



## Contact Acoustic Nonlinearity Identification via Online Vibro-Acoustic Modulation Technique

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Sepehry N.<sup>\*1</sup> PhD,  
Ehsani M.<sup>2</sup> MSc,  
Shamshirsaz M.<sup>2</sup> PhD,  
Sadighi M.<sup>3</sup> PhD

#### How to cite this article

Sepehry N, Ehsani M, Shamshirsaz M, Sadighi M. Contact Acoustic Nonlinearity Identification via Online Vibro-Acoustic Modulation Technique. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(7):1719-1730.

<sup>1</sup>Mechanical & Mechatronic Engineering Faculty, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

<sup>2</sup>New Technologies Research Center (NTRC), Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

<sup>3</sup>Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran

#### \*Correspondence

Address: Shahrood University of Technology, Haft Tir Square, Shahrood, Iran. Postal Code: 3619995161.

Phone: -

Fax: +98 (23) 32300258

naser.sepehry@gmail.com

#### Article History

Received: October 14, 2019

Accepted: May 03, 2020

ePublished: July 20, 2020

### ABSTRACT

Employing nonlinear dynamic signature of the host structure for early damage detection and remaining useful life estimation purposes, is an emerging idea in the area of piezoelectric patches based structural health monitoring. Clamped support loosening is one of the defects that not only may cause disorder in system's functioning, but also obstruct damage identification process through distorting the signals. In this study, support loosening induced contact acoustic nonlinearity (CAN) behavior was monitored by vibro-acoustic modulation (VAM) technique. Using miniaturized PZT patches with the capability to be installed on the host structure permanently for both pump and probe actuation as well as sensing the modulated signal, enabled online monitoring via VAM technique. An appropriate filter was designed to eliminate the unintentionally excited natural frequencies and to reveal the sidebands. In this study, the sensitivity of modulation strength to the pump excitation frequency was also investigated. According to the results, appearance of sidebands around the central probe frequency is an appropriate indicator for CAN identification. In order to study the mechanism of modulation phenomenon, a coupled field electromechanical finite element (FE) model was developed. Proper matching of the numerical and experimental results indicates sufficient accuracy of the developed FE model and its potential to predict the modulation behavior.

**Keywords** Structural Health Monitoring; Vibro-Acoustic Modulation; Contact Acoustic Nonlinearity; Piezoelectric Patches; Coupled Field Finite Element Analysis; Experimental Results

### CITATION LINKS

[1] Early damage detection ... [2] Use of non-linear ultrasonic ... [3] Structural health monitoring ... [4] Through the looking glass ... [5] Experimental and theoretical analysis ... [6] Identification of temperature variation ... [7] Nonlinear elastic wave ... [8] A study of the vibro-acoustic ... [9] Dynamic nonlinear elasticity ... [10] Thermo-electro mechanical ... [11] Review of second harmonic generation ... [12] Nonlinear acoustics for fatigue crack detection ... [13] Nonlinear mesoscopic elasticity ... [14] Nonlinear mesoscopic elasticity ... [15] Observation of the luxemburg-gorky effect ... [16] Thermoelastic mechanism for logarithmic ... [17] Instability, chaos, and memory ... [18] Detecting damage in composite material ... [19] Nonlinear ultrasonic ... [20] Crack detection ... [21] Modulation of ultrasound by vibrations ... [22] Vibro-acoustic modulation (VAM)-inspired ... [23] Nonlinear interaction of acoustical waves due ... [24] Vibro-acoustic modulation based damage ... [25] Modeling nonclassical nonlinearity ... [26] CAN: An example of nonclassical acoustic ... [27] Nonlinear acoustics for fatigue crack ... [28] Vibro-acoustic modulation nondestructive ... [29] Interaction of sound and vibrations ... [30] Nonlinear elastic wave spectroscopy ... [31] Nonlinear modulation technique for NDE ... [32] Impact damage detection in light composite ... [33] Development and field application ... [34] Impact damage detection in laminated composites ... [35] Nonlinear acoustics with low-profile ... [36] Noncontact detection of fatigue cracks ... [37] Reference-free fatigue crack detection ... [38] Nonlinear acoustic interaction ... [39] Experimental study of impact-damage ... [40] Nonlinear vibroacoustic wave modulations for ... [41] Residual fatigue life estimation using a nonlinear ... [42] Low-cost simulation using model order reduction ... [43] A new model order reduction method based on ... [44] Discrete singular convolution and spectral finite ... [45] Microcrack modeling and simulation for nonlinear ... [46] Finite element modeling of nonlinear acoustics ...

## شناسایی رفتار غیرخطی تماسی مبتنی بر تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک برخط

ناصرالدین سپهری\* PhD

دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

محمد احسانی MSc

پژوهشکده فناوری نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

مهناز شمشیرساز PhD

پژوهشکده فناوری نو، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

مجتبی صدیقی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، تهران، ایران

### چکیده

به کارگیری مشخصه‌های دینامیکی غیرخطی سازه تحت پایش به‌منظور شناسایی زود هنگام آسیب، از جمله ایده‌های جدید در حوزه پایش سلامت مبتنی بر وصله‌های پیزوالکتریک به‌شمار می‌رود. شل شدن تکیه‌گاه گیردار از جمله عیوبی است که نه تنها منجر به ایجاد اختلال در سیستم‌های مهندسی مختلف می‌شود، بلکه اغلب با تأثیرگذاری بر روی سیگنال‌های حسگری، شناسایی آسیب در سازه را با چالش مواجه می‌کند. در این پژوهش رفتار غیرخطی تماسی ناشی از شل شدن تکیه‌گاه گیردار به کمک تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک مورد پایش قرار گرفت. استفاده از وصله‌های پیزوالکتریک با قابلیت اتصال دائم به سازه میزبان به‌منظور تحریک سیگنال‌های پمپ و حامل و همچنین ثبت سیگنال تلفیق شده، امکان پایش برخط مبتنی بر تکنیک تلفیق را فراهم آورد. اعمال یک فیلتر مناسب منجر به حذف فرکانس‌های طبیعی و ظهور باندهای جانبی تلفیق در اطراف فرکانس تحریک مرکزی شد. در این پژوهش همچنین حساسیت تلفیق به فرکانس تحریک سیگنال پمپ مورد بررسی قرار گرفت. طبق نتایج، بروز باندهای تلفیق جانبی در اطراف باند فرکانس مرکزی، شاخص مناسبی برای تشخیص رفتار غیرخطی ناشی از شل شدن تکیه‌گاه محسوب می‌شود. در ادامه از یک مدل المان محدود وابسته الکترومکانیکی به‌منظور بررسی مکانیزم دقیق ایجاد پدیده تلفیق استفاده شد. تطابق مناسب نتایج عددی و آزمایشگاهی، نشان از دقت کافی مدل عددی توسعه داده شده و قابلیت آن در پیش‌بینی پدیده تلفیق دارد.

**کلیدواژه‌ها:** پایش سلامت سازه، تلفیق ارتعاشات و آکوستیک، غیرخطی تماسی آکوستیک، وصله‌های پیزوالکتریک، مدل المان محدود وابسته الکترومکانیکی، نتایج تجربی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۱۴

\*نویسنده مسئول: naser.sepehry@gmail.com

### مقدمه

نقش کلیدی شناسایی زود هنگام آسیب در ارتقای کیفیت سیستم‌های پایش سلامت سازه، منجر به تمرکز بیش‌ازپیش تحقیقات بر روی این حوزه از پایش سلامت سازه شده است [1]. شناسایی زود هنگام آسیب‌های تجمعی زمان بیشتری را برای اقدامات اصلاحی، تعمیر یا تعویض عضو آسیب‌دیده فراهم می‌آورد [2]. در صورتی که اولین نشانه‌های تنزل خواص و آسیب‌دیدگی سیستم، تنها مدت کوتاهی قبل از بحرانی شدن وضعیت سلامت آن شناسایی شود، زمان لازم برای طراحی

استراتژی تعمیر و نگهداری، استقرار تجهیزات آمادگاری (Logistics)، تأمین قطعات و افراد متخصص مورد نیاز کاهش یافته و به این ترتیب امکان پیشگیری از کارافتادگی کامل سیستم از بین خواهد رفت [3] با این دیدگاه، تشخیص زود هنگام آسیب مزایای ویژه‌ای در حوزه کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش سطح ایمنی و در دسترس بودن سیستم ایفا می‌کند [4-6].

نتایج تحقیقات مختلف نشان از برتری روش‌های مبتنی بر طیف‌نگاری الاستیک غیرخطی نسبت به تکنیک‌های پایش سلامت سنتی که اغلب بر پایه توصیف رفتار خطی سازه استوار شده‌اند، در شناسایی زود هنگام آسیب دارند [7]. حساسیت بیشتر اعضای دینامیکی غیرخطی سازه به وجود آسیب و عدم لزوم دسترسی به سیگنال‌های حالت سالم در برخی از تکنیک‌های غیرخطی، محققین را به سمت استفاده از شاخص‌های غیرخطی برای شناسایی آسیب سوق داده است [8]. تشکیل هارمونی‌های بالا و پایین، اعوجاج شکل موج، انتقال فرکانس تشدید به صورت تابعی از دامنه تحریک و تابع انسجام از جمله ویژگی‌های غیرخطی برای شناسایی آسیب به‌شمار می‌روند. این روش‌ها همگی بر پایه این اصل که سطح پاسخ غیرخطی در سازه آسیب‌دیده نسبت به سازه سالم بزرگ‌تر است، بنا شده‌اند.

