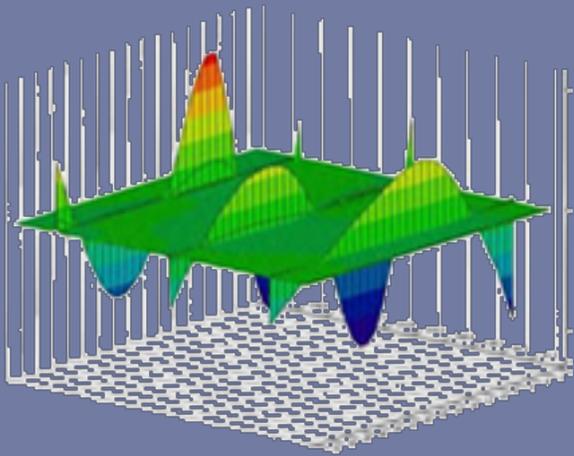
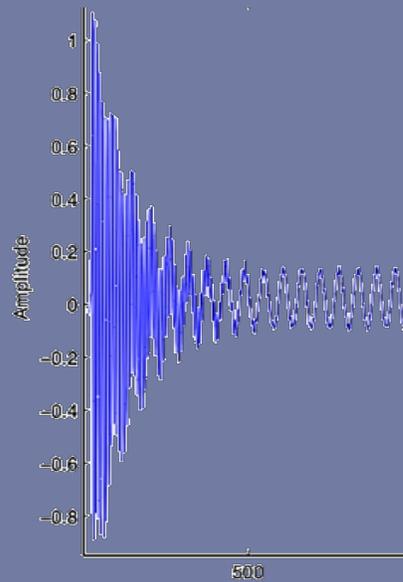


آموزش آنالیز مودال با دستگاه تحلیل گر

Vibro Rack 1000



عناوین

۱.....	مقدمه.....
۳.....	آنالیز مودال چیست؟.....
۶.....	تابع پاسخ فرکانسی (FRF) چیست؟.....
۱۳.....	تفاوت بین تست مودال با چکش و shaker چیست؟.....
۱۶.....	نکات اصلی اندازه‌گیری FRF با چکش چیست؟.....
۱۷.....	نکات اصلی استفاده از window چیست؟.....
۲۰.....	چگونه شکل مود ارتعاشی از FRF اندازه‌گیری شده به دست می‌آید؟.....
۲۳.....	آنالیز مودال عملیاتی چیست؟.....
۲۷.....	آنالیز مودال چه فایده‌ای دارد؟.....
۳۱.....	مدل المان محدود یک صفحه.....
۳۴.....	انجام تست مودال تجربی روی صفحه.....
۳۵.....	تنظیمات اندازه‌گیری FRF با VibroRack 1000.....
۳۹.....	معرفی نرم‌افزار ICATS.....
۴۳.....	آنالیز مودال در ICATS.....
۵۳.....	آنالیز مودال عملیاتی با ARTEMIS.....

مقدمه

تحلیلگر تست مودال^۱، برای اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی سازه‌ها به کار می‌رود. به کمک پاسخ فرکانسی هر سازه می‌توان فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی، سختی، اینرسی و شکل مودهای آن سازه را تعیین نمود. در واقع، تست مودال، تکنیکی تجربی برای بدست آوردن مدل مودال یک سیستم دینامیکی - ارتعاشی می‌باشد. انجام تست مودال، شامل اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی و یا پاسخ سازه به یک تحریک مشخص می‌باشد. این دستگاه از یک سنسور نیرو به صورت چکش پیزوالکتریک، حداقل یک شتاب‌سنج برای اندازه‌گیری پاسخ (خروجی سیستم)، یک تحلیلگر اندازه‌گیری ارتعاشات و یک کامپیوتر که نرم‌افزارهای تست و آنالیز مودال بر روی آن نصب می‌شود، تشکیل شده است.

آنالیز مودال، فرآیند تعیین خواص ذاتی دینامیکی یک سیستم در قالب فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها و بکارگیری آنها به منظور ایجاد مدلی ریاضی از رفتار دینامیکی سیستم می‌باشد، که به این مدل ریاضی، مدل مودال^۲ و به سیستم و اطلاعات مربوط به مشخصات آن، داده‌های مودال^۳ گفته می‌شود. آنالیز مودال بر این اصل استوار است که پاسخ ارتعاشی یک سیستم دینامیکی خطی را می‌توان بصورت ترکیب خطی مجموعه‌ای از حرکات هماهنگ ساده، که به شکل مودهای ارتعاشی موسوم اند، در نظر گرفت. این مفهوم، مشابه استفاده از ترکیب فوریه امواج سینوسی و کسینوسی برای نمایش یک شکل موج پیچیده می‌باشد. شکل مودهای ارتعاشی، وابسته به دینامیک سیستم بوده و توسط خواص فیزیکی (جرم، سختی، میرایی) و نحوه توزیع فضایی آنها، تعیین می‌شوند. هر مود، برحسب پارامترهای مودال مود مربوطه، شامل فرکانس طبیعی، ضریب میرایی مودال و الگوی جابجایی در آن مود، که شکل مود نامیده می‌شود، توصیف می‌گردد. شکل مود ممکن است حقیقی و یا موهومی باشد. هر مود، با یک فرکانس طبیعی متناظر است. میزان مشارکت هر مود طبیعی در ارتعاش کلی سیستم، به مشخصات منبع تحریک و همچنین به شکل مود مربوطه بستگی دارد.

تست مودال، تکنیکی تجربی برای بدست آوردن مدل مودال یک سیستم ارتعاشی خطی می‌باشد. مبنای تئوری این تکنیک بر اساس رابطه بین پاسخ ارتعاشی در یک نقطه از سازه با تحریک در همان نقطه و یا نقطه‌ای دیگر، بصورت تابعی از فرکانس تحریک است. این رابطه، که اغلب بصورت یک تابع ریاضی مختلط می‌باشد، تابع پاسخ فرکانسی^۴ (FRF) نامیده می‌شود. انجام تست مودال، شامل اندازه‌گیری‌ها و یا پاسخ ضربه سازه است. می‌باشد.

¹ Modal test analyzer

² Modal model

³ Modal data

⁴ Frequency Response Function (FRF)

تست مودال دارای کاربردهای متنوعی می‌باشد، که پیش از توصیف کامل دستگاه تحلیلگر تست مودال و به منظور درک بهتر، در زیر به برخی از آنها اشاره می‌شود:

۱- رفع اشکال:

منظور از رفع اشکال، بدست آوردن دید مهندسی به کمک اطلاعات مودال، در مورد دینامیک یک سازه مشکل‌زا می‌باشد. این موضوع، مهمترین کاربرد آنالیز مودال تجربی از بدو ایجاد آن و منشأ ظهور کاربردهای دیگر بوده است .

۲- تطابق مدل اجزای محدود^۵ با نتایج تجربی:

یکی دیگر از کاربردهای تست مودال، بدست آوردن مدل مودال با انجام اندازه‌گیری روی سازه می‌باشد و از آن برای تطابق با مدل اجزای محدود، به منظور به‌روز رسانی آن، استفاده می‌گردد .

۳- اصلاح سازه:

در اصلاح سازه، تغییراتی روی جرم، سختی و یا میرایی سیستم دینامیکی انجام می‌شود. بالتبع این تغییرات رفتار دینامیکی سیستم را تغییر خواهد داد. با استفاده از مدل مودال سیستم، شبیه سازی و پیش‌بینی رفتار سیستم در حالات مختلف امکان‌پذیر خواهد بود .

۴- تحلیل حساسیت:

به کمک مدل مودال یک سیستم دینامیکی، می‌توان حساسیت پارامترهای مودال سازه را نسبت به ایجاد تغییر در هر یک از پارامترهای فیزیکی سیستم، پیش‌بینی نمود .

۵- پیش‌بینی پاسخ:

پس از تعیین مدل مودال یک سازه، امکان پیش‌بینی پاسخ سازه به هر نوع نیروی خارجی وجود دارد .

۶- تشخیص عیوب سازه‌ای:

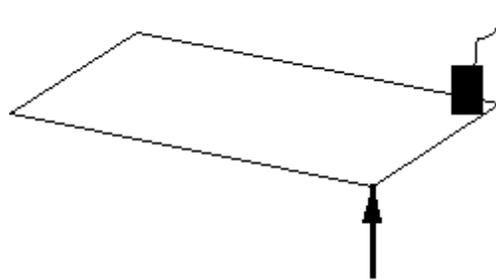
مبانی تئوری کاربرد آنالیز مودال در تشخیص عیوب سازه‌ای بر اساس این واقعیت است که پاسخ دینامیکی سازه در اثر ایجاد عیوب، تغییر خواهد کرد. این امر، امکان تعیین آسیب روی سازه را به کمک بررسی تغییر پاسخ سازه قبل و بعد از ایجاد آن، فراهم می‌آورد.

از آنجا که اغلب کارشناسانی که با مقوله ارتعاشات سرو کار دارند، در مورد اصول موثر بر ارتعاشات و مودهای ارتعاشی هر سازه با سوالاتی مواجه می‌شوند، مجموعه‌ای مختصر و کاربردی و به دور از پیچیدگی‌های ریاضی در این زمینه گردآوری شده است. با استفاده از این مجموعه کاربر می‌تواند با مبانی اصلی مطرح در آنالیز مودال آشنا شده و به صورت کاربردی با روش اعمال آن آشنا شود.

⁵ Finite element model

۱. آنالیز مودال چیست؟

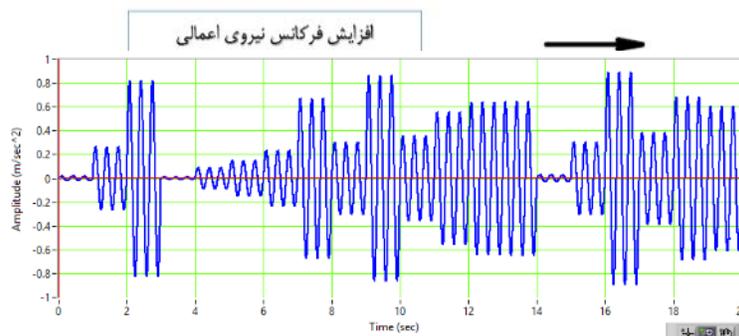
آنالیز مودال فرآیندی است که رفتار دینامیکی یک سازه بر اساس فرکانس های طبیعی، میرایی^۶ (استهلاک) و شکل مودهای هر فرکانس طبیعی، توصیف می شود. برای بیان ساده این مفهوم، صفحه ای فولادی مطابق شکل (۱) را در نظر بگیرید که در حال ارتعاش است :



شکل (۱). ارتعاشات یک صفحه فولادی

فرض کنید که در نقطه اعمال نیرو یک نیرو با دامنه ثابت و فرکانس معین به صفحه اعمال گردد و بتوان فرکانس نیرو را تغییر داد. نیروی ورودی کاملاً سینوسی در نظر گرفته می شود. در طرف دیگر صفحه نیز یک شتاب سنج وصل شده است که ارتعاشات صفحه در اثر نیروی نوسانی سینوسی را اندازه گیری و ذخیره می نماید...

حال با حفظ دامنه ثابت نیرو، برای مثال در دامنه ۱۰ نیوتن، فرکانس نوسان نیرو افزایش می یابد. برای مثال فرکانس اعمال نیرو از ۱۰ هرتز تا ۵۰۰ هرتز تغییر کرده و در این بازه، ارتعاشات صفحه اندازه گیری می شود. ارتعاشات اندازه گرفته شده از طریق تحلیلگر به کامپیوتر منتقل شده و نوسانات آن در نرم افزار مطابق شکل (۲) قابل مشاهده خواهد بود:



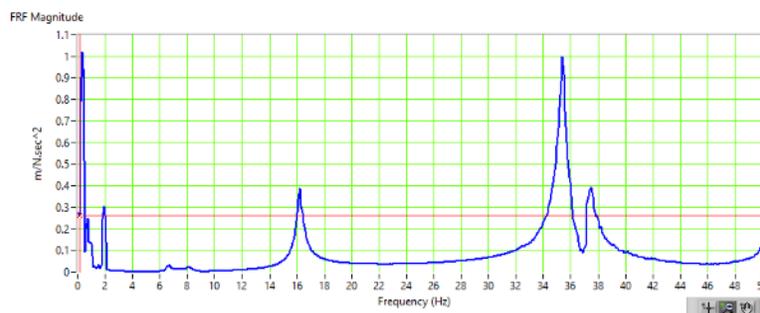
شکل (۲). ارتعاشات صفحه فولادی تحت اعمال نیروی سینوسی

⁶ Damping

از بررسی ارتعاشات صفحه در شکل (۲) می توان مشاهده نمود که دامنه ارتعاشات صفحه فولادی در بازه فرکانسی تعیین شده، در بعضی فرکانسها افزایش یافته و مجدداً با پیشروی فرکانس کاهش می یابد. این مسأله در نگاه اول غیرعادی به نظر می رسد که دامنه ارتعاشات با افزایش فرکانس و با وجود اعمال نیروی ثابت (یعنی نیروی ثابت ۱۰ نیوتن در بازه فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۵۰۰ هرتز) در برخی بازه ها افزایش و در بعضی کاهش می یابد.

در واقع همانطور که از شکل (۲) می توان دریافت، دامنه ارتعاشات صفحه، تابعی از فرکانس نیروی اعمالی به آن صفحه می باشد. علت این مسأله مفهوم تشدید یا رزونانس می باشد. در واقع دامنه ارتعاشات تابعی از نرخ نوسان نیرو (فرکانس نیرو) بوده و هر چقدر که فرکانس نیرو به یکی از فرکانسهای طبیعی سیستم نزدیکتر می شود، دامنه ارتعاشات بیشتر شده تا در فرکانس طبیعی حداکثر لرزش و ارتعاشات به وقوع می پیوندد. سپس با پیشروی و دور شدن فرکانس نیرو (فرکانس تحریک) دامنه ارتعاشات کاهش می یابد تا دوباره به یکی از فرکانس های طبیعی سیستم نزدیک گردد. این موضوع جالب ترین مسأله آنالیز مودال است که چگونه با وجود اعمال نیروی ثابت، ارتعاشات در فرکانسهای مختلف، تغییر می یابند.

نمودار سیگنال ارتعاشی بر حسب زمان مطابق شکل (۲) اطلاعات مفیدی از ارتعاشات صفحه ارائه می نماید. اما با اعمال تبدیل فرکانسی (FFT) و بردن سیگنال از حوزه زمان به حوزه فرکانس داده های ارزشمندتری به دست خواهد آمد که به آن تابع پاسخ فرکانسی^۷ (FRF) می گویند. این تابع برای سیگنال ارتعاشی صفحه فولادی بیان شده در مثال بالا مطابق شکل (۳) رسم خواهد شد.

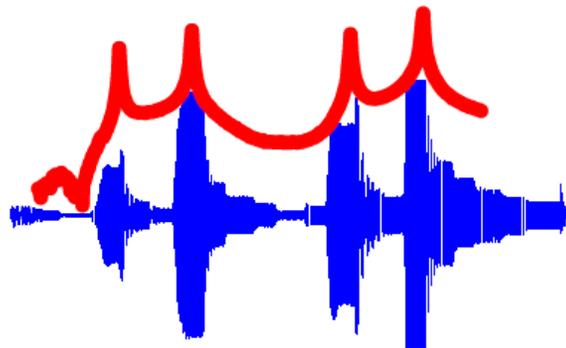


شکل (۳). پاسخ فرکانسی صفحه فولادی

در این شکل قله هایی وجود دارد که هر کدام از آنها مربوط به یکی از فرکانسهای طبیعی سیستم می باشد. در واقع این قله ها در فرکانسهایی اتفاق می افتند که در آنها پاسخ ارتعاشی سیستم به میزان قابل توجهی افزایش یافته است.

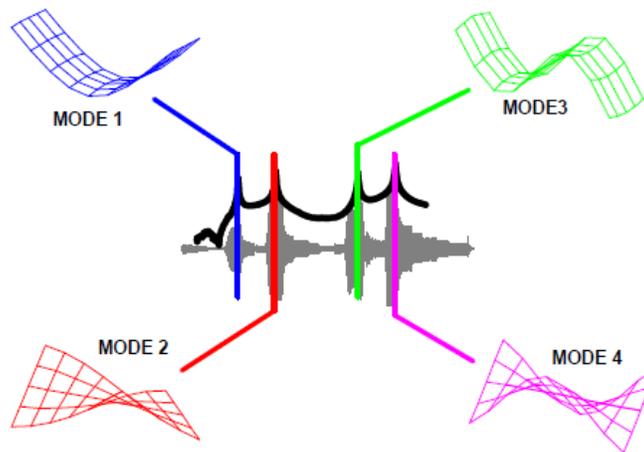
⁷ Frequency response function

حال اگر هر دو شکل (۲) و (۳) را روی هم رسم شود، مطابق شکل (۴) مشاهده می شود که وقتی فرکانس نیروی اعمالی به صفحه به قله های خود شکل (۳) رسیده است، دامنه ارتعاشات نیز در حداکثر میزان خود (شکل-۲) قرار دارد. البته برای یافتن این فرکانسهای طبیعی استفاده از تابع پاسخ فرکانسی به جای سیگنال زمانی ساده تر خواهد بود.



شکل (۴). برهم نهی سیگنال زمانی و پاسخ فرکانسی

نکته جالب توجه دیگر این است که شکل و الگوی ارتعاشات جسم در هر یک از این فرکانسهای طبیعی با الگوی فرکانس های طبیعی دیگر متفاوت خواهد بود. حال فرض نمایید که هدف رسم شکل مودهای هر یک از این فرکانسهای طبیعی باشد. برای بررسی این موضوع ۴۰ شتاب سنج به صورت عمودی و افقی با فاصله یکنواخت روی صفحه نصب می گردد. حال با رسم ارتعاشات هر یک از شتاب سنجها در هر فرکانس به صورت جداگانه می توان شکل مود هر فرکانس طبیعی را مطابق شکل (۵) مشاهده نمود.



شکل (۵). شکل مودهای ۴ فرکانس طبیعی اول صفحه فولادی

شکل (۵) الگوی تغییر شکل مود سازه در هر یک از فرکانسهای طبیعی سیستم را نشان می دهد. با تحریک سازه در اولین فرکانس طبیعی آن، شکل آبی روی شتاب سنج ها مشاهده خواهد شد (mode ۱). با افزایش فرکانس ارتعاشات به دومین فرکانس طبیعی، الگوی ارتعاشات صفحه به مود دوم با رنگ قرمز تغییر شکل داده و به همین ترتیب مودهای سوم و چهارم که با رنگ های سبز و بنفش مشخص خواهند شد. به این الگوهای ارتعاشی شکل مود^۸ هر فرکانس می گویند.

در هر سازه و ماشینی که طراحی می شود، فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی وجود دارد. در واقع مقدار این فرکانس ها و شکل مودها تابعی از مقدار و توزیع سختی و اینرسی سازه می باشد. هر طراح باید این فرکانسهای طبیعی و شکل مودها را در سازه خود تعیین و چگونگی شرایط احتمالی تحریک این فرکانسها را تحلیل نماید.

بر این اساس، آنالیز مودال مطالعه و استخراج فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای یک سازه محسوب می شود. فهم فرکانسهای طبیعی و شکل مودهای یک سازه برای طراحی آن که تحت نیروهای دینامیکی است، بخشی جداناپذیر از فرآیند طراحی هر سازه به شمار می آید. از آنالیز مودال در طراحی سازه های دینامیکی مانند خودرو، هواپیما، راکت تنیس، فضاپیما و بسیاری موارد دیگر استفاده می شود. در ادامه به بررسی دقیق تر تابع پاسخ فرکانسی پرداخته خواهد شد.

۲. تابع پاسخ فرکانسی (FRF) چیست؟

تابع پاسخ فرکانسی به بیان ساده نسبت پاسخ خروجی یک سازه به نیروی ورودی در فرکانسهای مختلف است. در یافتن تابع پاسخ فرکانسی، نیروی اعمالی به سازه و پاسخ ارتعاشی سازه هر دو به صورت همزمان اندازه گیری می شود. این پاسخ می تواند به یکی از سه شکل جابه جایی، سرعت و یا شتاب اندازه گیری شود. در ادامه سیگنال زمانی اندازه گیری شده توسط نرم افزار با استفاده از تبدیل فوریه به حوزه فرکانس انتقال می یابد. نتیجه بدست آمده از تبدیل فوریه سیگنال زمانی ارتعاشات یک عدد مختلط به ازاء هر فرکانس است که شامل یک بخش حقیقی و یک بخش موهومی می باشد که به بیان دیگر دارای یک دامنه و فاز است.

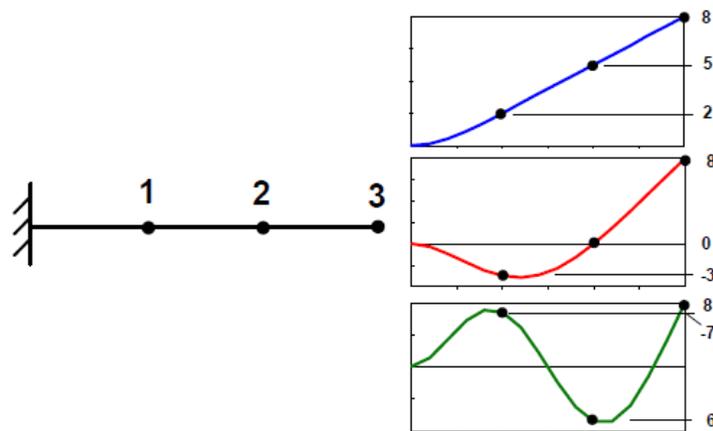
$$Z = x + iy = \rho e^{i\theta}$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}, \theta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{y}{x}\right)$$

به عنوان مثال یک تیر ساده را مطابق شکل (۶-الف) در نظر بگیرید که در سه نقطه، ارتعاشات آن اندازه گیری شده است. در واقع ارتعاشات تیر را با سه درجه آزادی تقریب زده و سه شکل مود و سه فرکانس طبیعی برای

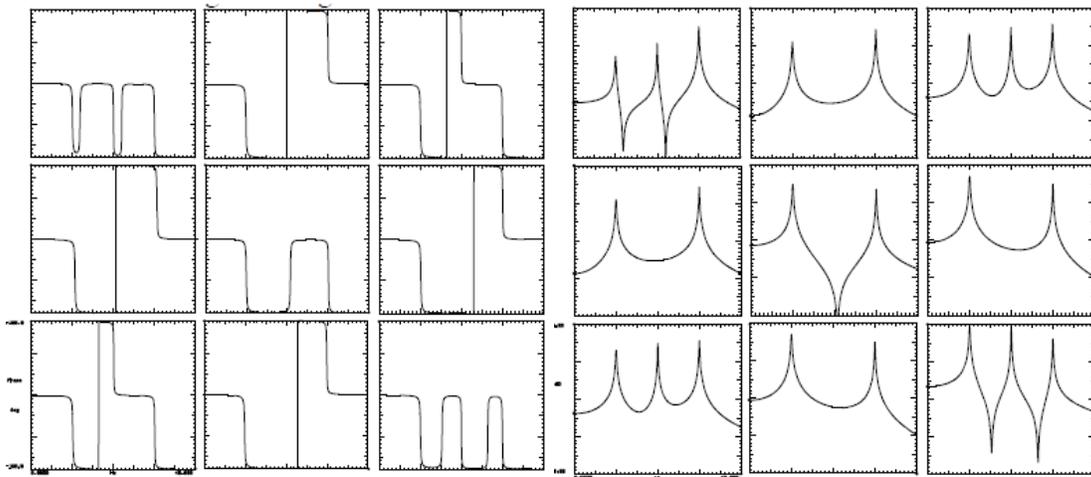
⁸ Mode shape

آن استخراج شده است. بنابراین ۹ تابع فرکانسی مختلط برای این مدل سه درجه آزادی می‌بایست تهیه شود که به آن ماتریس پاسخ فرکانسی یا H می‌گویند. هر المان از ماتریس پاسخ فرکانسی را در بیشتر کتابها با حرف $H_{x,y}$ نشان می‌دهند که در آن x شماره درجه آزادی است که در آن درجه آزادی پاسخ اندازه‌گیری شده و y شماره درجه آزادی است که در آن نیرو اعمال شده است. به عنوان مثال $H_{1,2}$ یعنی پاسخ فرکانسی زمانی که نیرو به نقطه ۲ وارد شده و سنسور ارتعاشات در نقطه ۱ نصب شده است.



