

شناسایی تجربی فرکانس‌های طبیعی پره توربین گاز با سنجش

غیرتماسی مبتنی بر میکروفون

عباس رهی*	سید احمد مرتضوی	علی رهی
دانشیار	دانشجوی دکتری	دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشگاه شهید بهشتی	دانشگاه شهید بهشتی	دانشگاه شهید بهشتی
a_rahi@sbu.ac.ir	s_mortazavi@sbu.ac.ir	al.rahi@mail.sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۱

چکیده

شناسایی فرکانس‌های طبیعی سازه‌ها یکی از ابزارهای کلیدی برای تحلیل رفتار دینامیکی پره‌های توربین گاز و بخار است و اهمیت ویژه‌ای در صنایع نیروگاهی و هوافضا دارد. در پره‌های سبک و حساس، استفاده از حسگرهای تماسی مانند شتاب‌سنج موجب تغییر جرم و میرایی سیستم شده و خطا در تخمین فرکانس‌های طبیعی را افزایش می‌دهد. در این پژوهش، فرکانس‌های طبیعی یک پره توربین با روش سنجش غیرتماسی مبتنی بر میکروفون اندازه‌گیری می‌شود. پره با شرایط مرزی آزاد آویخته و تحت تحریک ضربه چکش قرار می‌گیرد و پاسخ ارتعاشی ناشی از پره به صورت سیگنال صوتی توسط میکروفون ثبت می‌شود. سیگنال‌ها با استفاده از کارت داده‌برداری و الگوریتم FFT^۱ پردازش شده و فرکانس‌های طبیعی استخراج می‌شود. نتایج تجربی با شبیه‌سازی اجزای محدود در نرم‌افزار انسیس^۲ مقایسه گردید. داده‌ها نشان می‌دهند که روش پیشنهادی با خطای نسبی کمتر از ۲ درصد قادر به شناسایی فرکانس‌های طبیعی پره‌ها است و تغییر فاز متناظر در نمودار تابع پاسخ فرکانسی صحت روش غیرتماسی را تأیید می‌کند.

واژگان کلیدی: فرکانس‌های طبیعی، پره توربین، سنجش غیرتماسی، میکروفون، تحلیل مودال

۱. مقدمه

توجه قرار گرفته‌اند. ایوینز [۱] مبانی تئوری و عملی تحلیل مودال را پایه‌گذاری کرد. پژوهش او بسیاری از توسعه‌های بعدی در روش‌های غیرتماسی بنا نهاد. بلوینز [۲] فرمول‌های استاندارد محاسبه فرکانس طبیعی و شکل مود برای سازه‌های پایه مانند تیرها و صفحات را گردآوری کرد. این فرمول‌ها برای مقایسه و

تحلیل مودال تجربی به عنوان روشی کلیدی برای شناسایی ویژگی‌های دینامیکی سازه‌ها شناخته می‌شود. در سال‌های اخیر، به دلایلی همچون حساسیت سازه‌ها، کاهش اثر حسگر بر پاسخ دینامیکی و نیاز به اندازه‌گیری سریع، روش‌های غیرتماسی مورد

* نویسنده مسئول

اعتبارسنجی نتایج تجربی غیرتماسی بسیار حیاتی هستند. پیترز و همکاران [۳] کاربردهای روش تخمین پارامتر مودال را در صنایع خودروسازی و هوافضا نشان دادند. این الگوریتم در تحلیل سیستم‌های با موده‌های دارای میرایی بالا و هم‌پوشانی مودال موفق عمل می‌کند. فرشیدی و همکاران [۴] یک سیستم تحلیل مودال غیرتماسی کامل ارائه کردند که در آن از یک پالس هوای متمرکز برای تحریک تیر کنسولی و از یک آرایه میکروفون میکروالکترومکانیکی برای اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی استفاده شد. آن‌ها به کالیبراسیون محرک هوا و آرایه میکروفون پرداختند و نشان دادند که این روشی مقرون‌به‌صرفه و مناسب برای سازه‌های حساس است. بولکه و همکاران [۵] قابلیت یک آرایه میکروفون تجاری ۱۲۰ کاناله را برای تحلیل مودال سطوح بزرگ مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از روش سوناه^۳ میدان صوتی نزدیک را به ارتعاش سطح برگرداندند و نتایج را با لیزر ویبرومتر و مدل اجزای محدود مقایسه کردند. دقت بالای این روش در شناسایی شکل مودها به اثبات رسید. ونلانددیت و همکاران [۶] به طور خاص به بررسی استفاده از هوای فشرده به عنوان یک منبع تحریک غیرتماسی در آزمون‌های مودال پرداختند. آن‌ها پارامترهای مؤثر بر عملکرد این محرک را تحلیل کرده و کارایی آن را در تحریک سازه‌های مختلف نشان دادند. اوزدوگانلار و همکاران [۷] چالش‌ها و روش‌های تحلیل مودال تجربی را برای سیستم‌های میکروالکترومکانیکی بررسی کردند. با توجه به اندازه بسیار کوچک و حساسیت این سازه‌ها، روش‌های غیرتماسی در این حوزه از ضرورت بالایی برخوردارند. کاستلینی و همکاران [۸] از پالس‌های لیزری برای تحریک غیرتماسی سازه و

