



# Mühendislik

2022

# İçindekiler

- 1. Modal Test ve Analize Giriş
  - ✓ Modal Test ve Analiz Uygulamaları
  - ✓ FFT-DFT Teorisi
  - Örnekleme Hızı
  - Filtreleme
  - Leakage
  - Windowing
  - Averaging
- 2. Modal Test Yöntemleri
  - ✓ EMA, ODS, OMA
  - ✓ Tahrik Sensörü Seçimi
  - ✓ Response Sensörü Seçimi
  - ✓ SISO,SIMO,MIMO
- 3. Pre-test
  - ✓ Sınır Koşullarının Belirlenmesi
  - ✓ Linearity
  - ✓ Uyarma Konumlarının Belirlenmesi
- 4. Modal Test Parametreleri
  - ✓ FRF Fonksiyonu
  - ✓ Coherence
  - ✓ MIF
  - ✓ Modal Circle
  - ✓ Mode Shape
- 5. Modal Analiz Parametreleri
  - ✓ Stabilizasyon Diyagramı
  - ✓ AutoMAC
  - ✓ CrossMAC
  - ✓ Curve Fitting

# Modal Test ve Modal Analiz Uygulamaları



# Modal Test ve Modal Analiz Uygulamaları



# Modal Test ve Modal Analiz Uygulamaları

- Titreşim olaylarının tanımlanması ve değerlendirilmesi
- Analitik dinamik modellerin doğrulanması, düzeltilmesi ve güncellenmesi
- Deneysel temelli dinamik modellerin geliştirilmesi
- Yapısal bütünlük değerlendirmesi
- Yapısal modifikasyon ve hasar tespiti
- Matematiksel modellerin azaltılması
- Dinamik özelliklerinin belirlenmesi, iyileştirilmesi ve optimize edilmesi

# Modal Analiz Teorisi

## Fourier Dönüşümü

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right)$$

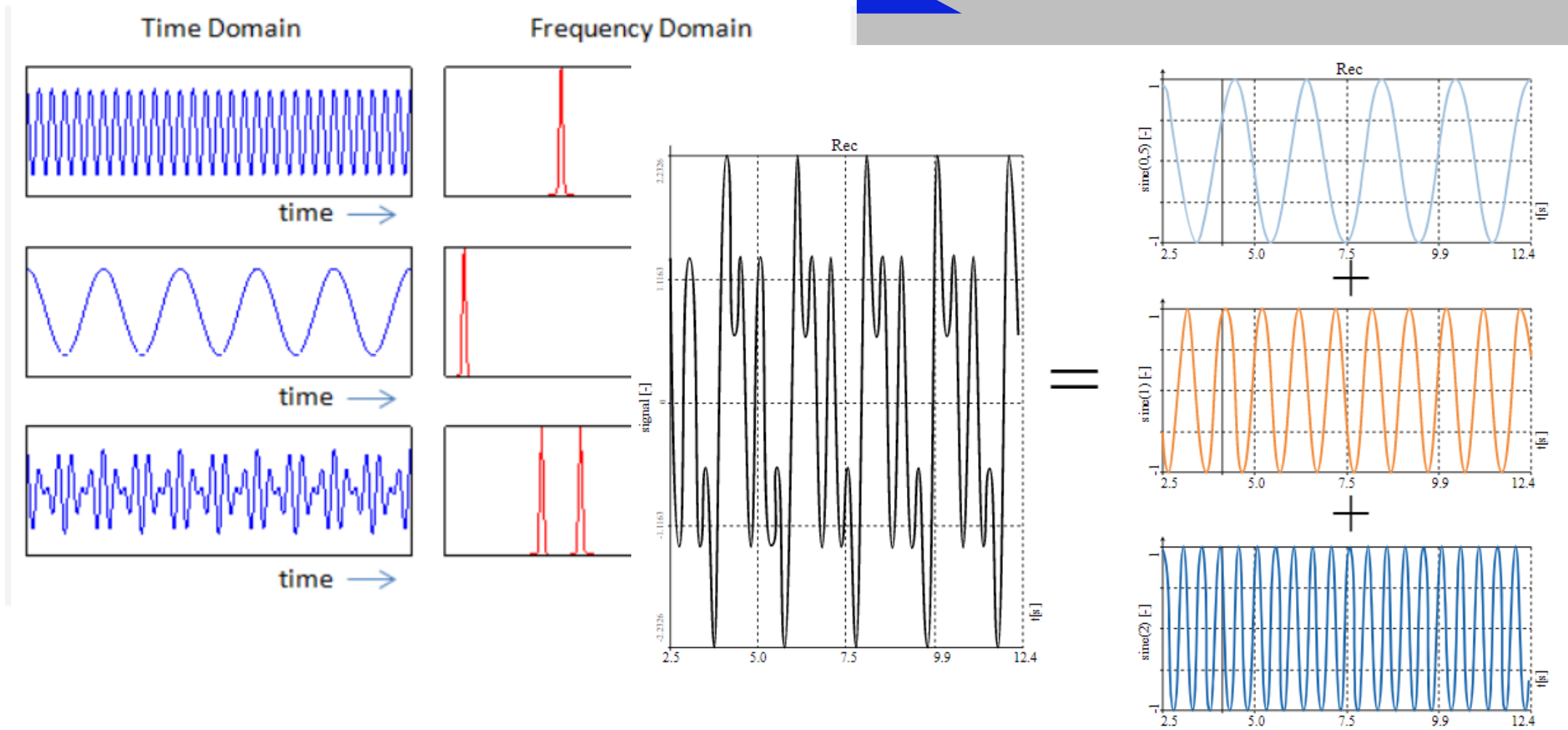
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \frac{2\pi nt}{T} dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin \frac{2\pi nt}{T} dt$$

# Modal Analiz Teorisi

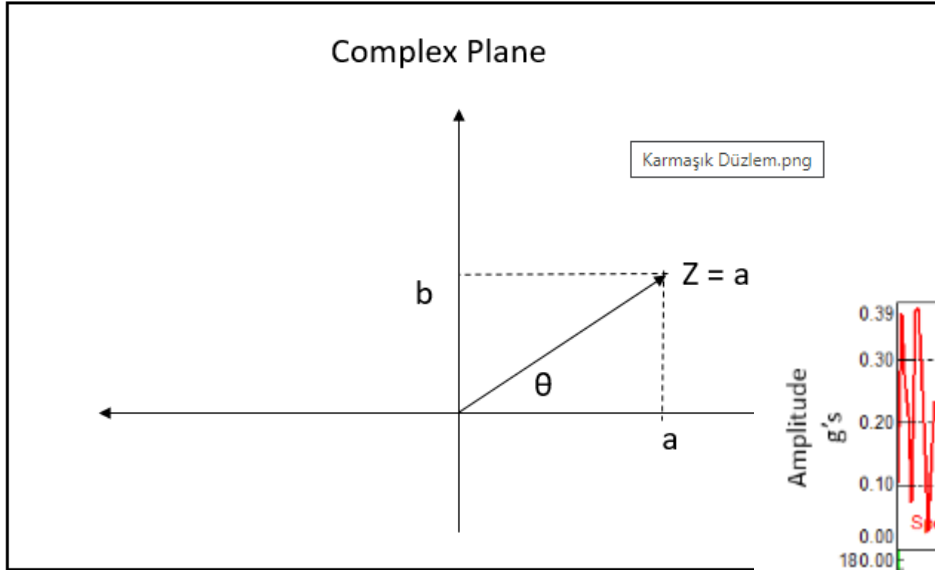
## Fourier Dönüşümü



# Modal Analiz Teorisi

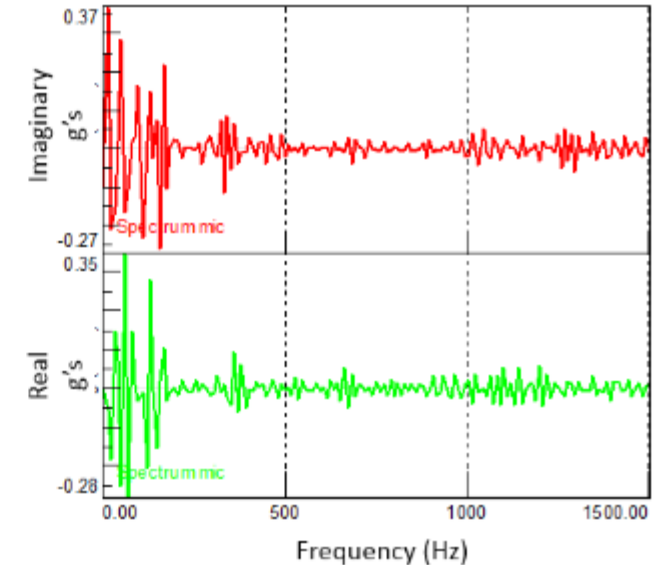
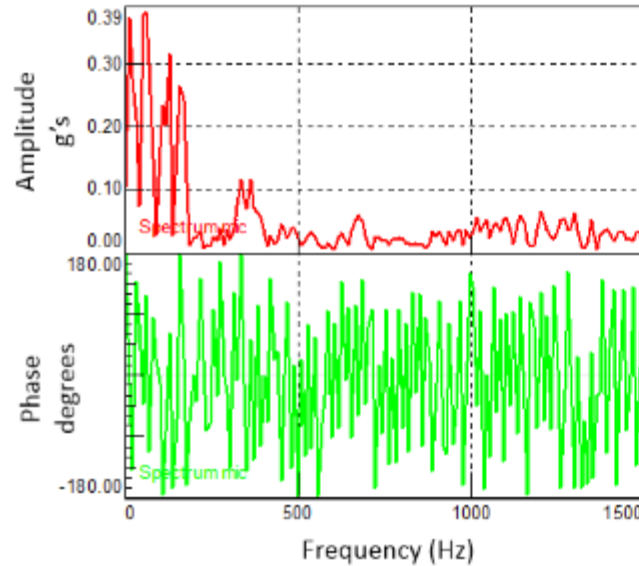
## Fourier Dönüşümü

Fourier Dönüşümünün çıktısı, her biri elde edilen frekans spektrumunda bir frekansa, genliğe ve faza karşılık gelen bir dizi karmaşık sayıdır.



$$\text{Amplitude} = \sqrt{a^2 + b^2}$$

Fourier Transform: Amplitude and Phase (left) versus Real and Imaginary (right)





# Modal Analiz Teorisi

## DFT

$$y_{p+1} = \sum_{j=0}^{n-1} \omega^{jp} x_{j+1}$$

$$\omega = e^{-2\pi i/n}$$

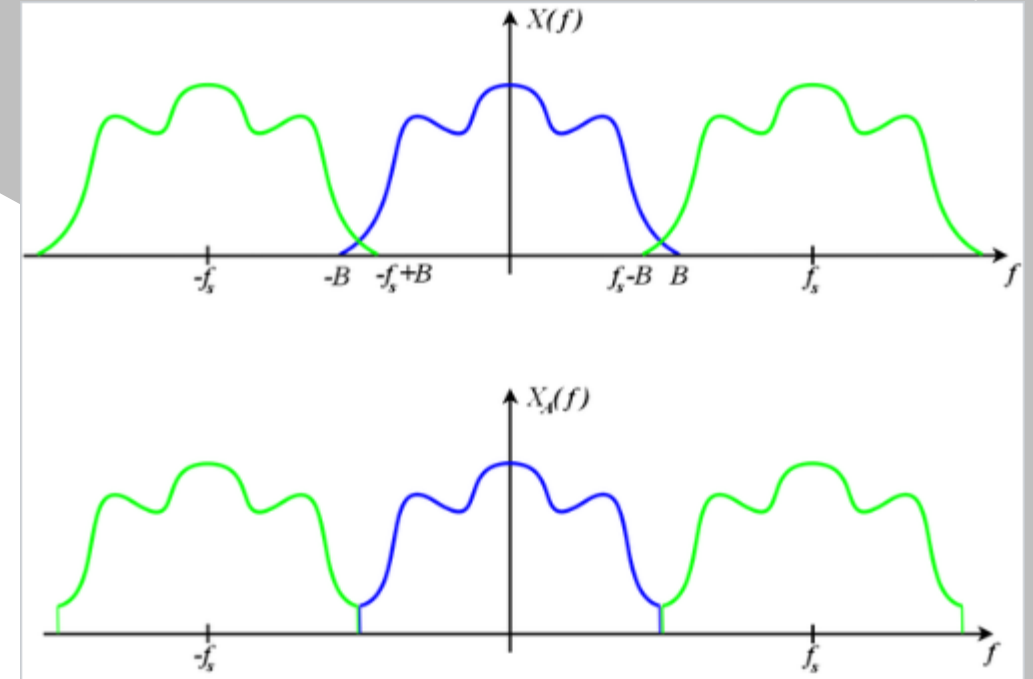
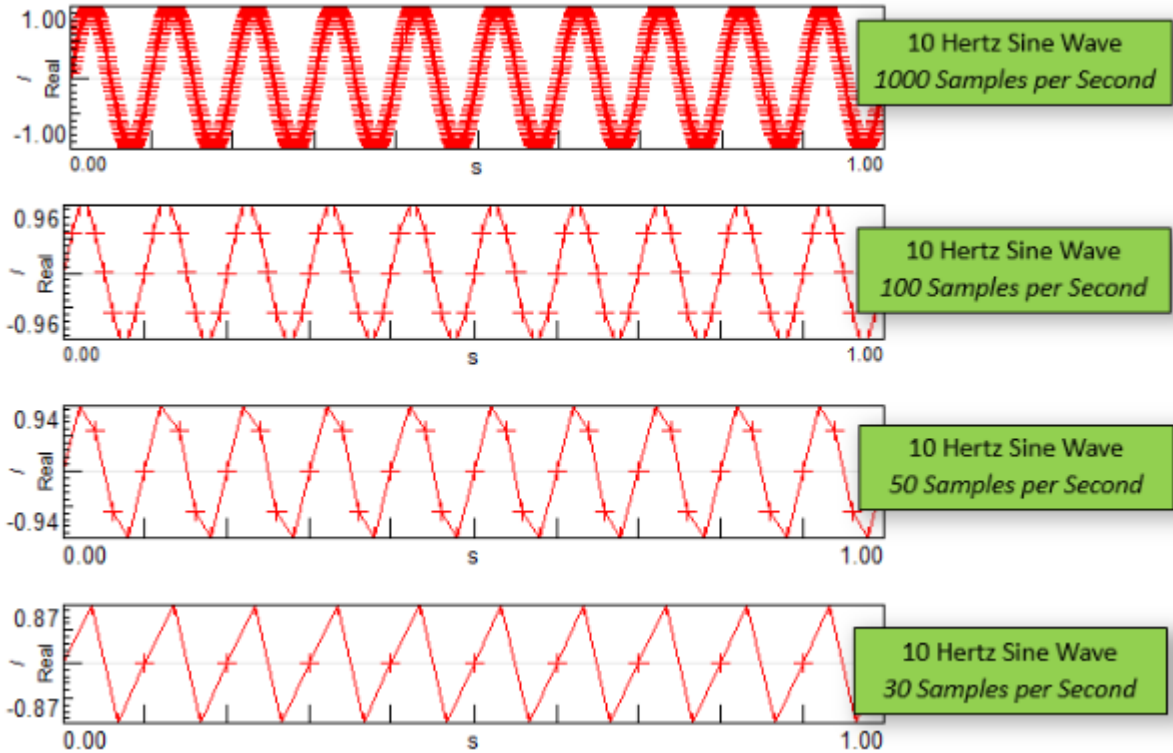
Ayrık bir zaman bloğunda bir Fourier Dönüşümü gerçekleştirir. İsteğe bağlı sayıda veri noktasından oluşan herhangi bir zaman sinyalinde bir DFT gerçekleştirilebilir.

## FFT

Hesaplama açısından verimli bir şekilde Discrete Fourier Dönüşümü gerçekleştiren bir algoritmadır. Analiz edilen zaman bloğunda (örneğin 512, 1024, 2048 ve 4096) iki sayıda numunenin bir kuvvetini gerektirir.

# Modal Analiz Teorisi

## Örnekleme Frekansı

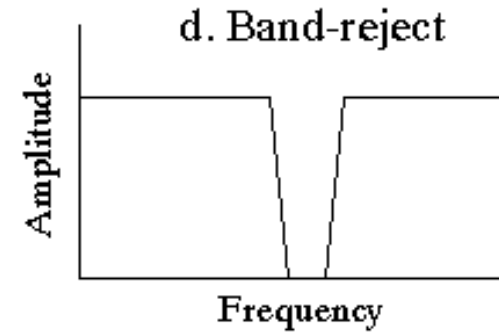
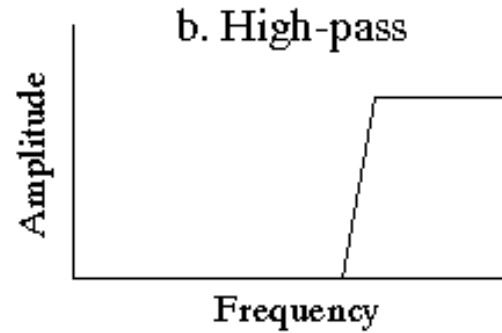
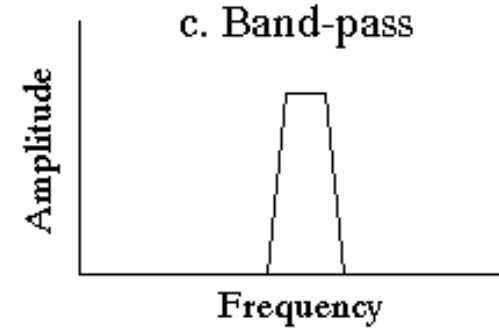
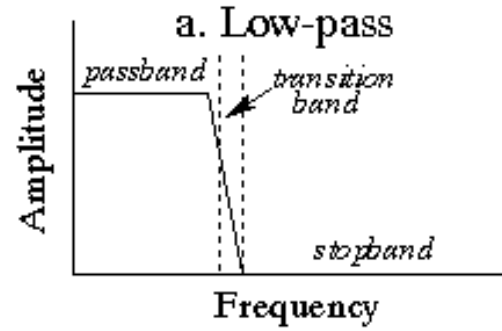


Aliasing

Nyquist-Shannons' Sampling Theorem  
Sampling Frequency  $\geq 2 * (\text{Frequency Bandwidth of Interest})$

