

مقاله پژوهشی

DOR: [20.1001.1.24767131.1403.10.1.8.0](https://doi.org/10.24767/131.1403.10.1.8.0)

درصد همانندی: ۹٪

## تشخیص ترک در صفحه مستطیل شکل در شناورهای اثر سطحی با استفاده از الگوریتم تحلیل طیف تکین

محمد شیرزادی فر<sup>۱\*</sup>، علی عبداللهی فر<sup>۲</sup>

mshirzadifar@mut.ac.ir

<sup>۱\*</sup> نویسنده مسئول، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

abdollahifar@mut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۶

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۲۸

### چکیده

در این مقاله، موضوع شناسایی ترک با طول پنج سانتی متر و عمق یک میلی متر در صفحه مستطیل شکل آلومینیومی از نوع ۶۰۶۱ با ضخامت یک میلی متر برای شناورهای اثر سطحی مورد بررسی تشخیص ترک قرار گرفته است. در گام نخست صفحه مستطیلی شکل و ترک در نرم افزار آباکوس مدل سازی و تحت ضربه شبیه سازی شد. در گام دوم داده های کرنش به دست آمده از نقاط مختلف سازه در نرم افزار آباکوس استخراج شده و به نویز آلوده می شوند و سپس با الگوریتم طیف تکین به مودهای ذاتی خود تجزیه می شوند و انحراف معیار هر کدام از مودهای ذاتی محاسبه شدند و فرایند تشخیص عیب انجام شد. نتایج حاصل شده نشان دهنده توانایی بالای روش مذکور در شناسایی چندین عیب به صورت هم زمان به خصوص در سازه پوسته بدنه شناورهای اثر سطحی است.

واژه های کلیدی: الگوریتم طیف تکین، شناسایی ترک، ضربه اثر سطحی، سازه بدنه شناور

## ۱. مقدمه

وجود ترک ساختاری در سازه‌ها، به‌عنوان یکی از عوامل بروز عیوب و اماندگی در سیستم‌های مکانیکی محسوب می‌شود. بنابراین عوامل ایجاد و رشد ترک در سازه‌های مهندسی همواره توسط محققان علوم مهندسی مکانیک سازه، مورد توجه چشمگیری قرار گرفته است.

ایجاد و رشد ترک در سازه، همواره منجر به کاهش یافتن سختی موضعی آن و همچنین ایجاد تغییر در پاسخ رفتار دینامیکی تمام مجموعه سازه تحت تحریک می‌شود. بنابراین روش‌های تشخیص ترک بر مبنای تغییر پاسخ رفتار دینامیکی سازه‌ها تحت ارتعاشات واداشته همواره مدنظر شمار زیادی از محققان سازه قرار گرفته است.

از نمونه سازه‌هایی که وقوع ترک در آن‌ها همواره موجب بروز مشکل می‌شود، می‌توان به تیرهای کامپوزیتی تحت بارگذاری خمشی، تیرهای از جنس مواد مدرج و همچنین تیرهای بتنی تقویت‌شده با فیبرهای مصنوعی اشاره نمود که به ترتیب توسط محققانی نظیر اکباس، لین فنگ ژو، قهرمان نژاد و همکارانشان، مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱-۳].

وجود ترک در صفحات نیز می‌تواند خطرات بسیاری ایجاد نماید و به همین دلیل شناسایی ترک‌های موجود در ورق‌ها بسیار مهم است. از جمله بررسی‌های انجام‌شده بر روی ترک‌های موجود در ورق‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: هوانگ و همکارانش از طریق آزمایش میزان تنش موجود در ورق‌های دارای ترک تحت نیروی کششی را بررسی کرده و سپس رشد ترک را تحلیل نموده‌اند [۴]. مرادی و همکارانش نیز به تحلیل ارتعاشات آزاد ورق‌های دارای ترک پرداخته‌اند [۵]. همچنین ترک موجود در ورق به کمک تبدیل ویولت با در نظر گرفتن نوفه شناسایی شده است [۶]. قنادپور و همکارانش به تحلیل ترک در ورق‌های تحت بار یکپارچه پرداخته‌اند [۷]. اتصال دو قطعه از طریق جوشکاری باعث ایجاد تمرکز تنش در محل جوش می‌شود و به همین دلیل ایجاد ترک بر روی محل جوشکاری شده و یا نزدیک محل جوش می‌تواند بسیار مخرب باشد. وانگ و وو به شناسایی

ترک‌های موجود در اتصالات جوشکاری شده پرداخته و رشد آن‌ها را تخمین زده‌اند [۸].

الگوریتم تشخیص طیف تکین به‌عنوان یکی از کارآمدترین الگوریتم‌ها در تحلیل انواع مختلفی از سری‌های زمانی، محسوب می‌شود. تنوع استفاده از الگوریتم‌های طیف تکین در تخمین و پیش‌بینی میزان بارندگی سالانه در هند [۹]، ایجاد ترافیک در خیابان‌ها بر اساس سری‌های زمانی چند متغیره [۱۰] و پیش‌بینی میزان تولیدات در صنایع تولیدی [۱۱]، حاکی از دقت روش الگوریتم طیف تکین در تحلیل انواع مختلف سری‌های زمانی می‌باشد. استفاده از شبکه‌های عصبی در کنار الگوریتم طیف تکین نیز به‌عنوان یک روش ارتقاء یافته توسط کولیداکیس و همکارانش برای نخستین بار به منظور تخمین زمان بندی ترافیک جاده‌ای برون‌شهری استفاده شد [۱۲]. در ادامه نیز ترکیب طیف تکین و شبکه عصبی، سری زمانی فوریه و بردار برگشت، سرعت باد با دقت بسیار مناسبی توسط لیو و همکارانش پیش‌بینی شد [۱۳] و [۱۴].

## ۲. مواد و روش‌ها

الگوریتم‌های متعددی به منظور پیش‌بینی و توصیف انواع مختلفی از سری‌های زمانی وجود دارند که یکی از کامل‌ترین آن‌ها مبتنی بر ترکیب شبکه‌های عصبی تکاملی به همراه پشتیبانی با بردار برگشت با الگوریتم طیف تابع تکین است [۱۴].

الگوریتم تابع طیف تکین با ترکیبی از سری‌های زمانی متعدد در انواع محدوده‌های فرکانسی به پیش‌بینی و توصیف یک سری زمانی مشخص با سری‌های زمانی تجزیه‌شده، می‌پردازد. روش مذکور، شامل مراحل است که در ادامه به شرح زیر، به بیان آن‌ها پرداخته می‌شود.

محاسبه بردارهای ویژه، اولین مرحله در روش نرمال‌سازی سری‌های زمانی است. این بدان معناست که مقدار میانگین هر سری زمانی از کل داده‌های سری زمانی کم شده و مقدار نهایی بر انحراف معیار سری، تقسیم می‌شود.

استفاده از ماتریس بازسازی شده می توان رفتار سری زمانی هدف، را پیش بینی و تحلیل کرد [۱۵].

### ۳. روش حل مسئله

در این بخش، چگونگی تحلیل تئوری صفحات ترک دار بررسی می شود. با توجه به استفاده از حسگرها در داده برداری به منظور انجام تحلیل صفحات ترک دار، می بایست از گستره مناسبی از فرکانس داده برداری برای حسگرها، استفاده نمود؛ زیرا افزایش فرکانس داده برداری علی رغم افزایش دقت، موجب ازدیاد مدت زمان تحلیل داده ها نیز می شود.

با استفاده از داده بردارها با قابلیت ثبت داده ها در محدوده های فرکانسی متفاوت، می توان داده های آنالوگ حسگرهای کرنش سنج را بر مبنای سری زمانی دریافت نمود. در پژوهش حاضر با مینا قرار دادن فرکانس داده برداری ۳۰۰ هرتز و مقایسه نتایج حاصل از پیش بینی نتایج به کمک تحلیل با الگوریتم طیف تکین، می توان دریافت که این فرکانس دارای دقت و زمان حل مناسب در تحلیل صفحات ترک دار ایزوتروپیک، می باشد.

در پژوهش حاضر، اقدام به تحلیل صفحه ای آلومینیومی با ضخامت یک میلی متر و ابعاد طولی و عرضی برابر با ۴۵ و ۳۹/۵ سانتی متر می شود. سایر مشخصات مربوط به ثابت های مادی صفحه مذکور شامل مقادیر چگالی، مدول الاستیسیته یانگ و ضریب پواسون لحاظ شده در تحلیل نرم افزاری نیز در جدول (۱)، ارائه شده است.