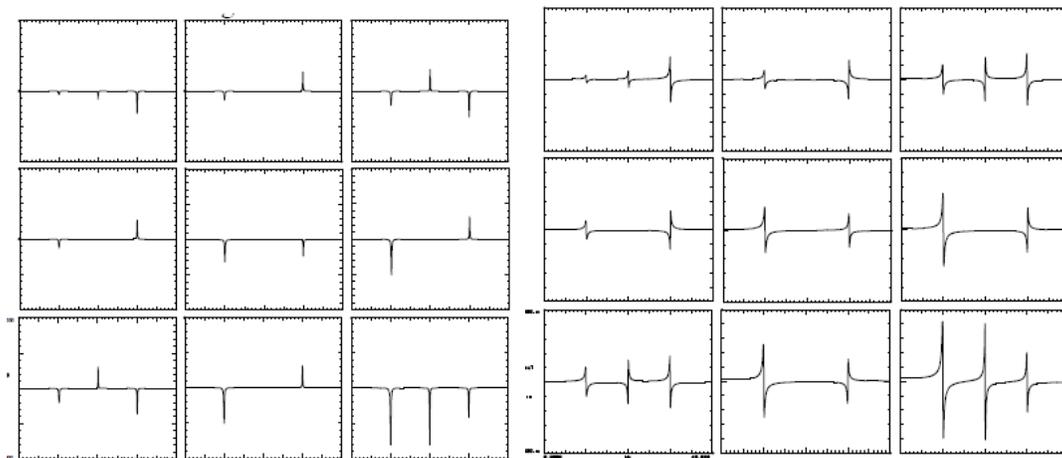
شکل (۶-الف). مدل سه درجه آزادی تیر یک سرگیردار

شکل های (۶-ب تا ۶-ه) قسمت‌های حقیقی، موهومی، فاز و دامنه یک ماتریس پاسخ فرکانسی را نشان می‌دهد. البته همان طور که ذکر شد، هر عدد مختلط دارای دو بخش حقیقی و موهومی است که آن را می‌توان به سادگی به صورت یک دامنه و فاز نیز نشان داد. از آنجا که تابع پاسخ فرکانسی یک برداری از اعداد مختلط است می‌توان از زوایای گوناگون به آن نگاه کرده و آنرا تفسیر نمود. حال به هر یک از این اندازه‌گیری‌ها نگاهی نموده و سعی در تفسیر نتایج آن می‌نماییم.



شکل (۶-ب) دامنه FRF

شکل (۶-ج) فاز FRF



شکل (۶-د) مقدار حقیقی FRF

شکل (۶-ه) مقدار موهومی FRF

در ابتدا تیر، با استفاده از چکش مودال در نقطه 3 تحریک می شود (ضربه زده می شود). چکش مودال چکشی است که در نوک آن یک نیروسنج پیزوالکتریک قرار دارد و نیروی ورودی به سازه را اندازه گیری می نماید. پاسخ ارتعاشات نیز به کمک یک شتاب سنج در همان نقطه 3 اندازه گیری می گردد. به این اندازه گیری $H_{3,3}$ گفته می شود. به این نوع اندازه گیری که در آن پاسخ خروجی و تحریک ورودی در یک نقطه است یعنی اندیس سطر و ستون پاسخ فرکانسی یکسان است، Point FRF می گویند و دارای خواص مهمی نسبت به سایر FRF ها است که به شرح زیر می باشد:

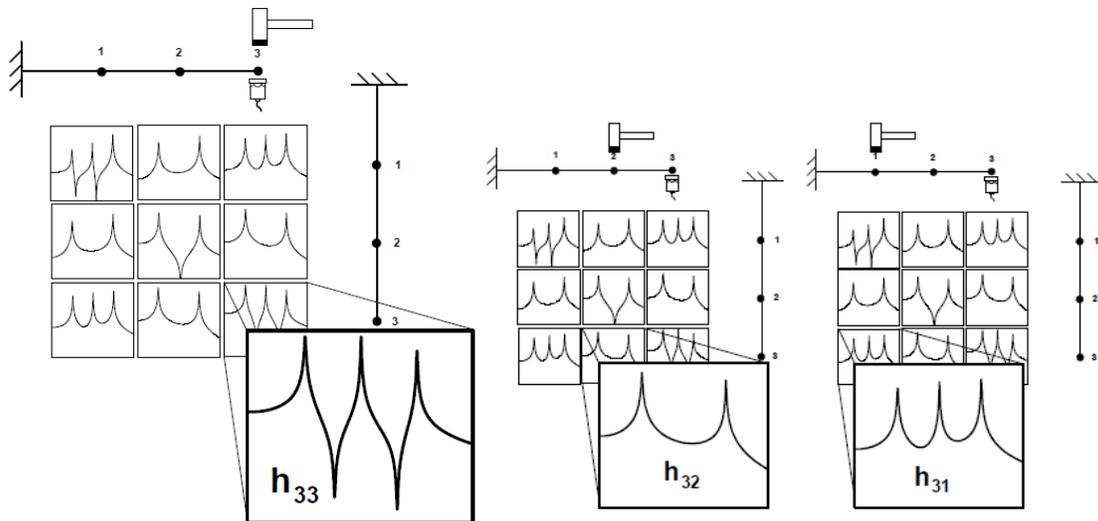
- ✓ همه رزونانس‌ها (قله‌ها) با یک آنتی‌رزونانس (دره) از هم جدا شده‌اند.
 - ✓ با عبور از هر رزونانس 180 درجه فاز کم می‌شود و با عبور از هر آنتی رزونانس فاز 180 درجه افزایش می‌یابد.
 - ✓ در مورد قله‌های بخش موهومی، پاسخ فرکانسی در هر دو طرف یک رزونانس به یک جهت می‌باشند، یعنی اگر پیش از رزونانس منفی است، پس از رزونانس نیز منفی خواهد بود.
- بنابراین به همین شکل اندازه‌گیری‌ها ادامه می‌یابد و دو ضربه دیگر در نقاط 1 و 2 زده می‌شود و شتاب نقطه 3 اندازه‌گیری می‌شود. در ادامه، شتاب سنج به نقطه 2 انتقال یافته و سه ضربه در نقاط 1، 2 و 3 زده شده و داده‌ها اندازه‌گیری می‌شود. همین روند برای نقطه یک نیز طی می‌گردد. در پایان 9 پاسخ فرکانسی اندازه‌گیری شده است که هر کدام مربوط به اعمال نیرو در یک نقطه و اندازه‌گیری در یک نقطه است. پس ماتریس پاسخ فرکانسی به صورت زیر در می‌آید.

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix}$$

نکته مهمی که باید ذکر شود آن است که بر اساس فرض رفتار دینامیکی خطی سازه‌ها در آنالیز مودال، ماتریس پاسخ فرکانسی یک ماتریس متقارن است و برای هر ماتریس متقارن داریم:

$$H_{xy} = H_{yx}$$

بنابراین برای انجام آنالیز مودال لزوماً نیاز نیست کلیه اندازه‌گیری‌ها انجام شود و از برخی از آنها می‌توان یکبار اندازه‌گیری نمود و در ماتریس قرار داد. سوالی که در اینجا پیش خواهد آمد این است که آیا لازم است همه پاسخ فرکانسیهای ممکن را برای اندازه‌گیری فرکانسهای طبیعی و رسم شکل مودها انجام داد یا خیر؟ همان طور که بیان شد، به اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی که در آن نقطه تحریک (اعمال نیرو) و نقطه خروجی (اندازه‌گیری ارتعاشات) یکسان باشد، **FRF point** گفته می‌شود. همچنین به اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی که در آن نقطه تحریک (اعمال نیرو) و نقطه خروجی (اندازه‌گیری ارتعاشات) یکسان نباشد، **Cross FRF** می‌گویند. در شکل (۷) **Cross FRF** های نقطه ۳ نشان داده شده است که در آن شتاب سنج روی نقطه ۳ نصب شده است و ضربه به نقاط ۱ و ۲ اعمال می‌گردد.

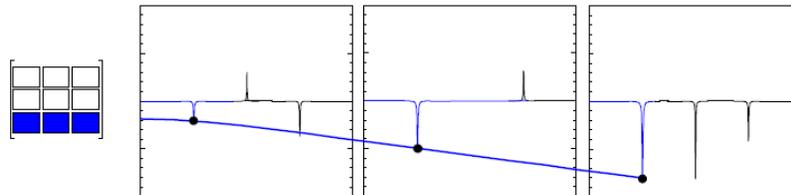


شکل (7-ب) Point FRF 3 نقطه

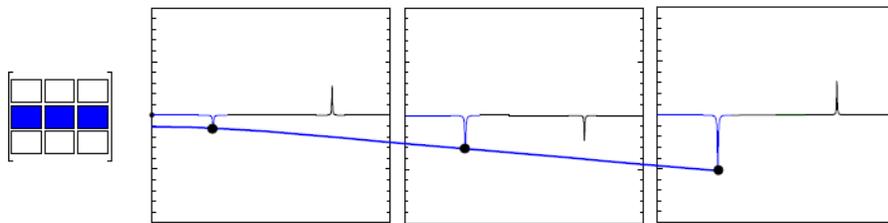
شکل (7-الف) Cross FRF 3 نقطه

۳. چرا برای آنالیز مودال تنها یک سطر یا ستون از ماتریس **FRF** نیاز است؟

یکی از مهم ترین نکات در آنالیز مودال این است که بتوان از اندازه گیری پاسخ فرکانسی **FRF** به شکل مودها دست پیدا کرد. در این بخش به توضیح نحوه این دستیابی پرداخته خواهد شد. با توجه به سطر سوم ماتریس **H**، ابتدا اولین مود ارتعاشی بررسی خواهد شد. با نگاهی به اولین قله در قسمت موهومی پاسخ فرکانسی اولین فرکانس طبیعی را می توان طبق شکل (8-الف) مشاهده کرد. یک روش سریع برای استخراج شکل مود، اندازه گیری دامنه پاسخ فرکانسی در یک فرکانس طبیعی (قله **FRF**) برای نقاط مختلف است.

شکل (8-الف) مود اول از سومین سطر ماتریس **FRF**

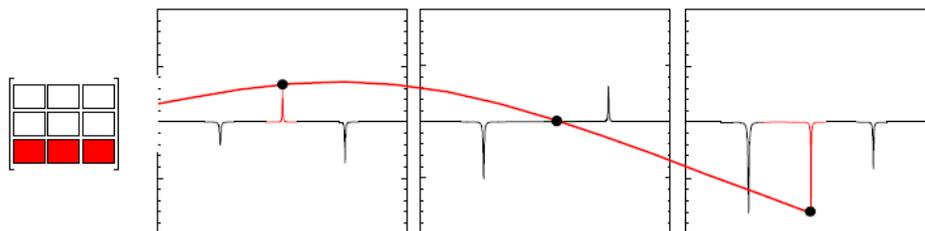
حال با توجه به شکل (۸-ب) به سطر دوم ماتریس پاسخ فرکانسی نگاه کنید و همچنان روی مود ۱ تمرکز نمایید. با مشاهده قله در دامنه بخش موهومی تابع پاسخ فرکانسی، به آسانی مود ۱ را می توان از این سطر نیز شناسایی نمود.



شکل (۸-ب) مود اول از دومین سطر ماتریس FRF

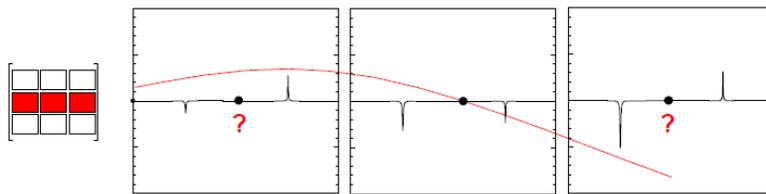
به طریق مشابه برای رسم شکل مود اول میتوان از اولین سطر ماتریس H نیز استفاده نمود. این مثال تصویری شکل ساده شده ای از این تئوری است که با داشتن یک سطر یا ستون از ماتریس پاسخ فرکانسی می توان شکل مود هر مود را رسم نمود.

حال در شکل (۸-ج) تمرکز خود را روی دومین مود ارتعاشی صفحه گذاشته و به سطر سوم ماتریس H توجه نمایید. بار دیگر به همان صورت می توان مود دوم را نیز از روی پاسخ فرکانسی شناسایی نمود.



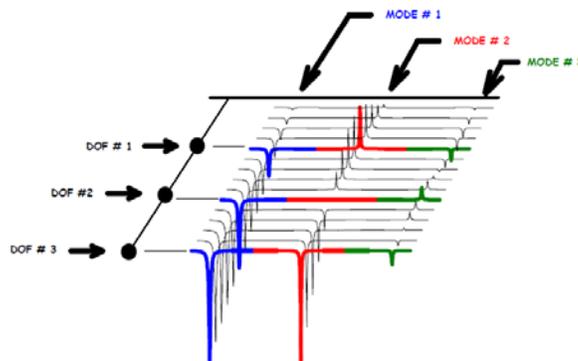
شکل (۸-ج) مود دوم از سومین سطر ماتریس FRF

با توجه به سطر دوم ماتریس پاسخ فرکانسی و تمرکز روی فرکانس طبیعی دوم در شکل (۸-د) مشاهده می شود که دامنه ای در مود دوم موجود نیست (مقدار تابع H صفر است). این مساله طبیعی است، زیرا نقطه دوم گره (node) مود دوم است. به نقطه ای که در یک فرکانس طبیعی و شکل مود ارتعاشی هیچ جابه جایی ندارد، گره یا Node آن مود گفته می شود. در اینجا نقطه دوم تیر برای مود دوم ارتعاشی آن گره یا نود است در نتیجه هنگامیکه ما ارتعاشات نقطه دو را اندازه گیری نموده و به نقاط دیگر ضربه زدیم هیچ ارتعاشی در فرکانس مود ۲ اندازه گیری نشد.



شکل (۸-۵) مود دوم از دومین سطر ماتریس FRF

در اینجا نکته مهمی که وجود دارد آن است که نقطه مرجع که برای اندازه‌گیری سطر یا ستونی از ماتریس پاسخ فرکانسی روی گره یک مود باشد شکل آن مود در نتایج مشاهده نمی‌شود. پس برای اندازه‌گیری ماتریس پاسخ فرکانسی باید از نقطه ای به عنوان مرجع استفاده نمود که گره هیچ کدام از مودهای مدنظر نباشد. به ویژه این مساله در مورد تست Roving hammer کاربرد دارد. تستی که در آن شتاب سنج در یک نقطه ثابت از سازه قرار می‌گیرد و با چکش به نقاط مختلف ضربه زده می‌شود. هر کدام از این ضربات به درجات آزادی، یک پاسخ فرکانسی H_{x_i} خواهد بود و در نهایت یک سطر یا ستون از ماتریس پاسخ فرکانسی به دست می‌آید. در مثال بالا فقط از سه درجه آزادی برای تقریب مدل دینامیکی تیر مورد نظر استفاده شد. اما با افزودن تعداد درجات آزادی و بالتبع نقاط اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی شکل مودها با وضوح بهتری معلوم می‌شوند که در شکل (۹) نشان داده شده است. در این شکل، ۱۵ تابع پاسخ فرکانسی در امتداد سه نقطه مثال قبل قابل مشاهده می‌باشد. این ۱۵ تابع پاسخ فرکانسی به صورت دیاگرام آبشاری نمایش داده شده اند. به کمک این نوع شکل به آسانی می‌توان شکل مودها را به کمک بخش موهومی تابع پاسخ فرکانسی یعنی FRF رسم نمود. تا کنون تمام نکاتی که ذکر شد در ارتباط با تست مودال به کمک چکش بود، این در حالی است که اگر تست مودال به کمک یک محرک ارتعاشی (shaker) انجام شود، مساله کمی فرق خواهد کرد. در بخش های بعد به این مساله پرداخته خواهد شد.



شکل (۹). نمایش آبشاری FRF های تیر نمونه

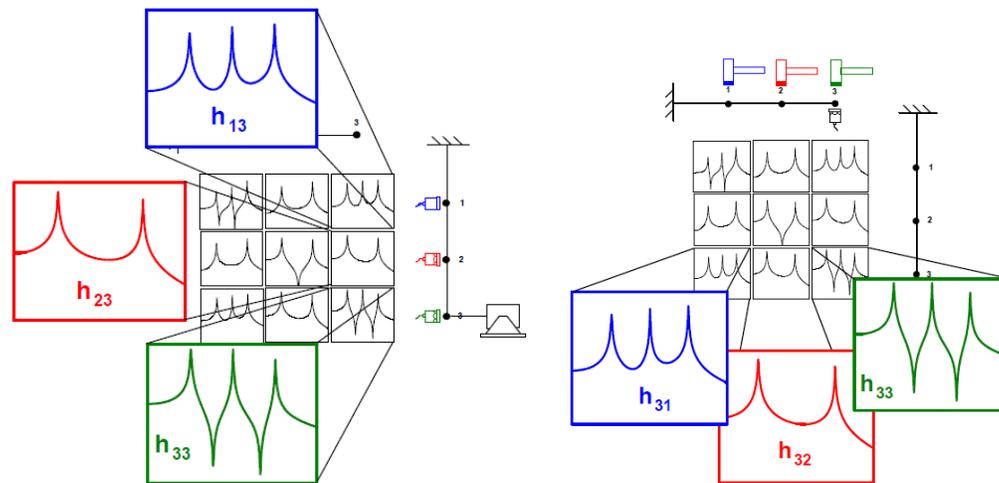
۴. تفاوت بین تست مودال با چکش و shaker چیست؟

از نقطه نظر تئوری، تفاوتی ندارد که یک پاسخ فرکانسی (FRF) نتیجه تست با یک چکش باشد یا یک shaker. در شکل های (۱۰-الف) و (۱۰-ب) اندازه‌گیری‌های انجام شده با یک چکش مودال و یک shaker مودال نشان داده شده اند. در یک تست مودال به کمک ضربه نتیجه اندازه‌گیری یکی از سطرهای ماتریس پاسخ فرکانسی است یعنی شتاب سنج در یک نقطه ثابت قرار داده شده و چکش هر دفعه روی یکی از درجات آزادی سیستم ضربه می‌زند. به این تست Roving hammer نیز می‌گویند. این در حالیست که در تست مودال به کمک شیکر یک ستون از ماتریس پاسخ فرکانسی به دست می‌آید. یعنی شتاب سنج‌ها در نقاط مختلف نصب شده و پاسخ آنها در برابر اعمال نیروی هارمونیک به یک نقطه اندازه‌گیری می‌گردد. با توجه به تقارن ماتریس FRF برای سیستم‌های با دینامیک خطی، پس یک سطر با ستون متناظر خود برابر است. مثلاً "سطر سوم با ستون سوم برابر است، پس فرقی نمی‌کند که کدامیک اندازه‌گیری شود. همچنین فرقی نمکند که با چه چیزی اندازه‌گیری شود. سطر سوم به کمک شیکر یا ستون سوم به کمک چکش.

پس اگر من بتوان نیرویی خالص به سازه وارد کرد، بدون اینکه تعاملی بین سازه و نیروی تحریک بوجود آید و پاسخ سازه را با یک سنسور بدون جرم اندازه‌گیری کرد، فرقی بین دو نوع تست مودال وجود نخواهد داشت. اما در عمل مساله کمی متفاوت است. تفاوت از آنجا نشأت می‌گیرد که هم شیکرها و هم سنسورهای اندازه‌گیری ارتعاشات در عمل خود روی دینامیک سازه موثر می‌باشند. در واقع نکته مهم اینست که آنالیز مودال روی سازه انجام نمی‌شود بلکه روی سازه به علاوه تجهیزات تحریک و اندازه‌گیری ارتعاشات انجام می‌شود و مسایلی مانند سیستم تعلیق سازه، جرم سنسورها، آثار سختی چیدمان شیکر بر روی نتایج بی‌تأثیر نمی‌باشند.

بنابراین درحالیکه تئوری به ما میگوید که تفاوتی بین دو نوع تست وجود ندارد، اغلب تفاوت‌هایی به ویژه در جنبه های داده برداری موجود است. برای مثال در تست با شیکر شتاب سنج جابه جا می‌شود حال فرض کنید که جرم شتاب‌سنج روی نتایج تأثیر داشته باشد و سازه وزن سنگینی نسبت به شتاب سنج نداشته باشد، در این حالت بهتر است جرمهایی به اندازه جرم شتاب سنج تهیه نمود و در نقاطی که ارتعاشات آن اندازه‌گیری نمی‌شود قرار داده شود تا تست همسان گردد.

تفاوت دیگر در دینامیک شکر و میله محرک آن است. اغلب مودهای سازه تحت تأثیر جرم و سختی شیکر قرار می‌گیرند و چیدمان تست برای به حداقل رساندن تأثیرگیری نتیجه از دینامیک شیکر می‌بایست تنظیم گردد. پس همانطور که مشاهده شد با وجود اینکه در تئوری انتظار بر همسان بودن نتایج مودال چکش و شیکر است، اما در عمل از چیدمان تست تا داده برداری متفاوت است.



شکل 10- الف تست مودال چکش roving hammer شکل 10- ب تست مودال با چکش roving response

چه اندازه‌گیری‌هایی برای محاسبه یک FRF لازم است؟

مهم‌ترین اندازه‌گیری در انجام آنالیز مودال تجربی اندازه‌گیری تابع پاسخ فرکانسی FRF است. به طور ساده FRF نسبت بین پاسخ خروجی تقسیم بر تحریک ورودی است. این اندازه‌گیری به کمک تحلیل گر⁹ ویژه انجام می‌گیرد که دارای برنامه‌ای برای محاسبه تبدیل‌های فرکانسی می‌باشند. در ادامه به توضیح مختصری در مورد تولید یک FRF پرداخته خواهد شد.

سیگنال آنالوگ از سنسورها به تحلیل گر انتقال یافته و در آنجا با استفاده از فیلترهای فرکانسی Anti-aliasing که عموماً مجموعه‌ای از فیلترهای پایین‌گذر می‌باشند، نویزهای فرکانس بالای سیگنال حذف می‌گردد.

در مرحله بعد، با استفاده از مبدل آنالوگ به دیجیتال که عموماً برای این کار از مبدل‌های 10، 12 و یا 16 بیتی استفاده می‌شود، سیگنال دیجیتال سازی گردیده و به حافظه نرم افزار انتقال می‌یابد.

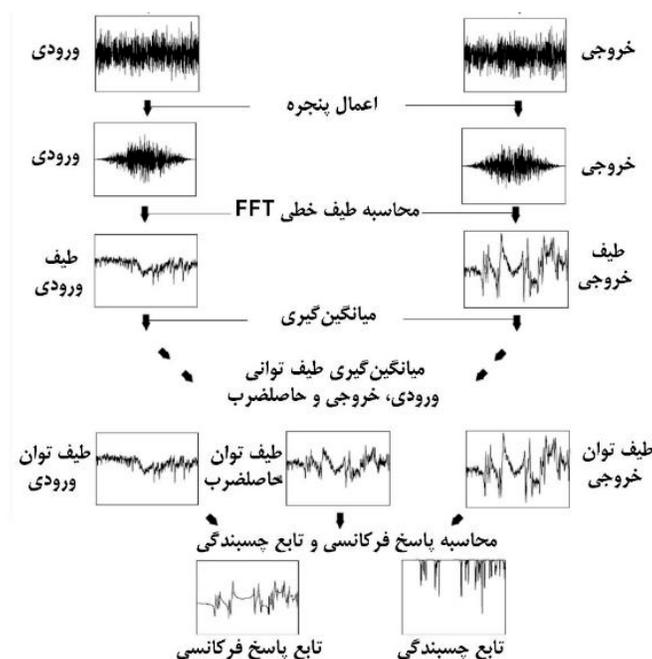
در این پروسه فرکانس نمونه‌برداری، تعداد نمونه‌ها در هر بار اندازه‌گیری و خطای کمیت‌سازی quantization error از منابع ایجاد خطا در اندازه‌گیری می‌باشند که هر کدام برای هر تست مقادیر حداقلی را به خود می‌گیرند.

