

# آنالیز مودال تجربی و تحلیلی پره و دیسک توربین گاز رولزرویس

بابک خدابنده‌لو<sup>۱</sup>، کاوه عباسی<sup>۲\*</sup>، علی صیامی<sup>۳</sup>، مسعود آسایش<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> گروه نفت و زمین‌شناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون نروژ، تورنهیم

<sup>۲</sup> گروه مکانیک، دانشگاه آزاد واحد اسلام‌آباد غرب، اسلام‌آباد غرب، کرمانشاه، ایران

<sup>۳</sup> گروه تجهیزات دوار، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

\*مسئول مکاتبات: k.abbasi@iauea.ac.ir

## چکیده

## واژگان کلیدی

تحلیل مودال تجربی  
آزمون چکش  
فرکانس طبیعی  
شکل مود  
توربین

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۲/۰۲

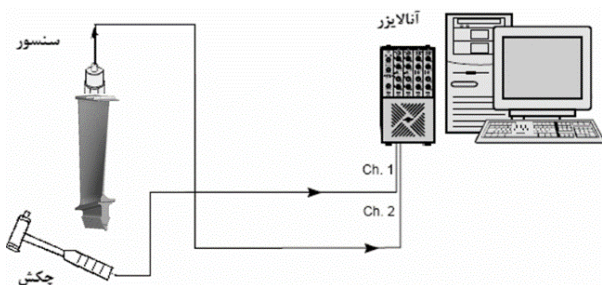
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

شناسایی فرکانس طبیعی‌های یک سیستم مکانیکی برای احتراز از رخداد پدیده تشدید همواره مورد توجه بوده است؛ روش‌های تجربی همواره برای تحلیل‌های مکانیکی قابل اعتمادتر و البته پرهزینه‌تر بوده‌اند. آنالیز مودال تجربی روشی معمول برای شناسایی پارامترهای ارتعاشی یک سیستم مکانیکی است. انجام موفق آزمون مودال سازه‌های پیچیده همواره با مشکلاتی روبرو است؛ به عنوان نمونه می‌بایست اندازه‌گیری‌های تجربی همواره در خارج از نقاط گره‌های مودهای ارتعاشی صورت گیرد. در این مقاله تلاش می‌گردد تا با استفاده از آزمون مودال چکش، فرکانس طبیعی و شکل مودهای دیسک و یک پره، توربین رولزرویس استخراج گردد. برای انجام موفق آزمون مودال تجربی، از تحلیل اجزا محدود مدل سیستم نیز استفاده شده است. نتایج تحلیل عددی در کنار نتایج تجربی مکمل یکدیگر بوده‌اند و می‌توان از نتایج عددی برای بهینه کردن فرآیند آزمون استفاده نمود و البته از نتایج تجربی برای اصلاح مدل تحلیلی نیز استفاده کرد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که در انجام آزمون مودال تجربی چنین سازه‌های تحلیل‌های عددی می‌تواند در موفقیت آزمون راهگشا باشد و به عنوان مکمل، در کنار نتایج تجربی مورد استفاده قرار گیرد.

## ۱ مقدمه

اطلاعات عددی استفاده می‌شود و از این اطلاعات برای انجام آزمون مودال و البته اعتبارسنجی نتایج نیز استفاده می‌گردد. برای تشخیص پارامترهای مودال توربین در این پژوهش از روش آزمون چکش استفاده گردید. آزمون چکش روشی سریع و کم‌هزینه برای پیدا کردن مودهای ماشین‌ها و سازه‌ها می‌باشد و با توجه به راحتی اجرای آن کاربرد وسیعی در صنعت دارد. شکل ۱ نمای کلی از آزمون مودال با ضربه چکش را نشان می‌دهد. در آزمون مودال پس از اندازه‌گیری سیگنال‌های زمانی پاسخ و ضربه و اعمال تبدیل فوری سریع<sup>۱</sup> به آن، تابع پاسخ فرکانسی محاسبه می‌گردد.

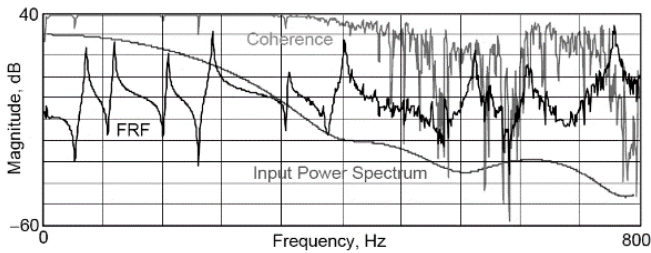
شناسایی فرکانس‌های طبیعی سیستم‌های مکانیکی همواره موضوع بسیاری از پژوهش‌های حوزه مکانیک بوده است و در طراحی سازه‌های مکانیکی از نقطه نظر ارتعاشی مودهای سازه جهت دوری از پدیده تشدید همواره موضوع پژوهش بوده است. روش‌های تجربی آنالیز مودال تجربی به صورت مدون در مرجعی توسط اوینز [۱] مطرح شد. آنالیز مودال تجهیزات مکانیکی، بدلیل حساسیت مضاعف ملاحظات ارتعاشی، در بسیاری از پژوهش‌های پیشین موضوع تحقیق قرار گرفته است. به عنوان نمونه لارسن و همکارانش [۲] در گزارشی مدون به روش‌های تحلیل مودال پره‌های توربین باد پرداخته‌اند. همچنین جنجل و احمد [۳] آنالیز مودال پره توربین باد را موضوع پژوهش خود قرار دادند. آنها اثر تغییرات هندسه و مواد بر رفتار ارتعاش را مورد توجه قرار دادند. کومار و پندی [۴] پره توربین گاز را مورد آنالیز مودال استاتیکی قرار دادند. همچنین در پژوهشی دیگر رحمانی و همکارانش [۵] پره‌های ردیف اول توربین گاز نیروگاه آستوم را مورد تحلیل مودال تجربی قرار داده‌اند؛ در این پژوهش‌ها تنها به تحلیل مودال پره‌ها پرداخته شده و دیسک توربین گاز مورد توجه قرار نگرفته است. بنابراین، در پژوهش حاضر، ابتدا اجزای دیسک و پره به صورت جداگانه و در ادامه دیسک به همراه یک پره، مورد تحلیل مودال قرار می‌گیرند و ملاحظات و نکات مربوط به انجام تست ذکر می‌گردد. همچنین از نرم‌افزار تحلیل اجزا محدود انسیس برای استخراج