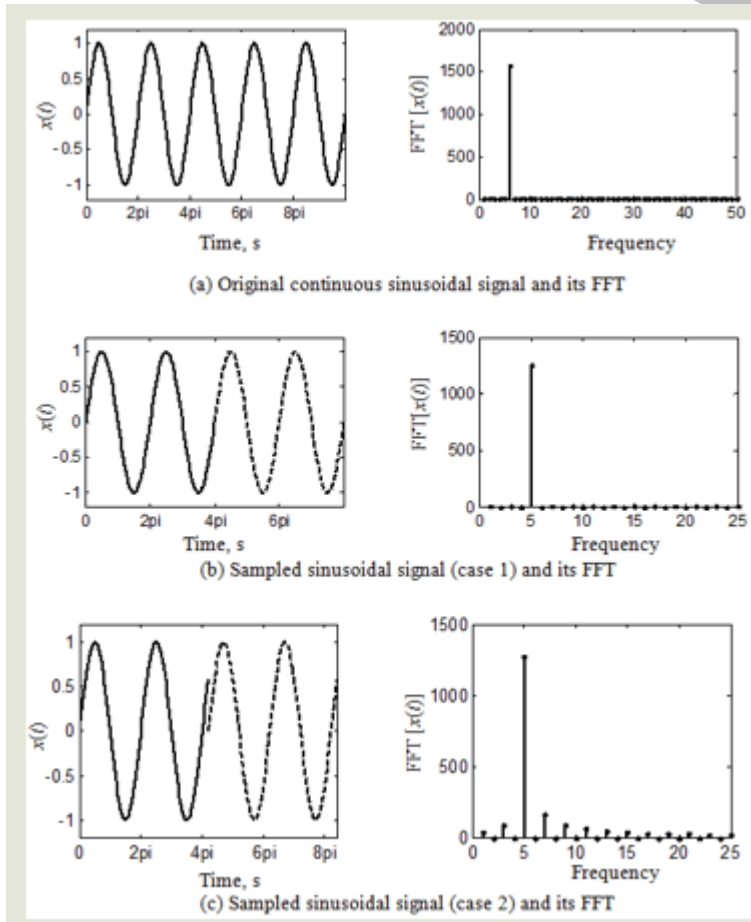
# Modal Analiz Teorisi

## Filtreleme

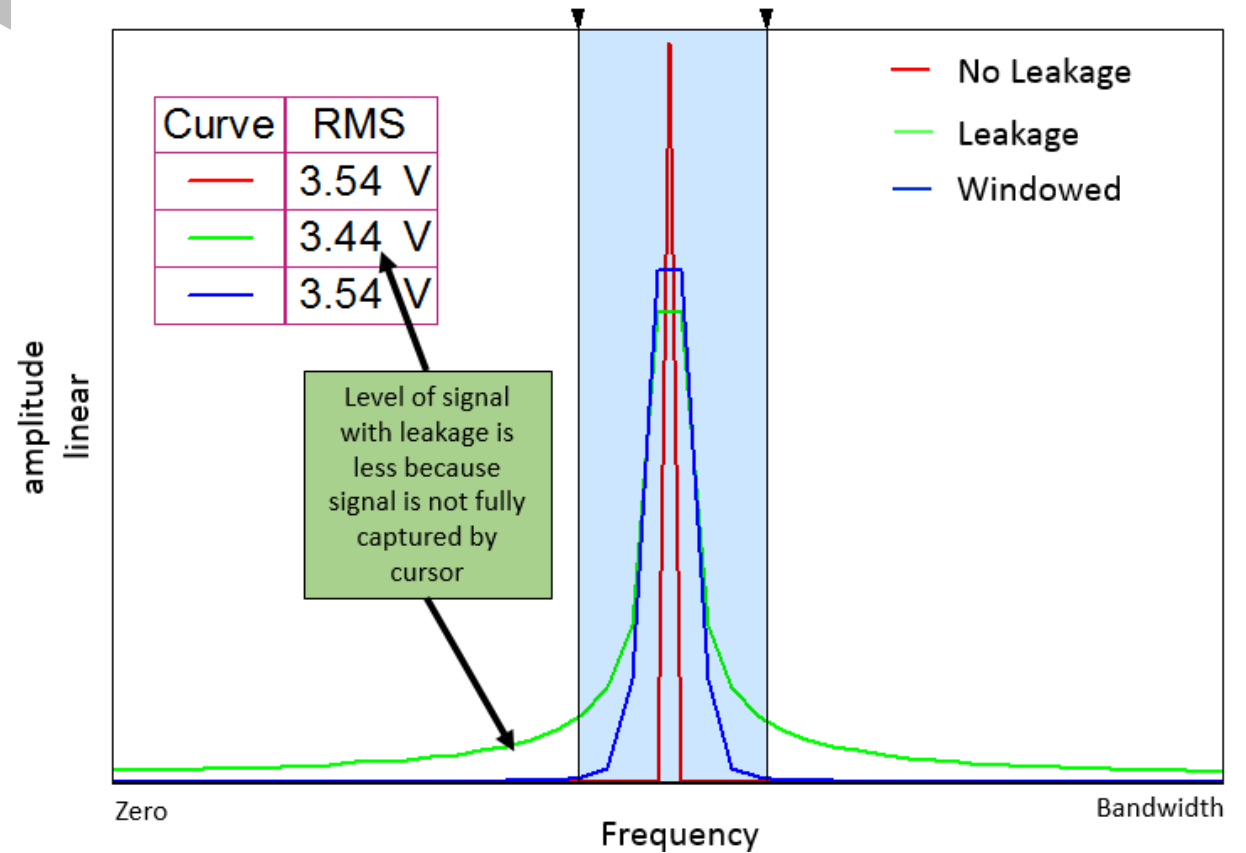


# Modal Analiz Teorisi

## Leakage

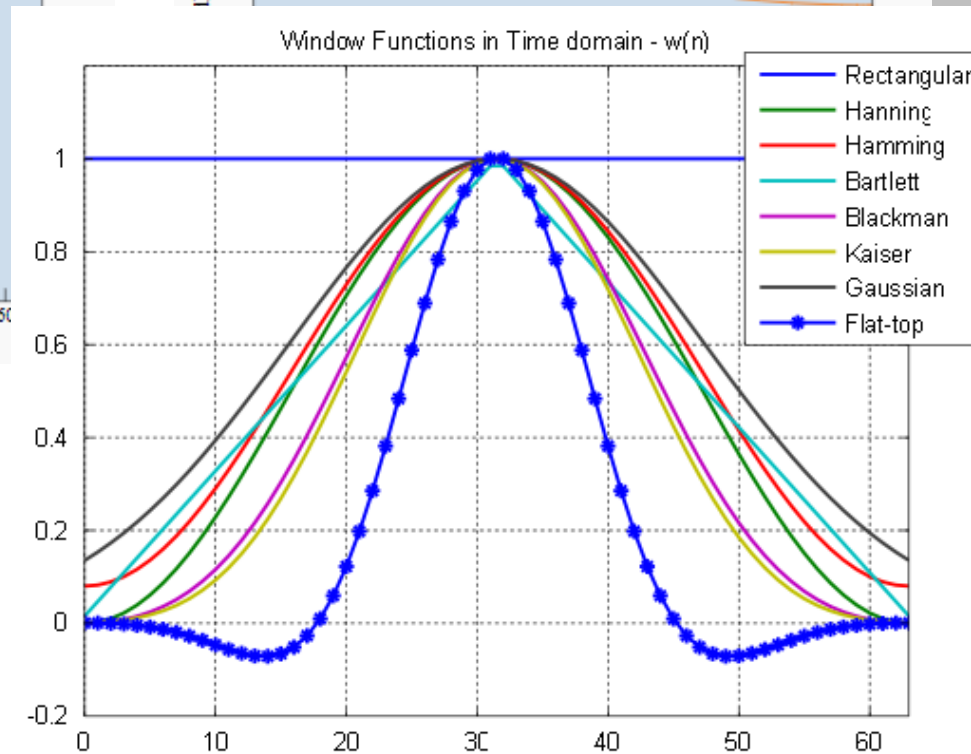
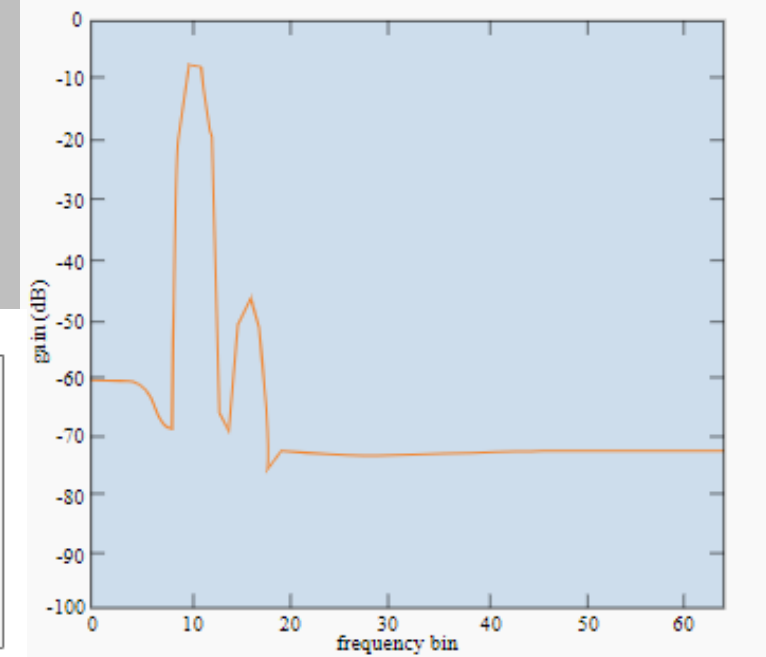
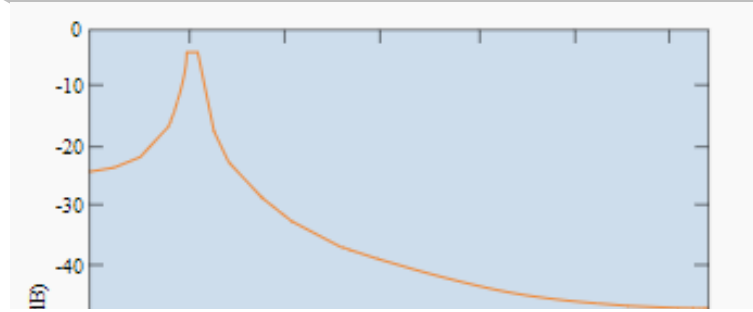
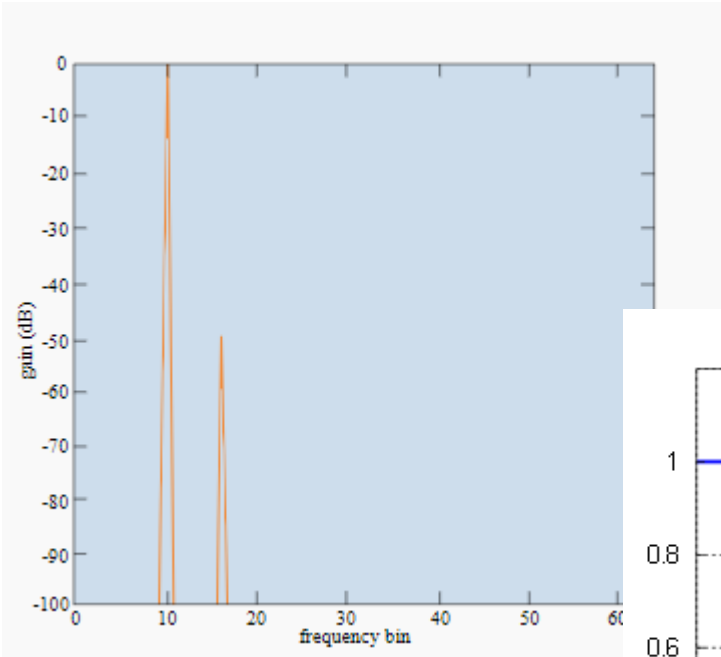


Sine wave: No Leakage, Leakage, Windowed



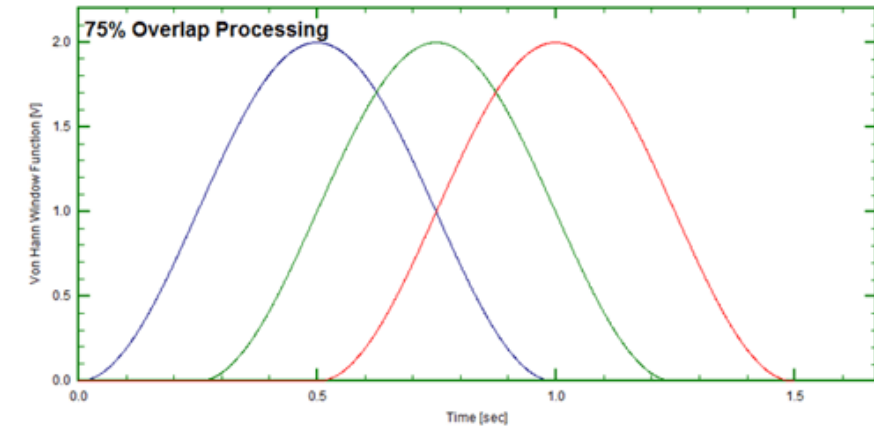
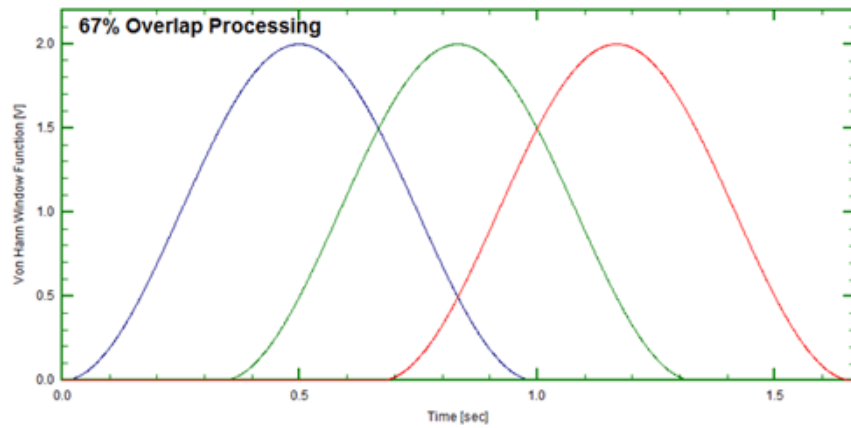
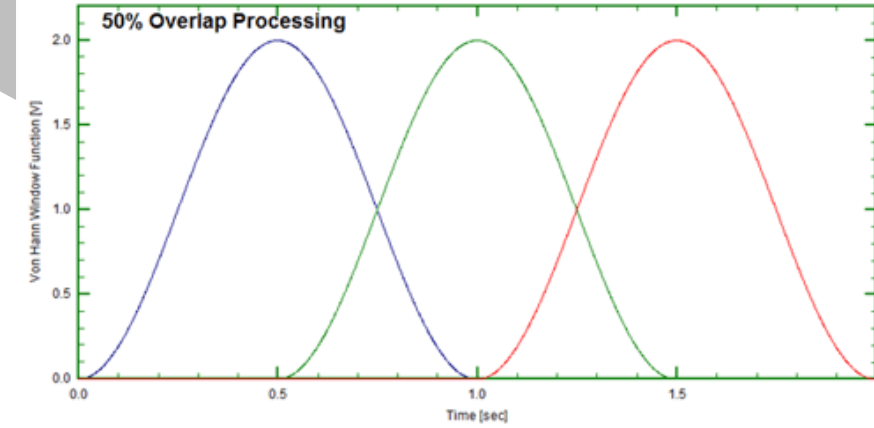
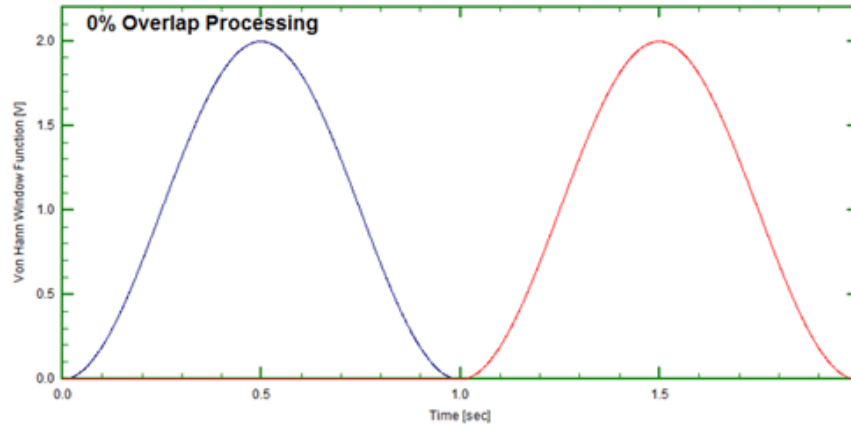
# Modal Analiz Teorisi

## Pencereleme(Windowing)



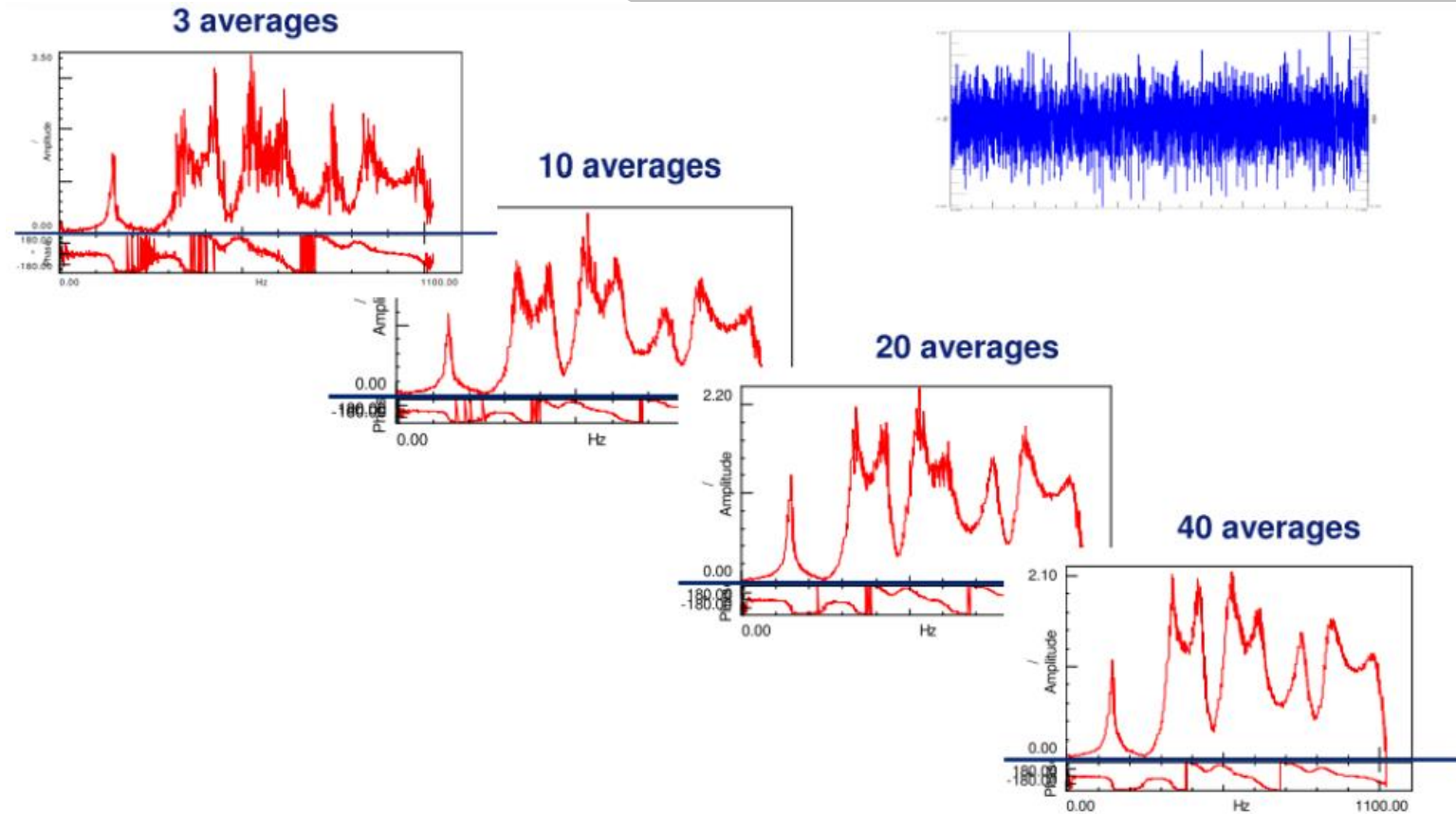
# Modal Analiz Teorisi

## Overlap



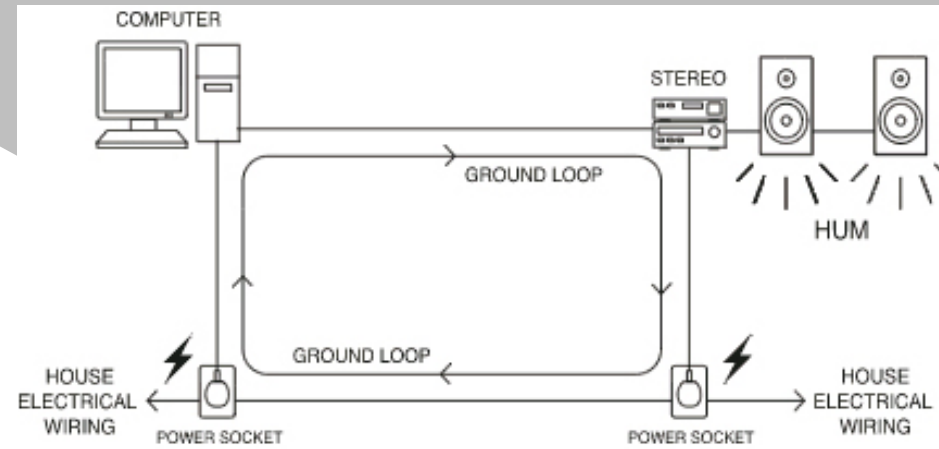
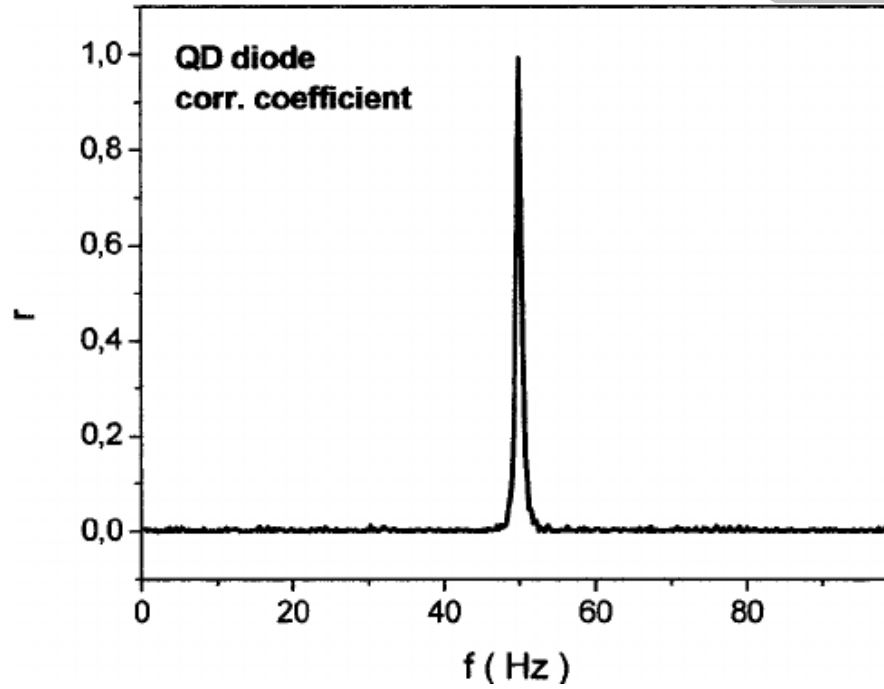
# Modal Analiz Teorisi

## Averaging

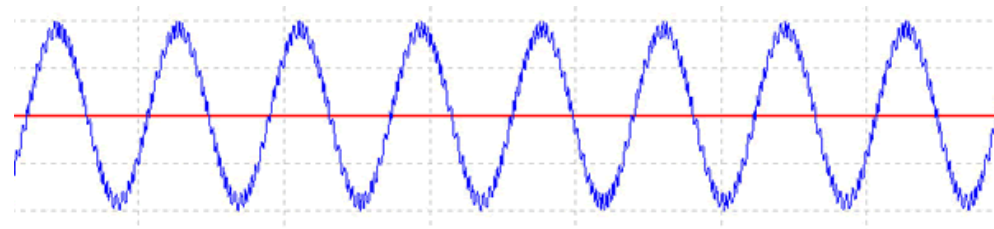


# Modal Analiz Teorisi

## Elektriksel Gürültü

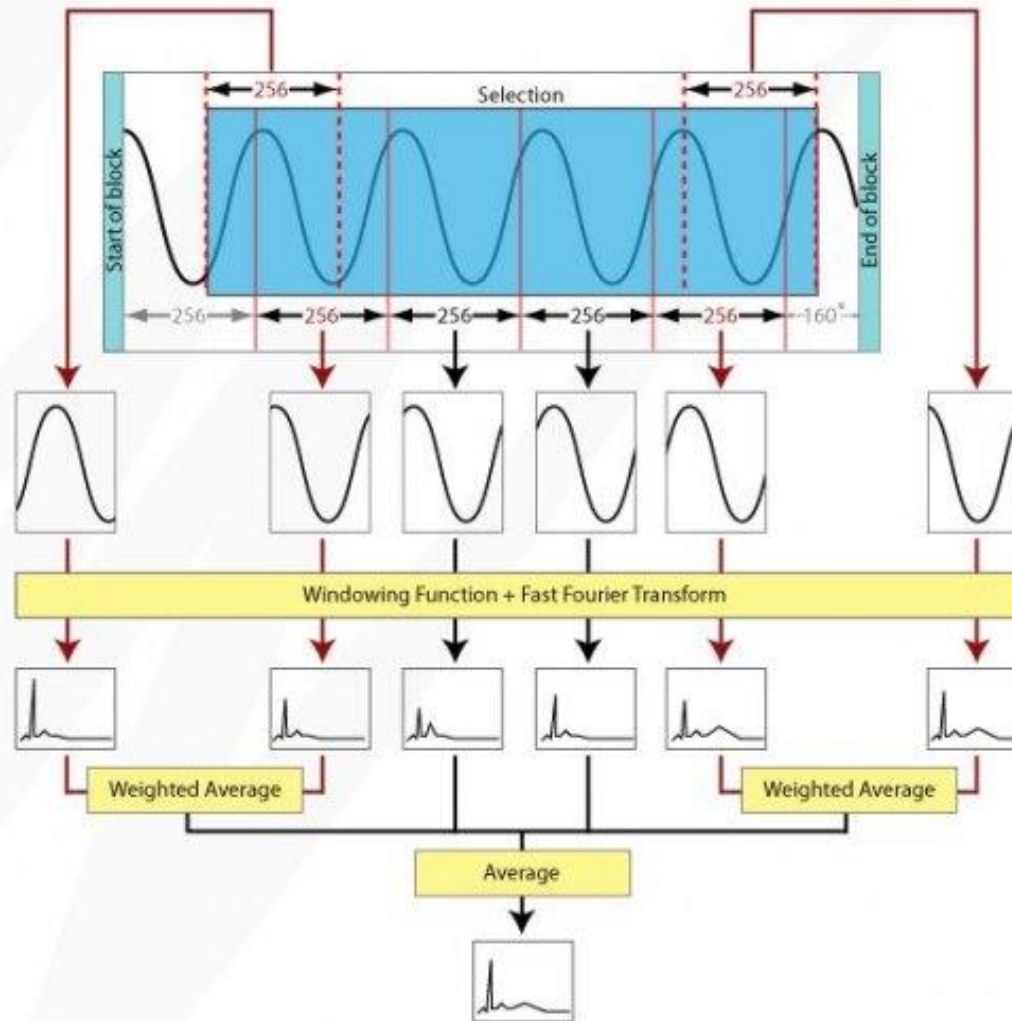


AC noise





# Modal Analiz Teorisi



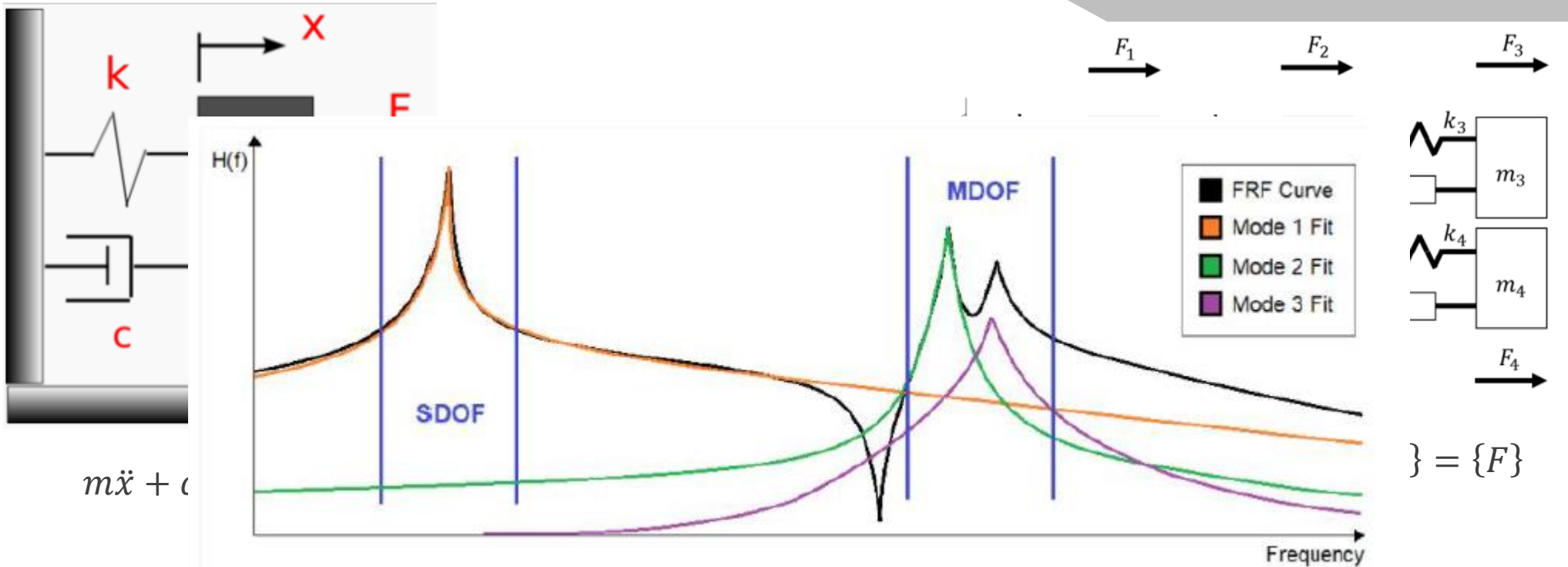
This figure shows how a selection is processed to generate a single spectrum.