استخراج پارامترهای مودال استفاده کردند. این روش که به تحریک لیزری معروف است، قابلیت ایجاد پالس‌های نیروی کوتاه و پرنرژی را دارد. پارک و همکاران [۹] روش اتصال‌پذیری را برای تحلیل دینامیکی ابزارهای برشی به کار بردند. اگرچه تمرکز این مقاله بر روش‌های تماسی بود، اما اصول ارائه‌شده در توسعه روش‌های غیرتماسی نیز تأثیرگذار بوده است. پاستور و همکاران [۱۰] به تبیین مبانی معیار اطمینان مودال پرداختند. این معیار به عنوان یک ابزار آماری ضروری برای مقایسه کمی شکل موده‌های استخراج‌شده از روش‌های مختلف (مانند غیرتماسی و تحلیلی) به طور گسترده استفاده می‌شود. اشتاینر و هالد [۱۱] محدودیت‌های روش‌های مرسوم هلوگرافی آکوستیکی^۴ میدان نزدیک را مورد بحث قرار داده و مزایای روش سوناه را در کاهش خطاهای ناشی از تبدیل فوریه فضایی و کار با آرایه‌های نامنظم برشمردند. فارس و همکاران [۱۲] به تحلیل دقیق تأثیر جت هوا بر روی یک سطح تخت پرداختند. پژوهش آن‌ها درک بهتری از توزیع نیرو و تنش برشی ناشی از برخورد جت هوا ارائه داد که برای کالیبراسیون محرک‌های هوایی بسیار مفید است. لی و لی [۱۳] یک روش غیرتماسی برای تخمین اندازه ترک در یک تیر دوار ارائه کردند. اساس کار آن‌ها تحلیل سیگنال‌های ویبرو-آکوستیک بود که نشان می‌دهد چگونه می‌توان از داده‌های صوتی برای تشخیص عیب استفاده کرد. بنکو و همکاران [۱۴] از تحلیل صدا به عنوان یک روش غیرتماسی برای تشخیص عیب در موتورهای جاروبرقی استفاده کردند. این کار، پتانسیل روش‌های مبتنی بر آکوستیک را در صنعت نشان می‌دهد. هالائتر و اسمیت [۱۵] به طراحی و کالیبراسیون جت‌های هوایی برای کنترل فعال

ارتعاش پرداختند. این تحقیق یکی از نخستین کارها در زمینه استفاده عملی از هوای فشرده برای اعمال نیرو بر سازه بود. رامچاندان و نارایانان [۱۶] پارامترهای آکوستیکی مانند چگالی مودال و بازدهی تابش را برای یک پوسته استوانه‌ای تقویت‌شده ارزیابی کردند. چنین مطالعاتی برای پیش‌بینی پاسخ آکوستیک-ارتعاشی سازه‌های پیچیده ضروری است. گادا و همکاران [۱۷] به مشخصه‌یابی ویبرو-آکوستیک چرخ‌های قطار پرداختند. این مطالعه نمونه‌ای از کاربرد روش‌های ترکیبی ارتعاش و صدا در صنعت ریلی است. کاستلینی و همکاران [۱۸] کاربرد اندازه‌گیری‌های ارتعاشی را در تشخیص نواقص دندان‌های انسان بررسی کردند. این پژوهش، گستره کاربرد روش‌های غیرتماسی را تا حیطه پزشکی و بیومکانیک نشان می‌دهد. فیلیپس و المنگ [۱۹] یک پیاده‌سازی کارآمد از الگوریتم فرکانس مختلط کم‌ترین مربعات چند-ارجاعی ارائه دادند. این الگوریتم قدرتمند برای تخمین پارامترهای مودال از داده‌های تابع پاسخ فرکانسی، هم در روش‌های تماسی و هم غیرتماسی کاربرد دارد. پوهل [۲۰] در پژوهش خود به مقایسه کیفی شکل مودهای تعیین‌شده توسط روش‌های سوناه و هلز^۵ با اندازه‌گیری‌های لیزر ویبرومتر پرداخت و دقت این روش‌های آکوستیکی را تأیید کرد.

همچنین سلامی پور و کاظمی [۲۰]، روشی جایگزین را در حوزه تحلیل مودال عملیاتی، با بهره‌گیری از روش‌های تصویربرداری و توابع انتقال‌پذیری ارائه کردند.

در مقاله حاضر، تحلیل مودال تجربی مبتنی بر روش اندازه‌گیری غیرتماسی با استفاده از یک میکروفون تجاری انجام می‌شود و نتایج حاصل با نتایج شبیه‌سازی

انسیس مقایسه می‌گردد. برای این منظور ابتدا یک پره توربین توسط یک ضربه چکش تحریک شده و امواج ساطع شده از آن با میکروفون اندازه‌گیری می‌شود سپس با تحلیل امواج دریافت شده فرکانس‌های طبیعی پره توربین استخراج می‌شود و در مقادیر بدست آمده با نتایج حاصله از شبیه‌سازی نرم‌افزار انسیس مقایسه می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که مقدار خطای حاصل در فرکانس اول کمتر از ۲ درصد می‌باشد. این نوع اندازه‌گیری برای زمانی که طول پره بسیار کوچک باشد از اهمیت بالایی برخوردار است. از جمله نوآوری این مقاله می‌توان به حذف جرم حسگر برای شناسایی فرکانس‌های طبیعی پره توربین گاز با استفاده از اندازه‌گیری سیگنال صوتی توسط میکروفون اشاره کرد.