جدول ۱. ثابت های مادی آلومینیوم

مقادیر	مشخصه	ردیف
۶۸/۳	مدول یانگ (GPa)	۱
۰/۳۴	ضریب پواسون	۲
۲۶۹۸/۸	چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	۳

نرم افزار آباکوس از دو حل کننده صریح و ضمنی به منظور انجام تحلیل های شامل بارگذاری دینامیکی، استفاده می نماید. از آنجایی که در تحلیل صفحات شامل ترک بر اساس تغییر

در روش فوق، متغیر  $M$ ، نماینده پنجره ای با طول تقریبی معادل بیست درصد تعداد داده های سری زمانی مورد بحث، است.

سپس یک ماتریس از حاصل ضرب تعداد سری های زمانی در اندازه پنجره با نماد  $Y$  محاسبه می شود که ستون های اصلی آن متشکل از سری های زمانی و ستون های فرعی آن شامل سایر سری های زمانی دارای از یک تا یک پنجره قبل از  $M$  در داده های سری زمانی مدنظر، می باشد.

سپس در مرحله بعد، ماتریس کواریانس بر مبنای رابطه (۱)، محاسبه می شود.

$$C = (Y' \times Y) / N \quad (1)$$

در رابطه (۱)، ماتریس  $C$  نماد ماتریس کواریانس، تعداد داده های سری زمانی با شمارنده  $N$  و ترانهاده ماتریس  $Y$  با نماد  $Y'$ ، نشان داده شده است. سپس بر مبنای ماتریس محاسبه شده در رابطه (۱)، بردارهای ویژه ماتریس مذکور قابل محاسبه می باشد.

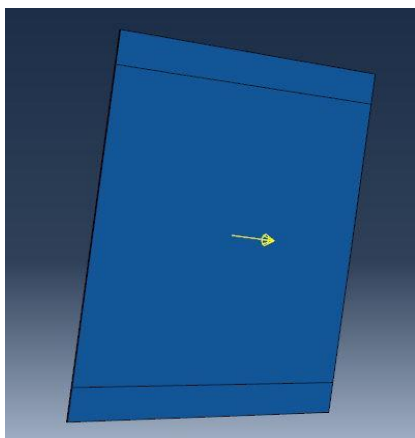
پس از محاسبه مقادیر ویژه، محاسبه ماتریس اجزای اصلی با استفاده از رابطه (۲)، میسر می باشد.

$$PC = Y \times \rho \quad (2)$$

در معادله (۲)، ماتریس اجزای اصلی دارای نماد  $PC$  و ماتریس بردارهای ویژه ماتریس کواریانس دارای نماد  $\rho$ ، نشان داده شده است.

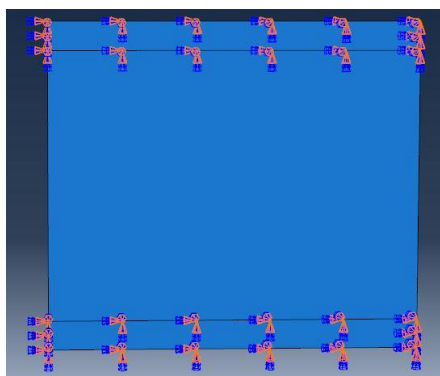
با توجه به متفاوت بودن ماتریس مؤلفه های اصلی با ماتریس سری های زمانی برای یک سیستم، نمی توان دو ماتریس فوق را با یکدیگر، مقایسه نمود. بنابراین نیاز است به منظور حل این مشکل، اقدام به تشکیل ماتریس اجزای بازسازی شده، شود. به منظور ایجاد ماتریس اجزای بازسازی شده می بایست در گام نخست، ماتریس  $Z$ ، با روندی مشابه با نحوه تشکیل ماتریس  $Y$  اما در جهت معکوس تأخیر زمانی نسبت به ماتریس  $Y$ ، تشکیل شود. سپس با تقسیم ماتریس بردارهای ویژه به ماتریس هایی با  $M$  ستون و با ضرب  $Z$  در آن ها، ماتریس اجزای بازسازی شده به دست آید. بعد از آن با

در قسمت بارگذاری در نرم افزار آباکوس، نحوه اعمال بارگذاری خارج از صفحه به صورت نشان داده شده در شکل ۴، مشخص شده است.



شکل ۴. بارگذاری ضربه‌ای خارج از صفحه

با توجه به تأثیرپذیری مستقیم خروجی نتایج نرم افزار آباکوس از شرایط مرزی گوناگون، شرایط مرزی در این پژوهش بر مبنای ایجاد دو قسمت کاملاً مقید شده به طول  $3/5$  سانتی متر از بالا و پایین صفحه و مطابق با شکل ۵، لحاظ شده است.



شکل ۵. شرایط مرزی صفحه

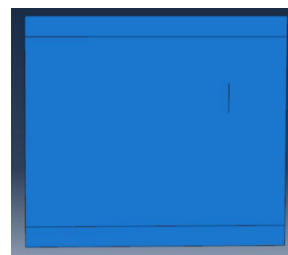
شبکه‌بندی این سازه به صورت مربعی بوده و اندازه نهایی مش‌ها نیز  $0/05$  میلی متر لحاظ شده است. در شکل ۶، کیفیت مش‌بندی اعمال شده روی سازه در محیط نرم افزار قابل مشاهده است.

به منظور حصول اطمینان از کیفیت مطلوب شبکه‌بندی در ارائه نتایج حاصل از تحلیل نرم افزاری از روش مطالعه شبکه‌بندی با دقت همگرایی بیشتر از ۹۲ درصد، استفاده شده است.

شکل ورق به صورت ناگهانی، نمی‌توان از حل کننده صریح استفاده نمود [۱۶]؛ در این پژوهش از حل کننده دینامیکی ضمنی و با مینا قرار دادن آیکون هندسه غیرخطی، به منظور انجام تحلیل استفاده می‌شود. متداول ترین راهکار تحلیل اجزاء محدود ترک در نرم افزار، روش اجزاء محدود توسعه یافته با قابلیت ارزیابی رفتار در ناپیوستگی‌ها می باشد [۱۷].

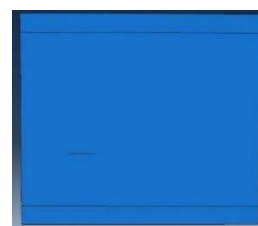
ترک مدل سازی شده ۵ سانتی متر طول و ۱ میلی متر عمق دارد. در این پژوهش، رفتار یک صفحه آلومینیومی شامل ترک با طول ۵ سانتی متر و عمق ترک ۱ میلی متر در سه موقعیت جانمای ترک، انجام شده است.

در شکل ۱ محل قرارگیری ترک در حالت اول نشان داده شده است. ترک به صورت عمودی در نظر گرفته شده است.



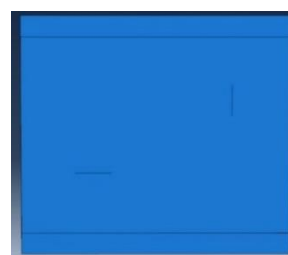
شکل ۱. محل ترک بر روی صفحه در حالت اول (ترک عمودی)

در شکل ۲ نیز محل قرارگیری ترک در حالت دوم نشان داده شده است. این ترک به صورت افقی قرار داده شده است.



شکل ۲. محل ترک بر روی صفحه در حالت دوم (ترک افقی)

در شکل ۳ نیز محل قرارگیری ترک‌ها در حالت سوم، به صورت ترکیبی از حالت‌های عمودی و افقی (ترکیب حالت‌های شماره یک و دو) نشان داده شده است.