در یک تقسیم‌بندی کلی، انواع رفتار غیرخطی سازه به دودسته کلاسیک و غیرکلاسیک مجزا می‌شوند [9]. غیرخطی‌های کلاسیک که حجم قابل توجهی از تحقیقات در حوزه تحقیقاتی نظریه الاستیسیته غیرخطی را شامل می‌شوند، از اعوجاج ریزساختاری، تمرکز تنش، وابستگی ترموالاستیک [10] یا کرنش‌های بزرگ نشأت می‌گیرند. رفتار غیرخطی کلاسیک در تابع پاسخ فرکانسی، به صورت تشکیل هارمونی‌های بالاتر (Higher Harmonic Generation; HHG) [11] یا انتقال فرکانسی [12] بروز می‌کند. دسته دوم از رفتارهای غیرخطی موسوم به غیرخطی‌های غیرکلاسیک، عمدتاً از عوامل میرایی هیستریزیس موجود در سازه [13] یا تماس بوسان (Kissing Contact) لبه‌های ترک یا اتصالات شل شده ناشی می‌شوند [14]. در ادبیات فنی، پدیده‌های مختلفی اعم از غیرخطی تماسی آکوستیک (Contact Acoustic Nonlinearity; CAN)، انتقال تلفیق (موسوم به اثر لوکزامبورگ-گورکی) [15]، اثر حافظه [16, 17] و همچنین تلفیق ارتعاشات و آکوستیک به رفتار غیرخطی غیرکلاسیک سازه منتسب می‌شوند. غیرخطی‌های غیرکلاسیک در طیف پاسخ فرکانسی سازه به صورت تشکیل هارمونی‌های بالاتر و پایین‌تر، اختلاط فرکانس، انتقال خطی (درجه یک) فرکانس تشدید [18] و تلفیق فرکانسی [19] ظاهر می‌شوند.

پدیده تلفیق ارتعاشات و آکوستیک برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ مشاهده و گزارش شد [20]. هر چند، عمده تحقیقات علمی بر روی این موضوع در دهه ۹۰ میلادی انجام گرفت [21]. در سال‌های اخیر، استفاده از این تکنیک در حوزه پایش سلامت سازه غیرخطی

تاکنون تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک برای شناسایی آسیب در گستره وسیعی از سازه‌ها شامل ورق‌های تقویت‌شده مورد استفاده در بال هواپیما، اتصالات جوشی در لوله‌ها [28]، تیرهای بتنی [29] و اتصالات پیچی مورد استفاده قرار گرفته است. بهره‌گیری از ادوات مختلف به‌منظور ثبت سیگنال تلفیق‌شده و اعمال تحریک حامل و به‌خصوص تحریک پمپ، منجر به معرفی سامانه‌های آزمایشگاهی مختلف برای پیاده‌سازی این تکنیک شده است. لرزاننده [27]، چکش‌های آنالیز مودال [30]، بلندگو [31]، لیزر، استک [32] و وصله‌های پیزوالکتریک [33] از جمله ادوات مورد استفاده به‌منظور پمپاژ انرژی در سیستم در تحقیقات مختلف به‌شمار می‌روند. استفاده تحلیل مودال تجربی یا عددی برای تعیین فرکانس‌های رزونانس محلی سازه آسیب‌دیده و انتخاب بهینه فرکانس تحریک پمپی و حامل از جمله ترندهای افزایش کیفیت پمپاژ انرژی به سیستم و افزایش دامنه باند‌های تلفیق محسوب می‌شود [34]. از طرفی، تراگذارهای اولتراسونیک، لیزر، کامپوزیت‌های ماکرو الیاف و تراگذارهای پیزوالکتریک [35] اغلب برای تحریک موج حامل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ویفرهای پیزوالکتریک و لرزه‌سنج لیزری داپلر [36] از جمله حسگرهای مورد استفاده برای ثبت سیگنال تلفیق‌شده هستند.

بررسی حساسیت تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک به نوع و اندازه آسیب، دامنه و فرکانس امواج پمپ و حامل سطح نوفه و دمای محیط [37]، موضوع اصلی اغلب تحقیقات تجربی در این حوزه را تشکیل می‌دهد. دونسکوی و همکاران [38]، به‌منظور بررسی رابطه مابین اندازه آسیب و شدت تلفیق، این تکنیک را بر روی نمونه‌های آزمایشگاهی دارای ترک‌های کالیبره‌شده پیاده کردند. آنها همچنین تأثیر فرکانس موج حامل را بر میانگین دامنه باند‌های جانبی مورد مطالعه قرار دادند. پیرونکا و همکاران [32]، از تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک به‌منظور شناسایی آسیب ناشی از ضربه در پنل‌های ساندویچی سبک استفاده کردند. طبق نتایج شدت تلفیق با افزایش سطح انرژی ضربه افزایش می‌یابد. به‌علاوه، افزایش شدت تلفیق ناشی از افزایش دامنه تحریک پمپی، تنها در نمونه‌های آسیب‌دیده مشاهده شد. این امر امکان جداسازی آثار غیرخطی ناشی از آسیب را از سایر عوامل شامل غیرخطی‌های ناشی از رفتار مواد (ذاتی) فراهم می‌کند.

آیمریک و استاسوسکی [39]، ضمن بررسی قابلیت تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک برای شناسایی آسیب ناشی از ضربه سرعت‌پایین در لمینیت‌های کربن/اپوکسی، میزان تأثیرگذاری شرایط تکیه‌گاهی بر نتایج را مورد مطالعه قرار دادند. طبق نتایج، در صورت استفاده از تحریک پمپی با دامنه نسبتاً بزرگ در حضور غیرخطی‌های تماسی ناشی از تکیه‌گاه، الگوی فرکانس‌های تلفیق جانبی حتی در نمونه‌های سالم نیز ایجاد می‌شود. به‌علاوه، نیروی تکیه‌گاهی بر دامنه قله موج حامل و فرکانس‌های تلفیق جانبی مؤثر بوده و شدت این تأثیرگذاری به میزان آسیب لمینیت وابسته

گسترش قابل‌توجهی داشته است. بروز رفتار غیرخطی غیرکلاسیک ناشی از آسیب‌های مختلف اعم از ایجاد و رشد ترک، جدایش بین لایه‌های مواد مرکب و شل‌شدن پیچ [22] یا شرایط تکیه‌گاهی سازه ناشی از بارگذاری‌های استاتیکی یا خستگی، که منجر به بروز پدیده تلفیق ارتعاشات و آکوستیک می‌شود، منجر به استفاده بیش‌ازپیش از این تکنیک در حوزه پایش سلامت سازه شده است. به‌منظور تفسیر پدیده تلفیق ارتعاشات و آکوستیک، سازه سالمی که توسط دو تحریک جداگانه شامل ارتعاشات فرکانس پایین و سیگنال حامل فراصوت قرار دارد را در نظر بگیرید. میدان جابه‌جایی حاصل از این تحریک در سازه سالم که دارای رفتار خطی است، معادل با برهم‌نهی نتایج حاصل از تحریک جداگانه سیستم توسط هر یک از سیگنال‌های فوق خواهد بود. این در حالی است که در سیستم‌های دارای عامل غیرخطی غیرکلاسیک، تعامل سیگنال‌های تحریک و آسیب منجر به مدوله‌شدن دامنه/فاز موج فراصوت توسط ارتعاشات فرکانس پایین می‌شود [24، 2]. به این ترتیب، بروز پدیده تلفیق را می‌توان به‌عنوان معیاری از وجود آسیب در سامانه تحت پایش در نظر گرفت.

با وجود امکان بررسی نتایج تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک در هر دو حوزه زمان و فرکانس، در عمل اغلب از نتایج حوزه فرکانس به‌منظور ارایه شاخص‌های آسیب مؤثر بهره‌برداری می‌شود. به‌طور خاص، پدیده تلفیق به‌صورت باند‌های جانبی در فرکانس‌های  $f_c \pm n f_p$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) در اطراف قله فرکانس حامل بروز می‌کند ( $f_c$  فرکانس حامل و  $f_p$  فرکانس پمپ است). نسبت دامنه باند‌های جانبی به دامنه فرکانس مرکزی از جمله شاخص‌های آسیب مورد استفاده جهت تعیین شدت آسیب در این تکنیک به‌شمار می‌رود.

