

تست غیرمخرب تیغه کمپرسور با ارتعاش سنج مبتنی بر اثر دوپلر

محمد برتری^۱، حدیثه ایمانی^{۲*}، فاطمه رضایی^۳، محمد سعید جعفری^۴

^۱ ایران، تهران، حکیمیه، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشجوی ارشد.

^۲ ایران، تهران، سیدخندان، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، دانشجوی ارشد.

^۳ ایران، تهران، سیدخندان، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده فیزیک، استادیار.

^۴ ایران، تهران، ونک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک، دانشجوی دکترا.

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: had.imani@email.kntu.ac.ir

چکیده

لرزش تیغه‌های کمپرسور از عوامل اصلی خستگی فرکانسی بالا و خرابی زود هنگام در توربوماشین‌ها است. استفاده از حسگرهای تماسی مانند شتاب‌سنج موجب ایجاد اثر جرم افزوده و خطا در برآورد فرکانس‌های طبیعی می‌شود؛ از این رو روش‌های غیرتماسی اهمیت ویژه‌ای دارند. در این پژوهش، فرکانس‌های طبیعی و مودهای ارتعاشی یک تیغه کمپرسور با هندسه ایرفویلی و شرایط مرزی یکسرگیردار، با استفاده از تحریک سینوسی جاروبی شیکر الکترومغناطیسی و اندازه‌گیری غیربرخوردی سرعت ارتعاش توسط ارتعاش‌سنج لیزری دوپلر^۱ (LDV) استخراج شده است. پاسخ ارتعاشی تیغه در چند نقطه ثبت و تابع پاسخ فرکانسی (FRF) شتاب سرعت محاسبه گردید. با تحلیل قله‌های FRF و روش پهنای باند ۳ dB، فرکانس‌های طبیعی و نسبت میرایی مودال تعیین و مودهای خمشی و پیچشی متناظر شناسایی شد. نتایج تجربی تطابق خوبی با رفتار گزارش شده برای تیغه‌های سالم داشته و نشان می‌دهد پروتکل پیشنهادی مبتنی بر LDV، بدون اثر جرم افزوده و با تکرارپذیری بالا، امکان شناسایی دقیق ویژگی‌های مودال تیغه برای کاربردهای پایش سلامت را فراهم می‌کند.

کلمات کلیدی: ارتعاش سنج لیزری؛ تیغه کمپرسور؛ فرکانس‌های طبیعی؛ پایش سلامت.

^۱ Laser Doppler vibrometer

۱- مقدمه

تیغه‌های کمپرسور از مهم‌ترین اجزای توربوماشین‌ها به‌شمار می‌روند و سلامت سازه‌ای آن‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در قابلیت اطمینان، راندمان و ایمنی سامانه‌های پیشران دارد. این تیغه‌ها در معرض نیروهای آیرودینامیکی متغیر، تحریکات گذرا، پدیده‌های جریان ناپایا و ارتعاشات اجباری قرار می‌گیرند و در نتیجه تحت تنش‌های چرخه‌ای با دامنه و فرکانس بالا قرار می‌گیرند [1]. چنانچه فرکانس تحریک با یکی از فرکانس‌های طبیعی تیغه هم‌زمان شود، امکان وقوع رزونانس و ایجاد ارتعاشات شدید وجود دارد که می‌تواند منجر به رشد ترک، کاهش عمر خستگی و حتی شکست فاجعه‌آمیز پره گردد. بنابراین شناسایی دقیق ویژگی‌های مودال تیغه شامل فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و نسبت میرایی گام اساسی در پایش سلامت، طراحی مقاوم‌تر و پیش‌بینی خرابی است [2].