⁹ analyzer

یکی از مهم‌ترین منابع خطا در اندازه‌گیری FRF ناشی از فرکانسی Spectral leakage است که تحت تاثیر انتقال داده از حوزه زمان به حوزه فرکانس ایجاد می‌گردد. با توجه به اینکه فرضیه پریودیک بودن سیگنال از پیش‌نیازهای تبدیل فرکانسی FFT است، اگر سیگنال در طول داده‌برداری رفتار غیر پریودیک داشته باشد، خطایی داخل اندازه‌گیری اعمال می‌شود که به آن نشت فرکانسی می‌گویند و منجر به خطا در محل قرارگیری پیک فرکانسی می‌شود. برای کاهش این مسأله از توابع وزنی استفاده می‌شود که سر و ته سیگنال را صفر نموده و سیگنال را به یک سیگنال پریودیک شبیه می‌نمایند. به این منظور در تست های به کمک شیکر از تابع وزنی window weighting function، هنینگ Hanning و در تست ضربه از window نمایی Force/Exponential استفاده می‌شود.

پس از داده برداری و تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال، تبدیل فوریه ورودی (تحریک) و خروجی (سنسور) محاسبه می‌گردد و در ادامه طیف توان power spectrum ورودی و خروجی یعنی auto power spectrum و طیف توان بین ورودی و خروجی یعنی cross power spectrum محاسبه می‌گردد.

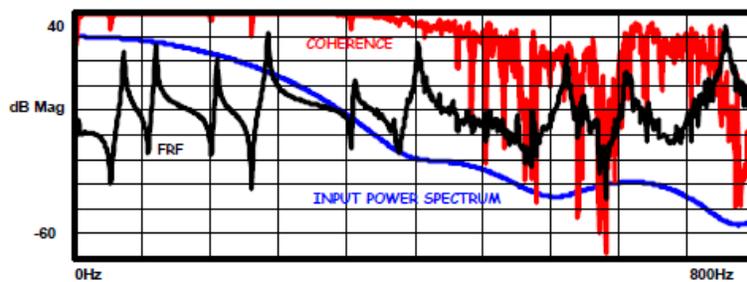
در شکل (11) آناتومی چگونگی محاسبه یک FRF نشان داده شده است. البته نکات اندازه‌گیری زیاد دیگری مانند انواع میانگین گیری و .. وجود دارد که در یک اندازه‌گیری صحیح باید رعایت گردد. در این زمینه می‌توان به کتابهای پردازش سیگنال و یا فصل پردازش سیگنال از کتاب (D.J.Ewins) Modal Tesing مراجعه نمود. در ادامه به مسایل عملی انجام یک تست مودال پرداخته خواهد شد.



شکل (11). آناتومی یک تحلیل گر FRF

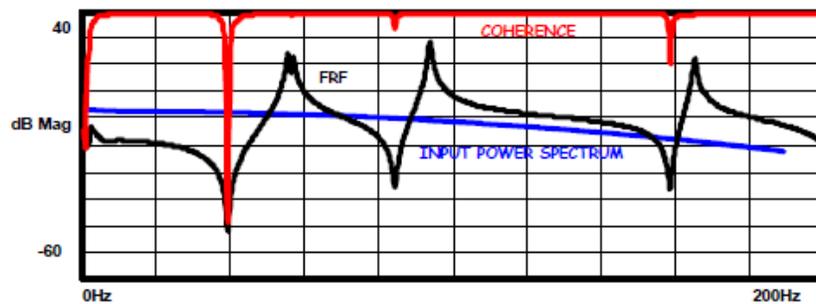
۵. نکات اصلی اندازه‌گیری FRF با چکش چیست؟

برای اندازه‌گیری FRF با استفاده از چکش می‌بایست چند نکته اساسی رعایت شود. در این قسمت برخی از این نکات ذکر خواهد شد. اولین نکته، انتخاب نوک tip چکش است. همه چکش‌های تست مودال دارای چند مدل نوک قابل تعویض می‌باشند که برای هر تست می‌توان از نمونه مد نظر استفاده نمود. در واقع برای انجام تست مودال به کمک چکش مودال، محدوده فرکانسی تحریک و نیروی اعمالی به سازه تحت تاثیر نوک چکش و سختی آن است. هر چه نوک چکش سخت تر باشد، محدوده فرکانسی وسیع تری توسط چکش تحریک می‌گردد و فرکانسهای بالاتر بهتر تحریک می‌گردند. اغلب چند مدل نوک چکش برای چکشهای مودال موجود است که این انواع شامل پلاستیک، تفلون سخت، فولاد و ... می‌باشد. برای مثال استفاده از نوک تفلونی در شکل (12-الف) نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست در این ضربه تا فرکانس 400 هرتز به خوبی تحریک می‌شود. اما در فرکانسهای بالاتر با افت شدید مقدار و همچنین نویز در تابع چسبندگی (کوهیرنس) Coherence (خط قرمز) و طیف توان نیروی چکش (خط سیاه) مواجه می‌شویم.



شکل (12-الف). استفاده از نوک چکش نرم منجر به عدم تحریک فرکانسهای بالاتر شده است

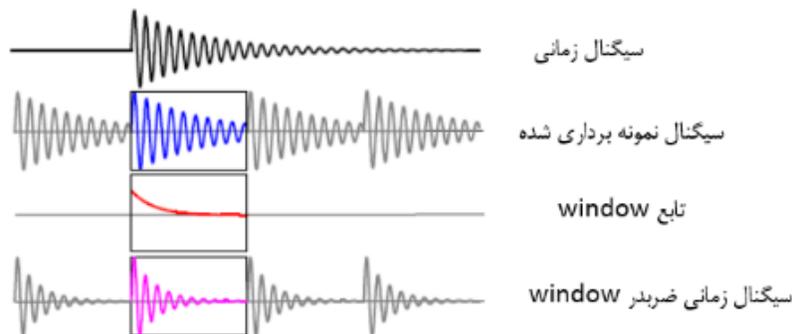
در هنگام انجام تست ضربه می‌بایست نوک چکش طوری انتخاب گردد که طیف نیروی نسبتاً مسطحی بدهد و به شکل یک خط صاف باشد تا در محدوده فرکانسی که شکل مورد در آنجا تعیین می‌شود، FRF ای بدون نویز حاصل گردد.



شکل (12-ب). نوک چکش مناسب منجر به ارائه طیف FRF و کوهیرنس یکنواخت می‌شود

دومین نکته که در استفاده از تست مودال ضربه باید رعایت گردد، استفاده از پنجره (window) مناسب است. همانطور که پیشتر ذکر شد window در کاهش نشت فرکانسی و خطای فرکانسی بسیار موثر است. به ویژه در مورد سازه‌هایی مانند تیر یا صفحه فلزی نازک که دارای میزان میرایی کمی هستند، ارتعاشات تا چند ثانیه بعد از ضربه هم به صفر نمی‌رسد. در این موارد از پنجره های force و exponential برای به حداقل رساندن نشت فرکانسی و در واقع ایجاد سیگنال پرپودیک که از ملزومات تبدیل فوریه است، استفاده می‌شود.

Force window یک تابع ضربه در حوزه زمان است که در نیروی ورودی ضرب می‌شود و exponential window که در سیگنال زمانی شتاب سنج ضرب می‌گردد، یک تابع کاهنده نمایی است که در انتهای نمونه برداری دامنه‌ها را به شدت کاهش داده و به صفر می‌رساند.



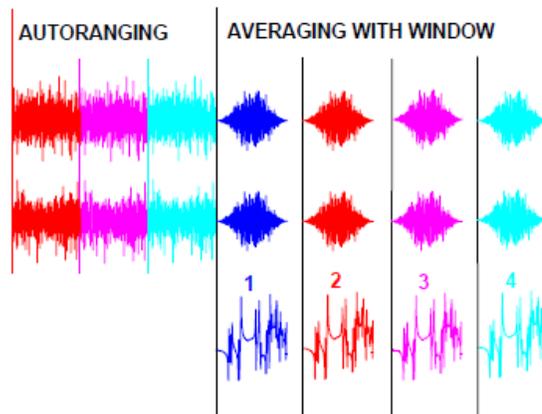
شکل (13). exponential window برای به حداقل رساندن نشت فرکانسی

چون استفاده از تابع window منجر به ایجاد نویز در سیگنال می‌گردد، بایستی تا جای امکان استفاده از آن را محدود نمود. یکی از راههای استفاده از window با ضرایب کمتر، استفاده از تعداد نقاط داده برداری بیشتر و طول زمانی بیشتر سیگنال است. در قسمت بعد به ویژگی‌های مورد نیاز برای انجام تست مودال با شیکر پرداخته می‌شود.

۶. نکات اصلی اندازه‌گیری FRF با شیکر چیست ؟

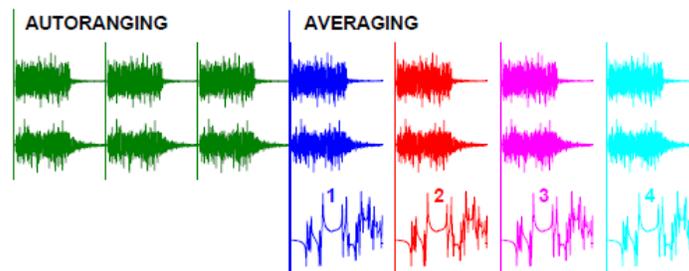
نکات دیگری که در تست مودال با شیکر می‌بایست در نظر گرفت، استفاده از سیگنال تحریک مناسب و سینوسی است که منجر به بی‌نیازی از استفاده از تابع window می‌گردد. البته نکات دیگری هم هست که می‌بایست در تست با شیکر در نظر گرفت و برای مطالعه بیشتر می‌توان به منابع مختلف رجوع کرد.

یکی از قدیمی ترین و پر کاربرد ترین سیگنالهای ورودی که به عنوان نیرو به شیکر اعمال می شوند، سیگنال تصادفی (random) است. در این نوع سیگنال برای کاهش نشت فرکانسی از hanning window استفاده می شود. در شکل (14) یک سیگنال نیروی ورودی تصادفی به همراه hanning window نشان داده شده است. همانطور که از شکل پیداست استفاده از window تا حدودی توانسته تا از نشت فرکانسی ورودی جلوگیری نماید.

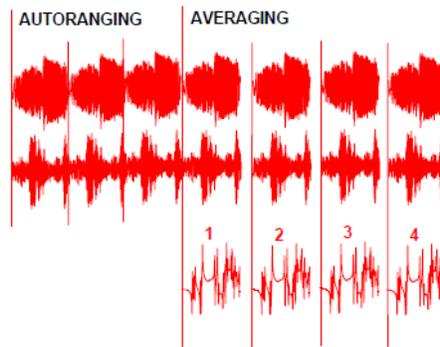


شکل (14). تست مودال با شیکر و استفاده از hanning window

دو نوع سیگنال پر کاربرد در تست مودال با شیکر، سیگنالهای Burst random و Sine chirp می باشند. این دو نوع سیگنال ورودی، دارای ویژگی هایی می باشند که آنها را بی نیاز از window کرده است و به شکل ذاتی نشت فرکانسی ندارند. این دو نوع تحریک در همه آنالایزرها موجود می باشند و شکل ظاهری آنها در شکل های (15) و (16) رسم شده است.



شکل (15). سیگنال تحریک Burst random بدون اعمال window



شکل (16). سیگنال تحریک Sine chirp بدون اعمال window

۷. نکات اصلی استفاده از window چیست ؟

استفاده از توابع Window در همه اندازه‌گیری‌ها لازم است. انواع مختلف توابع تحریک و window مورد نیاز آنها ذکر شد. همچنین توابع تحریکی که به window احتیاج ندارند نیز معرفی گردید. به هر جهت، مواقعی است که به ویژه در اندازه‌گیری‌های حین کارکرد ماشین نمی‌توان از استفاده از windowها صرف نظر نمود. در این قسمت به این مساله پرداخته می‌شود.

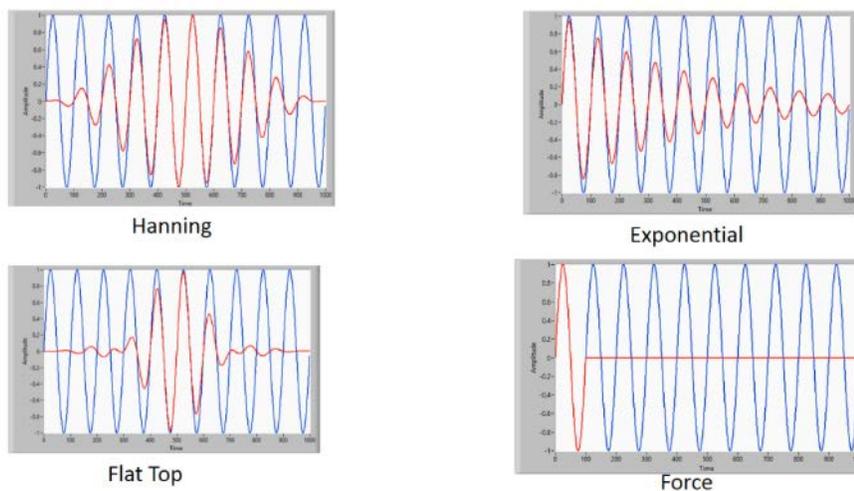
به طور کلی چهار نوع پنجره window که بیشتر از بقیه به کار می‌روند، Flat Top, Hanning, nifor و Force/Exponential می‌باشند. به جای بررسی ریاضی و جزئیات این توابع به کارکرد آنها پرداخته خواهد شد. تابع uniform که به آن rectangular نیز می‌گویند، یک تابع مستطیلی شکل با ضریب بهره 1 gain است و در مواقعی کاربرد دارد که شرط پریودیک (متناوب) بودن سیگنال صادق باشد. از این تابع برای تست ضربه در زمانیکه هم ورودی نیرو و هم خروجی پاسخ در یک نمونه وجود دارند، استفاده می‌شود، همچنین برای تست مودال با شیکر و سیگنالهای sine chirp, burst random ، pseudo-random و digital stepped sine کاربرد دارد، زیرا می‌توان این سیگنال‌ها را پریودیک فرض نمود.

تابع Hanning یک تابع وزنی کسینوسی (زنگوله‌ای) است که در ابتدا و انتها، دامنه صفر دارد. برای سیگنالهایی مانند سیگنال‌های Random که خصوصیت پریودیک ندارند، از این تابع استفاده می‌شود.

از تابع Flat Top برای سیگنالهای سینوسی که ملزومات پریودیک فرآیند FFT را ندارند، استفاده می‌گردد. به طور کلی این سیگنال در کالیبراسیون مورد استفاده قرار می‌گیرد.

تابع Force/Exponential در اندازه‌گیری ضربه و تست مودال با چکش کاربرد دارد. تابع force بر روی ضربه اعمال می‌شود و تابع exponential نیز روی پاسخ اعمال می‌گردد.

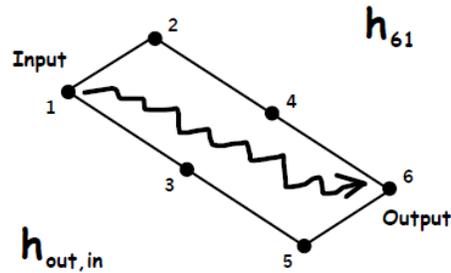
هر یک از توابع window ذکر شده در بالا بر روی فرکانس‌های سیگنال تاثیرگذار هستند. به طور کلی استفاده از Window منجر به کاهش دامنه به میزان کم و افزایش میرایی در سیگنال می‌شود. اما به دلیل تاثیری که window ها در کاهش نشت فرکانسی FFT و FRF دارند، به ناچار از آنها استفاده می‌شود. در شکل (17)، سیگنال سینوسی (خط آبی) به همراه نتیجه اعمال هر window (خط قرمز) به آن نشان داده شده است.



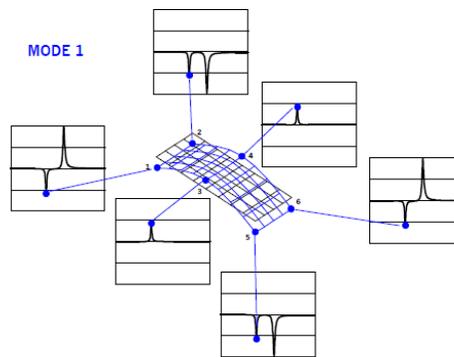
شکل (17). سیگنال سینوسی (خط آبی) به همراه نتیجه اعمال هر window (خط قرمز) به آن

۸. چگونه شکل مود ارتعاشی از **FRF** اندازه‌گیری شده به دست می‌آید؟

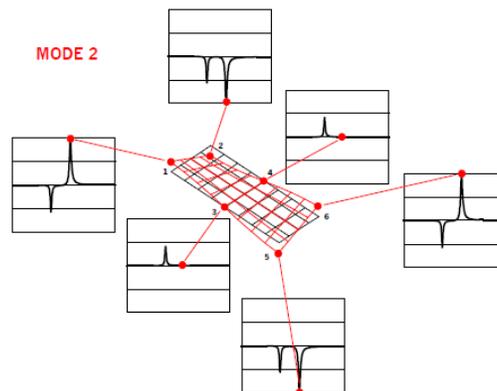
حال که نکات اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی مورد بررسی قرار گرفت، به سازه نمونه یعنی همان صفحه فولادی شکل (1) باز گشته و اندازه‌گیری‌های مودال سازه را انجام می‌دهیم. 6 نقطه اندازه‌گیری روی صفحه فرض نمایید. پس 6 نقطه برای اندازه‌گیری و 6 نقطه برای اعمال نیرو داریم. (یعنی 36 اندازه‌گیری ارتعاشی می‌توان انجام داد). پاسخ فرکانسی **FRF** به ما می‌گوید که اگر به یک نقطه نیروی دینامیکی اعمال شود، سازه در مقابل چگونه ارتعاش می‌نماید. اگر نیرو را به نقطه اعمال نماییم و پاسخ از نقطه 6 اندازه‌گیری گردد، آنگاه تابع تبدیل transfer function بین دو نقطه 1 و 6 مطابق شکل (18) به دست می‌آید.



شکل (18). نقاط اندازه‌گیری ورودی و خروجی



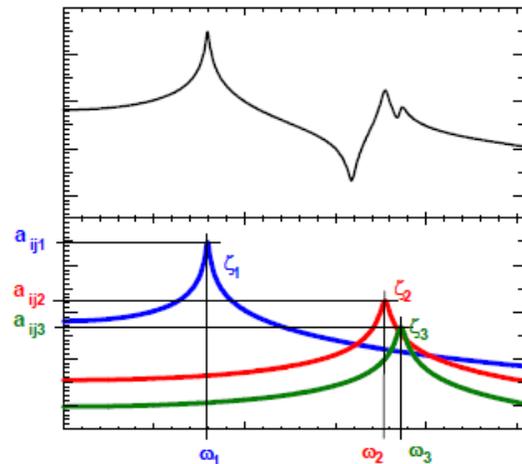
شکل (19). شکل مود اول صفحه



شکل (20). شکل مود دوم صفحه

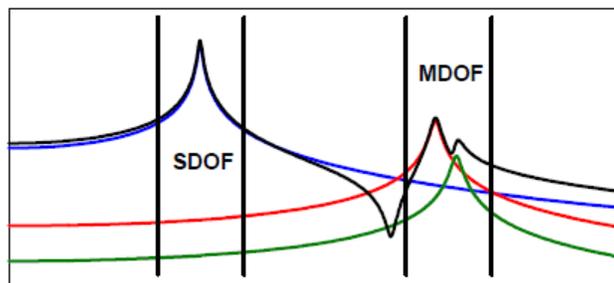
در حالیکه از الگوریتم ساده نشان داده شده در شکل‌های بالا (روش استفاده از قله های FRF یعنی peak picking) می‌توان برای آنالیز مودال سازه‌های ساده استفاده نمود. الگوریتم‌های دیگر ریاضی وجود دارند که از آنها برای تخمین مدل مودال (فرکانس طبیعی، میرایی، شکل مود) از روی نتایج FRF استفاده می‌شود. مرحله تخمین پارامترهای مودال که اغلب به آن مرحله پوش منحنی curve fitting نیز می‌گویند، توسط

نرم افزارهای کامپیوتری انجام می شود. مطابق شکل (21) پارامترهای اصلی که از این مرحله به دست می آید، همان فرکانسهای طبیعی و ضرایب میرایی و شکل مودهای هر مود می باشد.



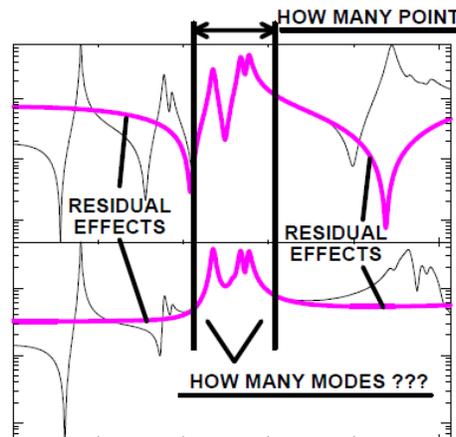
شکل (21). تفکیک FRF اندازه گیری شده به سه مود ارتعاشی سازه

روش های ریاضیاتی ذکر شده از تکنیک های مختلفی برای استخراج اطلاعات مودال از FRF های اندازه گیری شده استفاده می نمایند. بعضی از این روشها از داده های حوزه زمان و برخی در حوزه فرکانس عمل می نمایند. بعضی هر مود را جداگانه و بعضی همزمان چند مود را استخراج می نمایند شکل (22). به صورت کلی همه این الگوریتمها سعی در تخمین با بهترین دقت فرکانس طبیعی، میرایی و شکل مود هر مود دارند.



شکل (22). استخراج پارامترهای مودال با روش تک درجه آزادی SDOF و چند درجه آزادی MDOF

روودی های اصلی نرم افزارهای آنالیز مودال در این مرحله، تعداد مودها، مقدار باقی مانده هر مود mode residue و باند فرکانسی مدنظر است شکل (23). مسایل خیلی زیادی در این زمینه مانند اعتبارسنجی آنالیز مودال و انتخاب روش مناسب آنالیز مودال باقی می ماند که برای مطالعه آنها بهتر است به کتابهای موجود در این زمینه مراجعه گردد.



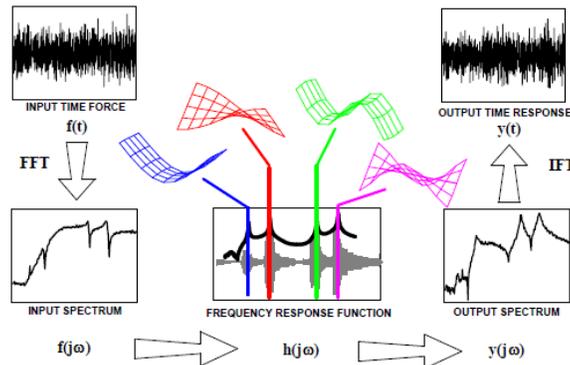
شکل (23). پوش منحنی curve fitting بر روی یک نمونه FRF

همه سازه‌ها به اعمال نیروی خارجی عکس العمل نشان می‌دهند، اما در بسیاری موارد نیروی خارجی را نمی‌توان اندازه‌گیری نمود. در حالیکه به کمک سنسورهای ارتعاشی می‌توان ارتعاشات سازه در نقاط مختلف را اندازه‌گیری نمود. پس در ادامه به موضوع پرداخته خواهد شد که چطور می‌توان از روی اندازه‌گیری پاسخ فرکانس می‌توان مدل مودال سازه را استخراج نمود.

