



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۳، پاییز ۱۳۹۵، صفحه ۲۴۱ تا ۲۴۸  
Vol. 48, No. 3, Fall 2016, pp. 241-248



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی عمران و محیط زیست

Amirkabir Journal of Science & Research  
Civil and Environmental Engineering  
(ASJR-CEE)

## شناسایی خسارت در سکوه‌های ثابت دریایی با استفاده از مفاهیم آنتروپی انرژی در تبدیل بسته موجک

حسین رحامی<sup>۱</sup>، حامد امینی تهرانی<sup>۲\*</sup>، مصطفی اخوات<sup>۲</sup>، غلامرضا قدرتی امیری<sup>۳</sup>

۱- دانشیار، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

۲- کارشناس ارشد مهندسی زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

(دریافت: ۱۳۹۱/۱۰/۲۸، پذیرش: ۱۳۹۴/۲/۲۷)

### چکیده

پایش سلامت سازه برای اطمینان از عملکرد ایمن سازه در طول مدت زمان بهره‌برداری از آن امری ضروری است. سکوه‌های فراساحلی به طور گسترده‌ای برای استخراج نفت و گاز از دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجایی که در این سکوها قسمت بیشتر سازه در زیر آب در معرض شرایط محیطی دریا قرار دارند، به شدت مستعد ایجاد خسارت هستند. یکی از روش‌های شناسایی عیوب سازه‌های در سکوه‌های دریایی، بهره‌گیری از ابزارهای پردازش سیگنال است. در این مقاله ابتدا مدلی از یک سکوی جکت معرفی می‌شود، سپس حالات مختلفی از خرابی توسط کاهش سختی طبقات به آن اعمال شده و پاسخ سازه تحت تحریک نویز سفید گاوسی ثبت می‌شود. در این مرحله پاسخ شتاب ثبت شده توسط تبدیل بسته موجک در ترازهای مختلف تجزیه شده و مؤلفه‌های حساس به خسارت با بهره‌گیری از مفاهیم آنتروپی انرژی و انجام تحلیل حساسیت، انتخاب می‌شوند. نتایج به دست آمده حاکی از آن است که مؤلفه‌های حساس به خسارت انتخاب شده حتی در آسیب‌های با شدت کم از کارایی مطلوبی برخوردار بوده و میزان تغییرات این مؤلفه‌ها نیز به‌طور محسوسی به شدت خسارت‌های وارده به سکو وابسته است.

### کلمات کلیدی:

پایش سلامت سازه، سکوه‌های فراساحلی، پردازش سیگنال، تبدیل بسته موجک، آنتروپی انرژی، تحلیل حساسیت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:  
Rahami, H., Amini Tehrani, H., Akhvat, M., and Ghodrati Amiri, G., 2016. "Damage Detection in Offshore Fixed Platforms Using Concepts of Energy Entropy in Wavelet Packet Transform". *Amirkabir Journal of Civil and Environmental Engineering*, 48(3), pp. 241-248.

DOI: 10.22060/ceej.2016.597

URL: [http://ceej.aut.ac.ir/article\\_597.html](http://ceej.aut.ac.ir/article_597.html)

E-mail: [hmdamini@yahoo.com](mailto:hmdamini@yahoo.com) نویسنده مسئول و عهده دار مکاتبات:



## ۱- مقدمه

سکوه‌های دریایی جکت نوعی از سازه‌های فراساحلی هستند که به طور گسترده‌ای برای استخراج و اکتشاف منابع نفت و گاز در مناطق فراساحلی دریا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سازه‌ها در طول عمر سرویس‌دهی خود همواره در معرض بارهای محیطی مانند موج و جریان‌های دریایی قرار دارند که این امر، سبب ایجاد تنش‌های چرخه‌ای و خستگی در قسمت‌های مختلف سازه مانند اتصالات می‌شود. بنابراین گذشت زمان موجب ایجاد خسارت تجمعی در این بخش‌ها و کاهش مقاومت سازه در برابر طوفان‌های دریایی می‌گردد. برای جلوگیری از این مسئله، شناسایی و تعمیر خرابی‌ها در سکو امری ضروری است. امروزه با توجه به هزینه‌های بسیار زیاد بازرسی‌های چشمی در اعماق دریا، روش‌های شناسایی خسارت مبتنی بر پردازش سیگنال‌های<sup>۱</sup> پاسخ سازه‌ای، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است.

در دو دهه اخیر پژوهشگران بسیاری کاربرد این روش‌ها را برای شناسایی خسارت در ساختمان‌ها بررسی نموده‌اند. یین و لین<sup>۲</sup> [۱] استفاده از تبدیل بسته موجک<sup>۳</sup> را برای شناسایی و طبقه‌بندی سیگنال‌های ارتعاشی مورد مطالعه و بررسی قرار دادند. اوآنسوا و سوارز<sup>۴</sup> [۲] از تبدیل موجک برای شناسایی ترک در قاب‌ها استفاده کردند. نه و همکاران<sup>۵</sup> [۳] روشی را برای تشخیص وجود آسیب در سازه‌ها با استفاده از ویژگی‌های حساس به خسارت مبتنی بر تحلیل موجک معرفی نمودند. این ویژگی‌ها از پاسخ‌های ثبت شده در مدت زمان وقوع زلزله استخراج شدند.