علی‌رغم پیشنهاد مدل‌های متنوع برای توجیه فیزیکی پدیده تلفیق، علت دقیق اتفاق افتادن چنین رفتاری از سوی سازه تحت پایش، همچنان در هاله‌ای از ابهام قرار دارد. پیچیدگی اصلی در تعیین علت فیزیکی این پدیده از شکل‌گیری پدیده‌های غیرخطی متنوع در مقیاس‌های مختلف (مزو، میکرو و ماکرو) و ترکیب آن با این واقعیت که عوامل غیرخطی مختلف گاه منجر به بروز نتایج غیرخطی یکسان در طیف پاسخ سازه می‌شوند، نشأت می‌گیرد. این امر جداسازی پدیده‌های فیزیکی عامل بروز رفتار غیرخطی را دشوار می‌سازد. غیرخطی آکوستیک تماسی از جمله مهم‌ترین مکانیزم‌های بروز پدیده تلفیق به‌شمار می‌رود [25]. غیرخطی‌های آکوستیک تماسی شامل هر نوع تعامل سطوح جامد با یکدیگر ناشی از ترک، جدایش و شل‌شدن پیچ یا تکیه‌گاه‌گیردار هستند [26]. در تحقیقات اولیه تغییر در سطح تماس ناشی از سیگنال پمپ به‌عنوان علت پدیده تلفیق ذکر شد. این در حالی است که تحقیقات اخیر امکان بروز این رفتار را حتی زمانی که سیگنال پمپ دهانه ترک را به‌اندازه کافی باز نکند، نشان داد. در این مقالات بر پدیده‌های مبتنی بر اتلاف انرژی توسط آسیب به‌عنوان اصلی‌ترین مکانیزم شکل‌گیری پدیده تلفیق تأکید شده

و قابل استفاده در کاربردهای عملی توفیق چندانی نداشته است. به علاوه، تاکنون از مدل‌های وابسته الکترومکانیکی که قابلیت شبیه‌سازی تعامل سازه تحت پایش و مبدل‌های مورد استفاده در تکنیک تلفیق را دارا هستند، برای مدل‌سازی دقیق این پدیده استفاده نشده است. هدف از این پژوهش، بررسی امکان بهره‌گیری از وصله‌های مینیاتوری پیزوالکتریک برای اعمال تحریک‌های پمپی و حامل و همچنین ثبت سیگنال‌های تلفیق شده و پیاده‌سازی تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک به صورت برخط است. به طور خاص، از این تکنیک برای بررسی رفتار غیرخطی ناشی از شل شدن تکیه‌گاه گیردار استفاده شد. در ادامه، حساسیت شاخص تلفیق به فرکانس تحریک پمپی مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی امکان مطالعه مکانیزم‌های فیزیکی مؤثر بر ایجاد پدیده تلفیق به کمک مدل المان محدود وابسته الکترومکانیکی صحت‌سنجی شده از جمله اهداف دیگر پژوهش حاضر به شمار می‌رود.

### سامانه آزمایشگاهی

سامانه آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش شامل یک تیر آلومینیومی مجهز به سه وصله پیزوالکتریک و مقید شده توسط تکیه‌گاه گیردار است که در شکل ۱ نشان داده شده است. وصله‌های پیزوالکتریک به کمک چسب بر روی تیر آلومینیومی نصب شده و از ورق‌های مسی به منظور اعمال ولتاژ صفر به سطح زیرین آنها استفاده شد. برای تحریک وصله‌های عملگری پمپ و حامل از دو مولد تابع GPS-2105 و Agilent-33220A استفاده شد. به منظور تحلیل حساسیت شدت تلفیق به فرکانس پمپ، دو فرکانس ۴۵ و ۵۵ کیلوهرتز برای پمپاژ انرژی به سیستم لحاظ شد. دامنه فرکانس حامل در همه آزمون‌ها ۲۰۰ کیلوهرتز منظور شد. دامنه قله به قله هر دو ولتاژ تحریک ۲۰ ولت منظور شد. برای اندازه‌گیری موج تلفیق شده، وصله پیزوالکتریک با نقش حسگری به یک نوسان‌نما با نرخ نمونه‌برداری ۸۰ میلیون نمونه بر ثانیه متصل شد. پس از اعمال تحریک‌های سینوسی پمپ و حامل و ارایه فرصت کافی به سیستم برای پیاپاشدن تحریک پمپی، ولتاژ خروجی حسگر به مدت ۵/۰ ثانیه ذخیره شد. به منظور افزایش نسبت سیگنال به نوفه، نتایج در ۱۰ پنجره زمانی مختلف اندازه‌گیری و میانگین آنها به عنوان نتایج نهایی در نظر گرفته شد. به علاوه، به منظور حذف فرکانس‌های طبیعی تحریک شده ناشی از تحریک‌های سینوسی غیر ایده‌آل (شروع تحریک از لحظه صفر منجر به تحریک سیستم در فرکانس‌هایی غیر از فرکانس تحریک سینوسی می‌شود)، از یک فیلتر در حوزه فرکانس استفاده شد. از جمله پارامترهای تنظیم فیلتر مورد استفاده، امکان انتخاب بازه فرکانسی مورد نظر است. از این ویژگی برای صرف نظر از فیلتر شدن فرکانس‌های تلفیق جانبی استفاده شد.

تمامی آزمون‌ها، برای دو حالت تیر سالم (متناظر با تکیه‌گاه گیردار کاملاً سفت) و معیوب (شل کردن عمدی تکیه‌گاه) تکرار شدند.

استفاده از لرزه‌سنج لیزری داپلر برای ثبت سیگنال تلفیق شده در نقاط مختلف سازه تحت پایش، امکان تصویرسازی و تشخیص احتمالاتی آسیب را مبتنی بر تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک فراهم می‌کند. *اویور* و همکاران<sup>[24]</sup>، از این شیوه به منظور تعیین شدت تورق در پایه‌های سفت کننده بدنه هواپیما استفاده کردند. *پیزونکا* و همکاران<sup>[40]</sup>، نیز با مقایسه تصویرسازی آسیب مبتنی بر شاخص‌های آسیب خطی، شاخص دامنه هارمونی‌های بالاتر و شاخص تلفیق به دقت و حساسیت بیشتر تکنیک تلفیق در تعیین دقیق مساحت تورق در لمینیت کامپوزیتی تأکید کردند.

پایش نحوه تغییرات شدت تلفیق با افزایش چرخه‌های خستگی از جمله تحقیقات دیگر انجام شده در این حوزه به شمار می‌رود. *لیم* و همکاران<sup>[33]</sup>، پس از به کارگیری تکنیک تلفیق غیرخطی ارتعاشات و آکوستیک برای پایش رشد ترک خستگی در یک ورق آلومینیومی و میله سرمحور هواپیما، از این روش برای پایش پل استفاده کردند. آنها علاوه بر ارایه یک بسته عملگری/حسگری قابل حمل و اتصال به سازه به منظور پیاده‌سازی تکنیک تلفیق، از تحلیل‌های آماری برای حذف اثرات نوفه استفاده کردند. *لیو* و همکاران<sup>[36]</sup>، از روش طیف‌سنجی لیزری تلفیق غیرخطی امواج (LNWMS) برای تشخیص ترک‌های خستگی در ورق و میله سرمحور آلومینیومی استفاده نمودند. در این تحقیق به جای استفاده از دو سیگنال ورودی مجزا، تنها از یک سیگنال پالسی در یک محدوده فرکانسی برای تحریک سازه استفاده شد. به واسطه تحریک در یک محدوده فرکانسی گسترده و ایجاد تعامل بین اجزای مختلف فرکانس تحریک و آثار غیرخطی موجود در ماده، فرکانس‌های تلفیق در اطراف فرکانس‌های تشدید سازه ایجاد می‌شوند. *مالفنس فیرو* و متو<sup>[41]</sup> نیز با ایجاد تناظر بین شاخص آسیب مبتنی بر تلفیق و اندازه ترک و استفاده از قانون پاريس و معادله غیرخطی نازاروف- ساتین به تخمین عمر خستگی باقی‌مانده سازه‌های فلزی پرداختند.

وجود دو تحریک با دوره‌های تناوب کاملاً متفاوت در تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک، شبیه‌سازی عددی آن را با چالش‌های جدی در انتخاب اندازه بهینه مش، نمو زمانی و بازه زمانی مواجه کرده و اغلب این شبیه‌سازی‌ها با هزینه محاسباتی قابل توجهی همراه خواهند بود<sup>[42-44]</sup>. *لی* و همکاران<sup>[45]</sup>، پس از مدل‌سازی دقیق هندسه میکروترک مبتنی بر الگوریتم پردازش تصویر میکروسکوپ نوری، نحوه تعامل تحریک پمپی و حامل با شکل‌گیری پدیده تلفیق را به شیوه عددی مطالعه کردند. شبیه‌سازی پدیده تلفیق در یک لمینیت کامپوزیتی متورق توسط سیگن و همکاران از جمله تلاش‌های معدود دیگر در این حوزه محسوب می‌شود<sup>[46]</sup>.

علی‌رغم مطالعات تجربی قابل توجه انجام گرفته پیرامون پدیده تلفیق ارتعاشات و آکوستیک، پیاده‌سازی آن به صورت کاملاً برخط



۲۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد. با اعمال قید جسم صلب به هر دو تکیه‌گاه، از تغییر شکل آنها در حین تحلیل جلوگیری شد.

جدول ۱) خواص مواد پیزوالکتریک و آلومینیوم

پارامتر	نماد	پیزوالکتریک	آلومینیوم
چگالی (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho$	۷۵۰۰	۲۷۰۰
گذردهی الکتریکی (F/m)	$\epsilon_{22}$	۱۳e-۹	-
	$\epsilon_{11}$	۱۵/۳e-۹	-
ثابت پیزوالکتریک (C/m <sup>2</sup> )	$e_{211}$	۱۷/۴۴	-
	$e_{222}$	۲۳/۳	-
	$e_{212}$	-۷/۵	-
ثابت الاستیک (GPa)	$\nu_{12}$	۰/۳۳	۰/۳۳
	$E_{22}$	۵۰	۷۰
	$E_{11}$	۶۲	۷۰

تحریک سیستم توسط اعمال هم‌زمان دو ولتاژ سینوسی با فرکانس‌های پمپ و حامل به سطوح بالایی وصله‌های پیزوالکتریک عملگر انجام گرفت. در هر دو سیگنال دامنه اعمالی ۱۰ ولت لحاظ شد. برای ایجاد اختلاف پتانسیل مورد نظر، ولتاژ سطوح زیرین تمام وصله‌های پیزوالکتریک صفر منظور شد. به‌منظور بررسی نقش فرکانس سیگنال پمپ در مکانیزم ایجاد پدیده تلفیق، تحلیل برای دو فرکانس پمپ ۴۵ و ۵۵ کیلوهرتز تکرار شد.