در روش‌های متداول آزمایش مودال، از حسگرهای تماسی همچون شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی استفاده می‌شود. با این حال، نصب حسگر روی تیغه‌هایی که جرم و سختی نسبتاً کمی دارند، موجب ایجاد اثر جرم افزوده شده و می‌تواند فرکانس‌های طبیعی اندازه‌گیری‌شده را به مقدار قابل‌توجهی تغییر دهد. همچنین، نیاز به سیم‌کشی، محدودیت در تعداد نقاط اندازه‌گیری و اثرگذاری بر شرایط مرزی از دیگر چالش‌های روش‌های تماسی است. از این رو، استفاده از روش‌های غیربرخوردی و نوری مانند ارتعاش‌سنج لیزری دوپلر (LDV) در سال‌های اخیر به‌طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است [3]. LDV با بهره‌گیری از تغییرات فاز و فرکانس پرتو لیزر بازتابی قادر است سرعت و جابه‌جایی ارتعاشی سازه را بدون تماس و با دقت بسیار بالا اندازه‌گیری کند و به همین دلیل انتخاب مناسبی برای تیغه‌های سبک، نازک و دارای هندسه پیچیده مانند پره‌های کمپرسور محسوب می‌شود. در بسیاری از مطالعات گذشته، رفتار مودال تیغه‌ها به‌صورت عددی یا تجربی بررسی شده و نشان داده شده است که تیغه‌های سالم معمولاً الگوهای ارتعاشی با تکرارپذیری بالا و فرکانس‌های طبیعی نزدیک به یکدیگر دارند؛ در حالی که آسیب‌دیدگی باعث تغییر محسوس در فرکانس‌ها و توزیع انرژی مودال می‌شود. با این وجود، بخش عمده‌ای از این مطالعات یا وابسته به حسگرهای تماسی بوده‌اند یا شرایط مرزی واقعی تیغه را به‌خوبی بازتولید نکرده‌اند. علاوه بر این، گزارش‌های منتشرشده کمتر به تحلیل کمی FRF، استخراج میرایی مودال یا مقایسه دقیق نتایج با مدل‌های تحلیلی و عددی پرداخته‌اند [4].

هدف این پژوهش توسعه و ارزیابی یک پروتکل آزمایشگاهی مبتنی بر تحریک سینوسی جاروبی و اندازه‌گیری غیربرخوردی LDV برای استخراج ویژگی‌های مودال تیغه کمپرسور است. در این راستا، پاسخ ارتعاشی تیغه در چند نقطه ثبت و تابع پاسخ فرکانسی شتاب سرعت محاسبه می‌شود تا فرکانس‌های طبیعی، شکل مودهای خمشی و پیچشی و نسبت میرایی مودال تعیین گردد. همچنین به‌منظور ارزیابی دقت روش، نتایج تجربی با رفتار مودال تیغه‌های سالم گزارش‌شده در منابع مقایسه شده و در ادامه، زمینه برای صحت‌سنجی عددی و توسعه روش‌های پایش سلامت فراهم می‌شود.

۲- روش آزمایش و چیدمان

۲-۱ تعریف مسئله

تیغه‌های کمپرسور، به‌دلیل قرارگیری در مسیر جریان هوای پرفشار و سرعت بالا، همواره تحت بارهای آیرودینامیکی متغیر و تحریکات مکانیکی چرخه‌ای قرار دارند. هدف این پژوهش، شناسایی دقیق ویژگی‌های مودال یک تیغه کمپرسور با شرایط مرزی معادل حالت واقعی نصب آن است.

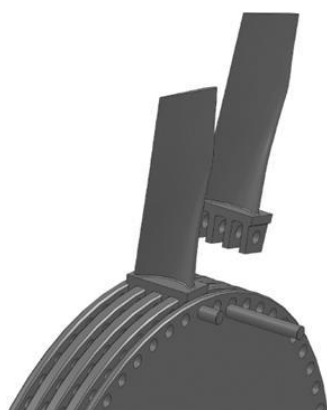
تیغه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. این تیغه دارای هندسه سه‌بعدی ایرفویلی با ضخامت کم، پیچش تدریجی در امتداد دهانه، و کاهش عرض و ضخامت در راستای ارتفاع است؛ ویژگی‌هایی که موجب ایجاد مودهای خمشی، پیچشی و خمشی-پیچشی ترکیبی می‌شوند. این نوع هندسه همان مشخصه تیغه‌های کمپرسور موتورهای جت است که برای عملکرد آیرودینامیکی بهینه طراحی می‌شوند. تیغه از جنس سوپرآلیاژ پایه‌نیکل (Inconel 718)، مشابه تیغه‌های صنعتی و هوایی، در نظر گرفته می‌شود تا رفتار مودال آن با شرایط واقعی سازگار باشد.