# Modal Analiz Teorisi

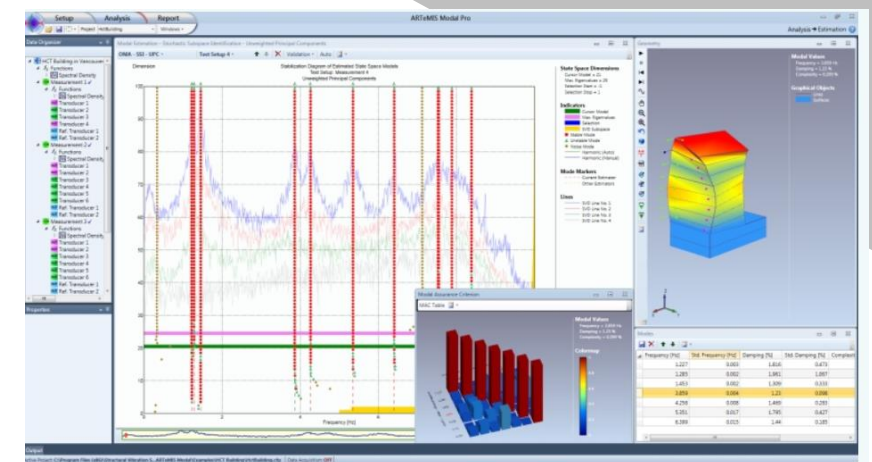
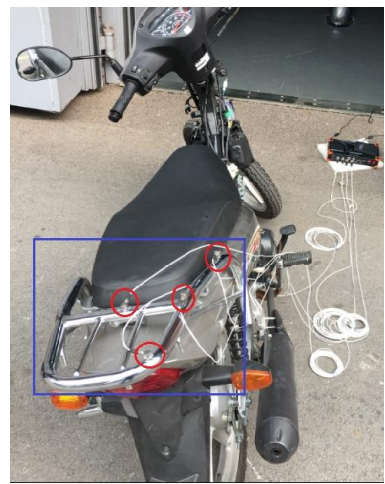
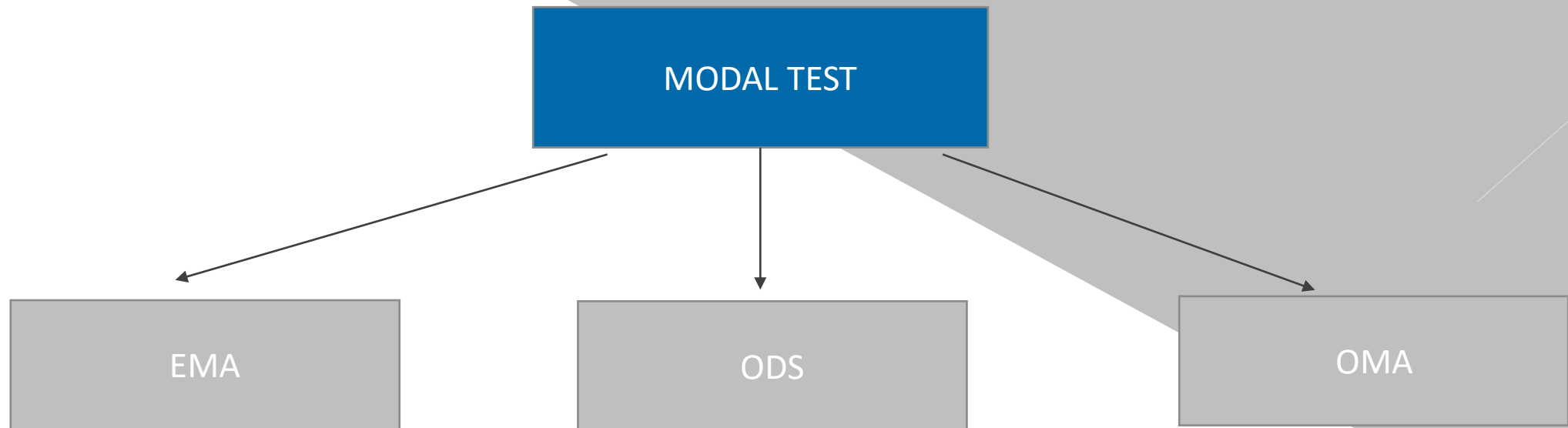
## Titreşim Teorisi

SDOF

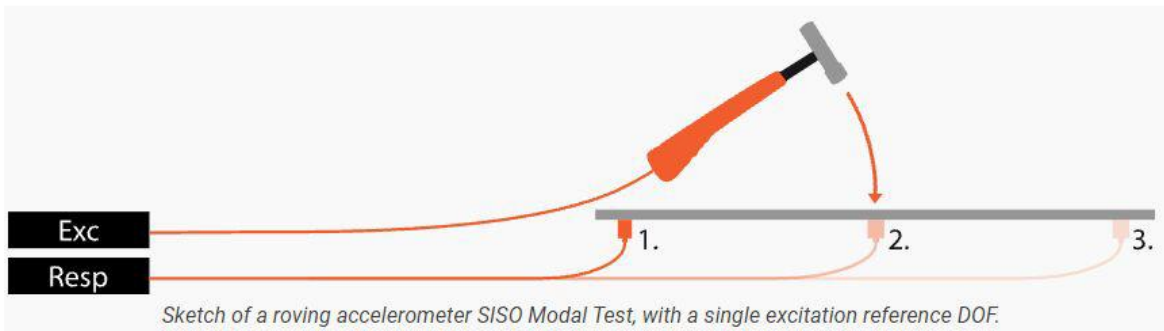
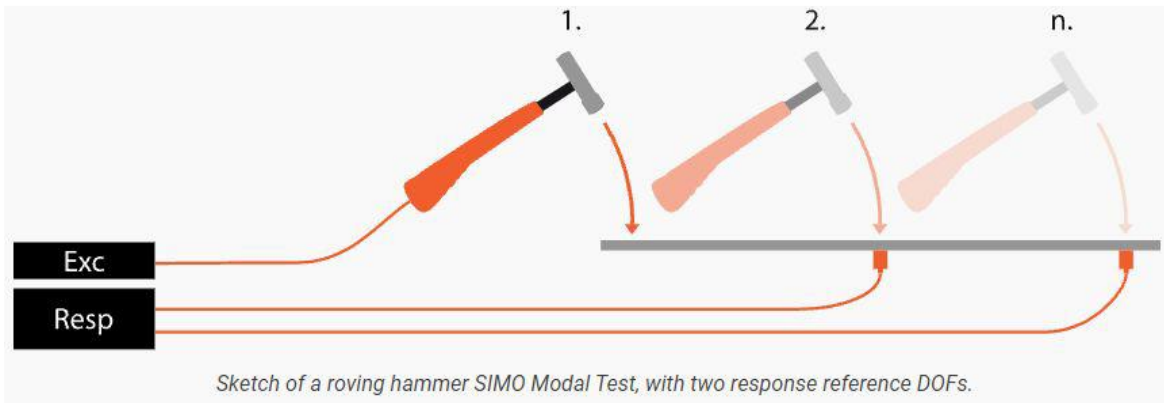
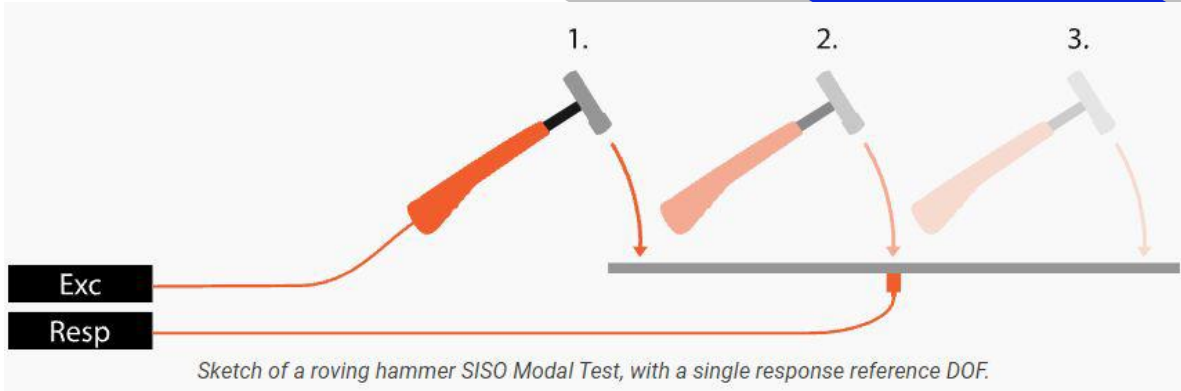
MDOF



# Modal Test Yöntemleri



# EMA-Darbe Çekici Testleri

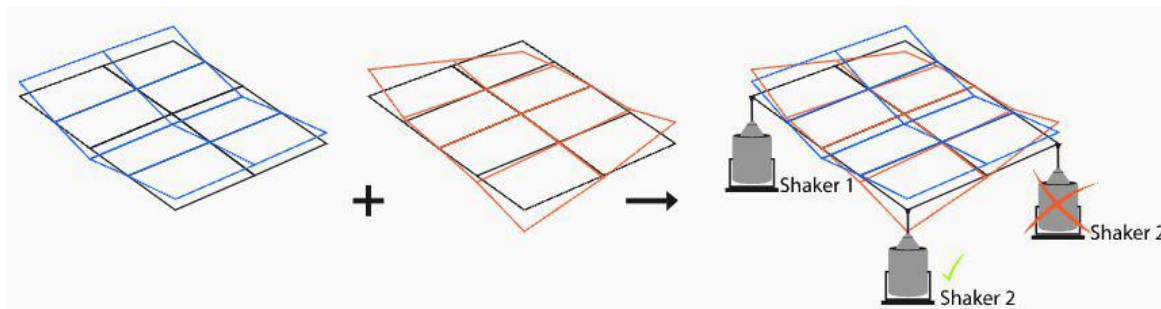
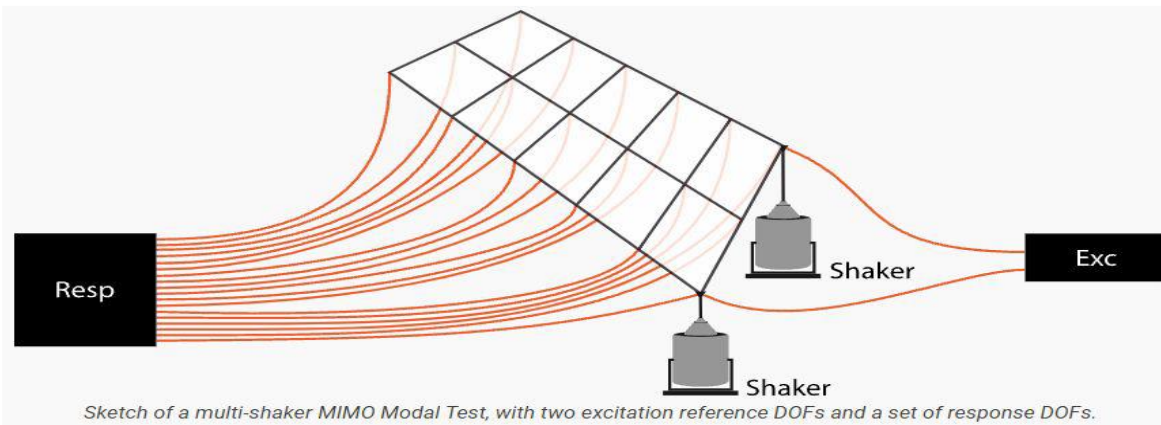
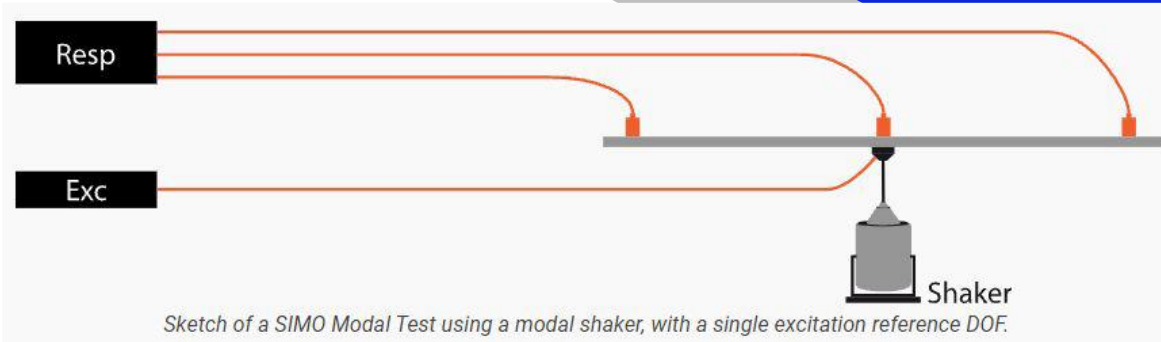


$$\begin{matrix} \text{hammer} \end{matrix} \rightarrow \begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{2n} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \leftarrow \begin{matrix} \text{hammer} \end{matrix}$$

$H_{\text{out/in}} = H_{\text{row/column}} = H_{ij}$

Detailed description: This block contains a diagram of a hammer on the left and a hammer on the right. In the center, a matrix equation relates the output vector Y to the input vector X. The matrix H has rows and columns indexed from 1 to n. The element H<sub>21</sub> is highlighted with a red box. The equation is H \* X = Y. Below the matrix, the relationship H<sub>out/in</sub> = H<sub>row/column</sub> = H<sub>ij</sub> is stated.

# EMA-Sarsıcı (Shaker) Testleri

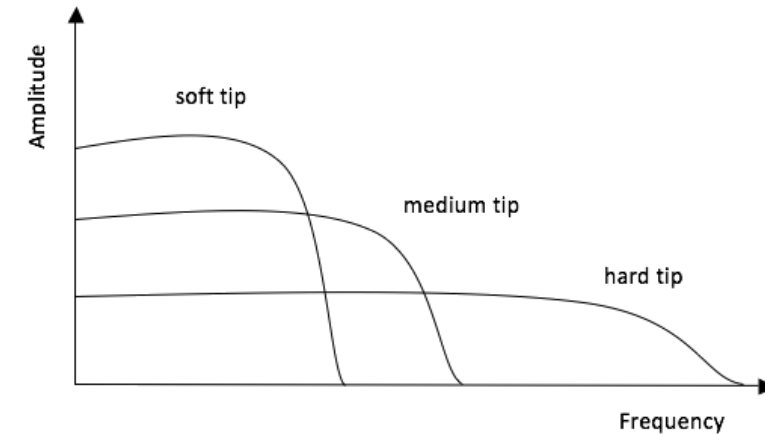
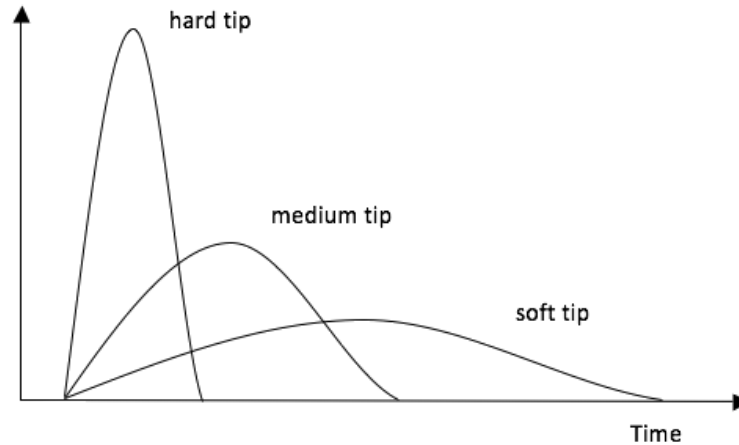
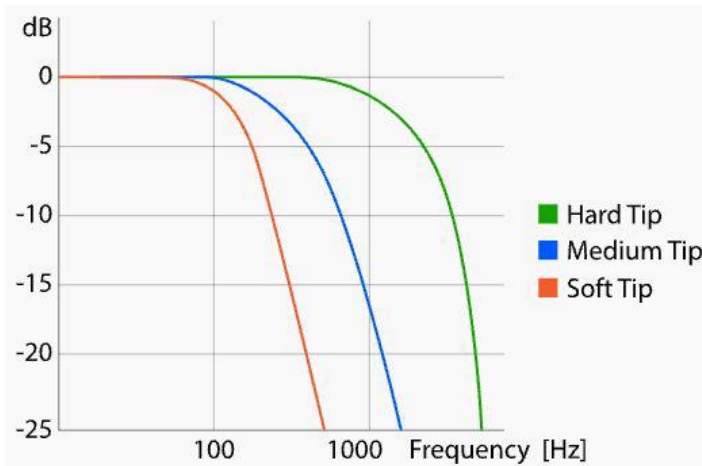


A diagram showing the relationship between input and output vectors in a MIMO system. On the left, a vector of response DOFs  $\begin{Bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ \vdots \\ Y_n \end{Bmatrix}$  is shown with arrows pointing to a small sensor icon. This is equal to a transfer function matrix  $\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} & \cdots & H_{1n} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} & \cdots & H_{2n} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} & \cdots & H_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & H_{n3} & \cdots & H_{nn} \end{bmatrix}$  multiplied by a vector of excitation reference DOFs  $\begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix}$ . On the right, a large shaker icon is shown with an arrow pointing to the  $X_3$  element of the excitation vector.

# Impact Hammer Seçimi



Hammer Size	Applications	Range Scale	Sensitivity	Mass
<b>Small</b>	Small Structures: Circuit Boards, processors & memory modules, and other delicate articles.	< 100 lbf pk, < 444 N pk	> 50 mV / lbf, >11.2 mV / N	< 0.36 lb, < 0.16 kg
<b>Medium</b>	Medium Structures: car frames, engine blocks, small electric motors, and other medium-heavy devices.	100 - 1.00k lbf, pk, 444 - 4.44k N pk	50 - 5 mV / lbf, 11.2 - 1.10 mV / N	0.36 - 1.00 lb, 0.16 - 0.45 kg
<b>Large</b>	Heavy Structures: Pumps, compressors, weldments, impellers, building foundations, and other very large structures.	> 1.00k lbf, pk, > 4.44k N pk	< 5 mV / lbf, <1.10 mV / N	> 1.00 lb, > 0.45 kg



# Impact Hammer Kullanmanın Avantajları-Dezavantajları



Kullanım kolaylığı nedeniyle saha çalışmaları ve sorun giderme için en uygun çözümdür.

## Avantajları

- Hızlı
- Değişken kütle yüklemesi yok
- Taşınabilir
- Ucuz

## Dezavantajları

- Yüksek tepe faktörü yapıyı doğrusal olmayan davranışa sürükleyebilir.
- Büyük yapılar için gereken yüksek tepe kuvveti yerel hasara neden olabilir.
- Yüksek oranda deterministik sinyal, doğrusal yaklaşım olmadığı anlamına gelir.

# Sarsıcı ve Tahrik Sinyali Seçimi



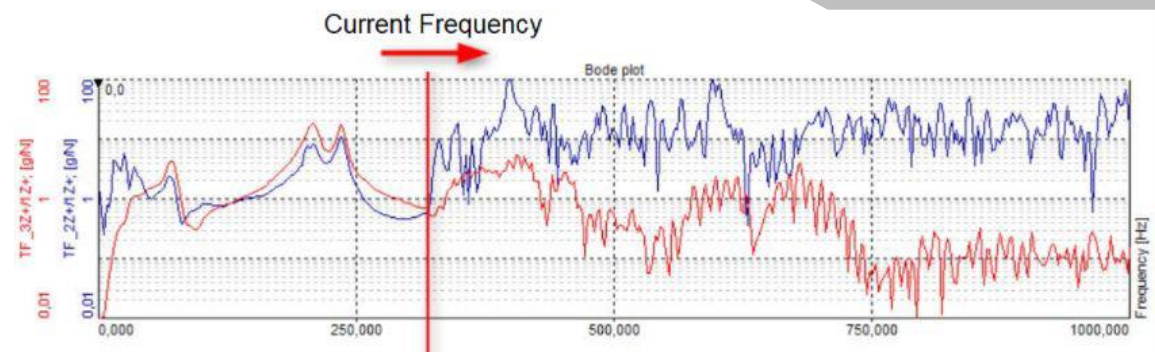
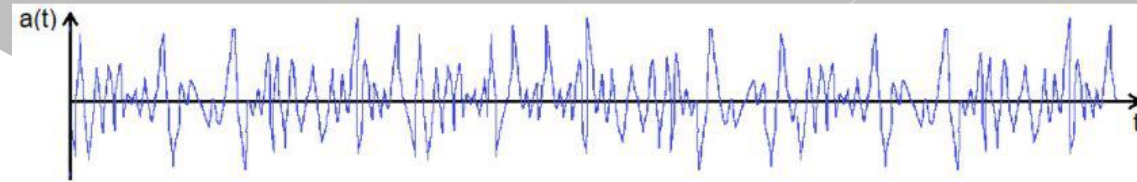
Output Force	Frequency Range	Displacement PkPk
~ 20 N, 4.5 lbf - 500 N, 112 lbf	~ 0 Hz - 12 kHz	~ 5mm, 0.2 inch - 25 mm, 1 inch



Output Force	Frequency Range	Total Shaker Mass
~ 5 N, 1.1 lbf - 40 N, 9 lbf	~ 10 Hz - 3 kHz	~ 0.05 kg 0.11 lb - 0.5 kg, 1.1 lb

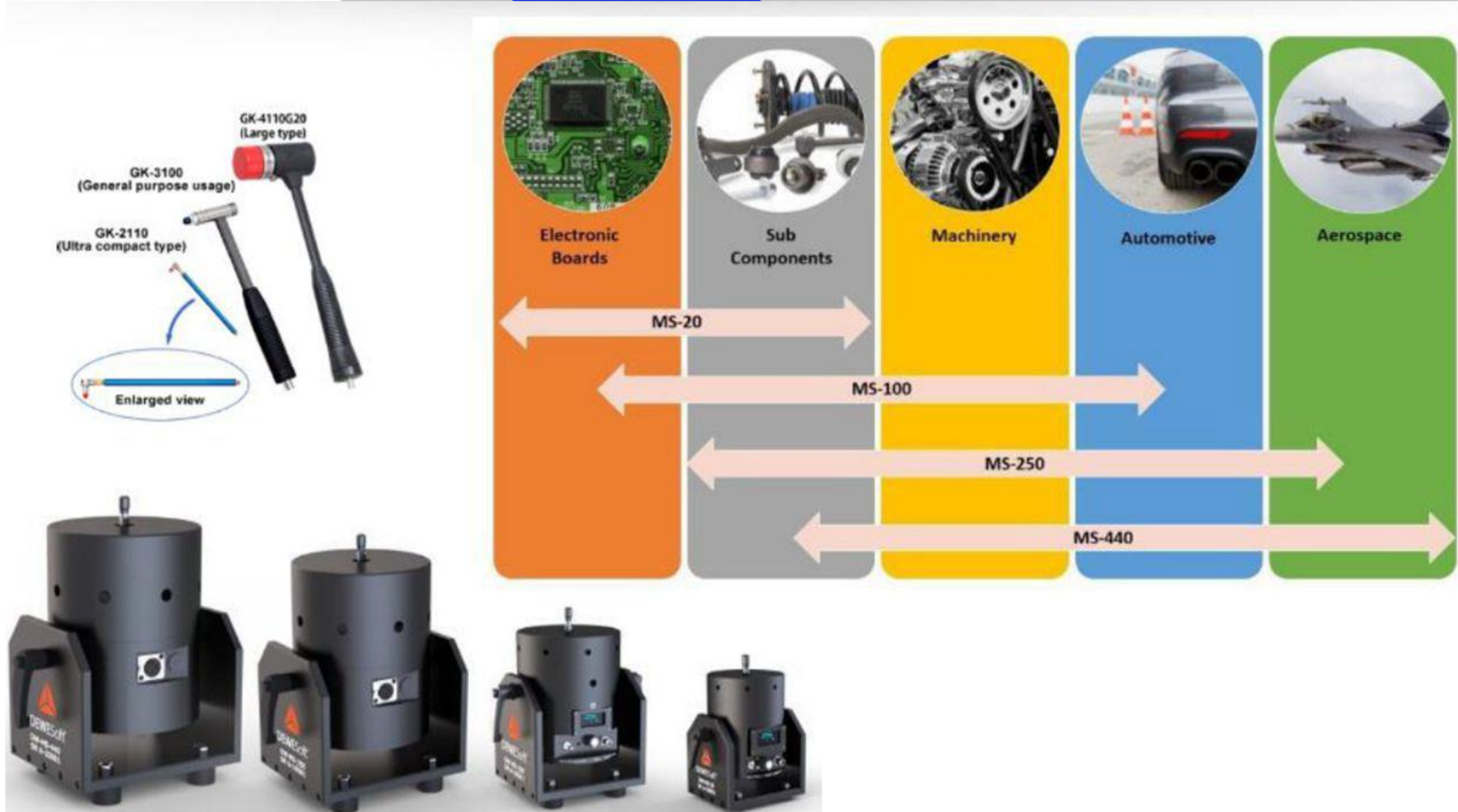
## Tahrik Sinyali Tipleri

- Continuous Random
- Brust
- Swept Sine





# Sarsıcı ve Tahrik Sinyali Seçimi



# Sarsıcı Kullanmanın Avantajları-Dezavantajları



Esneklik ve doğruluğa odaklanan laboratuvar çalışmaları için en uygun çözümdür.

## Avantajları

- Geniş uyarım sinyali aralığı
- Çok sayıda ölçüm parametresinin optimizasyonu (Dynamic range, SNR, Energy distribution, linearity, leakage)
- Sabit, büyük kurulumlar için uygunluk
- MIMO analizi yapabilme imkanı

## Dezavantajları

- Yapıya sarsıcının ve kuvvet sensörünün sabitlenmesi
- Sarsıcı ve stinger kaynaklı potansiyel dinamik yükleme
- Sarsıcılar arasında potansiyel mekanik bağlantı
- Maliyeti yüksek

# Response Sensörü Seçimi

Sensors: Accelerometer, Gyroscope, Laser Vibrometer, Displacement Transducer



## MEMs

### Avantajları

- DC ölçümler
- Yıllara bağlı stabilite
- Tekrarlanabilirlik
- Kompanzasyon kolaylığı

### Dezavantajları

- Kullanım zorluğu (dizayn, elektriksel)
- Elektromanyetik alan değişime duyarlılık

## Piezoelectric

### Avantajları

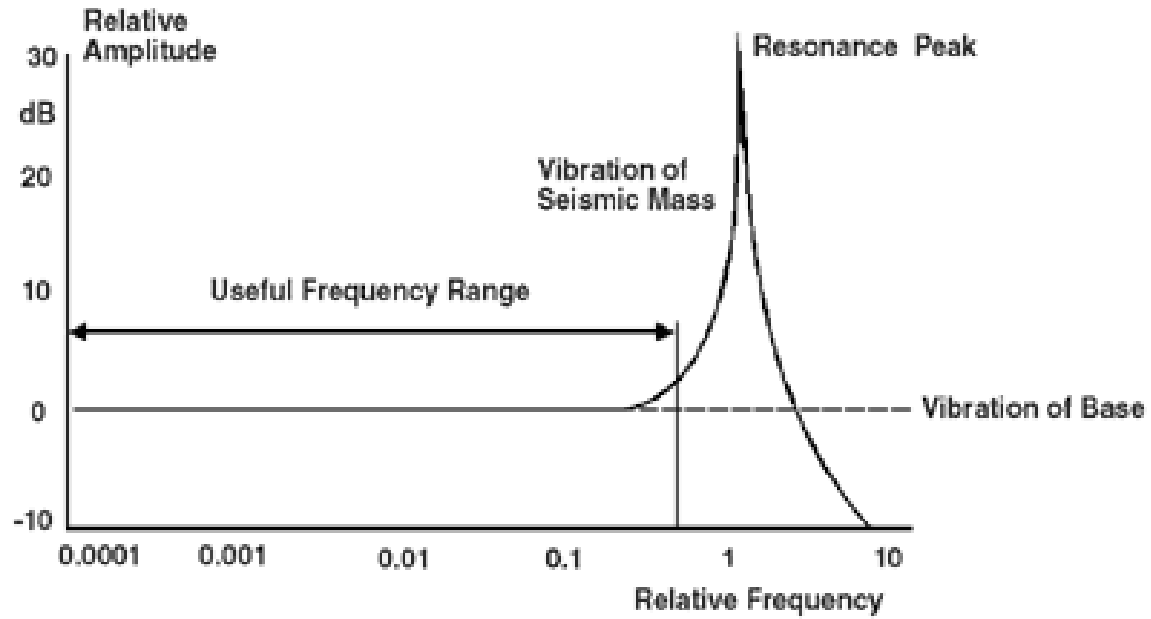
- Çok yüksek frekans aralığı
- Yüksek sıcaklık
- 6000g'e kadar geniş ölçüm aralığı
- Küçük boyutlar

### Dezavantajları

- Statik ölçümler için uygun değil
- Yıllara bağlı düşük stabilite
- Düşük elektrik yükü ile çalışır, yüksek empedanslı kabloya ihtiyaç duyar
- Neme karşı hassas

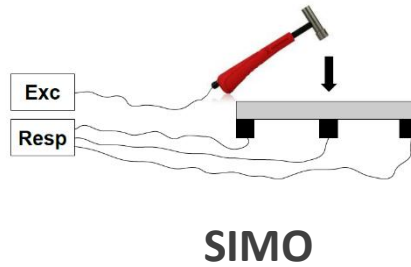
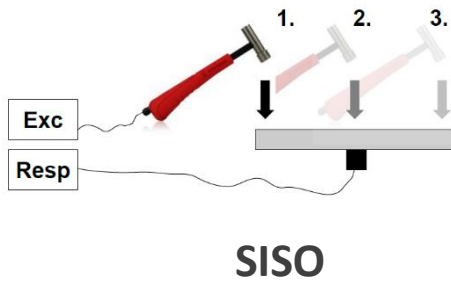
# Response Sensörü Seçimi

- Frekans bant genişliği ve genlik ölçüm aralığına uygun olmalı!!!!



