

Onur Özgelen Aselsan A.Ş.  
HBT/MTD, Mekanik Tasarım Müdürlüğü,  
Ankara, TürkiyeGökhan Osman Özgen\* Ortadoğu Teknik Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi, Makine Müh. Bölümü,  
Ankara, Türkiye.**Makale Bilgisi:**

Araştırma Makalesi

Gönderilme: 3 Eylül 2024

Kabul: 5 Kasım 2024

\*Sorumlu Yazar: Gökhan Osman Özgen

Email: gozgen@metu.edu.tr

DOI: <https://doi.org/10.56193/matim.1542920>

# Mekanik Sistemlerin Titreşim Özelliklerinin Deneysel Olarak Elde Edilebileceği Bir Modal Analiz Yazılımı Geliştirilmesi

Bu makalede, mekanik sistemlerin modal parametrelerini deneysel olarak tanımlamak amacıyla geliştirilen bir yazılımın teorik altyapısı ve mimarisi anlatılmış ve doğrulama amaçlı olarak tanımlanan iki durum çalışması için yazılımdan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Yazılımın geliştirilmesi kapsamında, literatürde mevcut olan modal parametre tanımlama teknikleri araştırılmış ve aralarından yaygın olarak kullanılanlar yazılımda kullanılmak üzere seçilmiştir. Tipik bir modal parametre tanımlama yazılımının ne tür özellikleri olduğunun belirlenmesi için mevcut ticari yazılımlar da incelenmiştir. Yazılım geliştirme ortamı olarak Labview seçilmiştir. Labview, diğer programlama tekniklerine göre sunduğu görsel avantajlar ve tam teşekküllü bir modal parametre tanımlama yazılımı geliştirmek için Labview kullanımının yenilikçi bir uygulama olması bakımından tercih edilmiştir. Geliştirilen yazılımın doğru çalıştığını göstermek için, iki farklı durum çalışmasında analitik (sonlu elemanlar analizleriyle) ve deneysel olarak elde edilen frekans tepki fonksiyonları geliştirilen yazılıma girdi olarak verilmiş ve yazılım ile tanımlanan modal parametreler referans modal parametre değerleriyle karşılaştırılarak doğrulama yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel Modal Analiz, Modal Parametre Kestirimi, ModalTanımlama Teknikleri, Eğri Uydurma, Mekanik Titreşimler

## 1. GİRİŞ

Modal analiz gerçek mühendislik uygulamalarında yapıların titreşim davranışını tanımlamak için kullanılan matematiksel bir yöntemdir. Modal parametreler (doğal frekanslar, mod şekilleri, sönümlenme oranları) matematiksel veya deneysel yollarla belirlenebilir. Matematiksel yöntemlerle titreşim davranışının incelenmesi ile ilgili bir çok temel kaynak mevcuttur. Deneysel modal analiz, mekanik sistemlerin titreşim davranışının modal frekanslar, sönümlenme oranları ve modal vektörlerinin deneysel olarak elde edilen frekans tepki fonksiyonlarından yararlanarak tespit edilmesidir. Bu konuyla ilgili temel kaynaklara literatürden ulaşmak mümkündür([1], [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8]). Modal parametreler, frekans veya

zaman tabanlı frekans tepki fonksiyonları kullanılarak bulunur. Modal parametreler temelde, deneysel olarak elde edilen karakteristik titreşim fonksiyonlarına (frekans tepki fonksiyonlarına) eğri uydurma tekniği kullanılarak bulunur. Oturtulan eğrilerin dayandığı matematiksel ilişkiler, çok serbestli sistemlerin titreşim davranışının modal parametreler cinsinden elde edildiği teorik ilişkilerden elde edilmektedir.

Bu çalışmada, modal parametrelerin, deneysel olarak elde edilmiş frekans tepki fonksiyonları kullanarak elde edileceği bir yazılım geliştirmesi hedeflenmiştir. Ticari ürünler olarak farklı deneysel modal analiz yazılımları mevcuttur; fakat bu yazılımlar hem yüksek ücretlerle satılmaktadır hem

de Türkiye özelinde yabancı firmalardan ithal edilerek satın alınmaktadır.

Ticari yazılımlar arasında LMS, ME'scopeVES, ve Brüel & Kjaer Pulse bulunmaktadır. LMS yazılımı, deneysel modal analiz yöntemlerini uygulamak ve modal parametreleri elde etmek için kullanılabilecek çok gelişmiş araçlara ve özelliklere sahiptir. Literatürde sadece kendine ait olan PolyMAX isimli tahminci algoritmasından da yararlanmaktadır. PolyMAX algoritması çok temiz kararlılık diyagramları elde etme ve yüksek sönümlenmeli sistemleri de tespit edebilme özelliklerine sahiptir. Yazılım, kullanıcı tecrübesine ihtiyaç olmadan otomatik olarak modal frekansları tanımlayıp seçebilme kabiliyetine sahiptir. Bir diğer yazılım ME'scopeVES, mekanik yapıların titreşim problemlerini analiz edebilme özelliklerine sahiptir. ME'scopeVES frekans tepki fonksiyonu (FRF) bazlı ve operasyonel modal analiz gerçekleştirebilme kabiliyetlerine sahiptir. Aynı zamanda titreşim-akustik analizleri ve dinamik modelleme/simülasyonlar gerçekleştirilebilmektedir. Diğer ticari yazılımlarda da olduğu gibi birbirine yakın modlar (çoklu modlar) çoklu referanslı modal analiz yöntemleri kullanılarak tespit edilebilmektedir. İncelenen bir diğer gelişmiş yazılım Brüel & Kjaer tarafından geliştirilen Pulse analiz platformudur. Brüel & Kjaer, LMS yazılımı gibi otomatik mod seçici opsiyonuna sahiptir. Yazılım çok çeşitli tekli veya çoklu serbestlik dereceli tek giriş-tek çıkışlı, tek giriş-çoklu çıkışlı ve çoklu giriş-çoklu çıkışlı eğri uydurma algoritmaları seçeneklerine sahiptir. Aynı zamanda gelişmiş ölçüm doğrulama ve raporlama özelliklerine de sahiptir. Son olarak, ticari yazılımların çoğunda modal analiz kapsamında incelenen yapıların geometrilerinin oluşturulması ve düzenlenmesi konusunda gelişmiş araçların ve özelliklerinin de mevcut olduğunu da belirtmek gerekir.

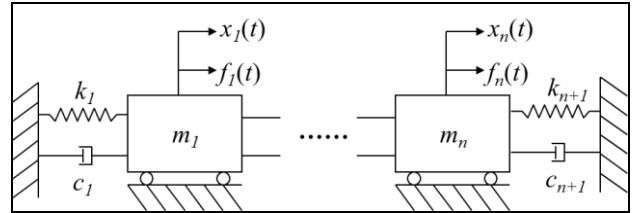
Ulusal literatürde, mekanik yapıların titreşim özelliklerinin karakterizasyonuna yönelik çalışmalar bulunsun da [9], deneysel modal analiz gerektiren durumlarda çoğunlukla ticari yazılımların kullanıldığı görülmektedir ([10],[11],[12],[13]). Deneysel modal analiz uygulamalarının özel veya genel amaçlı yapılabilmesi konusunda tecrübe kazanmak ve yakın gelecekte ulusal kaynaklarla geliştirilebilecek modal analiz yazılımları üzerine çalışmalara yönlendirici olması açısından bu makalede sunulan yazılım geliştirme ve doğrulama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Makalenin devamında önce modal analiz teorisi ve deneysel modal analizin temelini oluşturulan modal parametre tanımlama yöntemleri verilmiş ve bunu takiben geliştirilen yazılımın mimarisi ve işlevsel özellikleri örnek sonuçlar ve görseller üzerinden verilmiştir. Makalenin son kısmında, geliştirilen deneysel modal

analiz yazılımının doğrulaması iki durum çalışması (senaryosu) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryoda, basit bir mekanik sistemin modal parametreleri (mod şekilleri ve modal frekans ve sönümlenme oranları) sonlu elemanlar analizleri ile elde edilmiş, yine aynı model kullanılan analizlerden elde edilmiş frekans tepki fonksiyonları geliştirilen deneysel modal analiz yazılımına girildi olarak girilmiş ve son aşamada geliştirilen yazılımda bulunan tüm modal parametre tanımlama yöntemleri ile modal parametreler elde edilmiştir. Yazılım sonuçları ve sonlu elemanlar sonuçları daha sonra karşılaştırılmıştır. İkinci senaryoda ise ilk senaryodan farklı bir mekanik yapının - bu sefer - gerçek deneylerden elde edilen frekans tepki fonksiyonları kullanılarak modal parametreler geliştirilen yazılımla elde edilmiş ve bu sonuçlar incelenen hazır ticari yazılımlardan bir tanesi kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak geliştirilen deneysel modal analiz yazılımının nihai doğrulaması yapılmıştır.

## 2. MODAL ANALİZ TEORİSİ

Çok serbestlik dereceli sistemlerin mekanik titreşimlerinin incelenmesinde Şekil 1'de verilen model kullanılabilir. Bu model için hareket denklemleri aşağıda verilen matris denklemleri ile ifade edilebilir.

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (1)$$



Şekil 1. Çok serbestlik dereceli sistem modeli

Burada  $[M]$  atalet matrisini,  $[C]$  viskoz sönümlenme matrisini,  $[K]$  direnç matrisini ifade etmektedir.  $\{x\}$  ve  $\{f\}$  yer değiştirme tepkisi ve kuvvet vektörleridir. Denklemin homojen (serbest titreşim) çözümü için aşağıdaki çözümün var olduğu kabul edilebilir:

$$\{x\} = \{B\}e^{st} \quad (2)$$

Burada  $\{B\}$  ve  $s$  homojen sonucun bulunması işlemi sonunda elde edilmesi gereken parametrelerdir. Hareket denklemleri için varsayılan çözüm kullanıldığında, karmaşık özdeğer problemi olarak aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$[s^2[M] + s[C] + [K]]\{x\} = \{0\} \quad (3)$$

Denklem 3'ün çözülmesi sonrasında özdeğerler ve özvektörler aşağıdaki gibi bulunabilir:

$$\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$$

$$\left\{ \begin{matrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_N \end{matrix} \right\}_1, \dots, \left\{ \begin{matrix} \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_N \end{matrix} \right\}_N \quad (4)$$

Burada  $\lambda_r$ ,  $r$  numaralı mod için karmaşık sönümlü doğal frekanstır;  $N$  sistem serbestlik derecesidir. Mod numarası  $r$  için karmaşık sönümlü doğal frekansı aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$\lambda_r = \sigma_r + j\omega_r \quad (5)$$

Burada  $\sigma_r$ ,  $r$  numaralı mod için sönüleme katsayısını;  $\omega_r$ ,  $r$  numaralı mod için sönümlü doğal frekansı, ve  $j$ , sanal birim sayısını ifade etmektedir. Frekans tepki fonksiyonu matrisi, özvektörler, özdeğerler ve frekans  $\omega$  cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir ([2],[3],[8]):

$$[H(\omega)] = \sum_{r=1}^N \left( \frac{Q_r \{\psi\}_r \{\psi\}_r^T}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{Q_r \{\psi\}_r^* \{\psi\}_r^{*T}}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right) \quad (6)$$

Burada  $Q_r$ ,  $r$  numaralı mod için ölçek katsayısını;  $\{\psi\}_r$ ,  $r$  numaralı mod için özvektörü ifade etmektedir. Denklem 6, çok serbestlik dereceli sistemlerin titreşim davranışının modal parametreler cinsinden ifade edilmesine imkan vermektedir ve modal analiz teorisinin temel ilişkilerinden biridir. Deneysel modal analiz yöntemleri bu denklemin fonksiyonel formu üzerinden geliştirilebilir.