۲. معادلات حاکم

در این بخش، روابط ریاضی حاکم بر تولید و انتشار امواج صوتی ناشی از ارتعاش پره توربین ارائه می‌شود. این معادلات پایه نظری روش اندازه‌گیری غیرتماسی با استفاده از میکروفون برای تعیین فرکانس طبیعی است. انتشار صوت ناشی از ارتعاش پره در محیط هوا توسط معادله موج خطی توصیف می‌شود [۲۲]:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

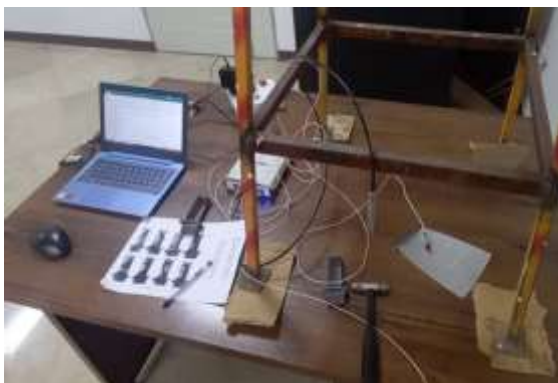
که در آن $p(\mathbf{r}, t)$ فشار صوتی در فاصله \mathbf{r} و زمان t ، c سرعت انتشار صوت در هوا و ∇^2 عملگر لاپلاسین انتشار فضایی فشار است.

این معادله بیان می‌کند که هر گونه ارتعاش سطح پره، میدان فشاری تولید می‌کند که با سرعت c در محیط انتشار می‌یابد. برای پره‌هایی با سطح کوچک و ارتعاشات محدود، می‌توان سطح پره را به عنوان یک

شکل ۱، چیدمان آزمایشگاهی برای انجام تحلیل مودال تجربی غیرتماسی مبتنی بر اندازه‌گیری پاسخ آکوستیکی توسط یک میکروفون را نشان می‌دهد. هدف از این چیدمان، شناسایی ویژگی‌های مودال سازه بدون استفاده از حسگرهای تماسی و بدون ایجاد اثر جرمی یا سفتی اضافی بر سیستم مورد آزمایش است. شماتیک چیدمان آزمایشگاهی مورد استفاده در شکل ۲ ارائه شده است.

به منظور حذف اثرات تکیه‌گاهی و شبیه‌سازی شرایط مرزی “آزاد-آزاد”، پره توربین توسط نخ‌های نایلونی نازک از یک پایه صلب آویزان شده است. تجهیزات مورد استفاده عبارتند از:

- چکش مودال: جهت اعمال نیروی تحریک ضربه‌ای کوتاه مدت.
- میکروفون اندازه‌گیری: جهت ثبت پاسخ امواج صوتی ناشی از ارتعاش سطح پره، که در فاصله بهینه (حدود ۵ سانتی‌متری) از سطح پره قرار گرفته است.
- سیستم داده‌برداری: کارت National Instruments جهت تبدیل سیگنال‌های آنالوگ به دیجیتال با نرخ نمونه‌برداری بالا.
- رایانه و نرم‌افزار: جهت پردازش سیگنال و استخراج توابع پاسخ فرکانسی.



شکل ۱. چیدمان آزمایش برای انجام تحلیل مودال تجربی

منبع توزیع فشار مدل کرد. فشار صوتی در نقطه \mathbf{r} ناشی از سرعت سطح پره برابر است با [۲۲]:

$$p(\mathbf{r}, t) = \frac{\rho c}{4\pi} \int_S \frac{v(\mathbf{r}_s, t_r) \cdot \hat{\mathbf{n}}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|} dS \quad (2)$$

که در آن \mathbf{r}_s نقطه روی سطح پره، S سطح ارتعاشی پره، $\hat{\mathbf{n}}$ بردار عمود بر سطح، ρ چگالی هوا، و $t_r = t - \frac{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_s|}{c}$ زمان تأخیر انتشار موج، و $v(\mathbf{r}_s, t)$ سرعت ارتعاشی سطح پره می‌باشد.

این مدل نشان می‌دهد که فشار ثبت‌شده تابع مستقیمی از سرعت و نوسان سطح پره است.

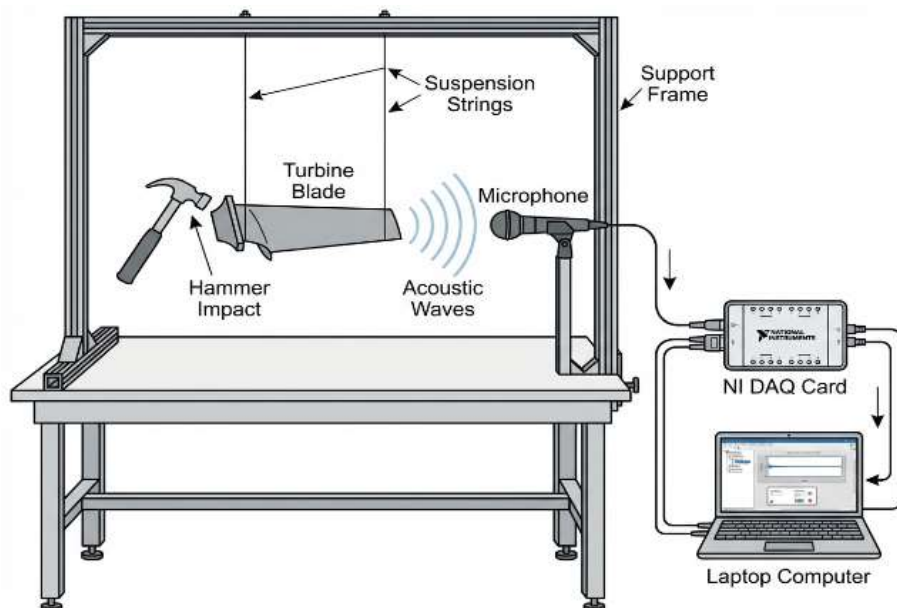
در محدوده نزدیک پره که فاصله میکروفون از پره، کوچک‌تر از طول موج صوت باشد ($r \lesssim \lambda$)، میدان صوتی به صورت مجموع فرکانس‌های طبیعی قابل مدل‌سازی است:

$$p(\mathbf{r}, t) = \sum_n \rho c v_n(\mathbf{r}) \cdot \hat{\mathbf{n}} e^{i\omega_n t} \quad (3)$$

که در آن $v_n(\mathbf{r})$ بردار سرعت سطح پره برای مود n ، $\omega_n = 2\pi f_n$ فرکانس زاویه‌ای طبیعی مود n ، و f_n فرکانس طبیعی مود n می‌باشد.

این رابطه نشان می‌دهد که هر فرکانس طبیعی، فرکانس مشخصی در فشار صوتی ایجاد می‌کند. پس فرکانس طبیعی پره باعث ایجاد قله در دامنه فشار صوتی می‌شود و میرایی پره باعث کاهش دامنه قله‌ها و پهن‌تر شدن آن‌ها در نمودار پاسخ می‌شود. بنابراین، تحلیل در نزدیک میدان صوتی می‌تواند فرکانس‌های طبیعی پره را شناسایی کند.

۳. چیدمان آزمایش برای اندازه‌گیری فرکانس طبیعی



شکل ۲. شماتیک چیدمان تجهیزات آزمایشگاهی پره توربین

Instruments دریافت و سپس به رایانه برای تحلیل به وسیله نرم‌افزار منتقل می‌شود.



شکل ۳. پره توربین مورد آزمایش هنگام تحریک با ضربه چکش و اندازه‌گیری امواج آکوستیکی آن توسط میکروفون

پردازش سیگنال‌ها در حوزه فرکانس انجام شده و طیف فرکانسی پاسخ پره توربین استخراج شده است. در این مرحله، قله‌های متناظر با فرکانس‌های طبیعی سازه به وضوح در شکل ۵ قابل مشاهده است.

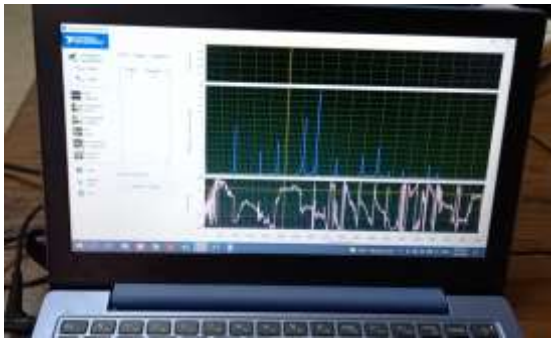
شکل ۳، پره توربین مورد آزمایش را هنگام تحریک با ضربه چکش و اندازه‌گیری امواج آکوستیکی آن توسط میکروفون نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پره توربین در حالت آزاد به‌صورت معلق و با استفاده از نخ‌های نازک از یک پایه آویزان است. این روش نگهداری باعث کاهش تأثیر قیود مرزی و انتقال حداقلی ارتعاشات به تکیه‌گاه‌ها می‌شود و امکان مشاهده رفتار ذاتی دینامیکی سازه را فراهم می‌سازد. تحریک سازه به‌صورت غیرتماسی و از طریق تحریک کنترل‌شده ضربه چکش انجام شده است. پاسخ ارتعاشی پره توربین به‌صورت غیرمستقیم و از طریق امواج صوتی منتشرشده ناشی از ارتعاش سطح پره با استفاده از یک میکروفون اندازه‌گیری می‌شود. مطابق شکل ۴ و ۵، سیگنال خروجی میکروفون توسط یک کارت داده برداری ساخت شرکت National