شرایط مرزی تیغه مطابق شکل ۲ بازتولید شده است. در این چیدمان، ریشه تیغه در محل پیچ‌خورده به‌صورت صلب مهار شده و

شرایط یکسرگیردار (Cantilever) ایجاد می‌گردد؛ حالتی که بیان‌گر نحوه اتصال واقعی تیغه به دیسک کمپرسور است. حساسیت پاسخ مودال تیغه به شرایط مرزی بسیار بالا است و تغییر کوچک در سختی گیره می‌تواند موجب جابه‌جایی قابل توجه فرکانس‌ها شود؛ بنابراین بازتولید دقیق این شرایط برای اعتبار نتایج ضروری است.

تحریک تیغه توسط شیکر الکترومغناطیسی انجام می‌شود (مطابق شکل ۲)، به‌طوری که نیرو به لبه آزاد تیغه اعمال می‌شود تا مودهای اصلی خمشی و پیچشی در بازه فرکانسی مناسب فعال شوند. پاسخ ارتعاشی در چند نقطه مشخص روی سطح تیغه مطابق چیدمان شکل ۳ توسط ارتعاش‌سنج لیزری دوپلر (LDV) اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به جرم بسیار کم تیغه و حساسیت آن به اثر جرم افزوده، استفاده از حسگرهای تماسی ممکن است فرکانس طبیعی را تا چند درصد تغییر دهد؛ در حالی که LDV امکان اندازه‌گیری غیربرخوردی، دقیق و بدون تغییر خواص مودال را فراهم می‌کند.

در این پژوهش، مسئله اصلی استخراج دقیق فرکانس‌های طبیعی، شکل مودهای خمشی/پیچشی، و میرایی مودال تیغه است؛ به‌گونه‌ای که پاسخ FRF در نقاط مختلف تیغه تحلیل شده و تفاوت رفتار مودال نقاط مختلف توجیه شود. این داده‌ها پایه‌ای برای تحلیل‌های بعدی از جمله همبستگی با مدل المان محدود (FEM) و کاربرد در پایش سلامت تیغه در شرایط عملیاتی خواهد بود.



شکل ۲. مدل CAD از نصب تیغه کمپرسور با انتهای پیچ شده.



شکل ۱. تیغه کمپرسور مورد مطالعه.



شکل ۳. چیدمان آزمایشگاهی تست غیر مخرب LDV.

۲-۲ روش آزمایش

آزمایش مودال تیغه با هدف استخراج فرکانس‌های طبیعی، شکل مودها و نسبت میرایی مودال، با ترکیب تحریک مکانیکی کنترل‌شده و اندازه‌گیری غیربرخوردی سرعت ارتعاش انجام شد. در این بخش، چیدمان آزمایش، نحوه تحریک، روش اندازه‌گیری و فرآیند تحلیل

داده به صورت مرحله به مرحله تشریح می‌شود.