### 3. DENEYSEL MODAL ANALİZ: MODAL PARAMETRE TANIMLAMA YÖNTEMLERİ

Deneysel modal analiz, fiziksel sistemlerin modal frekanslarının, modal vektörlerinin, modal sönüleme oranlarının, modal atalet ve modal direngenliklerinin deneysel olarak elde edilmiş frekans tepki fonksiyonlarına Denklem 6'daki matematiksel ifadelerin eğri oturtma yöntemi ile uygulanmasıyla elde edilmesi işlemine verilen genel isimdir. Deneysel modal analiz farklı amaçlar için gerçekleştirilir. Bunlar:

- 1) Matematiksel modellerin doğrulanması
- 2) Deneysel parametreler cinsinden model oluşturulması
- 3) Titreşim problemlerinin teşhis ve çözümüne yönelik çalışmalar

Deneysel modal analiz iki aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar frekans tepki fonksiyonlarının deneysel veriler kullanılarak hesaplanması (bu işleme modal veri toplama da denilmektedir) ve modal parametrelerin kestirimidir. Bu makalede sunulan çalışmada, modal parametrelerin kestirimine yönelik yaygın olarak kullanılan yöntemler seçilerek, özel hazırlanmış bir yazılım üzerinden bu yöntemlerin uygulanacağı bir platform geliştirilmiştir. Frekans tepki fonksiyonlarının deneysel olarak elde edilmesine yönelik yöntemler ve teorik altyapı bu makalede verilmemiştir ama istenilirse bu konuda bir çok kaynak literatürde mevcuttur ([14],[15],[16],[17],[18],[19],[20],[21]).

Modal parametrelerin kestirimi, temelde iki tip karakteristik fonksiyon kullanılarak yapılır. Bunlar frekans tepki fonksiyonları ve dürtü tepki fonksiyonlarıdır. Dürtü tepki fonksiyonları, frekans tepki fonksiyonlarının ters Fourier dönüşümü ile edilmektedir. Bu fonksiyonların aşağıda verilmiş matematiksel formları modal parametre kestirim yöntemlerinin temel çıkış noktalarını oluşturur ([3],[8],[14]):

$$[H(\omega)] = \sum_{r=1}^N \frac{[A]_r}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{[A^*]_r}{(j\omega - \lambda_r^*)} \quad (7)$$

$$[h(t)] = \sum_{r=1}^N [A]_r e^{\lambda_r t} + [A^*]_r e^{\lambda_r^* t} \quad (8)$$

Burada  $N$ , mod sayısını;  $[A]_r$ ,  $r$  numaralı mod için artık matrisi;  $\lambda_r$ ,  $r$  numaralı mod için kutup noktasını (veya karmaşık sönümlü doğal frekansı) ifade etmektedir. Bir çok modal parametre kestirim yöntemi, frekans tepki fonksiyonlarının frekansa bağlı polinomlar cinsinden ifade edildiği denklemlerdeki bilinmeyen katsayıların eğri oturtma yöntemleri ile elde edilmesi temeline dayanır. Örneğin, tek bir girdi ve tek bir tepki serbestlik derecesi arasında ölçülen frekans tepki fonksiyonu için bu tarz bir matematiksel form aşağıda verilmiştir ([14]):

$$H_{pq}(\omega) = \frac{X(\omega)}{F(\omega)} = \frac{\beta_{2N-2}(j\omega)^{2N-2} + \beta_{2N-1}(j\omega)^{2N-1} + \dots + \beta_1(j\omega)^1 + \beta_0(j\omega)^0}{\alpha_{2N}(j\omega)^{2N} + \alpha_{2N-1}(j\omega)^{2N-1} + \dots + \alpha_1(j\omega)^1 + \alpha_0(j\omega)^0} \quad (9)$$

Burada  $p$  girdi serbestlik derecesinin indisi,  $q$  tepki serbestlik derecesinin indisi,  $N$  kestirimi yapılması hedeflenen mod sayısı,  $\beta$  ve  $\alpha$  da polinom katsayılarıdır. Çok girdili ve çok tepkili frekans tepki fonksiyonu formülizasyonu aşağıdaki gibidir ([14]):

$$\sum_{k=0}^{2N} [\alpha_k] (j\omega)^k [H(\omega)] = \sum_{k=0}^{2N-2} [\beta_k] (j\omega)^k [I]_0$$

Burada  $[I]$  birim matrisidir. Denklem 9 veya Denklem 10 kullanılarak elde edilen polinom katsayılarından frekans tepki fonksiyonlarının orjinal denklemlerindeki (Denklem 7) modal parametreler elde edilerek modal parametre kestirimi yapılabilmektedir. Farklı yöntemler, bu işlemi farklı şekilde gerçekleştirmektedir. Benzer bir prosedür dürtü (impulse) tepki fonksiyonu tabanlı yöntemler için de tanımlanabilir. Bu çalışma kapsamında seçilen algoritmaların karşılaştırma tablosu Tablo 1'de verilmiştir. Tablo 1'de verilen  $p$  terimi girdi serbestlik derecesinin indisi,  $q$  terimi ise tepki serbestlik derecesinin indisidir.

### 3.1. Rasyonel Kesirli Polinom Yöntemi (Rational Fractional Polynomial-RFP)

Popüler ve en sık kullanılan frekans ve zaman tabanlı yöntemler geliştirilecek yazılımda uygulanmak üzere seçilmiştir. İlk seçilen yöntem frekans tabanlı tek girdi-tek çıktılı çok serbest dereceli sistemleri çözen Rasyonel Kesirli Polinom (Rational Fractional Polynomial - RFP)

yöntemidir([15]). Bu yöntem temelde, rasyonel kesirle ifade edilen frekans tepki fonksiyonu (oturtulan eğri ve ölçülen frekans tepki fonksiyonları arasındaki farkı ifade etmek) için bir hata fonksiyonu tanımlanması ve bu hata fonksiyonunun en aza indirgenmesi prensibine dayanmaktadır. Aşağıda verilen hata fonksiyonunu en düşük değere indiren polinom katsayıları modal parametreleri bulmamızı sağlamaktadır ([15]):

$$[H(s)] = \frac{\sum_{k=0}^{2N-1} \alpha_k (s)^k}{\sum_{k=0}^{2N} \beta_k (s)^k} \quad (11)$$

Burada  $[H(s)]$ , frekans sonuç tepki fonksiyonunu;  $\alpha$  ve  $\beta$ , pay ve payda polinom katsayılarını;  $s$  Laplace değişkenini ifade etmektedir.

### 3.2. Global Rasyonel Kesirli Polinom Yöntemi (The Global Rational Fractional Polynomial Method-GRFP)

RFP yönteminin The Global Rational Fractional Polynomial Method (GRFP) adı verilen çoklu çıktı sistemleri çözen versiyonu da mevcuttur. Yöntemin tüm aşamaları [16] ve [17] numaralı kaynaklarda verilmiştir. Yöntemin RFP'den ana farkı birden fazla frekans sonuç tepki fonksiyonu kullanması ve sistemin tüm verisini kullanarak modal parametreleri bulmasıdır.

Tablo 1. Seçilen modal parametre kestirim yöntemlerinin karşılaştırma tablosu

| Algoritma   | Taban   |       | Çalıştığı Frekans Tepki Fonksiyon Sayısı |              |
|---|---------|-------|--|--------------|
|   | Frekans | Zaman | Skalar                                   | Matriks      |
| Rasyonel Kesirli Polinom (Rational Fractional Polynomial-RFP) ([15])                                | •       |       | •  |              |
| Global Rasyonel Kesirli Polinom (The Global Rational Fractional Polynomial Method-GRFP)([16], [17]) | •       |       | •  |              |
| Çoklu Referans Frekans Taban Yöntemi (The Polyreference Frequency Domain Method-PFD)([18])          | •       |       |  | $p \times p$ |
| Kompleks Üstel Yöntemi (Complex Exponential-CE) ([19])  |         | •     | •  |              |
| En Az Kare Kompleks Üstel Yöntemi (Least Squares Complex Exponential-LSCE) ([6])                    |         | •     | •  |              |
| Ibrahim Zaman Taban Yöntemi (Ibrahim's Time domain-ITD) ([20])                                      |         | •     |  | $p \times p$ |
| Çoklu Referans Zaman Taban Yöntemi (Polyreference Time Domain-PTD)([22],[23],[24])                  |         | •     |  | $q \times q$ |
| Özsistem Gerçekleşme Algoritması (Eigensystem Realization Algorithm-ERA) ([21])                     |         | •     |  | $p \times p$ |

### 3.3. Çoklu Referans Frekans Taban Yöntemi (The Polyreference Frequency Domain Method-PFD)

GRFP yöntemine ek olarak çoklu giriş-çıkışlı sistemleri çözebilen frekans tabanlı Çoklu Referans Frekans Taban Yöntemi (The Polyreference Frequency Domain Method (PFD)) yöntemi mevcuttur ([18]).Yöntem hareketli mekanik bir sistemin ikinci dereceden differansiyel denkleminin durum uzay versiyonundan türetilmiştir.

### 3.4. Kompleks Üstel Yöntemi (Complex Exponential-CE)

Zaman tabanlı tek giriş-tek çıkışlı sistemleri çözen ve geliştirilen yazılım için seçilen ilk yöntem kompleks üstel(Complex Exponential (CE)) yöntemidir ([19]). Aynı yöntemin tek giriş-çok çıkışlı sistemleri çözen versiyonu En Az Kare Kompleks Üstel Yöntemi (Least Squares Complex Exponential (LSCE)) da mevcuttur ([6]). İki metodun tek farkı çözümde ikincide birden fazla zaman sonuç fonksiyonundan yararlanılmasıdır. Çok girişli-çok çıkışlı sistemleri çözen versiyonu da Çoklu Referans Zaman Taban Yöntemi(Polyreference Time Domain (PTD))'dir([22],[23],[24]).

### 3.5. İbrahim Zaman Taban Yöntemi (İbrahim's Time domain-ITD)

İbrahim Zaman Tabanı Yöntemi (İbrahim's Time domain (ITD)) ([20]), hareketli mekanik bir sistemin ikinci dereceden differansiyel denkleminin durum uzay versiyonunun kütle matrisinin tersiyle çarpılmasından türetilmiştir. Serbest bozunma durumu düşünüldüğünde, denklem özdeğer probleminde dönüşmektedir. Denklem özdeğer ve özvektörleri sistemin modal parametrelerini vermektedir.

### 3.6. Özsistem Gerçekleşme Algoritması (Eigensystem Realization Algorithm-ERA)

Son olarak çoklu giriş-çoklu çıkışlı sistemler için zaman tabanlı yöntem olarak Özsistem Gerçekleşme Algoritması (Eigensystem Realization Algorithm (ERA)) seçilmiştir ([21]).Yöntem, temelde tekil değer ayrıştırma prensibine dayanmaktadır. Tekil değer ayrıştırmaya sokulan matrisler Hankel matrisinden elde edilmektedir. Modal parametreler, realize edilmiş matrislerin özdeğer denkleminde elde edilmektedir.

## 4. YAZILIM MİMARİSİ

Geliştirilen yazılımın mimarisini ve sahip olduğu özellikleri ve işlevleri oluşturmak ve

belirlemek için yaygın olarak kullanılan ticari yazılımlar incelenmiştir. Bu yazılımlar LMS, ME'scopeVES, Brüel & Kjaer ve STAR Modal yazılımlarıdır. Bunlara ek olarak Cincinnati Üniversitesi Yapısal Dinamik Laboratuvarı tarafından geliştirilen X-Modal II yazılımı da incelenmiştir. Bu ticari yazılımlarda testlerden elde edilen ham verilerin işlenmesiyle de ilgili araçlar mevcuttur.

Ticari yazılımların sahip olduğu özellikler ışığında bu çalışma kapsamında geliştirilecek yazılımın ana özellikleri belirlenmiştir. İncelenen yazılımlar ve ortak özellikleri değerlendirildiğinde, bir modal analiz yazılımının asgari olarak sahip olması gereken özellikler aşağıdaki gibi listenebilir:

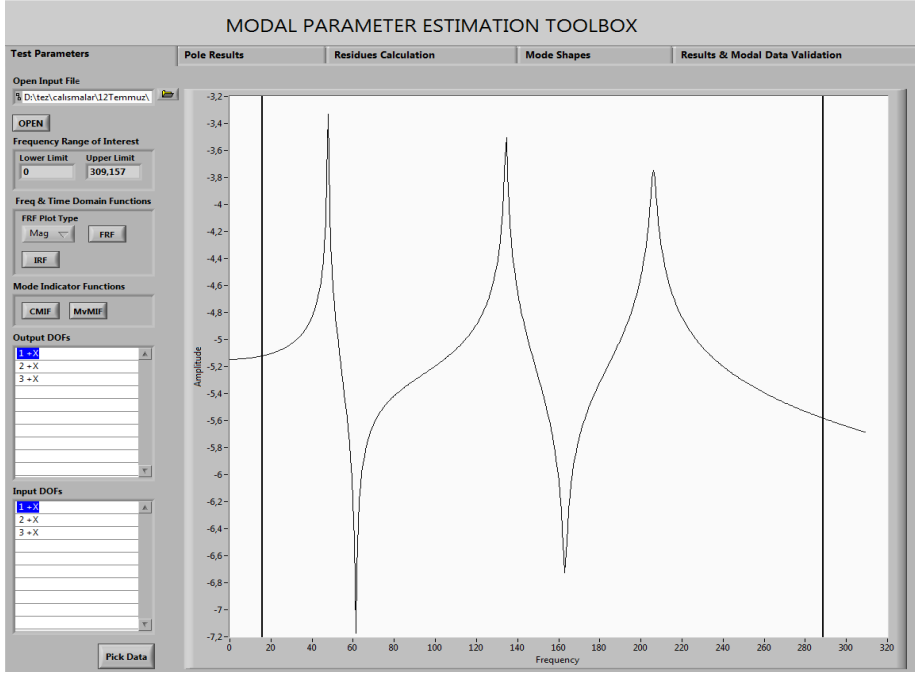
- Mod gösterici fonksiyonlar (Mode Indicator Function) çizme
- Tek veya çoklu serbestlik dereceli tek giriş-tek çıkışlı, tek giriş-çoklu çıkışlı ve çoklu giriş-çoklu çıkışlı eğri uydurma algoritmaları içermesi
- Mod seçimi için kararlılık diyagramı (Stability Diagram) çizme
- Seçilen modun doğruluğuna karar veren analiz yöntemleri barındırma

Labview kullanılarak geliştirilen yazılım beş sekmeden oluşmaktadır. Her sekme modal analiz sürecinin aşamalarından meydana gelmektedir. Bu bölümün devamında, her sekmenin kullanımı ve işlevi tanıtılacaktır.