محققین برای شناسایی خسارت در سازه‌های فراساحلی نیز از روش‌های مبتنی بر مؤلفه‌های مودال و همچنین روش‌های مبتنی بر سیگنال بهره گرفته‌اند. برینکر و همکاران<sup>۶</sup> [۴] عنوان کردند که ایجاد تغییرات در یکپارچگی سازه سبب تغییر در مؤلفه‌های مودال سازه می‌شود. آن‌ها از مدل خودرگرسیو میانگین متحرک<sup>۷</sup> برای تخمین تغییرات مؤلفه‌های مودال بهره گرفتند. نیکولز<sup>۸</sup> [۵] از پاسخ سازه‌ای به دست آمده تحت تحریک محیطی برای ایجاد مدل‌های تجربی فضای فازی<sup>۹</sup> استفاده کرد. ژانگ و چن<sup>۱۰</sup> [۶] تغییرات پاسخ فرکانسی سکو را به عنوان ویژگی حساس به خسارت در نظر گرفتند. ژو و همکاران<sup>۱۱</sup> [۷] از ترکیب تجزیه تجربی مودی<sup>۱۲</sup> و توزیع ویگنر-ویل<sup>۱۳</sup> برای شناسایی خسارت مبتنی بر ارتعاش در سکوه‌های ثابت دریایی استفاده کردند. الشافی و همکاران<sup>۱۴</sup> [۸]

<sup>1</sup> Signal Processing

<sup>2</sup> Yen and Lin

<sup>3</sup> Wavelet Packet Transform (WPT)

<sup>4</sup> Ovanosova and Suarez

<sup>5</sup> Noh et al.

<sup>6</sup> Brincker et al.

<sup>7</sup> Auto-regressive Moving Average (ARMA)

<sup>8</sup> Nichols

<sup>9</sup> Phase Space

<sup>10</sup> Zhang and Chen

<sup>11</sup> Xu et. al.

<sup>12</sup> Empirical Mode Decomposition (EMD)

<sup>13</sup> Wigner-Ville Distribution

<sup>14</sup> Elshafey et. al.

از شبکه‌های عصبی مصنوعی<sup>۱۵</sup> به منظور تعیین شاخص خسارت با استفاده از پاسخ زوال‌یابنده آزاد بهره بردند. شنگ و ژن<sup>۱۶</sup> [۹] از پاسخ زمانی به دست آمده تحت بارهای تصادفی برای شناسایی خسارت در المان‌های سکوه‌های ثابت دریایی استفاده کردند. آن‌ها در ابتدا یک مدل سری زمانی با مرتبه تنظیم‌شونده ایجاد نمودند و سپس ماتریس حساسیت شامل مشتق اول ضرایب خودرگرسیو نسبت به سختی المان‌های سازه‌ای را به دست آوردند. مجتهدی و همکاران<sup>۱۷</sup> [۱۰] به منظور شناسایی خسارت در سکوی جکت از مدل المان محدود به‌روزشده برای پیش‌بینی تغییرات در خصوصیات دینامیکی اجزای سکو تحت الگوهای خسارت مختلف استفاده کردند. آن‌ها از سیستم منطق فازی<sup>۱۸</sup> و تحلیل احتمالاتی برای طبقه‌بندی خسارت‌های کلی در سازه بهره گرفتند.

در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از سیگنال پاسخ شتاب ثبت شده توسط سنسور جانمایی شده در عرشه سکوی جکت، وجود خسارت در سازه را شناسایی کرد. به این منظور، ویژگی‌های حساس به خسارت با بهره‌گیری از مفهوم آنتروپی انرژی و انجام تحلیل حساسیت بر روی مؤلفه‌های حاصل از تجزیه بسته موجک تعیین می‌شود. در ادامه مدل یک سکوی جکت در حوزه نکتی رسالت واقع در آب‌های خلیج فارس معرفی شده و خرابی در آن به صورت کاهش سختی معادل طبقات مختلف شبیه‌سازی می‌شود. کارایی روش پیشنهادی در تشخیص وجود آسیب و همچنین حساسیت شاخص خسارت نسبت به شدت آسیب‌های وارده مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

## ۲- تبدیل بسته موجک

تبدیل بسته موجک به طور گسترده‌ای در تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها کاربرد دارد. در حقیقت این تبدیل، تبدیل موجکی است که در آن سیگنال از فیلترهای بیشتری نسبت به تبدیل موجک گسسته عبور داده می‌شود. در تبدیل بسته موجک هر دو ضریب تقریب و جزئی از فیلتر می‌گذرند. بنابراین تبدیل بسته موجک یک تجزیه کامل را در ترازهای مختلف انجام داده و در نتیجه در محدوده‌های فرکانس بالا وضوح بهتری را به دست می‌دهد. در تبدیل بسته موجک، خانواده‌ای از توابع موجک و توابع مقیاس مربوط به آن‌ها برای تجزیه سیگنال اصلی به زیر شاخه‌ها به کار گرفته می‌شود. تجزیه سیگنال به صورت متوالی در هر دو قسمت فرکانس بالا و پایین تکرار می‌شود تا به سلسله‌های بعدی تجزیه برسد. این مسئله در شکل (۱) نشان داده شده است.

هر مؤلفه در درخت تبدیل بسته موجک، یک مؤلفه فیلتر شده است. به طوری که پهنای باند این فیلترها با افزایش شماره ترازها کاهش می‌یابد. همچنین کل درخت نیز به منزله یک بانک فیلتر در نظر گرفته می‌شود. در بالای این درخت وضوح زمانی، مناسب و وضوح فرکانسی

<sup>15</sup> Artificial Neural Network

<sup>16</sup> Yuan-Sheng and Zhen

<sup>17</sup> Mojtahedi et al.

<sup>18</sup> Fuzzy Logic System

تجزیه بسته موجک این امکان را می‌دهد تا انرژی سیگنال در باندهای فرکانسی و زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار گیرد.