# Modal Test Yöntemleri

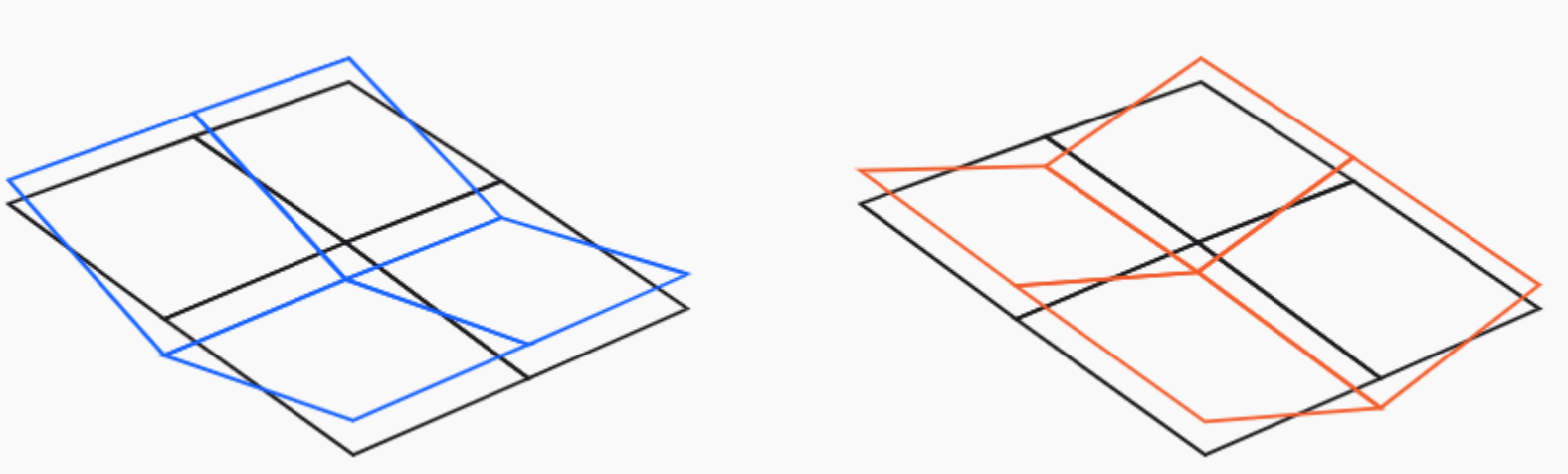
- SISO (Single Input Single Output): Tek bir uyarıcı ve tek bir tepki alacak sensör kullanarak yapılan modal test yöntemidir.
- SIMO (Single Input Multiple Output): Tek bir uyarıcı ve birden fazla tepki alacak sensör kullanarak yapılan modal test yöntemidir.
- MIMO (Multiple Input Multiple Output) : Birden fazla uyarıcı ve birden fazla tepki alacak sensör kullanarak yapılan Modal test yöntemidir.



# Modal Test Yöntemleri

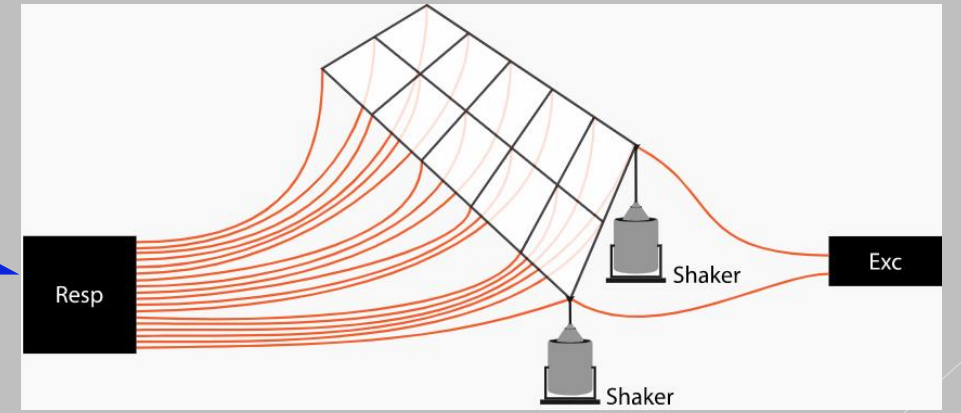
## Çok Referanslı Modal Testler

- Bazı test durumları, birden fazla referans DOF ile ölçümler gerektirir. Bu, ölçülen verilerde tüm modların yeterince "mevcut" olduğu uygun bir referans DOF bulmanın mümkün olmadığı durumdur.
- Örneğin, yapılar, yapının farklı kısımlarında baskın modal sapmalarla farklı modlar sergileyebilir. Bu tür modlara genellikle yerel modlar denir.
- Bunun bir örneği, farklı yapısal özelliklere sahip birkaç farklı parçadan oluşan karmaşık yapılardır.
- Test nesnesinin aynı rezonans frekansına sahip daha fazla moda sahip olduğu durumlarda çoklu referans testi de gereklidir. Buna genellikle "tekrarlanan kökler" ve yakından bağlı modlar denir.
- Tekrarlanan köklere bir örnek, belirli simetrik yapılara sahip olmaktır. Bu gibi durumlarda, örneğin birbirine dik olan iki bükülme modu, rezonans frekanslarına göre yakın bir şekilde eşleştirilebilir.
- Ölçülen referans DOF sayısı (en azından) aynı frekanstaki mod sayısına eşit olmalıdır



# Modal Test Yöntemleri

## Çok Referanslı Sarsıcı Testi



- Çoklu sarsıcı testleri daha fazla ivmeölçer sensörüyle gerçekleştirilir - bu nedenle MIMO konfigürasyonuna sahiptir.
- Birden çok sarsıcı kullanmanın ana avantajı, giriş kuvveti enerjisinin yapı üzerinde daha fazla yere dağılmasıdır. Bu, özellikle büyük ve karmaşık yapılarda ve ağır sönümlenmeli yapılarda yapı üzerinde daha düzgün bir titreşim tepkisi sağlar.
- Bu tür yapılara yeterli titreşim enerjisi elde etmek için, yalnızca tek bir çalkalayıcı kullanıldığında giriş uyarma seviyesi bazen çok yüksek olarak ayarlanır. Bu, doğrusal olmayan etkilere neden olabilir ve modal modelin kötü tahminlerini verebilir. Daha fazla konumdaki uyarma, genellikle yapının gerçek hayattaki çalışması sırasında maruz kaldığı uyarma kuvvetlerinin daha iyi bir temsilini sağlar.
- Tek bir sarsıcı kullanmak yerine birden fazla sarsıcı kullanmak, daha tutarlı veriler ve azaltılmış ölçüm süresi sağlama avantajına da sahiptir. Tutarlı veriler, çok referanslı modal test verileri üzerinde gerçekleştirilen modal analiz için çok önemlidir.

# ODS (Operational Deflection Shape)

- EMA'nın gerçekleştirilmesinin zor olduğu yapılarda baskın yapısal titreşimlere yönelik değişiklikleri analiz etmek ve belirlemek için kullanılır.
- Giriş uyarma sinyalleri olmadan, yalnızca çıkış sinyalleri kullanılır.

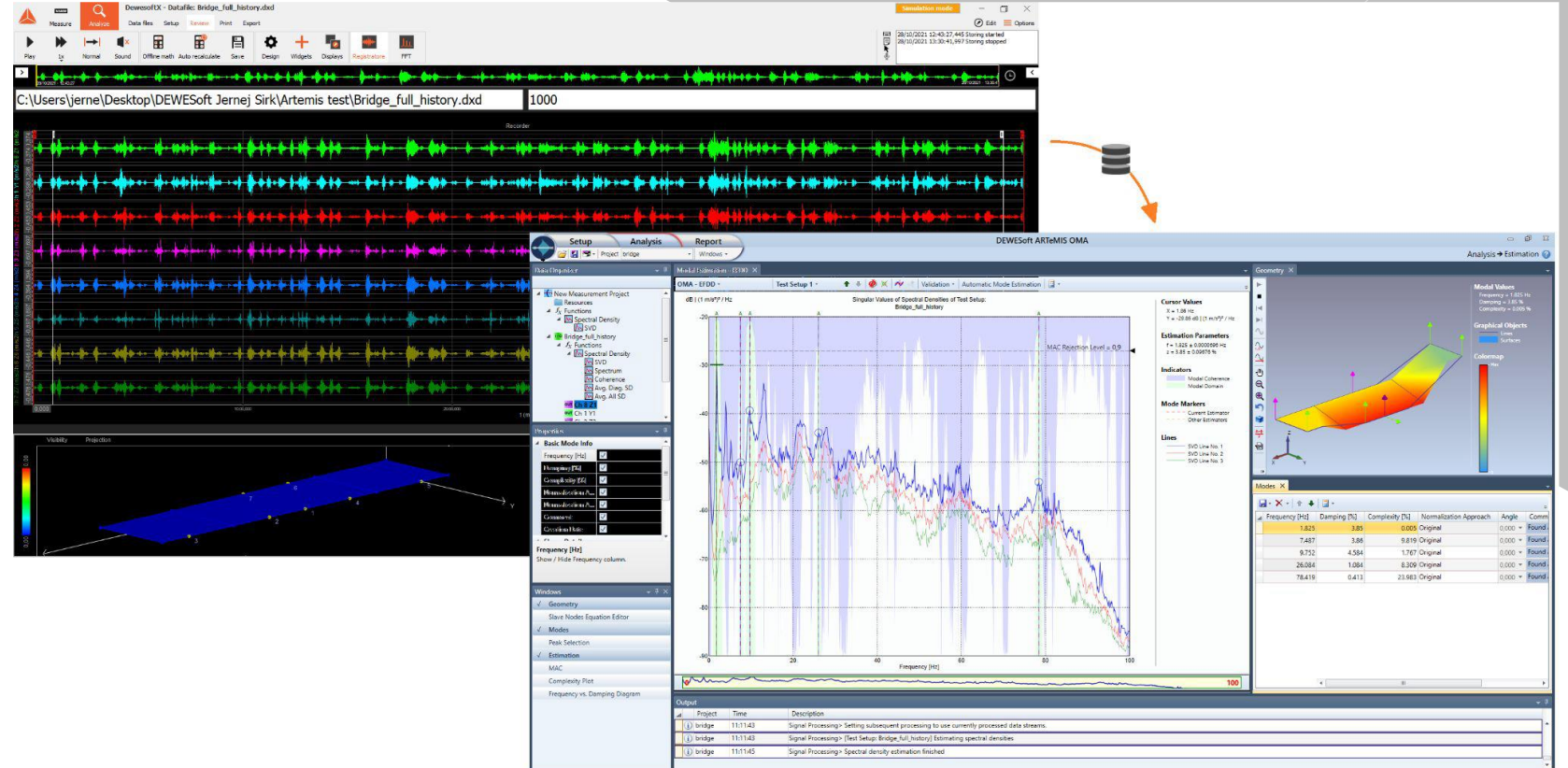




# OMA (Operational Modal Analysis)

- Yapı çalışma koşulları altındayken, yani ilk uyarı veya bilinen yapay uyarı yokken toplanan titreşim verilerine dayanarak yapının mod özelliklerini tanımlamayı amaçlar.
- Giriş uyarma sinyalleri olmadan, yalnızca çıkış sinyalleri kullanılır.

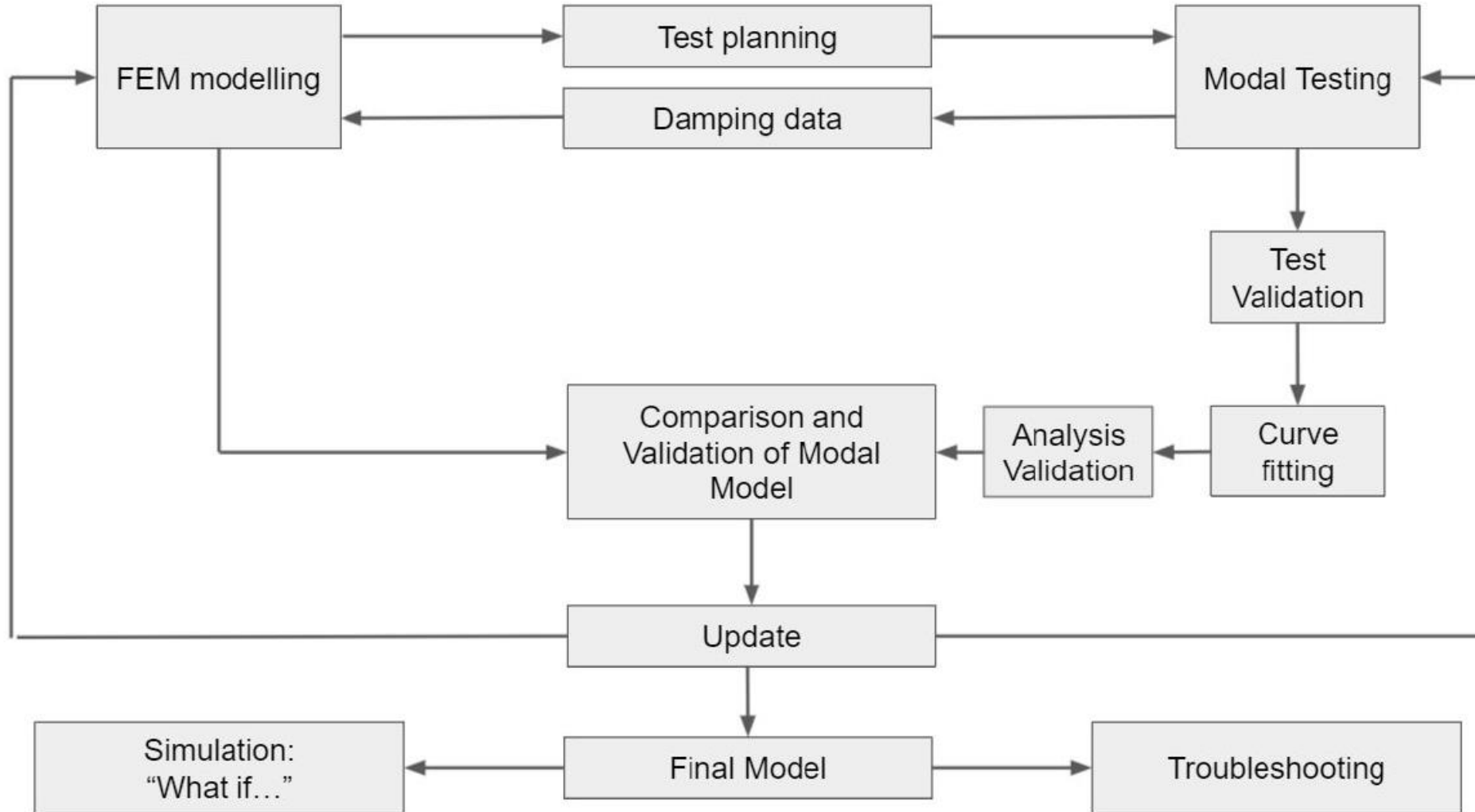
- Yüksek binalar
- Gemiler
- Köprüler
- Rüzgar Türbinleri



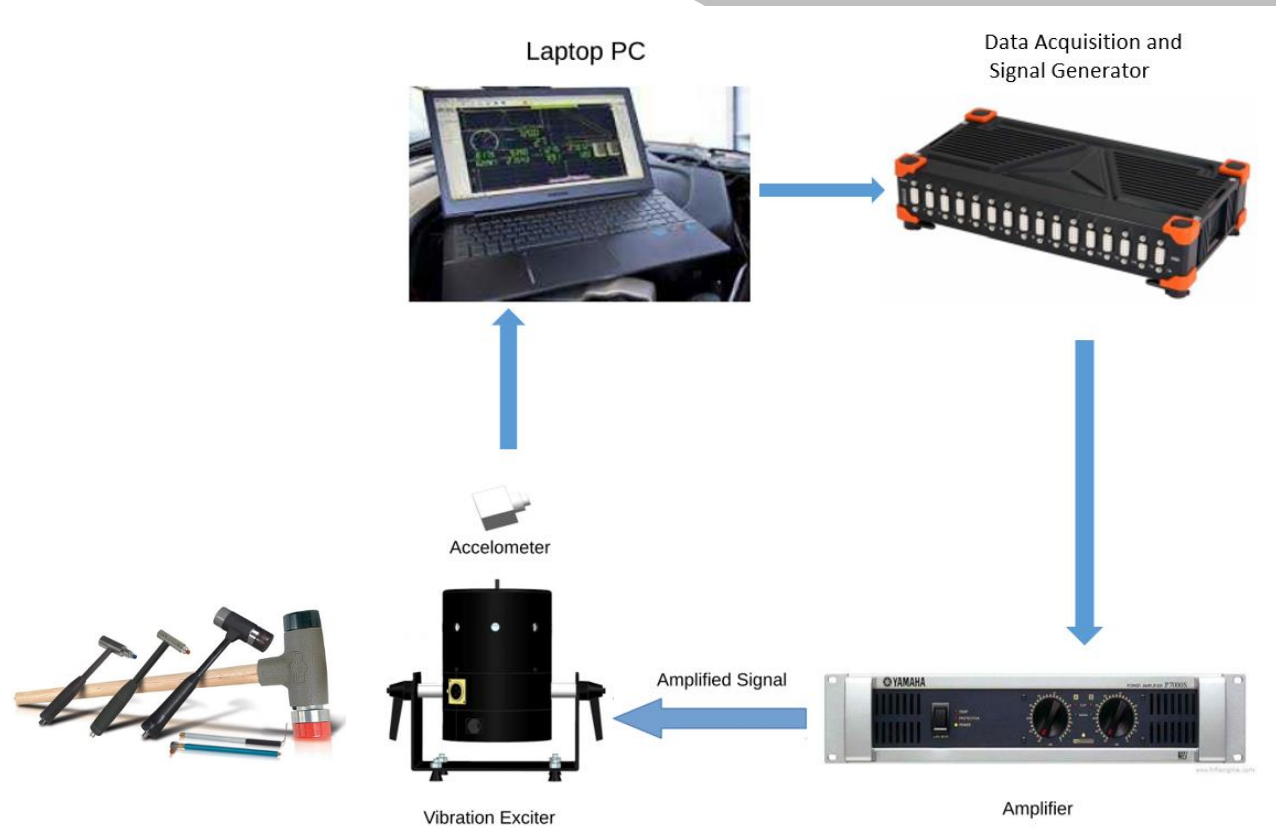
## ODS vs. OMA

- Hem ODS hem de OMA, harici giriş kuvvetleri kullanmaz, ancak tamamen yanıt ölçümlerine dayanır. Bu nedenle Modal Test prosedürü ODS ve OMA için aynıdır ancak analiz ve sonuçlar farklıdır.
- ODS, ölçülen operasyonel DUT üzerindeki DOF'lerin genlik ve faz bilgileri hakkında temel bilgiler sağlar ve sapma şekillerinin geometri animasyonunu etkinleştirir.
- OMA, ölçülen operasyonel DUT'un doğal frekansları, sönümlenmesi ve mod şekilleri ile bir Modal Modeli (EMA gibi) tahmin eder.
- Ancak EMA , kuvvet giriş sinyallerinin kullanımıyla elde edilen FRF verilerinden Modal Modelleri tahmin ederken, OMA, Modal Modelleri operasyonel titreşim ölçümlerinden, örneğin hesaplanmış Otomatik ve Çapraz güç Spektral Yoğunluk fonksiyonlarından (PSD ve CPSD) tahmin eder.
- OMA giriş kuvveti sinyallerini kullanmadığından, uygulanan kuvvetler bilinmemektedir. Bu nedenle, modal kütleler tahmin edilemez ve tahmin edilen mod şekilleri ölçeklendirilemez. OMA, EMA yapmanın zor olduğu durumlarda modal bir modeli tahmin etmek için kullanılabilir. Örneğin, yapı sağlığı için DUT'leri izlerken, DUT'nin boyutu veya konumu harici güçle uyarmayı pratik olmadığına veya DUT'nin operasyonel yapısal koşullarının analiz edilmesi gerektiğinde.

# Modal Workflow

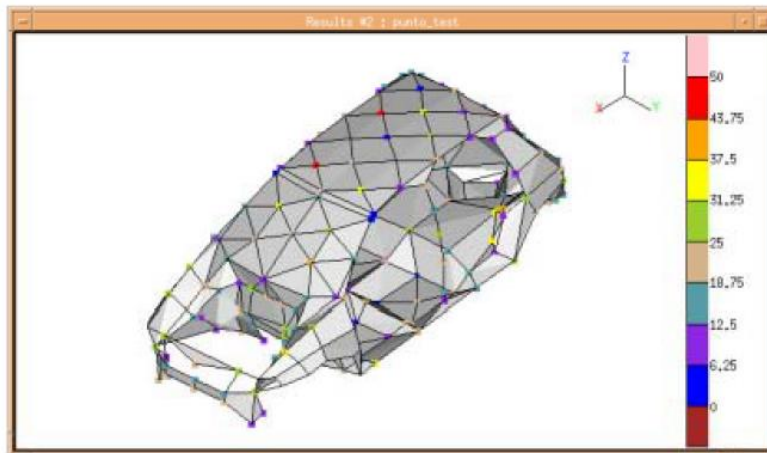
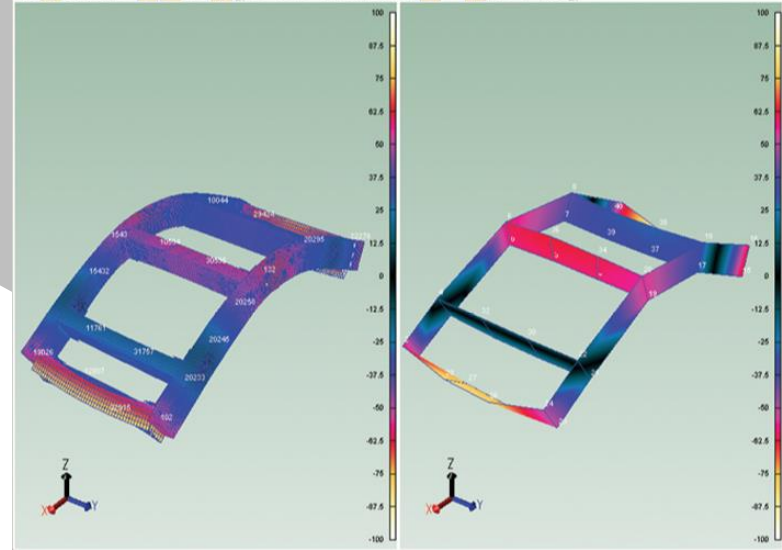
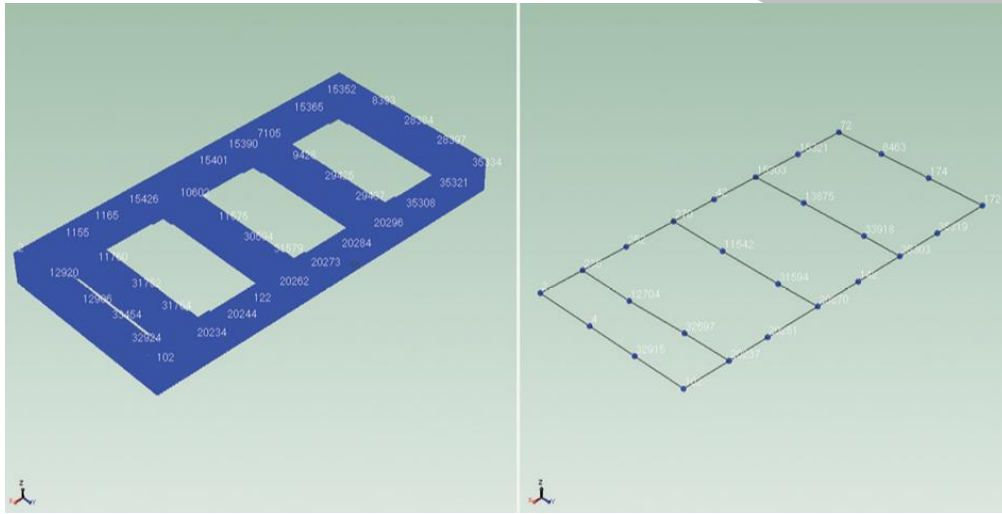