### 4.1. Test Parametreleri Sekmesi

Yazılım, modal analiz uygulamalarında modal analizlerde kullanılacak titreşim testi verileri için ortak bir dil olarak geliştirilen evrensel dosya formatını okuyabilmektedir ([25]). Bu sekmede kullanıcı öncelikle evrensel dosya formatı dilindeki giriş dosyasını açmalıdır. Kullanıcı bu dosyayı açtığında yapının giriş-çıkış serbestlik derecelerinin frekans sonuç fonksiyonlarını görecektir.

Bu sekmenin konulmasının amacı titreşim testinden elde edilen frekans sonuç fonksiyonlarıyla ilgili kullanıcıya görsel aşinalık kazandırmaktır. Kullanıcı bu sekmede, analizde kullanmak istediği frekans aralığını ve hangi frekans tepki fonksiyonlarını tanımlamaya dahil etmek istediğini seçebilmektedir. Kullanıcı bu sekmede ek olarak,yapıdaki mod sayısı ile ilgili kullanıcıya ön bilgi veren mod gösterici fonksiyonlarını çizdirebilmektedir. Şekil 2'de, bahsedilen özelliklerin nasıl bir menüyle sunulduğu görülebilmektedir.



Şekil 2. Test parametreleri sekmesi

#### 4.1.1. Mod Gösterici Fonksiyonlar (Mode Indicator Functions)

Mod gösterici fonksiyonlar sistemin içerdiği bütün modal frekansları lokal maksimum veya minimum noktalarla işaret eden fonksiyonlardır. Genellikle kolaylıkla teşhis edilemeyen yakın tekrarlı modları tanımlamak için kullanılırlar. Sistemden deneysel olarak elde edilen bütün frekans tepki fonksiyonları bu fonksiyonların hesaplamalarında kullanılırlar çünkü deneysel olarak elde edilen her bir frekans tepki fonksiyonunda mekanik bir sisteme ait bütün modların bilgisi her zaman açık olarak görülememektedir.

##### 4.1.1.1. Çok Değişkenli Mod Gösterici Fonksiyonu (Multivariate Mode Indicator Function-MvMIF)

Çok Değişkenli Mod Gösterici Fonksiyonu doğal frekansları lokal minimum noktaları olarak göstermektedir. Çok Değişkenli Mod Gösterici Fonksiyonu, frekans tepki fonksiyonunun rezonans noktalarında gerçek (reel) kısmı değerleri sıfıra çok yakın olduğunda verimli bir şekilde çalışmaktadır. Sistemde kompleks modlar mevcutsa çok doğru sonuçlar vermeyebilir çünkü Çok Değişkenli Mod Gösterici Fonksiyonu ilgilenilen frekans aralığında modları tahrik edebilecek bir kuvvet vektörü bulma prensibine dayanmaktadır. Rezonans noktalarında frekans tepki fonksiyonlarının gerçek kısmının sanal kısmına oranla çok küçük bir değer olduğu kabul edildiği için, bu olgu bizi aşağıda formülasyonu

verilen özdeğer ve özvektörleri bulmamızı sağlayan minimizasyon problemine götürmektedir [26]:

$$[H_{real}]^T [H_{real}] \{F\} = \lambda \left( [H_{real}]^T [H_{real}] + [H_{imag}]^T [H_{imag}] \right) \{F\} \quad (12)$$

Burada  $H_{real}$  ve  $H_{imag}$ , frekans tepki fonksiyonunun gerçek ve sanal kısımlarını;  $F$ , kuvvet vektörünü;  $\lambda$ , özdeğerleri ifade etmektedir. Şekil 3 örnek bir senaryo için Çok Değişkenli Mod Gösterici grafiğini göstermektedir.

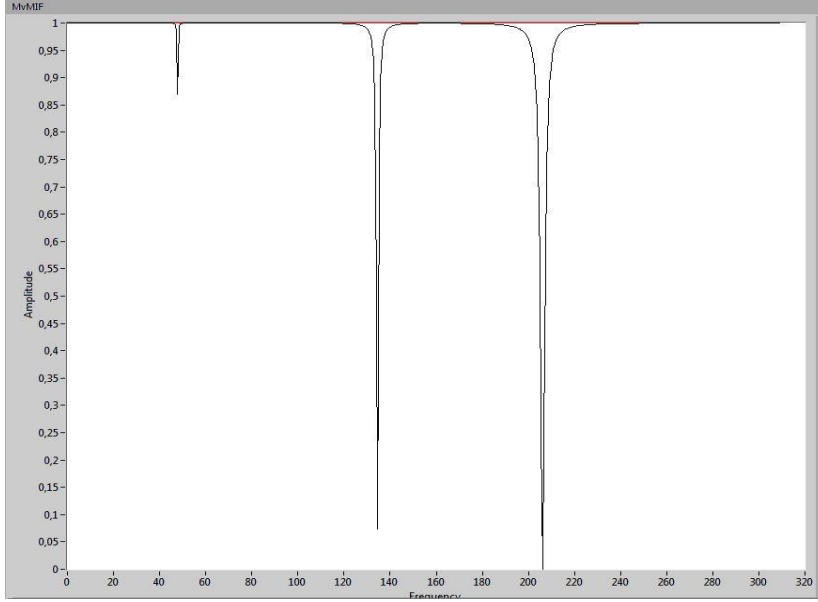
##### 4.1.1.2. Kompleks Mod Gösterici Fonksiyonu (Complex Mode Indicator Function-CMIF)

Kompleks Mod Gösterici Fonksiyonu grafiğinin tepe noktaları, sönümlü doğal frekans noktalarını göstermektedir. Kompleks Mod Gösterici Fonksiyonu sistemin mod şeklini bulmada da kullanılabilir. Kompleks Mod Gösterici Fonksiyonu, modları bulmada tekil değerleri ayrıştırma prensibine dayanmaktadır([27]). Kompleks Mod Gösterici Fonksiyonları birbirine çok yakın tekrarlı modları tanımlayabilme özelliğine de sahiptir ve aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$[H(\omega)] = [U(\omega)] [S(\omega)] [V(\omega)]^T \quad (13)$$

$(N_o \times N_i) \quad (N_o \times N_e) \quad (N_e \times N_i)$

$$CMIF_k(\omega) = \mu_k(\omega) = S_k(\omega)^2 \quad (14)$$



Şekil 3. Çok Değişkenli Mod Gösterici grafiği örneği

Burada  $N_o$ , tepki serbestlik derecesi sayısını;  $N_i$ , girdi serbestlik derecesi sayısını;  $N_e$ , etkili mod sayısını;  $U(\omega)$ , mod şekil vektörlerinin sol tekil matriksini;  $S(\omega)$ , tekil değer matriksini;  $V(\omega)$ , mod şekil vektörlerinin sağ tekil matriksini;  $CMIF_k(\omega)$ , frekansa bağlı fonksiyon olarak k numaralı CMIF fonksiyon değerini;  $\mu_k(\omega)$ , k numaralı özdeğeri;  $S_k(\omega)$ , frekansa bağlı k numaralı tekil değeri ifade etmektedir. Şekil 4 örnek bir durum için Kompleks Mod Gösterici Fonksiyonu grafiğini göstermektedir.

#### 4.2. Kutup Sonuçları Sekmesi

Kullanıcı bu sekmede, kullanacağı yöntemi seçmekte ve o yöntemle ilgili gerekli parametreleri girmektedir. Kullanıcı daha sonra kararlılık diyagramını çizdirmektedir. Çizdirilen kararlılık diyagramı üstündeki kutup belirleyici imlecinden yararlanarak modlara ait frekansları seçebilmektedir. Yanlışlıkla seçilen veya istemediği sonuçları silebilmektedir(Şekil 5).

Kararlılık diyagramı sonuçları bir önceki iterasyonlardan gelen modal parametre sonuçlarının bir sonraki iterasyon sonuçlarıyla kıyaslanmasından elde edilmektedir. Kullanıcı açılır-pencere kullanarak parametrelerin kıyaslanma kriterlerini de değiştirebilmektedir(Şekil 6).

#### 4.3. Artık (Residue) Terimleri Hesaplama Sekmesi

Mod frekansları tespiti sonrası frekans sonuç fonksiyonlarını yeniden sentezlerken tanımlanan mod

frekanslarından uzakta kalan düşük ve yüksek frekanslar tarafından domine edilen artık terimler de hesaba katılır. Kullanıcı bu sekmede, kullandığı yöntemi seçmekte ve yöntemden elde edilen sonuçlara göre ilgili frekans sonuç fonksiyonlarını yeniden sentezleyebilmektedir. Bu sentezlemeyi yaparken kalan terimleri dahil edip etmemek istediğini seçmektedir (Şekil 7).

#### 4.4. Mod Şekilleri Sekmesi

Kullanıcı bu sekmede, yapının mod şekillerini ilgili yöntemin sonuçlarına göre çizdirebilmektedir. Kullanıcı ayrıca mod şekillerinin animasyonunu da oynatabilmektedir (bkz. Şekil 8).

#### 4.5. Sonuçlar & Modal Veri Doğrulama Sekmesi

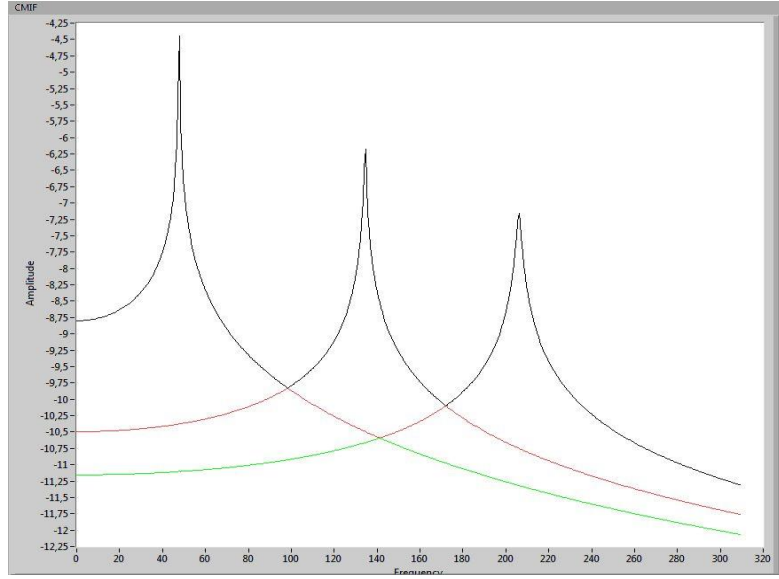
Kullanıcı bu sekmede, bütün yöntemlerden elde ettiği modal frekans ve sönümlenme katsayısı sonuçlarını tablo halinde listeyebilmekte ve sonuçları arasında Mod Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion-MAC) grafiği çizdirip sonuçların doğruluğunu (elde edilen modların birbirinden farklı bağımsız modlar olup olmadığını) değerlendirmektedir (bkz. Şekil 9). Mod Güvence Kriteri (Modal Assurance Criterion-MAC) iki mod vektörü arasındaki benzerlik derecesini belirlemektedir. Bu kriter aşağıdaki gibi formülize edilmiştir ([3]):

$$MAC = \frac{\left| \left\{ \psi_1^{*r} \right\} \left\{ \psi_2 \right\} \right|^2}{\left| \left\{ \psi_1^{*r} \right\} \left\{ \psi_1 \right\} \right| \left| \left\{ \psi_2^{*r} \right\} \left\{ \psi_2 \right\} \right|} \quad (15)$$