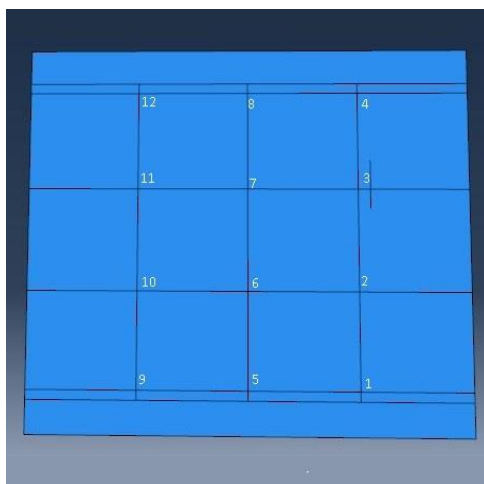


شکل ۳. موقعیت ترک بر روی صفحه در حالت سوم (دو ترک)

از پل و تستون میزان ولتاژ اندازه‌گیری شده و از این طریق کرنش محاسبه می‌شود. پل و تستون چهارپایه دارد که روی سه تا از پایه‌ها مقاومت با مقدار مشخص قرار می‌گیرد. کرنش سنج به‌عنوان مقاومت مجهول بر روی پایه چهارم قرار دارد. در صورت تغییر مقدار کرنش در کرنش سنج، تعادل پل و تستون به‌هم‌خورده و در خروجی اختلاف ولتاژ ایجاد می‌شود. با تحلیل میزان اختلاف ولتاژ، کرنش به وجود آمده در حسگر به دست می‌آید. از نکته‌های مثبت این حسگرها می‌توان به ارزان بودن حسگر اشاره کرد. از طرفی یکی از عیب‌های این حسگرها عدم پاسخگویی دقیق در سیستم‌هایی با تغییر دمای قابل توجه است.

بنابراین با توجه به ابعاد صفحه مورد بررسی، هر  $122\text{cm}^2$  از مساحت سطح توسط یک عدد حسگر، تحت پوشش قرار گرفته است.

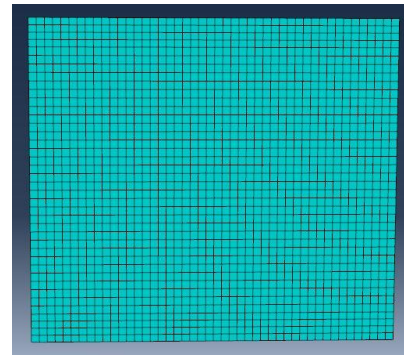
در حالت اول تحلیل، صفحه شامل یک ترک در راستای عمودی است. جهت شناسایی عیب بایستی در نقاط مختلفی از سازه حسگر قرار داده شود. چینش حسگرها که با جستجو به دست آمده‌اند مطابق شکل ۷ است. سپس سری بازسازی شده زمانی حسگرها با توجه به نمودار نوفه‌های در نظر گرفته شده، تعیین می‌شوند.



شکل ۷. موقعیت حسگرها با توجه به حضور ترک عمودی درون صفحه‌ای در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود

در شکل ۱۱، داده‌های مربوط به هر کدام از حسگرهای شماره یک تا دوازده تحت تأثیر ضربه خارج از صفحه، ارائه شده است. داده‌های ثبت شده توسط حسگرها حاکی از به

در حل اجزای محدود معمولاً در محدوده‌های حساس مانند اطراف ترک برای افزایش دقت از مش کوچک‌تر استفاده می‌شود. در این پژوهش نیز نتایج مش یکنواخت با نتایج مربوط به مش کوچک‌تر در اطراف ترک مقایسه شده است و نتایج نشان‌دهنده دقت کافی در حالت مش یکنواخت است.



شکل ۶. صفحه مش بندی شده

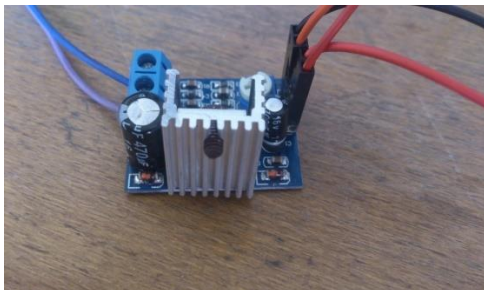
پس از انجام مش بندی، صفحه موردنظر با مدول کاری خود، تحلیل و میزان کرنش در نقاط موردنظر تعیین می‌شود.

سپس به منظور تشخیص عیوب ناشی از بروز ترک در صفحه و با استفاده از الگوریتم طیف تابع تکین و اعمال آن بر روی سری‌های زمانی حاصل از مقادیر کرنش در نقاط مربوطه، ماتریس‌های کوواریانس و اجزای اصلی محاسبه و به‌عنوان معیار ارزیابی تشخیص عیب حاصل از رشد ترک، مبنا قرار می‌گیرد.

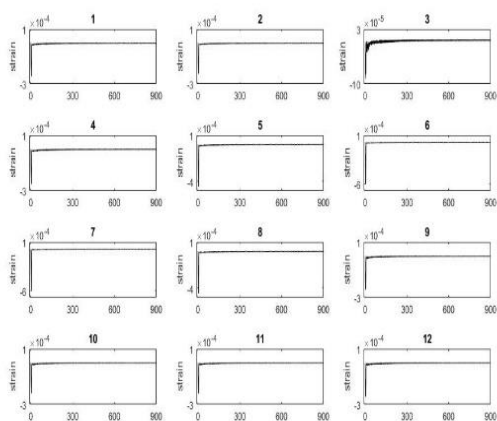
#### ۴. ارائه نتایج شبیه‌سازی

پس از مدل‌سازی و تحلیل صفحه موردنظر در این پژوهش با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، مقادیر مربوط به کرنش در تمامی نقاط مشخص شده از قبل، به‌صورت یک سری زمانی مشخص می‌شود. سپس سری زمانی حاصل، با استفاده از تحلیل تابع طیف تکین، بررسی می‌شود. در این بخش سه حالت مختلف وجود ترک روی صفحه که به ترتیب شامل ترک عمودی، افقی و ترکیب ترک‌های عمودی و افقی با تعداد ۱۲ موقعیت حسگر روی صفحه می‌باشد، تحلیل شده است. هر کدام از این حسگرها میزان کرنش ایجاد شده در سیستم را ثبت می‌کنند. در حسگرهای کرنش سنج با استفاده

تقویت کننده استفاده شود. در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش نیز از تقویت کننده استفاده شده است. شکل ۱۰، نشان‌دهنده یک تقویت کننده است که به ضربه‌زننده مولد جریان و مولد شکل موج متصل است و با دریافت سیگنال، توان آن را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۰. تقویت کننده TDA2030A



شکل ۱۱. داده‌های مربوط به کرنش هر کدام از حسگرهای شماره یک تا دوازده تحت تأثیر ضربه خارج از صفحه در حضور ترک عمودی درون صفحه‌ای (محور طولی: تعداد داده، محور عمودی: مقدار کرنش بر حسب میلی‌متر بر میلی‌متر)

با توجه به حضور همیشگی خطای ناشی از عوامل محیطی گوناگون در حین داده برداری، نتایج حاصل از نرم‌افزار اجزاء محدود با مقادیر تصادفی به منظور لحاظ نمودن اثر نوفه‌ها و نزدیک‌تر شدن نتایج حاصل از تحلیل به داده برداری واقعی، جمع می‌شود.

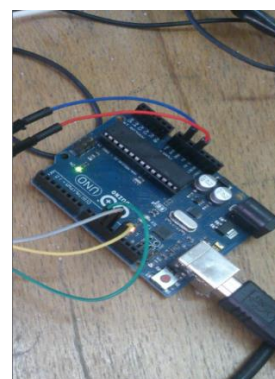
در شکل ۱۲ نمودارهای مربوط به نوفه اضافه شده به نتایج حسگرها نشان داده شده است. محور عمودی این نمودارها بیانگر مقدار نوفه است.

سمت صفر میل کردن مقادیر کرنش پس از گذشت بازه زمانی کوتاهی از اعمال ضربه می‌باشد. به منظور ایجاد ضربه در صفحه بایستی از یک ضربه‌زننده استفاده شود. ضربه‌زننده پس از دریافت شکل و دامنه موج نیرو، در صفحه، ضربه مناسب را ایجاد می‌کند. در شکل ۸، تصویر و نوع ضربه‌زننده، ملاحظه می‌شود.