#### ۴- شاخص حساس به خسارت<sup>۱</sup>

شاخص حساس به خسارت آنتروپی به صورت رابطه (۸) معرفی می‌شود:

$$EDSI_n = \left| \frac{E_{j,n}^u - E_{j,n}^d}{E_{j,n}^u} \right| \times 100 \quad (8)$$

که در آن  $EDSI_n$  شاخص حساس به خسارت مؤلفه  $n$  ام در تراز  $j$  از درخت تجزیه بسته موجک،  $E_{j,n}^u$  و  $E_{j,n}^d$  نیز به ترتیب انرژی مؤلفه  $n$  ام در تراز  $j$  در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده هستند. در حقیقت تعریف این شاخص بر این اصل استوار است که وقوع خسارت در سازه سبب تغییرات چشمگیر در مقادیر آنتروپی تعدادی از مؤلفه‌های درخت بسته موجک می‌شود.

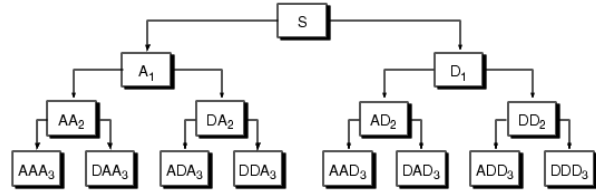
#### ۵- مطالعه موردی

##### ۵-۱- توصیف سکوی جکت

حوزه نفتی رسالت در آب‌های خلیج فارس و در فاصله‌ای در حدود ۸۰ کیلومتری از جزیره‌ی لاوان و در عمق ۶۷ متری آب قرار دارد. میدان نفتی رسالت شامل یک سکوی حفاری، یک سکوی استخراج، یک سکوی سرویس‌دهی و یک مشعل سه‌پایه است. این سکو در سال ۱۹۶۸ توسعه داده شد و شروع به استخراج نفت نمود. بعضی خرابی‌ها در طول جنگ ایران و عراق و بعضی از خرابی‌ها نیز در اثر شرایط آب و هوایی شدید ایجاد گردید. سکوی سرویس‌دهی شامل چهار پایه جکت است و قسمت بالایی آن نیز در ارتفاع ۶۷/۴ متری عمق آب قرار دارد که به وسیله یک پل به سکوی استخراج متصل می‌شود. عمر سرویس‌دهی سکو ۲۵ سال است. یک نمای سه‌بعدی و جزئیات آن در شکل (۲) نشان داده شده است [۱۱]. در این مقاله به منظور بررسی روش پیشنهادی از مدل دو بعدی این سکو بهره گرفته شده است.

##### ۵-۲- مدلسازی

برای انجام مدلسازی، یک مدل دو بعدی از قاب گفته‌شده ایجاد شد. این مدل دوبعدی به صورت مدل جرم و فنر با یک درجه آزادی انتقالی در هر تراز، در راستای افق در نظر گرفته شده است. برای تعیین مقادیر جرم و سختی، به گونه‌ای عمل شده است که زمان تناوب و همچنین انرژی جنبشی در هر حالت ارتعاشی در مدل برشی با مقادیر متناظر در سازه واقعی برابر باشند. رفتار سکو در فرایند تحلیل به صورت خطی در نظر گرفته شده و میرایی سیستم نیز به صورت میرایی رایلی و متناسب با جرم و سختی سازه فرض می‌شود. در شکل (۲) مدل برشی سکو و در جدول (۱) مقدار سختی و جرم هر تراز آورده شده است.



شکل (۱): تجزیه سیگنال توسط تبدیل بسته موجک

ضعیف بوده و در پایین آن به صورت برعکس است. بسته‌های موجک شامل مجموعه‌ای از توابع موجک است که به صورت خطی ترکیب شده‌اند.

بسته موجک تابعی با سه اندیس است که در آن  $i$ ،  $j$  و  $k$  به ترتیب اندیس‌های نوسان، مقیاس و جابه‌جایی نامیده می‌شوند.

$$\psi_{j,k}^i = 2^{j/2} \psi^i(2^j t - k) \quad (1)$$

موجک‌های  $\psi^i$  از روابط بازگشتی زیر به دست می‌آیند:

$$\psi^{2i}(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} h(n) \psi^i(2t - n) \quad (2)$$

$$\psi^{2i+1}(t) = \sqrt{2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} g(n) \psi^i(2t - n) \quad (3)$$

که در آن،  $h$  فیلتر پایین‌گذر، فیلتری است که سیگنال‌هایی با بسامدی کمتر از بسامدی مشخص را عبور می‌دهد و  $g$  فیلتر بالاگذر است که از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$g(k) = (-1)^k h(1-k) \quad (4)$$

همچنین مولفه  $i$  ام سیگنال  $f(t)$  و ضرایب بسته موجک  $c_{j,k}^i$  در تراز  $j$  به صورت رابطه‌هتی (۵) و (۶) به دست می‌آیند:

$$f_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_{j,k}^i \psi_{j,k}^i(t) \quad (5)$$

$$c_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^i(t) dt \quad (6)$$

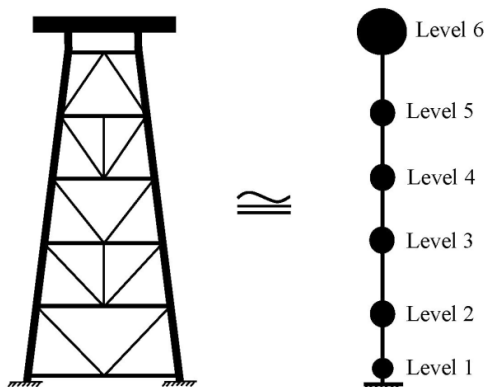
#### ۳- آنتروپی انرژی

آنتروپی بیانگر حجم اطلاعات ذخیره‌شده در سیگنال است. یعنی هرچه مقدار آنتروپی بیشتر باشد، مقدار اطلاعات ذخیره شده نیز بیشتر خواهد بود و برعکس. آنتروپی انرژی در گره  $i$ ، در درخت تجزیه بسته موجک یک سیگنال، حالت خاصی از آنتروپی  $P$ -nom بوده که در آن  $P=2$  است. آنتروپی  $P$ -nom به صورت زیر تعریف می‌شود:

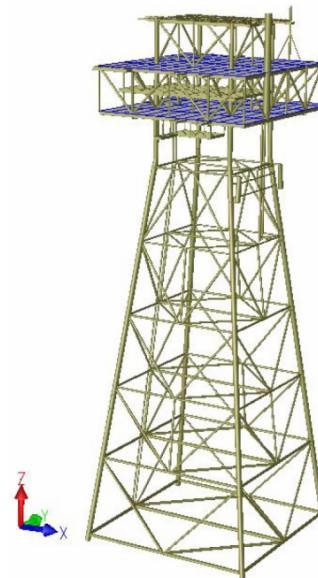
$$e_i = \sum_k |c_{j,k}^i|^P; \quad (P \geq 1) \quad (7)$$

که در آن،  $c_{j,k}^i$  ضرایب موجک در تراز  $j$  و گره  $i$  از درخت تجزیه بسته موجک هستند. در حقیقت آنتروپی  $P$ -nom، زمانی که  $P=2$  باشد، مفهوم انرژی را می‌رساند و به همین دلیل است که به آن آنتروپی انرژی گفته می‌شود. آنتروپی انرژی گره‌ها در تجزیه بسته موجک برای کاربرد در زمینه طبقه‌بندی سیگنال‌ها از پتانسیل بالاتری نسبت به ضرایب بسته موجک برخوردار است. استفاده از این ویژگی در گره‌های مختلف درخت

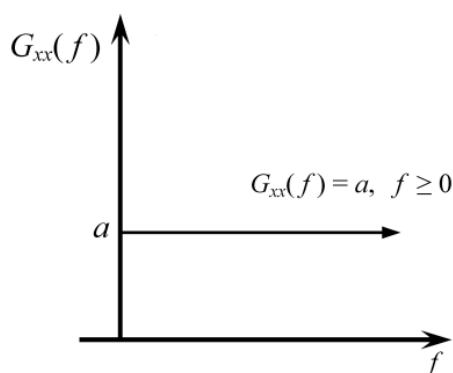
<sup>1</sup> Entropy Damage Sensitive Index



شکل (۳): مدل برشی معادل سکو



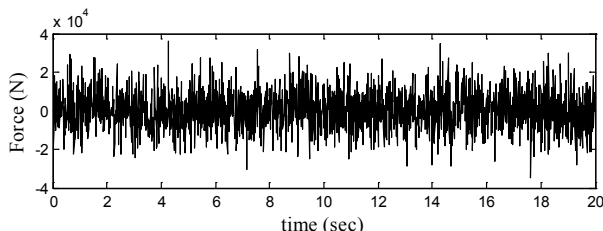
شکل (۲): نمای سه بعدی سکوی سرویس دهی در حوزه نفتی رسالت



شکل (۴): تابع چگالی طیفی توانی اغتشاش سفید

جدول (۱): مقادیر سختی و جرم در هرتراز در سازه برشی

مشخصات	تراز ۱	تراز ۲	تراز ۳	تراز ۴	تراز ۵	تراز ۶
سختی (ton)	۱۱۰	۱۸۳	۱۵۲	۱۴۶	۱۳۲	۸۶۵
جرم (kN/cm)	۴۳۵۴	۱۲۶۹	۱۱۸۳	۱۰۷۶	۹۷۰۱	۱۰۰۶



شکل (۵): سیگنال تصادفی استفاده شده برای تحریک سکو

### ۵-۳- تحریک سکوی مورد نظر

در سازه‌های بزرگ، انجام آزمایش ارتعاش اجباری دشوار است و ایجاد سطح کافی از تحریک معمولاً بسیار پرهزینه خواهد بود. همچنین سازه باید برای مدتی از عملکرد خود بازداشته شود تا امکان انجام آزمایش فراهم شود که این امر، سبب ایجاد مشکلات فراوانی به خصوص در مورد سازه‌های با اهمیتی مانند سکوهایی دریایی خواهد شد. بهتر است از ارتعاشات محیطی برای شناسایی این نوع سازه‌ها استفاده شود. در نتیجه برای تحریک سکوی مورد نظر از اغتشاش سفید استفاده شده است که به تراز بالایی سکو وارد می‌شود. در اصل اغتشاش سفید یک داده تصادفی با توزیع یکنواخت انرژی در همه فرکانس‌ها است.

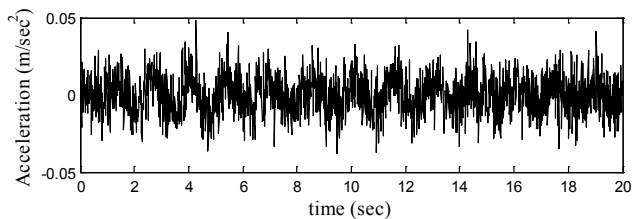
همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود تابع چگالی طیفی توان اغتشاش سفید در همه فرکانس‌ها مقداری ثابت است. با استفاده از این خاصیت، اغتشاش سفید را می‌توان داده تصادفی دانست که مقدار تابع چگالی طیفی توان آن ثابت است.