۹. آنالیز مودال عملیاتی چیست؟

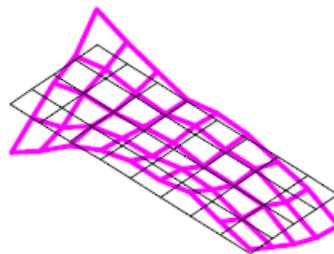
هر سیستم دینامیکی به نیروهای وارد بر آن پاسخ می‌دهد. خواه آن نیرو قابل اندازه‌گیری باشد و یا نه. برای توصیف بهتر فرض می‌شود که در این مرحله نیروهای وارد بر سازه مشخص باشد. برای سادگی کار با اینکه نیروها در حوزه زمان به سازه وارد می‌شوند، آن را در حوزه فرکانس در نظر می‌گیریم. برای سازه‌ای که یک نیروی یکنواخت دینامیکی (ضربه‌ای با دامنه ثابت در همه فرکانس‌ها) به آن وارد شود، پارامترهای مودال را می‌توان با اندازه‌گیری پاسخ محاسبه نمود. این مساله در شکل (24) نشان داده شده است.

تحریک نشان داده شده یک تحریک تصادفی random است که همه فرکانس‌ها را تحریک کرده است. مهم-ترین نکته اینست که FRF مانند یک فیلتر بر روی ورودی عمل نموده و خروجی را شکل می‌دهد. تحریک ورودی طوری است که همه مودها را به یک میزان تحریک می‌نماید و پاسخ سوپرپوزیشن خطی از همه مودهایی است که توسط ورودی تحریک شده‌اند. حال اگر نیروی ورودی فقط یک مود را تحریک کرده بود، خروجی نیز فقط یک مود بود مانند حالتیکه در شرایط کاری یک ماشین پیش می‌آید.



شکل (24). نمایش گرافیکی پاسخ دینامیکی سازه

برای درک این مساله، از سازه مثال یعنی صفحه فلزی استفاده می‌نماییم. فرض کنید شرایط کاری به این صورت برای سیستم وجود دارد که یک نیروی نابالانسی در فرکانس ثابت به صفحه وارد می‌گردد. اگر از مجموعه‌ای از شتاب سنج‌ها برای اندازه‌گیری ارتعاشات صفحه استفاده نماییم، الگوی تغییر شکل نشان داده شده در شکل (25) را مشاهده خواهیم نمود. با نگاه کردن به این تغییر شکل نمی‌توان دریافت که چرا سازه این طور رفتار می‌نماید یا با چه تغییری می‌توان رفتار سازه را تغییر داد. چرا صفحه انقدر پیچیده رفتار می‌کند و چرا ظاهر آن شبیه هیچ یک از مودهای رسم شده در قسمت قبل نیست؟



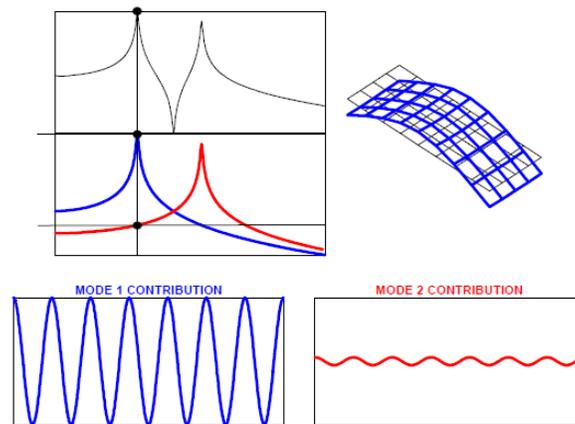
شکل (25). تغییر شکل اندازه‌گیری شده

برای درک این امر، صفحه را در نظر گرفته و فرض کنید یک نیروی سینوسی ساده در یک گوشه از صفحه اعمال گردد. در اینجا برای سادگی فرض می‌کنیم که فقط دو مود اول صفحه توسط نیروی اعمالی تحریک می‌شود. حال می‌دانیم که کلید اصلی در تعیین پاسخ سازه داشتن رابطه FRF بین ورودی و خروجی‌ها است. علاوه بر این، وقتی ارتعاشات یک سازه حین عملکرد اندازه‌گیری می‌شود، FRF سیستم را دیگر اندازه‌گیری نمی‌کنند، بلکه فقط باید پاسخ سیستم اندازه‌گیری شود.

ابتدا سیستم را با یک سیگنال سینوسی تحریک می‌کنیم که دقیقاً همان فرکانس طبیعی اول صفحه است. پاسخ سیستم برای یک FRF در شکل (26) رسم شده است. اگرچه سیستم در یک فرکانس تحریک می‌گردد،

FRF مانند فیلتری پاسخ سیستم را تعیین می‌نماید. مشاهده می‌شود که پاسخ سیستم از هر دو مود 1 و 2 تشکیل شده است. البته مشاهده می‌شود که قسمت اصلی پاسخ چه در حوزه زمان و چه در حوزه فرکانس تحت تاثیر مود 1 است.

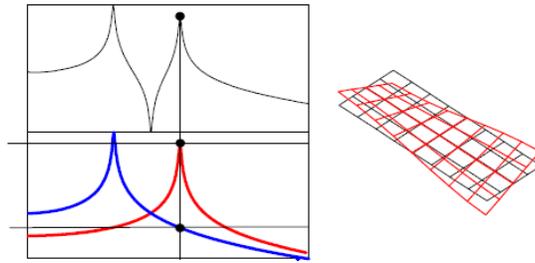
حال اگر پاسخ را تنها در یک فرکانس و در نقاط مختلف اندازه‌گیری نماییم، شکل سازه بسیار شبیه شکل مود اول آن خواهد بود. اما مود دوم نیز به میزان کمی در این ارتعاش شرکت خواهد داشت. همیشه به یاد داشته باشید که در این روش ما فقط پاسخ را اندازه‌گیری می‌کنیم و به نیروی ورودی دسترسی نداریم.



شکل (26). تحریک سازه در نزدیکی مود 1

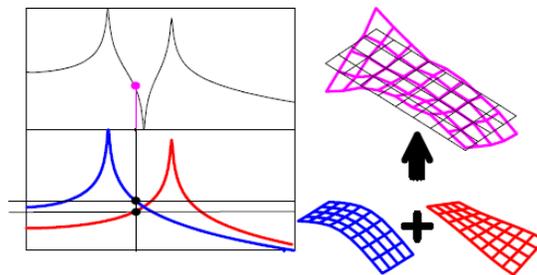
هنگامیکه FRF اندازه‌گیری می‌شود و پارامترهای مودال استخراج می‌گردد، شرکت هر مود جداگانه در FRF به صورت تک تک برای هر مود به دست می‌آید (مود 1 آبی، مود 2 قرمز و به همین صورت برای سایر مودها). در نظر داشته باشید که در اندازه‌گیری ارتعاشات ماشین تحت شرایط کاری، داده‌ها پاسخ سازه تحت یک فرکانس خاص است و در واقع ترکیب خطی از همه مودها در آن وجود دارد. بنابراین اگر فرکانس کاری ماشین با فرکانس مود اول برابر باشد، پاسخ سازه به شکل مود 1 نزدیک خواهد شد.

حال فرض کنیم سیستم با فرکانس مود دوم تحریک شود. شکل (27) همان اطلاعات شکل (26) مود اول را این بار برای مود دوم نمایش می‌دهد. در این حالت همانطور که مشاهده می‌شود، سیستم به شکل مود دوم ارتعاش می‌کند، اما کمی هم مود اول در ارتعاشات صفحه مشارکت دارد.



شکل (27). تحریک سازه در فرکانسی نزدیک فرکانس طبیعی دوم

اما اگر سیستم در فرکانسی دور از فرکانس‌های طبیعی تحریک گردد چه اتفاقی می‌افتد؟ این بار سیستم در فرکانسی بین دو فرکانس طبیعی اول و دوم تحریک می‌شود. در این موارد، تفاوت بین اندازه‌گیری مودال و اندازه‌گیری حین عملکرد operating data measurement مشخص می‌گردد. در شکل زیر تغییر شکل سازه نشان داده است.

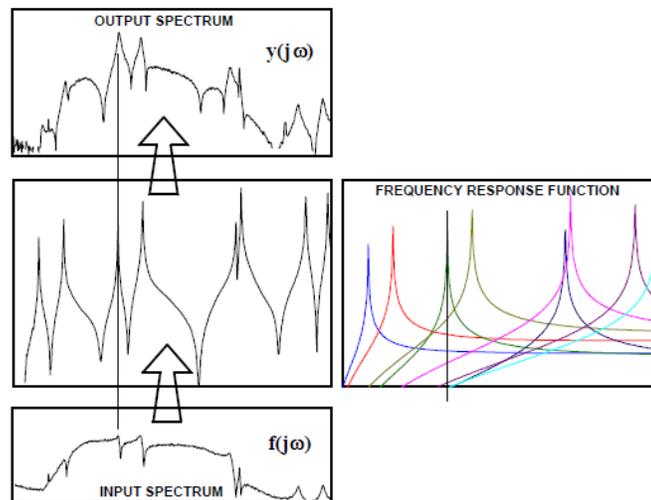


شکل (28). تحریک در فرکانسی بین دو مود اول و دوم

در نگاه اول، به نظر می‌آید که تغییر شکل سازه شبیه چیزی نیست که ما از آن انتظار داشتیم، اما با دقت در شکل و الگوی ارتعاش مشخص می‌گردد که کمی از مود اول خمشی و کمی از مود اول پیچشی در تغییر شکل حضور دارند. بنابراین تغییر شکل ترکیبی از دو مود است و در واقع همیشه همه شکل مودها در ارتعاشات حضور دارند اما متناسب با فاصله فرکانس تحریک (نیروی اعمالی به سازه) مودهایی با فرکانس نزدیکتر به فرکانس تحریک بیشتر و مودهایی با فرکانس دورتر کمتر تحریک می‌شوند.

حال می‌دانیم که ارتعاشات یک سازه در برابر نیرویی با فرکانس ثابت متناسب با شکل مودهایی است که فرکانس طبیعی آنها به فرکانس تحریک نزدیک تر است. هنگامیکه ما ارتعاشات حین عملکرد یک ماشین یا سازه را اندازه‌گیری می‌کنیم، اطلاعات مودال سازه را نداریم، بنابراین چنانچه به اندازه‌گیری‌های حین عملکرد بدون داشتن اطلاعات مودال نگاه کنیم، نمی‌توان گفت که چرا سازه در حال ارتعاش اینگونه است.

در شکل-29 طیف خروجی اندازه‌گیری شده یک نقطه از صفحه نشان داده شده است. این مرتبه نیروی اعمالی به سازه در یک گستره فرکانسی پهنتری اعمال شده و منجر به تحریک موده‌های بیشتری شده است، حال با دانستن مساله شرکت شکل موده‌های مختلف در ارتعاشات سازه در شرایط کاری، می‌توان پاسخ سیستم را راحت‌تر درک نمود.



شکل-29 نتیجه تحریک صفحه با نیرویی که فرکانسهای مختلف Broad band در آن موجود است

در واقع، تفاوت بزرگی بین تغییر شکل عملیاتی *operating deflection shape* و شکل مود وجود دارد، حال می‌توان دید که شکل مودها به صورت ترکیب خطی با یکدیگر جمع شده و الگوی تغییر شکل در شرایط کاری را تولید می‌نمایند.

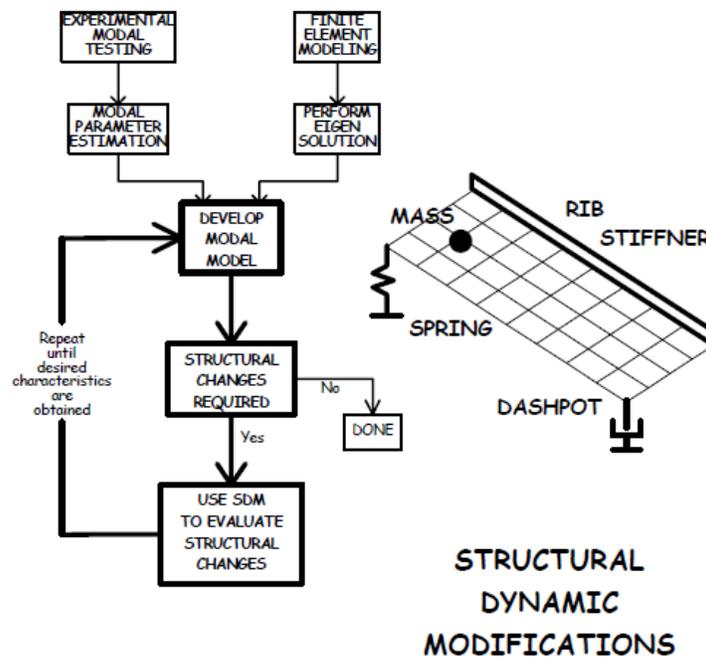
۱۰. آنالیز مودال چه فایده‌ای دارد؟

اطلاعات بدست آمده از آنالیز مودال اطلاعات مفیدی است که در طراحی هر سازه‌ای می‌تواند مفید باشد. درک و مشاهده شکل مودها در فرآیند طراحی گام بسیار ارزشمندی است که منجر به شناسایی قسمت‌های ضعیف سازه که نیاز به تقویت دارند، می‌گردد. ایجاد یک مدل مودال برای مطالعات طراحی و شبیه‌سازی بسیار مفید می‌باشد. یکی از این مطالعات اعمال تغییرات در دینامیک سازه می‌باشد...

این فرآیند یک عملیات محاسباتی است که در آن با استفاده از اطلاعات مودال (فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی، شکل مودها) اثر تغییرات در پارامترهای فیزیکی سازه شبیه‌سازی و تعیین می‌گردد. این تغییرات بدون

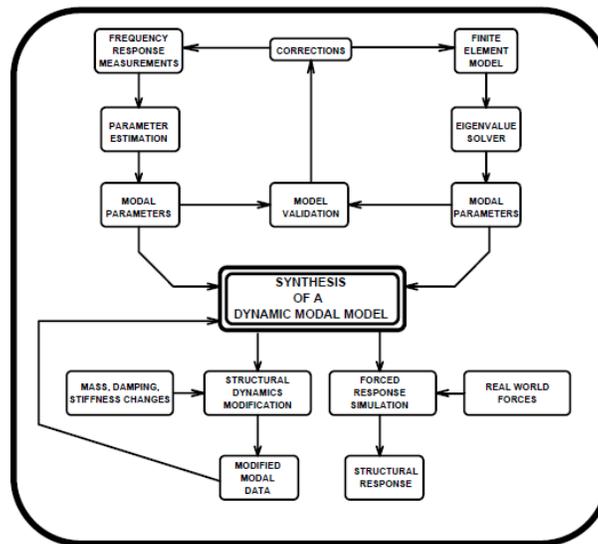
اعمال فیزیکی و صرفاً" به کمک محاسبات شبیه‌سازی شده و طراح از نتیجه تغییرات احتمالی و تاثیر آنها بر رفتار دینامیکی سازه با خبر می‌شود.

شماتیکی از این روند محاسباتی در شکل (30) نشان داده شده است.



شکل (30). فلوجارت فرآیند شبیه‌سازی تغییرات در دینامیک سازه

علاوه بر این مطالعات، شبیه‌سازی پاسخ نیز برای اطلاع از تغییر شکل سازه در شرایط کاری از خروجی‌های این محاسبات است و ویژگی دیگر تست و آنالیز مودال این است که می‌توان به کمک نتایج آن مدل کامپیوتری المان محدود finite element را اعتبارسنجی model updating نموده و خطاهای احتمالی آن را تصحیح نمود. برخی دیگر از ویژگی‌های آنالیز مودال در شکل (31) نشان داده شده است.

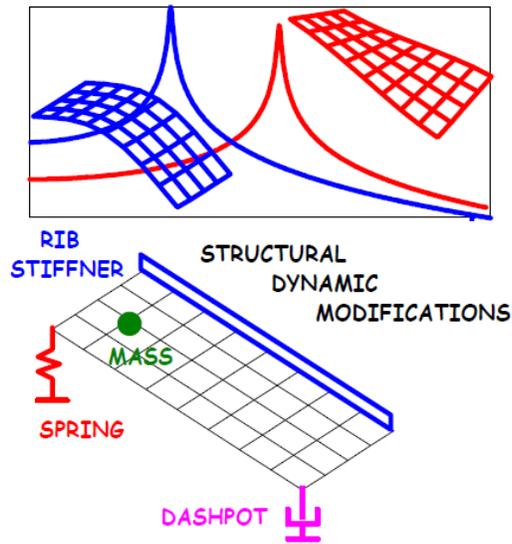


شکل (31). فرآیند مدلسازی دینامیکی

۱۱. آیا اندازه‌گیری‌های مودال سازه مورد نیاز است یا اندازه‌گیری‌های در شرایط کاری؟

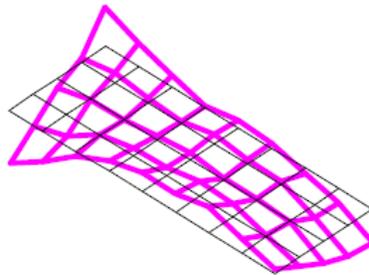
در واقع هر دو این اطلاعات یعنی اطلاعات مودال سازه و اطلاعات تغییر شکل عملیاتی سازه بسیار مفید می‌باشند. اگر فقط یکی از آنها را بتوان تهیه نمود، در بسیاری از موارد باید تصمیمات مهندسی را بدون اطلاع از کل سیستم اتخاذ کرد. به این منظور ابتدا تفاوت‌های این دو را باید در نظر گرفت.

مدل مودال نیاز به این دارد که نیروی ورودی به سازه برای تعیین FRF اندازه‌گیری شود و همینطور برای شبیه‌سازی اعمال تغییرات در سازه و محاسبه پاسخ اجباری سیستم به مدل مودال نیاز است.



شکل (32). ویژگی‌های مدل مودال

از طرف دیگر، اطلاعات حاصل از اندازه‌گیری عملیاتی سازه تصویر عملی از وضعیت کنونی سازه در حال کارکرد می‌باشد. اما در بسیاری از موارد تغییر شکل عملیاتی سازه می‌تواند گیج‌کننده باشد و لزوماً راهنمایی صریحی از چگونگی حل مشکل ارائه نمی‌نماید. در واقع، بهترین وضعیت موقعی وجود دارد که دسترسی به هر دو دسته اطلاعات مودال و تغییر شکل عملیاتی موجود باشد.



شکل (33). تغییر شکل عملیاتی سازه

۱۲. مدل المان محدود یک صفحه

برای انجام تست مودال آزمایشی ابتدا یک صفحه فولادی به ابعاد 205 در 205 میلیمتر و ضخامت 1.6 میلیمتر ساخته شد، برای انجام تست مودال در حالت آزاد چهار فنر نسبتاً "نرم به چهار طرف ورق افزوده شد و ورق مورد نظر داخل یک قاب نصب شد. این صفحه در شکل -34 نشان داده شده است.



شکل (34). صفحه فولادی تست مودال

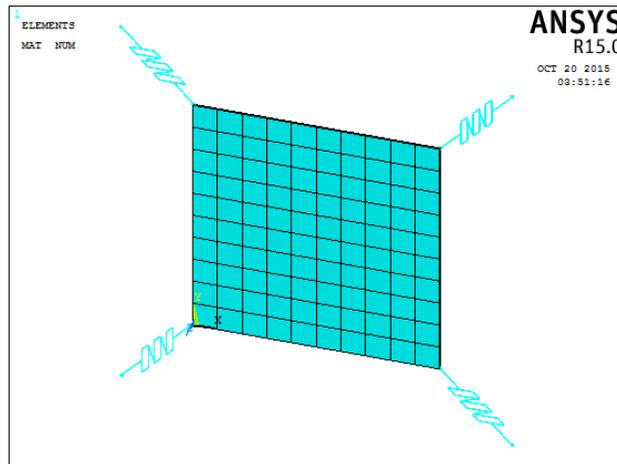
برای مقایسه نتایج حاصل از تست مودال با روش مدلسازی المان محدود صفحه ذکر شده در نرم‌افزار المان محدود Ansys مدلسازی شد. مدل مذکور در شکل (35). نشان داده شده است. برای مدلسازی صفحه از المان SOLID186 و مدلسازی فنرها از المان COMBI214 استفاده شد. کد المان محدود این مثال در پیوست-1 آمده است. در مرحله بعد آنالیز مودال محاسباتی توسط نرم‌افزار روی صفحه انجام شد. پنج فرکانس طبیعی اول صفحه (با صرف نظر کردن از فرکانس‌های طبیعی که در اثر استفاده از فنرها ایجاد شده است) که در ادامه برای مقایسه با نتایج تست مودال تجربی به کار می‌رود، به شرح زیر است:

- 1) 135 هرتز
- 2) 189.75 هرتز
- 3) 235 هرتز

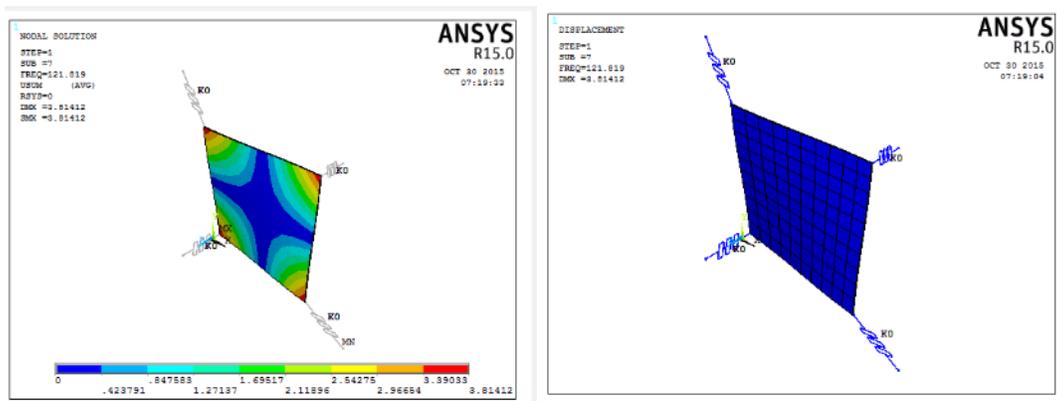
(4) 338 هرتز

(5) 587 هرتز

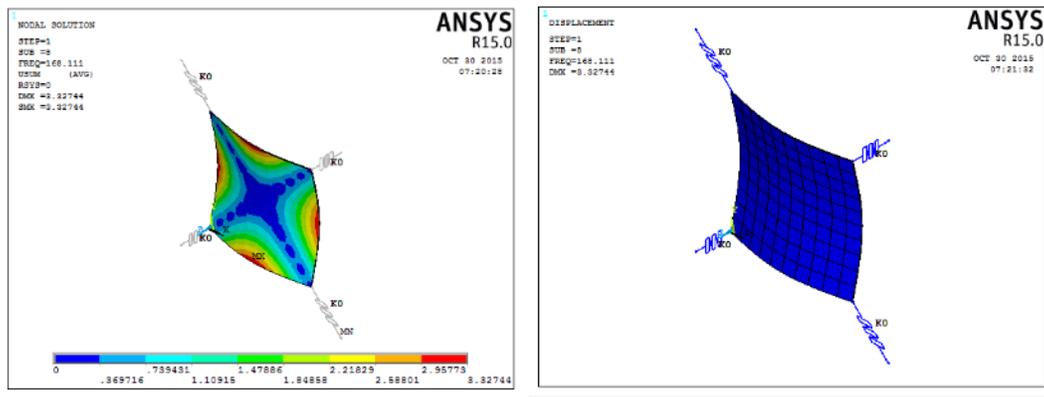
شکل مود این پنچ فرکانس در شکل های 35 تا 39 رسم شده است.