شکل ۸. ضربه‌زننده

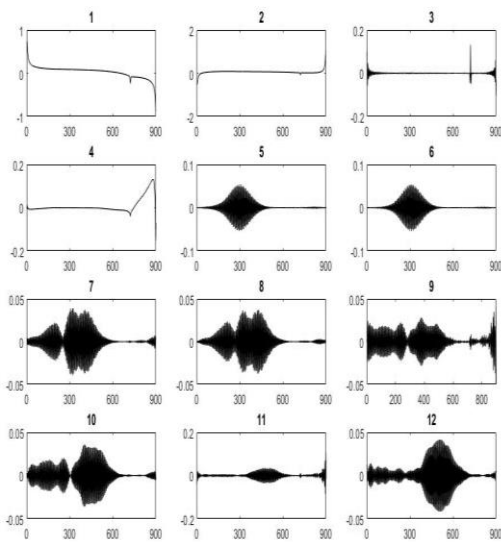
با توجه به اینکه در هر فرکانس تحریک، برخی از نقاط صفحه ثابت می‌باشند و در صورت وجود عیب در نقاط ثابت (گره‌ها)، عیوب قابل شناسایی نمی‌باشند نمی‌توان از نیروی تحریک ضربه‌ای با فرکانس ثابت برای شناسایی استفاده کرد. به همین منظور بایستی نیروی تحریک اعمال شده بر روی سیستم دارای فرکانس متغیر با زمان باشد. جهت تولید نیروی تحریک با فرکانس متغیر از مولد شکل موج متغیر با زمان مطابق با شکل ۹، استفاده می‌شود.



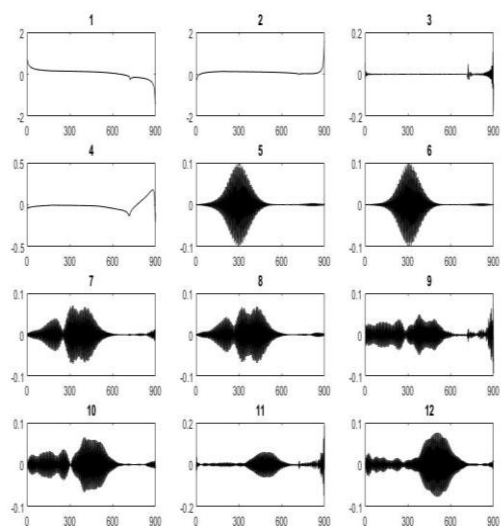
شکل ۹. مولد شکل موج متغیر با زمان آردوینو

همچنین در صورتی که سیگنال‌های ایجاد شده توان لازم برای تحریک مناسب سیستم را نداشته باشند بایستی از

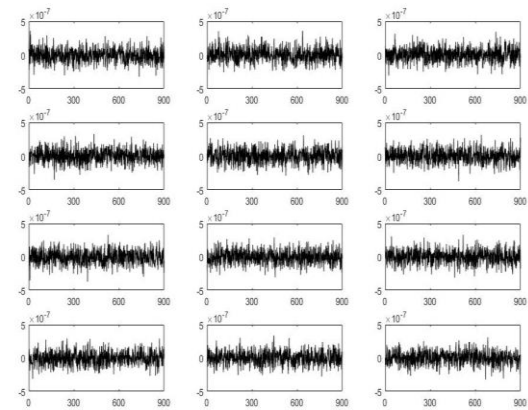
به عنوان نمونه ارائه شده است؛ بنابراین وجود دامنه متفاوت سری زمانی بازسازی شده در ناحیه نزدیک به ترک که توسط حسگر شماره سه ثبت شده است حاکی از قابلیت تشخیص عیب بر مبنای الگوریتم تحلیل طیف تابع تکین است. طول پنجره لحاظ شده برای هر ستون از ماتریس سری زمانی برابر با ۱۸۰ سری برای هر حسگر در نظر گرفته شده است. در شکل های ۱۰ تا ۱۲ مقادیر مربوط به سری های زمانی بازسازی شده برای حسگرهای شماره یک، سه و ده، بر روی محور عمودی و تعداد داده ها بر روی محور افقی نشان داده شده است.



شکل ۱۳. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی شده زمانی برای حسگر شماره یک نصب شده بر روی صفحه شامل ترک عمودی (محور طولی): تعداد داده، محور عمودی: مقدار کرنش بر حسب میلی متر بر میلی متر)



شکل ۱۴. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی شده زمانی برای حسگر شماره سه نصب شده بر روی صفحه شامل ترک عمودی (محور طولی): تعداد داده، محور عمودی: مقدار کرنش بر حسب میلی متر بر میلی متر)



شکل ۱۲. نمودارهای مربوط به نوفه اضافه شده به نتایج حسگرها در حضور ترک عمودی درون صفحه ای (محور طولی: تعداد داده، محور عمودی: مقدار کرنش بر حسب میلی متر بر میلی متر)

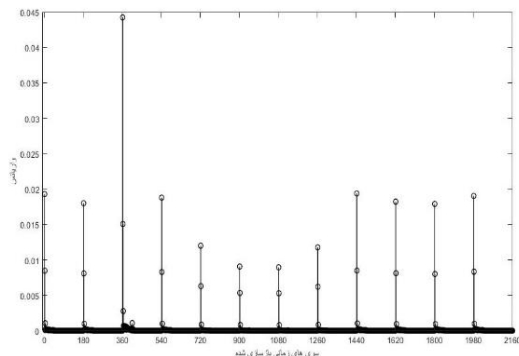
برای هر کدام از ۱۲ حسگر جانمایی شده روی صفحه در شکل ۷، ۹۰۰ داده در طول زمان ثبت شده است که در شکل ۱۲، با داده تصادفی به منظور لحاظ نمودن اثر نوفه ها و نزدیک تر شدن نتایج حاصل از تحلیل به داده برداری واقعی، جمع شده است. به علت مشابهت نمودار نوفه ها در هر سه حالت تحت بررسی، از تکرار مجدد نمودارهای مشابه مذکور، خودداری شده است.

در صورتی که محدوده خطاهای افزوده شده به سیستم نسبت به محدوده نتایج پایین تر باشد، منجر به ایجاد تغییرات نامتناسب کلی در نتایج حاصل نمی شود. در این پژوهش مقادیر مربوط به کرنش های به دست آمده برای هر یک از حسگرها در محدوده  $10^{-7}$  تا  $10^{-5}$  است و در صورتی که نوفه های سیستم در محدوده پانزده درصد میانگین سری های زمانی لحاظ شود، می توان عیوب ناشی از ایجاد ترک و تأثیر آن بر کرنش های صفحه ایزوتروپیک تحت ضربه خارجی عمود بر صفحه را به راحتی شناسایی نمود.

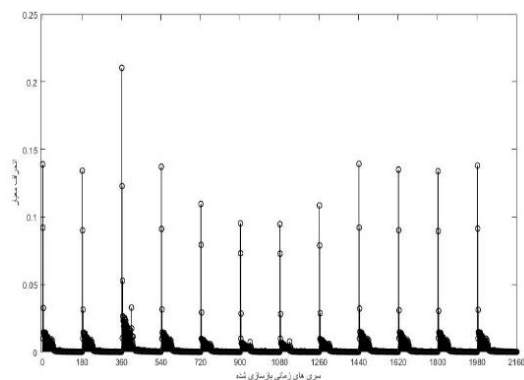
نتایج نهایی حاصل از تحلیل الگوریتم طیف تابع تکین به صورت سری های بازسازی شده زمانی به دست می آیند که تحلیل آن ها نمایانگر پیش بینی دقیقی از چگونگی رفتار سیستم می باشد.

دامنه سری های زمانی بازسازی شده به دست آمده برای تمامی حسگرها (به جز حسگر شماره سه که در نزدیکی ترک قرار دارد)، دامنه یکسانی نسبت به هم دارند. بنابراین با توجه به شباهت مذکور، نتایج مربوط به حسگرهای شماره یک و ده

تفاوت چشمگیر مقادیر واریانس و انحراف معیار در حسگر شماره سه نسبت به سایر حسگرها حاکی از توانمندی روش تحلیل طیف تابع تکین در تشخیص عیوب ناشی از وجود ترک در صفحه است.