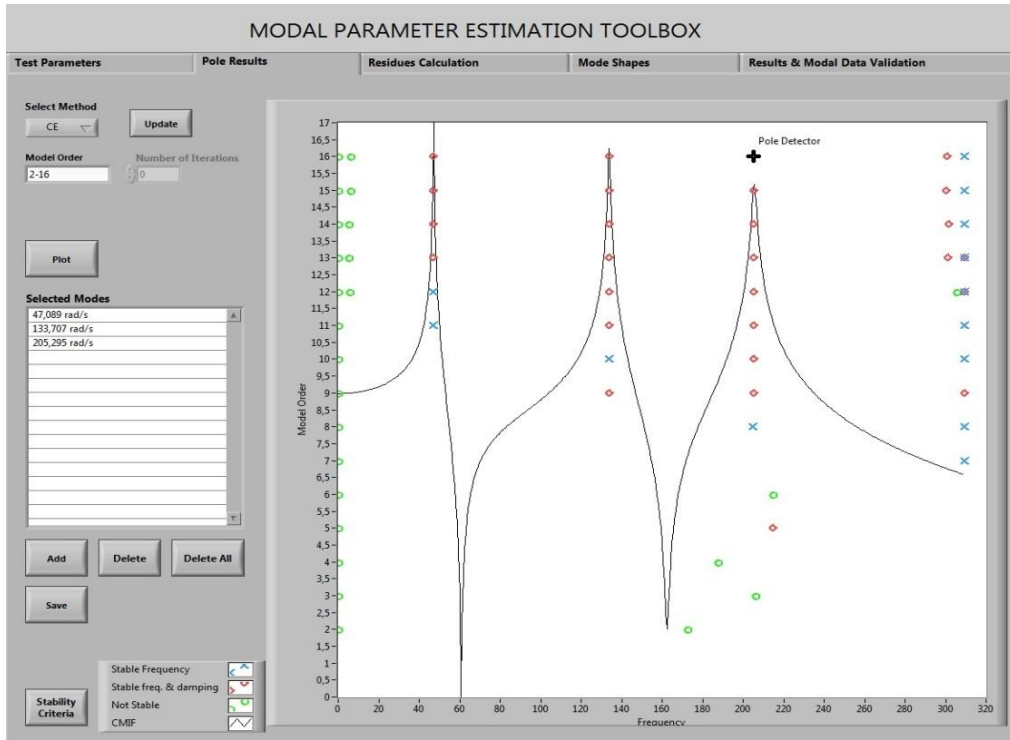


MAC değeri her zaman 0 ve 1 değerleri aralığında çıkar. MAC değerinin bire yakın olması, değişik yöntemlerle elde edilmiş mod şekil vektörlerinin

birbirleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Bu değerın sifıra yakın olması bu ilişkinin azaldığı anlamına gelmektedir.

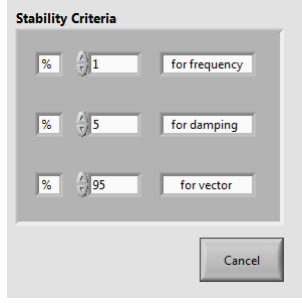


Şekil 4. Kompleks Mod Gösterici Fonksiyon grafiği örneği

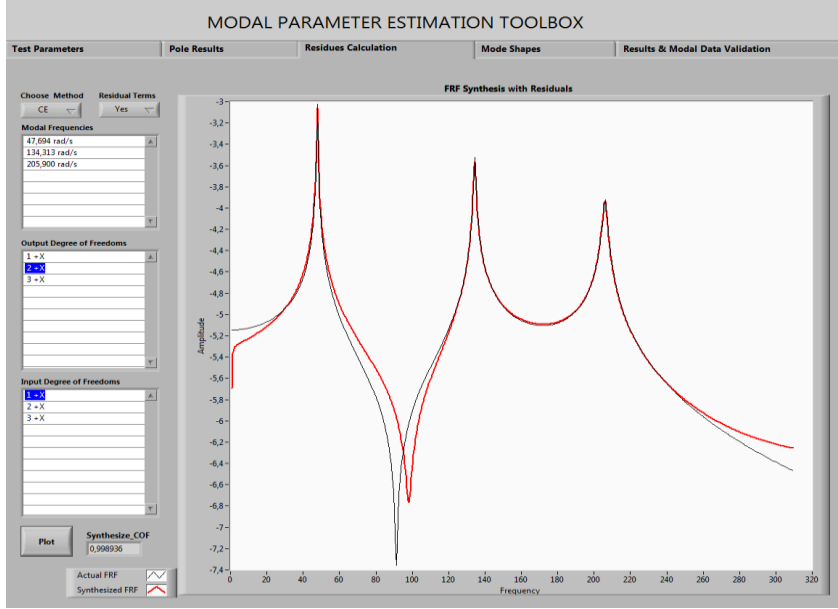


Şekil 5. Kutup sonuçları sekmesi

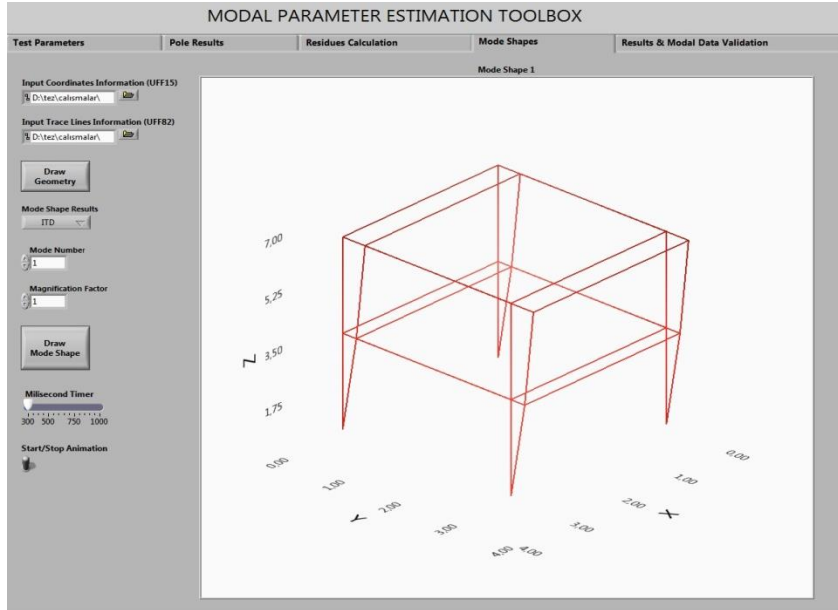




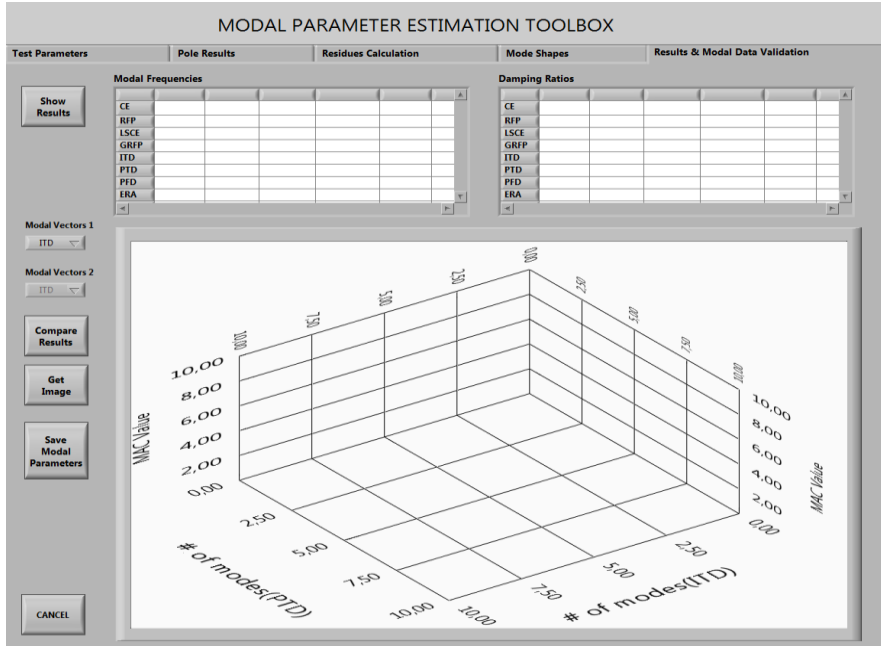
Şekil 6. Kutup sonuçları sekmesinin açılır penceresi



Şekil 7. Artık (residue)terimleri hesaplama sekmesi



Şekil 8. Mod şekilleri sekmesi



Şekil 9. Sonuçlar & modal veri doğrulama sekmesi

## 5. YAZILIMIN DOĞRULANMASI

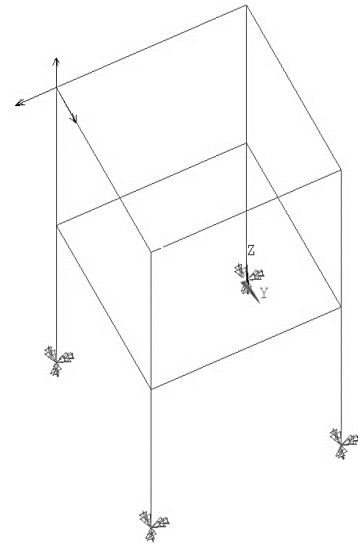
Bu bölümün amacı, geliştirilen yazılımın verdiği sonuçların doğru olup olmadığını göstermektir. Bu amaçla analitik ve deneysel olmak üzere iki durum çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlarının doğruluğundan emin olunan analitik ve deneysel yolla elde edilen frekans tepki fonksiyonlarından elde edilen modal parametre sonuçları (mod frekansı, sönümlenme katsayısı, mod şekilleri) geliştirilen yazılımdan elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve yakın sonuçlar bulunduğu gözlemlenmiştir. Analitik durum çalışmasında basit bir model üzerinden ANSYS yazılımıyla sonlu elemanlar analizi ile elde edilen frekans tepki fonksiyonları kullanılmıştır. Deneysel durum çalışmasında ise Cincinnati Üniversitesi Yapısal Dinamik Laboratuvarında geliştirilen X-Modal II yazılımına girdi sağlamak üzere dairesel bir plakadan elde edilen deneysel frekans tepki fonksiyonları sonuçları kullanılmıştır.

### 5.1. Analitik Durum Çalışması

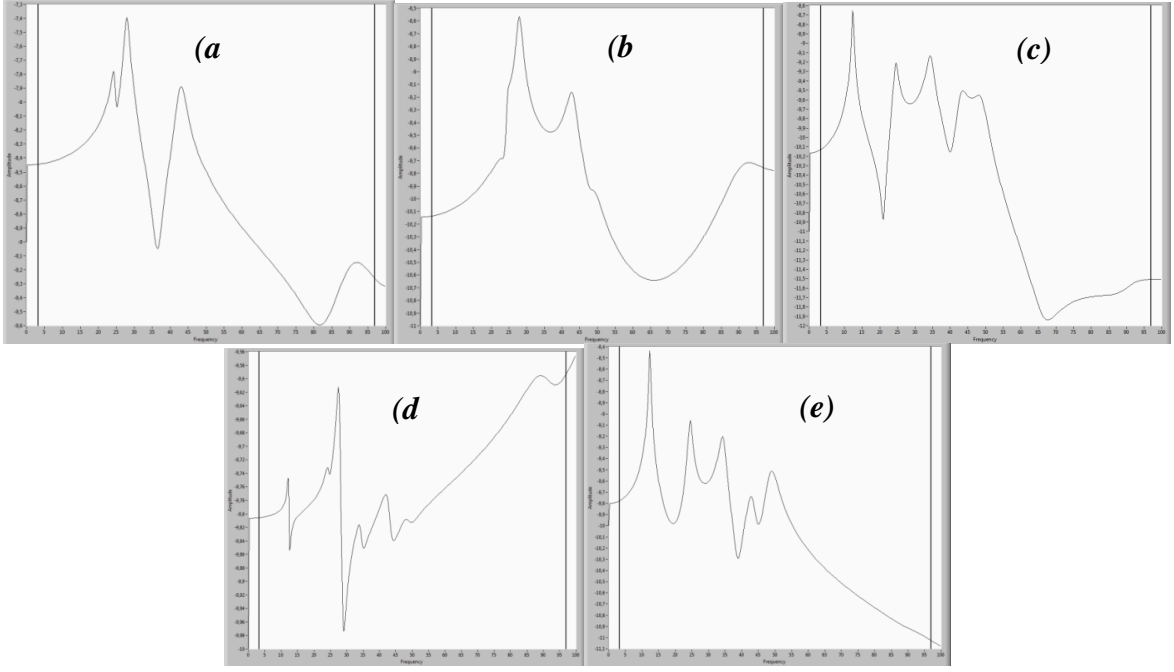
Bu çalışmanın temel göstergesi yazılımın  $x, y$ , ve  $z$  yönlerinde tanımlanan frekans sonuç fonksiyonlarıyla aynı anda çalışabildiğini göstermektir. ANSYS kullanılarak Şekil 10'daki yapı modellenmiştir. Modelde toplam 12 düğüm noktası bulunmaktadır. Bunların 4 tanesinin bütün yer değiştirmeleri sabitlenmiştir. Bütün yönlerde birim kuvvetler tanımlanmış, 8 düğüm noktası için  $x, y$ , ve  $z$  yönlerinde yer değiştirme ve kuvvetler için toplamda  $72(8 \times 3 \times 3)$  frekans tepki fonksiyonu elde edilmiştir. 0-100 rad/s arasındaki frekanslar için sırasıyla modal

ve harmonik analizler ANSYS'te koşturulmuştur. Şekil 11'de değişik düğüm noktaları ve serbestlik dereceleri için elde edilen frekans tepki fonksiyonları geliştirilen yazılımdan alınmış görseller olarak olarak verilmiştir.