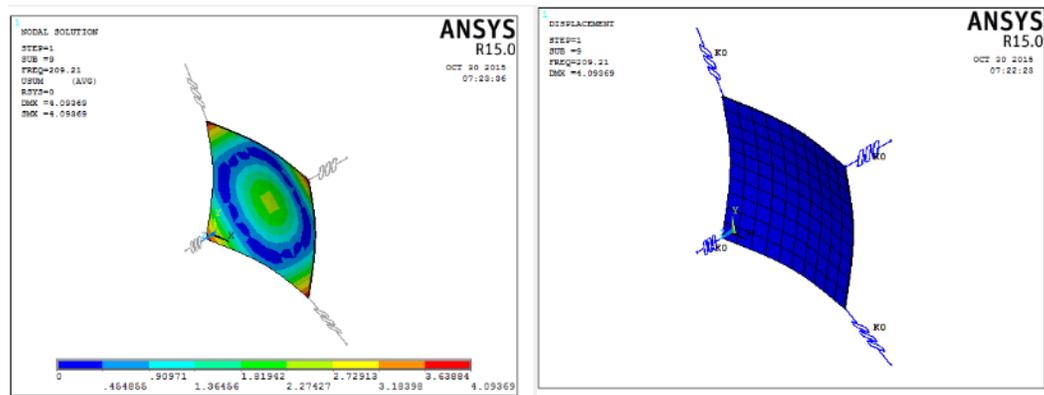
شکل-34 مدل المان محدود صفحه فولادی تست مودال



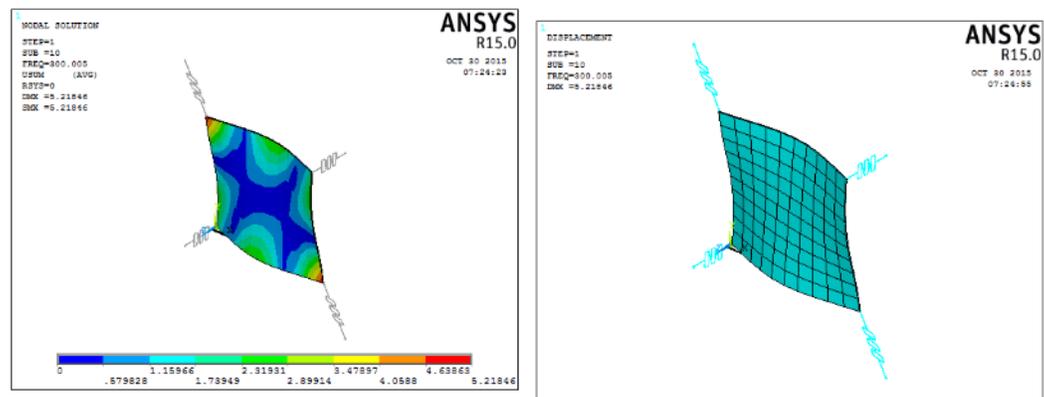
شکل (35). شکل مود شبیه سازی برای فرکانس طبیعی 121 هرتز



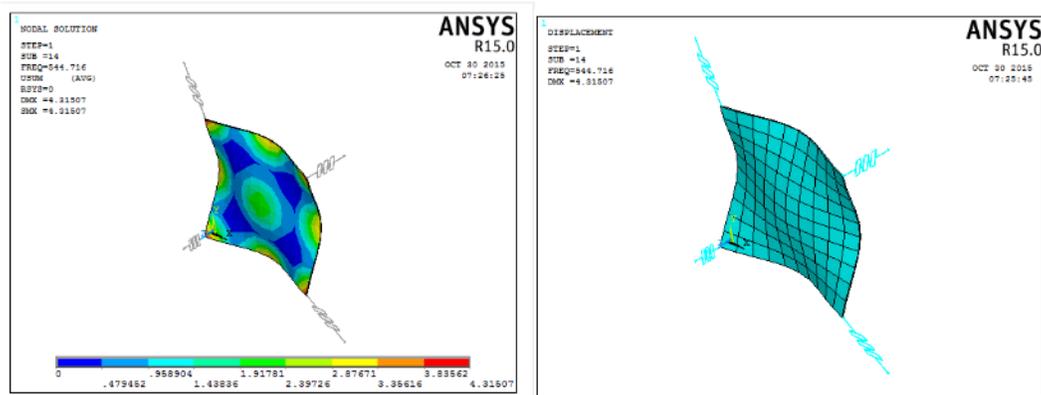
شکل (36). شکل مود شبیه‌سازی برای فرکانس طبیعی 168 هرتز



شکل (37). شکل مود شبیه‌سازی برای فرکانس طبیعی 210 هرتز



شکل (38). شکل مود شبیه‌سازی برای فرکانس طبیعی 300 هرتز

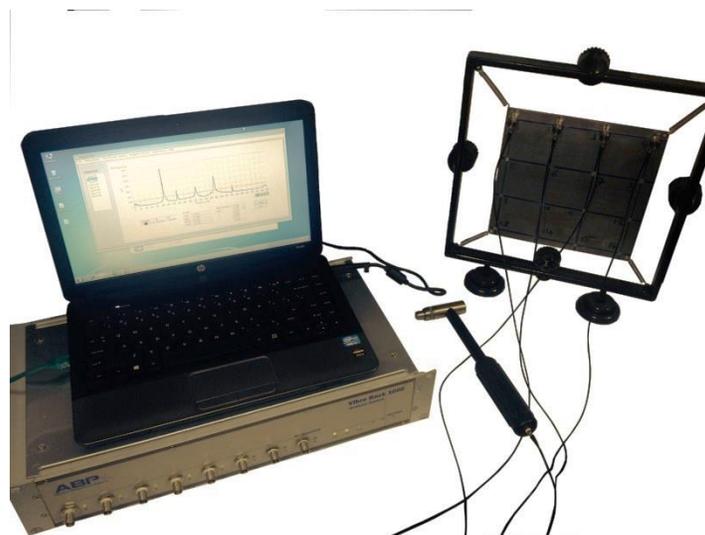


شکل (39). شکل مود شبیه‌سازی برای فرکانس طبیعی 544 هرتز

۱۳. انجام تست مودال تجربی روی صفحه

برای انجام تست مودال تجربی روی صفحه‌ای که در قسمت قبل مدل و نیز ساخته شد، از آنالایزر ABPVibroRack 1000 و نرم‌افزارهای تست مودال آن به همراه شتاب‌سنج GlobalTest AP2037-100 برای اندازه‌گیری ارتعاشات و چکش مودال GlobalTest AU-02 برای اندازه‌گیری نیروی اعمالی بر سازه استفاده شد.

تصاویر چکش تست مودال، شتاب‌سنج و آنالایزر در شکل (40) نشان داده شده است. همچنین صفحه به صورت 16 نود (گره) 4 در 4 علامتگذاری شد تا بتوان به کمک این 16 نود شکل مودهای صفحه را رسم نمود. نامگذاری این نقاط در شکل (41) نشان داده شده است.



شکل (40). آنالایزر، چکش مودال و سنسورهای اندازه‌گیری ارتعاشات

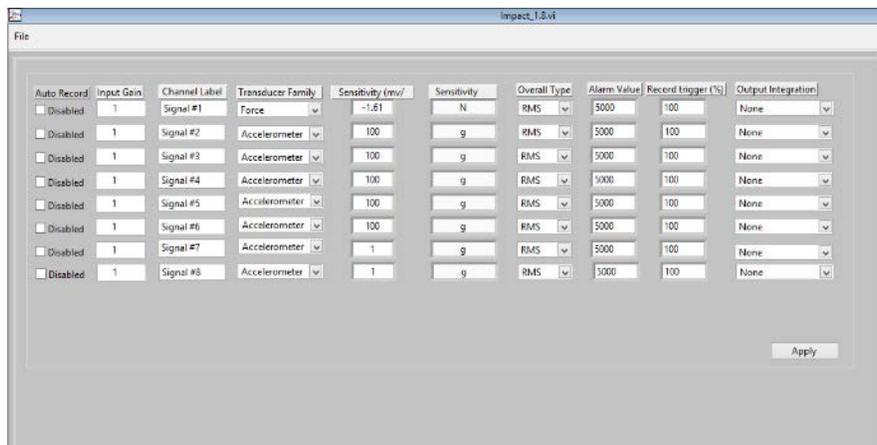


شکل (41). مش بندی صفحه برای انجام تست مودال

در ادامه تست مودال روی 16 نقطه نشان داده شده در شکل (41) انجام و پاسخ فرکانسی اندازه گیری شد.

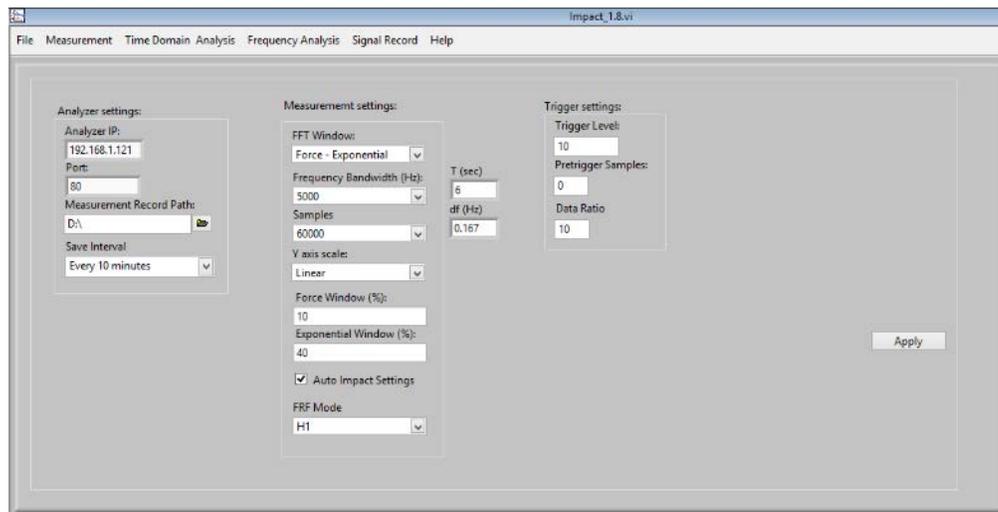
۱۴. تنظیمات اندازه گیری FRF با VibroRack 1000

برای انجام تست مودال به کمک چکش از نرم افزار Impact Test استفاده شد، روند کار برای اندازه گیری به این صورت است که ابتدا تنظیمات سنسورها در منوی `file` → `new configuration` به شکل نشان داده شده در شکل (42) انجام شد.



شکل (42). تنظیمات سنسورها برای اندازه گیری FRF

همانطور که از شکل بالا پیداست برای کانال یک سنسور نیرو با حساسیت 1.61 میلی ولت بر نیوتن و سنسورهای کانالهای 2 تا 6 شتابسنج با حساسیت 100 میلی ولت بر g وارد شد. در مرحله بعد از منوی measurement → measurement setup تنظیمات دیگر اندازه گیری وارد می گردد (شکل (43)).



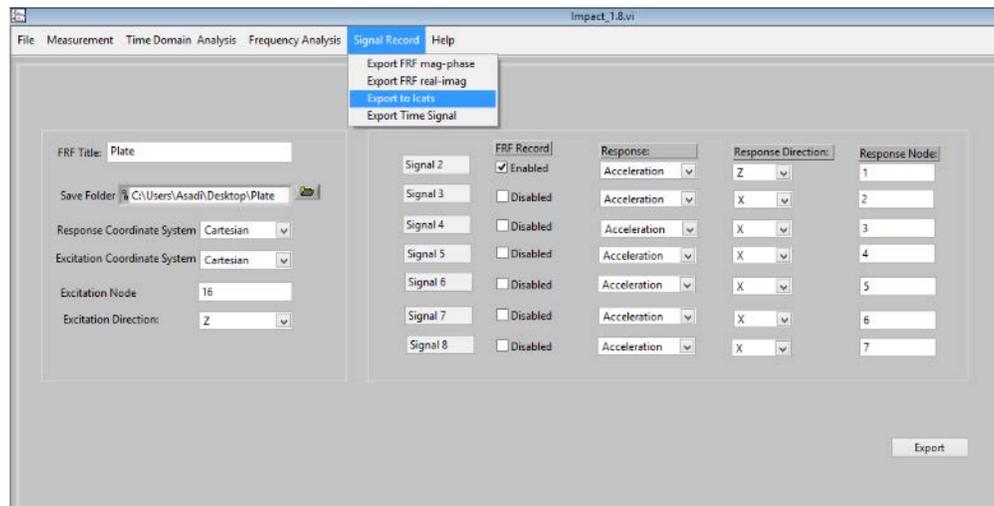
شکل (43). تنظیمات اندازه گیری FRF

ابتدا تنظیمات آی پی و پورت ارتباطی کامپیوتر با آنالایزر در قسمت بالا وارد می شود و آدرس محل ذخیره سازی فایل های سیگنال زمانی می تواند تعیین گردد. در قسمت measurement settings ابتدا window مورد استفاده انتخاب می شود که در مورد تست ضربه از Force/exponential استفاده می شود. در بخش دیگر می توان پهنای باند (دو برابر نرخ نمونه برداری) و نیز تعداد نمونه ها را تعیین نمود. بر اساس انتخاب این دو عدد مدت زمان داده برداری و وضوح یا همان فاصله خطوط فرکانسی در کنار این دو به صورت $T(\text{sec})$ بر حسب ثانیه و $df(\text{Hz})$ بر حسب هر تیز نمایش داده می شود. دقت داشته باشید که این آنالایزر تنها می تواند به اندازه 6 ثانیه در هر فریم داده برداری نماید یعنی چنانچه طول داده برداری از 6 ثانیه در قسمت $T(\text{sec})$ بیشتر باشد، کاربر با خطا روبرو خواهد شد.

در قسمت بالا راست، تنظیمات trigger وارد می گردد. Trigger level به میزانی از نیرو گفته می شود که برای مشخص نمودن لحظه شروع محاسبه پاسخ فرکانسی به کار می رود. Pretrigger برای مواقعی است که می خواهیم از نمونه های پیش از ضربه استفاده نماییم. Data Ratio نیز میزان زمانی از داده است که استفاده می شود، برای مثال چنانچه $T(\text{sec})$ 6 ثانیه داده داشته باشیم و در این قسمت عدد 3 را وارد نماییم، از 3 ثانیه از دیتا برای محاسبه FRF استفاده می شود و چنانچه این عدد از عدد $T(\text{sec})$ بزرگتر باشد از کل فریم زمانی

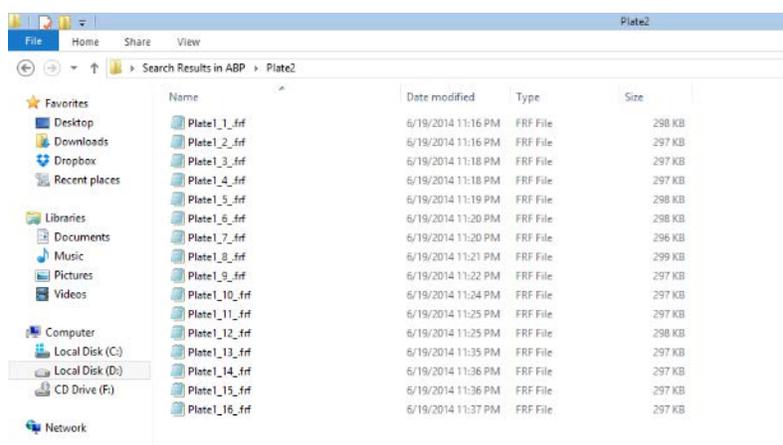
برای محاسبه FRF استفاده می‌شود. پس از تنظیمات با انتخاب دکمه f5 از کیبورد یا انتخاب منوی measurement start اندازه‌گیری آغاز می‌گردد، بهتر است بلافاصله پس از انتخاب start ضربه به سازه اعمال شود. پس از طی زمان معینی، داده‌برداری انجام و به کامپیوتر ارسال می‌گردد. در قسمت raw time signal کل پاسخ زمانی و نیز در قسمت triggered time signal بخشی از سیگنال که پس از ضربه اتفاق افتاده است نمایش داده می‌شود. در منوی آنالیز فرکانسی نیز توابع مرتبط با تبدیل‌های فرکانسی نمایش داده می‌شود. برای مثال، در بخش mag FRF دامنه پاسخ فرکانسی برای هر سیگنال نسبت به نیروی ورودی به سازه نمایش داده می‌شود.

پس از اندازه‌گیری پاسخ فرکانسی برای انجام آنالیز مودال و استخراج شکل مودها در نرم‌افزار ICATS به منوی export to ICATS → signal record رفته و تنظیمات ذخیره‌سازی اعمال می‌گردد.



شکل (44). تنظیمات خروجی فایل پاسخ فرکانسی به نرم‌افزار ICATS

در FRF Title عنوان پروژه وارد می‌شود. در Save folder پوشه مورد نظر برای ذخیره‌سازی فایلها انتخاب می‌گردد. برای مدلسازی می‌توان از سه مدل مختصات cartesian, cylindrical و spherical استفاده نمود، بر اساس انتخابی که انجام می‌گردد می‌توان راستای اندازه‌گیری X, Y, Z, RotX, RotY, RotZ, R, Z, Phi را هم برای نودی که در آن ضربه زده شده و نودی که اندازه‌گیری شده انتخاب نمود. برای کانالهایی که میخواهیم، پاسخ فرکانسی آن ذخیره گردد FRF record را enable می‌کنیم. شماره نود یا همان گره ضربه در excitation node و شماره نود پاسخ در قسمت response node وارد می‌شود. پس از انجام این تنظیمات با زدن export فایل ICATS پاسخ فرکانسی در محل انتخاب شده ذخیره می‌گردد. این روند برای همه نقاط انجام می‌گردد طوری که در فولدر انتخاب شده 16 فایل به ازاء 16 اندازه‌گیری ایجاد می‌گردد.



شکل (45). پوشه فایل‌های پاسخ فرکانسی ذخیره شده

۱۵. معرفی نرم افزار ICATS

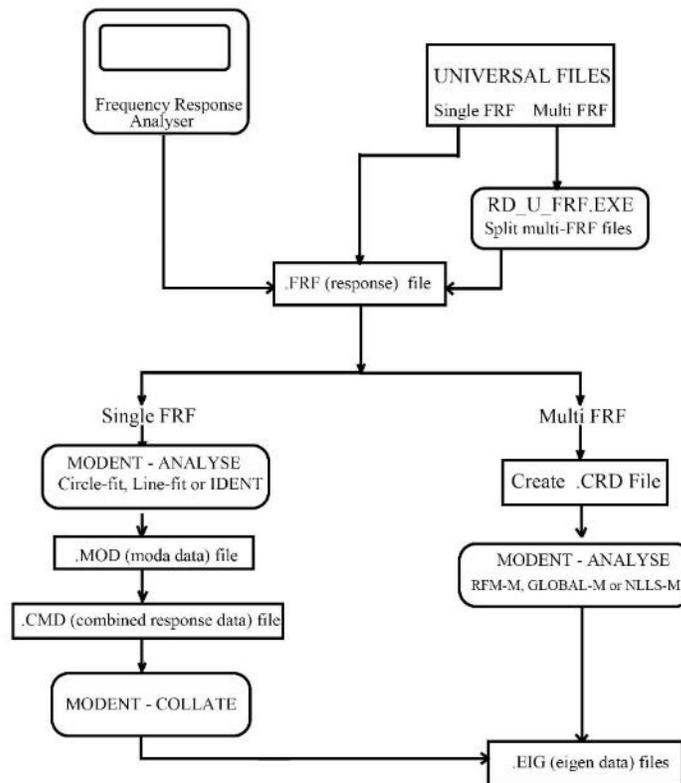
برنامه ICATS یک بسته نرم افزاری به شکل مجموعه‌ای از برنامه‌های نوشته شده تحت فرترن، C++ و آسمبلی می‌باشد، که برای تحلیل دینامیکی سازه‌های مختلف از استخراج فرکانس طبیعی تا استخراج ماتریس شکل مودها و فرکانس های طبیعی و نیز ماتریس‌های معادل سختی، میرایی و اینرسی کاربرد دارد. این برنامه ها 32 بیت بوده و قابل اجرا در ویندوز XP می‌باشند برای اجرای آن در ویندوزهای بالاتر مانند 7، 8 و نیز 64 بیتی باید ابتدا یک محیط سیستم عامل مجازی روی ویندوز یا همان Virtual XP OS نصب نمود. خلاصه‌ای از نام و عملکرد این برنامه‌ها در جدول زیر آمده است. پیش از اجرای هر یک از این برنامه‌ها پس از هر بار روشن شدن کامپیوتر ابتدا یکبار فایل sn.bat را اجرا نمایید.

تحلیل مودال پاسخ فرکانسی، تولید FRF، تست کیفیت مودال و رسم توابع نمایانگر مود به روشهای SDOF, MDOF, Global-M و ...	MODENT
نمایش شکل مودها و شکل مود عملیاتی، پاسخ اجباری، تبدیل مود مختلط به حقیقی	MODESH
تولید مش سه بعدی برای نقاط اندازه گیری و مدلسازی سازه های مختلف در دستگاه مختصات کارتزین، قطبی و کروی	MESHGEN
طراحی تست ارتعاشی: انتخاب نقاط بهینه تعلیق و تحریک و نقاط اندازه گیری پاسخ	MODPLAN
حل مقدار ویژه مختلط، آنالیز دینامیکی، تصحیح مدل با داده های اندازه گیری و پیش بینی ارتعاشات اجباری و نیروهای درونی	MODIFY
مجموعه ای از برنامه های جداگانه برای اجرای وظایف خاص	UTILITIES
برای تبدیل فایل‌های UFF به فایل‌های FRF	RD_FRF_U
برای تبدیل فایل‌های نرم افزار المان محدود ANSYS	RD_ANSYS
اداره فایل‌های مقدار ویژه برای کاهش مختصات، ادغام فایل‌ها، حذف مودها و ...	EIG_UTIL
برنامه ای برای ایجاد فایل‌های CRD. از فایل‌های FRF.	LIST_FRF
نمایش گره های دو فایل هندسی برای مقایسه MAC	MAP_GEN
برنامه نمایش شکل مودها	MODVIEW

در ادامه دیاگرام هایی آمده‌اند که ارتباط بین برنامه‌ها و فایل‌های مختلف بسته نرم‌افزاری ICATS را نشان می‌دهند. با مطالعه این دیاگرامها جریان اطلاعات اندازه‌گیری شده برای اجرای یک تحلیل مودال خوب بر کاربر روشن می‌گردد. توجه داشته باشید که کلیه برنامه‌های ICATS از فایل‌های به فرم ASCII استفاده می‌کنند، لذا این فایلها را میتوان به راحتی با یک ویرایشگر متن، ویرایش کرد. تا اینجای کار ما یکسری فایل FRF برای صفحه مورد نظر تولید نموده ایم و حالا میخواهیم فرکانسهای طبیعی آن و شکل مودهای آن را به دست آورده و با مدل المان محدود حاصل از نرم افزار Ansys مقایسه کنیم.

همانطور که در شکل (46) آمده است، برای انجام آنالیز مودال دو حالت موجود است. حالت اول اینکه از سازه فقط یک پاسخ فرکانسی موجود باشد و حالت دوم اینکه تعداد بیشتری پاسخ فرکانسی اندازه گیری شده باشد. حالت اول برای تعیین فرکانسهای طبیعی و ضرایب دمپینگ کاربرد دارد، در حالیکه از حالت دوم برای رسم شکل مودها و استخراج ماتریس سختی، اینرسی و میرایی استفاده می شود.

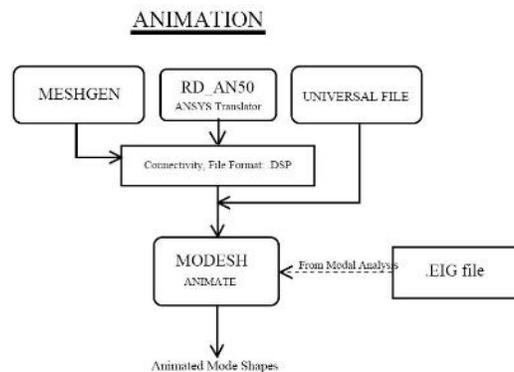
MODAL ANALYSIS



شکل (46). روند آنالیز مودال در ICATS

برای حالت اول پس از اندازه گیری و ذخیره پاسخ فرکانسی یعنی فایل `.frf`، فایل مذکور را با نرم افزار MODENT باز می‌کنیم و با گزینه های `Analyze` و سپس تعیین روش یعنی `Circle-fit`، `Line-fit` و یا `Nonlinear-fit` پاسخ سیستم مورد نظر را می‌توان تحلیل کرد. در حالت دوم، با توجه به اینکه تعدادی پاسخ فرکانسی تهیه شده است، ابتدا از طریق برنامه `ListFRFW` در پوشه `Utilities` همه پاسخهای فرکانسی را با هم ترکیب کرده و یک فایل `*.CRD` ایجاد می‌کنیم و سپس در محیط برنامه MODENT فایل ایجاد شده را برای تحلیل فراخوانی می‌کنیم.