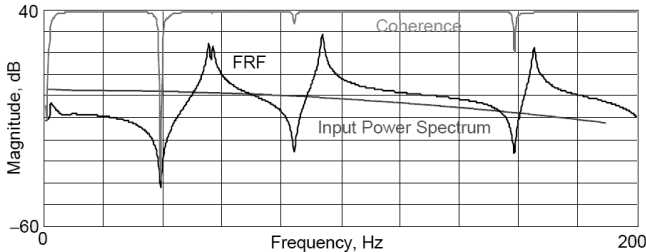
شکل ۱: نمای کلی آزمون با چکش به همراه تجهیزات اصلی مورد نیاز.

تجهیزات استفاده شده برای انجام آزمون ضربه بر روی توربین عبارتند از:  
۱. یک چکش ضربه همراه با سنسوری برای اندازه‌گیری نیروی ورودی و سر آن.

<sup>1</sup>fast Fourier transform



(الف)



(ب)

**شکل ۳:** نتایج آزمون ضربه: (الف) با تحریک مناسب در محدوده فرکانسی دلخواه، (ب) بدون تحریک مناسب در محدوده فرکانسی دلخواه.

متذکر می‌شود که فرکانس طبیعی توربین تا بازه ۶۴۰۰ هرتز بررسی و استخراج گردید و محدوده فرکانسی تحت بررسی ۰ تا ۶۴۰۰ هرتز بوده است. بنابراین در انجام آزمون چکش، باید سرچکش سخت انتخاب گردد، بگونه‌ای که همه مودها تحریک شوند و یک تابع پاسخ فرکانسی مناسب حاصل شود. نکته قابل توجه دیگر این است که تغییرات جای شتاب‌سنج‌ها، بصورت یک بار وزنی متغیر بر روی سازه تأثیر می‌گذارد. بار وزنی متغیر باعث جابجایی‌های متغیر در فرکانس‌های طبیعی می‌شود که باتوجه به وزن شتاب‌سنج نسبت به سازه می‌تواند دارای تأثیرات قابل توجهی باشد و یا اینکه قابل صرف‌نظر باشد. اگر تعداد کافی شتاب‌سنج در دسترس باشد، می‌توان آنها را در تمام درجات آزادی موردنظر سازه قرار داد که البته خود این امر باعث بار وزنی بزرگتر می‌گردد. از طرفی در این بار وزنی درجات آزادی در تمام پاسخ‌های فرکانسی، یکسان خواهد بود و در نتیجه یکنواختی<sup>۶</sup> در داده‌ها خواهیم داشت. بعلاوه اگر تعداد کانال‌های اندازه‌گیری، اجازه اندازه‌گیری همزمان همه پاسخ‌ها را فراهم نماید، زمان اندازه‌گیری مینیمم و یکنواختی ماکزیمم خواهد شد. البته در حالتی که محدودیت تعداد کانال‌ها و سنسورها اجازه اندازه‌گیری همزمان همه درجات آزادی را ندهد، می‌توان با اضافه کردن جرم‌هایی برابر جرم سنسور به نقاط اندازه‌گیری از تأثیر حرکت جرم سنسورها در طول سازه جلوگیری نمود.

## ۲ انجام تست مودال دیسک

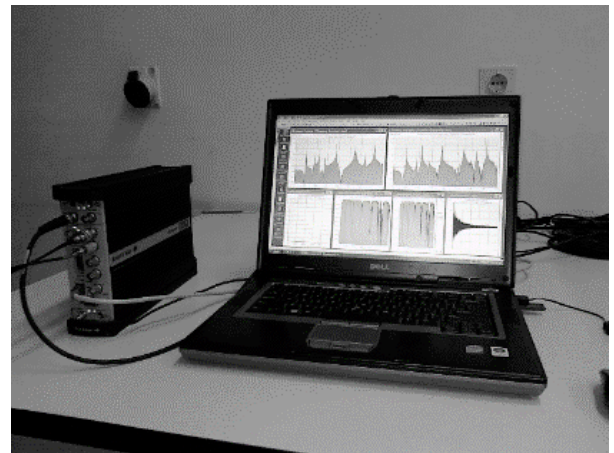
روشن است که برای انجام آزمون مودال و بدست آوردن پارامترهای مودال، به اندازه‌گیری حداقل یک سطر یا ستون ماتریس تابع پاسخ فرکانسی نیاز است. همچنین برای آزمون موفق ابتدا نیاز است بررسی‌های اولیه برای مشخص نمودن نقاط گره‌ای (نودها) انجام شود. در مورد دیسک تحت بررسی که در شکل ۴ نشان داده شده است با توجه به نوع سازه و تقارن آن و تحلیل آن به

۲ سنسور شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری شتاب پاسخ در نقاط و جهات مشخص.

۳ آنالیزور تبدیل فوریه سریع چهار کاناله بی اندکی<sup>۲</sup> به همراه نرم‌افزار پالس موازی و همراه آن، برای محاسبه توابع پاسخ فرکانسی.

۴ نرم‌افزار مودال پس‌پردازش آیکنس<sup>۳</sup> برای مشخص کردن پارامترهای مودال و نمایش شکل مودها.