به‌منظور مدل‌سازی حالت سالم سیستم، تمامی درجات آزادی نودهایی از تیر و تکیه‌گاه که با هم در تماس بودند به یکدیگر مقید شدند. این در حالی است که برای مدل‌سازی شل‌شدن تکیه‌گاه گیردار، قید وابستگی درجات آزادی نوده‌های فوق برداشته و تعاملی تماسی بین تیر و تکیه‌گاه تعریف شد. حرکت نسبی سطوح فوق در حین ارتعاشات، امکان بروز رفتار غیرخطی و تلفیق امواج پمپ و حامل را فراهم می‌آورد.

به‌منظور تحلیل المان محدود پدیده تلفیق در حوزه زمان از حل‌گر دینامیکی ضمنی استفاده شد. حضور دو سیگنال تحریک با ویژگی‌های ذاتی کاملاً متفاوت در پدیده تلفیق ارتعاشات و آکوستیک، انتخاب اندازه نمو زمانی و بازه زمانی تحلیل را با چالش جدی مواجه می‌کند. ماهیت ایستایی تحریک پمپی، انتخاب بازه زمانی به اندازه کافی بزرگ، به‌منظور ایجاد فرصت کافی برای بازتاب آن از مرزها و مرتعش‌کردن سازه را ایجاد می‌کند. این در حالی است که شبیه‌سازی تحریک حامل به‌عنوان موجی رونده در چنین بازه زمانی وسیعی، از نظر محاسباتی بسیار پرهزینه خواهد بود. از طرفی نمو زمانی موردنیاز برای همگرایی مساله همواره توسط بزرگ‌ترین فرکانس موجود در تحلیل (تحریک حامل) و با قاعده  $\Delta t_{max} \leq (1/20)(1/f_{max})$  مشخص می‌شود. عدم دسترسی به حل‌گرهای صریح در مسایل شامل وصله‌های پیزوالکتریک به‌واسطه رابطه ساختاری غیرخطی آنها، منجر به پیچیده‌تر شدن شبیه‌سازی وابسته الکترومکانیکی می‌شود. در این تحقیق از حل‌گر ضمنی با نمو زمانی  $1 \times 10^{-7}$  برای

به‌منظور ثابت نگه‌داشتن شرایط تکیه‌گاهی ابتدا آزمون‌های مربوط به حالت سالم برای هر دو فرکانس پمپ موردنظر اجرا شد و پس از شل‌کردن تکیه‌گاه آزمون‌های حالت معیوب انجام گرفت. به این ترتیب شرایط تکیه‌گاهی در آزمون‌های حالت معیوب شرایط مشابهی خواهند داشت.



شکل ۱) بستر آزمون‌های آزمایشگاهی

#### مدل‌سازی اجزای محدود

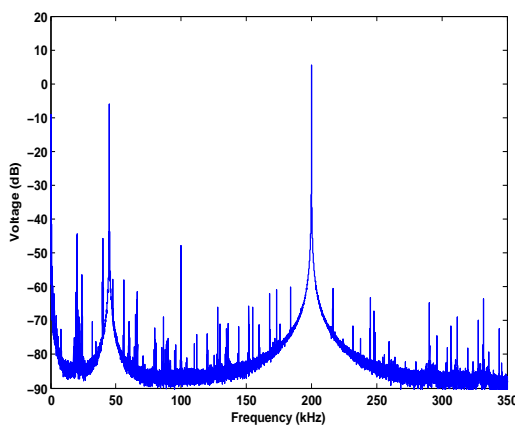
به‌منظور ایجاد بینشی عمیق نسبت به مکانیزم فیزیکی ایجاد پدیده تلفیق ارتعاشات و آکوستیک ناشی از شل‌شدن تکیه‌گاه گیردار، از یک مدل اجزا محدود دوبعدی استفاده شد. شکل ۲ نمای شماتیک مدل پیاده‌سازی‌شده متناظر با سامانه آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. به‌طور خاص، تیر آلومینیومی توسط دو وصله پیزوالکتریک با نقش عملگری برای تحریک‌های پمپی و حامل و همچنین یک وصله پیزوالکتریک در نقش حسگری مجهز شده است.



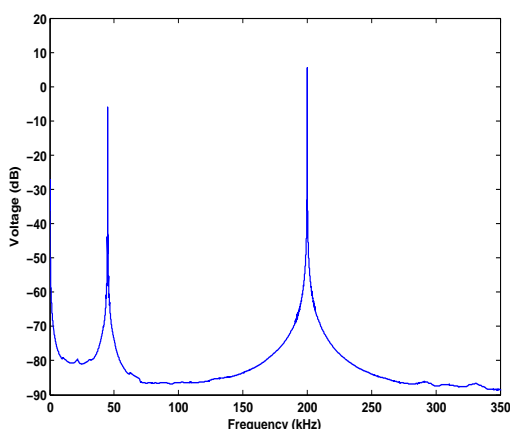
شکل ۲) شماتیک تیر آلومینیومی مجهز شده به سه وصله پیزوالکتریک شامل عملگر پمپی (Pu)، حامل (Pr) و حسگر (S) (تماس بین تیر و تکیه‌گاه گیردار با رنگ قرمز متمایز شده است)

با اعمال فرض کرنش صفحه‌ای، هندسه مدل‌سازی‌شده در تحلیل المان محدود شامل یک تیر آلومینیومی به طول ۲۰۰ و ضخامت ۲ میلی‌متر متناظر با نمونه مورد استفاده در آزمون تجربی است. طول و ضخامت وصله‌های پیزوالکتریک به ترتیب ۵ و ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. فاصله وصله حامل و حسگر از تکیه‌گاه گیردار ۴ میلی‌متر و فاصله وصله پمپ از تکیه‌گاه ۱۵۵ میلی‌متر است. خواص مواد تخصیص داده شده به تیر و وصله‌ها در جدول ۱ آمده است. لازم به ذکر است که با خطی در نظرگرفتن خواص مواد، تماس بین تکیه‌گاه و تیر تنها عامل غیرخطی موجود در سیستم محسوب می‌شود. طول ناحیه تماس بین تیر و تکیه‌گاه

بی‌نهایت است) منجر به برانگیختگی طیف قابل توجهی از فرکانس‌های طبیعی سازه با دامنه‌ای قابل توجه نسبت به دامنه باندهای جانبی ناشی از پدیده تلفیق می‌شود (نمودار ۲- الف). اعمال تحریک سینوسی در بازه زمانی بی‌نهایت منجر به طیف پاسخ ضربه در حوزه فرکانس است. حال آنکه در عمل، زمان بی‌نهایت وجود نداشته و همواره ورودی به صورت یک ورودی سینوسی در زمان بی‌نهایت ضرب در یک پنجره مستطیلی خواهد بود. طیف پاسخ چنین تحریکی در حوزه فرکانس به صورت تابع sinc خواهد بود. اعمال چنین تحریکی که حاوی فرکانس‌هایی غیر از فرکانس اصلی سینوسی است، منجر به تحریک فرکانس‌های طبیعی سازه می‌شود. این امر منجر به پیچیدگی فرآیند شناسایی فرکانس‌های تلفیق‌شده تا جایی که در برخی از موارد تشخیص فرکانس‌های تلفیق بدون ارجاع به طیف حالت سالم غیرممکن خواهد بود (نمودار ۲- الف). برای رفع این چالش از یک فیلتر در حوزه فرکانس مبتنی بر ایده میانگین متحرک برای حذف فرکانس‌های طبیعی استفاده شد.



(الف)



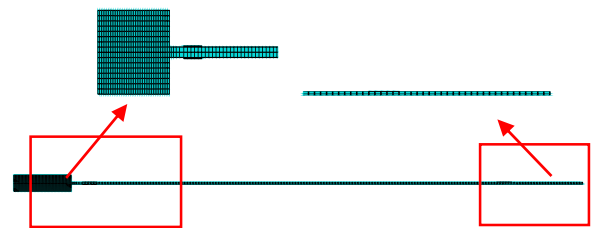
(ب)

**نمودار ۱** طیف پاسخ سازه به اعمال تحریک‌های پمپی (۴۵ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز) در حالت سالم؛ الف) بدون فیلتر، ب) با فیلتر

انتگرال‌گیری در حوزه زمان استفاده شد. برای کاهش هزینه محاسباتی از مدل دوبعدی استفاده شده است همچنین به دلیل بالا بودن فرکانس حامل از مدل مرتبه بالای المان محدود برای کاهش تعداد درجه آزادی استفاده شده است.

گسسته‌سازی مناسب دامنه حل در مسایل انتشار امواج نیز از اهمیت ویژه‌ای در ارتباط با دقت نتایج و سرعت همگرایی برخوردار است. اغلب استفاده از حداقل ۱۰ تا ۲۰ المان در فاصله کوتاه‌ترین طول موجود در مساله مورد بررسی  $L_{max} \leq \lambda_{min}/20$  به عنوان نقطه شروع برای گسسته‌سازی دامنه حل توصیه می‌شود. در ادامه با ریزترکردن ابعاد مش و بررسی همگرایی نتایج، اندازه مناسب المان‌ها محاسبه می‌شود. از تعداد ۳۱۲۵ المان مربعی برای دستیابی به نتایج همگرا شده، استفاده شد. شکل ۳ نحوه گسسته‌سازی تیر، وصله‌های پیزوالکتریک و تکیه‌گاه گیردار را نشان می‌دهد.