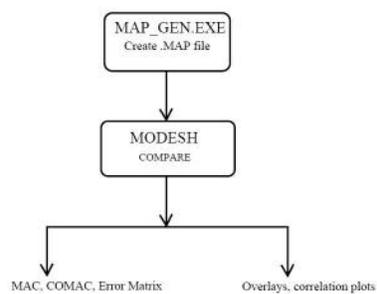
برای نمایش و مقایسه شکل مودها دو عمل می‌بایست انجام گیرد. مورد اول اینکه پس از انجام تحلیل با نرم‌افزار MODENT فایل مقدار ویژه و بردار ویژه حاصل از تحلیل (`EIG`) را ذخیره کرد و از طرف دیگر نیز می‌بایست هندسه سازه مورد نظر را مدل کرد. به این منظور می‌بایست فایل (`.DSP`) ایجاد کرد. این فایل را هم می‌توان به کمک `RD_ANSYS` از فایل‌های مدل نرم افزار `Ansys` ایجاد کرد و هم می‌توان به کمک یک ویرایشگر استاندارد مانند `Notepad` یا `Wordpad` به صورت دستی مدل ساده شده‌ای از سازه ایجاد کرد. برای نمایش مودها ابتدا نرم‌افزار `MODESH` را باز کرده و سپس دو فایل هندسه یعنی `DSP` و فایل تحلیل مودال یعنی `EIG` را فراخوانی نمود (شکل (47)).



شکل (47). روند انیمیشن شکل مودها در ICATS

برای مقایسه دو مدل که عموماً یکی مدل المان محدود و دیگری مدل حاصل از تست مودال می‌باشد نیز می‌توان از مجموعه ICATS استفاده کرد. به این منظور ابتدا به کمک نرم افزار `MAP_GEN.EXE` از روی فایل هندسه `DSP` فایل نقشه (`.MAP`) ایجاد کرده و با نرم افزار `MODESH` مودها را مقایسه کرده و از توابع `COMAC.MAC` و `Error Matrix` استفاده می‌کنیم (شکل (48)).

Eigenvector Comparison

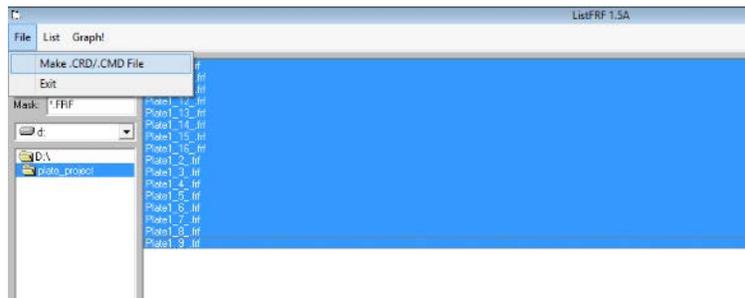


شکل (48). روند مقایسه مودها در ICATS

در پیوست-2 فایل‌های ICATS یعنی محتوی هر فایل و پسوند آن معرفی شده است.

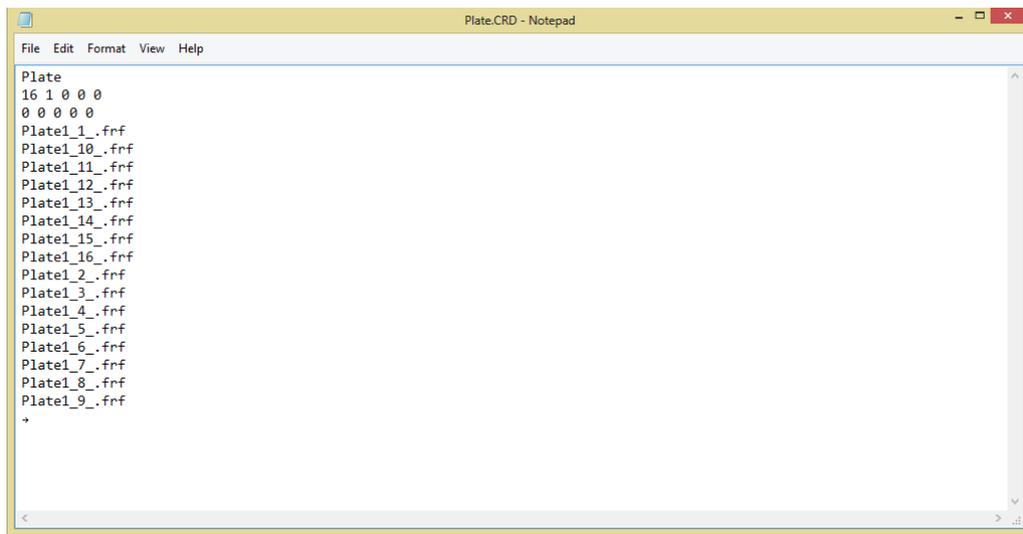
۱۶. آنالیز مودال در ICATS

تا به اینجا ما صفحه را مش بندی نموده و در 16 نقطه به آن ضربه زدیم و پاسخ فرکانسی آن را اندازه‌گیری نمودیم. حال برای ترکیب فایل‌های پاسخ فرکانسی با پسوند .frf آنها را به داخل یک فولدر منتقل نموده و به کمک فایل listfrfw از فولدر ICATS Utilities آنها را ترکیب می‌کنیم. در قسمت crd filename نامی برای فایل مورد نظر مانند plate انتخاب نموده و سپس آدرس همه frf های اندازه‌گیری شده را به نرم افزار داده و آنها را انتخاب می‌نماییم (به رنگ آبی در می‌آید شکل (49)). بعد با انتخاب گزینه make crd file از منوی file فایل جدید را در فولدر قبلی ذخیره نمایید. نرم افزار عنوانی نیز برای فایل سوال می‌نماید.



شکل (49). ایجاد فایل crd با نرم افزار listfrfw از فرآیندهای اندازه‌گیری شده

سپس فایل plate.crd ایجاد شده را با استفاده از notepad باز کنید (شکل-50). همانطور که مشاهده می‌شود، اسم فایلها و تعداد آنها (16) و شماره فایل point frf در این فایل نوشته شده است. اگر شماره فایل point frf صحیح نیست -عدد یک پس از عدد 16 سطر دوم فایل (شکل (50)) آنها را تصحیح نمایید، یعنی از لیست ببینید فایل شماره چندم مربوط به اندازه‌گیری است که در آن نود هم ضربه زده شده و هم پاسخ اندازه‌گیری شده است.



```

Plate
16 1 0 0 0
0 0 0 0 0
Plate1_1_.frf
Plate1_10_.frf
Plate1_11_.frf
Plate1_12_.frf
Plate1_13_.frf
Plate1_14_.frf
Plate1_15_.frf
Plate1_16_.frf
Plate1_2_.frf
Plate1_3_.frf
Plate1_4_.frf
Plate1_5_.frf
Plate1_6_.frf
Plate1_7_.frf
Plate1_8_.frf
Plate1_9_.frf
+
```

شکل (50). محتویات فایل crd

در نظر داشته باشید که کلیه فایل‌های آنالیز مودال چه هندسه، پاسخ فرکانسی مودها و ... به صورت متن ذخیره شده اند و می‌توان آنها را با ویرایشگرهای متنی مانند **notepad** باز نموده و اصلاح کرد. در مرحله بعد می‌بایست هندسه مدل را وارد کرد. برای اینکار روشهای مختلفی است که از روی **help** نرم افزار **icats** مطالعه نمود. اما در اینجا باز از روش تایپ استفاده می‌نماییم. هندسه ما یک صفحه است که دارای **16** نود و از اتصال این نودها المانها به دست می‌آیند. پس ابتدا یک فایل **new text document** باز نموده و مشخصات را داخل آن می‌نویسیم، سپس فایل با پسوند **dsp**. ذخیره می‌گردد برای آشنایی با محتویات یک **dsp** فایل لطفاً به پیوست-2 مراجعه نمایید. محتوی این فایل برای پروژه صفحه در شکل-51 نشان داده شده است. **Plate** همان عنوان پروژه است. در سطر سوم **16** تعداد نودها و **9** تعداد المانها است. از سطر 5 تا سطر 20 نودها به این صورت تعریف می‌شوند که ابتدا شماره نود و سپس مختصات **y,x** و **Z** نود مورد نظر وارد می‌شود. از سطر 21 تا 30 المانها تعریف می‌شوند به این صورت که ابتدا شماره المان سپس تعداد نودهای المان، بعد شماره نودها و در آخر رنگ المان وارد می‌گردد.

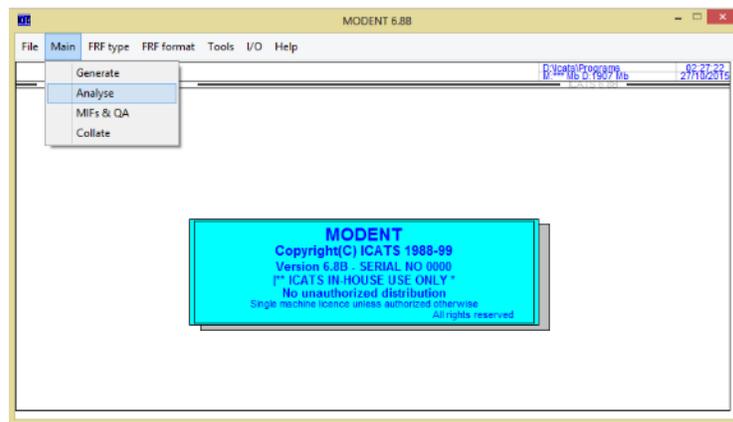
```

File Edit Format View Help
PLATE
0 0 0 0 0
0 0 0 0 0
16 9
1 0 3 0
2 1 3 0
3 2 3 0
4 3 3 0
5 0 2 0
6 1 2 0
7 2 2 0
8 3 2 0
9 0 1 0
10 1 1 0
11 2 1 0
12 3 1 0
13 0 0 0
14 1 0 0
15 2 0 0
16 3 0 0
1 4 1 2 6 5 13
2 4 2 3 7 6 13
3 4 3 4 8 7 13
4 4 4 5 6 10 9 13
5 4 6 7 11 10 13
6 4 7 8 12 11 13
7 4 9 10 14 13 13
8 4 10 11 15 14 13
9 4 11 12 16 15 13
+

```

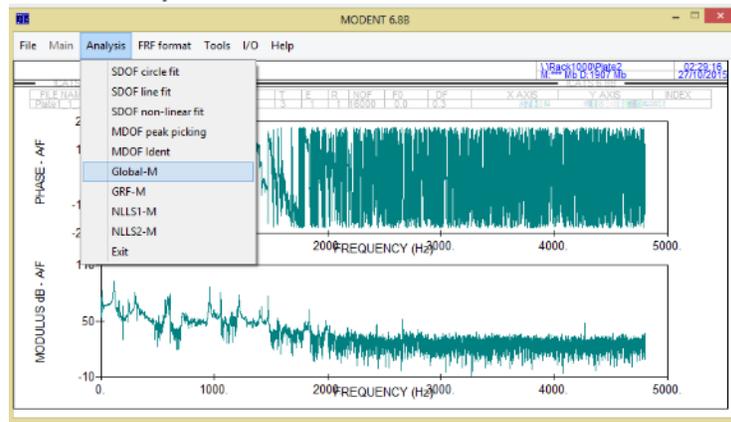
شکل (51). محتویات فایل dsp

پس از تولید فایل crd و فایل هندسه dsp می‌توان به سراغ آنالیز مودال رفت. به این منظور ابتدا از پوشه programs → icats فایل modent را باز نمایید. پنجره نرم‌افزار به صورت نشان داده شده در شکل 52- باز می‌گردد.



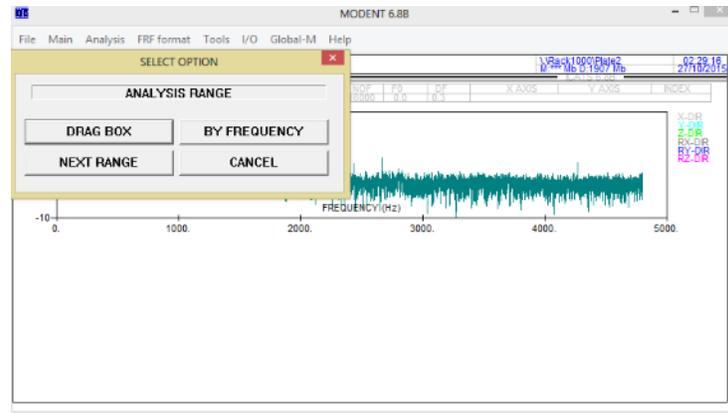
شکل (52). نرم‌افزار Modent

گزینه analyse از منوی main انتخاب کرده و multifrf را انتخاب کنید. سپس آدرس فایل crd ایجاد شده در مرحله قبل را به نرم‌افزار بدهید. در ادامه از منوی آنالیز روش آنالیز مودال مورد نظر را انتخاب نمایید. روشهای مختلفی وجود دارند که توضیحات این روشها در کتاب های آنالیز مودال موجود است. در اینجا روش global-m که برای سیستمهای چند درجه آزادی روش مناسبی است انتخاب شد (شکل 53).



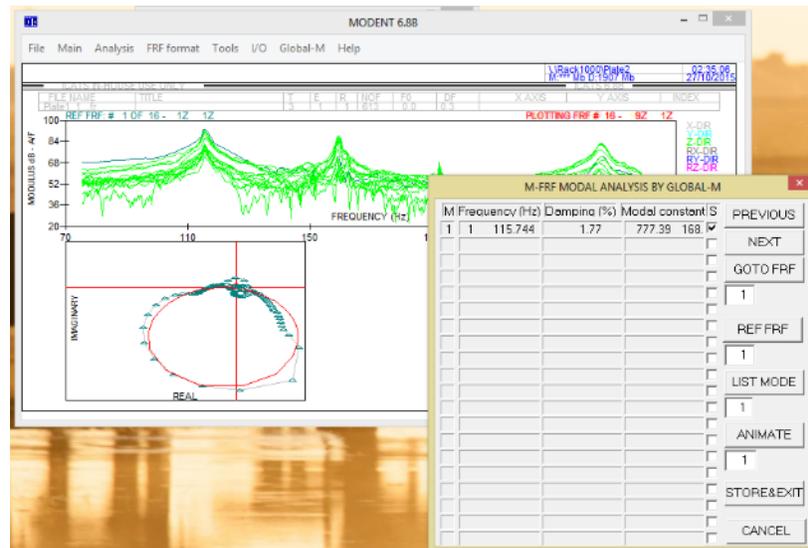
شکل (53). نرم افزار modent

سپس منوی به نام **global-m** به نرم افزار افزوده می‌گردد که با انتخاب آن و گزینه **analyse** می‌توان بازه فرکانسی مورد نظر برای تحلیل مودال را به صورت دستی **by frequency** و یا به کمک ماوس **drag box** انتخاب نمود.



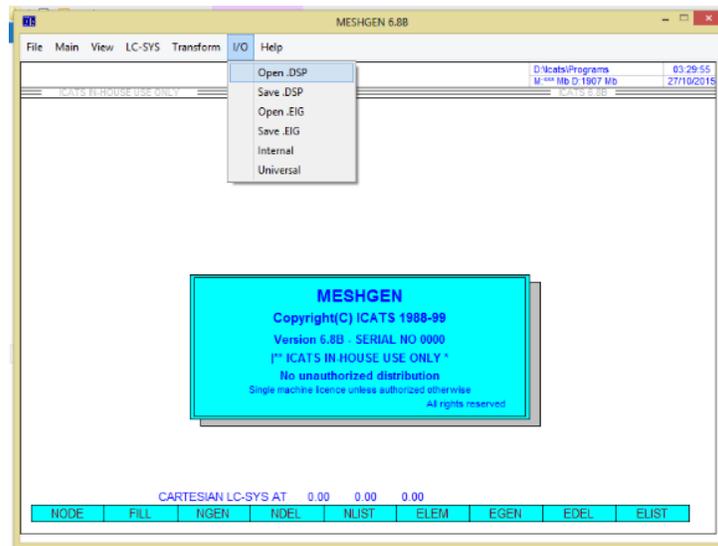
شکل (54). نرم افزار modent

سپس با هر بار انتخاب محدوده فرکانسی نزدیک یک فرکانس طبیعی می‌توان آن را در پنجره نرم‌افزار مشاهده نمود و در صورت تایید با زدن علامت تیک آن و گزینه **store & exit** آن را به مودهای استخراج شده افزود (شکل (55)). پس از استخراج مودهای مورد نظر می‌توان فایل فرکانس‌های طبیعی، ضرایب میرایی و شکل مودها را ذخیره نمود.



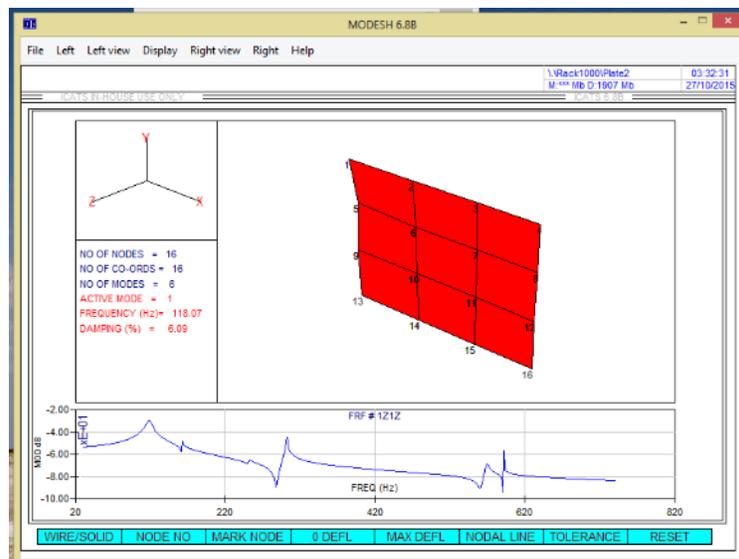
شکل (55). نرم افزار modent

برای ذخیره فایل نتایج آنالیز مودال به منوی global-m رفته و گزینه eig .save را بزنید. فایل با پسوند eig. همان مقدار ویژه Eigen value (فرکانس طبیعی) و بردار ویژه Eigen vectors (شکل مودهای سیستم) است. پس از ذخیره این فایل که می‌تواند به دو صورت مختلط یا حقیق ذخیره شود، میبایست دستگاه مختصات سیستم اندازه‌گیری را بر نتایج مودال تبدیل نمود که به آن transform می‌گویند. به این منظور فایل meshgen از پوشه programs را انتخاب کنید و در آن آدرس dsp فایل eig , فایل ایجاد شده در مراحل بالا را از منوی I/O وارد نموده و گزینه Transform را انتخاب نمایید (شکل (56)) و eig فایل جدید را ذخیره کنید.



شکل (56). برنامه meshgen

حال برای نمایش شکل مودها برنامه modesh را باز نموده و از منوی main گزینه animate را انتخاب نمایید و آدرس فایل dsp را به نرم افزار بدهید. از منوی left گزینه open eig را انتخاب نمایید. حال با زدن animation از منوی display می توانید شکل مودهای صفحه را مشاهده کنید. با فعال کردن گزینه های wire/solid و node no در پایین صفحه می توانید شماره نودها و المانها را نمایش دهید. با استفاده از mode no از منوی left می توانید مود دیگری را انتخاب کنید. در پایین صفحه نیز frf تولید شده از شکل مودهایی که از نرم افزار modent استخراج نمودید، نشان داده شده است.

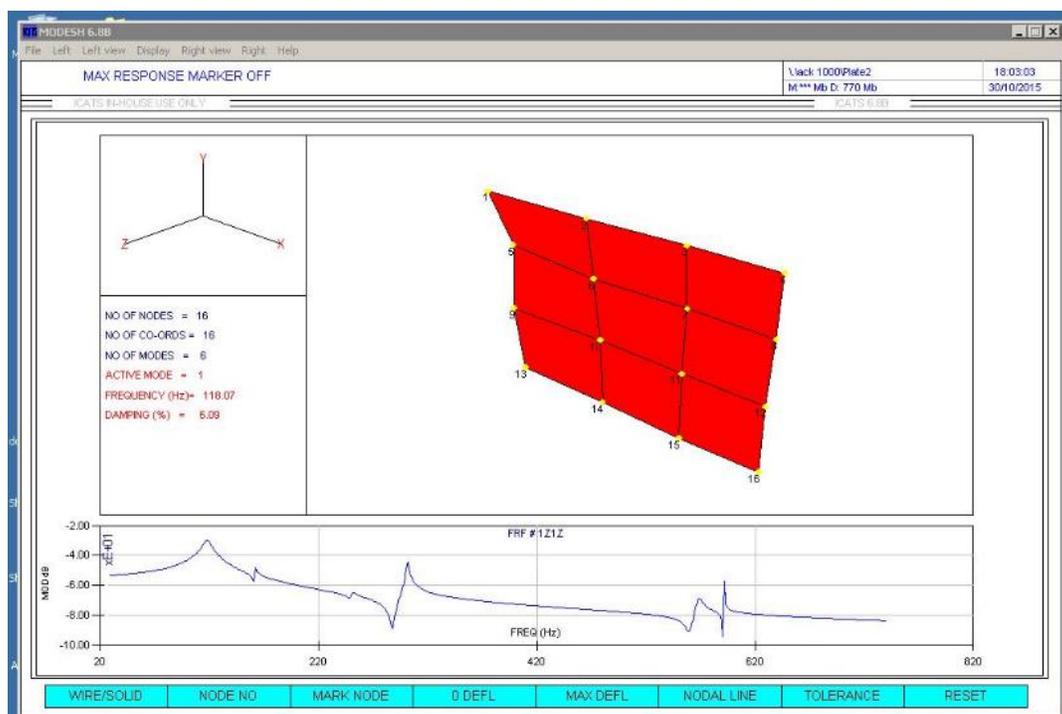


شکل (57). برنامه modesh

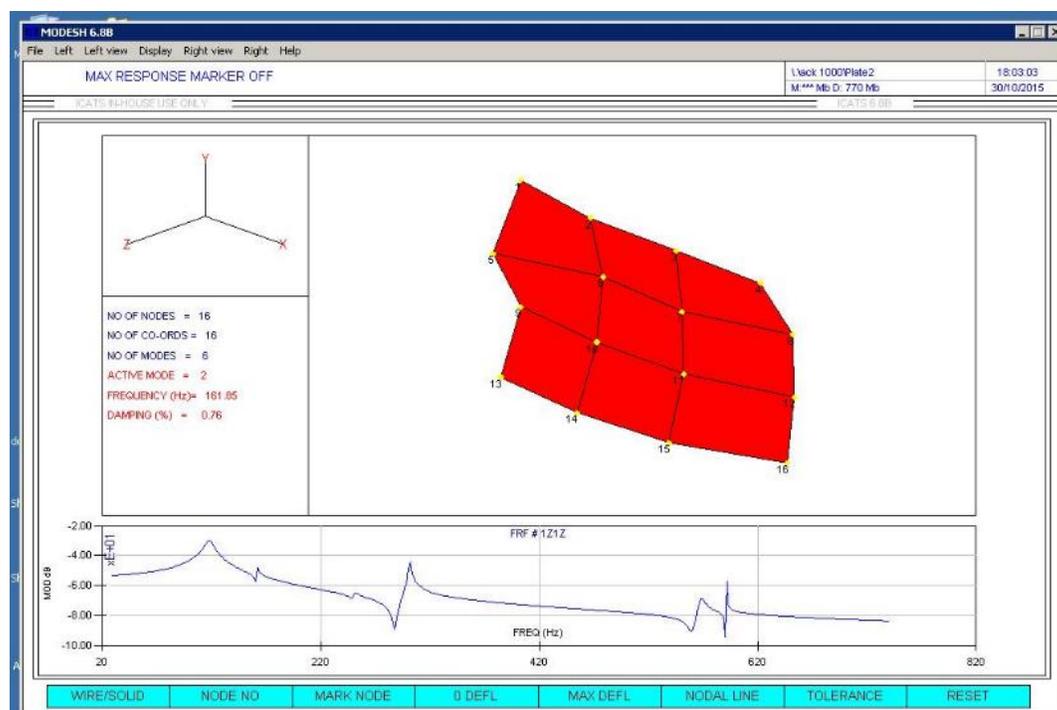
به طریق مشابه که در این بخش ذکر شد پنج شکل مود اول صفحه شکل (41) استخراج شد. فرکانس طبیعی این شکل مودها به همراه مقایسه آنها با نتیجه حاصل از تحلیل المان محدود با نرم افزار Ansys در جدول زیر آمده است:

خطای مدل از تست عملی (%)	مدل المان محدود Ansys	تست تجربی	فرکانس طبیعی (هرتز)
2.5	121	118	1
4.3	168	161	2
-16.0	210	250	3
-0.3	300	301	4
-4.2	544	568	5
0.2	592	591	6

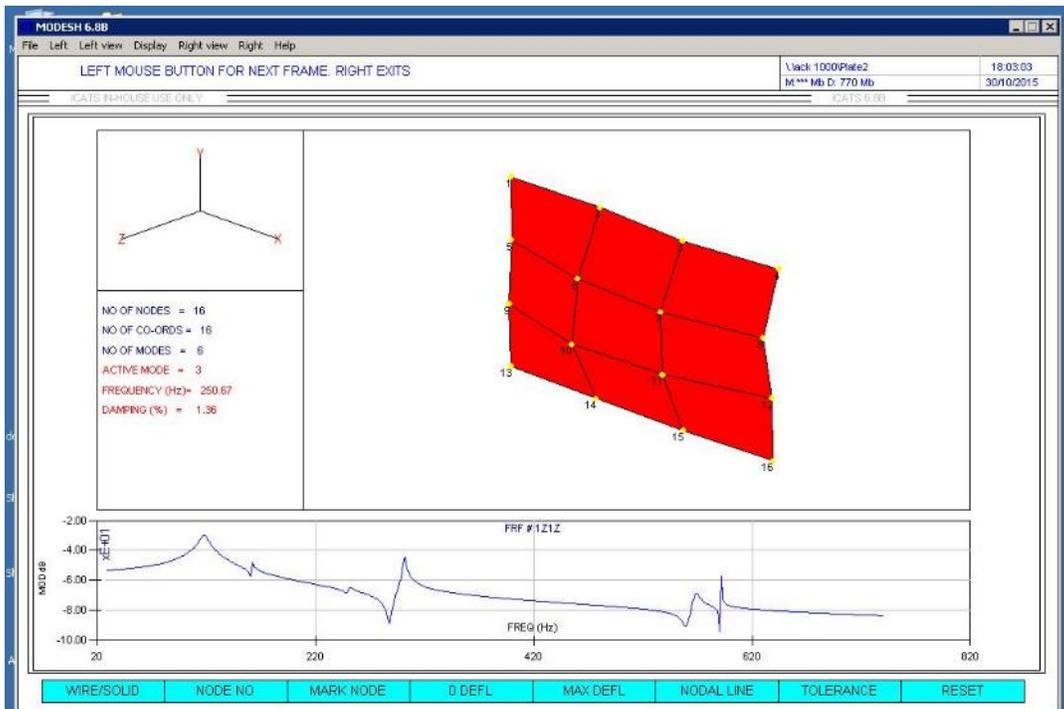
در شکل‌های زیر شکل مود این 5 فرکانس طبیعی که در نرم افزار ICATS برنامه MODESH رسم شده است، آمده است.