در شکل (۵) سیگنال تصادفی ورودی که به عنوان تحریک در نظر گرفته شده، نمایش داده شده است. این سیگنال در ۲۰۰۰ نقطه و با گام زمانی ۰/۰۱ ثانیه در نرم‌افزار متلب و بر اساس ویژگی‌های اغتشاش سفید تولید می‌شود.

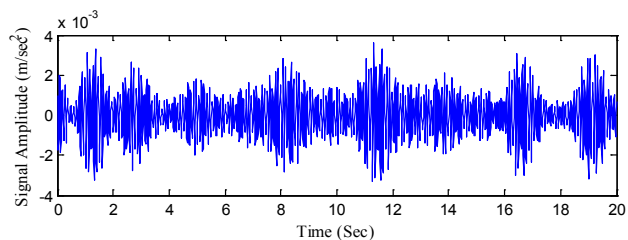
### ۵-۴- الگوهای خسارت

به طور کلی عوامل ایجاد آسیب در سکوها که ممکن است مجموعه سازه و تأسیسات آن را تهدید کند، به گروه‌های زیر دسته‌بندی می‌شوند:

- ناکافی بودن حد ایمنی: ممکن است در طول عمر سازه بارهای محیطی شامل باد، موج و زلزله و همچنین بارهای ثقیلی از حد تصور تجاوز کنند و یا این که مقاومت سازه در اثر علل مختلف کاهش یابد. در این حالت امکان تجاوز نیرو از ظرفیت و در نتیجه آسیب به اعضای اصلی سکو و عرشه وجود دارد.
- رویدادهای اتفاقی: ممکن است در اثر رویدادهایی مانند برخورد شناورها به سکو، آتش‌سوزی، سقوط اشیاء، بمباران و خوردگی خسارت‌های جدی به وجود آید.
- اشتباهات کلی: خطاها و اشتباهات انسانی و سازمانی در طراحی، ساخت، حمل، نصب و بهره‌برداری از سکو می‌تواند موجب ایجاد آسیب



شکل (۶): پاسخ شتاب سازه سالم تحت تحریک مورد نظر



شکل (۷): سیگنال بازسازی شده مؤلفه دوازدهم از تراز ششم

تجزیه را ادامه داده و از تراز بالاتر استفاده می‌شود.

بررسی‌های انجام شده نشان داد که تراز ششم مناسب‌ترین تراز برای دست‌یابی به مؤلفه‌های حساس به خسارت است. در شکل (۹) تغییرات شاخص حساس به خسارت آنتروپی برای الگوهای خسارت ده‌گانه در تراز ششم رسم شده است. همان‌طور که در این شکل نیز مشخص است، مؤلفه‌های ۴۶، ۶۱، ۱۲، ۱۰ و ۵۷ از میان ۶۴ مؤلفه موجود در تراز ششم، بیش‌ترین حساسیت را نسبت به وقوع خسارت در سکو از خود نشان داده و در تمام الگوهای معرفی شده که بیانگر شدت‌های مختلف خسارت در طبقات سکو هستند، وجود آسیب را به خوبی نشان می‌دهند. در جدول (۳) مقادیر شاخص *EDSI* برای مؤلفه‌های ۴۵ تا ۵۴ و ۵۷ تا ۶۴ آورده شده است. همان‌طور که عنوان شد، از میان ۵ مؤلفه انتخاب شده، ۳ مؤلفه ۴۶، ۵۷ و ۶۱ در این بازه قرار می‌گیرند که با ستون‌های رنگی در جدول مشخص هستند. روشن است که در الگوهای خسارت مختلف، مقادیر مؤلفه‌های گفته شده تفاوت آشکاری را با سایر مؤلفه‌ها دارند و این امر حاکی از حساسیت بالای این مؤلفه‌ها نسبت به وجود آسیب در سازه است.

#### ۵-۶- سنجش حساسیت شاخص *EDSI* نسبت به شدت آسیب

به منظور سنجش حساسیت شاخص معرفی شده نسبت به شدت خسارت‌های وارده، با ثابت در نظر گرفتن محل ایجاد آسیب و افزایش پله‌ای شدت آسیب وارده، نحوه تغییر شاخص حساس به خسارت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است با افزایش شدت خسارت از ۵ تا ۵۰ درصد (۱۰ الگو) در تراز سوم سکو، مقدار شاخص آنتروپی نیز برای مؤلفه‌های ۴۶ و ۵۷ افزایش می‌یابد. این مسئله حاکی از آن است که شاخص معرفی شده قادر است شدت خسارت را نیز به طور کیفی مورد ارزیابی دهد.

شود.

در این مقاله الگوهای خسارت طوری در نظر گرفته شده‌اند که اولاً با واقعیت‌های موجود منطبق باشند و ثانیاً بتوانند به طور قابل قبولی کارایی روش پیشنهادی را به ازای شدت‌های مختلف خسارت نشان دهند. الگوهای خسارت در نظر گرفته شده در جدول (۲) آورده شده است. این الگوها به صورت کاهش سختی در تراز مربوطه اعمال شده‌اند. به طور مثال منظور از ۱۰ درصد در تراز چهارم در الگوی خسارت اول این است که در مقدار سختی تراز چهارم سکو مقدار سختی ۱۰ درصد کاهش یافته است.