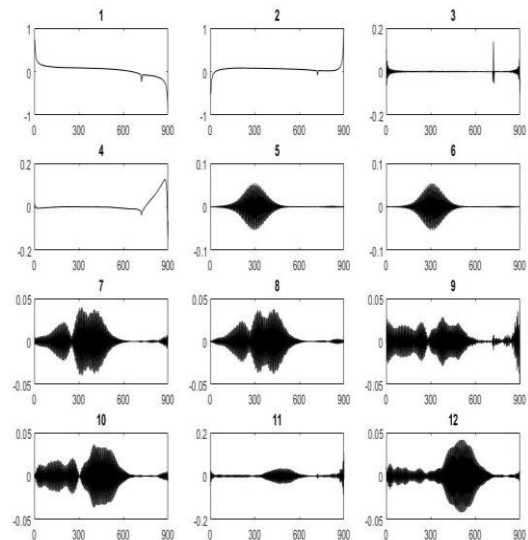
شکل ۱۶. نمودار مقادیر واریانس‌های مربوط به سری‌های بازسازی شده زمانی برای حسگرهای نصب شده بر روی صفحه حاوی ترک عمودی



شکل ۱۷. نمودار مقادیر انحراف‌های مربوط به سری‌های بازسازی شده زمانی برای حسگرهای نصب شده بر روی صفحه حاوی ترک عمودی

در صورتی که از مقادیر مربوط به واریانس و انحراف معیار مربوط به هر حسگر، دوباره برای بار دوم نیز، واریانس و انحراف معیار گرفته شود؛ اختلاف حسگر شماره سه نسبت به سایر حسگرها و توانمندی آن در تشخیص عیب ناشی از وجود ترک در صفحه، با وضوح بهتری، نمایان می‌شود. در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، مقادیر واریانس و انحراف معیار دوم سری‌های زمانی بازسازی شده، برای هر حسگر نشان داده شده است.

لازم به ذکر است که در شکل‌های ۱۸ و ۱۹، مقادیر واریانس مربوط به هر حسگر، دیگر با توان دوم انحراف معیار مربوط به همان حسگر، برابر نخواهند بود.



شکل ۱۵. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی شده زمانی برای حسگر شماره ده نصب شده بر روی صفحه شامل ترک عمودی (محور طولی: تعداد داده، محور عمودی: مقدار کرنش بر حسب میلی‌متر بر میلی‌متر)

با توجه به شکل‌های بالا، نمودارهای مربوط به ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی شده زمانی برای تمامی حسگرها، مشابه حسگرهای شماره یک و ده و به صورت یکسان می‌باشد و تفاوت دامنه مربوط به حسگر شماره سه نسبت به سایرین، حاکی از توانایی تشخیص وجود ترک در نزدیکی ناحیه پوشش داده شده توسط حسگر مذکور می‌باشد.

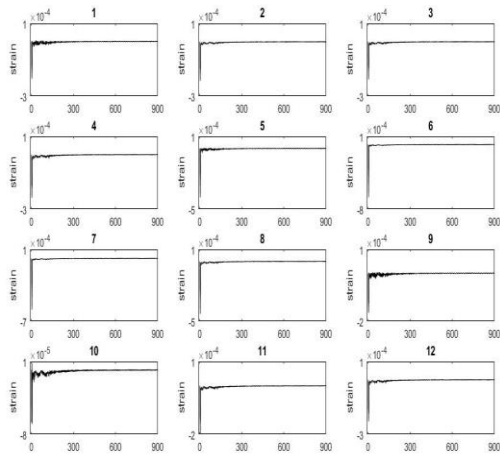
به منظور تشخیص عیب ناشی از وجود ترک باید هر کدام از حسگرها، میزان پراکندگی داده‌های بازسازی شده زمانی را به دست آورد. از آنجایی که تعداد داده‌های هر سری بازسازی شده زمانی با تعداد داده‌های گزارش شده توسط هر حسگر، یکسان است؛ ماتریس سری‌های بازسازی شده زمانی از حاصل ضرب تعداد حسگرها در طول پنجره، به دست می‌آید.

بنا به روند فوق، در پژوهش حاضر نیز در مجموع ۱۲ حسگر بر روی صفحه شامل ترک، نصب شده است. در صورتی که طول پنجره برابر با ۱۸۰ لحاظ شود، تعداد تمام سری‌های بازسازی شده زمانی برابر با ۲۱۶۰ عدد به دست می‌آید که هر مجموعه ۱۸۰ عددی از آن مربوط به هر حسگر بر حسب توالی شماره تمامی حسگرهای نصب شده، است.

در شکل‌های ۱۶ و ۱۷ نیز به ترتیب، مقادیر مربوط به محاسبه واریانس و انحراف معیار سری‌های بازسازی شده زمانی برای هر حسگر ارائه شده است.

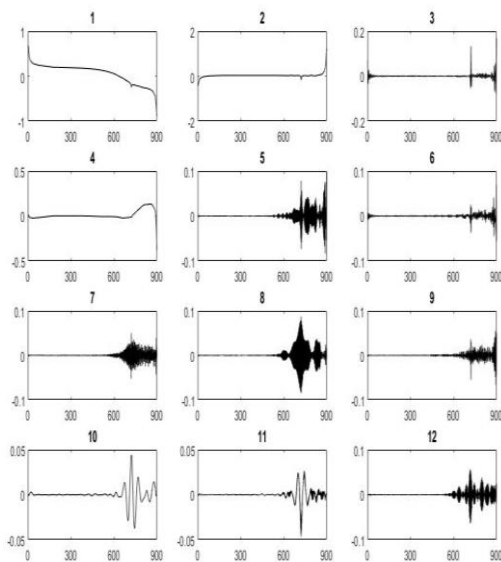


مشابه روند ارائه شده برای صفحه شامل ترک عمودی، در حالتی که صفحه شامل ترک افقی می باشد نیز پس از تعیین موقعیت ترک و حسگرها، نتایج مربوط به کرنش حسگرها به صورت ارائه شده در شکل ۲۱، مشخص می شود.

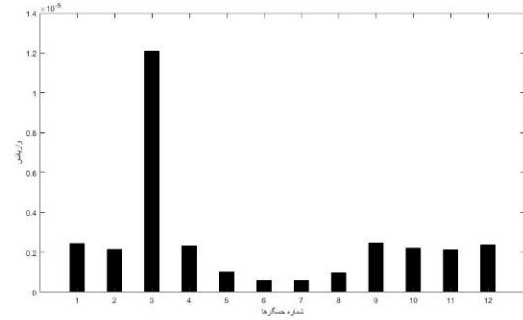


شکل ۲۱. داده های مربوط به کرنش هر کدام از حسگرهای شماره یک تا دوازده تحت تأثیر ضربه خارج از صفحه در حضور ترک افقی درون صفحه های (محور طولی: تعداد داده، محور عمودی: مقدار کرنش بر حسب میلی متر بر میلی متر)

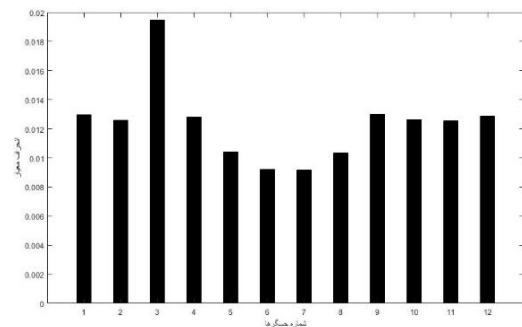
در این حالت نیز دامنه سری های زمانی بازسازی شده به دست آمده برای تمامی حسگرها (به جز حسگر شماره ده که در نزدیکی محل ترک افقی قرار دارد)، دامنه یکسانی نسبت به هم دارند. بنابراین به منظور بررسی قابلیت تشخیص الگوریتم تابع طیف تکین در شناسایی ترک افقی، نتایج مربوط به حسگرهای شماره یک، ده و یازده به ترتیب در شکل های ۲۲، ۲۳ و ۲۴ ارائه شده است.