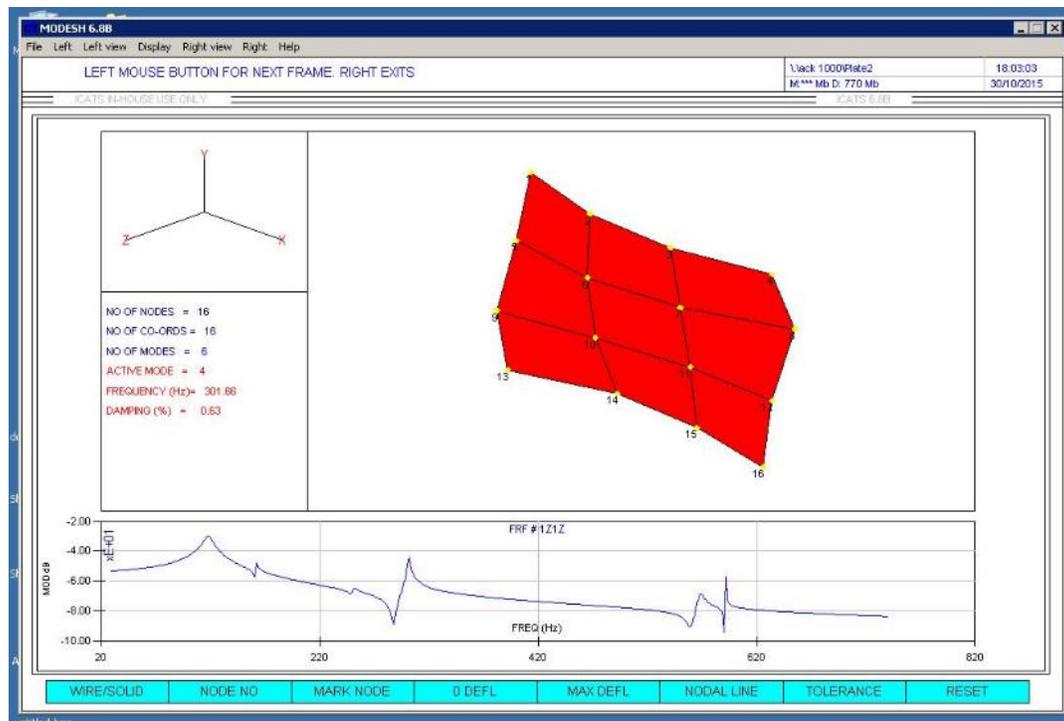
شکل (58). شکل مود 118 هرتز



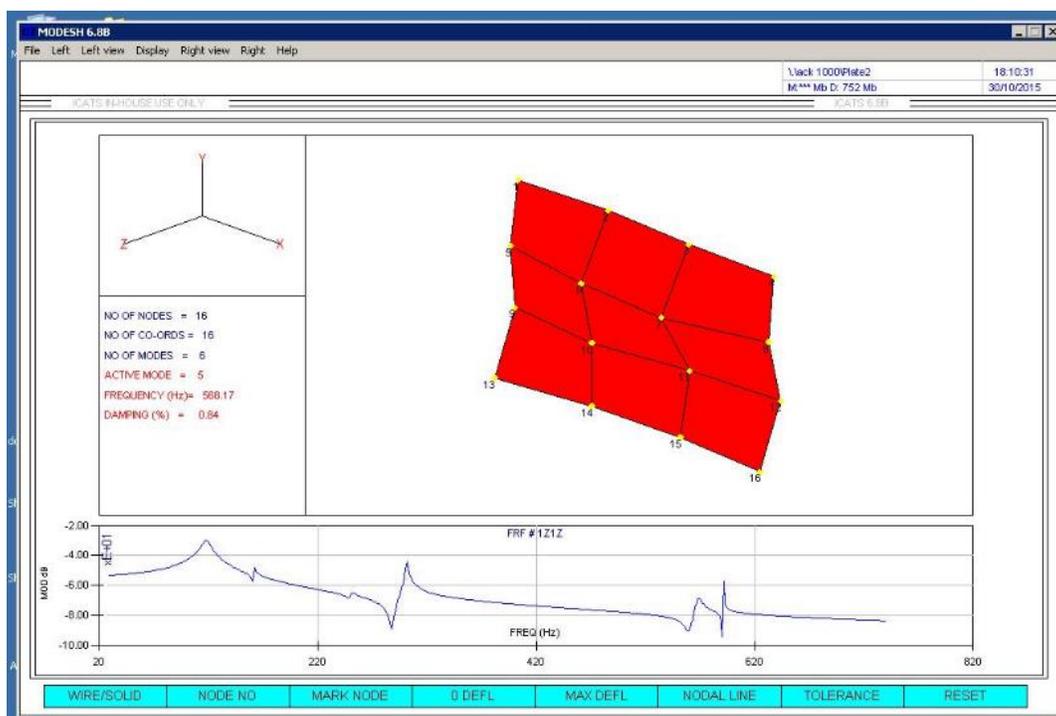
شکل (59). شکل مود 161 هرتز



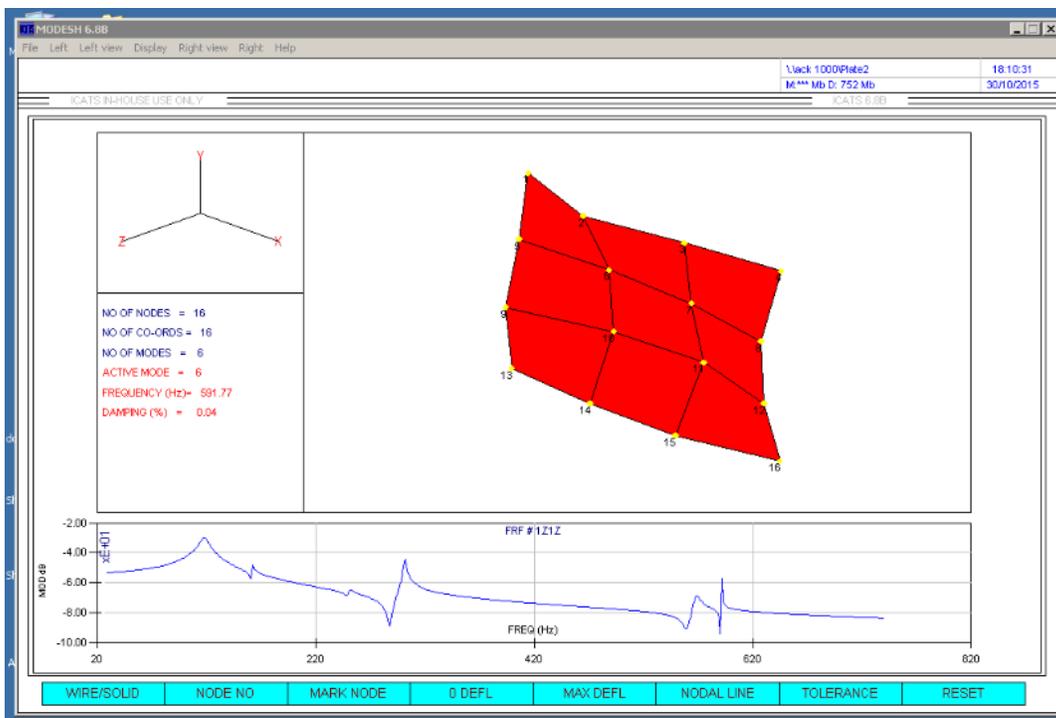
شکل (60). شکل مود 250 هرتز



شکل (61). شکل مود 301 هرتز



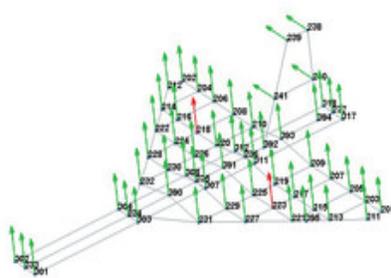
شکل (62). شکل مود 568 هرتز



شکل (63). شکل مود 591 هرتز

۱۷. آنالیز مودال عملیاتی با ARTEMIS

آنالیز مودال عملیاتی (Operational Modal Analysis) یا به اختصار OMA که به آن آنالیز مودال بر اساس خروجی سیستم و یا آنالیز پاسخ به تحریک محیط نیز می‌گویند، نوعی از آنالیز مودال است که بدون در نظر گرفتن و یا کنترل تحریک‌های ورودی سیستم انجام می‌شود. خروجی‌های، این روش نسبتاً جدید در آنالیز مودال همان خروجی‌های آنالیز مودال با روش‌های سنتی یعنی: شکل مود، فرکانس طبیعی و نسبت میرایی می‌باشد. تفاوت OMA با تغییر شکل عملیاتی (Operating Deflection Shape) یا به اختصار ODS در



این است که در OMA تحریک‌های نویز و ورودی حذف شده و فقط اطلاعات مودال به دست می‌آید. فواید OMA نسبت به روش‌های دیگر آنالیز مودال شامل موارد زیر می‌باشد:

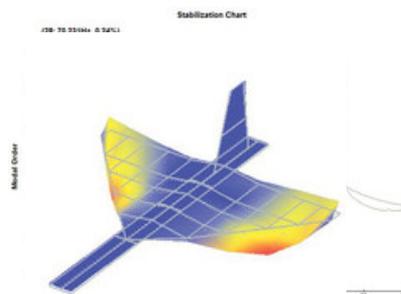
✓ روش OMA یک روش چند ورودی - چند خروجی (Multiple Input Multiple Output) است، این به این معنی است که

این روش می‌تواند مودهای نزدیک به هم را و حتی مودهای تکراری را با دقت بهتری نسبت به روش‌های تک ورودی - چند خروجی پیش‌بینی کند.

✓ برای تحلیل با این روش، تست ساده‌تر انجام می‌شود، زیرا دیگر نیازی به یک چکش تست مودال و یا شیکر ارتعاشی نیست. در واقع با توجه به اینکه روش فقط بر اساس اندازه‌گیری خروجی‌ها عمل می‌کند، می‌توان حین اندازه‌گیری پاسخ صرفاً ضربات تصادفی به سازه در نقاط مختلف وارد نمود.

✓ مزیت دیگر این روش نسبت به سایر روش‌ها اینست که در این روش خروجی شکل مودها بر اساس نویز ورودی از محیط و نیز با در نظر گرفتن شرایط مرزی حین عملکرد سازه می‌باشد.

کاربردها

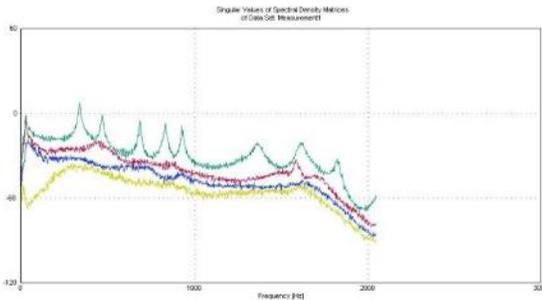


✓ تست غیر مخرب، در انجام تست‌های غیر مخرب، هدف

اینست که سلامت سازه در طول زمان تست شود. به دلیل

اینکه در روش OMA سازه حین عملکرد تحلیل می‌شود، از آن

برای مانیتورینگ سلامت سازه می‌توان به خوبی استفاده نمود.



✓ **عیب یابی**، در سالهای اخیر این روش به عنوان یکی از روشهای پیدا کردن عیوب در سازه های بزرگ با موفقیت به کار رفته است. از شکل مودها و فرکانسهای طبیعی برای پیدا کردن ترک و آسیب دیدگی در سازه استفاده می شود.

✓ **تعیین دامنه ارتعاشات**، در مواردی که مدل المان

محدود از سازه در دسترس است، می توان به کمک اعمال نتایج اندازه گیری تجربی در مدل، ارتعاشات نقاط غیر قابل اندازه گیری را پیش بینی نمود.

✓ **تحلیل خستگی**، به کمک مورد بالا می توان، میزان آسیب تجمعی در نقاط اندازه گیری نشده مانند مفصل های زیر آب سازه های دریایی را تعیین نمود.

✓ **مقیاس بندی شکل مودها**، در مورد سازه های بزرگ با روش OMA می توان شبیه سازی پاسخ بهتری با توجه به تعیین دقیق تر شکل مودها و تخمین ماتریس پاسخ فرکانسی انجام داد.

برای انجام آنالیز مودال عملیاتی با استفاده از آنالیزهای پاسخ فرکانسی از نرم افزار ARTEMIS استفاده می گردد. این نرم افزار یکی از قوی ترین نرم افزارهای موجود در بازار برای انجام آنالیز مودال عملیاتی است که بسیاری از شرکت های شناخته شده در زمینه اندازه گیری ارتعاشات از این نرم افزار به عنوان ماژول در بسته نرم افزاری خود یعنی استفاده می کنند. این نرم افزار برای تحلیل مودال از روش های مختلف ارائه شده در دنیا استفاده می کند. تکنیک های محاسبات عددی مانند Crystal Clear Stochastic Subspace Identification به نرم افزار این امکان را می دهد که خروجی های مورد نظر تحلیل مودال را از روی پاسخ خام زمانی خروجی سازه تحت شرایط نرمال و طبیعی کارکرد خود استخراج نماید. روش کار بدین صورت است که با اتصال چندین سنسور به آنالیزر داده های ارتعاشی به صورت پاسخ زمانی فایل های متنی ذخیره سازی می شوند. در مرحله بعد هندسه تقریبی از سازه در نرم افزار مدلسازی شده و فایل های پاسخ ارتعاشی ذخیره شده نقاط مختلف سازه، به نرم افزار آدرس دهی می شود. در مرحله بعد نرم افزار تحلیل مودال را روی سازه با توجه به پاسخ ها انجام داده و شکل مودها، فرکانس های طبیعی و نسبت های میرایی را استخراج می کند.

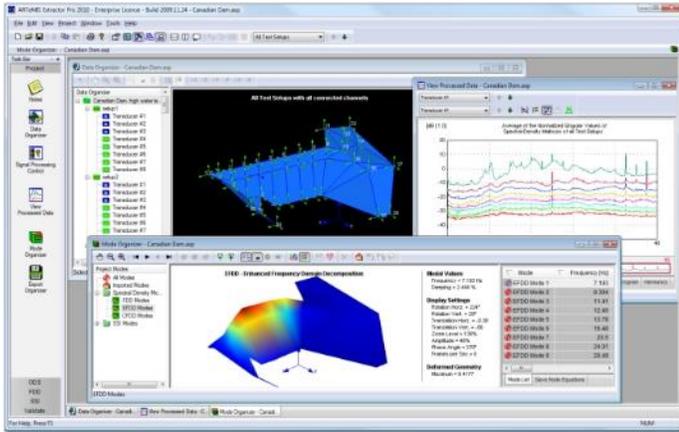
جهت آشنایی تعدادی از پروژه های انجام شده با نرم افزار ARTEMIS معرفی می شود:

✓ آنالیز مودال برج Heritage Court

✓ تحلیل مودال پل واسکودوگاما

آموزش آنالیز مودال با تحلیل گر

- ✓ آنالیز مودال سقف استادیوم براگا
- ✓ تحلیل مودال سد ونکوور کانادا
- ✓ آنالیز مودال سفینه سوفیا و ...



Mode	Frequency [Hz]	Res. Frequency [Hz]	Damping Ratio [%]	Std. Deviation Ratio [%]
RFDD Mode 1	218	0	0	0
RFDD Mode 2	338.4	0	0.86	0
SBHUPC Mode 3	339.6	0	0.8784	0
FDD Mode 4	459	0	0	0
CFDD Mode 5	469.7	0	0.8473	0
SBHUPC Mode 6	469.9	0	0.8296	0
SBHUPC Mode 7	695.6	0	0.3548	0
RFDD Mode 8	697.1	0	0.3592	0
FDD Mode 9	888	0	0	0
SBHUPC Mode 10	837.1	0	0.578	0
CFDD Mode 11	833.2	0	0.5991	0
RFDD Mode 12	914	0	0	0
FDD Mode 13	929	0	0	0
RFDD Mode 14	928.6	0	0.3888	0
SBHUPC Mode 15	939.8	0	0.363	0
FDD Mode 16	1305	0	0	0
SBHUPC Mode 17	1306	0	1.554	0
CFDD Mode 18	1307	0	1.558	0
SBHUPC Mode 19	1522	0	0.8412	0
RFDD Mode 20	1517	0	0.8528	0
SBHUPC Mode 21	1521	0	0.8793	0
FDD Mode 22	1526	0	0	0
CFDD Mode 23	1526	0	0	0
SBHUPC Mode 24	1528	0	0.7661	0
RFDD Mode 25	1527	0	0.8362	0

برای تحلیل در نرم افزار ARTEMIS دو نوع فایل نیاز است. نوع اول فایل `.cfg` یا همان فایل پیکربندی (configuration file) و نوع دوم فایل اندازه گیری ارتعاشات با پسوند `.asc`. ابتدا به تشریح فایل `cfg` می پردازیم، این فایل را می توان با نرم افزارهای ویرایش متن مانند notepad باز نمود. مواردیکه در این فایل ذکر می شوند به شرح زیر است:

(1) فاصله زمانی دو نمونه که برابر است با عکس فرکانس نمونه برداری و به صورت زیر در فایل وارد می شود.

This is the sampling interval specified in seconds.

T

0.00666888962988

(2) تعریف نودها یا همان گره های مدل که به صورت شماره نود و مختصات X, Y و Z وارد می شود.

This is the node definition group.

Node Number, X-coordinate, Y-coordinate, Z-coordinate.

Nodes

1	0	3	0
2	1	3	0
3	2	3	0
4	3	3	0
5	0	2	0

(3) تعریف خط ها که از اتصال نودها درست شده است. به این منظور شماره نودها وارد می شود.

This is the line definition group.

From Node Number, To Node Number.

Lines

2	1
3	2

4) تعریف المانها به این منظور شماره نودها برای تعریف هر المان وارد می شود.

This is the surfaces definition group.

From first Node Number, second Node Number, To third Node Number.

Surfaces

1	2	5
2	5	6
2	3	6
3	6	7

5) در قسمت **setups** ابتدا نام اندازه گیری، سپس نام فایل اندازه گیری و در ادامه معرفی ستونهای اندازه گیری وارد می شود، به این صورت که شماره نود اندازه گیری در ستون اول و سپس درجه آزادی اندازه گیری در ستونهای بعدی به همراه واحد اندازه گیری و نیز این که کدام سنسور **reference** است. شتاب سنج مرجع شتاب سنجی است که در همه فایلهای اندازه گیری ثابت است و محل آن تغییر نمی کند، اما شتاب سنج آزاد می تواند در اندازه گیری ها جابه جا شود. در هر اندازه گیری به حداقل یک شتاب سنج مرجع نیاز است.

Setups

Measurement 1

mes31set.asc

0.000001 1 0 0 2 m/s² Acceleration Free Transducer 1

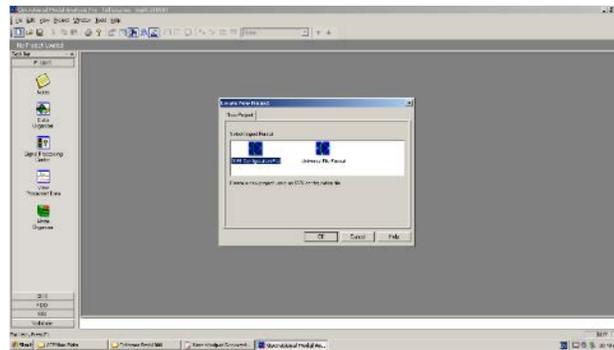
0.000001 1 0 0 5 m/s² Acceleration Ref. Transducer 1

0.000001 1 0 0 11m/s² Acceleration Free Transducer 2

0.000001 1 0 0 6 m/s² Acceleration Ref. Transducer 2

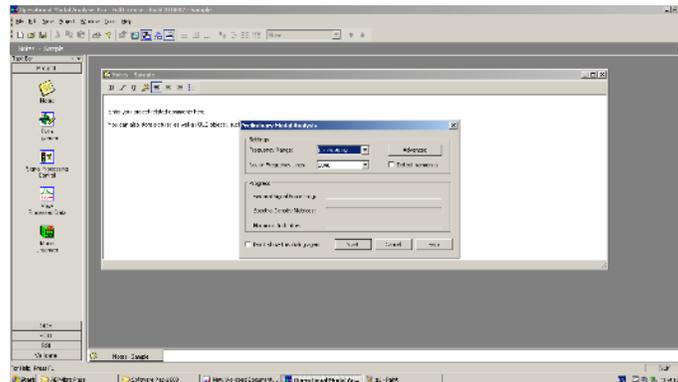
فایل دوم فایل **asc** است که در واقع ستونهایی از عدد است که هر ستون ارتعاشات اندازه گیری شده توسط یک ستون اسن. برای ایجاد این فایل نرم افزار **CMS** را باز نموده و سپس پس از اندازه گیری گزینه **export asc file** را انتخاب نمایید.

ابتدا روی آیکون نرم افزار کلیک نمایید. در نظر داشته باشید که پیش از این مرحله میبایست فایل تعریف مدل **configuration** تهیه شده باشد، همینطور فایلهای اندازه گیری با پسوند **asc**. نیز از نرم افزار **Vibro-CMS** ذخیره شده باشد. یک پوشه (**Folder**) به نام پروژه باز نموده و همه این فایلها را داخل آن پوشه قرار دهید. ابتدا گزینه **NEW SVS Configuration file** سپس را انتخاب نمایید.