اولین نکته‌ای که در انجام آزمون چکش توربین می‌بایست مورد توجه قرار گیرد، انتخاب سرچکش<sup>۴</sup> است که تأثیر مهمی در اندازه‌گیری انجام شده دارد. محدوده فرکانس تحریک ورودی با سختی سر انتخاب شده ارتباط مستقیم دارد. سر سخت‌تر موجب تحریک محدوده فرکانسی بزرگتری توسط نیروی تحریک می‌گردد. سرچکش باید بگونه‌ای انتخاب شود که تمام مودهای مورد نظر در محدوده فرکانسی را تحریک نماید. اگر یک سر نرم انتخاب شود، همه مودها بصورت مناسب تحریک نخواهد شد.



(الف)



(ج)

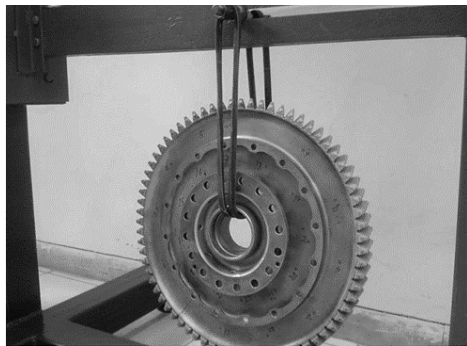


(ب)

**شکل ۲:** (الف) آنالیزور ۴ کاناله به همراه نرم‌افزار پالس مربوطه. (ب) چکش با ملحقهات آن (ج) سنسور شتاب‌سنج به همراه کابل اتصال.

شکل ۳ دو نمونه سیگنال تحریک، پاسخ فرکانسی و همبستگی متناظر آن را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۳ الف مشاهده می‌شود سیگنال ورودی ضربه سریعاً افت کرده درحالی که تبدیل فوریه سیگنال ضربه مناسب به صورت یک خط صاف است، همچنین روشن است که تابع پاسخ فرکانسی نیز در فرکانس‌های بالا همراه با نویز است، این مطلب در نمودار همبستگی<sup>۵</sup> نیز مشهود است. از طرف دیگر شکل ۳ ب کیفیت سیگنال مناسب در محدوده وسیع فرکانسی را نشان می‌دهد.

<sup>۲</sup>B & K <sup>۳</sup>ICATS <sup>۴</sup>hammer tip <sup>۵</sup>coherence <sup>۶</sup>consistency

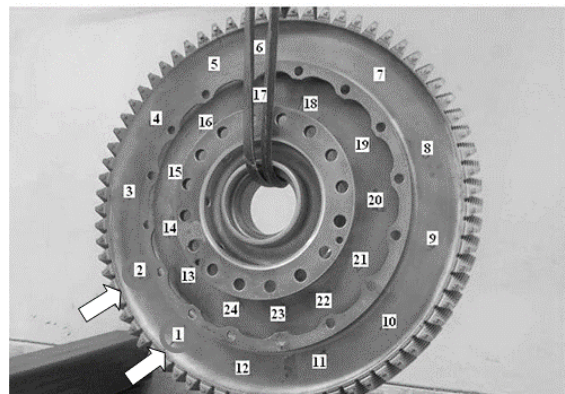


(الف)



(ب)

**شکل ۵:** تست دیسک بصورت آزاد: (الف) با استفاده از تسمه (ب) بر روی صفحه فومی.

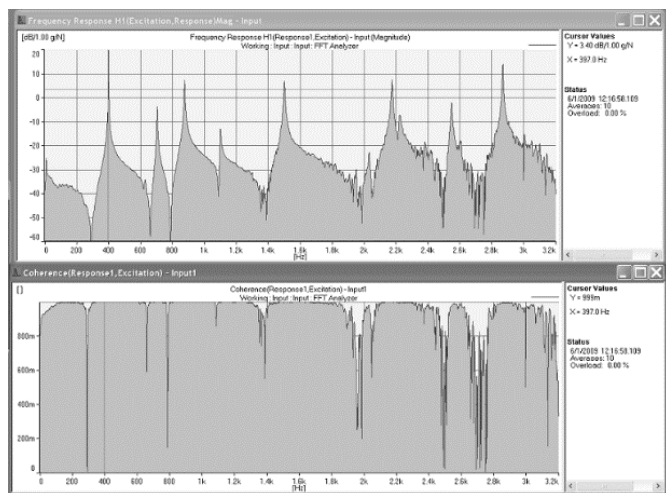


**شکل ۴:** دیسک تحت بررسی و نقاط اندازه‌گیری پاسخ.

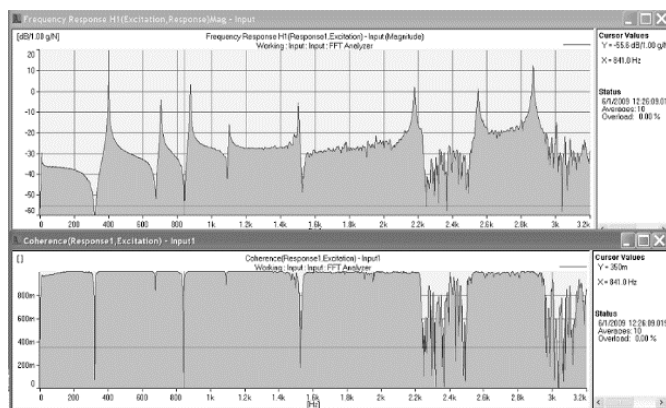
برای ایجاد تکیه‌گاه آزاد، سازه یک بار به کمک یک تسمه انعطاف‌پذیر آویزان شده و جهت تحریک عمود بر راستای آویزان شدن سازه انتخاب شد و در گام بعدی دیسک بر روی یک صفحه ضخیم فومی انعطاف‌پذیر قرار داده شد (شکل ۵).