شکل ۲۲. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی شده زمانی برای حسگر شماره یک نصب شده بر روی صفحه شامل ترک افقی



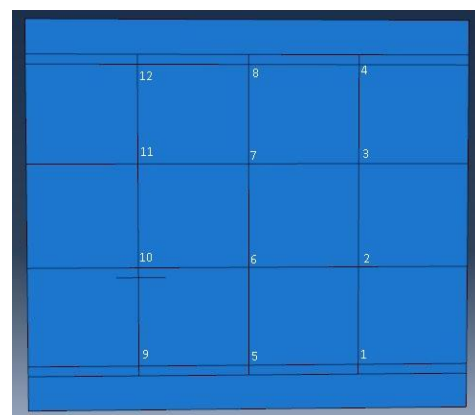
شکل ۱۸. نمودار مقادیر واریانس های دوم مربوط به سری های بازسازی شده زمانی برای حسگرهای نصب شده بر روی صفحه حاوی ترک عمودی



شکل ۱۹. نمودار مقادیر انحراف معیارهای دوم مربوط به سری های بازسازی شده زمانی برای حسگرهای نصب شده بر روی صفحه حاوی ترک عمودی

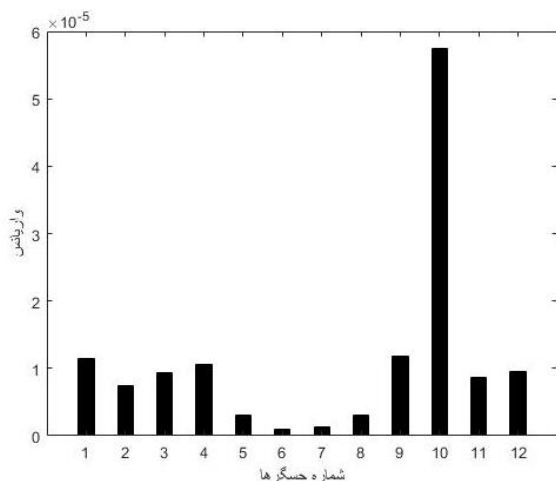
ایجاد اختلاف های بیشتر برای حسگر شماره سه نسبت به سایر حسگرها در مقادیر مربوط به واریانس و انحراف معیار دوم که در شکل های ۱۸ و ۱۹، ارائه شده است؛ حاکی از وجود ترک در نزدیک حسگر شماره سه، است که به خوبی توسط حسگر مربوطه، شناسایی شده است.

در حالت دوم، ترک به صورت افقی بر روی صفحه مدل سازی شده است. در شکل ۲۰ محل قرارگیری حسگرها و ترک در حالت دوم نشان داده شده است.

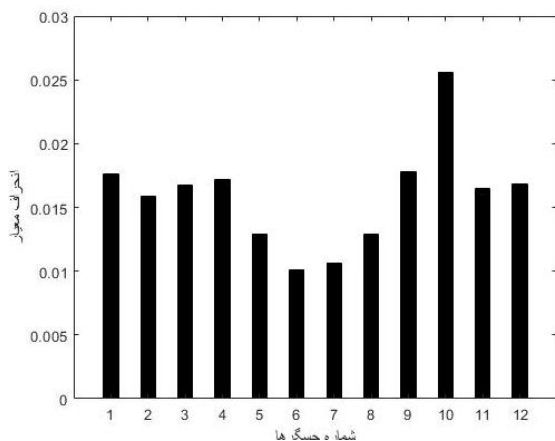


شکل ۲۰. موقعیت حسگرها با توجه به حضور ترک افقی درون صفحه های در محیط نرم افزار اجزاء محدود

معیار دوم نیز برای داده‌های مرتبط با هر حسگر به ترتیب در شکل‌های ۲۵ و ۲۶، ارائه شده است.



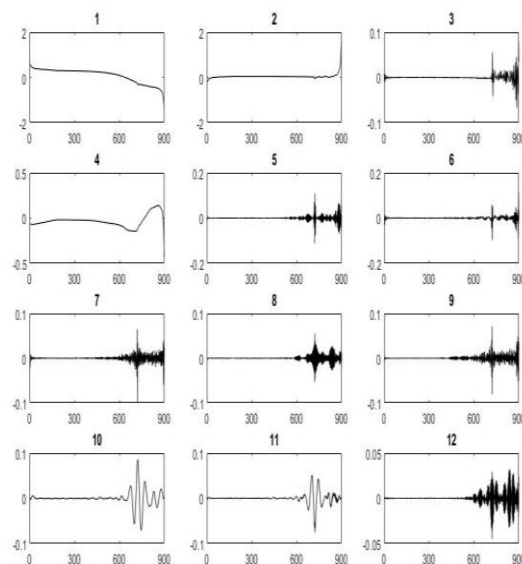
شکل ۲۵. نمودار مقادیر واریانس‌های دوم مربوط به سری‌های بازسازی‌شده زمانی برای حسگرهای نصب‌شده بر روی صفحه حاوی ترک افقی



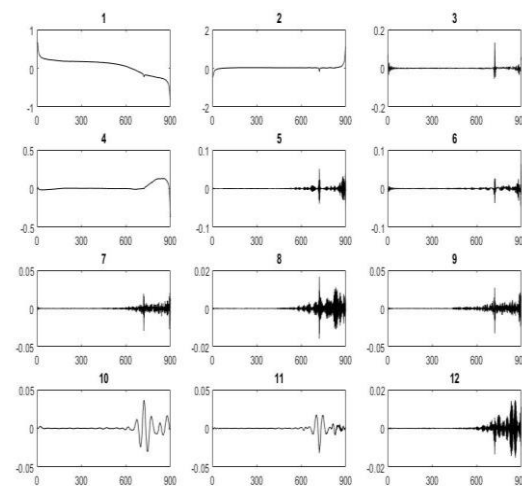
شکل ۲۶. نمودار مقادیر انحراف معیارهای دوم مربوط به سری‌های بازسازی‌شده زمانی برای حسگرهای نصب‌شده بر روی صفحه حاوی ترک افقی

ایجاد اختلاف‌های بیشتر برای حسگر شماره ده نسبت به سایر حسگرها در مقادیر مربوط به واریانس و انحراف معیار دوم که در شکل‌های ۲۵ و ۲۶، ارائه شده است؛ حاکی از وجود ترک در نزدیک حسگر شماره ده، است که به خوبی توسط حسگر مربوطه، شناسایی شده است.

در حالت سوم هر دو ترک به صورت هم‌زمان مدل‌سازی و تحلیل شده‌اند؛ مانند دو حالت قبل ابتدا مکان ترک‌ها و محل قرارگیری حسگرها در شکل ۲۷ نشان داده شده است.



شکل ۲۳. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی‌شده زمانی برای حسگر شماره ده نصب‌شده بر روی صفحه شامل ترک افقی

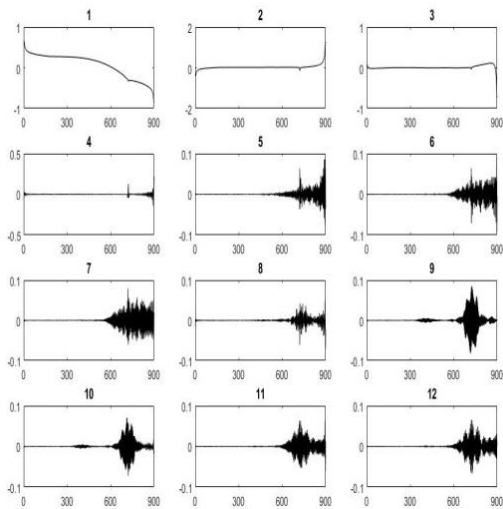


شکل ۲۴. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی‌شده زمانی برای حسگر شماره یازده نصب‌شده بر روی صفحه شامل ترک افقی

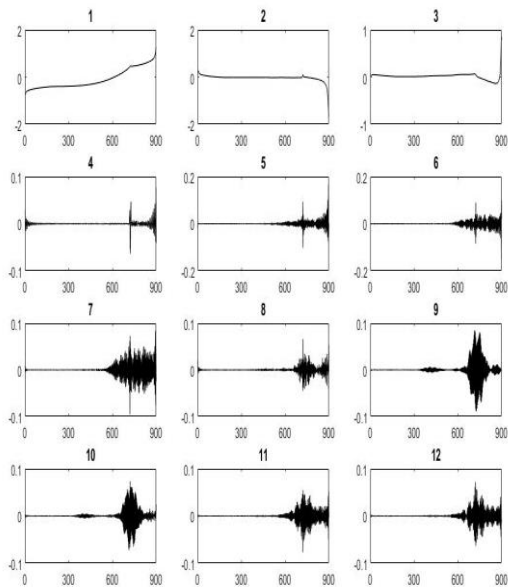
با توجه به شکل‌های ۲۲ تا ۲۴، نمودارهای مربوط به ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی‌شده زمانی برای تمامی حسگرها، مشابه حسگرهای شماره یک و یازده و به صورت یکسان می‌باشد و تفاوت دامنه مربوط به حسگر شماره ده نسبت به سایرین، حاکی از توانایی تشخیص وجود ترک افقی در نزدیکی ناحیه پوشش داده شده توسط حسگر مذکور است.