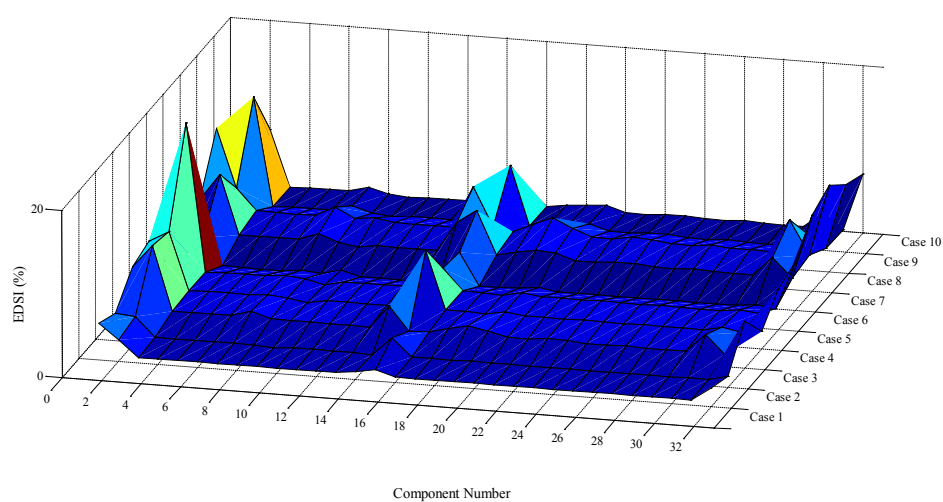
جدول (۲): الگوهای خسارت در نظر گرفته شده

الگوی خسارت	تراز ۱	تراز ۲	تراز ۳	تراز ۴	تراز ۵	تراز ۶
الگوی ۱	۰	۰	۰	۱۰	۰	۰
الگوی ۲	۰	۱۰	۰	۰	۰	۰
الگوی ۳	۰	۰	۰	۰	۰	۱۵
الگوی ۴	۰	۱۵	۰	۰	۱۰	۰
الگوی ۵	۰	۲۰	۱۵	۰	۰	۰
الگوی ۶	۰	۱۰	۰	۳۰	۱۰	۰
الگوی ۷	۰	۲۰	۰	۳۰	۰	۱۰
الگوی ۸	۰	۰	۱۰	۲۵	۰	۱۵
الگوی ۹	۰	۱۰	۰	۰	۱۵	۳۰
الگوی ۱۰	۰	۱۵	۰	۲۵	۱۵	۱۰

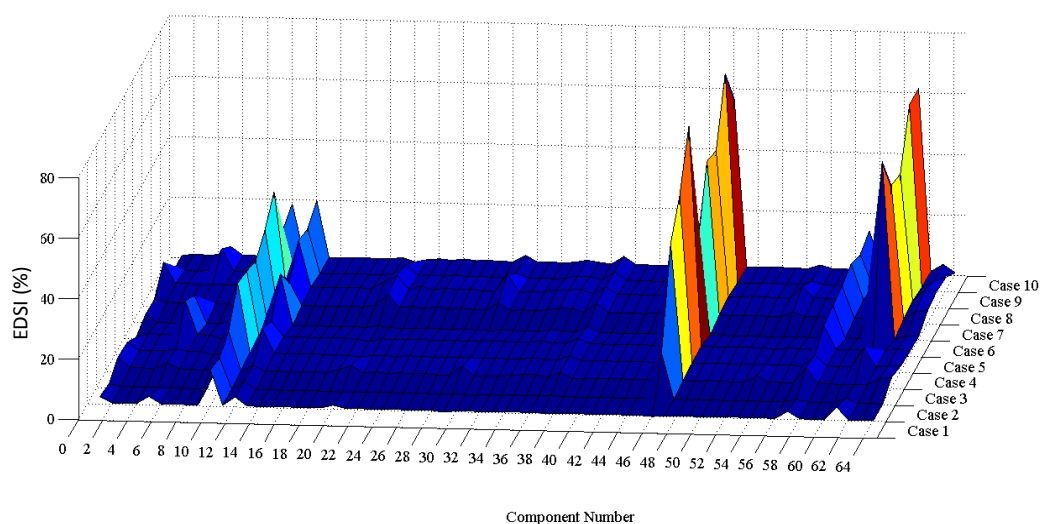
#### ۵-۵- بررسی نتایج

به منظور پایش سلامت سکوی مورد مطالعه، ابتدا سازه توسط اغتشاش سفید گاوسی که تاریخچه زمانی آن در شکل (۵) آورده شده است، تحریک می‌شود. در این مرحله با بهره‌گیری از تحلیل بسته موجک، پاسخ برداشت شده از سازه تجزیه شده و ضرایب بسته موجک در ترازهای مختلف محاسبه می‌شوند. از آنجایی که در تراز درخت تجزیه بسته موجک، ۲ مؤلفه وجود خواهد داشت. بنابراین باید سیگنال زمانی متناظر برای هر یک از ۲ مؤلفه بازسازی شود. شکل (۷) سیگنال بازسازی شده مؤلفه دوازدهم از تراز ششم درخت تجزیه بسته موجک را نشان می‌دهد. پس از بازسازی سیگنال‌ها، آنتروپی انرژی مطابق رابطه بیان شده محاسبه و مقدار شاخص حساس به خسارت آنتروپی برای هر یک از مؤلفه‌ها تعیین می‌شود. در این مرحله با انجام تحلیل حساسیت، تراز مؤثر و همچنین مؤلفه‌های حساس به خسارتی که بیشترین مقدار را در حالت وجود آسیب دارا هستند، انتخاب می‌شوند. همان‌طور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، مقادیر شاخص معرفی شده برای ۳۲ مؤلفه حاصل از تجزیه پاسخ شتاب سازه در تراز پنجم از درخت تجزیه بسته موجک، تغییرات قابل ملاحظه‌ای را به ازای الگوهای مختلف خسارت نشان نمی‌دهند. به همین علت عمل