پس از اعمال ضربه چکش، توابع پاسخ فرکانسی و همبستگی دیسک استخراج شد. در شکل ۶ این دو تابع در نقطه‌ای که تحریک و سنسور روی هم قرار دارند (نقطه ۱) و برای نقطه ۱۲ نمایش داده شده‌اند. همانگونه که در این شکل‌ها مشخص است در بازه فرکانسی ۲۰۰۰ تا ۳۲۰۰ هرتز تابع پاسخ فرکانسی دارای نویز زیادی است و تابع همبستگی در این بازه دچار افت شدید می‌گردد. لازم به توضیح است که تابع همبستگی مناسب در کل بازه اندازه‌گیری باید نزدیک به مقدار یک باشد. بنابراین با توجه به این دو شکل به نظر می‌رسد که نتایج تست انجام شده در بازه فرکانسی بیشتر از ۲۰۰۰ هرتز قابل اعتماد نیست. با توجه به نتایج تست به نظر می‌رسد اتصال دیسک توسط تسمه برای ایجاد حالت آزاد چندان مطلوب نیست.

در حالت دوم تکیه‌گاهی نیز سنسورها بر روی نقاط ۱ و ۲ ثابت شد و چکش بر روی نقاط مشخص شده حرکت نمود. در این حالت نیز توابع پاسخ فرکانسی و همبستگی بترتیب برای نقطه ۱ (نقطه‌ای که ضربه و سنسور بر هم منطبق هستند) و نقطه ۱۲ در شکل ۷ نمایش داده شده است. در این حالت در هر دو نقطه تابع پاسخ فرکانسی و تابع همبستگی در کل بازه اندازه‌گیری از کیفیت بسیار بالایی برخوردار بود. بازه اندازه‌گیری فرکانسی در این حالت تا ۶۴۰۰ هرتز انتخاب شد که بازه وسیعی از لحاظ تست مودال می‌باشد.



(الف)



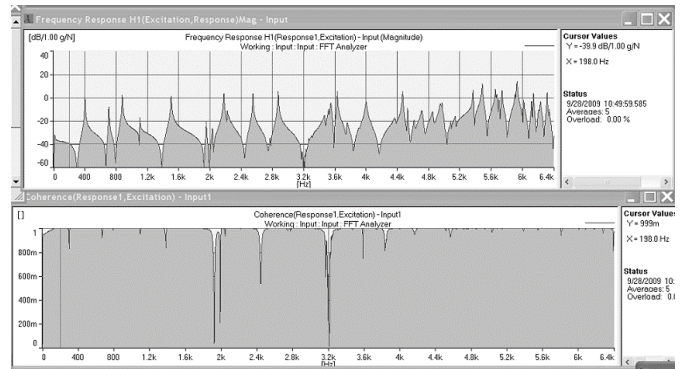
(ب)

**شکل ۶:** توابع پاسخ فرکانسی و همبستگی: (الف) برای نقطه ۱ دیسک، (ب) برای نقطه ۱۲ دیسک.

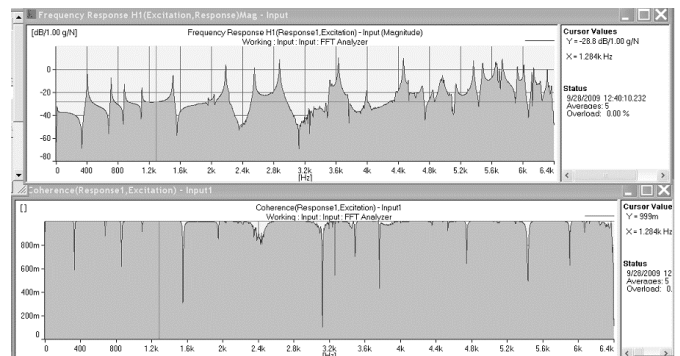


پره نیز به دو روش با تکیه‌گاه آزاد معلق و آزمایش گردید در یک حالت با استفاده از بند لاستیکی آویزان گردید و در حالت دیگر مانند دیسک بر روی صفحه فومی ضخیم قرار گرفت. بر خلاف دیسک تفاوت محسوسی در نتایج تست در این دو حالت مشاهده نشد. نوع آزمایش در این مورد، حالت ضربه ثابت و سنسور متحرک انتخاب گردید.

با توجه به شکل انحنای سطح پره، تحریک پره در نقاط مختلف نشان داده شده در شکل بررسی شد تا از عدم حذف مود بر اثر عدم انتخاب درست نقطه تحریک سازه اطمینان حاصل گردد. بطور مثال توابع پاسخ فرکانسی برای دو نقطه مجاور ۱۳ و ۱۴، در نزدیکی پای پره، در شکل ۹ نشان داده شده است. این نقاط تغییرات انحنا در پره زیاد است. در حالت اول سنسور در نقطه ۱۴ قرار گرفته و ضربه در همان نقطه وارد شده (شکل ۹ الف) و در حالت بعدی پاسخ و ضربه در نقطه ۱۳ قرار داده شد (شکل ۹ ب). مشاهده می‌شود که در نقطه ۱۴ برخی فرکانس‌ها نسبت به تحریک در نقطه ۱۳ به خوبی تحریک نشده‌اند.



(الف)



(ب)

**شکل ۷:** توابع پاسخ فرکانسی و همبستگی دیسک با تکیه‌گاه دوم: (الف) در نقطه ۱، (ب) در نقطه ۱۲.

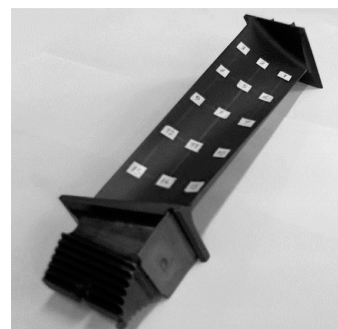
در جدول ۱، شش فرکانس اول حاصل از تست دیسک نشان داده شده است.

