Vol.6-CRC Press Book, 2010.
- [16] M. Mehrjoo, N. Khaji, H. Moharrami, and A. Bahreininejad, "Damage Detection of Truss Bridge Joints Using Artificial Neural Networks", *Expert Systems with Applications*, Vol. 35, NO. 3, October 2008, pp. 1122 – 1131.
- [17] H. F. Lam, and C. T. Ng, "The selection of pattern features for structural damage detection using an extended Bayesian ANN algorithm", *Engineering Structures*, Vol. 30, NO. 10, October 2008, pp. 2762 – 2770.
- [18] M. R. Taha, and J. Lucero, "Damage identification for structural health monitoring using fuzzy pattern recognition", *Engineering Structures*, Vol. 27, NO. 12, October 2005, pp. 1774 – 1783.

- [19] M. Chandrashekhar, and R. Ganguli, "Uncertainty handling in structural damage detection using fuzzy logic and probabilistic simulation", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 23, NO. 2, February 2009, pp. 384 – 404.
- [20] Y. Y. Liu, Y. F. Ju, C. D. Duan and X. F. Zhao, "Structure Damage Diagnosis Using Neural Network and Feature Fusion", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 24, NO. 1, February 2011, pp. 87 – 92.
- [21] A. Tarighat, "Model Based Damage Detection of Concrete Bridge Deck using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System", *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 11, NO. 3, September 2013, pp. 170 – 181.
- [22] F. Zhu, Z. Deng, and J. Zhang, "An Integrated Approach for Structural Damage Identification Using Wavelet Neuro-Fuzzy Model", *Expert Systems with Applications*, Vol. 40, NO. 18, December 2013, pp. 7415 – 7427.
- [23] D. Newland, *An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis*, 3<sup>th</sup> ed., Longman, New York, 1993.
- [24] K. M. Liew, and Q. Wang, "Application of Wavelet Theory for Crack Identification in Structures", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124, NO. 2, February 1998, pp. 152 – 157.
- [25] E. Douka, S. Loutridis, and A. Trochidis, "Crack Identification in Beams Using Wavelet Analysis", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, NO. 13-14, June 2003, pp. 3557 – 3569.
- [26] A. Messina, "Refinements of Damage Detection Methods Based on Wavelet Analysis of Dynamical Shapes", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, NO. 14-15, July 2008, pp. 4068 – 4097.
- [27] K. V. Nguyen, and H. T. Tran, "Multi-Cracks Detection of a Beam-Like Structure Based on the On-Vehicle Vibration Signal and Wavelet Analysis", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 329, NO. 21, October 2010, pp. 4455 – 4465.
- [28] W. Fan, and P. Qiao, "A 2-D Continuous Wavelet Transform of Mode Shape Data for Damage Detection of Plate Structures", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, NO. 25-26, December 2009, pp. 4379 – 4395.
- [29] C. C. Chang, and L. W. Chen, "Damage Detection of a Rectangular Plate by Spatial Wavelet Based Approach", *Applied Acoustic*, Vol. 65, NO. 8, August 2004, pp. 819 – 832.
- [30] M. Rucka, and K. Wilde, "Application of Continuous Wavelet Transform in Vibration Based Damage Detection Method for Beams and Plates", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 297, NO. 3-5, November 2006, pp. 536 – 550.
- [31] D. Hester, and A. Gonzalez, "A Wavelet-Based Damage Detection Algorithm Based on Bridge Acceleration Response to a Vehicle", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 28, April 2012, pp. 145 – 166.
- [32] I. Daubechies, *Ten Lectures on Wavelets*, CBMS-NSF Regional Conference Series in Applied Mathematics, Vol. 61, SIAM, Philadelphia, Pennsylvania, 1992.
- [33] M. Misiti, Y. Misiti, G. Oppenheim, and J. M. Poggi, *Wavelet Toolbox for Use with MATLAB, User's Guide Version 2*, 2002.
- [34] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, Academic Press, San Diego, 1999.
- [35] SAP2000 17.1.0. (2014). 1976-2014 Computers and Structures, Inc.
- [36] MATLAB 8.3. (2014). the MathWork, Inc. R2014a.