تیغه پس از نصب در شرایط مرزی یکسرگیردار، بر روی یک میز آزمایش ارتعاشات قرار داده شد. برای ایجاد تحریک مکانیکی تکرارپذیر، از یک شیکر الکترومغناطیسی استفاده شد که از طریق یک رابط صلب به لبه آزاد تیغه متصل گردید. جهت تصویری از نحوه قرارگیری تیغه، شیکر و تجهیزات اندازه‌گیری، در صورت نیاز می‌توان به شکل‌های ارائه شده مراجعه کرد. تحریک تیغه با سیگنال سینوسی جاروبی انجام شد. این سیگنال در بازه فرکانسی ۰ تا ۲ کیلوهرتز تولید شد تا مودهای خمشی و پیچشی مرتبط با این محدوده برانگیخته شوند. دامنه تحریک ثابت نگه داشته شد تا شرایط تمامی آزمون‌ها قابل مقایسه باشد. سرعت جاروب به گونه‌ای انتخاب شد که زمان کافی برای پایدار شدن پاسخ در هر فرکانس وجود داشته باشد. پاسخ ارتعاشی تیغه با یک ارتعاش‌سنج لیزری دوپلر (LDV) ثبت شد. در مد سرعت تنظیم گردید و پرتو لیزر با زاویه‌ای مناسب (حدود ۴۵ درجه) نسبت به سطح تیغه تنظیم شد تا مؤلفه عمودی سرعت ارتعاش با بیشترین حساسیت قابل تشخیص باشد. برای ارزیابی توزیع انرژی مودال و تفاوت رفتار نقاط مختلف، سه نقطه روی سطح تیغه انتخاب و به صورت جداگانه اندازه‌گیری شدند. سیگنال تحریک ورودی و سرعت ارتعاشی خروجی به‌طور هم‌زمان توسط یک آنالیزور FFT نمونه‌برداری شدند. برای بهبود کیفیت داده‌ها از پنجره Hanning و میانگین‌گیری روی چند تکرار (Averaging) و نرخ نمونه‌برداری بالاتر از ۵ برابر حداکثر فرکانس مورد نیاز استفاده شد.

پاسخ فرکانسی (FRF) به صورت نسبت سرعت خروجی LDV به شتاب ورودی محاسبه شد:

$$FRF(\omega) = \frac{V(\omega)}{A(\omega)} \quad (1)$$

که $V(\omega)$ سرعت اندازه‌گیری شده و $A(\omega)$ شتاب تحریک اعمال شده است. فرکانس‌های طبیعی از روی قله‌های FRF تشخیص داده شدند. برای برآورد کمی میرایی، از روش پهنای باند ۳ dB استفاده شد:

$$\zeta = \frac{f_2 - f_1}{f_n} \quad (2)$$

که در آن f_n فرکانس طبیعی و f_1 و f_2 فرکانس‌هایی هستند که دامنه پاسخ در آن‌ها ۳ dB کمتر از بیشینه مود است. اختلاف FRF نقاط مختلف بر اساس تفاوت موقعیت گره‌ها و شکم‌های مودال، جهت حسگر LDV و تغییرات انرژی مودال تفسیر می‌شود و در بخش نتایج به‌طور کامل تحلیل خواهد شد.

۳- نتایج

در این بخش، تابع‌های پاسخ فرکانسی (FRF) اندازه‌گیری شده در سه نقطه مختلف تیغه مورد تحلیل قرار گرفته و فرکانس‌های طبیعی، ماهیت مودها و نسبت میرایی مودال استخراج شده است. شکل‌های FRF بیان‌گر آن هستند که اگرچه دامنه پاسخ در نقاط مختلف متفاوت است، اما فرکانس‌های طبیعی در همه نقاط ثابت بوده و این موضوع نشان‌دهنده صحت اندازه‌گیری و رفتار مودال منسجم سازه است.

۳-۱ استخراج فرکانس‌های طبیعی

اولین قله شاخص FRF در بازه حدود ۱۹۰-۲۲۰ Hz مشاهده شد و به دلیل دامنه حداکثری در لبه آزاد و کمینه نزدیک ریشه، به عنوان مود خمشی اول شناسایی شد. مود دوم در بازه ۱۱۸۰-۱۲۲۰ Hz قرار داشت و کاهش دامنه در نقطه میانی تیغه، وجود یک گره خمشی را تأیید می‌کند. مود سوم در حوالی ۱۷۵۰-۱۸۵۰ Hz با الگوی دامنه‌ای متفاوت ظاهر شد که حساسیت نقاط مختلف به دوران مقطع را نشان می‌دهد؛ این رفتار شاخص مود پیچشی اول است. (شکل ۴-الف و ب)

در نمودارهای گسترده‌تر (شکل ۴-ج) مودهای مرتبه بالاتر نیز دیده شدند: یک مود در بازه ۲۰۵-۲۰۳ kHz (که خمشی سوم یا مود ترکیبی است) و یک مود دیگر در ۴۰۵-۴۰۲ kHz که نشان‌دهنده رفتار پیچیده دینامیکی تیغه است.