۴. نتایج و بحث

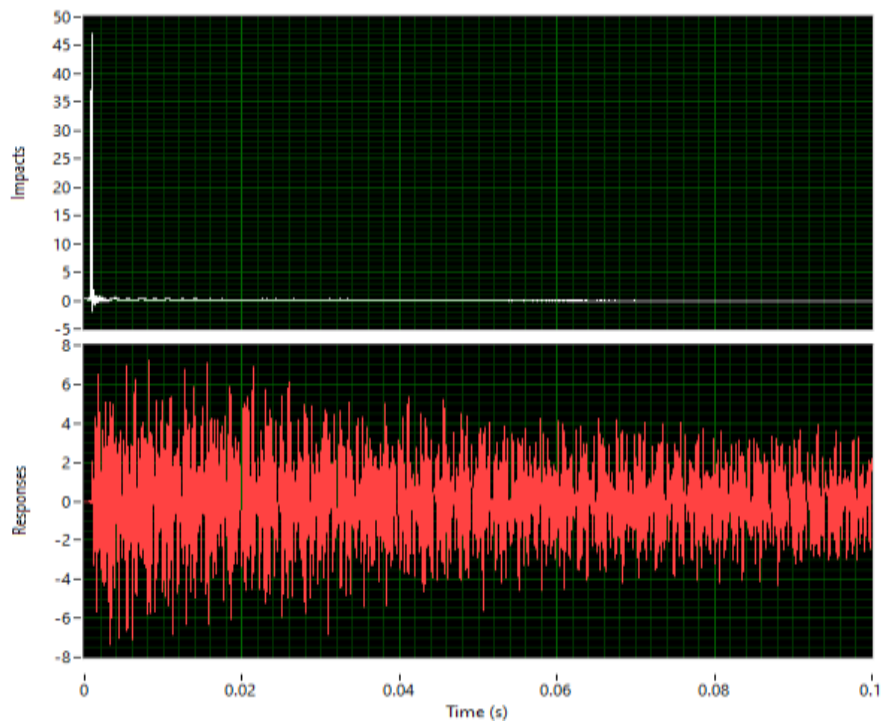
در گام نخست، کیفیت سیگنال‌های ورودی بررسی شد. شکل ۴، نمودار پالس نیروی ضربه و سیگنال‌های حوزه زمان و پاسخ صوتی میرا شونده پره را نشان می‌دهد که پالس نیروی ضربه ماهیت گذرا و تیز دارد و تحریک تمامی مودها در بازه فرکانسی مورد نظر را تضمین می‌کند. میرایی نمایی سیگنال میکروفون بیانگر رفتار طبیعی پره توربین است.



شکل ۴. سیگنال خروجی میکروفون توسط یک کارت داده برداری ساخت شرکت **National Instruments**



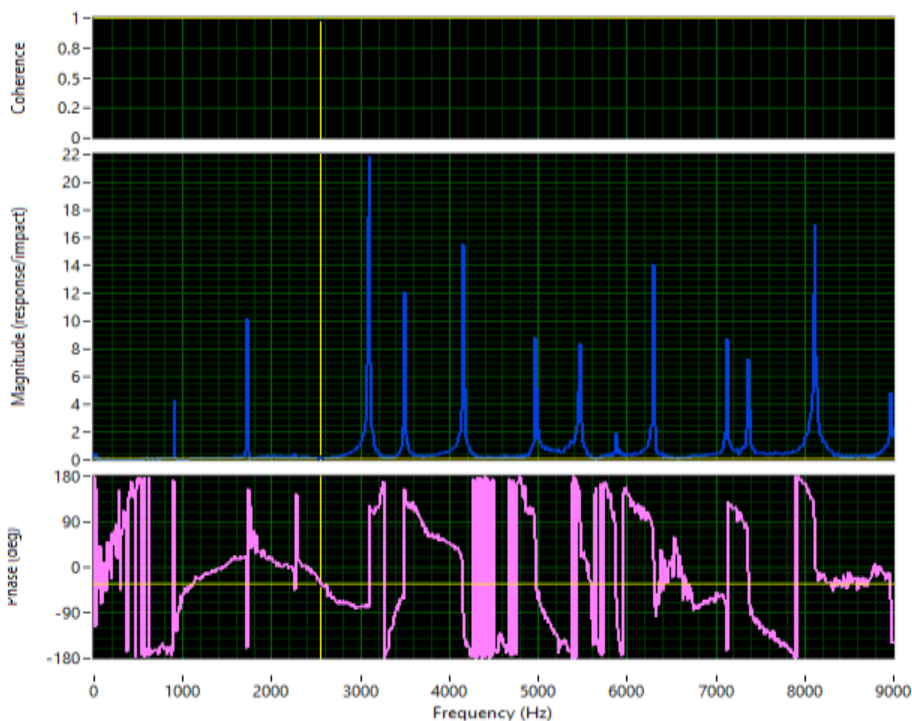
شکل ۵. استفاده از رایانه برای تحلیل سیگنال‌های دریافتی از میکروفون



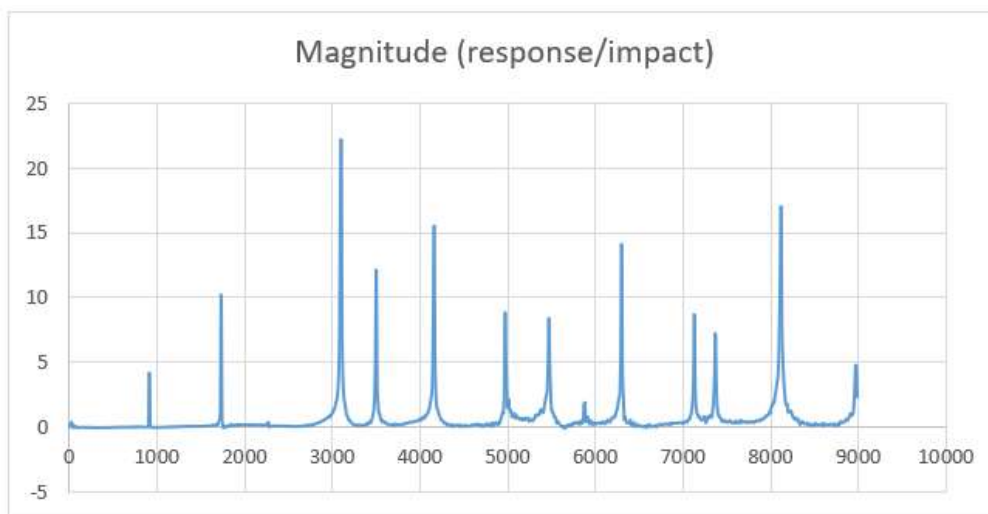
شکل ۶. اعمال پالس ضربه و اندازه‌گیری سیگنال‌های دریافتی توسط میکروفون

همچنین شکل ۸، تابع پاسخ فرکانسی سیگنال‌های دریافتی توسط میکروفون را نشان می‌دهد.