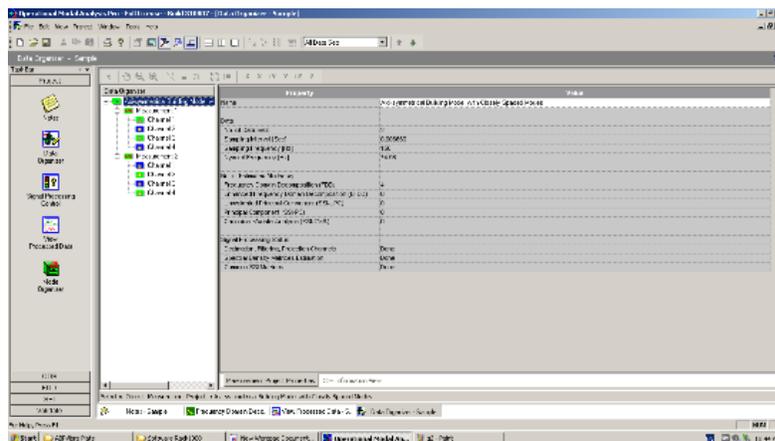
شکل (64). نرم افزار Artemis

در پنجره باز شده بازه فرکانسی مورد نظر و نیز تعداد خطوط محاسبه طیف فرکانسی را انتخاب نموده و Start کنید.



شکل (65). تنظیمات تحلیل در نرم افزار Artemis

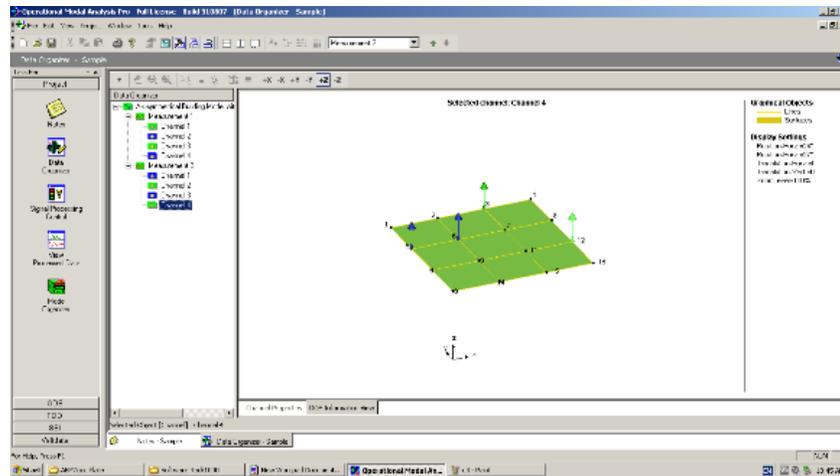
از طریق منوی سمت راست Organizer نقاط و تنظیمات اندازه گیری و تحلیل قابل مشاهده است.



شکل (66). تنظیمات اندازه گیری در نرم افزار Artemis

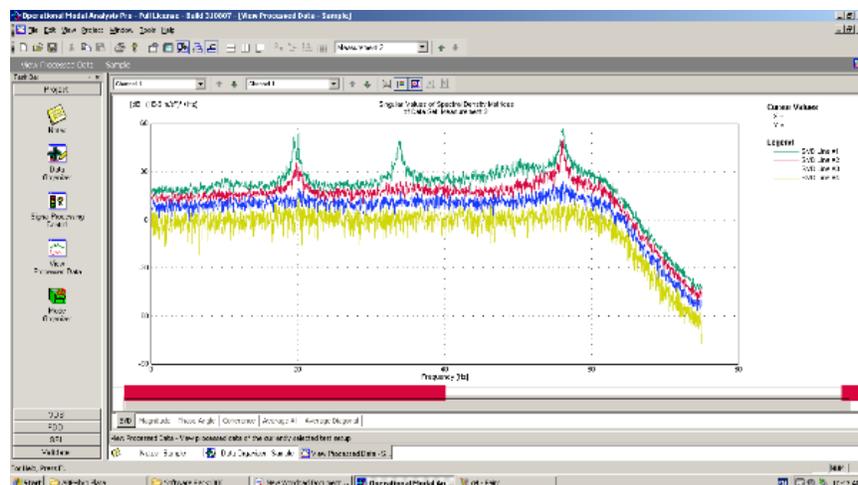
در `DOF information view.tab` درجه آزادیهای اندازه گیری شده بر روی مدل هندسی نشان داده

می شود.



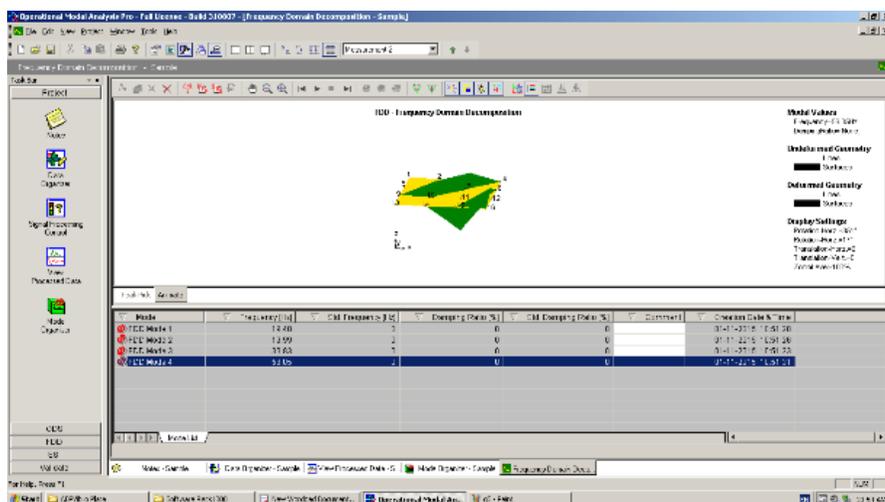
شکل (67). نمایش مدل در نرم افزار Artemis

در قسمت data processed View دامنه، فاز، coherence و Singular Value Decomposition نشان داده می شود.



شکل (68). نمایش نتایج

با استفاده از منوی tools گزینه mode organizer می توان مودها را افزود و در قسمت animation آنها را مشاهده نمود.



شکل (69). رسم شکل مودها

```
finish
/clear
/prep7
L1=.205
L2=.205
Thk=.0016
Dens1= 7600!Composite Density
K_spring=200
L_spring=.06
Kx1=1000
k,1,0,0,0
k,2,L1
k,3,L1,L2
k,4,0,L2
l,1,2
l,2,3
l,3,4
l,4,1
al,1,2,3,4
lesize,all,,10
ET,1,MESH200
KEYOPT,1,1,7
KEYOPT,1,2,0
MP,EX,1,210e 9! Young's Modulus
MP,PRXY, 1,0.28! Poisson's ratio
MP,DENS,1,Dens 1! Density
type,1
amesh,1
ET,2,SOLID 186
mat,1
type, 2
esize,,1
VOFFST,1,Thk , ,
n,2005,L1+L_spring,-L_spring
```

```

n,2006,-L_spring,-L_spring
n,2007,-L_spring,L2+L_spring
n,2008,L1+L_spring,L2+L_spring
R,1,Kx , , , , ,1
R,2,Kx , , , , ,1
R,3,Kx , , , , ,1
ET,8,COMBIN 14
KEYOPT,8,1,0
KEYOPT,8,2,1
KEYOPT,8,3,0
type,8
real,1
e,2,2005
e,22,2008
e,1,2006
e,42,2007
ET,9,COMBIN 14
KEYOPT,9,1,0
KEYOPT,9,2,2
KEYOPT,9,3,0
type,9
real,1
e,2,2005
e,22,2008
e,1,2006
e,42,2007
ET,10,COMBIN 14
KEYOPT,10,1,0
KEYOPT,10,2,3
KEYOPT,10,3,0
type,10
real,1
e,2,2005
e,22,2008
e,1,2006
e,42,2007

```

```
d,2005,all
d,2006,all
d,2007,all
d,2008,all
eplot
finish
/SOLU

ANTYPE, 3! Harmonic analysis
F,514,FZ, 1! Apply force
HARFRQ,0,1000, ! Frequency range
NSUBST,200, ! Number of frequency steps
KBC, 1! Stepped loads
SOLVE
FINISH
/POST 1

INRES,BASIC
FILE,'file','rst  '!'
SET,LAST
FINISH
/POST 26

FILE,'file','rst  '!'

/UI,COLL, 1

NUMVAR, 200
SOLU,191,NCMIT
STORE,MERGE
PLCPLX,0
PRCPLX,1
FILLDATA,191,, , 1,1
REALVAR, 191,191
NSOL,2,514,U,Z, UZ_ ,2
STORE,MERGE
!Name: UZ_3

!ID: 3

!Function: nsol( 958,U,Z)*{FREQ}*{FREQ}
```

NSOL,200,514,U,Z
PROD, 199,200,1
PROD,3,199,1,,FRF
STORE,MERGE
XVAR, 1
PLVAR,,3

پیوست-2 معرفی فایل‌های ICATS

همانطور که پیش از این ذکر شد، برنامه ICATS مجموعه ای از برنامه های مختلف است که برای تحلیل دینامیکی سازه ها کاربرد دارد. برای ارتباط بین این برنامه ها از فایل‌های مختلفی استفاده می شود که هر کدام از این فایلها دارای پسوند و محتوی خاصی بوده و برای ارتباط بین دو برنامه خاص به کار می روند. برای مثال برای نمایش شکل مود ابتدا فایل .EIG که حاوی فرکانسهای طبیعی و شکل مودها است توسط برنامه MODENT ایجاد شده و به برنامه MODESH فراخوانی می شود. در این قسمت فایل‌های مختلف که در برنامه ICATS مورد استفاده قرار می گیرند، به طور کامل معرفی می گردند.

1. فایل‌های پاسخ فرکانسی

پسوند: .FRF.

منبع ایجاد فایل: فایل ایجاد شده از آنالایزر ارتعاشی

محتوی فایل: مرجع مختصات گره هایی از سازه که تحریک و پاسخ از آنها اندازه گیری شده است، قسمت حقیقی و مختلط پاسخ فرکانسی، اطلاعات Coherence در صورت وجود، اطلاعات نیرو برای اندازه گیری Sine-Sweep در تحلیل غیر خطی

کاربرد: فایل ورودی برای تحلیل مودال-MODENT

ورودی تولید فایل .CRD. با برنامه LIST_FRFW

ورودی برای گزینه OVERLAY از برنامه MODESH

تولید شده توسط گزینه های ANIMATE و MODIFY از برنامه MODESH

<u>Record</u>	<u>نام متغیر</u>	<u>نوع</u>
1	Title عنوان و نام پاسخ فرکانسی	کاراکتر
2	ITYPE 1=نسبت جابه جایی به نیرو	عدد
	2=سرعت به نیرو نسبت	
	3=شتاب به نیرو نسبت	
3	N,F1,DELF	عدد
	(HZ)، اختلاف دو نقطه (HZتعداد نقاط فرکانسی، فرکانس شروع)	
4	ICOHER	عدد
	Coherence وجود داده عدم=0	
	Coherence اطلاعات وجود=1	
	نیرو=2	
5	IEN,IED,IRN,IRD,ISCALE	عدد
	IEN=تحریک نود	
	IED=تحریک جهت	
	(1=x, 2=y, 3=z, 4=rotx, 5=roty , 6=rotz)	
	IRN=پاسخ نود	
	IRD= جهت پاسخ	
	(1=x, 2=y, 3=z, 4=rotx, 5=roty , 6=rotz)	
	ISCALE=0 حساسیت سنسورها در اندازه گیری لحاظ شده است	
	ISCALE=1 پاسخ فرکانسی می بایست در یک مضرب، ضرب شود	
از اعداد 11، 12، 13 و نیز می توان برای توصیف جهت استفاده کرد که نشانگر سیستم مختصات غیر از کارتیزین می باشند.		
6	SCALE,COLOR,DUM3,DUM4,DUM5	عدد
	SCALE: مضرب ثابت برای ضرب پاسخ فرکانسی	
	COLOR: رنگ نمایش پاسخ فرکانسی (1-16)	
	DUM3,DUM4,DUM5 بدون استفاده	
7	IEXC,IRES	عدد
	عدد مختصات جهانی تحریک و پاسخ	
8	H1,H2,...,Hn	عدد مختلط
	مقدار FRF اندازه گیری شده در فرکانسهای مختلف	
9	C1,C2,...,Cn	عدد مختلط
	مقدار Coherence یا نیرو اندازه گیری شده در فرکانسهای مختلف	
10	F1,F2,...,Fn	عدد
	فرکانسهایی که در آن پاسخ فرکانسی ثبت شده، این مورد وقتی کاربرد دارد که FRF در فرکانسهایی با اختلاف ثابت ثبت نشده است.	

2. فایل‌های مقدار ویژه

پسوند فایل: EIG.

فایل ایجاد شده از : گزینه های Multi-FRF Analysis, Collate از برنامه MODENT و گزینه های Convert و Compare از برنامه Modesh. از مترجم ANSYS برنامه RD_ANSYS و برنامه EIG_UTIL

محتوی فایل: فرکانس های طبیعی، ضرایب دمپینگ، بردارهای ویژه (شکل مودها) که می توانند حقیقی و یا جرم-نرمالیزه باشند.

کاربرد: فایل ورودی گزینه های Convert, Compare, Animation از برنامه MODESH و گزینه Regenerate از برنامه MODENT و برنامه MODPLAN

<u>Record</u>	<u>نام متغیر</u>	<u>نوع</u>
1	Title عنوان و نام فایل مقدار ویژه	کاراکتر
2	M,N,MAST تعداد مودها، تعداد مختصات، تعداد مختصات اصلی	عدد
3	IDAMP, IPHI, IEIG کُد دمپینگ، نوع ماتریس فی، کُد ورودی ماتریس فی 0IDAMP= ضرایب میرایی در فایل ذخیره نمی شود. 1IDAMP= ضرایب میرایی در فایل ذخیره میشود. 0IPHI= ماتریس فی بخش موهومی ندارد. 1IPHI= ماتریس فی بخش موهومی دارد. 1IEIG= ستونها مقادیر بردار ویژه اند 2IEIG= سطرها مقادیر بردار ویژه اند	عدد
4	,MMAST2,M1M شماره مختصات اصلی	عدد
5	,...,FM2,F1F مقادیر فرکانسهای طبیعی	عدد
6	,...,ETAM2,ETA1ETA مقادیر ضرایب میرایی	عدد

<u>Record</u>	<u>نام متغیر</u>	<u>نوع</u>
7	5, IDUM4 IDIR, IMASS, NSOL, IDUM	عدد
	0 IDIR= جهت مختصات موجود نیست	
	1 IDIR= جهت مختصات موجود است	
	0 IMASS= مقیاس گذاری برای شکل مود موجود نیست	
	1 IMASS= شکل مودها در ریشه مودال مَس ضرب شوند	
	2 IMASS= هر مود را در ضریب آمده می بایست ضرب کرد	
	2 NSOL= اطلاعات از فایل UFF آمده است	
	5, IDUM4 IDUM بدون استفاده	
	عدد مختصات جهانی تحریک و پاسخ	
8	5, DUM4, DUM3, DUM2, DUM1 DUM	عدد
	بدون استفاده	
9	Re(PHIMN11), ..., Re(PHI	عدد
	قسمت حقیق ماتریس بردار ویژه	
10	Im(PHIMN11), ..., Im(PHI	عدد
	قسمت موهومی ماتریس بردار ویژه	
11	..., 2, IDIR2, NODE1, IDIR1 NODE	عدد
	1 NODE شماره نود اولین آرایه بردار ویژه	
	1 IDIR جهت اولین آرایه بردار ویژه (1, 2x, =z3=y, =rotz6rotx, ..., =4	
12	..., FACTM1 FACT	عدد
	اگر 1 IMASS=، جرم مودال	
	اگر 2 IMASS=، ضرایب مقیاس شکل مودها	

3. فایل‌های اطلاعات مودال از تحلیل تک پاسخ فرکانسی

پسوند فایل: MOD.

فایل ایجاد شده از : برنامه MODENT پس از تحلیل مودال پاسخ فرکانسی تکی

محتوی فایل: فرکانس های طبیعی، ضرایب دمپینگ، ثابت مودال و روش تحلیل برای هر مود

کاربرد: فایل ورودی گزینه های Collate و Regenerate از برنامه های MODENT

<u>Record</u>	<u>نام متغیر</u>	<u>نوع</u>
1	Title عنوان و نام فایل اطلاعات مودال	کاراکتر
2	IEN,IED,IRN,IIRD,IDUM	عدد
	IEN نود تحریک	
	IED جهت تحریک	
	IRN نود پاسخ	
	IIRD جهت پاسخ	
	IDUM بدون استفاده	
3	5,DUM4,DUM3,DUM2,DUM1DUM	عدد
	بدون استفاده	
4	IEXC,IRES	عدد
	شماره مختصات جهانی تحریک و پاسخ	
5	NOM	عدد
	تعداد مودها	
6	WR,ETAR,AR	عدد
	فرکانس، میرایی و ثابت مودال مود ۲	

4. فایل‌های مودال فضایی ماتریسهای [M],[K],[H],[D]

پسوند فایل: MKD.

فایل ایجاد شده از : برنامه های المان محدود

محتوی فایل: ماتریسهای جرم، سختی و میرایی

کاربرد: فایل ورودی گزینه Generate از برنامه MODENT و گزینه Modify از برنامه MODESH

توضیحات اینگونه فایلها در فایل‌های INTRO.PDF و APPEND.PDF در CD پیوست موجود است.

5. فایل‌های مودال مرکب

پسوند فایل: CMD.

فایل ایجاد شده از : برنامه LISTFRFW یا برنامه های ویرایشگر متنی

محتوی فایل: لیستی از فایل‌های MOD. حاصل از هر پاسخ فرکانسی تحلیل شده

کاربرد: ورودی گزینه های NLLS1-m،Collate و NLLS2-M از برنامه MODENT

توضیحات اینگونه فایلها در فایل‌های INTRO.PDF و APPEND.PDF در CD پیوست موجود است.

6. فایل‌های هندسه

پسوند فایل: DSP.

فایل ایجاد شده از : برنامه MESHGEN و یا RD_ANSYS

محتوی فایل: هندسه سازه و مدل

کاربرد: مدل ورودی برای سازه به برنامه های MESHGEN، MODESH و MODPLAN

<u>Record</u>	<u>نام متغیر</u>	<u>نوع</u>
1	Title عنوان و نام فایل مُدل	کاراکتر
2	ID_NELT, IDUM2, IDUM3, IDUM4, IDUM5	عدد
	0 نمایشگر نوع المان موجود نیست. =ID_NELT	
	1 نمایشگر نوع المان موجود است. =ID_NELT	
	5 بدون استفاده. IDUM2, IDUM3, IDUM4, IDUM5	
3	IDUM2, IDUM3, IDUM4, IDUM5	عدد
	بدون استفاده	
4	NONT, NOFT	عدد
	تعداد کل نودها و المانها	
5	NODE, X, Y, Z	
	شماره نود و مختصات آن	
6	ID, NONL, N1, N2, ... NNONL, ICOL, NELT	عدد
	ID شماره مرجع المان	
	NONL تعداد نودهای این المان	
	N1, N2, ..., NONL	
	شماره نودهای المان	
	ICOL کُد رنگ المان	
	NELT نوع المان	

7. فایل‌های مرکب پاسخ فرکانسی

پسوند فایل: CRD.

فایل ایجاد شده از: برنامه LIST_FRFW و یا RD_FRF_U

محتوی فایل: لیستی از فایل‌های پاسخ فرکانسی FRF. برای استفاده در تحلیل MODENT همچنین پاسخ فرکانسی موردنظر برای استفاده در نرمالیزه کردن مودها را تعیین می کند.

کاربرد: فایل ورودی برای تحلیل همزمان چندین پاسخ فرکانسی برنامه MODENT

توضیحات اینگونه فایلها در فایل‌های INTRO.PDF و APPEND.PDF در CD پیوست موجود است.

8. فایل‌های مقایسه

پسوند فایل: CMP.

فایل ایجاد شده از : برنامه MAP_GEN.EXE

محتوی فایل: نام دو فایل مقدار ویژه (EIG) که برای مقایسه به کار می رود.

کاربرد: ورودی گزینه Compare از برنامه MODESH دو مُدل مقدار و بردار ویژه که معمولاً از تست مودال و مُدل المان محدود به دست می آیند را می توان با معیارهای COMAC,MAC و نقشه بردار ویژه با یکدیگر مقایسه کرد.

توضیحات اینگونه فایلها در فایل‌های INTRO.PDF و APPEND.PDF در CD پیوست موجود است.

9. فایل‌های نیرو

پسوند فایل: FRC.

فایل ایجاد شده از : برنامه های ویرایشگر متنی ASCII

محتوی فایل: مقدار نیرو به شکل مختلط در گره های خاص برای تحلیل پاسخ اجباری

کاربرد: ورودی گزینه ANIMATE از برنامه MODESH پس از استخراج فایل مقدار ویژه برای مشاهده پاسخ اجباری به ورودی خاص

توضیحات اینگونه فایلها در فایل‌های INTRO.PDF و APPEND.PDF در CD پیوست موجود است.

پیوست-3-طریقه نصب نرم افزارها

طریقه نصب نرم افزارهای CMS و MDS و Impact

- 1) پیش از نصب نرم افزارها فایل DevMgr.exe را نصب نمایید.
 - 2) برای استفاده از نرم افزارهای MDS، CMS و Impact Test هیچ محدودیتی روی نسخه سیستم عامل ویندوز از XP 32 bit تا Windows 8.1 64 bit وجود ندارد و در همه موارد ابتدا با پوشه Installer نرم افزار رفته و با استفاده از فایل Setup.exe نرم افزار را نصب نمایید.
 - 3) به دلیل اینکه این نرم افزارها از طریق کارت شبکه یا پورت سریال به آنالایزر وصل شده و تغییراتی در فایل های نصبی خود می دهند در بعضی ویندوزها مشکلاتی به وجود می آید. برای جلوگیری از این مشکلات موارد زیر را انجام دهید:
 - 4) UAC یا همان User Accounts Control را در وضعیت minimum قرار دهید.
 - 5) Firewall ویندوز را Off نمایید.
 - 6) روی آیکون هر نرم افزار راست کلیک نموده و properties را انتخاب نمایید، بعد در قسمت compatibility mode تیک گزینه XP compatible with windows XP را بزنید.
 - 7) در همین قسمت تیک run this program as administrator را نیز انتخاب کنید.
- نصب نرم افزارهای تحلیل مودال
- چنانچه نرم افزارهای تحلیل مودال ICATS، B&K Pulse Sound و Artemis را نیز دارید، برای نصب آنها به طریق زیر عمل نمایید.
- 1) چون این نرم افزارها روی ویندوزهای 32 بیتی به ویژه XP اجرا می شوند، برای اجرا و نصب آنها روی ویندوزهای جدید به یک virtual XP احتیاج دارید. به این منظور به ترتیب زیر عمل کنید.
 - 2) به پوشه VMWare و سپس Player رفته و یکی از دو فایل را نصب نمایید (هر کدام به ویندوز شما خورد).
 - 3) یک سی دی ویندوز XP 32 بیتی داخل درایو گذاشته و در محیط VMWare نصب نمایید.
 - 4) فایل VMware-tools را روی یک سی دی به صورت write image file رایت نموده و داخل سیستم عامل XP آن را نیز نصب کنید.
 - 5) داخل VMWare workstation در قسمت settings و روی بخش options کلیک نمایید.
 - 6) shared folders را enable کرده و فولدري برای ارتباط بين دو سیستم عامل بسازید و گزینه map network drive را انتخاب نمایید.

7) حال فایل‌های برنامه های ICATS و B&K Pulse را به آن پوشه انتقال دهید. از قسمت درایو Z: ویندوز XP virtual به این فایلها دسترسی خواهید داشت.

8) پیش از اجرای هر یک از برنامه های ICATS در هر بار روشن کردن سیستم عامل xp باید فایل sn.bat را یک بار اجرا نمایید.