فرکانس‌های طبیعی استخراج شده در جدول ۱ گزارش شده‌اند. اختلاف فرکانس بین سه نقطه کمتر از چند درصد بوده و این موضوع نشان‌دهنده تکرارپذیری مناسب و کیفیت بالای اندازه‌گیری LDV است.

جدول ۱. استخراج فرکانس طبیعی، نوع مود و میرایی مودال از داده‌های FRF.

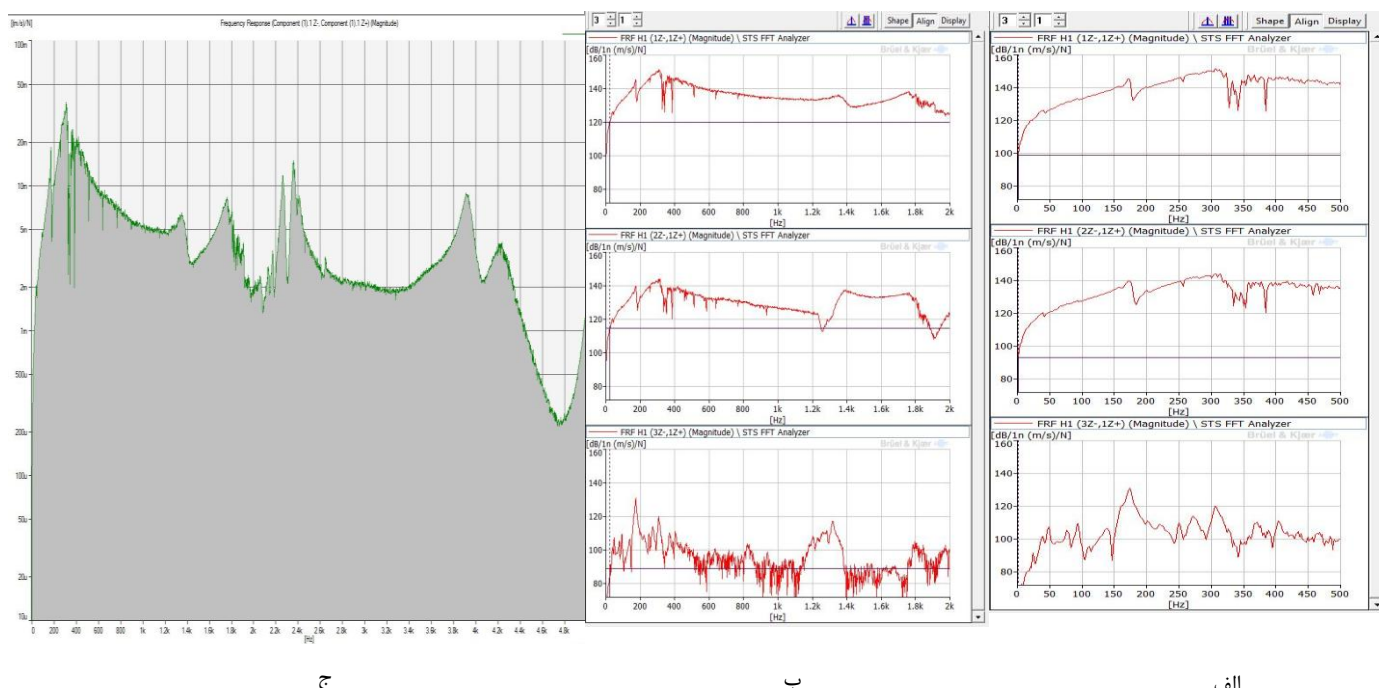
شماره مود	نوع مود	فرکانس نقطه ۱ (Hz)	فرکانس نقطه ۲ (Hz)	فرکانس نقطه ۳ (Hz)	میانگین f_n	میرایی (%) ζ
۱	خمشی اول	۲۰۰	۲۰۵	۲۱۰	۲۰۵	۲۰
۲	خمشی دوم	۱۱۸۰	۱۲۱۰	۱۲۰۰	۱۲۰۰	۱۰۷
۳	پیچشی اول	۱۷۵۰	۱۷۸۰	۱۸۰۰	۱۷۸۰	۱۰۷
۴	خمشی سوم / ترکیبی	۲۳۸۰	۲۴۳۰	۲۴۶۰	۲۴۰۰	۲۰۵
۵	مود مرتبه بالا	۴۳۲۰	۴۳۵۰	۴۴۰۰	۴۳۵۰	۱۰۴