# Pre-Test



# Pre-Test

Mode 10: 371.71700 Hz | Mode 4: 366.43197 Hz



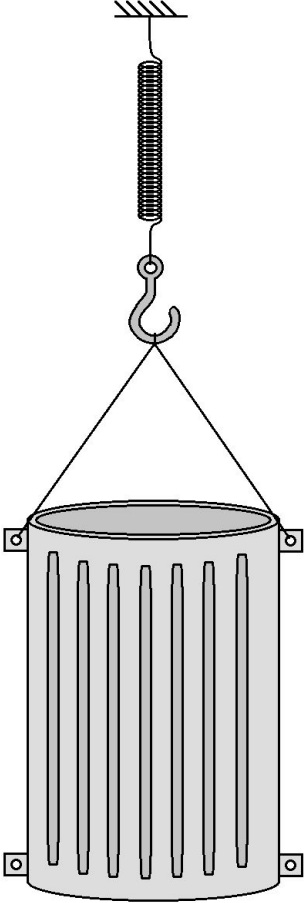
# Pre-Test

## Sınır Koşullarının Belirlenmesi-Test Yapısının Montajı



# Pre-Test

## Sınır Koşullarının Belirlenmesi-Test Yapısının Montajı



### Free-Free Test

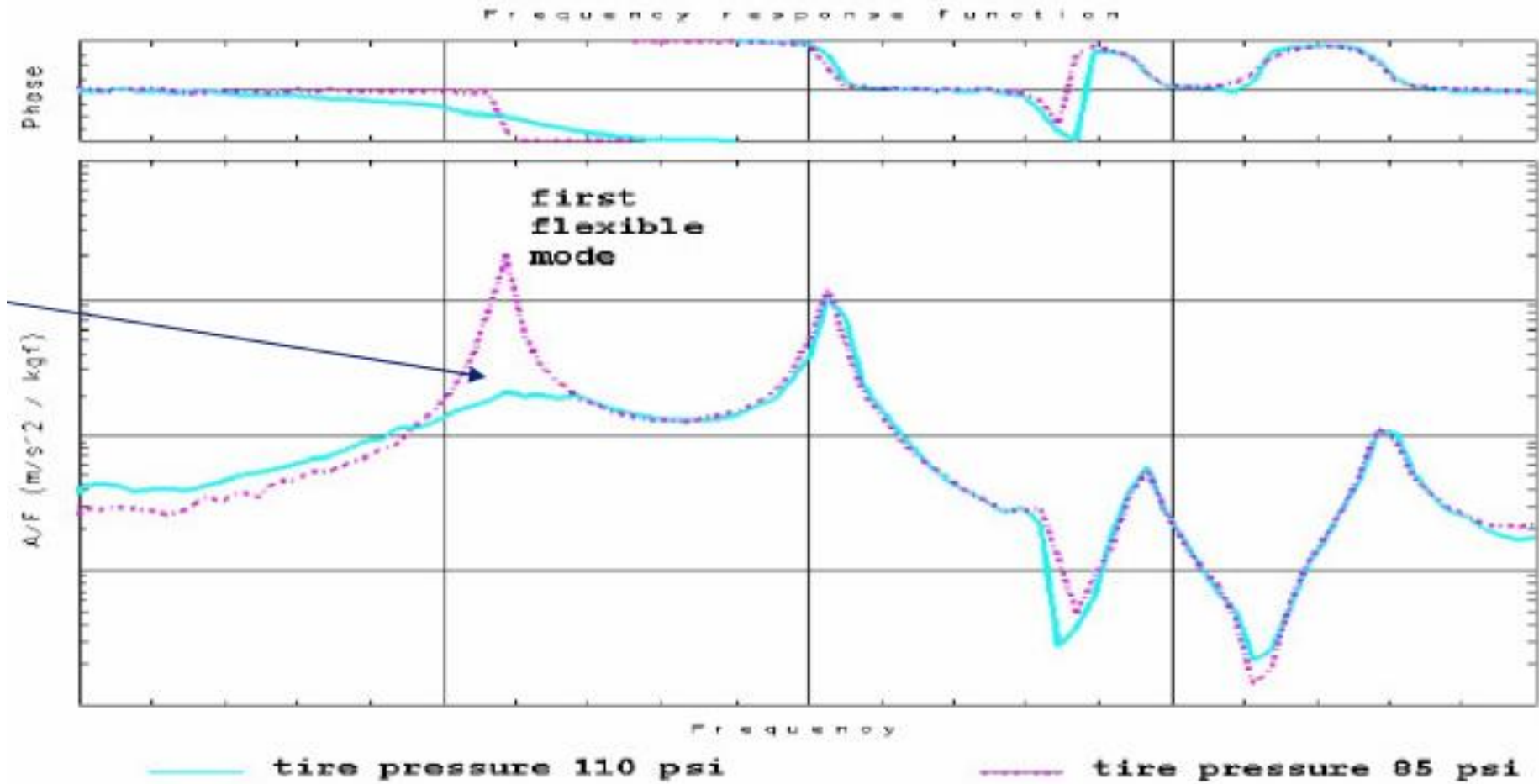
- En çok kullanılan yöntem
- Kısıtlanmamış modal model tahmini
- Dinamik modlar için ölçüm aralığındaki rijit body modlardan kaçınma.
- Sınır koşulları kullanmadan FEM modelinin doğrulanması

### Constrained Test

- Kısıtlı modal model tahmini
- Sınır koşulları kullanılarak FEM modelinin doğrulanması
- Doğru sınır şartlarını belirlemek zor

# Pre-Test

Sınır Koşullarının Etkileri



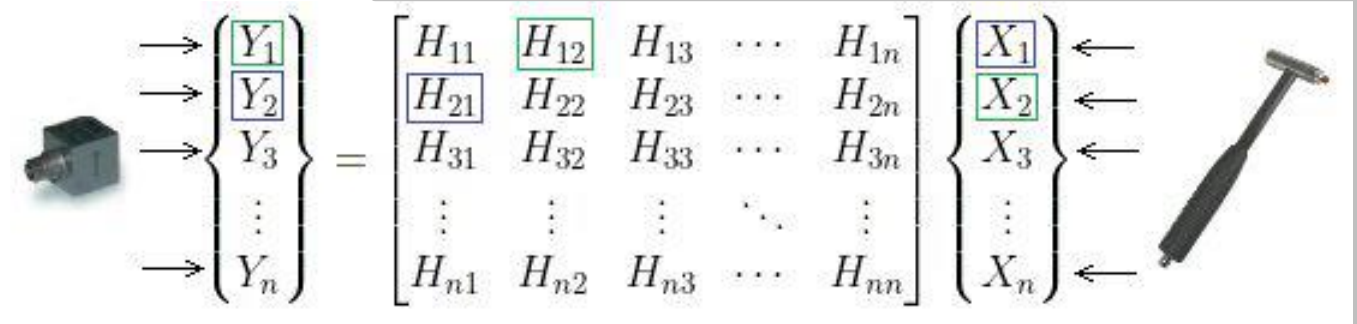
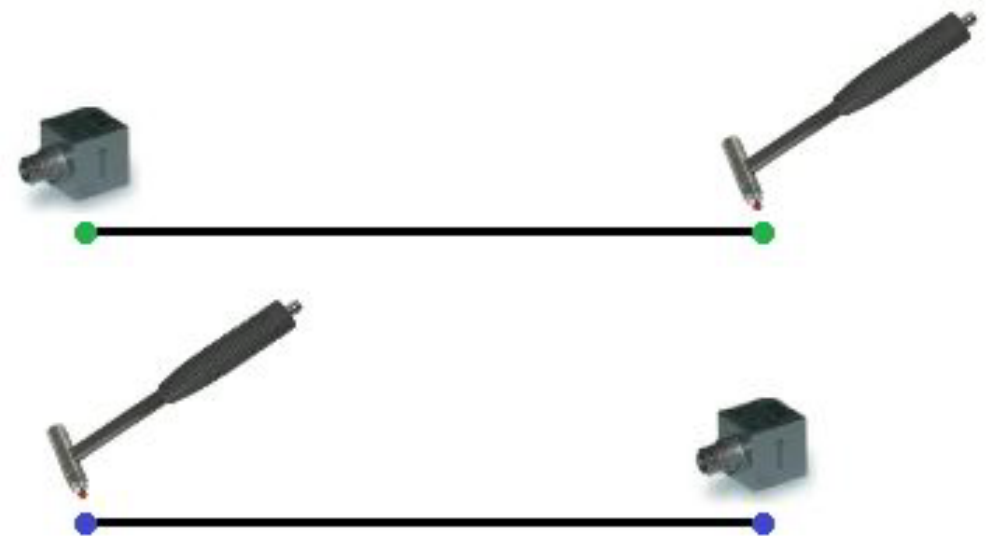
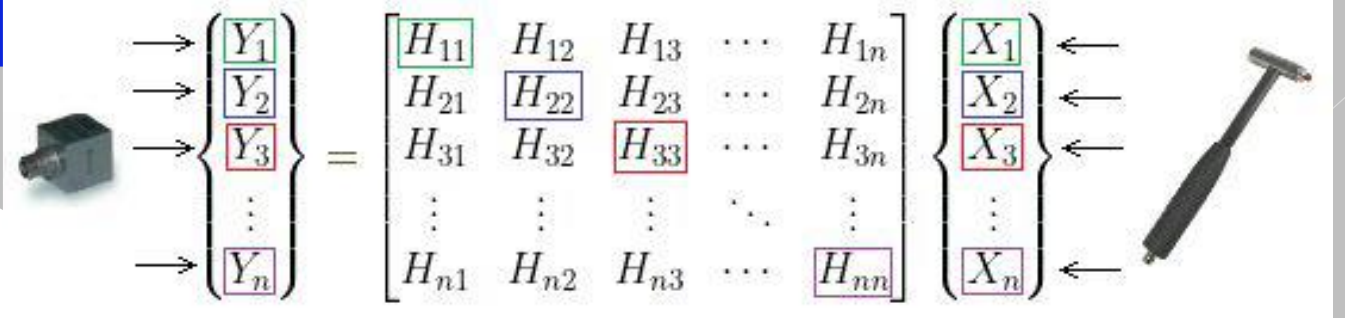
Rigid body mode frequency must be  $< 10\%$  of the first flexible mode



# Pre-Test

## Linearity

- Doğrusallık doğrulaması,  $H_{ij}=H_{ji}$
- Modal test için temel varsayım
- Yeterli darbe genliğinin test edilmesi



$$H_{out/in} = H_{row/column} = H_{ij}$$

# Pre-Test

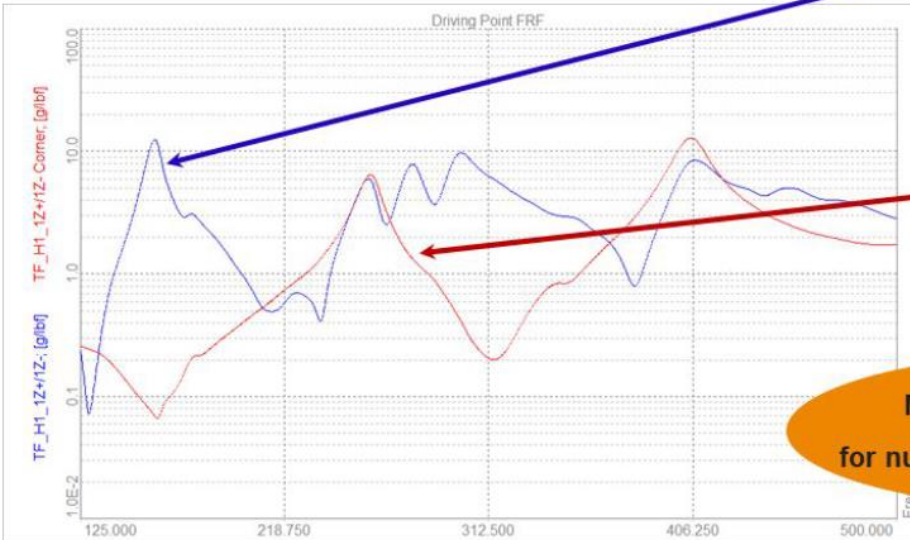
## Uyarma Konumlarının Belirlenmesi

- EMA testi için, nesneyi titreşim özelliklerinin çoğunu ortaya çıkaracak konum veya konumlardan uyarlamak önemlidir.
- Bir nesne, bazı titreşim modu modellerinin her zaman minimum titreşim genliğine sahip olduğu bir konumda uyarılırsa, bu modlar enerjiyi absorbe etmeyecek ve uyarılmayacaktır.
- Uygun uyarma konumlarını belirlemek için, genellikle farklı uyarma noktası konumlarının karşılaştırıldığı ön testler yapılır.
- ODS ve OMA testi giriş kuvveti sinyallerini kullanmadığından, tüm yapısal modlardan enerji bileşenlerini içerecek şekilde herhangi bir modun düğüm konumunda olmayan referans yanıt DOF'larını seçmek oldukça önemlidir.

# Pre-Test

## Uyarma Konumlarının Belirlenmesi

- Uyarım yerinin seçimi ve doğrulanması
  - Uyarım yerinin FRF'inde tüm modlar mevcut mu?
  - Response noktalarında tepki var mı?
- DOF konumu ve yönü
- FEM modelinden bilgi



**Better excitation point both**

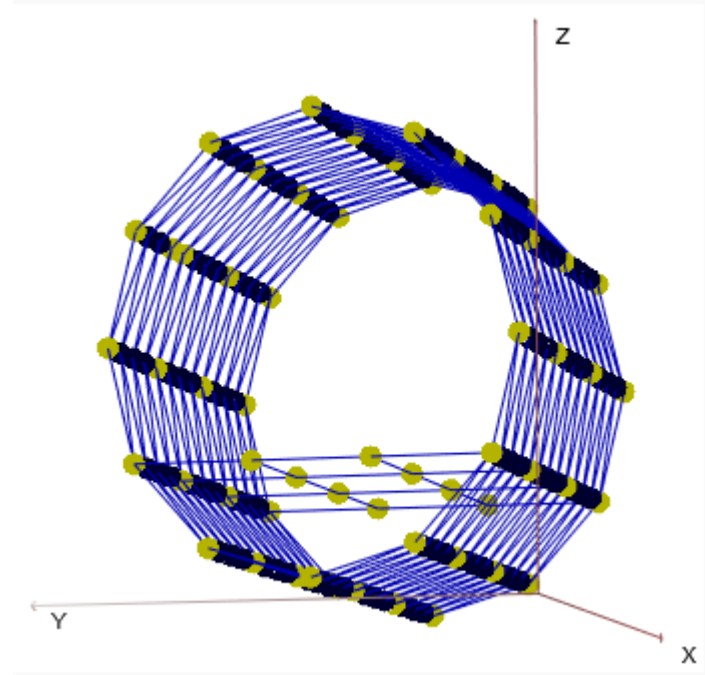
**Poor excitation point does misses modes**

**Measure driving point FRF's for number of positions and compare !**

# Pre-Test

## Geometrik Model Oluřturma

- Geometri modelleri, mhendislerin lmek iin DOF setini semesine, lm srecini gzden geirmesine ve ynlendirmesine ve test nesnesinin belirlenen mod Şekli sapmalarını grselleştirmesine yardımcı olur.



# Modal Test Sonuçları

FRF Fonksiyonu

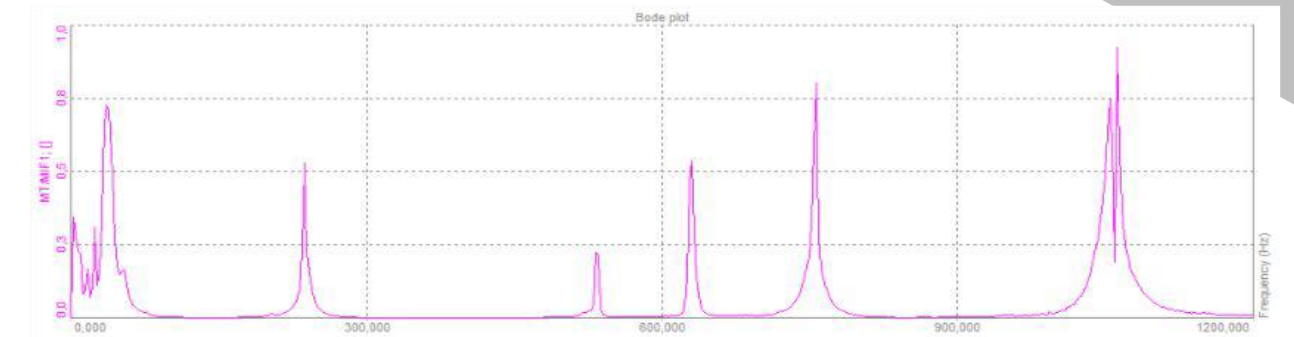
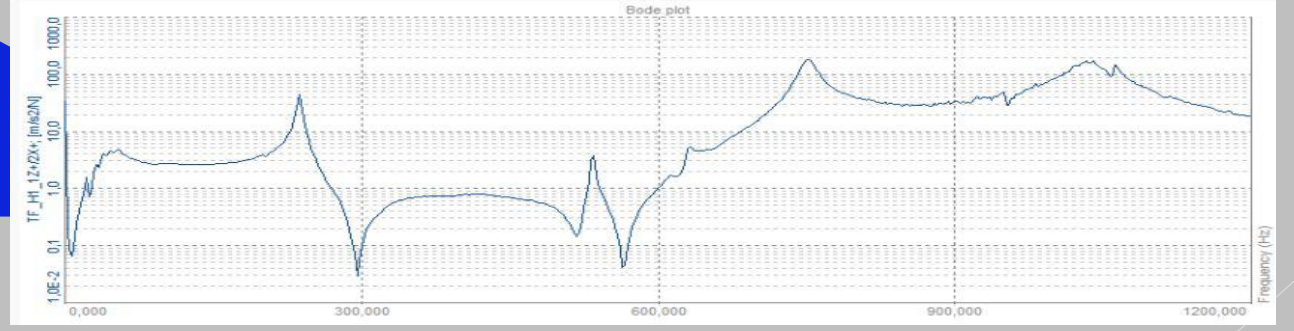
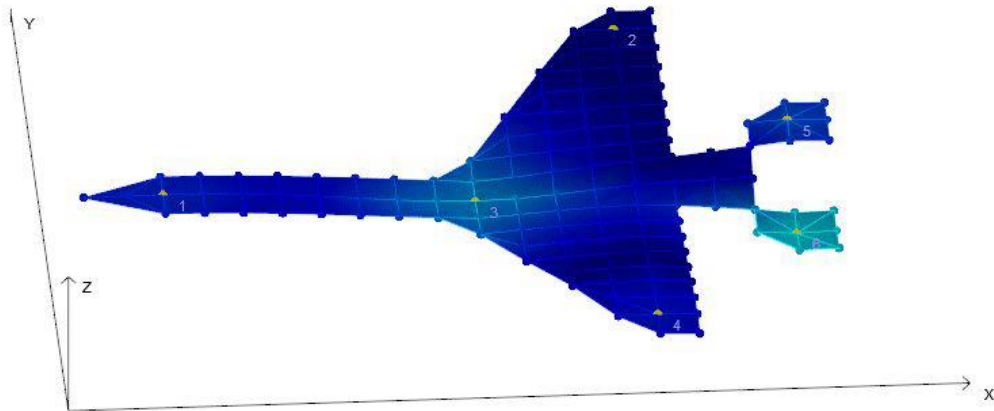
Resonans Frekansı

Damping Ratio

Mode Shapes

Coherence (Test Validasyonu)

MIF



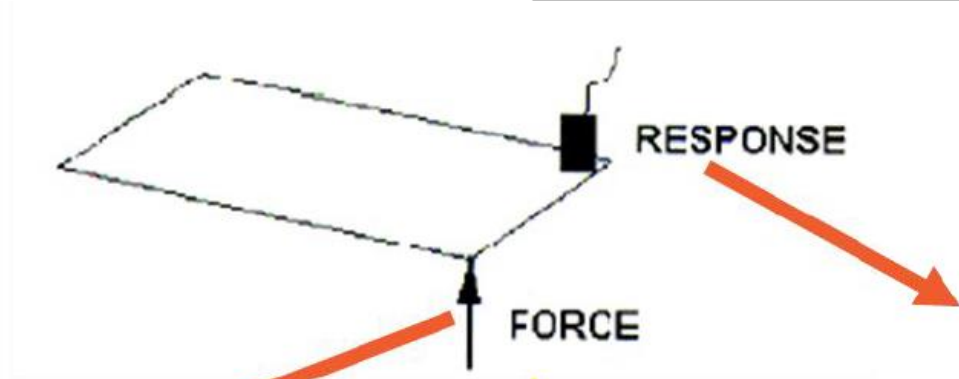
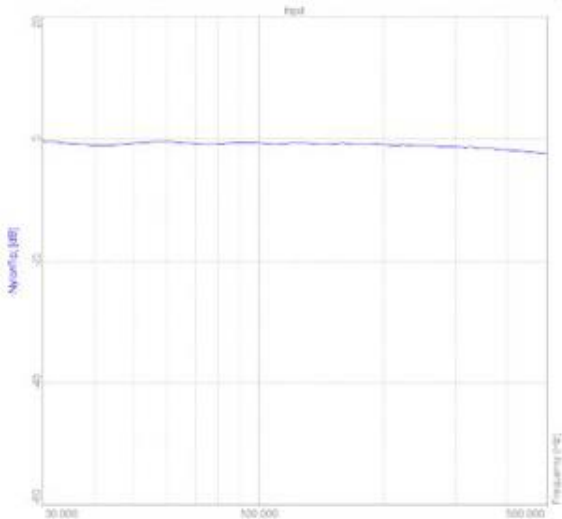
# Modal Test Sonuçları

FRF Fonksiyonu

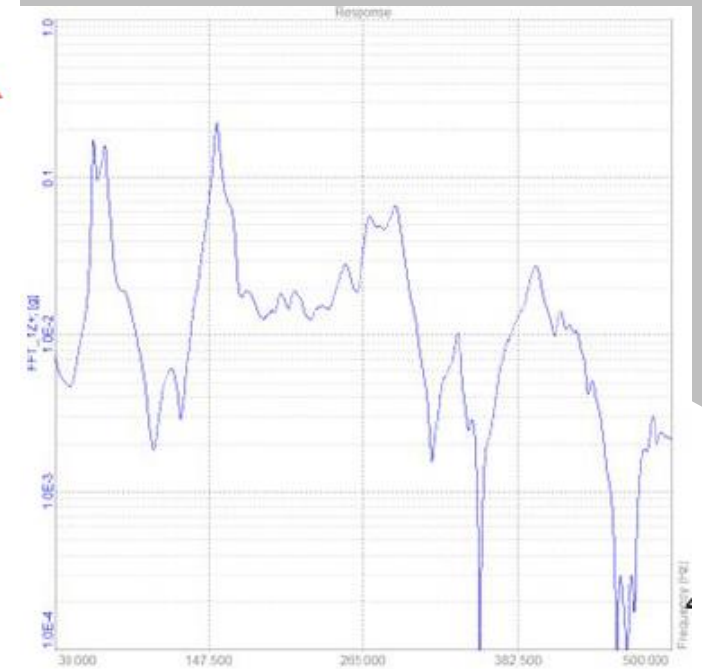
**Frequency Response Functions (FRFs)**, bilinen bir giriş sinyaline yanıt olarak sistemin çıkışını ölçer.

$$FRF = \frac{Output}{Input}$$

Input - Force



Output - Response

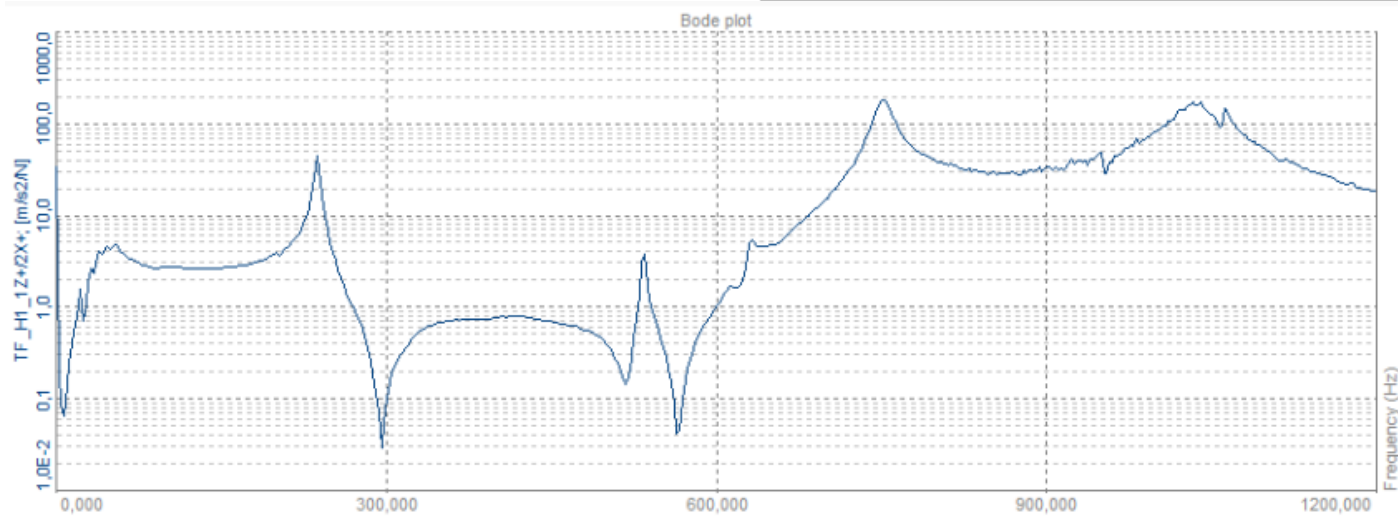


- Yapı dinamiği için;
- Input: Force
- Response: Displacement, Velocity, Acceleration

# Modal Test Sonuçları

## FRF Fonksiyonu

Her bir FFT frekans bileşeni için hesaplanarak, ölçülen frekans aralığı üzerinde FRF fonksiyonları sağlanır.



Bir FRF'nin büyüklüğü genellikle m/s<sup>2</sup>/N veya g/lbf cinsinden ölçülür.