**جدول ۱:** فرکانس‌های طبیعی دیسک بدست آمده از تست بر حسب Hz.

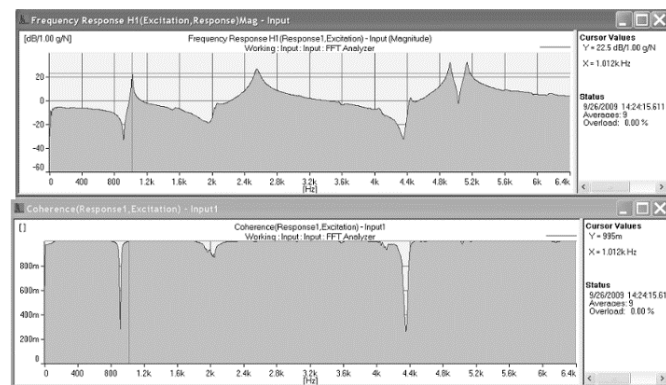
مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶
	۳۹۸	۷۰۳	۸۷۵	۱۰۹۹	۱۵۰۰	۱۹۵۱

### ۳ انجام تست مودال پره

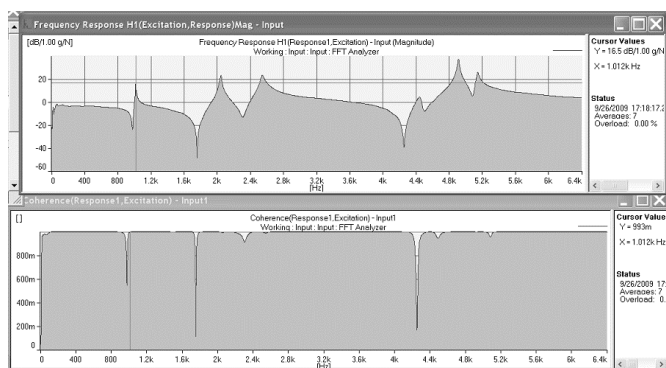
بر روی پره ۱۵ نقطه برای تست در نظر گرفته شده است تا بتوان به کمک این نقاط فرکانس‌های مختلف موجود در بازه اندازه‌گیری را مشاهده نمود. این نقاط بر روی هر دو سطح ایجاد شد و با ضربه بر روی نقاط مختلف دو سطح مشاهده شد نتایج مستقل از اندازه‌گیری بر روی سطح محدب و یا مقعر پره است. در شکل ۸ نقاط تست بر روی پره نشان داده شده است.



**شکل ۸:** نقاط مشخص شده برای تست بر روی پره



(الف)

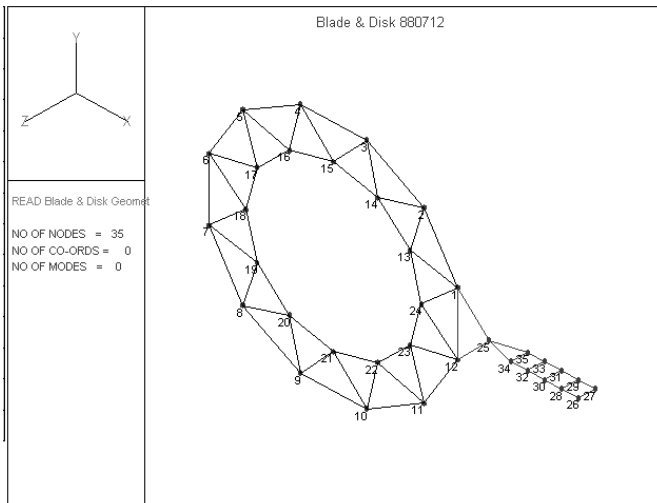


(ب)

**شکل ۹:** تحریک پره با استفاده از ضربه (الف) در نقطه ۱۴ و پاسخ در همان نقطه، (ب) در نقطه ۱۳ و پاسخ در همان نقطه.

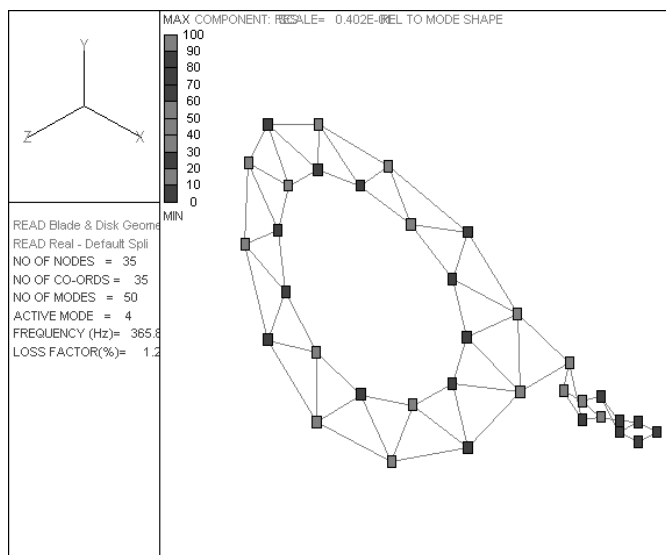
بطور مثال فرکانس دوم پره (حدود ۲۰۰۰ هرتز) که بر اساس مدل‌سازی مشاهده شده یک مود پیچشی است اما با توجه به موقعیت ضربه در حالت تحریک نقطه ۱۴ که بر روی خط مرکزی راستای طولی پره است این مود بصورت ضعیف تحریک شده است، در حالی که در نقطه ۱۳ فرکانس دوم حدود ۲۰۰۰ هرتز بسیار واضح است. همچنین فرکانس‌های بدست آمده از تحریک در نقطه ۱۳ کاملاً با فرکانس‌های بدست آمده برای پره از نتایج

آمده، نقاط میانی تست پره در شکل ۸ حذف گردید. بنابراین ۱۰ نقطه به عنوان نقاط تست روی پره باقی ماند. یک نقطه اضافی هم در محل ریشه دیسک انتخاب شد. بنابراین در مجموع ۳۵ نقطه به عنوان نقطه تست در مجموعه دیسک و پره وجود دارد. شکل ۱۱ هندسه تعریف شده مجموعه دیسک و پره برای برنامه مودش را نشان می‌دهد که نقاط این شکل بر اساس نقاط اندازه‌گیری تعریف شده‌اند.