نتایج خروجی به صورت تاریخچه زمانی ولتاژ القاشده در سطح بالایی حسگر ثبت و به کمک تبدیل فوریه به حوزه فرکانس منتقل شدند. به این ترتیب امکان مقایسه و صحت‌سنجی نتایج حاصل از تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی میسر خواهد بود.



شکل ۳) نحوه گسسته‌سازی تیر، وصله‌های پیزوالکتریک و تکیه‌گاه گیردار

## نتایج و بحث

### نتایج تجربی

در این بخش به مقایسه طیف پاسخ ناشی از اعمال دو تحریک هم‌زمان (پمپ و حامل) به تیر آلومینیومی در حالتی که تکیه‌گاه گیردار کاملاً سفت (حالت سالم) و حالتی که تکیه‌گاه گیردار به‌طور عمدی شل شده است (حالت معیوب) خواهیم پرداخت و تأثیر فرکانس موج پمپ را بر روی نتایج بررسی خواهیم کرد. طیف پاسخ پیزوالکتریک حسگر برای حالت سالم و معیوب، به‌ازای فرکانس‌های ۴۵ و ۲۰۰ کیلوهرتز به ترتیب برای تحریک‌های پمپ و حامل در نمودارهای ۱- الف و ۲- الف نشان داده شده است. با توجه به این دو نمودار، علاوه بر قله‌های متناظر با فرکانس‌های تحریک، قله‌های دیگری نیز در طیف پاسخ می‌شوند. این قله‌ها متناظر با فرکانس‌های طبیعی سازه در حوزه مورد نظر هستند. در واقع اعمال تحریک سینوسی در زمان محدود (طبق تعریف، حوزه انتگرال‌گیری در تبدیل فوریه از زمان منفی بی‌نهایت تا مثبت

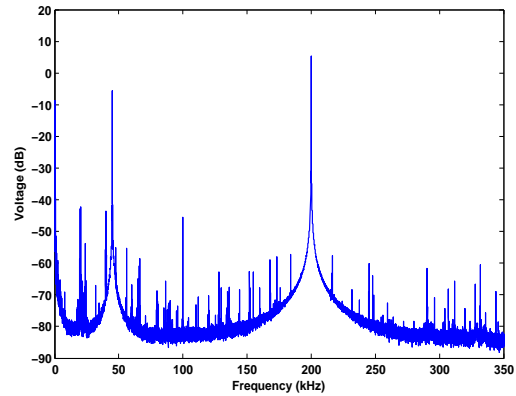
شل کردن تکیه‌گاه منجر به تلفیق موج حامل توسط تحریک پمپی و بروز قله‌هایی با فرکانس‌های  $200 \pm 45$  کیلوهرتز در طیف پاسخ فرکانسی می‌شود. با مقایسه نمودارهای ۱- ب و ۲- ج، در حالت معیوب دامنه قله موج حامل نسبت به حالت سالم کمی کاهش یافته که این امر حاکی از انتقال انرژی از موج حامل برای تشکیل باندهای تلفیق جانبی است. به‌منظور کمی‌سازی میزان تلفیق، شاخص آسیب به‌صورت دامنه باند تلفیق به دامنه فرکانس تحریک مرکزی حامل  $DI_{VAM} = A_{sb}/A_p$  تعریف شد. برای این حالت (پمپاژ انرژی با فرکانس ۴۵ کیلوهرتز) مقدار این شاخص برابر با  $5 \times 10^{-4}$  است.

نتایج تکرار آزمون تجربی با فرکانس ۵۵ کیلوهرتز برای پمپاژ انرژی پس از اعمال فیلتر طراحی‌شده در نمودارهای ۳ و ۴ نشان داده شده است. در نمودار ۴- ب نتایج در اطراف فرکانس تحریک حامل بزرگ‌نمایی شده است. مقایسه حالت‌های سالم در نمودار ۱- ب و نمودار ۳، نشان از تأثیر فرکانس موج پمپ بر دامنه قله فرکانس حامل دارد. علت این موضوع وجود مقدار بسیار ناچیزی از طیف توان فرکانس حامل در فرکانس تحریک پمپی به‌واسطه اعمال تحریک در بازه زمانی محدود بوده که مقدار آن با تغییر فرکانس تحریک پمپی تغییر می‌نماید. این امر همچنین مؤید نتایج ارایه‌شده در مورد برانگیختگی فرکانس‌های طبیعی سازه در فرکانس‌هایی غیر از تحریک پمپی و حامل است.

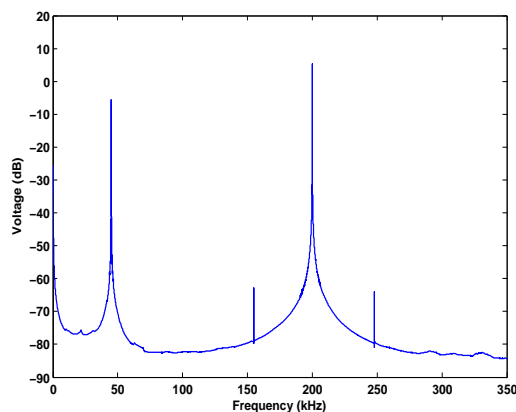
برای بررسی اثر پمپ روی تنها یک حالت سازه معیوب فرکانس ۵۵ کیلوهرتز نیز به‌عنوان فرکانس پمپ مورد بررسی قرار گرفته است. نمودار ۴- ب حاکی از بروز پدیده تلفیق در حالت معیوب و شکل‌گیری باندهای تلفیق جانبی  $200 \pm 55$  در اطراف فرکانس مرکزی حامل است. مقایسه نمودار ۱- ج و نمودار ۴- ب نشان از دامنه بزرگ‌تر باندهای تلفیق در حالت پمپاژ انرژی با فرکانس ۴۵ کیلوهرتز دارد. کاهش فرکانس پمپ منجر به افزایش دامنه جابه‌جایی نسبی در محل تکیه‌گاه گیردار و تقویت رفتار غیرخطی تماسی و غیرخطی‌های ناشی از استهلاک انرژی می‌شود. کاهش شاخص آسیب تعریف‌شده به‌صورت  $DI_{VAM} = A_{sb}/A_p$  از  $5 \times 10^{-4}$  به  $4 \times 10^{-4}$  برای فرکانس پمپ ۵۵ کیلوهرتز نیز این امر را به‌صورت کمی تأیید می‌کند. طبق نتایج، تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک برخط قابلیت شناسایی رفتار غیرخطی تماسی سازه را داشته و حساسیت آن با افزایش فرکانس پمپ به حضور آسیب افزایش می‌یابد.

#### نتایج تحلیل المان محدود

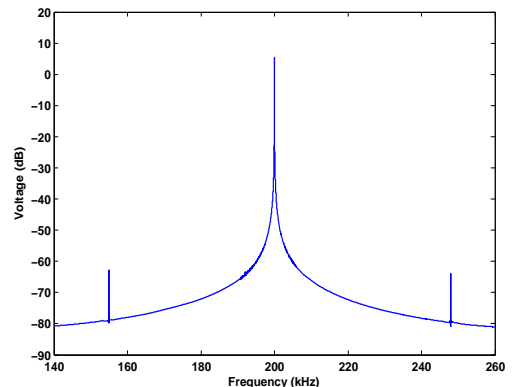
در این بخش پس از ارایه نتایج تحلیل المان محدود به صحت‌گذاری آنها از طریق مقایسه با نتایج تجربی خواهیم پرداخت. نمودار ۵- الف نتایج مربوط به طیف پاسخ تیر یک‌سر گیردار در حالت سالم و معیوب را برای تحریک سیستم با فرکانس پمپ ۴۵ کیلوهرتز و فرکانس حامل ۲۰۰ کیلوهرتز پس از اعمال تبدیل فوریه و اعمال فیلتر مناسب جهت حذف فرکانس‌های طبیعی نشان می‌دهد. مطابق انتظار، در حالت سالم (اعمال قید تکیه‌گاه



(الف)



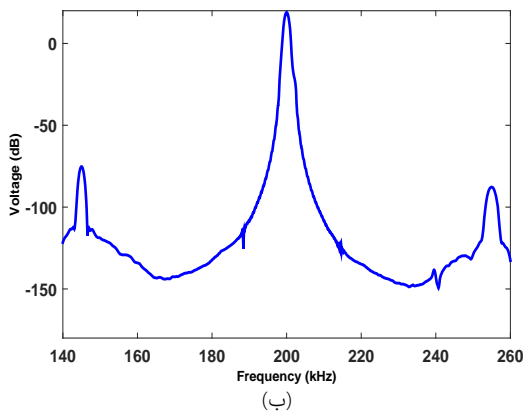
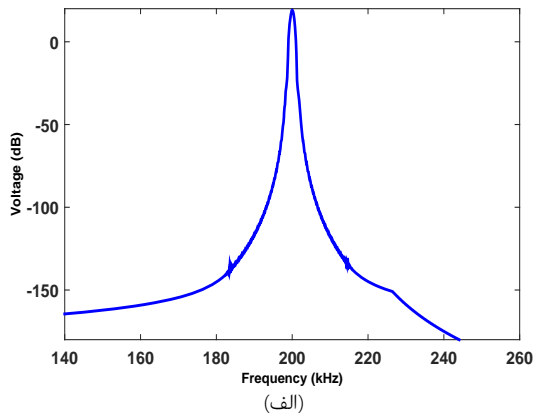
(ب)