# Modal Test Sonuçları

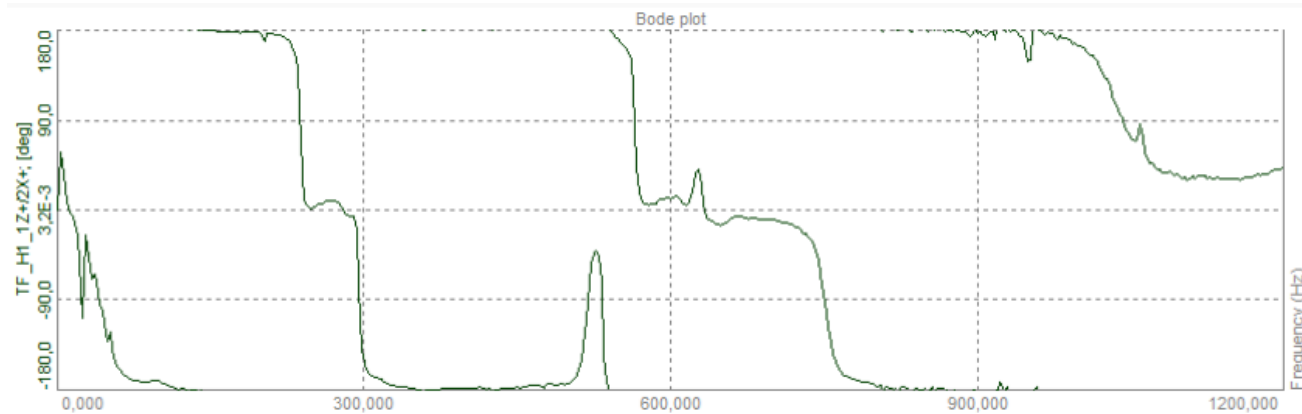
## FRF Fonksiyonu

Yüksek FRF büyüklük değerlerine sahip frekanslarda yapı daha hassastır ve düşük giriş kuvveti seviyelerinde bile çıkış tepkisi nispeten yüksek olacaktır.

FRF büyüklüğü bir pik yaptığında ve faz bu noktada 90 derece döndüğünde, genellikle bir rezonansı gösterir. Bu durum, «Coherence» incelenerek doğrulanabilir.

Düşük FRF büyüklük değerlerine sahip frekanslarda yapı, giriş kuvvetlerine karşı dirençlidir ve daha yüksek giriş kuvveti seviyelerinde bile çıkış tepkisi nispeten düşük olacaktır.

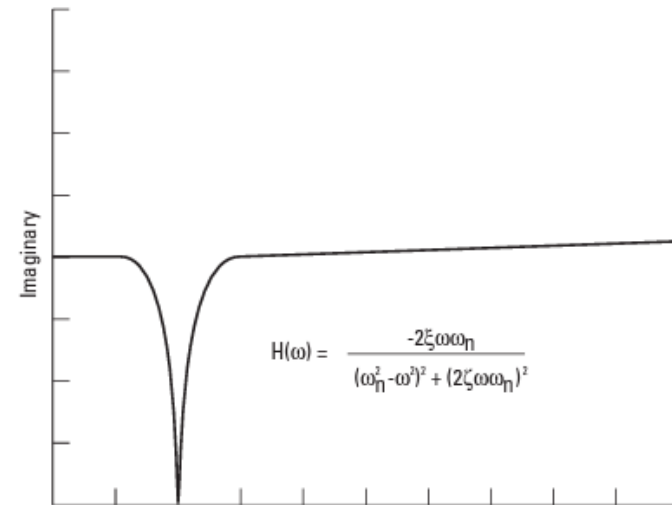
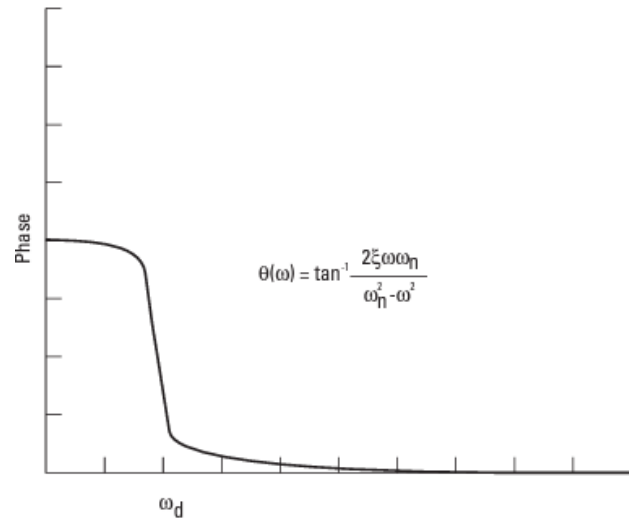
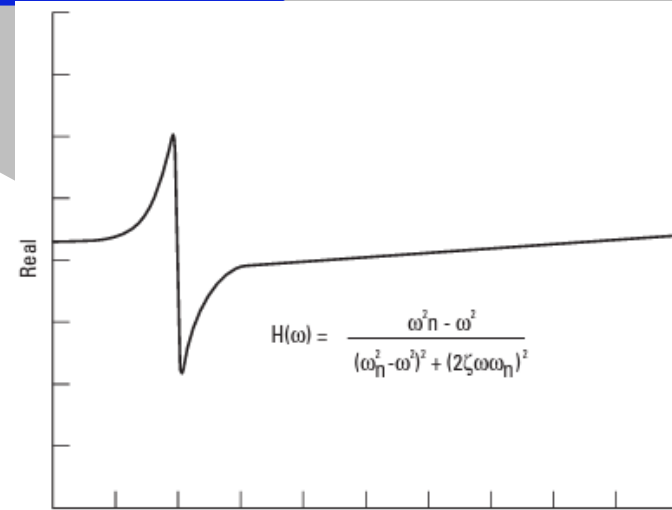
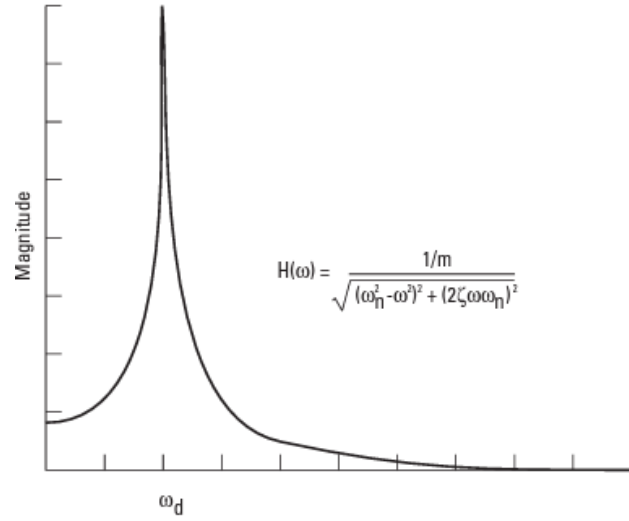
FRF grafiğinde çukur noktalar genellikle yapının «anti-rezonans» frekanslarını gösterir.





# Modal Test Sonuçları

## FRF Fonksiyonu



# Modal Test Sonuçları

## FRF Fonksiyonu

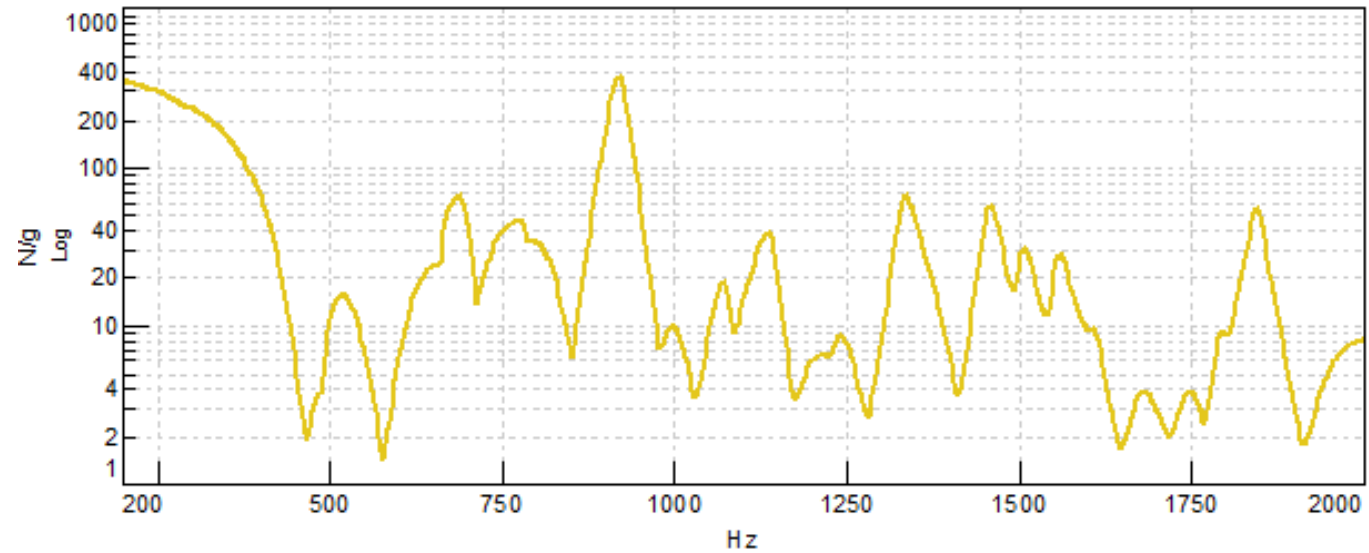
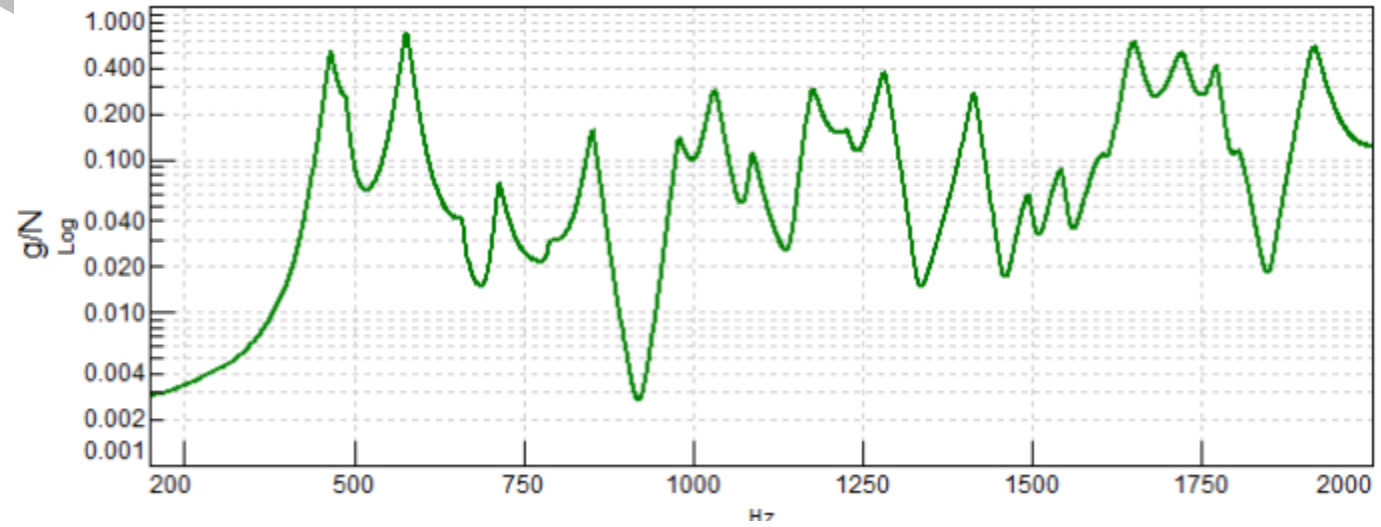
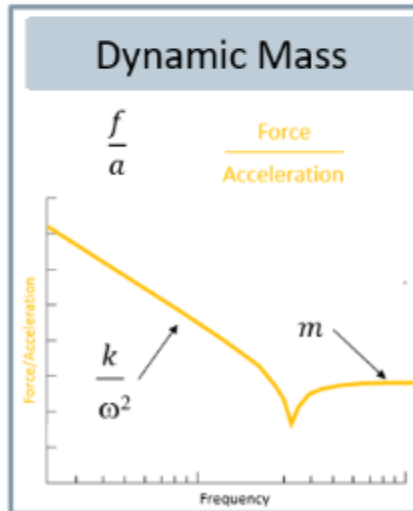
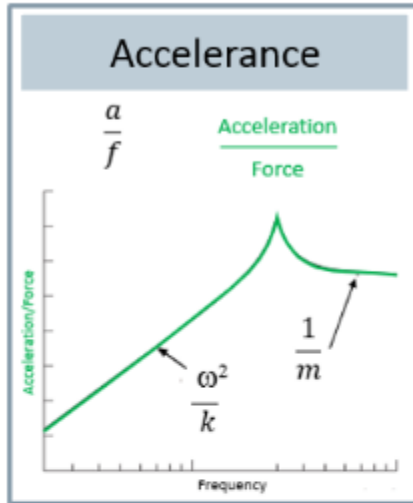
Yüksek kaliteli FRF verilerini elde etmenin en iyi yöntemleri şunlardır:

- Nispeten yüksek çözünürlükler kullanarak leakage etkisinin en aza indirilmesi.
- Giriş ve çıkış sinyallerindeki gürültünün en aza indirilmesi
- Gürültü hatalarını en aza indirmek için ortalamanın kullanılması.

Genel kural; sarsıcı testi için 32..64 ortalama, darbe çekici testi için 4..8 ortalama kullanmaktır.

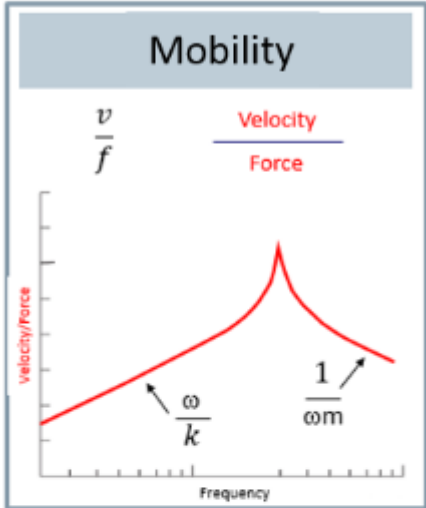
# Modal Test Sonuçları

## Acceleration

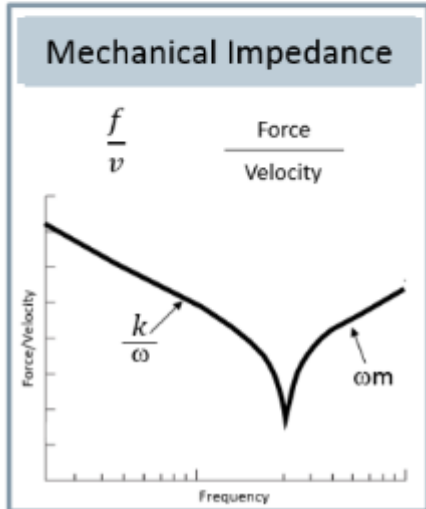


# Modal Test Sonuçları

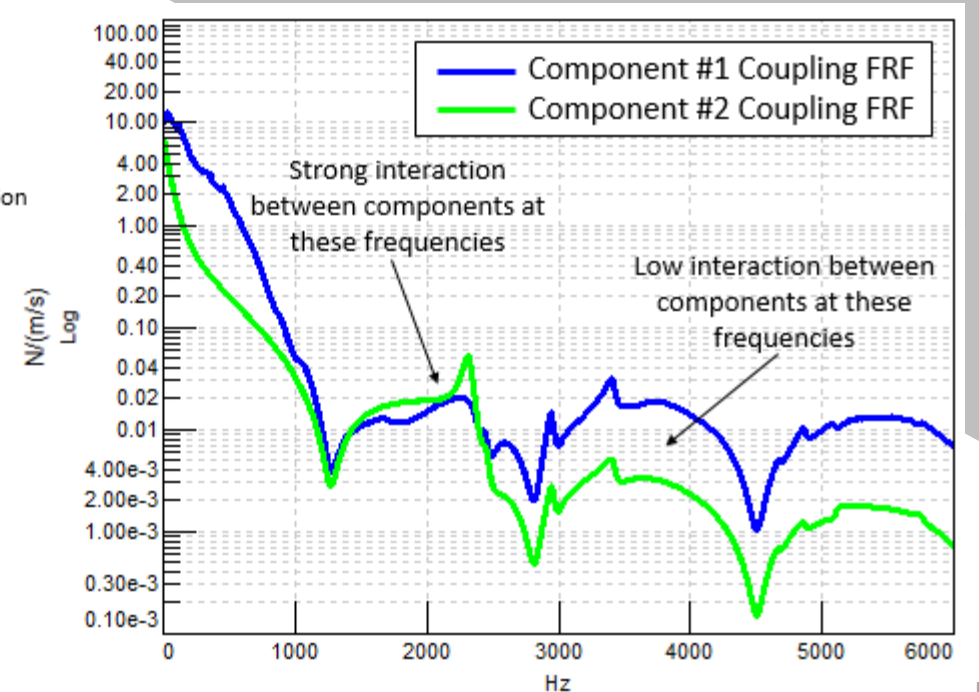
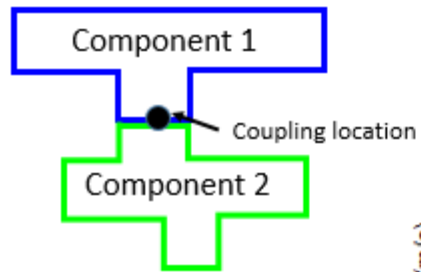
## Velocity



İç kuvvetler ve ses yayan yüzeyler arasındaki FRF'lerin genlik hareketi en düşük olan ürün tasarımları için tercih edilir.



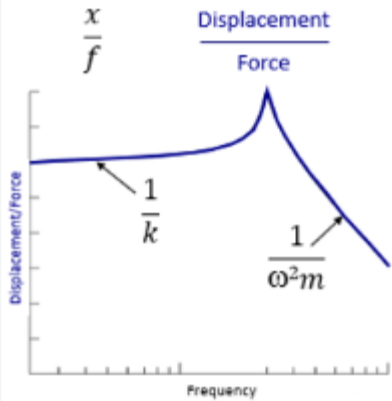
Bir y  
bir ç  
Kulla  
belir  
Kulla  
etkil



# Modal Test Sonuçları

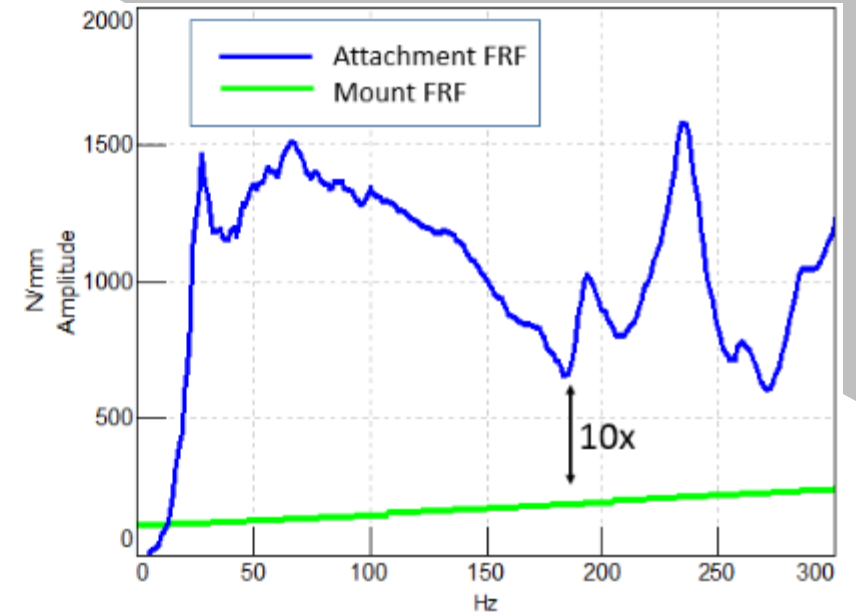
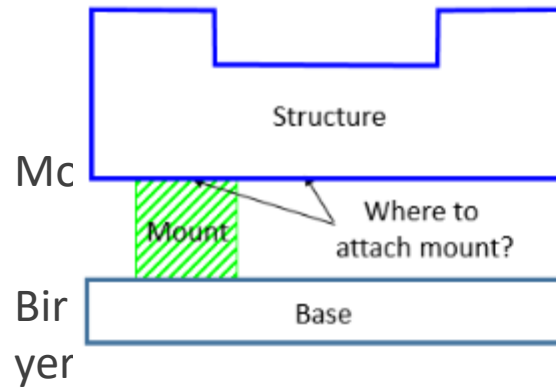
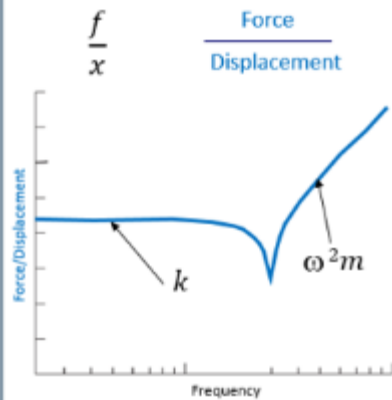
## Displacement

### Compliance



Bir yapının, birim kuvvete maruz kaldığında ne kadar hareket ettiğinin bir göstergesidir.

### Dynamic Stiffness



# Modal Test Sonuçları

## Coherence (Tutarlılık)

- Coherence verileri, modal test doğrulaması için önemli bilgiler sağlar.
- Coherence, bir DOF veya bir DOF grubunun başka bir DOF ile nasıl ilişkili olduğunu gösterir. Her bir FFT frekans bileşeni için, ölçülen frekans aralığında tutarlılık işlevleri sağlayan bir tutarlılık değeri hesaplanır.
- Coherence fonksiyonları normalde kalite denetimi için modal test sırasında izlenir.

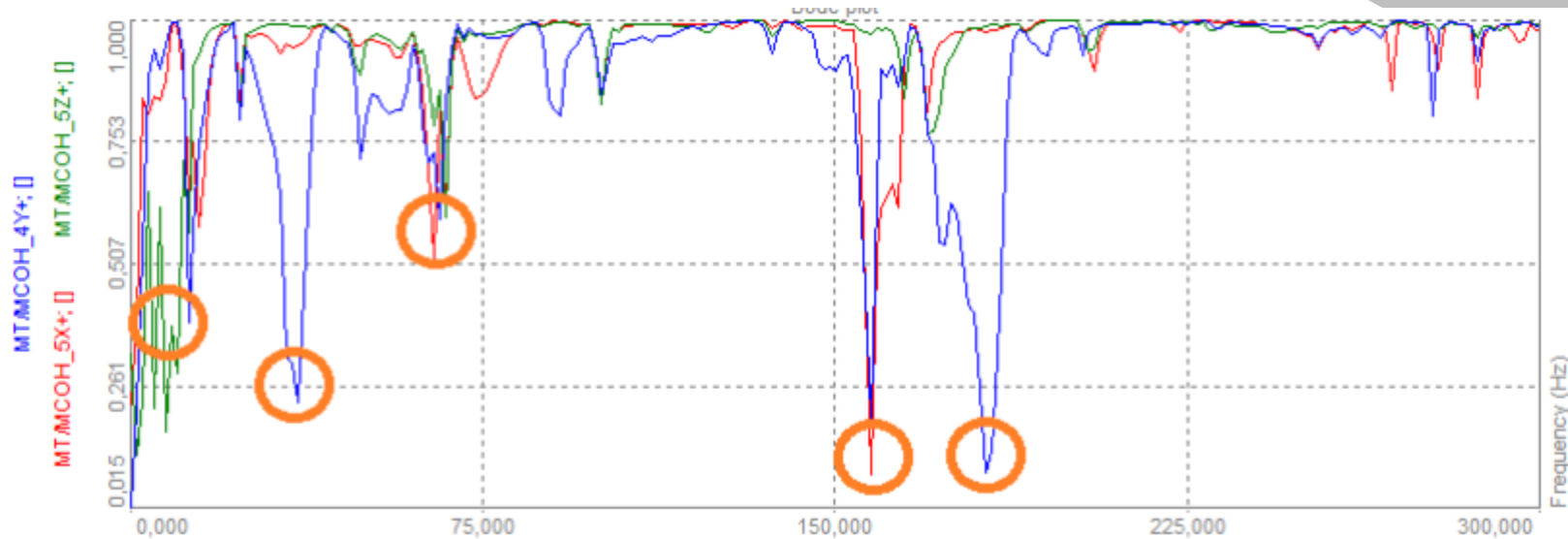


# Modal Test Sonuçları

## Coherence (Tutarlılık)

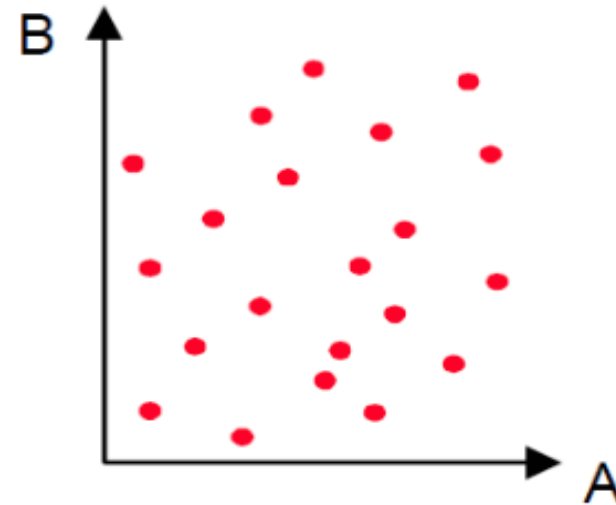
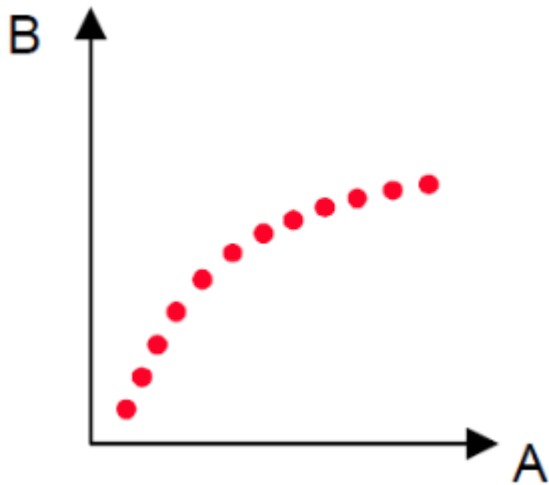
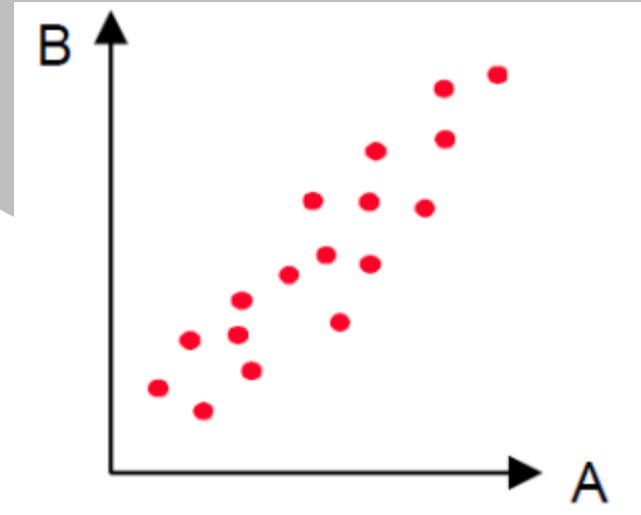
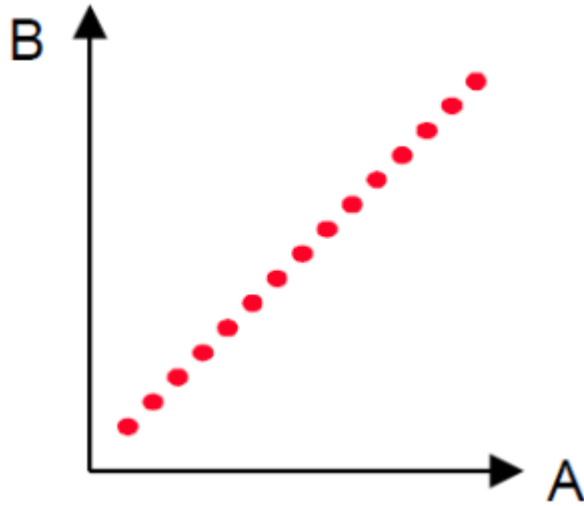
- Coherence genliği 0 ila 1 arasındadır.
- Düşük değerler, giriş ve çıkış kanalları arasındaki zayıf ilişkiyi gösterir.
- 1'e yakın değerler iyi bir ölçümü temsil eder.