شکل ۱۱: شکل هندسی مجموعه دیسک و پره تعریف شده برای برنامه مودش.

شکل ۱۲ نمونه‌ای از شکل مودهای بدست آمده از آزمون مودال تجربی را نشان می‌دهند. بعضی شکل مودهای مربوط به دیسک، بعضی به پره و بعضی هم به ترکیب دیسک و پره مربوط می‌شوند.



شکل ۱۲: شکل مود مجموعه دیسک و پره در حالت آزاد در فرکانس ۳۶۵ هرتز

## ۵ مقایسه نتایج مدل‌سازی با نتایج تست

در ادامه نتایج تحلیلی پره، دیسک و دیسک و پره ارائه می‌گردد و با نتایج بدست آمده از تست مقایسه می‌گردد. همچنین با توجه به اختلاف موجود بین نتایج تحلیل و تست اجزا، در صورت لزوم، با استفاده از تغییر مدول

مدل‌سازی در توافق است. بنابراین نقطه ثابت تحریک نقطه ۱۳ انتخاب شد و سنسور در نقاط مشخص شده حرکت نمود.

با استفاده از نرم‌افزار آیکتس بر اساس نتایج آزمون چکش، شکل مودهای پره نیز بدست آمده که در ادامه این نتایج ارائه خواهد شد.

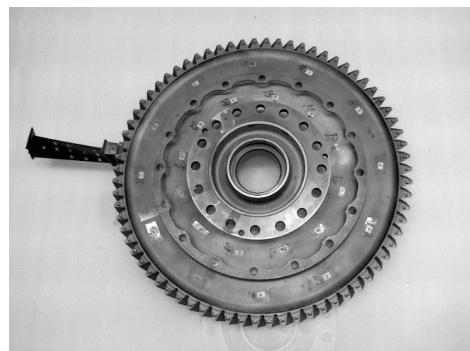
در جدول ۲، شش فرکانس طبیعی پره بدست آمده از تست نمایش داده شده است.

جدول ۲: فرکانس‌های طبیعی پره بدست آمده از تست برحسب Hz.

مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶
	۱۰۰۳	۲۰۷۳	۲۵۳۲	۴۴۲۸	۴۸۹۴	۵۰۵۷

## ۴ انجام تست مودال دیسک و یک پره

در ادامه دیسک و یک پره مطابق شکل ۱۰ سرهم شد و آزمون مودال بر روی آن انجام شد. اولین گام در جهت انجام تست برقراری اتصال قابل قبول بین ریشه پره می‌باشد. معیار ارزیابی اتصال مشاهده پاسخ فرکانسی مشابه در دو حالت قرارگیری سنسور شتاب‌سنج روی دیسک و روی پره و اعمال ضربه بر روی دیسک بوده است. به عبارت دیگر بعد از برقراری اتصال ابتدا سنسور بر روی دیسک قرار گرفت و با استفاده از آزمون ضربه بر روی دیسک پاسخ فرکانسی دیسک و پره بدست آمد. سپس سنسور بر روی پره گذاشته شد و در همان نقطه قبلی بر دیسک ضربه وارد آمد و مجدداً پاسخ فرکانسی مجموعه استخراج شد از مقایسه پاسخ فرکانسی بدست آمده در دو نقطه برای مجموعه می‌توان به مناسب بودن اتصال پی برد.



شکل ۱۰: دیسک و یک پره متصل به آن بر روی صفحه فومی.

پس از اطمینان از کیفیت اتصال، آزمون مودال در ۲۴ نقطه بر روی دیسک و ۷ نقطه بر روی پره انجام شد. تحریک بر روی دیسک قرار گرفت و یک سنسور در نقاط مختلف اندازه‌گیری پاسخ‌ها را ثبت نمود. در ادامه با استفاده از نرم‌افزار آیکتس سیگنال‌های بدست آمده جهت استخراج پارامترهای مودال دیسک و پره مورد استفاده قرار گرفت. در جدول ۳، هشت فرکانس اول مجموعه دیسک و یک پره نمایش داده شده است.

جدول ۳: فرکانس‌های طبیعی دیسک و پره بدست آمده از تست برحسب Hz.

مود	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
	۲۷۲	۳۶۶	۳۹۸	۷۳۰	۸۷۶	۱۱۰۰	۱۲۳۹	۱۷۹۵

همچنین برنامه مودش<sup>۷</sup> برای نمایش مودهای بدست آمده از آزمایش مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به کیفیت نتایج تست پره و شکل مودهای بدست

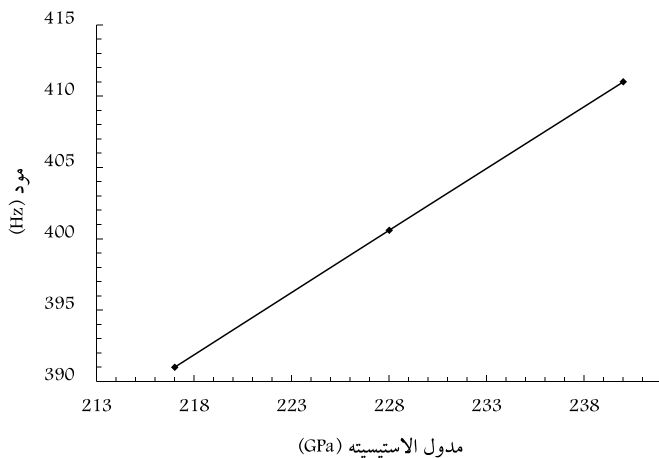
<sup>۷</sup>MODESH

معتبر در نرم‌افزار اعمال گردید. در گام بعدی نتایج تحلیل مودال دیسک در جدول ۵ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که نتایج بدست آمده از تحلیل با نتایج تست مودال تا حدی تفاوت دارد. با توجه به اینکه در نهایت مدل دیسک و پره به همراه هم مورد تحلیل قرار می‌گیرد در این‌جا تلاش می‌گردد تا حد امکان خطاهای موجود در مدل‌سازی اجزا دیسک و پره حذف گردد. در اینجا با تغییرات مدل الاستیسیته دیسک و در واقع با اصلاح این پارامتر سعی شده است که نتایج تست و تحلیل حتی‌الامکان به هم نزدیک گردد.