(ج)

نمودار ۲) طیف پاسخ سازه به اعمال تحریک‌های پمپی (۴۵ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز) در حالت معیوب؛ الف) قبل از اعمال فیلتر، ب) بعد از اعمال فیلتر، ج) بزرگ‌نمایی در اطراف فرکانس مرکزی حامل

نمودارهای ۱- ب و ۲- ب طیف پاسخ سیستم را پس از اعمال فیلتر طراحی‌شده به نتایج به‌ترتیب برای حالت سالم و معیوب نشان می‌دهند. به‌منظور بررسی دقیق‌تر باندهای تلفیق، طیف پاسخ برای حالت معیوب در اطراف فرکانس حامل بزرگ‌نمایی و در نمودار ۲- ج باز ترسیم شده است. طبق نتایج، در حالت سالم رفتار سازه کاملاً خطی بوده و فرکانس‌های تحریک عیناً در طیف پاسخ مشاهده می‌شوند. این در حالی است که

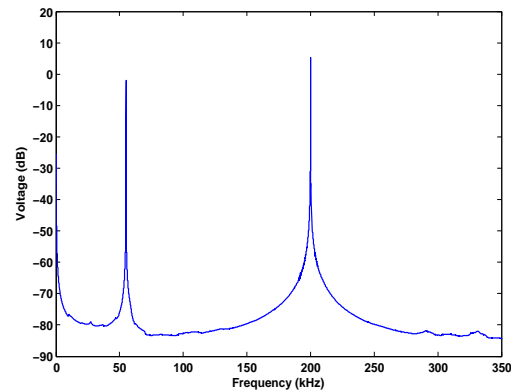


**نمودار ۵)** طیف پاسخ سازه به اعمال تحریک‌های پمپی (۴۵ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز) حاصل از تحلیل المان محدود؛ الف) حالت سالم، ب) حالت معیوب

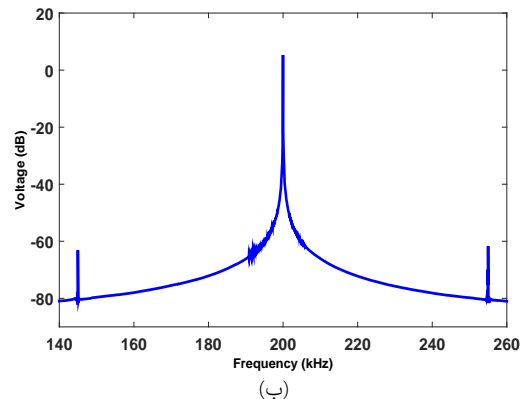
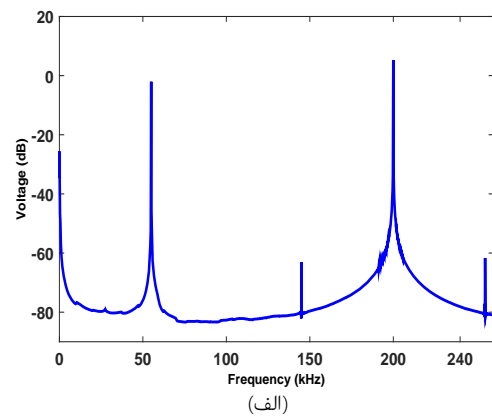
نتایج حاصل از تکرار تحلیل المان محدود برای تحریک سیستم با فرکانس پمپ ۵۵ کیلوهرتز و فرکانس حامل ۲۰۰ کیلوهرتز در نمودار ۶ نشان داده شده است. بروز پدیده تلفیق با ظهور فرکانس‌های  $200 \pm 55$  کیلوهرتز در طیف پاسخ سیستم معیوب در نمودار ۶- ب کاملاً مشخص است. به علاوه، مقایسه نمودار ۶- ب و نمودار ۴ نشان از تطابق بسیار مناسب نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود و نتایج تجربی دارد. استفاده از مدل‌های عددی صحت‌سنجی‌شده در شبیه‌سازی پدیده تلفیق ارتعاشات و آکوستیک، امکان محاسبه شدت تلفیق را در نقاط مختلف سازه تحت پایش و در نتیجه تصویرسازی ناحیه آسیب‌دیده را فراهم می‌کند.

به‌منظور بررسی مکانیزم فیزیکی وقوع پدیده تلفیق به‌کمک مدل المان محدود توسعه‌داده‌شده، کانتورهای جابه‌جایی سیستم در حالت سالم و معیوب در لحظات مختلف مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. شکل ۴ نمای کلی از کانتور جابه‌جایی در طول تیر را نشان می‌دهد. با توجه به اعمال قوانین ساختاری خطی بر رفتار مواد مورد استفاده در تحلیل، تماس در محل تکیه‌گاه تنها تمایز مدل‌های حالت سالم و معیوب و عامل ایجاد رفتار غیرخطی است. به‌منظور بررسی دقیق‌تر مکانیزم تماس، در سایر اشکال جابه‌جایی نسبی در نمای نزدیک تکیه‌گاه گیردار مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴). شکل ۵ کانتور جابه‌جایی در اطراف تکیه‌گاه را به‌ترتیب در

گیردار در تحلیل المان محدود) تنها فرکانس‌های تحریک در طیف پاسخ سازه مشاهده شدند. افزایش زمان شبیه‌سازی منجر به شباهت بیشتر سیگنال‌های تحریک به سیگنال سینوس ایده‌آل و دقت بیشتر نتایج (بروز تنها دو فرکانس تحریک) در طیف پاسخ می‌شود. نمودار ۵- ب نیز نشان از بروز فرکانس‌های تلفیق ناشی از برداشتن قید تکیه‌گاه گیردار و ایجاد تماس در آن ناحیه برای حالت معیوب دارد. مقایسه نتایج عددی به‌دست‌آمده با نتایج تجربی متناظر (نمودار ۳) نشان از صحت نتایج حاصل از تحلیل المان محدود دارد.



**نمودار ۳)** طیف پاسخ سازه به اعمال تحریک‌های پمپی (۵۰ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز) در حالت سالم

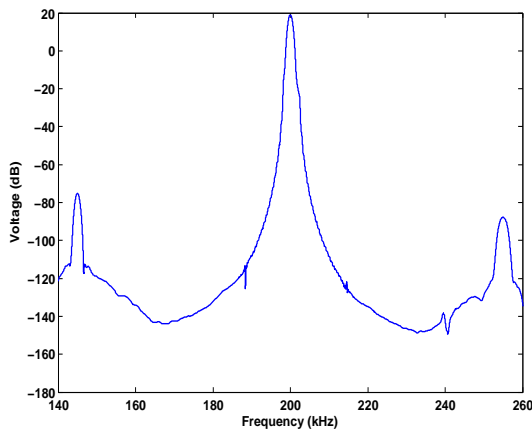


**نمودار ۴)** طیف پاسخ سازه به اعمال تحریک‌های پمپی (۵۰ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز) در حالت معیوب؛ الف) قبل از اعمال فیلتر، ب) بعد از اعمال فیلتر، ج) بزرگ‌نمایی در اطراف فرکانس مرکزی حامل

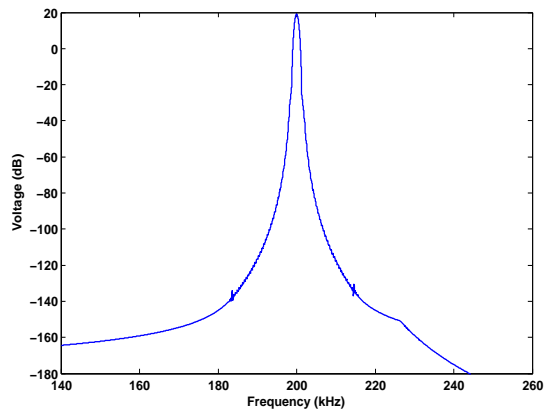


غیرخطی کاملاً متأثر از سیگنال پمپ است. این تغییرات منجر به تغییراتی با دوره تناوب سیگنال پمپ در سیگنال رونده حامل و در نتیجه سیگنال دریافتی در پیزوالکتریک حسگر می‌شود. از آنجایی که دوره تغییرات به وجود آمده در سیگنال زمانی ثبت شده توسط حسگر متناسب با دوره زمانی سیگنال تحریک پمپی است، باندهای جانبی تلفیق در اطراف فرکانس مرکزی حامل در طیف پاسخ حالت معیوب بروز می‌کند.