برای هر مود، پهنای باند ۳ dB تعیین و نسبت میرایی مودال ζ محاسبه شد. نتایج نشان داد که میرایی مودهای تیغه بین ۱ تا ۳ درصد قرار دارد که با رفتار سازه‌های فلزی با میرایی کم سازگار است.

تفاوت دامنه FRF در نقاط مختلف تیغه ناشی از شکل مود و توزیع انرژی مودال است. برای مود خمشی اول، دامنه نزدیک ریشه بسیار کوچک است؛ زیرا در شرایط یکسری‌دار، تغییر مکان ریشه صفر است. در نقطه آزاد دامنه حداکثر است. در مود خمشی دوم، نقطه میانی کاهش دامنه دارد که نشانه وجود گره مودال است. در مود پیچشی، دامنه در نقاط حساس به زاویه افزایش می‌یابد.

این تفاوت‌ها برخلاف ظاهر اولیه، نشانه کیفیت بالای داده‌ها است؛ زیرا امکان تعیین ماهیت مود و تشخیص گره‌ها/شکم‌ها را فراهم می‌کنند.

در مجموع، نتایج بیان می‌کنند که ترکیب تحریک شیکر و اندازه‌گیری LDV قادر است مودهای خمشی و پیچشی تیغه را با دقت بالا شناسایی و جداسازی کند و داده‌های به‌دست‌آمده برای صحت‌سنجی مدل‌های FEM و پایش سلامت قابل اتکا هستند.



شکل ۴. الف) تابع پاسخ فرکانسی (FRF) در سه نقطه مختلف تیغه تا ۵۰۰ Hz. پیک واضح در حدود ۲۰۰ Hz نشان‌دهنده مود خمشی اول است. اختلاف دامنه بین نقاط مختلف مطابق شکل مود خمشی اول بوده و بیانگر وجود گره در ریشه و شکم در لبه آزاد است. ب) FRF سه نقطه‌ای تیغه تا ۲۰۰۰ Hz. پیک‌های حدود ۱۲۰۰ Hz متناظر با مود خمشی دوم و پیک‌های ۱۷۵۰-۱۸۵۰ Hz متناظر با مود پیچشی اول هستند. اختلاف دامنه در نقاط مختلف بیانگر توزیع انرژی مودال و وجود گره خمشی در مود دوم است. ج) FRF گسترده تیغه تا ۵ kHz برای یک نقطه اندازه‌گیری. پیک‌های مشاهده‌شده در محدوده ۲.۳-۲.۵ kHz و ۴.۲-۴.۵ kHz مربوط به مودهای مرتبه بالاتر هستند و بیانگر رفتار چندمودی تیغه کمپرسور می‌باشند.

۳-۲ صحت‌سنجی نتایج با مدل تئوری تیر یک‌سرگیردار

به‌منظور ارزیابی دقت فرکانس‌های طبیعی استخراج‌شده از آزمایش LDV، یک مقایسه‌ی تحلیلی بر اساس مدل کلاسیک تیر یک‌سرگیردار ارائه شد. با وجود پیچیدگی هندسه سه‌بعدی ایرفویلی تیغه، مدل تیر اوپلر-برنولی می‌تواند تخمینی قابل قبول از نسبت فرکانس‌های خمشی تیغه ارائه دهد و حداقل سطحی از صحت‌سنجی تئوریک که در مطالعات استاندارد مودال مورد استفاده قرار می‌گیرد را فراهم کند.