İkinci aşamada, analitik olarak oluşturulan frekans tepki fonksiyonları, geliştirilen yazılıma yüklenmiştir. İlk olarak var olan tüm modları tespit edebilmek için mod gösterici fonksiyonlar çizdirilmiştir. Şekil 12 (CMIF) ve Şekil 13 (MvMIF) bu mod gösterici fonksiyonların grafiklerini göstermektedir. Bu grafiklerden, yapıda 0-100 rad/s arasında toplam 7 mod olduğu görülmektedir.



Şekil 10. Model geometrisi



Şekil 11. Örnek frekans tepki fonksiyonları – (a) 11Z-9X, (b) 9X-9X, (c) 8Y-9Z, (d) 4Z-9Z, (e) 9Z-9Y

Geliştirilen yazılımdaki bulunan bütün yöntemler kullanılarak ilgilenilen frekans aralığındaki tüm modal frekanslar bulunmuştur. Şekil 14 bütün yöntemlerle elde edilen kararlılık diyagramı sonuçlarını vermektedir. CE ve LSCE yöntemlerinin RFP ve GRFP yöntemlerine göre daha etkin çalıştığı görülmektedir. Daha düşük dereceli polinomlarla kararlı kutuplara ulaşılmıştır. ITD ve PFD yöntemleri uzay durum modelleriyle çalışmaktadır. Bu yöntemler büyük miktarlarda mekansal bilgi kullandığı için, daha az iterasyonla kararlı kutuplara ulaşabilmiş ama çok fazla hesaplama eforu istemektedir. Tablo 2 ve Tablo 3’de bütün yöntemler ve ANSYS ile bulunan modal frekanslar ve sönümlenme oranları değerleri verilmiştir. Elde edilen sonuçların tatmin edici düzeyde yakın olduğu görülmektedir.

Modal frekanslar ve sönümlenme oranları bulunduktan sonra rastgele seçilen frekans tepki fonksiyonları sentezlenmiş ve sonuçlar Şekil 15’de verilmiştir. Son olarak, her yöntemle bulunan modal vektörler MAC grafiğiyle kıyaslanmıştır. Tek giriş-tek çıkışlı sistemlerle çalışan yöntemlerle modal vektörler bulunamamaktadır. Bu yüzden sadece modal vektör tanımlaması yapabilen yöntemlerin sonuçları verilmiştir (bkz. Şekil 16). Şekil 17’de ise ANSYS ve geliştirilen yazılımdan elde edilen mod şekilleri görseller olarak verilmiştir. PFD yöntemi, modal vektörü doğru bir şekilde bulamamıştır. Çünkü PFD yönteminin dahil edildiği bütün kıyaslamalarda MAC değerleri 1’in altında kalmıştır. Gerek MAC grafiğinde, gerekse mod şekil sonuçlarında, 7.mod sonuçlarında bir tutarsızlık olduğu görülmüştür. Bu

yüzden ANSYS yazılımıyla yapılan analizlerin frekans aralığı 8’inci modu da içerecek şekilde genişletilmiştir. 8’inci mod frekansının 7’inci moda çok yakın olduğu görülmüştür (Tablo 4). ANSYS tarafından bulunan 8’nci modun şekil sonuçları karşılaştırıldığında, sonuçların uyduğu gözlenmiştir (Şekil 18). Kararlılık diyagramları incelendiğinde, PTD yöntemi dışında birbirine çok yakın olan modların tespit edilemediği görülmüştür. PTD yönteminin, çoklu giriş-çoklu çıkışlı sistemlerle çalıştığı için birbirine yakın modları tanımlama konusunda diğer yöntemlerden üstün olduğu görülmüştür.

## 5.2. Deneysel Durum Çalışması

Bu durum çalışmasının amacı geliştirilen yazılımın titreşim testiyle elde edilen gerçek deneysel veriler ile de doğru çalışabildiğini gösterebilmektir. Test yapısı esnek yaylar üzerinde konumlandırılmış serbest sınır koşullarına sahip olduğu varsayılan daire şeklinde bir alüminyum plakadır. Üstünde 2 tahrik (force input), 30 tepki (response output) noktası mevcuttur (bkz. Şekil 19). Tepki serbestlik dereceleri 1 ile 30 arasında etiketlenmiş noktalarda tanımlanmıştır. Her nokta için tahrik ve tepkiler plaka yüzeyine dik yönde (z yönünde) ölçülmüştür. Testlerde kullanılan tahrik noktaları 14 ve 19 nolu noktalar ve tahrikler z yönünde plaka yüzeyine dik olarak uygulanmıştır. Toplamda 60 adet frekans tepki fonksiyonu ölçülmüştür. Modal analize girdi sağlayacak test sonuçları çoklu referanslı sarsıcı testi yöntemi ile elde edilmiştir ([2],[5]). Test sonuçları yazarlardan birinin doktora çalışmaları sırasında

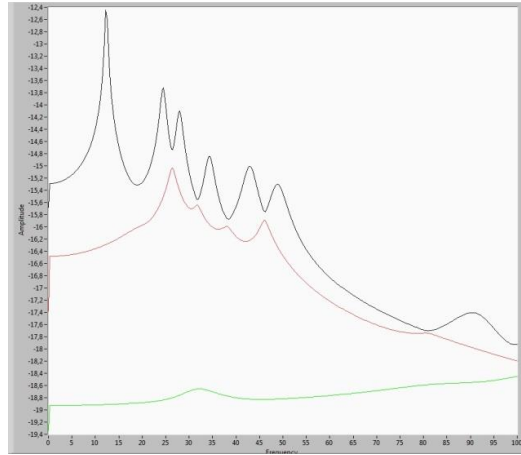
Cincinnati Üniversitesi'nin Yapısal Dinamik Araştırma Laboratuvarında (Structural Dynamics Research Laboratory) eğitim amaçlı gerçekleştirmiş olduğu bir testten alınmıştır. Ayrıca, geliştirilen yazılımdan elde edilen modal parametreler de yine aynı laboratuvarda geliştirilen X-Modal II yazılımıyla elde edilen modal parametre sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Analize başlarken test yapılan frekans aralığındaki mod sayısını doğru belirleyebilmek için CMIF (bkz. Şekil 20) eğrilerinden yararlanılmıştır. Testte kullanılan tahrik sayısı kadar CMIF eğrisi hesaplanabilir. Aynı frekansta birden fazla görülen zirve noktaları yapıda tekrarlanan kökler – aynı mod frekansında birden fazla bağımsız mod bulunması durumu - (repeated roots –multiple modes at the same frequency) olduğunu ifade etmektedir. MvMIF eğrisi de çizdirilmiştir; fakat tekrarlanan kökler bulunmasına rağmen bu eğriden çok net anlaşılacaktır (bkz. Şekil 21).Şekil 20'den yararlanılarak sistemdeki kök sayısı ile ilgili çıkarımda bulunulmuştur (bkz. Tablo 5).

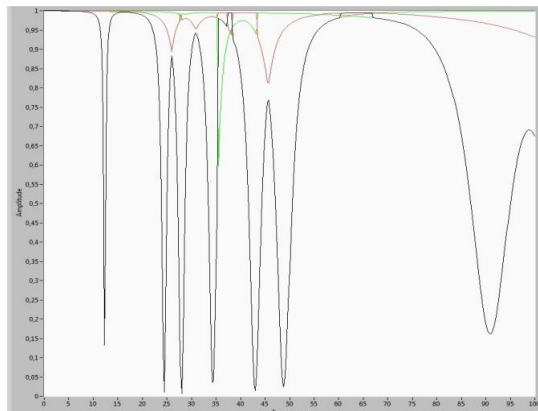
ITD, PTD & ERA yöntemleriyle elde edilen kararlılık diyagramları Şekil 22'de verilmiştir. Bu

durum çalışmasında sadece çoklu tahrik- çoklu tepkili frekans tepki fonksiyonu veri setiyle çalışabilen yöntemlerin sonuçları verilmiştir (bkz. Tablo 6). Şekil 22 ve Tablo 6 incelendiğinde, PTD yönteminin tekrarlanan kökleri bulmada en başarılı yöntem olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, modal frekans sonuçları metotlar karşılaştırıldığında iyi bir şekilde eşleşmekle beraber, sönümlenme katsayıları değerlerinde tutarsızlıklar görülmektedir. Mod şekil sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların eşleştiği görülmektedir (bkz. Şekil 23).

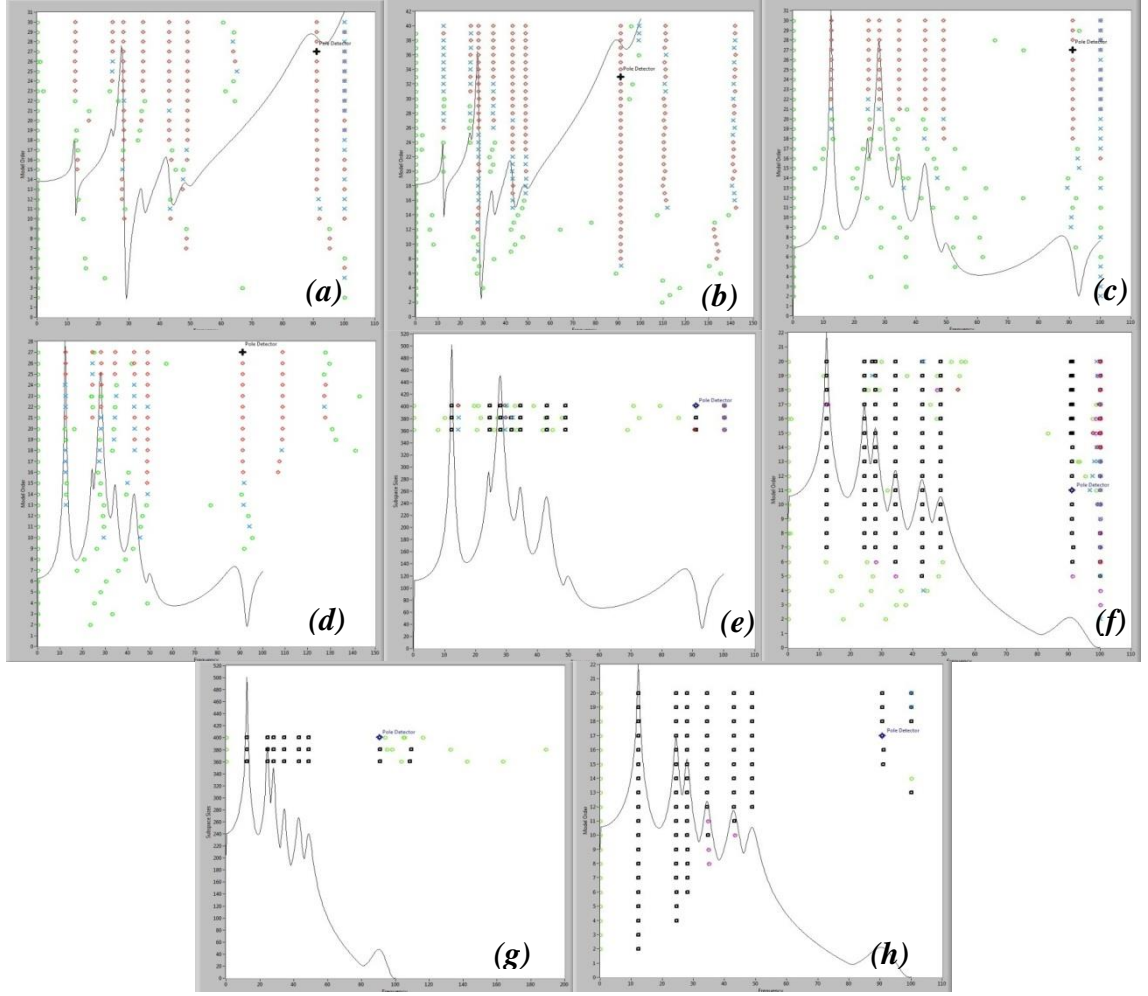
Son olarak, modal analizde kullanılan frekans tepki fonksiyonları sentezlenmiştir. Gösterim amaçlı olarak seçilen tepki-tahrik konum kombinasyonları 4Z-19Z, 19Z-19Z, 20Z-14Z ve 22Z-14Z için frekans tepki fonksiyonu karşılaştırmaları Şekil 24'te görülebilir. Test verileri 0-800 Hz arasında alınmış olmasına rağmen, modal parametreler 0-500 Hz arasında tespit edilmiştir. Frekans tepki fonksiyonlarında sentezleme sonuçları ve gerçek deney verileri arasında 500 Hz üzerinde Şekil 24'teki örnek frekans tepki fonksiyonlarında da görülen farklılıklar bu yüzden kaynaklanmaktadır.