Coherence sonuçları, ortalama ölçümlere dayalı olmalıdır. Ortalamanın kullanılmaması durumunda tutarlılık her zaman 1'e eşit yanlış bir değer gösterecektir!!



# Modal Test Sonuçları

Coherence (Tutarlılık)





# Modal Test Sonuçları

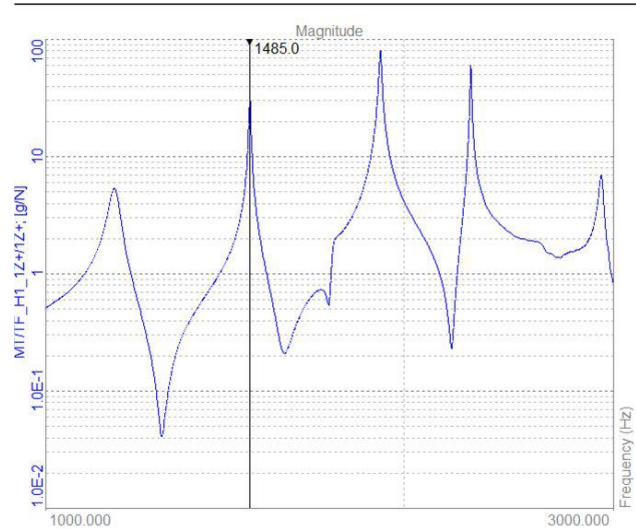
## Modal Circle

İncelenen noktanın bir rezonans noktası olduğuna karar verildikten sonra, bu noktanın tam frekansını ve sönümleme faktörünü öğrenmek için «Modal Circle» kullanılır.

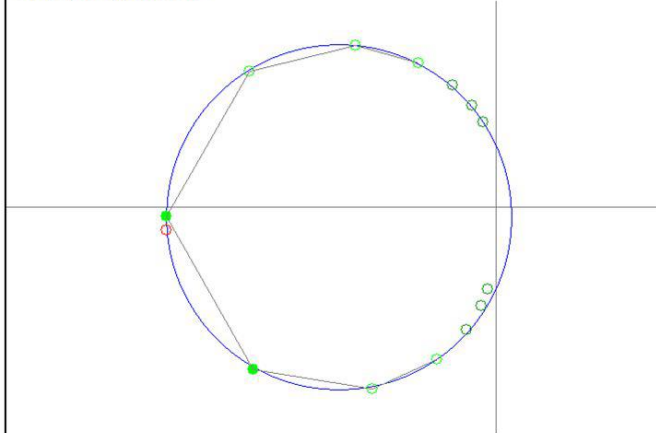
Her rezonans frekansı Nyquist grafiğinde bir daire ile temsil edilir (Reel vs. Imaginary), «circle fit» SDOF için oldukça kullanışlıdır.

FFT, yeteri kadar hassas olamayacağından (yüksek çözünürlük, test sırasında istenmeyen uzun hesaplama süresi gerektirir), enterpolasyon yapmak için bazı matematiksel yöntemler vardır.

Modal circle yöntemi, az sayıda, iyi ayrılmış ve hafif sönümlü modlara sahip basit SDOF yapıları için kullanılabilir.



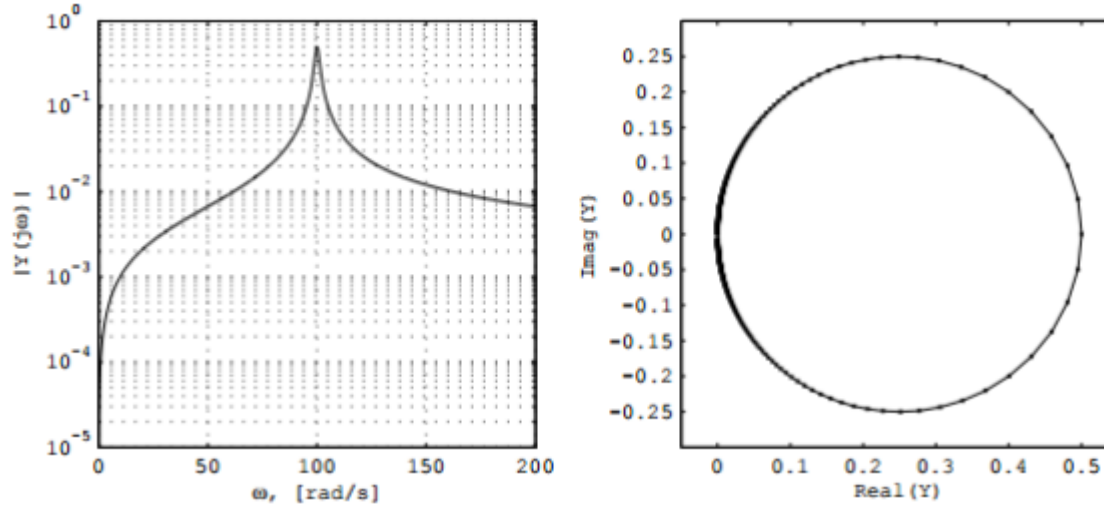
Mobility: TF\_H1\_1Z+/1Z+  
Frequency: 1484.9 Hz  
Damping ratio  $\zeta$ : 0.0011726



# Modal Test Sonuçları

## Modal Circle

Bir peak noktasının sağ ve sol tarafındaki FFT çizgileri, karmaşık koordinat sisteminde reel ve imaginary kısımlar tarafından çizilir. Her nokta için minimum hata ile aralarında bir daire hizalanır ve rezonans frekansı yaklaşık hesaplanır.

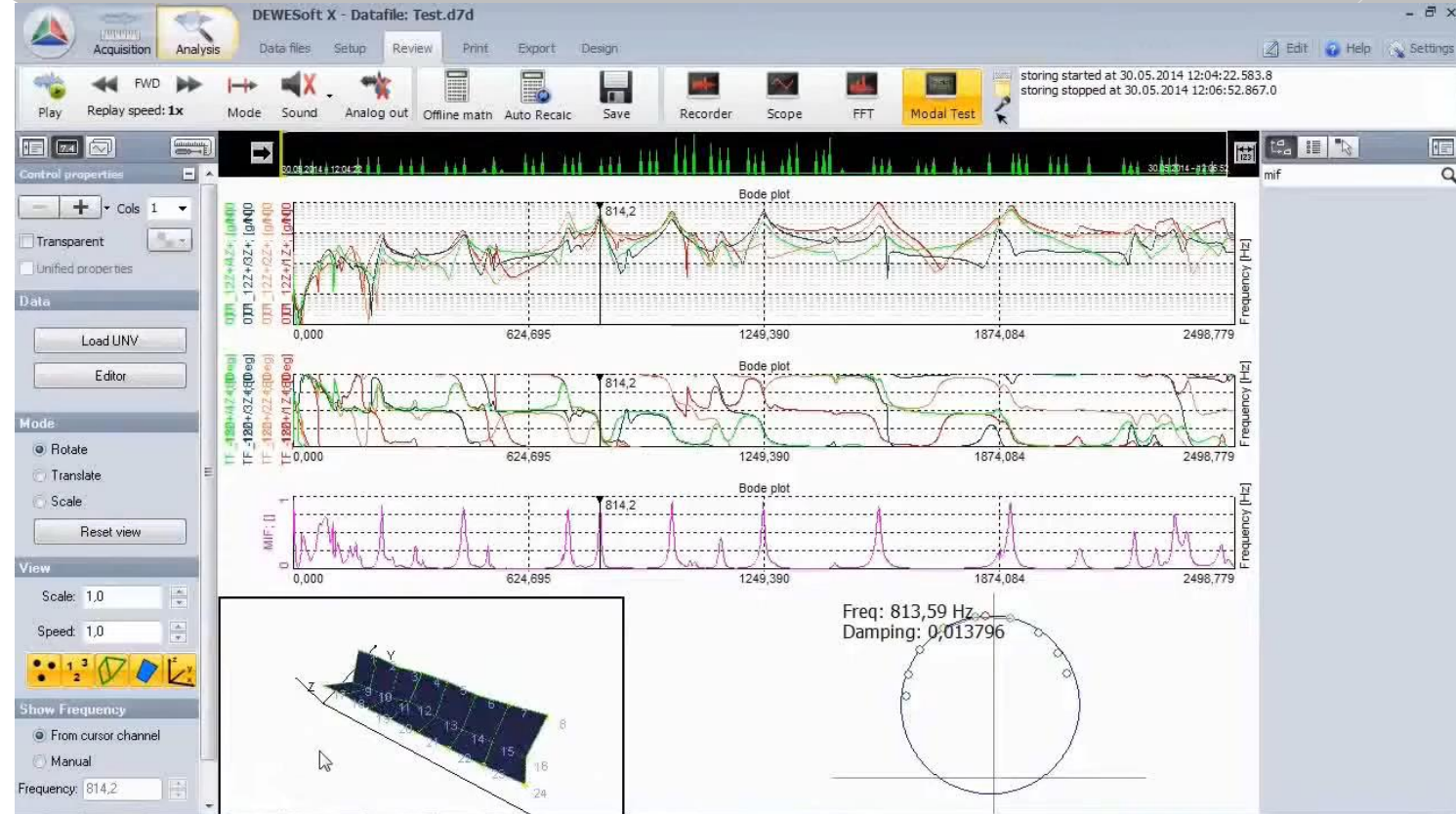
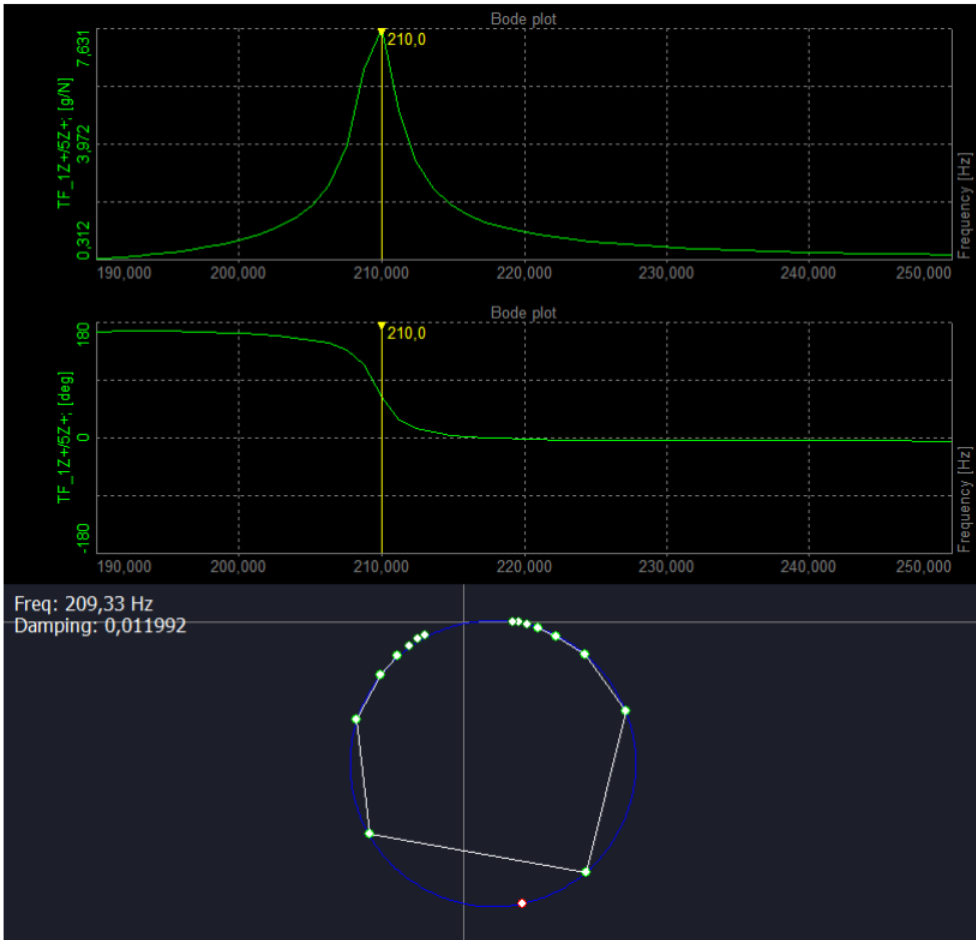


FRF eğrisinde seçilen nokta, komşu modlardan etkilenmemelidir.

FRF eğrisinin fazı yaklaşık 270 derece değişmelidir. Bu genellikle mümkün değildir ve 180 dereceden daha az bir açıklık daha olağandır.

# Modal Test Sonuçları

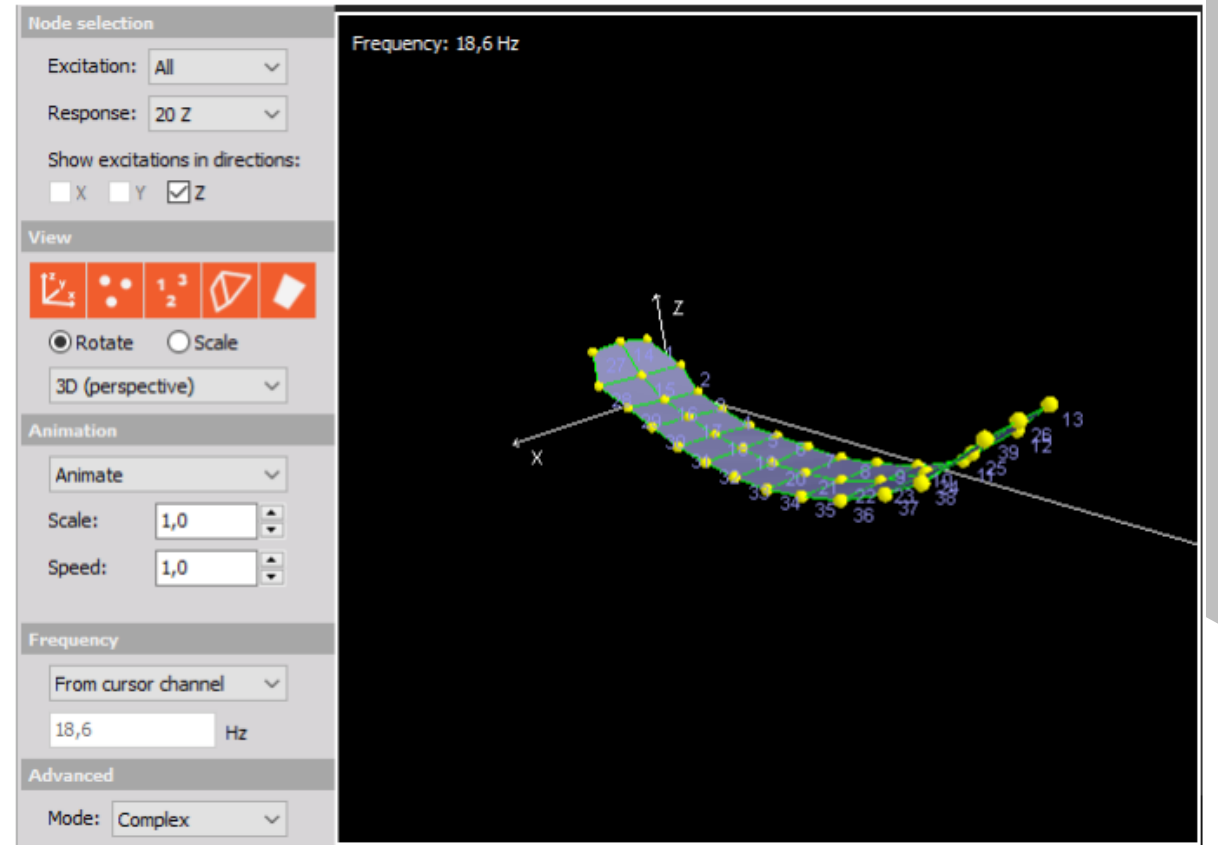
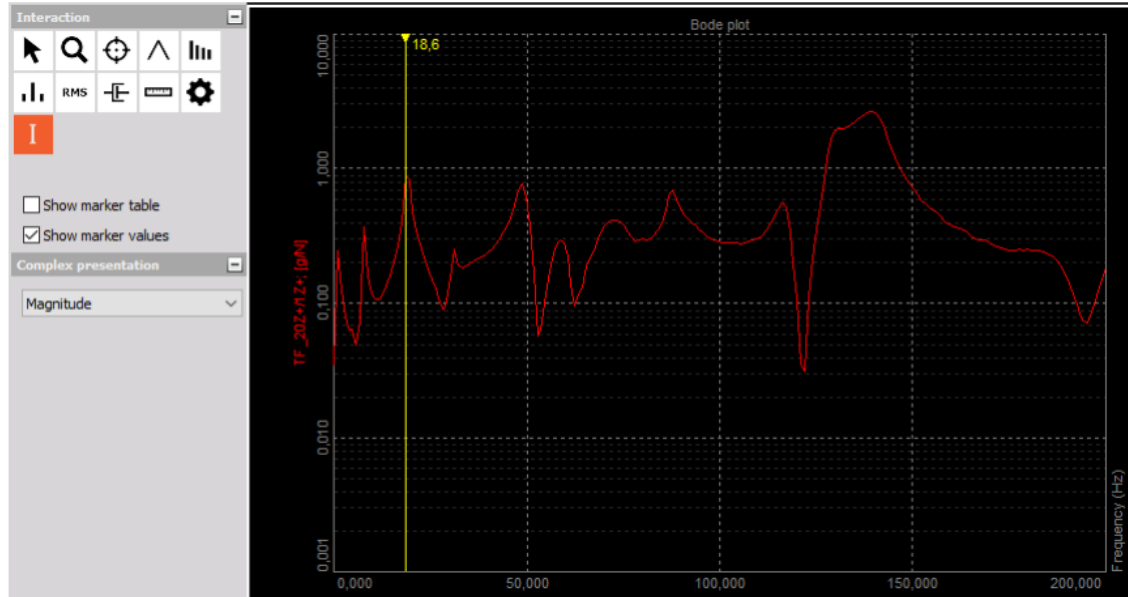
Modal Circle



# Modal Test Sonuçları

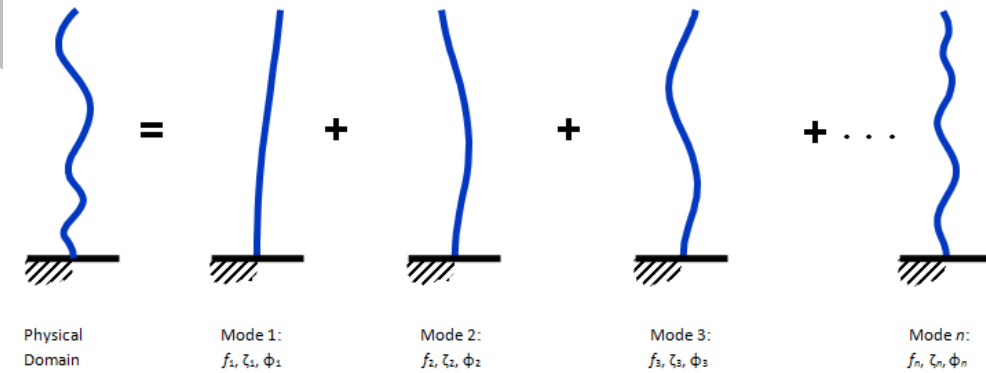
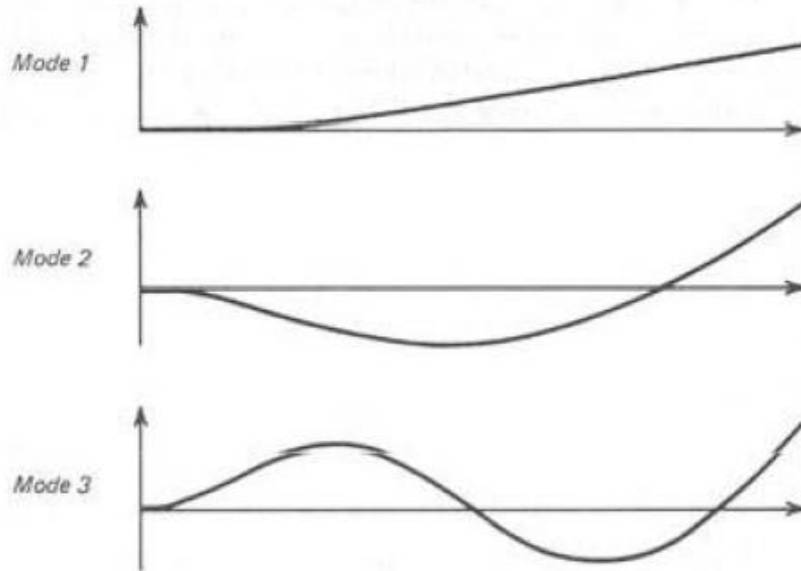
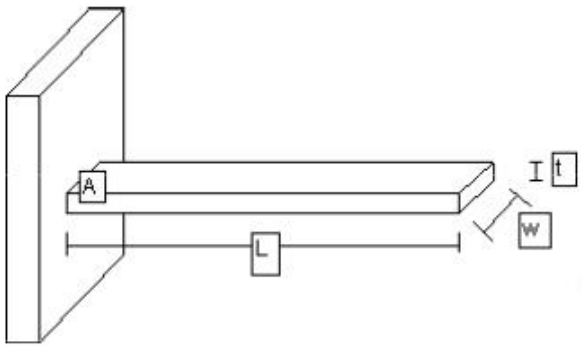
## Mode Shape

Yapı hareket animasyonu, ölçümden alınan genlikler ve fazlar ile sinüs fonksiyonlarını geometri model noktalarına koyarak yapılır.