برای تیر یکنواخت یک‌سرگیردار، فرکانس‌های طبیعی خمشی از رابطه‌ی زیر به‌دست می‌آیند:

$$f_n = \frac{\beta_n^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (3)$$

که در آن E مدول یانگ، I ممان اینرسی خمشی، ρ چگالی ماده، A مساحت مقطع، و β ضرایب مودال استاندارد برای تیر یک‌سرگیردار هستند. این ضرایب برای مودهای اول و دوم به‌ترتیب عبارتند از:

$$\beta_1 = 1.875, \beta_2 = 4.694 \quad (4)$$

با توجه به این ضرایب، نسبت تئوری فرکانس مود خمشی دوم به مود خمشی اول مستقل از خواص ماده و تنها تابع فرم تحلیلی سازه است:

$$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{th} = \left(\frac{\beta_2}{\beta_1}\right)^2 \approx 6.27 \quad (5)$$

در آزمایش انجام‌شده روی تیغه کمپرسور، فرکانس طبیعی مود خمشی اول برابر $f_{exp} \approx 205 \text{ Hz}$ و مود خمشی دوم برابر $f_{exp} \approx 1200 \text{ Hz}$ اندازه‌گیری شد. بنابراین نسبت تجربی فرکانس دو مود به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{exp} = \frac{1200}{205} \approx 5.85 \quad (6)$$

مقایسه دو مقدار تئوری و تجربی اختلاف نسبی حدوداً ۶٫۶٪ را نشان می‌دهد:

$$error(\%) = \frac{\left| \left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{exp} - \left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{th} \right|}{\left(\frac{f_2}{f_1}\right)_{th}} \times 100 = 6.6\% \quad (7)$$

۴- بحث

نتایج حاصل از تحلیل FRF در سه نقطه اندازه‌گیری روی تیغه نشان می‌دهد که رفتار مودال تیغه کاملاً با الگوی مورد انتظار برای یک سازه ایرفویلی یکسرگیردار سازگار است. اولین فرکانس طبیعی در حدود ۲۰۵ Hz ظاهر شد که دامنه بالای آن در ناحیه لبه آزاد و دامنه بسیار کم در ریشه، بیانگر شکل مود خمشی اول است. این الگوی توزیع دامنه مشخصه کلاسیک سازه‌های یکسرگیردار بوده و نشان‌دهنده کیفیت مناسب تحریک و اندازه‌گیری است.

دومین مود شناسایی‌شده در حوالی ۱۲۰۰ Hz مشاهده شد. کاهش محسوس دامنه در نقطه میانی تیغه نسبت به نقاط ریشه و لبه آزاد وجود یک گره خمشی را تأیید می‌کند؛ بنابراین این مود به طور روشن به عنوان مود خمشی دوم قابل طبقه‌بندی است. تفاوت دامنه بین نقاط مختلف کاملاً با الگوی مورد انتظار یک سازه دارای پیچش و تغییرات هندسی در طول دهانه سازگار است.

سومین مود اصلی در بازه ۱۷۵۰-۱۸۵۰ Hz قرار گرفت. الگوی دامنه این مود با مودهای خمشی متفاوت بود؛ دامنه در نواحی دورتر از محور خنثی افزایش یافته و در نواحی نزدیک به مرکز کاهش پیدا کرده است که این رفتار مشخصه مود پیچشی اول است. ثبت این مود نشان می‌دهد که زاویه تابش پرتو LDV و تنظیمات اندازه‌گیری به درستی انتخاب شده و مؤلفه سرعت مؤثر بر دوران مقطع تیغه با دقت مناسب استخراج شده است.

علاوه بر این مودها، پیک‌های دیگری نیز در بازه‌های ۲٫۵ kHz تا ۲٫۳ kHz و ۴٫۵ kHz تا ۴٫۲ kHz دیده شدند که متناظر با مودهای مرتبه بالاتر سازه هستند. این مودها نشان‌دهنده رفتار دینامیکی چندمودی تیغه و مشارکت ترکیبی سختی خمشی و پیچشی در فرکانس‌های بالا می‌باشند. هرچند تعیین دقیق شکل مودهای مرتبه بالا نیازمند مدل‌سازی عددی سه‌بعدی (FEM) است، اما حضور پایدار این پیک‌ها در چند نقطه اندازه‌گیری تأیید می‌کند که روش LDV طیف مودال تیغه را به صورت کامل و قابل اعتماد ثبت کرده است.