Şekil 12. Tüm frekans tepki fonksiyonları kullanılarak elde edilen CMIF grafikleri



Şekil 13. Tüm frekans tepki fonksiyonları kullanılarak elde edilen MvMIF grafikleri



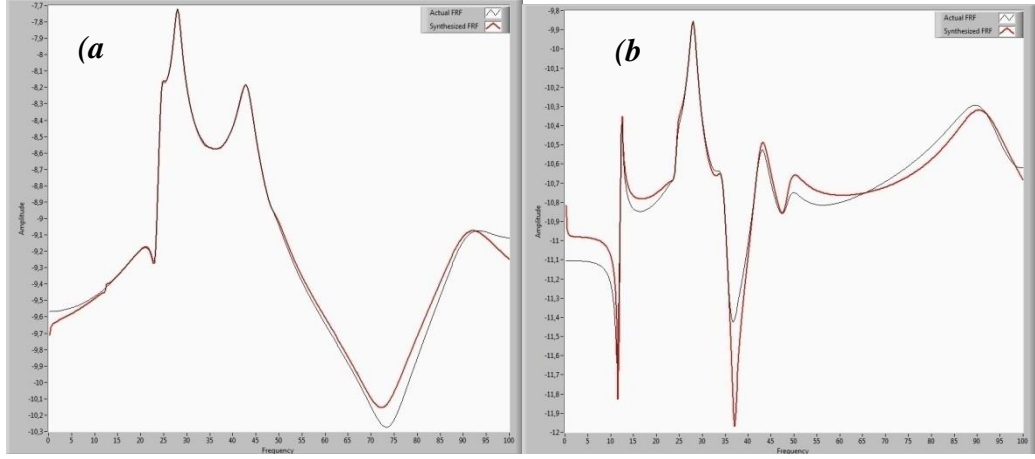
Şekil 14. Kararlılık diyagramları – (a) CE, (b) RFP, (c) LSCE, (d) GRFP, (e) ITD, (f) PTD, (g) PFD, (h) ERA

Tablo 2. Yazılımdan elde edilen & ANSYS'den elde edilen (referans)modal frekans sonuçları

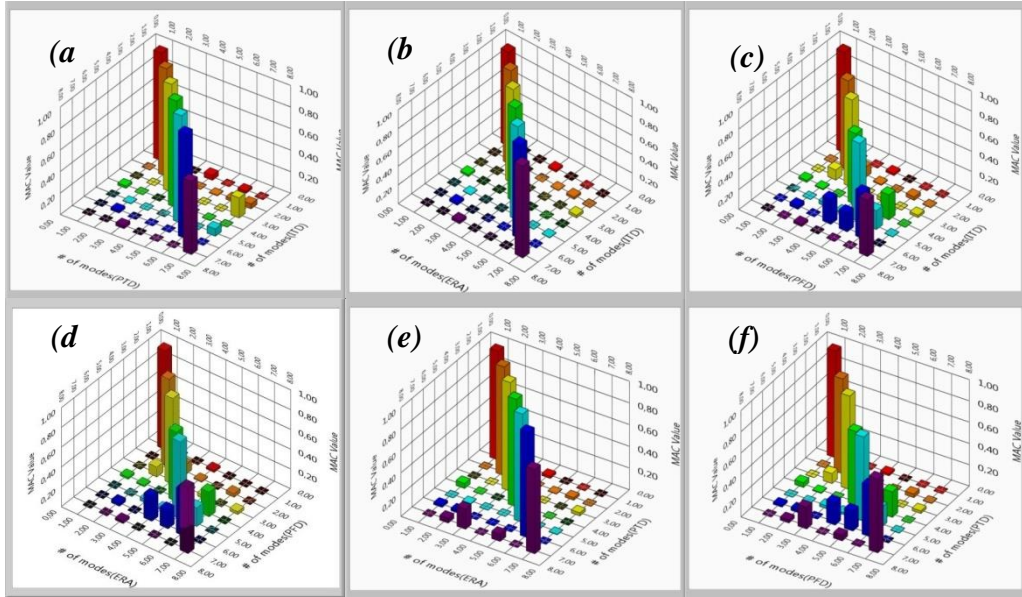
| Mod | Modal Frekanslar (rad/s) |        |        |        |        |        |        |        | ANSYS  |
|-----|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|     | CE                       | RFP    | LSCE   | GRFP   | ITD    | PTD    | PFD    | ERA    |        |
| 1   | 12.341                   | 12.332 | 12.346 | 12.299 | 12.345 | 12.345 | 12.332 | 12.345 | 12.329 |
| 2   | 24.488                   | 24.420 | 24.475 | 24.318 | 24.484 | 24.484 | 24.455 | 24.485 | 24.453 |
| 3   | 27.996                   | 27.970 | 28.000 | 28.189 | 27.996 | 27.996 | 27.959 | 27.997 | 27.960 |
| 4   | 34.411                   | 34.381 | 34.414 | 34.253 | 34.412 | 34.412 | 34.378 | 34.414 | 34.367 |
| 5   | 42.996                   | 42.943 | 42.996 | 42.940 | 42.995 | 42.995 | 42.939 | 43.001 | 42.940 |
| 6   | 48.888                   | 48.830 | 48.890 | 48.838 | 48.889 | 48.889 | 48.838 | 48.900 | 48.826 |
| 7   | 91.066                   | 90.951 | 91.058 | 90.949 | 91.068 | 91.053 | 90.937 | 91.029 | 90.531 |

Tablo 3. Yazılımdan elde edilen & ANSYS'den elde edilen (referans)sönümleme oranları sonuçları

| Mod | Sönümleme Oranları (%) |       |       |       |       |       |       |       | ANSYS |
|-----|------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | CE                     | RFP   | LSCE  | GRFP  | ITD   | PTD   | PFD   | ERA   |       |
| 1   | 1.640                  | 1.683 | 1.683 | 1.584 | 1.658 | 1.658 | 1.649 | 1.658 | 1.665 |
| 2   | 2.278                  | 1.666 | 2.331 | 2.395 | 2.305 | 2.306 | 2.309 | 2.305 | 2.306 |
| 3   | 2.496                  | 2.498 | 2.504 | 2.396 | 2.493 | 2.493 | 2.496 | 2.493 | 2.493 |
| 4   | 2.839                  | 2.850 | 2.836 | 2.712 | 2.835 | 2.835 | 2.818 | 2.832 | 2.835 |
| 5   | 3.295                  | 3.291 | 3.293 | 3.173 | 3.293 | 3.293 | 3.308 | 3.281 | 3.293 |
| 6   | 3.611                  | 3.610 | 3.608 | 3.606 | 3.608 | 3.608 | 3.555 | 3.586 | 3.608 |
| 7   | 5.873                  | 5.862 | 5.868 | 5.860 | 5.859 | 5.887 | 5.856 | 6.451 | 5.840 |



Şekil 15. Belirtilen düğüm noktalarının sentezlenen frekans sonuç fonksiyonları (Geliştirilen yazılım & ANSYS karşılaştırması) – (a) 6X-9X, (b) 6Z-9Z



Şekil 16. Belirtilen yöntemlerin sonuçları arasındaki MAC grafikleri - (a) ITD-PTD, (b) ITD-ERA, (c) ITD-PFD, (d) PFD-ERA, (e) PTD-ERA, (f) PTD-PFD

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, özgün olarak geliştirilen bir deneysel modal analiz yazılımının teorik altyapısı ve yazılımsal mimarisi verilmiş ve yazılımın doğrulanması için gerçekleştirilen biri analitik ve biri deneysel durum çalışmalarının detayları ve sonuçları sunulmuştur. Bazı durumlar dışında genelde yazılımdan tatmin edici sonuçlar (referans modal parametrelerle örtüşen tanımlama sonuçları) elde edilmiştir. Analitik durum çalışmasında ANSYS yazılımından sonlu elemanlar analizi ile elde edilen modal parametre sonuçları, deneysel durum çalışması için ise Cincinatti Üniversitesi Yapısal Dinamik Laboratuvarında geliştirilen X-Modal II yazılımından elde modal parametre sonuçları,

geliştirilen modal analiz yazılımının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Durum çalışmalarının sonuçları tatmin edici yakınlıkta olmasına rağmen yazılımın ticari yazılımlara göre halen eksikleri mevcuttur. Ticari yazılımlarda modal parametrelere değer biçme kısmı dışında elde edilen test verisini düzgün bir frekans sonuç fonksiyonuna dönüştürmek için özellikler de mevcuttur. Geliştirilen yazılımda, modal frekans belirlemek için etkili bir yöntem olan kararlılık diyagramından kullanıcı manuel bir şekilde frekansları belirlemektedir. Bununla ilgili ticari yazılımlarda prosesi otomatize eden özellikler mevcuttur. Benzer yöntemlerin geliştirilen yazılıma da kazandırılması düşünülebilir. Literatürde var olup, yazılıma eklenemeyen başka etkin modal parametreleri tanımlayan algoritmalar mevcuttur. Bu