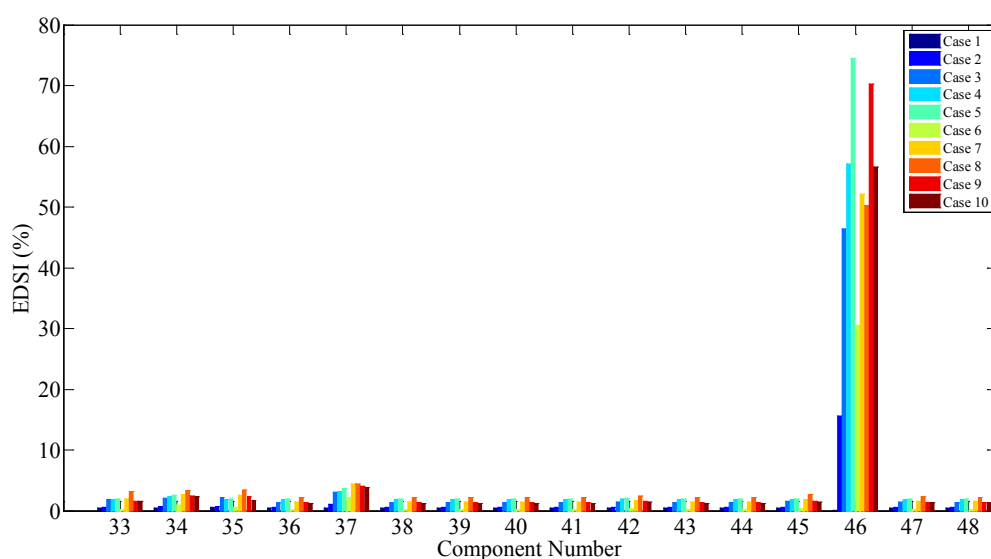




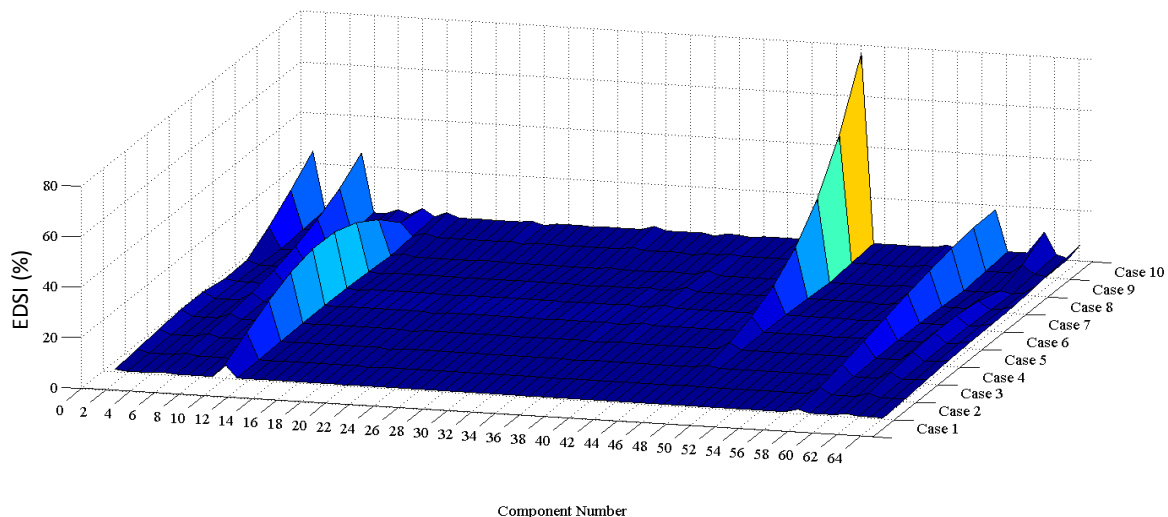
شکل (۸): تغییرات شاخص حساس به خسارت آنتروپی برای الگوهای خسارت ده‌گانه در تراز پنجم



شکل (۹): تغییرات شاخص حساس به خسارت آنتروپی برای الگوهای خسارت ده‌گانه در تراز ششم



شکل (۱۰): مقادیر شاخص EDSI برای مؤلفه‌های ۳۳ تا ۴۸ در تراز ششم



شکل (۱۱): تغییرات شاخص حساس به خسارت آنتروپی برای الگوی خسارت پله‌ای در تراز سوم سکو