با اعمال تبدیل فوریه سریع (FFT) بر سیگنال‌های نیرو و پاسخ، تابع پاسخ فرکانسی (FRF^7) محاسبه شده است. شکل ۷، دامنه و فاز پاسخ را نشان می‌دهند.



شکل ۷. دامنه و فاز پاسخ سیگنال‌های دریافتی توسط میکروفون



شکل ۸. تابع پاسخ فرکانسی (FRF) سیگنال‌های دریافتی توسط میکروفون

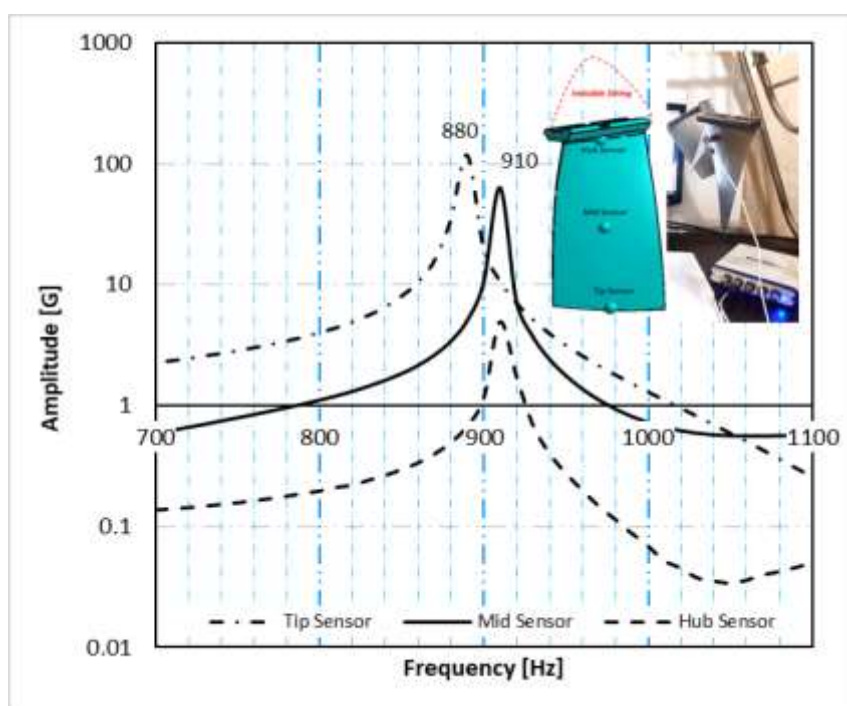
شکل ۷ مشهود است، متناظر با هر قله در نمودار دامنه، یک تغییر فاز ناگهانی حدود ۱۸۰ درجه در نمودار فاز

قله‌های (Peaks) مشاهده شده در نمودار دامنه بیانگر فرکانس‌های طبیعی سیستم هستند. همان‌طور که در

رخ داده است. این پدیده فیزیکی، وقوع تشدید را تأیید کرده و اطمینان می‌دهد که قله‌های مشاهده شده ناشی از نویز محیطی نیستند.

در شکل ۹، فرکانس‌های طبیعی پره توربین در سه موقعیت مختلف («نزدیک محور»، «میان پره» و «نوک پره») با استفاده از شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده‌اند. مشاهده می‌شود که نصب شتاب‌سنج باعث افزایش جرم موثر در محل نصب می‌شود که منجر به کاهش جزئی در فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری شده می‌شود. این اثر به ویژه در پره‌های سبک و حساس قابل توجه است

و می‌تواند منجر به خطا در تخمین دقیق فرکانس‌های طبیعی شود. همچنین این شکل نشان می‌دهد که هرچه حسگر به نوک پره نزدیک‌تر باشد، تغییر فرکانس محسوس‌تر است، چرا که تغییر جرم در انتهای پره تأثیر بیشتری بر مودهای ارتعاشی دارد. این اثر به دلیل حساسیت بالای پره‌های سبک و توزیع نامتوازن جرم، می‌تواند باعث جابه‌جایی جزئی اما قابل اندازه‌گیری در فرکانس‌های طبیعی شود که اهمیت آن در تحلیل‌های دقیق دینامیکی و طراحی توربین‌ها قابل توجه است.