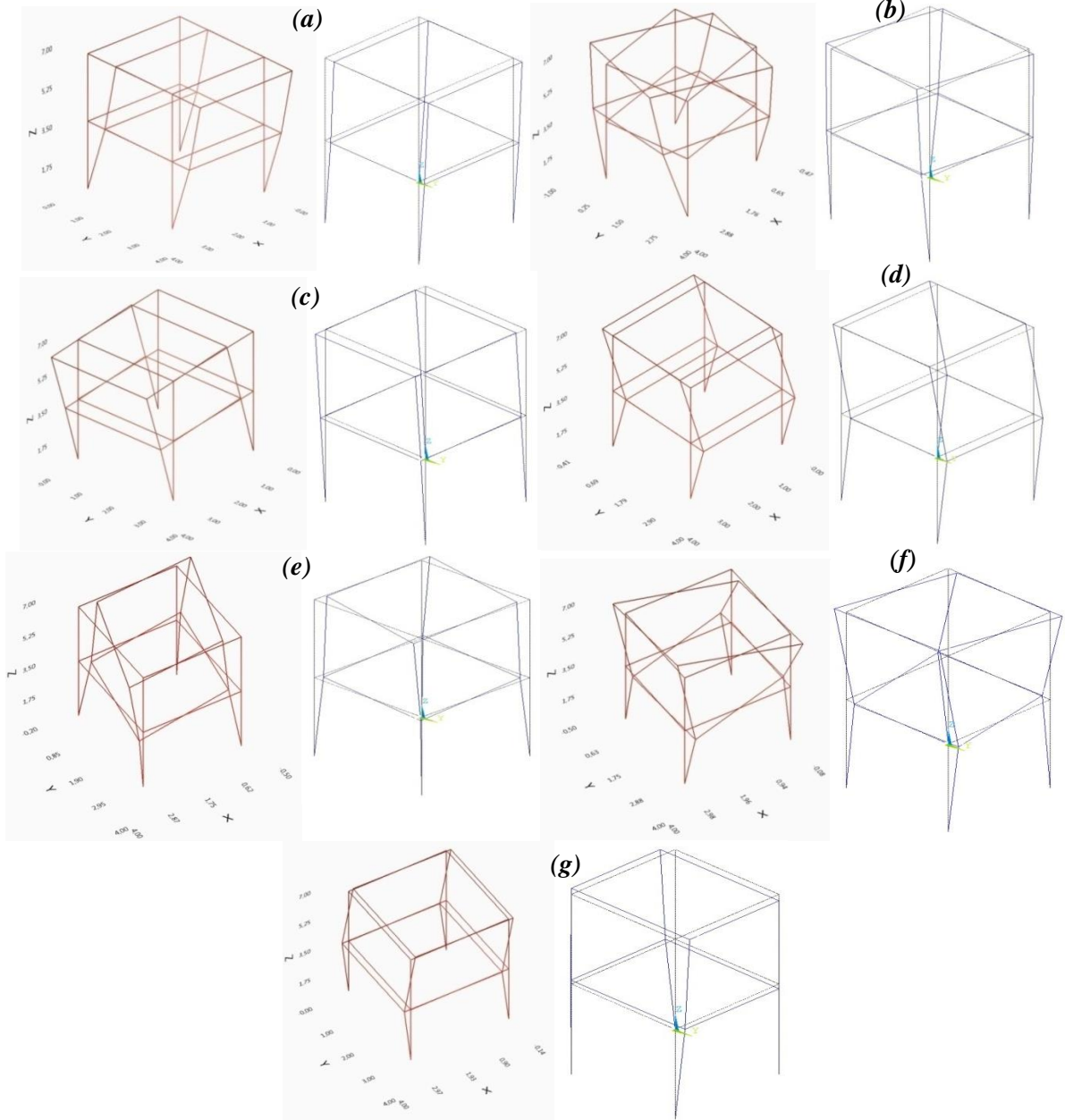
yöntemler de yazılıma kazandırılabilir. Ulusal kaynaklarla kullanıma açılacak modal analiz öncesi ve sonrası bütün işlemlere haiz bir yazılım geliştirilebilmesi için yukarıda bahsedilen özelliklerin yazılıma kazandırılması gerekmektedir.

### Teşekkür

Yazarlar tarafından herhangi bir destek beyan edilmemiştir.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

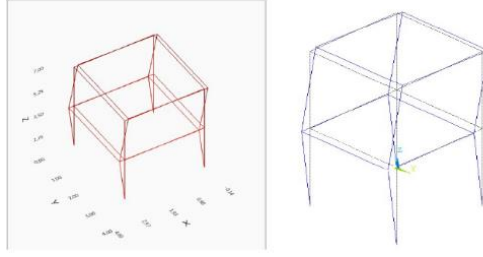


Şekil 17. Geliştirilen yazılım & ANSYS mod şekli sonuçları – (a) 1. mod, (b) 2. mod, (c) 3. mod, (d) 4. mod, (e) 5. mod, (f) 6. mod, (g) 7. Mod

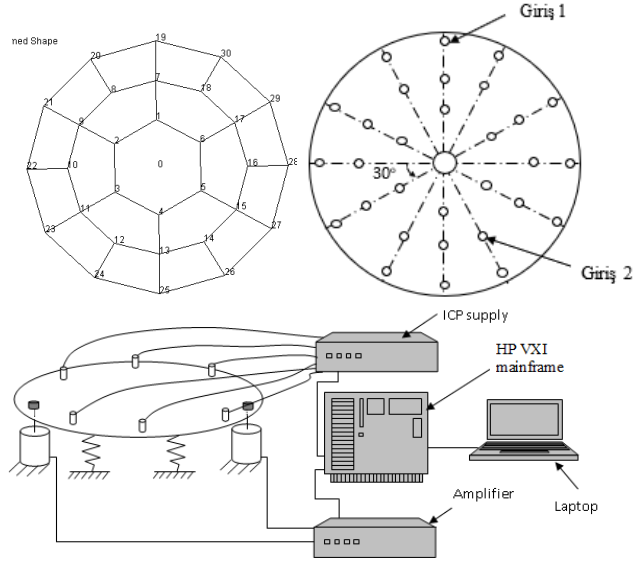
Tablo 4. Modal frekanslar (ANSYS)

| Mod | Modal Frekanslar (rad/s) |
|-----|--------------------------|
| 7   | 90.531                   |
| 8   | 90.945                   |

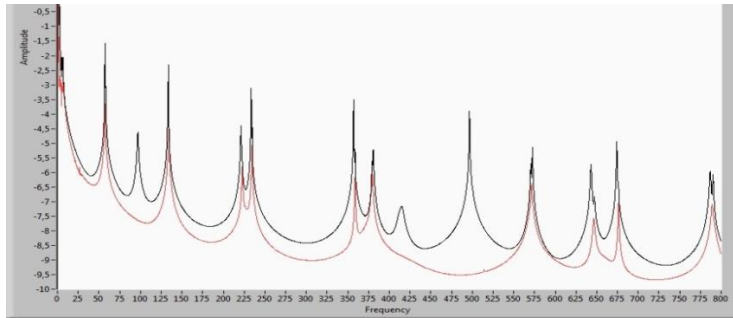




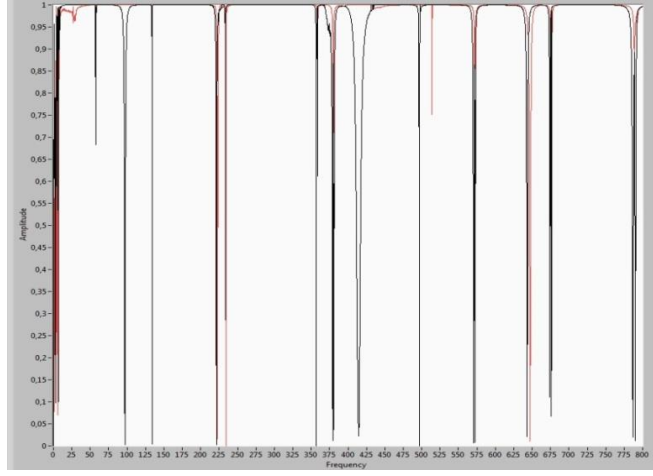
Şekil 18. Geliştirilen yazılım 7. mod & ANSYS 8. mod şekli sonuçları



Şekil 19. Test yapısı – alüminyum dairesel plaka



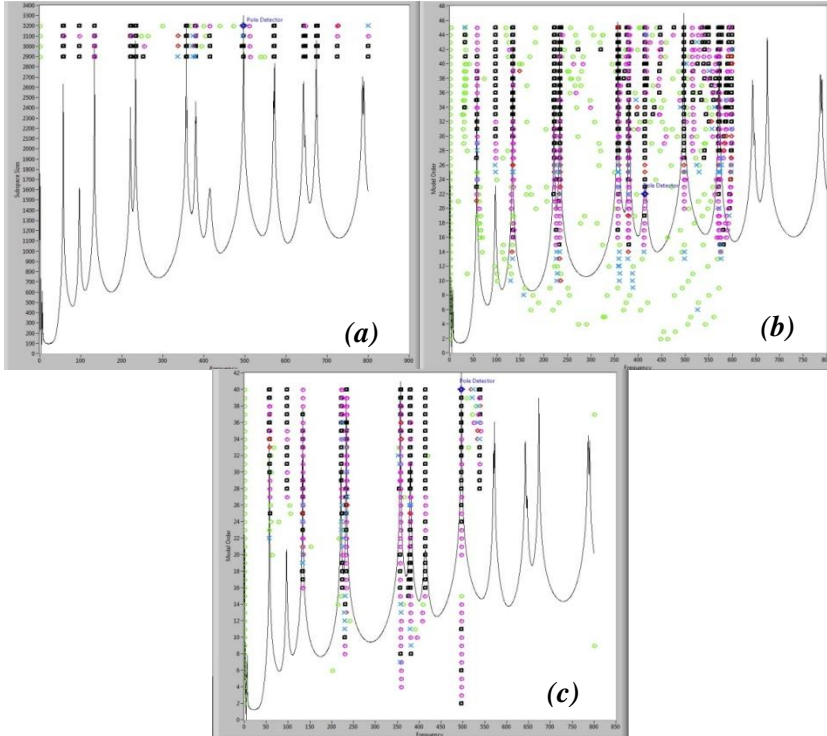
Şekil 20. CMIF eğrileri



Şekil 21. MvMIF eğrileri

Tablo 5. CMIF eğrilerinden yapılan çıkarımlar

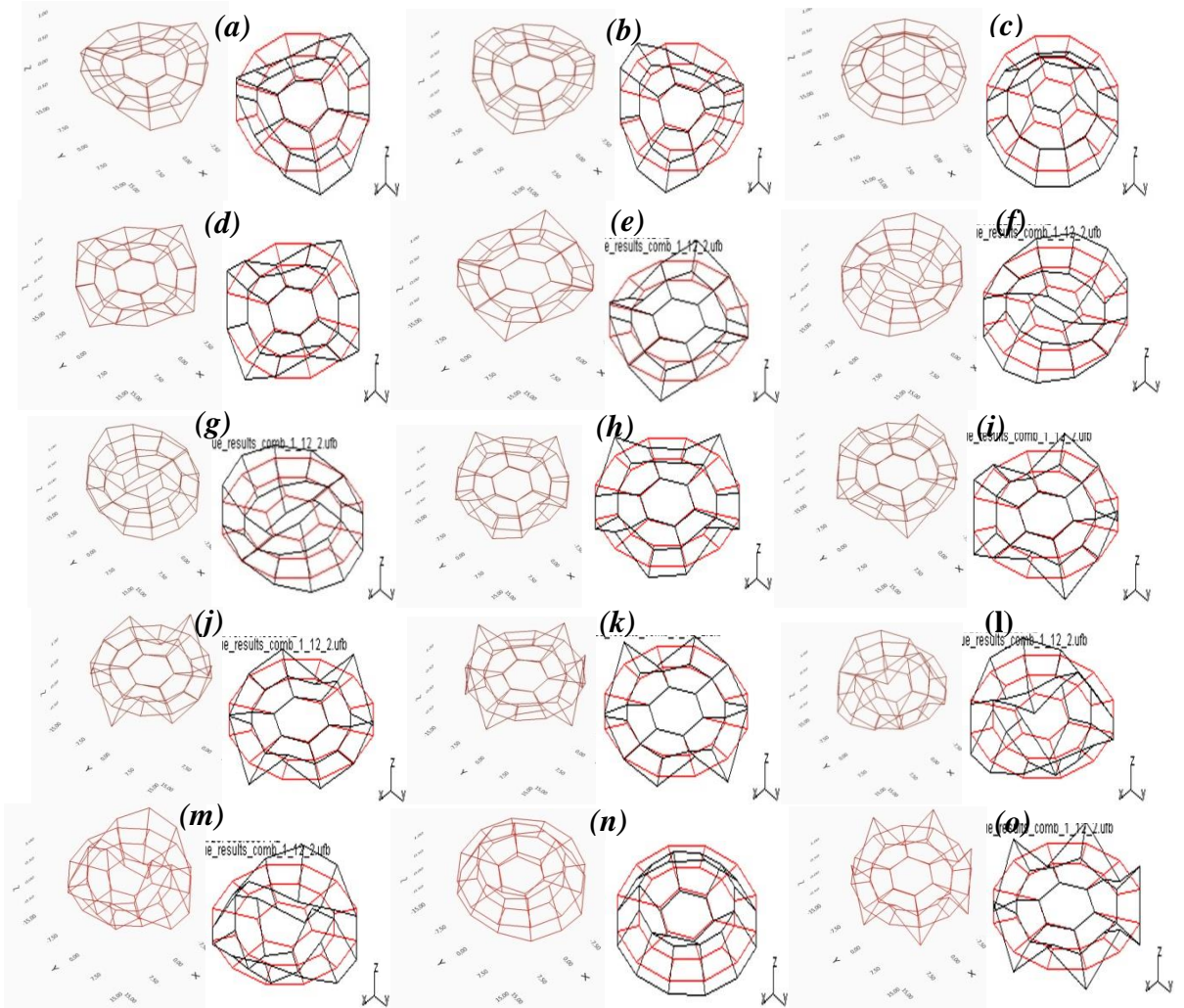
| Değer Biçilen Frekans | Kök Sayısı<br>(aynı moda frekansında bulunan bağımsız mod sayısı) |
|-----------------------|---|
| $\approx 60$          | 2   |
| $\approx 100$         | 1   |
| $\approx 135$         | 2   |
| $\approx 225$         | 2   |
| $\approx 230$         | 2   |
| $\approx 350$         | 2   |
| $\approx 375$         | 2   |
| $\approx 420$         | 1   |
| $\approx 500$         | 1   |