جدول (۳): مقادیر شاخص EDSI برای مؤلفه‌های ۴۵ تا ۵۴ و ۵۷ تا ۶۴ در تراز ششم

شماره مؤلفه‌ها در درخت تجزیه بسته موجک																	الگو	
۶۴	۶۳	۶۲	۶۱	۶۰	۵۹	۵۸	۵۷	۵۴	۵۳	۵۲	۵۱	۵۰	۴۹	۴۸	۴۷	۴۶	۴۵	خسارت
-۰/۵	-۰/۴	-۰/۵	۴/۵	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۵	۲/۸	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۵	-۰/۱	-۰/۵	۱
-۰/۵	-۰/۷	-۰/۶	۲/۳	-۰/۶	-۰/۶	-۰/۶	۱/۵	-۰/۶	-۰/۵	-۰/۶	-۰/۶	-۰/۶	-۰/۶	-۰/۶	-۰/۶	۱۵/۶	-۰/۶	۲
۴/۰	۳/۴	۱/۳	۱/۴	۱/۳	۱/۴	۱/۳	۶/۶	۱/۵	۳/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۴	۱/۵	۱/۳	۱/۴	۴۶/۵	۱/۶	۳
۲/۴	۲/۵	۱/۸	۸/۲	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۵/۳	۱/۸	۱/۹	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۱/۸	۵۷/۰	۱/۸	۴
۱/۸	۲/۷	۱/۹	۱/۴	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۹/۶	۲/۰	۱/۴	۱/۹	۱/۹	۲/۰	۱/۹	۱/۹	۱/۹	۷۴/۵	۲/۰	۵
۱/۷	۱/۳	-۰/۲	۵۸/۷	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	۱۱/۰	-۰/۳	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۳	-۰/۲	-۰/۲	-۰/۲	۳۰/۵	-۰/۳	۶
۵/۰	۴/۲	۱/۵	۴۵/۵	۱/۴	۱/۵	۱/۵	۱۲/۰	۱/۷	۳/۱	۱/۴	۱/۵	۱/۶	۱/۷	۱/۵	۱/۵	۵۲/۱	۱/۸	۷
۵/۸	۶/۰	۲/۲	۴۴/۰	۲/۱	۲/۲	۲/۲	۱۴/۰	۲/۵	۶/۰	۲/۱	۲/۲	۲/۴	۲/۶	۲/۲	۲/۲	۵۰/۳	۲/۷	۸
۵/۰	۳/۴	۱/۳	۶۱/۴	۱/۳	۱/۳	۱/۳	۱۱/۷	۱/۵	۲/۵	۱/۳	۱/۳	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۴	۷۰/۳	۱/۵	۹
-۰/۹	۳/۷	۱/۲	۶۱/۴	۱/۲	۱/۲	۱/۲	۱۴/۲	۱/۴	۲/۵	۱/۲	۱/۲	۱/۴	۱/۴	۱/۳	۱/۳	۵۶/۵	۱/۵	۱۰

تعیین ماتریس‌های جرم و سختی و همچنین نیازمندی به تنها یک سنسور در عرشه سکو برای ثبت پاسخ سازه، قابلیت این روش را برای کاربردهای عملی بارزتر می‌سازد.

### ۷- مراجع

- [1] Yen, G. G. and Lin, K. C.; "Wavelet Packet Feature Extraction for Vibration Monitoring," *Industrial Electronics*, IEEE Transactions, Vol. 47, No. 3, pp. 650-667, 2000.
- [2] Ovanesova, A. and Suarez, L.; "Applications of Wavelet Transforms to Damage Detection in Frame Structures," *Engineering Structures*, Vol. 26, No. 1, pp. 39-49, 2004.
- [3] Noh, H. Y. et al.; "Use of Wavelet-Based Damage-Sensitive Features for Structural Damage Diagnosis

### ۶- نتیجه گیری

در این مقاله روشی برای تشخیص خرابی در سکوه‌های ثابت دریایی بر اساس مفاهیم آنتروپی انرژی در تبدیل بسته موجک ارائه شد. به منظور پایش وضعیت سلامت سکو، شاخص حساس به خسارت آنتروپی معرفی و کارایی آن به‌ازای ۱۰ الگوی خسارت مختلف برای سکوی مورد نظر مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج به دست آمده بیانگر عملکرد بسیار مطلوب روش پیشنهادی در شناسایی خسارت به ازای الگوهای مختلف است. همچنین حساسیت شاخص مورد نظر به ازای شدت‌های مختلف آسیب با ثابت در نظر گرفتن محل ایجاد خسارت بررسی شد و مشاهده شد که با افزایش شدت خرابی، مقدار شاخص EDSI نیز سیر صعودی خواهد داشت. گفتنی است که در صورتی که از روش پیشنهادی برای تشخیص خرابی در سازه دیگری استفاده شود، مؤلفه‌های حساس به خسارت نیز با توجه به مشخصات سازه مورد بررسی تغییر خواهند نمود. عدم نیاز به

- Polar Engineering Conference*, Beijing, China, 2010.
- [8] Elshafey, A. A.; Haddara, M. R. and Marzouk, H.; "Damage Detection in Offshore Structures Using Neural Networks," *Marine Structures*, Vol. 23, No. 1, pp. 131-145, 2010.
- [9] Yuan-Sheng, C. and Zhen, W.; "Detecting Damage to Offshore Platform Structures Using the Time-Domain Data," *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 1, p. 3, 2008.
- [10] Mojtahedi, A. et al.; "Developing a Robust SHM Method for Offshore Jacket Platform Using Model Updating and Fuzzy Logic System," *Applied Ocean Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 398-411, 2011.
- [11] Komachi, Y. et al.; "Retrofit of Resselat Jacket Platform (Persian Gulf) Using Friction Damper Device," *Journal of Zhejiang University-Science A*, Vol. 12, No. 9, pp. 680-691, 2011.
- Using Strong Motion Data," *Journal of Structural Engineering*, Vol. 137, No. 10, pp. 1215-1228, 2011.
- [4] Brincker, R. et al.; "Damage Detection in an Offshore Structure," *Proceedings-Spie The International Society for Optical Engineering*, Spie International Society for Optical, 1995.
- [5] Nichols, J.; "Structural Health Monitoring of Offshore Structures Using Ambient Excitation," *Applied Ocean Research*, Vol. 25, No. 3, pp. 101-114, 2003.
- [6] Zhang, Z. and Chen, S.; "Crack Detection Using a Frequency Response Function in Offshore Platforms," *Journal of Marine Science and Application*, Vol. 6, No. 3, pp.1-5, 2007.
- [7] Changhang Xu, G. C.; "Damage Detection of Offshore Platform Model Using Empirical Mode Decomposition and Wigner-Ville Distribution," *Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Offshore and*