**جدول ۵:** مقایسه فرکانس‌های طبیعی دیسک در حالت تحلیلی با تست.

مُد	تحلیل با $E = 217 \text{ GPa}$ (Hz)	نتایج تست (Hz)	خطای نسبی (%)
۱	۳۹۱	۳۹۸	۱/۷
۲	۶۶۴/۳	۷۰۳	۵/۵
۳	۸۵۵	۸۷۵	۲/۳
۴	۱۰۶۰	۱۰۹۹	۳/۵
۵	۱۴۶۶	۱۵۰۰	۳/۶

برای اصلاح جنس دیسک، فرکانس طبیعی اول دیسک در سه مقدار متفاوت مدل الاستیسیته بر اساس تحلیل در انسیس، بدست آمده است. نمودار تغییرات فرکانس اول برای سه مقدار مدل الاستیسیته در نمودار شکل ۱۴ نمایش داده است. بر اساس این شکل نتایج بدست آمده از ضریب کشسانی ۲۲۸ گیگاپاسکال حداقل خطا در مود اول را ایجاد می‌کند.



**شکل ۱۴:** تغییرات فرکانس اول دیسک با تغییرات مدل کشسانی.

فرکانس‌های بدست آمده به ازای سه مقدار متفاوت ضریب کشسانی و تفاوت آنها با مقدار تست نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد که در کل مجموع قدر مطلق خطاها در حالتی که ضریب کشسانی ۲۲۸ گیگاپاسکال، کمترین مقدار است. نمودار شکل ۱۵ مقادیر فرکانس‌های طبیعی به ازای ضریب کشسانی‌های متفاوت نمایش داده شده است.

بنابراین طبق نتایج ارائه‌شده در تحلیل‌های بعدی از این مقادیر ضریب کشسانی به‌روزرشده استفاده می‌شود. در ادامه مدل دیسک و یک پره ساخته شد و مورد تحلیل مودال قرار گرفت. برای برقراری اتصال بین دیسک و پره از المان‌های تماسی استفاده شد که عملاً منجر به افزایش سفتی سازه می‌گردد.

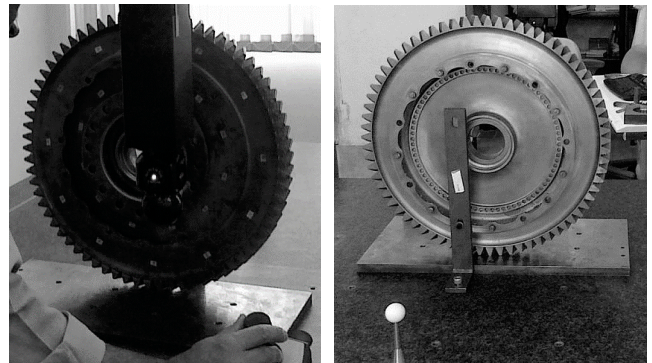
الاستیسیته نتایج تحلیلی به نتایج تست نزدیک می‌گردد و در واقع خواص مواد اصلاح می‌گردد. نتایج تحلیل مودال پره در انسیس در اینجا نمایش داده شده است. استقلال نتایج از مش با ریز کردن مش‌ها بررسی شد. در ادامه نتایج تست مودال در حالت آزاد با نتایج تحلیل مودال با استفاده از انسیس مقایسه شده است تا از صحت نتایج تحلیل اطمینان حاصل گردد. نتایج در جدول ۴ برای شش فرکانس اول پره ارائه شده است.

**جدول ۴:** مقایسه نتایج تست و تحلیل مودال پره.

مُد	مودهای تحلیلی (Hz)	نتایج تست (Hz)	خطای نسبی (%)
۱	۱۰۱۶/۳	۱۰۰۳	۱/۲
۲	۲۰۶۷/۱	۲۰۷۳	۰/۳
۳	۲۶۰۰/۶	۲۵۳۲	۲/۷
۴	۴۳۴۲/۵	۴۴۲۸	۱/۹
۵	۴۸۸۲	۴۸۹۴	۰/۲
۶	۵۱۴۳	۵۰۵۷	۱/۷

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۴ مشاهده می‌گردد که بیشترین خطای موجود بین نتایج تست و تحلیل ۲/۷ درصد است. بنابراین نتایج بدست آمده از تحلیل مودال پره قابل قبول به نظر می‌رسد.

نتایج تحلیل مودال دیسک در انسیس با مدل الاستیسیته ۲۱۷ گیگاپاسکال جدول ۵ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که ابعاد یک مقطع شعاعی از دیسک توسط ماشین اندازه‌گیری مختصات<sup>۸</sup>، اندازه‌گیری شد و با استفاده از ابعاد بدست آمده مدل دقیق دیسک بازتولید شد.