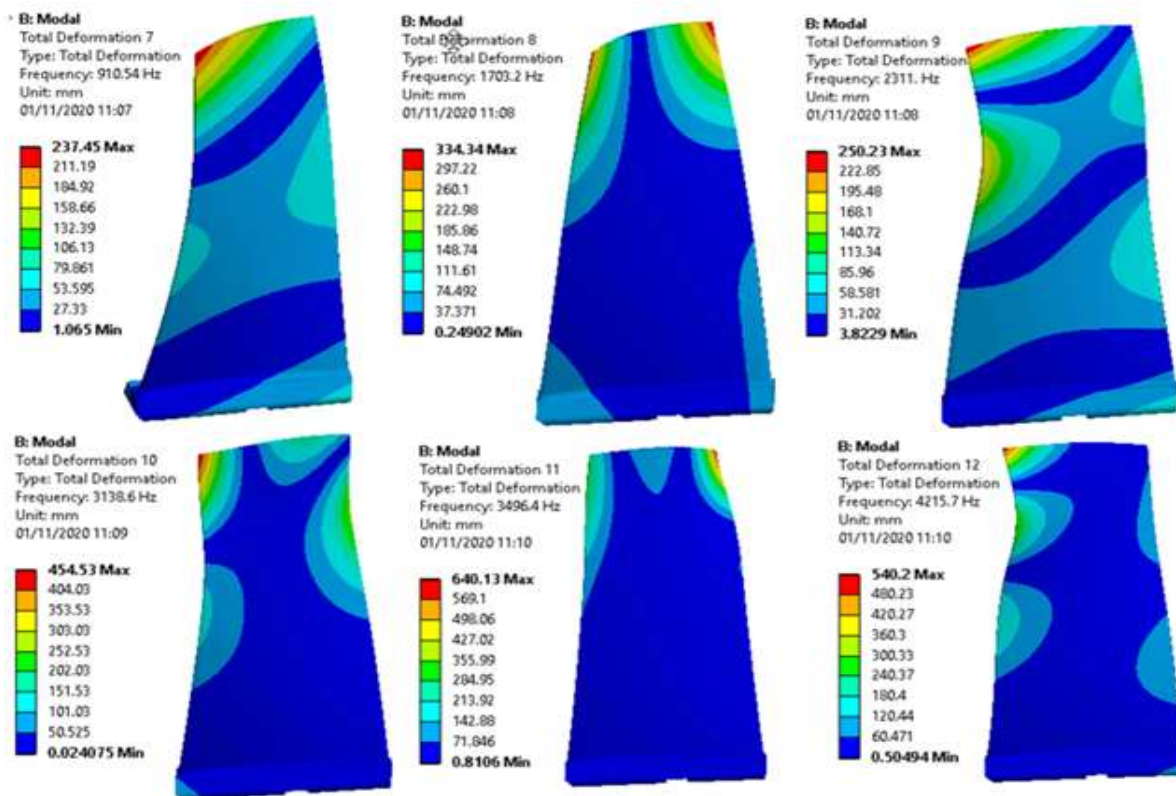
شکل ۹. اثر جرم حسگر شتاب‌سنج بر فرکانس‌های طبیعی پره

شکل ۹ همچنین اهمیت استفاده از روش‌های غیرتماسی مبتنی بر میکروفون را برجسته می‌کند، زیرا این روش بدون افزودن جرم اضافی، امکان شناسایی دقیق فرکانس‌های طبیعی را فراهم می‌آورد و می‌تواند داده‌های تجربی معتبرتری برای مقایسه با شبیه‌سازی اجزای محدود ارائه دهد. علاوه بر این، تحلیل نزدیک

میدان صوتی و ثبت تغییرات فشار توسط میکروفون، امکان شناسایی مودهای ارتعاشی با دقت بالا و بدون تداخل جرم حسگر را فراهم می‌کند که در طراحی و بهینه‌سازی پره‌های کوچک توربین گاز و بخار اهمیت حیاتی دارد.

مدول یانگ $E = 200 \text{ GPa}$ ، چگالی $\rho = 7800 \text{ kg/m}^3$ و ضریب پواسون $\nu = 0.3$ به نرم‌افزار اعمال و تحلیل مودال با شرایط مرزی آزاد انجام شده است.

برای اعتبارسنجی نتایج تجربی، پره توربین در محیط نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی از نرم‌افزار انسیس در شکل ۱۰ ارائه شده است. لازم به ذکر است خواص مکانیکی جنس پره



شکل ۱۰. مدل‌سازی پره توربین در محیط نرم‌افزار انسیس

بدون افزودن جرم اضافی، امکان شناسایی دقیق فرکانس‌های طبیعی پره‌های سبک و حساس فراهم می‌شود و اثرات تغییر جرم ناشی از نصب شتاب‌سنج حذف می‌گردد.

۵. جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، فرکانس‌های طبیعی یک پره توربین با استفاده از روش غیرتماسی مبتنی بر میکروفون تعیین شدند. تحلیل

مقایسه نتایج تجربی فرکانس‌های طبیعی پره، حاصل از اندازه‌گیری با میکروفون، با شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار انسیس در جدول ۱ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حداکثر خطای نسبی کمتر از ۲ درصد است، که نشان می‌دهد میدان صوتی نزدیک منتشر شده از پره، نماینده دقیقی از ارتعاشات سازه است. این تطابق همچنین اهمیت استفاده از روش‌های غیرتماسی مبتنی بر میکروفون را برجسته می‌کند، زیرا

جدول ۱. مقایسه فرکانس‌های طبیعی حاصل از آزمایش میکروفون و شبیه‌سازی انسیس

شماره مود	فرکانس تجربی (میکروفون) [Hz]	فرکانس محاسبه شده در انسیس [Hz]	درصد خطا (%)
۱	۹۱۰	۹۱۰.۵	۰/۰۵
۲	۱۷۳۰	۱۷۰۳	۱/۵۶
۳	۳۱۰۰	۳۱۳۸	۱/۲۳
۴	۳۵۰۰	۳۴۹۶	۰/۱۱
۵	۴۱۶۰	۴۲۱۵	۱/۳۲

می‌باشد، که صحت و قابلیت اعتماد روش ارائه شده را تأیید می‌کند.