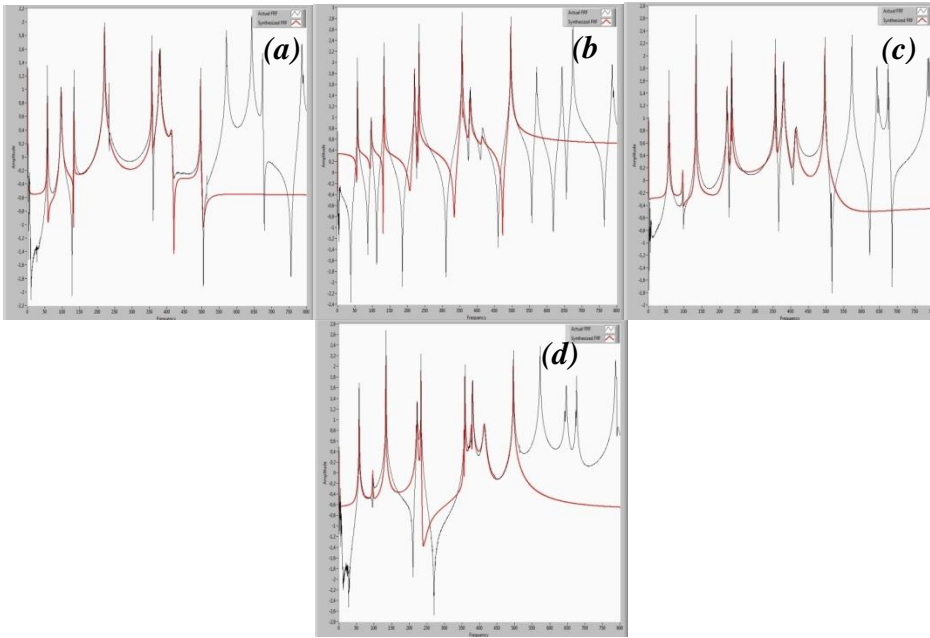
Şekil 22. Kararlılık diyagramları – (a) ITD, (b) PTD, (c) ERA

Tablo 6. Modal parametre sonuçları

| Mod | X-Modal II  |           | Geliştirilen Yazılım |           |             |           |             |           |
|-----|-------------|-----------|----------------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|     | RFP         |           | ITD                  |           | PTD         |           | ERA         |           |
|     | Frekans(Hz) | $\xi$ (%) | Frekans(Hz)          | $\xi$ (%) | Frekans(Hz) | $\xi$ (%) | Frekans(Hz) | $\xi$ (%) |
| 1   | 57.229      | 0.034     | 56.963               | 0.042     | 56.802      | 0.032     | 56.919      | 0.151     |
| 2   | 57.861      | 0.030     | 57.577               | 0.058     | 57.531      | 0.179     | 57.628      | 0.253     |
| 3   | 97.062      | 0.560     | 96.736               | 0.709     | 96.724      | 0.589     | 96.949      | 1.212     |
| 4   | 133.373     | 0.024     | 133.090              | 0.025     | 133.077     | 0.024     | -           | -         |
| 5   | 134.013     | 0.025     | -                    | -         | 133.729     | 0.022     | 133.720     | 0.035     |
| 6   | 221.273     | 0.148     | 220.961              | 0.156     | 221.009     | 0.161     | 221.050     | 0.127     |
| 7   | 222.992     | 0.115     | 222.442              | 0.139     | 222.487     | 0.140     | 222.445     | 0.404     |
| 8   | 233.560     | 0.034     | 233.262              | 0.032     | 233.252     | 0.033     | 233.318     | 0.039     |
| 9   | 234.531     | 0.031     | 234.209              | 0.039     | 234.221     | 0.035     | 234.270     | 0.047     |
| 10  | 357.000     | 0.032     | 356.692              | 0.032     | 356.695     | 0.033     | 356.683     | 0.031     |
| 11  | 358.974     | 0.025     | 358.558              | 0.027     | 358.547     | 0.023     | 358.572     | 0.034     |
| 12  | 379.203     | 0.116     | 378.954              | 0.109     | 378.753     | 0.176     | 378.690     | 0.183     |
| 13  | 380.603     | 0.130     | 380.323              | 0.124     | 380.119     | 0.159     | 380.126     | 0.138     |
| 14  | 414.344     | 0.668     | 414.318              | 0.770     | 413.960     | 0.605     | 413.900     | 0.618     |
| 15  | 496.754     | 0.034     | 496.424              | 0.034     | 496.422     | 0.035     | 496.459     | 0.034     |



Şekil 23. Deneysel modal analizle elde mod şekilleri (Geliştirilen yazılım sonuçları sağda ve X-Modal II sonuçları solda): (a) 1. mod, (b) 2. mod, (c) 3. mod, (d) 4. mod, (e) 5. mod, (f) 6. mod, (g) 7. mod, (h) 8. mod, (i) 9. mod, (j) 10. mod, (k) 11. mod, (l) 12. mod, (m) 13. mod, (n) 14. mod, (o) 15. Mod



Şekil 24. Gösterim amaçlı olarak seçilen tepki-tahrik konum kombinasyonları için frekans tepkifonksiyonları. (Geliştirilen yazılımdan elde edilen modal parametrelerle sentezlenen ve deneysel olarak ölçülen frekans tepki fonksiyonları karşılaştırması): (a) 4Z-19Z, (b) 19Z-19Z, (c) 20Z-14Z, (d) 22Z-14Z

## DEVELOPMENT OF A MODAL ANALYSIS SOFTWARE IN WHICH VIBRATION PROPERTIES OF MECHANICAL SYSTEMS OBTAINED EXPERIMENTALLY

In this paper, the theoretical framework and architecture of a software developed to experimentally identify modal parameters of mechanical systems is given and the results obtained from the software for two case studies defined for verification purposes are presented. As part of the development work of the software, modal identification techniques available in the literature are investigated and commonly used ones are selected to be used in the software. Commercially available modal analysis softwares are also investigated in order to identify for what a typical modal analysis software should have as features. Labview is chosen as the environment to develop the software. Labview is preferred for its graphical advantages over other programming techniques and for the fact that Labview use for development of full fledged modal analysis software is a novel application. In order to validate the software, analytically (via finite element analysis) and experimentally obtained frequency response functions of two separate case studies are given as inputs to the developed software and verification is done by comparing modal parameters identified by the developed software reference modal parameter values.

**Keywords:** Experimental Modal Analysis, Modal Parameter Estimation, Modal Identification Techniques, Curve Fitting, Mechanical Vibrations

## KAYNAKÇA

1. Brown, D., Allemang, R.J., Zimmerman, R., Mergey, M. (1979) Parameter Estimation Techniques for Modal Analysis. SAE Technical Paper Series, No.790221.
2. Ewins, D.J. (1984) Modal Testing, Theory and Practice. Research Studies Press, Ltd., Taunton, UK.
3. Allemang R.J. 1999. Experimental Modal Analysis. UC-SDRL-RJA-CN-20-263-663/664, Class Notes, Revision: June 7,1999+.
4. Schwarz, B.J., Richardson, M.H. (1999) Experimental Modal Analysis. Vibrant Tech. Inc., Orlando FL.
5. Fundamentals of Modal Testing Application Note 243-3. (2000) Agilent Technologies
6. Jimin, H., Fu Z.-F., (2001) Modal Analysis. Butterworth–Heinemann, Oxford/Boston.
7. Maia, N.M.M., Silva, J.M.M. (2001) Modal Analysis Identification Techniques. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 359: 29-40. <https://doi.org/10.1098/rsta.2000.0712>.
8. Allemang, R.J., Brown, D.L. (2022). Experimental Modal Analysis Methods. In: Allemang, R., Avitabile, P. (eds) Handbook of Experimental Structural Dynamics. Springer,

- New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4547-0\\_36](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4547-0_36)
9. Altunışık A.C., Kalkan E., Başağa H.B. (2017) Kemer barajların yapısal davranışlarını belirlemek amacıyla geliştirilen mühendislik yazılımı. DSİ Teknik Bülteni (126).
  10. Kılıç, İ., Bozdoğan K.B. , Aydın, S., Gök, S.G., Gündoğan S. (2020) Kule tipi yapıların dinamik davranışının belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii minaresi örneği. Pteknik Dergisi 23(1): 19-26.
  11. Okuyucu D. (2020) Tek katlı betonarme bir yapı üzerinde operasyonel modal analiz uygulaması. DÜMF Mühendislik Dergisi 11(3): 1407-1419.
  12. Öztürkoğlu, O., Taner, Y., Yurtseven, V., Özçelik, Ö., Günel, S. (2023) Kullanımda Olan 2,5 MW Kapasiteli Bir Rüzgâr Türbininden Veri Toplanması, Sistem Tanımlama ve Model Güncelleme. DEÜ FMD 25(75): 611-622.
  13. Aydın, Y.N., Korkut, T.B.,3 , Özyayın, O., Armakan, E., Sarı, G., Aytaç, G. (2021) Numerical and experimental modal analysis of wheels of Solaris 10 solar car and parametric design of lightweight EV wheel. DEÜ FMD 23(68): 689-699.
  14. Allemang, R.J., Brown, D.L. (1998) A unified matrix polynomial approach to modal identification. Journal of Sound and Vibration. 211(3):301-322.
  15. Richardson, M. H. & Formenti D. L. (1982) Parameter Estimation From Frequency Response Measurements Using Rational Fraction Polynomials. , Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, Florida.
  16. Richardson, M. H. & Formenti, D.L. (1985) Global Curve Fitting of Frequency Response Measurements using the Rational Fraction Polynomial Method. Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, Florida.
  17. Richardson, M. H. (1986) Global Frequency & Damping Estimates From Frequency Response Measurements. Proceedings of 4th International Modal Analysis Conference (IMAC), Los Angeles, CA.
  18. Lembregts, F., Leuridan, J., Van Brussel H. (1990) Frequency Domain Direct Parameter Identification for Modal Analysis: State Space Formulation. Mechanical Systems and Signal Processing. 4(1): 65-75.
  19. Maia, N. M. M. & Silva, J. M. M. (1997) Theoretical and experimental modal analysis. Baldock, UK: Research Studies Press (distributed by Wiley, Chichester).
  20. Ibrahim, S.R. & Mikulcik, E.C. (1977) A Method for the Direct Identification of Vibration Parameters from the Free Response. The Shock and Vibration Bulletin. 47(4): 183-198.
  21. Juang, J.N., Pappa, R.S. (1985) An Eigensystem Realization Algorithm for Modal Parameter Identification and Model Reduction. Journal of Guidance, Control, and Dynamics. 8(5):620-627.
  22. Vold, H., Kundrat, J., Rocklin, G.T., Russel, R. (1982) A Multi-Input Modal Estimation Algorithm for Mini-Computers. SAE Transactions, 91, 815-821. <http://www.jstor.org/stable/44631984>
  23. Vold, H. & Rocklin G.T. (1982) The Numerical Implementation of a Multi-Input Modal Estimation Method for Mini-Computers, Proceedings of the 1st International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, Florida.
  24. Zhang, L., Yao, Y., Lu, M. (1987) An Improved Time Domain Polyreference Method for Modal Identification. Mechanical Systems and Signal Processing. 1(4): 399-413.
  25. Structural Dynamics Research Lab at the University of Cincinnati. Universal File Formats for Modal Testing. Available at [https://www.ceas3.uc.edu/sdrluff/all\\_files.php](https://www.ceas3.uc.edu/sdrluff/all_files.php)
  26. Williams, R., Crowley, J. & Vold, H. (1985) Multivariate Mode Indicator Function in Modal Analysis. Proceedings of the 3rd International Modal Analysis Conference (IMAC), Orlando, Florida.
  27. Shih C.Y., Tsue Y.G., Allemang R.J., Brown D.L. (1989) Complex Mode Indication Function and its Applications to Spatial Domain Parameter Estimation. Proceedings of the 7th International Modal Analysis Conference (IMAC) Las Vegas, Nevada.