تعداد ۲۱۶۰ داده مربوط به مقادیر واریانس و انحراف معیار برای حسگرهای نصب‌شده بر روی ورق حاوی ترک افقی، مشابه حسگرهای نصب‌شده بر روی ورق حاوی ترک عمودی لحاظ شده است. همچنین مقادیر واریانس و انحراف

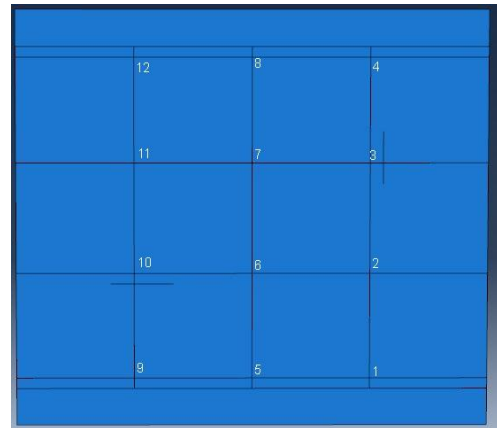
شناسایی ترک‌های افقی و عمودی هم‌زمان، نتایج مربوط به حسگرهای شماره سه، ده و یازده به ترتیب در شکل‌های ۲۹، ۳۰ و ۳۱، ارائه شده است.



شکل ۲۹. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی شده زمانی برای حسگر شماره سه نصب شده بر روی صفحه شامل ترک‌های توأمان عمودی و افقی



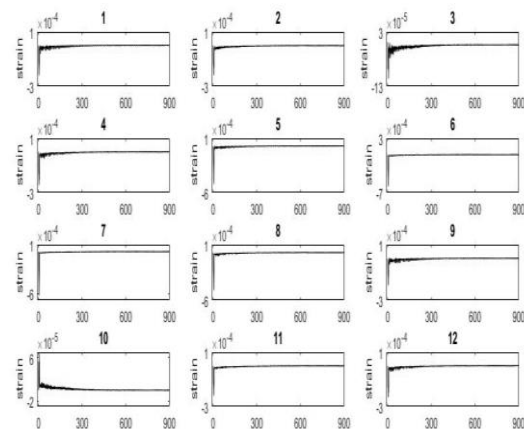
شکل ۳۰. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی شده زمانی برای حسگر شماره ده نصب شده بر روی صفحه شامل ترک‌های توأمان عمودی و افقی



شکل ۲۷. موقعیت حسگرها با توجه به حضور ترک عمودی و افقی درون صفحه‌ای در محیط نرم‌افزار اجزاء محدود

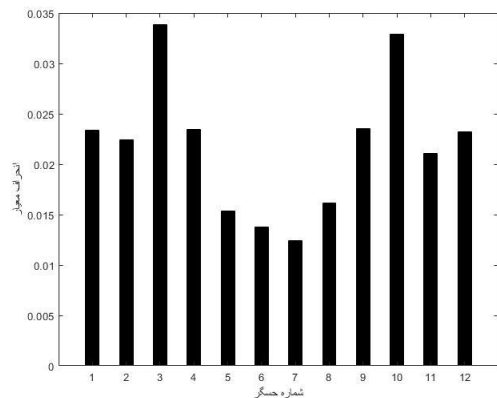
با توجه به شکل ۲۷، موقعیت ترک‌های عمودی و افقی درون صفحه‌ای در نقاط نزدیک به حسگرهای شماره سه و ده، واقع شده است.

مشابه روند ارائه شده برای صفحه شامل ترک عمودی، در حالتی که صفحه شامل ترکیب ترک عمودی و افقی می‌باشد نیز، نتایج مربوط به کرنش حسگرها به صورت ارائه شده در شکل ۲۸، مشخص می‌شود.



شکل ۲۸. داده‌های مربوط به کرنش هر کدام از حسگرهای شماره یک تا دوازده تحت تأثیر ضربه خارج از صفحه در حضور ترکیب ترک افقی و عمودی درون صفحه‌ای به صورت هم‌زمان (محور طولی: تعداد داده، محور عمودی: مقدار کرنش بر حسب میلی‌متر بر میلی‌متر)

در این حالت نیز دامنه سری‌های زمانی بازسازی شده به دست آمده برای تمامی حسگرها (به جز حسگرهای شماره سه و ده که در نزدیکی محل ترک‌های عمودی و افقی قرار دارد)، دامنه یکسانی نسبت به هم دارند. بنابراین به منظور بررسی قابلیت تشخیص الگوریتم تابع طیف تکین در

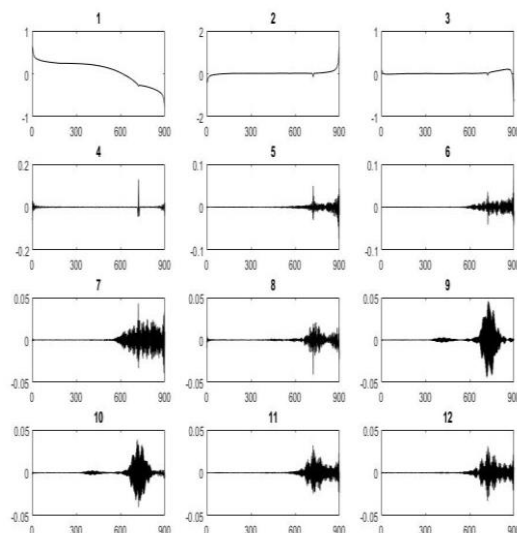


شکل ۳۳. نمودار مقادیر انحراف معیارهای دوم مربوط به سری‌های بازسازی‌شده زمانی برای حسگرهای نصب‌شده بر روی صفحه شامل ترک‌های توأمان عمودی و افقی

با توجه به نمودارهای مربوط به مقادیر واریانس و انحراف معیارهای دوم در شکل‌های ۳۲ و ۳۳، محل ترک توسط حسگرهای شماره سه و ده، به‌درستی مشخص شده است؛ بنابراین الگوریتم تحلیل طیف تکین قابلیت تشخیص موقعیت مکانی عیوب ناشی از ترک‌های ترکیبی (وجود بیش از یک ترک در قطعه) را نیز دارد.

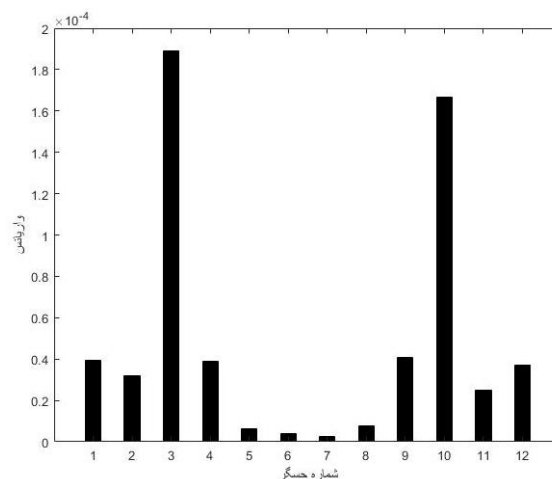
در این مقاله، پژوهش‌های انجام‌شده به‌منظور شناسایی عیوب ناشی از وجود ترک در سازه در دو بخش مطرح شد. در بخش اول صفحه‌های حاوی ترک در نرم‌افزار آباکوس مدل‌سازی می‌شوند. پس از مدل‌سازی، کرنش نقاطی که جهت قرار گرفتن حسگر در نظر گرفته شده‌اند در طول بازه زمانی ثبت می‌شود و رفتار آن‌ها از طریق الگوریتم تحلیل طیف تکین بررسی می‌شود.

در بخش دوم، صفحه موردنظر به‌صورت عملی تحلیل می‌شود. در این قسمت، از صفحه فلزی پس از تحریک، به کمک روش ارتباط تصویر دیجیتال تصویربرداری می‌شود و میزان کرنش در نقاط مختلف صفحه محاسبه و سپس عیوب سیستم شناسایی می‌شوند؛ بنابراین منظور از روش طیف تکین توسعه داده شده در این پژوهش، تلفیق روش تحلیل طیف تکین با روش پردازش تصویر دیجیتال در تشخیص عیوب ناشی از وجود ترک در صفحات تخت فلزی است که به‌صورت خلاصه در فلوچارت زیر ارائه شده است.