لحظات ۱/۳ و ۲/۵ میکروثانیه برای حالت سالم نشان می‌دهد. مطابق شکل، در حالت سالم هیچ گونه جابه‌جایی نسبی بین تیر و تکیه‌گاه وجود نداشته و به این ترتیب عامل غیرخطی در سیستم غیرفعال است. کانتور جابه‌جایی نسبی تیر و تکیه‌گاه گیردار در لحظات مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به دامنه جابه‌جایی نسبی در محل تکیه‌گاه، تغییر ناحیه تماس و در نتیجه فعال شدن عامل

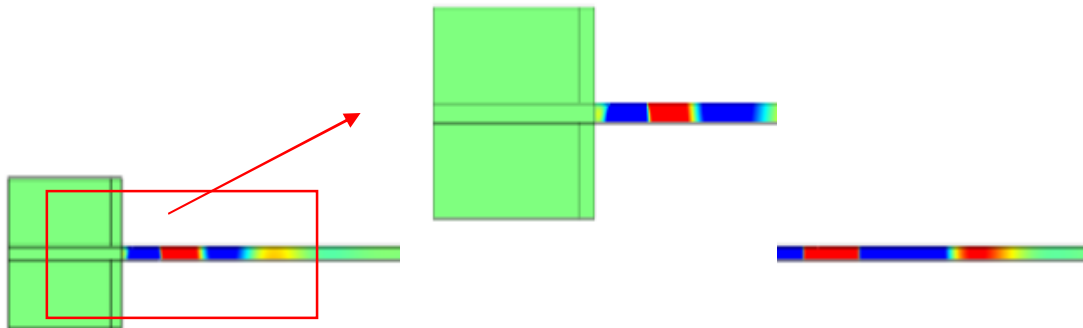


(ب)

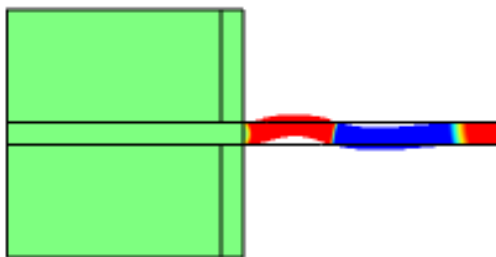


(الف)

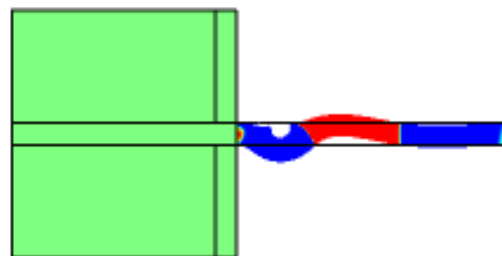
نمودار ۶) طیف پاسخ سازه به اعمال تحریک‌های پمپی (۵۰ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز) حاصل از تحلیل المان محدود؛ (الف) حالت سالم، (ب) حالت معیوب



شکل ۴) کانتور جابه‌جایی سیستم ناشی از اعمال تحریک‌های پمپی (۵۰ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز)؛ نمای نزدیک مورد استفاده در اطراف تکیه‌گاه گیردار به منظور بررسی مکانیزم پدیده تلفیق

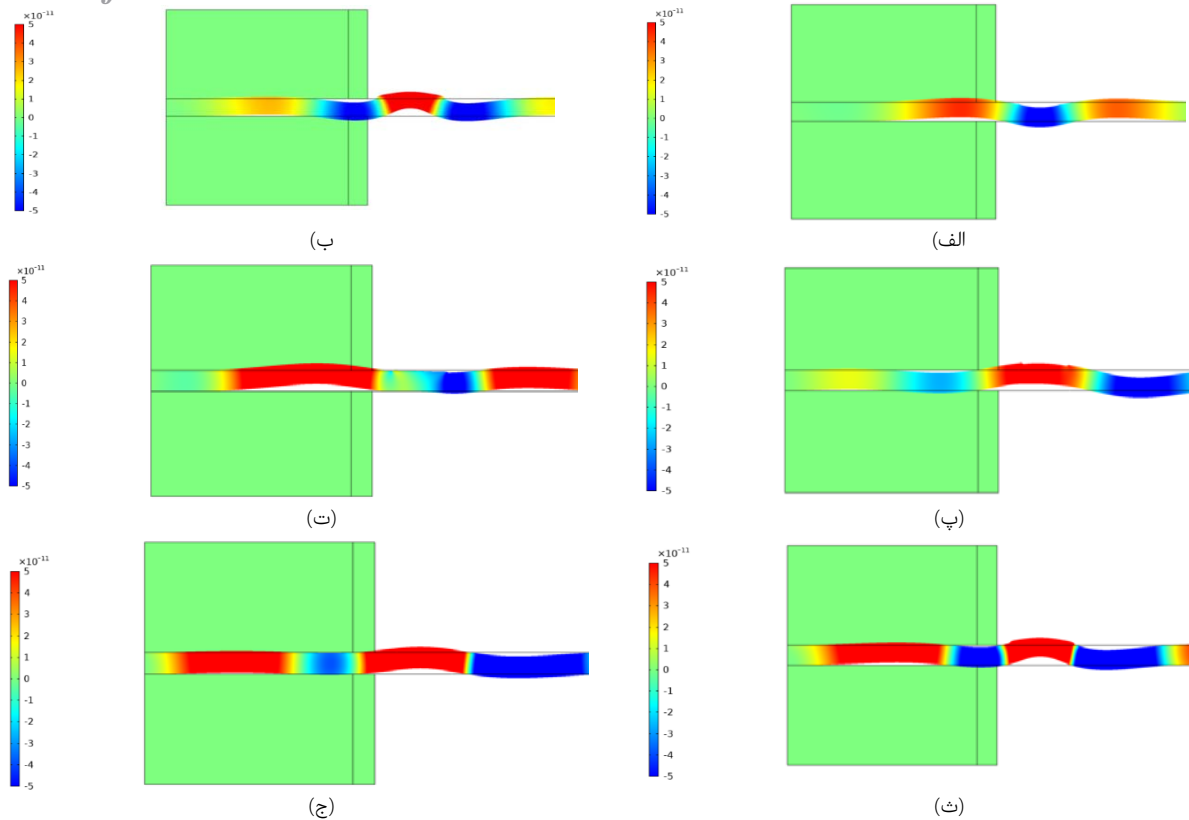


(ب)



(الف)

شکل ۵) کانتور جابه‌جایی سیستم ناشی از اعمال تحریک‌های پمپی (۵۰ کیلوهرتز) و حامل (۲۰۰ کیلوهرتز) در حالت سالم؛ (الف)  $0.10T_p$  (ب)  $0.14T_p$



شکل ۶) نحوه تغییرات ناحیه تماس بین تیر و تکیه‌گاه گیردار در حالت معیوب و در زمانه‌ای: الف)  $0.28T_p$ ، ب)  $0.40T_p$ ، پ)  $0.48T_p$ ، ت)  $0.63T_p$ ، ث)  $0.74T_p$ ، ج)  $0.70T_p$

### نتیجه‌گیری

امکان بهره‌گیری از وصله‌های ویفری پیزوالکتریک به‌منظور تبدیل تکنیک پایش تلفیق ارتعاشات و آکوستیک به روشی برخط، مورد مطالعه قرار گرفت. بروز رفتار غیرخطی ناشی از تماس به‌کمک این تکنیک شناسایی شد. به‌علاوه، حساسیت شاخص آسیب غیرخطی به فرکانس تحریک پمپی بررسی شد. به‌منظور بررسی مکانیزم ایجاد تلفیق از یک مدل المان محدود وابسته الکترومکانیکی استفاده شد. طبق نتایج موارد زیر قابل نتیجه‌گیری خواهند بود:

۱- علی‌رغم ارایه زمان کافی به سیستم پس از تحریک هم‌زمان آن توسط سیگنال‌های پمپ و حامل برای رسیدن به حالت پایا، همواره تعداد قابل توجهی از فرکانس‌های طبیعی سیستم به‌واسطه زمان محدود سیگنال‌های تحریک برانگیخته خواهند شد. شدت این برانگیختگی در نتایج تحلیل المان محدود که افزایش مدت زمان شبیه‌سازی منجر به افزایش هزینه محاسباتی می‌شود، چشمگیرتر است. ارایه یک فیلتر مناسب در حوزه فرکانس مبتنی بر ایده میانگین متحرک امکان حذف فرکانس‌های طبیعی و بروز باندهای تلفیق جانبی را میسر کرد.

۲- تکنیک پایش تلفیق ارتعاشات و آکوستیک برخط امکان شناسایی رفتار غیرخطی ناشی از تماس را فراهم می‌کند. ظهور فرکانس‌های تلفیق جانبی در اطراف فرکانس مرکزی حامل در طیف پاسخ، شاخص مناسبی جهت شناسایی زود هنگام آسیب در

سازه تحت پایش است.

۳- حساسیت شناسایی آسیب در تکنیک تلفیق ارتعاشات و آکوستیک با کاهش فرکانس پمپ افزایش می‌یابد.

۴- مدل المان محدود وابسته الکترومکانیکی با دقت بسیار مناسبی امکان پیش‌بینی پدیده تلفیق را فراهم می‌آورد. ماهیت متفاوت تحریک پمپی و حامل هزینه محاسباتی چنین مدل‌هایی را به‌شدت افزایش می‌دهد.

۵- استفاده از مدل المان محدود صحت‌سنجی شده امکان بررسی مکانیزم پدیده تلفیق ناشی از تماس را فراهم می‌آورد.

**تشکر و قدردانی:** از مسئول آزمایشگاه مکترونیک پژوهشکده فناوری نو دانشگاه صنعتی امیرکبیر و آزمایشگاه مکترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود به‌دلیل همکاری سازنده در انجام آزمایش‌ها کمال تشکر و قدردانی می‌شود.

**تأییدیه اخلاقی:** مقاله حاضر با رعایت تمام اصول اخلاقی ثبت شده است.

**تعارض منافع:** هیچ گونه تعارض منافی وجود ندارد.

**سهم نویسندگان:** ناصرالدين سپهری (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ محمد احسانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۲۵٪)؛ مهناز شمشیرساز (نویسنده سوم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪)؛ مجتبی صدیقی (نویسنده چهارم)، پژوهشگر کمکی (۲۵٪).