(ب)

(الف)

**شکل ۱۳:** اندازه‌گیری ابعاد دیسک با استفاده از ماشین اندازه‌گیری مختصات.

با توجه به این‌که هندسه دیسک از لحاظ ابعادی با دقت بسیار خوبی تهیه شده است، میزان جرم آن با میزان جرم دیسک که با استفاده از وزنه در آزمایشگاه بدست آمده است متفاوت می‌باشد. جرم واقعی دیسک در آزمایشگاه ۲۶/۲ کیلوگرم می‌باشد که با احتساب پیچ‌های بسته شده بر روی آن جرم خالص دیسک حدود ۲۶ کیلوگرم است با توجه به حجم دیسک مدل‌سازی شده، چگالی دیسک  $7980 \text{ kg/m}^3$  می‌باشد و با چگالی اولیه استخراجی از منابع برای جنس دیسک متفاوت می‌باشد و در واقع چگالی دیسک به‌روزرسانی شده است. لازم به یادآوری است که چگالی اولیه مفروض دیسک  $7980 \text{ kg/m}^3$  بود که با توجه به جنس آن و خواص مذکور در منابع

<sup>8</sup>coordinate measuring machine

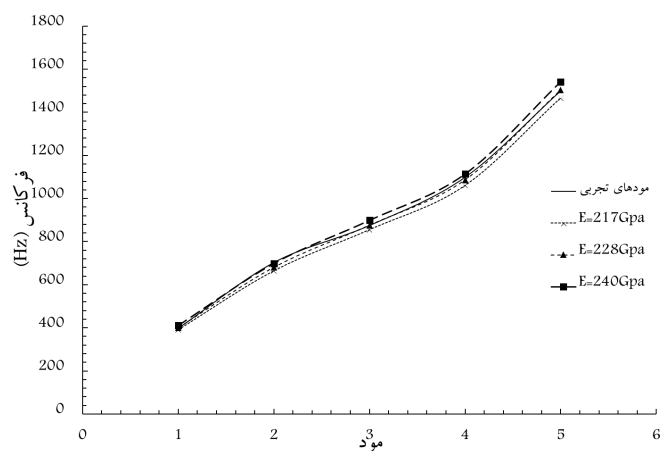
**جدول ۶:** تغییرات فرکانس‌های طبیعی تحلیلی دیسک و خطای آنها با تغییر مدول الاستیسیته.

خطای نتایج $E = 240 \text{ GPa}$ با تست (%)	تحلیل با $E = 240 \text{ GPa}$ (Hz)	خطای نتایج $E = 228 \text{ GPa}$ با تست (%)	تحلیل با $E = 228 \text{ GPa}$ (Hz)	خطای نتایج $E = 217 \text{ GPa}$ با تست (%)	تحلیل با $E = 217 \text{ GPa}$ (Hz)	نتایج تست مدول (Hz)	مود
۳/۳	۴۱۱	۰/۶	۴۰۰/۶	-۱/۷	۳۹۱	۳۹۸	۱
-۰/۶	۶۹۹	-۳/۱	۶۸۱	-۵/۵	۶۶۴/۳	۷۰۳	۲
۲/۷	۸۹۹	۰/۱۱	۸۷۶	-۲/۳	۸۵۵	۸۷۵	۳
۱/۴	۱۱۱۴	-۱/۲	۱۰۸۶	-۳	۱۰۶۰	۱۰۹۹	۴
۲/۸	۱۵۴۲	۰/۲	۱۵۰۳	-۲/۹	۱۴۶۶	۱۵۰۰	۵

## مراجع

- [1] Ewins, David J. *Modal testing: theory, practice and application*. Research Studies Press, second ed. , 2007.
- [2] Larsen, Gunner, Hansen, Morten, Baumgart, Andreas, and Carlen, Ingemar. *Modal analysis of wind turbine blades*, 01 2002.
- [3] Gangele, A. and Ahmed, S. Modal Analysis of S809 Wind Turbine Blade Considering Different Geometrical and Material Parameters. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 94:225, Oct 2013.
- [4] Kumar, Ravi Ranjan and Pandey, K. M. Static structural and modal analysis of gas turbine blade. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 225:012102, aug 2017.
- [5] Rahmani, Arash, Ghanbari, Ahmad, and Mohammadi, Ali. Experimental modal analysis of a first stage blade in alstom gas turbine. in *Advanced Development in Automation, Materials and Manufacturing*, vol. 624 of *Applied Mechanics and Materials*, pp. 303-307. Trans Tech Publications Ltd, 10 2014.
- [6] Mottershead, J.E. and Friswell, M.I. Model updating in structural dynamics: A survey. *Journal of Sound and Vibration*, 167(2):347 - 375, 1993.

به هرحال برای مدل‌سازی دقیق این اتصال نیاز به استفاده از فرآیندهای به‌روزرسانی است که در این پژوهش تمرکز بیشتر بر روی تست مدول مجموعه دیسک و پره با کمک نتایج مدل‌سازی بود.



**شکل ۱۵:** مقایسه نتایج کسب‌شده برای تحلیل مدول دیسک با تغییر مدول الاستیسیته و مقایسه آن با نتایج تست.

## ۶ نتیجه‌گیری

در نهایت و با توجه به نتایج تجربی می‌توان موارد زیر را در رابطه با آزمون مدول سازه‌هایی نسبتاً پیچیده همچون دیسک و پره بیان نمود. با توجه به پیچیدگی سازه‌ها بهتر است که اجزا سازه در ابتدا و به صورت مجزا مورد تحلیل مدول قرار گیرد تا برداشتی اولیه از شکل مود اجزا بدست آید. لازم به یادآوری است که شکل مودهای کل سازه، معمولاً ترکیبی از شکل مود اجزا سازه می‌باشد و شناخت شکل مود اجزا می‌تواند برای شناسایی نقاط گره‌ای مودها مؤثر باشد. همچنین تحلیل اجزا محدود نیز می‌تواند به انتخاب بهتر نقاط اندازه‌گیری و اعمال ضربه مناسب کمک کند. نکته مهم دیگر در رابطه با آزمون مدول انتخاب مناسب تکیه‌گاه است به نحوی که بتوان با حداقل نویز به بهترین شکل سازه را در محدوده فرکانسی وسیعی تحریک نمود. استفاده از سیگنال همبستگی در بررسی کیفیت توابع پاسخ فرکانسی استخراج‌شده بسیار مؤثر است.

همچنین توجه به این نکته ضروری است که نتایج آنالیز مدول تجربی می‌تواند برای اصلاح مدل اجزا محدود سازه نیز مورد استفاده قرار گیرد؛ فرآیندی که در دینامیک سازه تحت عنوان به‌روزرسانی مدل اجزا محدود [۶] مورد استفاده قرار می‌گیرد.