- این روش می‌تواند به عنوان یک ابزار سریع، اقتصادی و دقیق برای آزمون‌های صنعتی پره‌های کوچک در توربین‌های گاز و بخار و قطعات کوچک مکانیکی مورد استفاده قرار گیرد و امکان توسعه برای تحلیل مودهای ارتعاشی، اعتبارسنجی مدل‌های عددی و بهینه‌سازی طراحی سازه‌های حساس و کوچک را فراهم می‌کند.

سیگنال‌های صوتی و مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی اجزای محدود نشان داد:

- روش سنجش غیرتماسی صوتی با حذف اثر جرم حسگر قادر است فرکانس‌های طبیعی سازه‌های سبک و حساس را بدون ایجاد تغییر در رفتار دینامیکی پره، با دقت بالا شناسایی کند.
- تطابق نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی نزدیک است، به طوری که حداکثر خطای نسبی کمتر از ۲ درصد

۶. منابع

- [1] Ewins, David J. *Modal testing: theory, practice and application*. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Blevins, Robert D., and R. Plunkett. "Formulas for natural frequency and mode shape." *Journal of Applied Mechanics* 47.2 (1980): 461.
- [3] Peeters, Bart, et al. "Automotive and aerospace applications of the PolyMAX modal parameter estimation method." *Proceedings of IMAC*. Vol. 22. No. 1. Citeseer, 2004.
- [4] Farshidi, R., et al. "Non-contact experimental modal analysis using air excitation and a microphone array." *Measurement* 43.6 (2010): 755-765.
- [5] Bölke, Olaf, J. Garcia, and J. Heimann. "Experimental Modal Analysis based on non-contact measurements with a commercial microphone array." *ICSV26 (2019)*.
- [6] Vanlanduit, Steve, Frank Daerden, and Patrick Guillaume. "Experimental modal testing using pressurized air excitation." *Journal of sound and vibration* 299.1-2 (2007): 83-98.
- [7] Ozdoganlar, O. Burak, Bruce D. Hansche, and Thomas G. Carne. "Experimental modal analysis for microelectromechanical systems." *Experimental mechanics* 45.6 (2005): 498-506.
- [8] Castellini, Paolo, Gian Marco Revel, and Lorenzo Scalise. "Measurement of vibrational modal parameters using laser pulse excitation techniques." *Measurement* 35.2 (2004): 163-179.

- [9] Park, Simon S., Yusuf Altintas, and Mohammad Movahhedy. "Receptance coupling for end mills." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43.9 (2003): 889-896.
- [10] Pastor, Miroslav, Michal Binda, and Tomáš Harčarik. "Modal assurance criterion." *Procedia Engineering* 48 (2012): 543-548.
- [11] Steiner, Rolf, and Jorgen Hald. "Near-field acoustical holography without the errors and limitations caused by the use of spatial DFT." *International Journal of Acoustics and Vibration* 6.2 (2001): 83-89.
- [12] Phares, D.J., Smedley, G.T., & Flagan, R.C. (2000). The wall shear stress produced by the normal impingement of a jet on a flat surface. *Journal of Fluid Mechanics*, 418, 351-375.
- [13] Lee, Q.J., & Lee, J.H. (2006). Non-contact rotating beam crack size estimation from vibro-acoustic signals. *Measurement Science and Technology*, 17, 1529-1536.
- [14] Benko, U., Petrovic, J., Juricic, D., Tavcar, J., & Rejec, J. (2005). An approach to fault diagnosis of vacuum cleaner motors based on sound analysis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 19, 427-445.
- [15] Hallauer, W.L., & Smith, J.C. (1990). Air-jet thrusters for active vibration control: design and calibration. *Journal of Experimental Techniques*, 14, 47-50.
- [16] Ramachandran, P., and S. Narayanan. "Evaluation of modal density, radiation efficiency and acoustic response of longitudinally stiffened cylindrical shell." *Journal of Sound and Vibration* 304.1-2 (2007): 154-174.
- [17] Gadà, A., Manzoni, S., & Vanali, M. (2008). Vibro-acoustic characterization of railway wheels. *Journal of Applied Acoustics*, 69, 530-545.
- [18] Castellini, P., Revel, G.M., & Scalise, L. (2004). Measurement of vibrational modal parameters using laser pulse excitation techniques. *Journal of Measurement*, 35, 163-179.
- [19] Phillips, A.W., & Allemang, R.J. (2004). A Low Order Implementation of the Polyreference Least Squares Complex Frequency (LSCF) Algorithm. *International Conference on Noise and Vibration Engineering*.
- [20] Puhle, C. (2016). On the sunflower spiral: acoustical holography results. *InterNoise*.
- [۲۱] پارسا سلامی پور، رضا کاظمی، "شناسایی مودال یک تیر طره به کمک روش پردازش تصویر و توابع انتقال‌پذیری"، نشریه صوت و ارتعاش، دوره ۱۳، شماره ۲۵، ص ۱۲۶-۱۴۴، ۱۴۰۳.
- [22] Fahy, F., & Gardonio, P. (2007). *Sound and Structural Vibration: Radiation, Transmission and Response* (2nd ed.). Academic Press (Elsevier).

پی‌نوشت

¹ Fast Fourier Transform, FFT

² ANSYS

³ Statistically Optimal Near-field Acoustical Holography (SONAH) method

⁴ Acoustical Holography

⁵ Helmholtz Equation Least Squares, HELS

⁶ Peaks

⁷ Frequency Response Function