شکل ۳۱. نمودار ۱۲ جزء اولیه سری بازسازی‌شده زمانی برای حسگر شماره یازده نصب‌شده بر روی صفحه شامل ترک‌های توأمان عمودی و افقی

برای صفحه شامل ترک‌های توأمان عمودی و افقی نیز مانند دو حالت قبل، تعداد ۲۱۶۰ داده مربوط به مقادیر واریانس و انحراف معیار برای حسگرهای نصب‌شده بر روی ورق لحاظ شده است. همچنین مقادیر واریانس و انحراف معیار دوم نیز برای داده‌های مرتبط با هر حسگر به ترتیب در شکل‌های ۲۹ و ۳۰ ارائه شده است.



شکل ۳۲. نمودار مقادیر واریانس‌های دوم مربوط به سری‌های بازسازی‌شده زمانی برای حسگرهای نصب‌شده بر روی صفحه شامل ترک‌های توأمان عمودی و افقی

- فرکانس داده برداری کرنش در محدوده ۳۰۰ هرتز، دقت و زمان حل مناسبی در تشخیص ترک در صفحه مستطیل شکل مربوط به شناورهای اثر سطحی بر مبنای الگوریتم تحلیل طیف تکین توسعه داده شده دارد.

- با توجه به نتایج مذکور، به منظور آینده پژوهی نیز می توان از بسط رویکرد جدید تشخیص عیب ارائه شده در این مقاله با عنوان تشخیص ترک با استفاده از الگوریتم تحلیل طیف تکین در صفحات کامپوزیتی زیر بدنه شناورهای اثر سطحی نیز، استفاده نمود.

## ۶. فهرست علائم

فهرست علائم به کاررفته در مقاله در این بخش ارائه شده است.

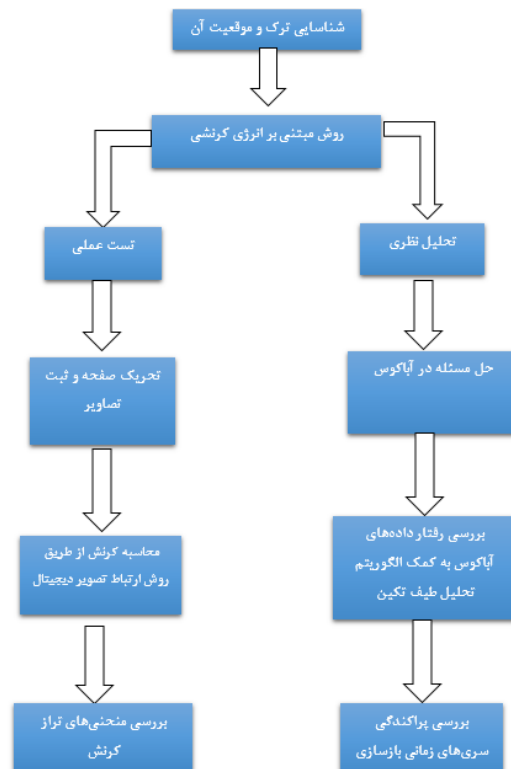
نماد	مشخصه
C	ماتریس کواریانس
M	ماتریس یک پنجم تعداد داده های سری زمانی
N	تعداد داده های سری زمانی
PC	ماتریس اجزای اصلی
Y	ماتریس سری های زمانی
Y'	ترانزاده ماتریس Y
Z	ماتریس اجزای بازسازی شده
$\rho$	ماتریس بردارهای ویژه ماتریس کواریانس

## سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از اعضاء هیات تحریریه و سردبیر نشریه هیدروفیزیک، بابت حسن همکاری در ارزیابی و انتشار مقاله حاضر، اعلام کنند.

## مراجع

- [1] Akbaş ŞD. Post-buckling analysis of a fiber reinforced composite beam with crack. Engineering Fracture Mechanics. 2019 May 1;212:70-80.
- [2] Zhu LF, Ke LL, Zhu XQ, Xiang Y, Wang YS. Crack identification of functionally graded beams using continuous wavelet transform. Composite Structures. 2019 Feb 15;210:473-85.



شکل ۳۴. روش طیف تکین توسعه داده شده مبتنی بر روش پردازش تصویر در تشخیص عیوب ناشی از وجود ترک

## ۵. نتیجه گیری

در این مقاله یک رویکرد جدید عیب یابی (تشخیص ترک) با استفاده از کرنش سازه و الگوریتم طیف تکین توسعه داده شده است که منجر به حصول نتایج اصلی زیر شده است.

- الگوریتم طیف تکین با توجه به ویژگی های انحصاری خود، گزینه ای بسیار مناسب در تشخیص عیوب سازه ای نظیر ترک است.
- همان طور که در نتایج شبیه سازی ها نیز نشان داده شده است؛ رویکرد مذکور، توانایی مناسبی در تشخیص موقعیت مکانیکی عیوب ناشی از وجود ترک در سازه ها را دارد.
- مقادیر واریانس و انحراف معیار دوم داده های مربوط به حسگرهای کرنش سنج عملکرد مناسبی در تشخیص ترک بر مبنای روش الگوریتم طیف تکین توسعه داده شده دارند.

- analysis, convolutional Gated Recurrent Unit network and Support Vector Regression. *Renewable energy*. 2019 Dec 1;143:842-54.
- [15] Golyandina N, Nekrutkin V, Zhigljavsky AA. Analysis of time series structure: SSA and related techniques. CRC press; 2001 Jan 23.
- [16] Reinhardt L, Cordes J, Geissler D. Using co-simulation to extend the usage of XFEM. In Proceedings of the SIMULIA Customer Conference, Barcelona, Spain 2011 May (pp. 17-19).
- [17] Ding J, Yu T, Bui TQ. Modeling strong/weak discontinuities by local mesh refinement variable-node XFEM with object-oriented implementation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020 Apr 1;106:102434.
- [3] Ghahremannejad M, Mahdavi M, Saleh AE, Abhaee S, Abolmaali A. Experimental investigation and identification of single and multiple cracks in synthetic fiber concrete beams. *Case Studies in Construction Materials*. 2018 Dec 1;9:e00182.
- [4] Huang Z, Deng S, Li H, Zuo H. Edge crack growth of mortar plate specimens under uniaxial loading tests. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2019 Apr 1;11(2):300-13.
- [5] Moradi S, Makvandi H, Poorveis D, Shirazi KH. Free vibration analysis of cracked postbuckled plate. *Applied Mathematical Modelling*. 2019 Feb 1;66:611-27.
- [6] Xu W, Ding K, Liu J, Cao M, Radziński M, Ostachowicz W. Non-uniform crack identification in plate-like structures using wavelet 2D modal curvature under noisy conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019 Jul 1;126:469-89.
- [7] Ghannadpour SA, Karimi M, Tornabene F. Application of plate decomposition technique in nonlinear and post-buckling analysis of functionally graded plates containing crack. *Composite Structures*. 2019 Jul 15;220:158-67.
- [8] Wang X, Wu N. Crack identification at welding joint with a new smart coating sensor and entropy. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019 Jun 1;124:65-82.
- [9] Unnikrishnan P, Jothiprakash V. Daily rainfall forecasting for one year in a single run using Singular Spectrum Analysis. *Journal of Hydrology*. 2018 Jun 1;561:609-21.
- [10] Mao X, Shang P. Multivariate singular spectrum analysis for traffic time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. 2019 Jul 15;526:121063.
- [11] Hassani H, Heravi S, Zhigljavsky A. Forecasting European industrial production with singular spectrum analysis. *International journal of forecasting*. 2009 Jan 1;25(1):103-18.
- [12] Kolidakis S, Botzoris G, Profillidis V, Lemonakis P. Road traffic forecasting—A hybrid approach combining artificial neural network with singular spectrum analysis. *Economic analysis and policy*. 2019 Dec 1;64:159-71.
- [13] Hammoudeh A, Al Saaideh M, Al-Naymat G. Hybrid Technique for Arrival Rate Extraction and Size Reduction using Singular Spectrum Analysis and Fourier Series. *Procedia Computer Science*. 2018 Jan 1;141:96-103.
- [14] Liu H, Mi X, Li Y, Duan Z, Xu Y. Smart wind speed deep learning based multi-step forecasting model using singular spectrum