اختلاف دامنه FRF در سه نقطه نشانه ایراد اندازه‌گیری نیست، بلکه بازتاب مستقیم توزیع انرژی مودال در طول تیغه است. برای مثال، دامنه کم در ریشه در مود خمشی اول نتیجه شرایط مرزی یکسرگیردار است و کاهش دامنه نقطه میانی در مود خمشی دوم وجود گره مودال را نشان می‌دهد. در مود پیچشی نیز نواحی حساس به دوران مقطع دامنه بیشتری ثبت کرده‌اند. این تفاوت‌ها نه تنها با رفتار تئوری سازه‌ها سازگار است، بلکه امکان بازسازی کیفی شکل مودها تنها از روی FRF را فراهم می‌کند.

بررسی میرایی مودال نشان داد که مقادیر میرایی حدود ۱ تا ۳ درصد هستند که با رفتار تیغه‌های فلزی با میرایی ساختاری کم سازگار است. استفاده از روش پهنای باند ۳ dB امکان برآورد کمی میرایی را فراهم کرده و نشان می‌دهد که داده‌های FRF از وضوح و کیفیت کافی برای استخراج پارامترهای مودال برخوردارند.

در مجموع، نتایج آزمایش نشان می‌دهند که پروتکل تست شامل تحریک شیکر و اندازه‌گیری غیربرخوردی LDV قادر است فرکانس‌های طبیعی، شکل مودهای خمشی و پیچشی و میرایی تیغه را با دقت بالا استخراج کند. این رفتار مودال با انتظار تئوریک تیغه‌های ایرفویلی مشابهت کامل داشته و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای صحت‌سنجی مدل‌های اجزای محدود و توسعه روش‌های پایش سلامت مورد استفاده قرار گیرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از تحریک سینوسی جاروبی و اندازه‌گیری غیربرخوردی LDV، ویژگی‌های مودال یک تیغه کمپرسور استخراج و تحلیل شد. نتایج نشان داد که سه مود اصلی تیغه شامل خمشی اول، خمشی دوم و پیچشی اول به‌وضوح قابل شناسایی هستند و فرکانس‌های طبیعی آن‌ها به‌ترتیب در حدود ۲۰۵ Hz، ۱۲۰۰ Hz و ۱۷۸۰ Hz قرار دارند. مقادیر میرایی مودال در بازه ۱ تا ۳ درصد به‌دست آمد که با رفتار سازه‌های فلزی با میرایی کم سازگار است. اختلاف دامنه FRF در نقاط مختلف امکان تشخیص گره‌ها و شکم‌های مودال را فراهم کرد و نشان داد که اندازه‌گیری چندنقطه‌ای با LDV قابلیت بازسازی کیفی شکل مودها را دارد. علاوه بر مودهای اصلی، مودهای مرتبه بالاتر نیز شناسایی شدند که رفتار دینامیکی چندمودی تیغه را تأیید می‌کنند. دقت، تکرارپذیری و غیرتماسی بودن روش LDV آن را به گزینه‌ای مناسب برای پایش سلامت تیغه‌های کمپرسور و ارزیابی رفتار مودال سازه‌های سبک تبدیل می‌کند. پیشنهاد می‌شود در ادامه، مدل اجزای محدود تیغه تدوین شده و نتایج تجربی با آن مقایسه شود تا امکان تحلیل دقیق‌تر شکل مودها، استخراج حساسیت مودها نسبت به آسیب، و توسعه روش‌های تشخیص خرابی فراهم گردد.

مراجع

1. Britz, D., Plesiutchnig, E., & Mayer, S. (2018). *Feasibility of vibration-based damage detection for pinned turbine blades* (Master's thesis). Technical University of Graz, Austria.
2. Schmitz, T. L., Ziegert, J. C., & Dutterer, B. S. (2010). *Analysis and compensation of mass loading effect of accelerometers on tool point FRF measurements for chatter stability predictions*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 50(6), 591–598.
3. Craig, R. R., & Kurdila, A. J. (2006). *Fundamentals of Structural Dynamics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
4. Randall, R. B. (2011). *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*. John Wiley & Sons.