**منابع مالی:** با حمایت‌های مالی نویسندگان، مقاله به ثبت رسیده است.

- 18- Meo M, Polimeno U, Zumpano G. Detecting damage in composite material using nonlinear elastic wave spectroscopy methods. *Applied Composite Materials*. 2008;15(3):115-126.
- 19- Jhang K-Y. Nonlinear ultrasonic techniques for nondestructive assessment of micro damage in material: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2009;10(1):123-135.
- 20- Sessler JG, Weiss V. Crack detection apparatus and method [Internet]. Washington: Department of the navy washington dc; 1975 [Cited Unknown Year Unknown Month Unknown Day]. Available from: <https://patents.google.com/patent/US3867836>
- 21- Korotkov AS, Sutin AM. Modulation of ultrasound by vibrations in metal constructions with cracks. *Acoustical Letters*. 1994;18(4):59-62.
- 22- Zhang Z, Xu H, Liao Y, Su Z, Xiao Y. Vibro-acoustic modulation (VAM)-inspired structural integrity monitoring and its applications to bolted composite joints. *Composite Structures*. 2017;176:505-515.
- 23- Zaitsev VY, Sutin AM, Belyaeva IY, Nazarov VE. Nonlinear interaction of acoustical waves due to cracks and its possible usage for cracks detection. *Journal of Vibration and Control*. 1995;1(3):335-344.
- 24- Ooijevaar T, Rogge MD, Warnet L, Akkerman R, Tinga T. Vibro-acoustic modulation based damage identification in a composite skin-stiffener structure. *Structural Health Monitoring*. 2016;15(4):458-472.
- 25- Delsanto PP, Scalerandi M. Modeling nonclassical nonlinearity, conditioning, and slow dynamics effects in mesoscopic elastic materials. *Physical Review B*. 2003;68(6):064107.
- 26- Solodov IY, Krohn N, Busse G. CAN: An example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids. *Ultrasonics*. 2002;40(1-8):621-625.
- 27- Klepka A, Staszewski WJ, Jenal RB, Szwedo M, Iwaniec J, Uhl T. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection—experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations. *Structural Health Monitoring*. 2012;11(2):197-211.
- 28- Donskoy DM, Sutin AM. Vibro-acoustic modulation nondestructive evaluation technique. *Journal of Intelligent Material Systems Structures*. 1998;9(9):765-771.
- 29- Didenkulov IN, Sutin AM, Ekimov AE, Kazakov VV. Interaction of sound and vibrations in concrete with cracks. In *AIP Conference Proceedings*. 2000;524(1):279-282.
- 30- Van Den Abeele KE-A, Carmeliet J, Ten Cate JA, Johnson PA. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, Part II: Single-mode nonlinear resonance acoustic spectroscopy. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2000;12(1):31-42.
- 31- Ballad EM, Vezirov SY, Pfleiderer K, Solodov IY, Busse G. Nonlinear modulation technique for NDE with air-coupled ultrasound. *Ultrasonics*. 2004;42(1-9):1031-1036.
- 32- Pieczonka L, Ukowski P, Klepka A, Staszewski WJ, Uhl T, Aymerich F. Impact damage detection in light composite sandwich panels using piezo-based nonlinear vibro-acoustic modulations. *Smart Materials and Structures*. 2014;23(10):105021.
- 33- Lim HJ, Kim Y, Koo G, Yang S, Sohn S, Bae I-H, et al. Development and field application of a nonlinear ultrasonic modulation technique for fatigue crack detection without reference data from an intact
- 1- Chandaran N, Martinez-Sanchez D, Soutis C, Gresil M. Early damage detection in composites by distributed strain and acoustic event monitoring. *Procedia Engineering*. 2017;188:88-95.
- 2- Lissenden CJ, Liu Y, Rose JL. Use of non-linear ultrasonic guided waves for early damage detection. *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*. 2015;57(4):206-211.
- 3- Achenbach JD. Structural health monitoring—What is the prescription?. *Mechanics. Research Communications*. 2009;36(2):137-142.
- 4- Bond LJ. Through the looking glass: the future for NDE?. In *AIP Conference Proceedings*. 2014;1581(1):21-35.
- 5- Sepehry N, Shamsirsaz M, Bastani A. Experimental and theoretical analysis in impedance-based structural health monitoring with varying temperature. *Structural Health Monitoring*. 2010;10(6):573-585.
- 6- Bastani A, Amindavar H, Shamsirsaz M, Sepehry N. Identification of temperature variation and vibration disturbance in impedance-based structural health monitoring using piezoelectric sensor array method. *Structural Health Monitoring*. 2012;11(3):305-314.
- 7- Van Den Abeele KA, Johnson PA, Sutin A. Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part I: Nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS). *Research Nondestructive Evaluation*. 2000;12(1):17-30.
- 8- Duffour P, Morbidini M, Cawley P. A study of the vibro-acoustic modulation technique for the detection of cracks in metals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2006;119(3):1463.
- 9- Ostrovsky LA, Johnson PA. Dynamic nonlinear elasticity in geo materials. *Rivista del Nuovo Cimento della Societa Italiana di Fisica*. 2001;24(7):1-46.
- 10- Sepehry N, Bakhtiari-Nejad F, Shamsirsaz M. Thermo-electro mechanical impedance based structural health monitoring: Euler-bernoulli beam modeling. *AUT Journal of Modeling and Simulation*. 2017;49(2):143-152.
- 11- Matlack KH, Kim J-Y, Jacobs LJ, Qu J. Review of second harmonic generation measurement techniques for material state determination in metals. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2015;34(1):273.
- 12- Klepka A, Staszewski WJ, Jenal R, Szwedo M, Iwaniec J, Uhl T. Nonlinear acoustics for fatigue crack detection experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations. *Structural Health Monitoring*. 2011;11(2):197-211
- 13- Guyer RA, Johnson PA. Nonlinear mesoscopic elasticity: The complex behaviour of rocks, soil, concrete. *Physics Special Topics*; 2009.
- 14- Guyer RA, Johnson PA. Nonlinear mesoscopic elasticity: Evidence for a new class of materials. *Physics Today*. 1999;52(4):30-36.
- 15- Zaitsev VY, Gusev V, Castagnede B. Observation of the luxemburg-gorky effect for elastic waves. *Ultrasonics*. 2002;40(1-8):627-631.
- 16- Zaitsev V, Gusev V, Castagnede B. Thermoelastic mechanism for logarithmic slow dynamics and memory in elastic wave interactions with individual cracks. *Physics Review Letters*. 2003;90(7):75501.
- 17- Solodov IY, Korshak BA. Instability, chaos, and memory in acoustic-wave-crack interaction. *Physics Review Letters*. 2001;88(1):14303.

2015;55(1):11005.

41- Malfense Fierro GP, Meo M. Residual fatigue life estimation using a nonlinear ultrasound modulation method. *Smart Materials and Structures*. 2015;24(2):025040.

42- Sepehry N, Shamshirsaz M, Bakhtiari Nejad F. Low-cost simulation using model order reduction in structural health monitoring: Application of balanced proper orthogonal decomposition. *Structural Control and Health Monitoring*. 2017;24(11):e1994.

43- Sepehry N, Asadi S, Shamshirsaz M, Bakhtiari Nejad F. A new model order reduction method based on global kernel k -means clustering: Application in health monitoring of plate using Lamb wave propagation and impedance method. *Structural Control and Health Monitoring*. 2018;25(9):e2211.

44- Sepehry N, Bakhtiari-Nejad F, Shamshirsaz M. Discrete singular convolution and spectral finite element method for predicting electromechanical impedance applied on rectangular plates. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2017;28(18):2473-2488.

45- Lee SE, Jin S, Hong J-W. Microcrack modeling and simulation for nonlinear wave modulation. *Sensors Smart Structures Technologies Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*. 2016;9803:98033J.

46- Singh AK, Chen B-Y, Tan VBC, Tay T-E, Lee H-P. Finite element modeling of nonlinear acoustics/ultrasonics for the detection of closed delaminations in composites. *Ultrasonics*. 2017;74:89-98.

condition. *Smart Materials and Structures*. 2016;25(9):1-14.

34- Klepka A, Pieczonka L, Staszewski WJ, Aymerich F. Impact damage detection in laminated composites by non-linear vibro-acoustic wave modulations. *Composites Part B: Engineering*. 2014;65:99-108.

35- Parsons Z, Staszewski WJ. Nonlinear acoustics with low-profile piezoceramic excitation for crack detection in metallic structures. *Smart Materials and Structures*. 2006;15(4):1110.

36- Liu P, Sohn H, Kundu T, Yang S. Noncontact detection of fatigue cracks by laser nonlinear wave modulation spectroscopy (LNWMS). *NDT & E International*. 2014;66:106-116.

37- Lim HJ, Sohn H, Desimio MP, Brown K. Reference-free fatigue crack detection using nonlinear ultrasonic modulation under various temperature and loading conditions. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2014;45(2):468-478.

38- Donskoy D, Sutin A, Ekimov A. Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing. *NDT & E International*. 2001;34(4):231-238.

39- Aymerich F, Staszewski WJ. Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique. *Structural Health Monitoring*. 2010;9(6):541-553.

40- Pieczonka L, Klepka A, Martowicz A, Staszewski WJ. Nonlinear vibroacoustic wave modulations for structural damage detection: an overview. *Optical Engineering*.