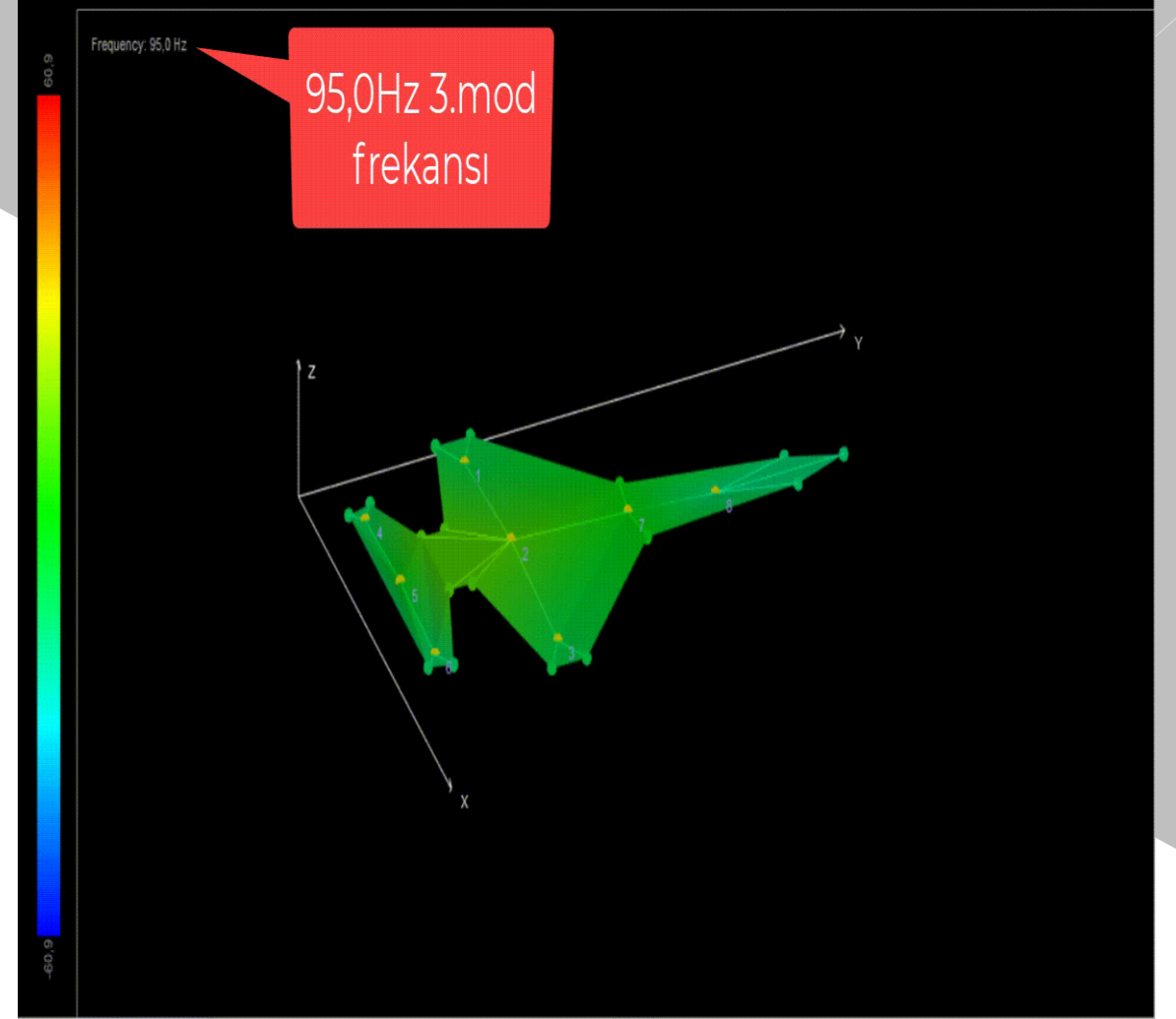
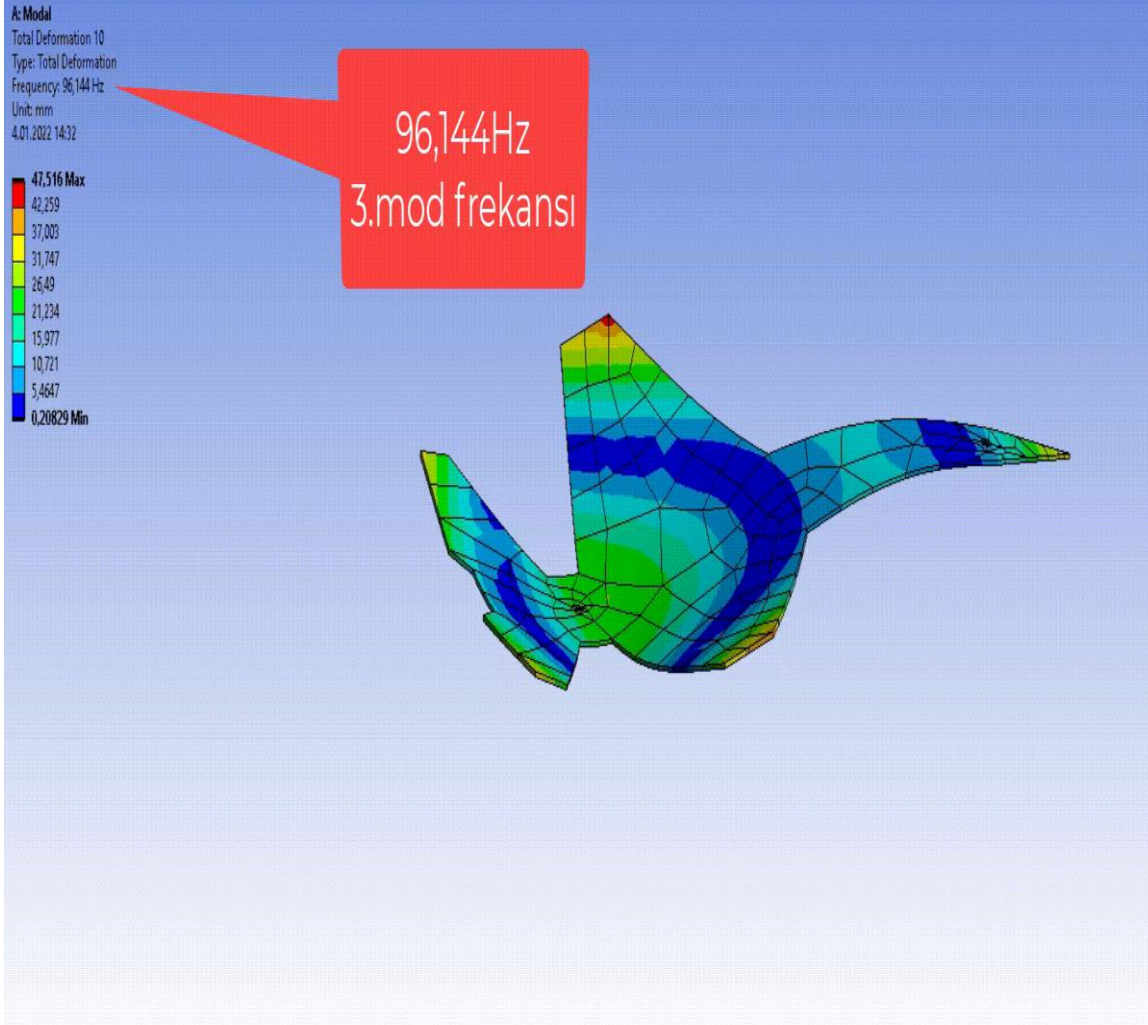
# Modal Test Sonuçları

Mode Shape



# Modal Test Sonuçları

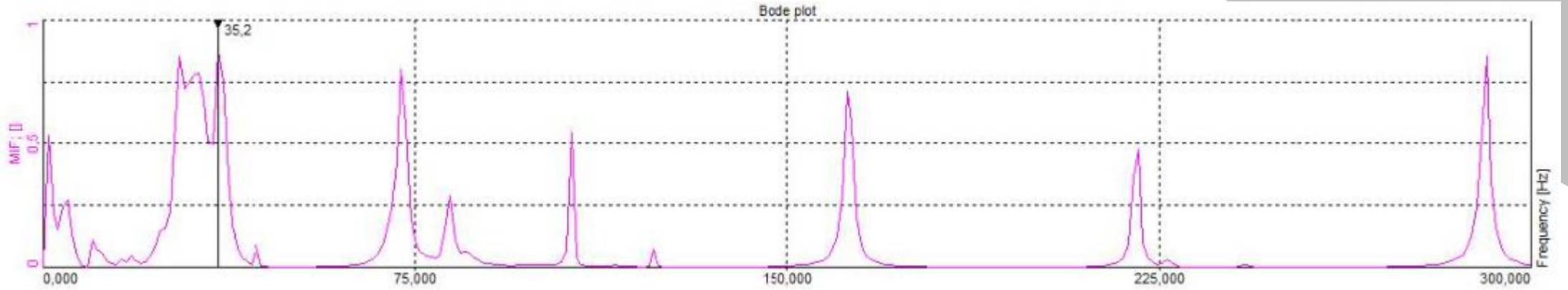
Mode Shape



# Modal Test Sonuçları

## MIF (Modal Indicator Function)

- MIF, modal testten elde edilen verilerde kaç tane modal modun bulunduğunu belirlemeye yardımcı olur.
- Bir yapının tüm parçaları aynı frekansta (sabit faz ilişkileri) sinüzoidal olarak hareket ediyorsa, bu harekete normal mod denir. Bu, rezonans veya doğal frekanslarda olur. Yapıya, malzemeye ve sınırlama koşullarına bağlı olarak, bir dizi mod şekli mevcuttur.



# Modal Analiz Sonuçları

## MIF (Modal Indicator Function)

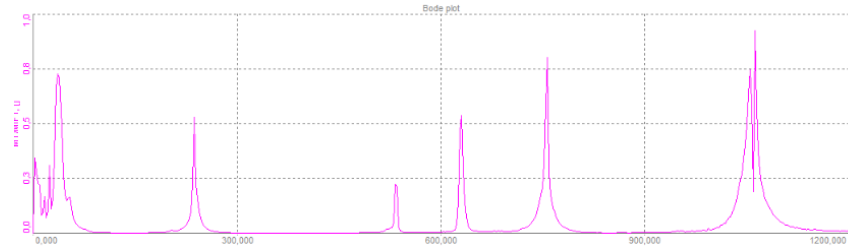
- Mod seçimi sürecinde yardımcı olmak için farklı türde MIF'ler geliştirilmiştir.

### PMIF (Power Mode Indicator Func.)

- FRF'lerin gücünü toplar.
- Modların tepe noktalarını alır ve tüm FRF'ler dahil edildiğinde bu, ölçülen yapıda mevcut olan tüm modları gösterebilir.
- Modlar iyi bir şekilde ayrıldıkça, modların oldukça iyi bir göstergesidir.

### NMIF (Normal Mode Indicator Func.)

- Yakın aralıklı modları belirlemede PMIF'ten daha iyidir.
- Modal modlarda hızla sıfırdan geçen FRF'in gerçek kısmını içerir.



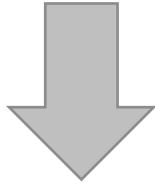
### CMIF (Complex Mode Indicator Func.)

- Tekrarlanan köklere sahip yakından bağlı modları algılayabilir.

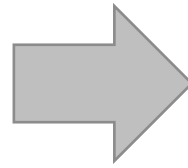


# Modal Analiz Sonuçları

FRF'lerin ve Frekans  
Ölçüm Aralığının  
Belirlenmesi



Stabilizasyon Diyagramı  
Kullanılarak Frekans,  
Sönümleme Oranı vs.  
Parametrelere Karar Verilmesi



Modal Synthesis ve MAC  
ile Validasyon Yapılması



Mode Shape'lerin  
Hesaplanması

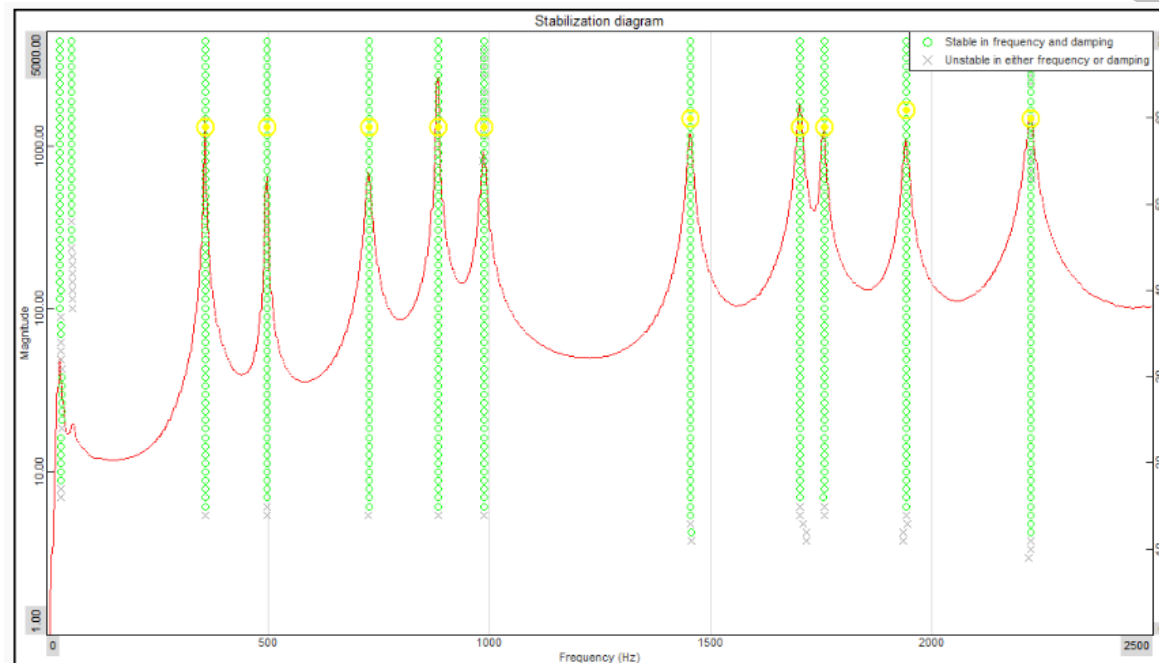
# Modal Analiz Sonuçları

## Stabilizasyon Diyagramı

Modal parametre tanımlamasının neye dayanması gerektiğini belirlemek için Stabilizasyon Diyagramı kullanılır. Kararlı kutupların ve dolayısıyla modal parametre tahmin süreci için kullanılacak tutarlı modların belirlenmesine yardımcı olur.

Kutuplar, modal frekans ve sönümlemeden oluşur.

Tahmin sırasını artırmak, tahmin edilen kutup sayısını da artıracaktır. Tahmini kutuplar, bireysel komşu mertebeler arasında yalnızca biraz değişmeye başladığında, kutupların kararlı olduğu söylenir.



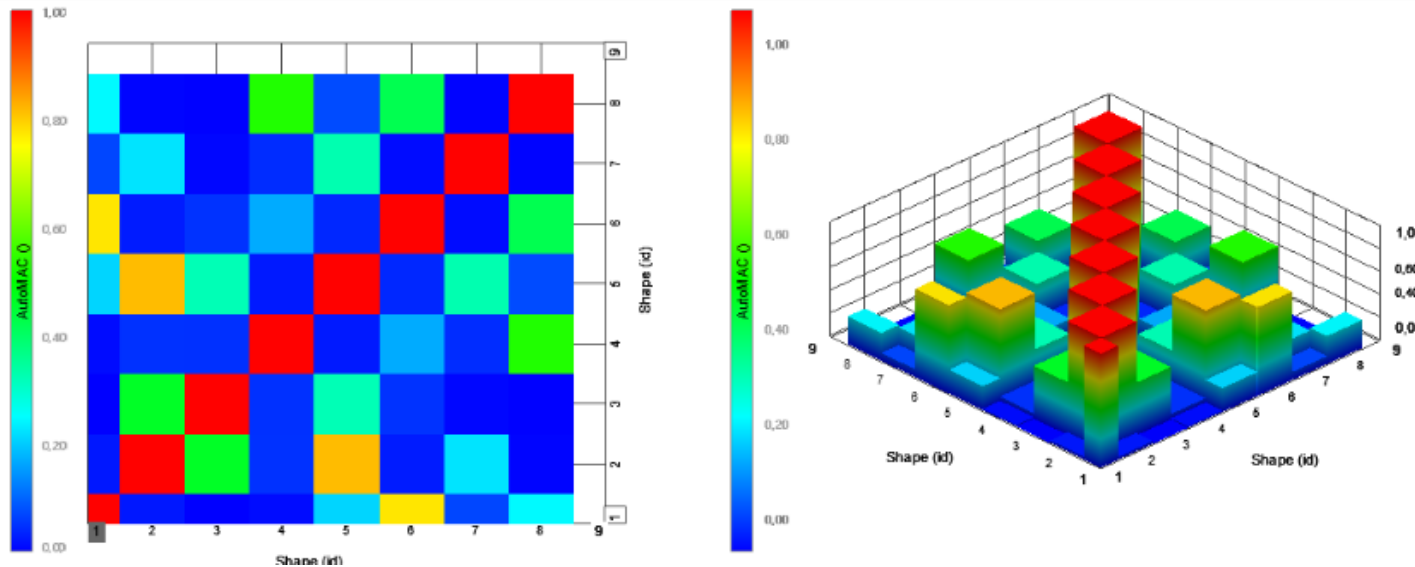
# Modal Analiz Sonuçları

## Modal Model Doğrulaması

Modal parametre tahmin süreci tamamlandıktan sonra, bir sonraki adım modal modeli doğrulamaktır. Modal parametre doğrulaması normalde gerçek ölçülen FRF verileriyle karşılaştırma için örneğin MAC denetimlerini ve FRF sentezini içerir.

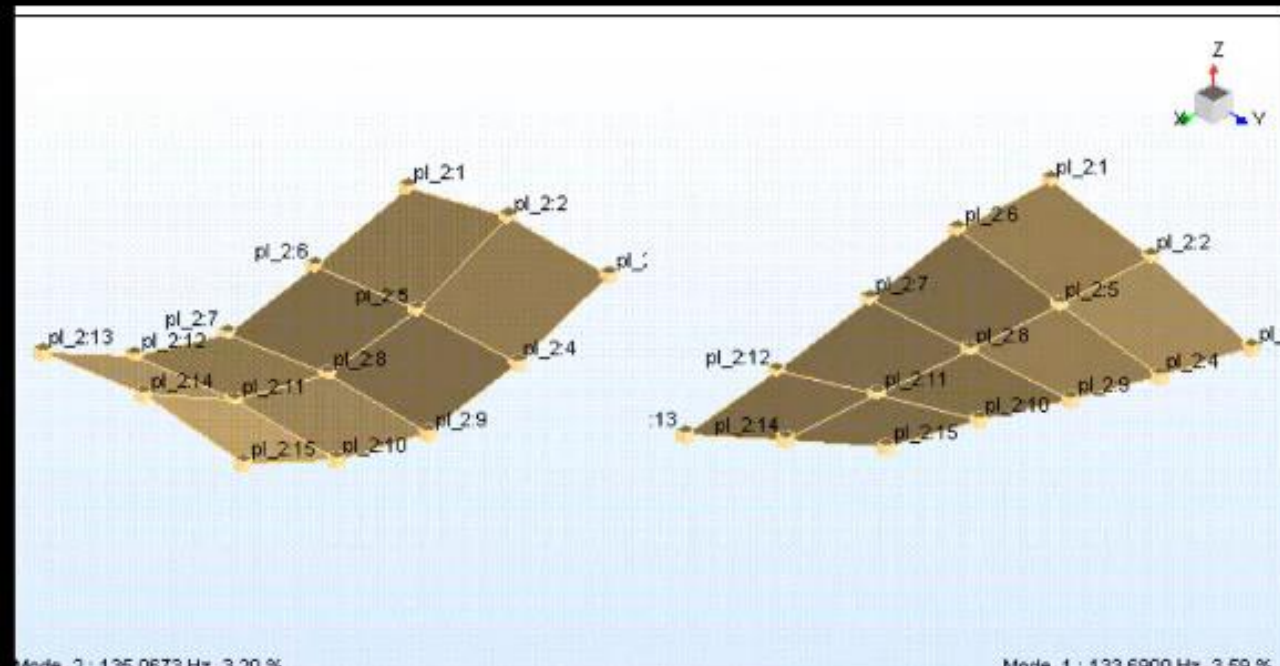
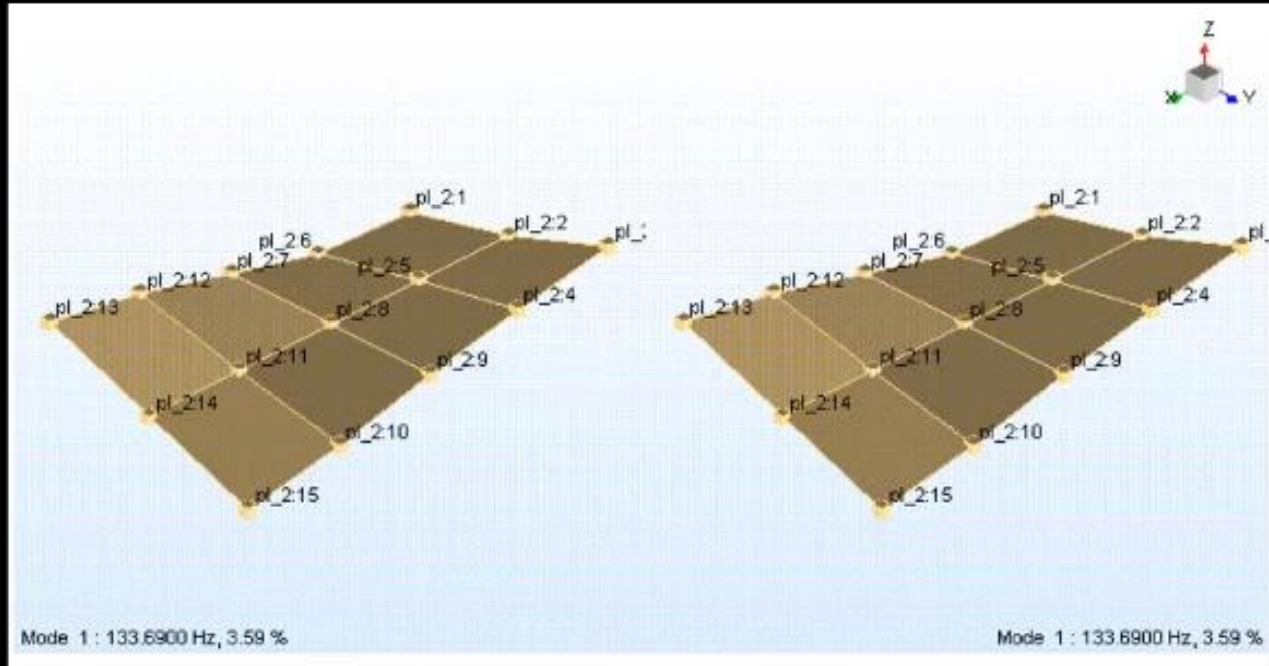
### AutoMAC

Modal Güvence Kriteri Analizi (MAC) analizi, iki modlu şekillerin benzerliğini belirlemek için kullanılır. MAC numarası, iki mod şekli arasındaki tutarlılık derecesini ifade eden, 0 ile 1 arasında bir skaler sabit olarak tanımlanır.



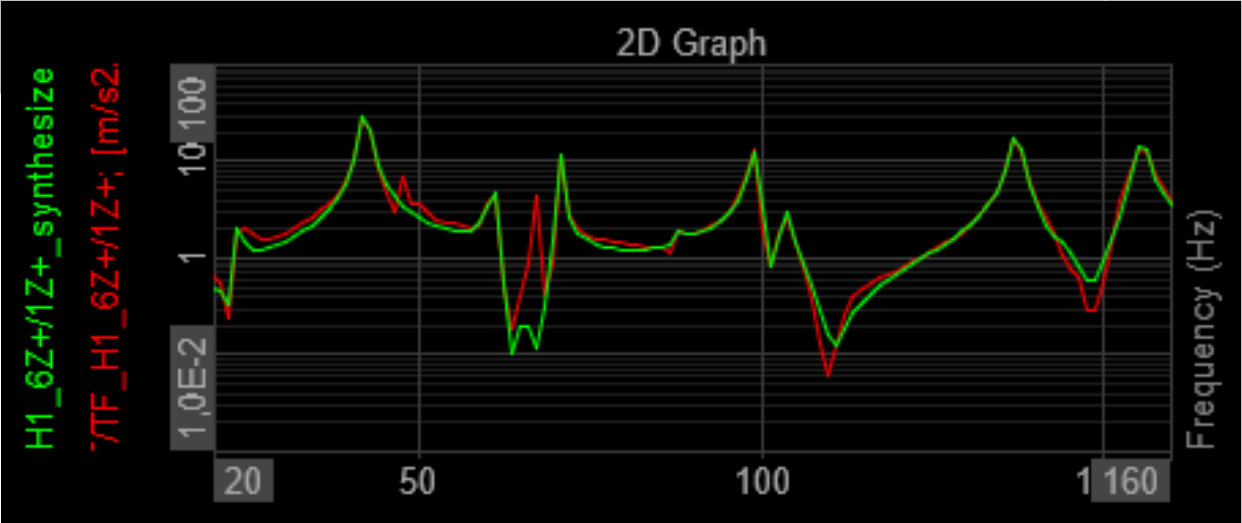
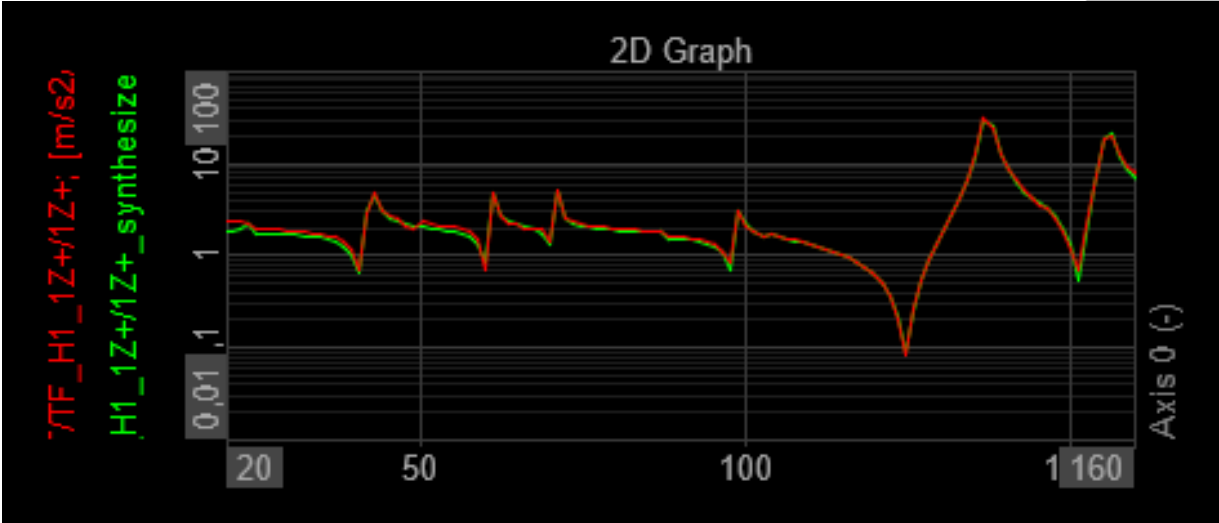
# Modal Analiz Sonuçları

AutoMAC



# Modal Analiz Sonuçları

Curve Fitting



# Modal Analiz Sonuçları

## Complexity Plot





M  
R  
C

# Mühendislik

Dinlediğiniz için teşekkürler..