

## KARE KESİTLİ BİR HAVALANDIRMA KANALI PARÇASININ DOĞAL FREKANSLARININ VE MOD BİÇİMLERİNİN ASKI KONUMLARI İLE DEĞİŞİMİNİN İNCELENMESİ

Gökhan KURNAZ<sup>1, a)</sup> ve Orhan ÇAKAR<sup>2, b)</sup>

<sup>1</sup>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ERZİNCAN

<sup>2</sup>Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, ELAZIĞ

<sup>a)</sup>gokhankurnaz@[erzincan.edu.tr](mailto:gokhankurnaz@erzincan.edu.tr), <sup>b)</sup>cakaro@[firat.edu.tr](mailto:cakaro@firat.edu.tr)

Günlük hayatımızda yaygın olarak kullanılan mühendislik uygulamalarından havalandırma sistemlerinde, kanal duvarlarında meydana gelen titreşimlerin hem gürültü problemlerine hem de yapısal bütünlük kayıplarına neden olabileceği bilinmektedir. Bu durum, özellikle bağlantı noktalarının yanlış konumlandırılması veya uygun olmayan destek konfigürasyonları ile daha da ciddi hale gelebilmektedir. Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı; havalandırma kanallarının bağlantı konfigürasyonlarına bağlı olarak değişen dinamik özelliklerini incelemek, kritik titreşim modlarını belirleyerek yapısal değişikliklerle rezonansın önlenmesine yönelik mühendislik çözümleri üretmektir. Böylece, havalandırma kanallarının mühendislik tasarımında dinamik optimizasyon sürecine katkı sağlamayı hedeflemektedir.

Çalışmada kare kesitli düz bir havalandırma kanalı parçası göz önüne alınmış, bu kanal parçasının farklı konumlarda asılması durumunda doğal frekanslarının ve mod biçimlerinin değişimi incelenmiştir. Analizler için ANSYS Workbench kullanılmıştır. Yapılan analizler, kanalın titreşim özelliklerinin, bağlantı noktalarının yeriyile ilgili yapılan yapısal değişikliklerden önemli ölçüde etkilendiğini ortaya koymuştur. Modal analiz sonuçları, kanal sistemlerinde rezonans davranışlarının anlaşılması ve titreşim kaynaklı gürültü problemlerinin önlenmesi açısından önemli bilgiler sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Havalandırma kanalı, modal analiz, doğal frekans, titreşim, yapısal modifikasyon, sonlu elemanlar yöntemi.

### INVESTIGATION OF THE VARIATION OF NATURAL FREQUENCIES AND MODE SHAPES OF A SQUARE-SECTION VENTILATION DUCT SEGMENT WITH RESPECT TO HANGER POSITIONS

#### ABSTRACT

It is known that, in ventilation systems, which are among the engineering applications commonly used in our daily lives, vibrations occurring on the duct walls can cause both noise problems and losses of structural integrity. This situation can become even more serious, especially with the incorrect positioning of connection points or with unsuitable support configurations. In this context, the aim of this study is to examine the dynamic properties of ventilation ducts that change depending on connection configurations, to determine critical vibration modes, and to produce engineering solutions to prevent resonance by means of structural modifications. In this way, it is aimed to contribute to the dynamic optimization process in the engineering design of ventilation ducts.

In the study, a straight, square cross-section ventilation duct segment was considered, and the change in its natural frequencies and mode shapes was examined in cases where this duct segment is suspended at

different positions. ANSYS Workbench was used for the analyses. The analyses showed that the vibration characteristics of the duct are significantly affected by structural changes related to the location of the connection points. The results of the modal analysis provide important information for understanding the resonance behaviors in duct systems and for preventing vibration-induced noise problems.

**Keywords:** Ventilation duct, modal analysis, natural frequency, vibration, structural modification, finite element method.

## 1. GİRİŞ

Modern binalarda iklimlendirme ve hava kalitesini sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan havalandırma kanalları, çalışma sırasında çeşitli dinamik yüklere maruz kalmakta ve bu durum, kanal sistemlerinde istenmeyen titreşim ve akustik gürültü problemlerine yol açabilmektedir. Özellikle ince cidarlı sac malzemelerden üretilen bu yapılar, çevresel etkiler, fan titreşimleri ve hava akışı kaynaklı dinamik yüklemeler karşısında düşük rijitliklerinden ötürü kolaylıkla rezonansa girebilmektedir. Bu nedenle, hava kanallarının doğal frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesi, titreşimle ilişkili problemlerin önlenmesi ve sistemin yapısal bütünlüğünün korunması açısından büyük önem taşımaktadır. Havalandırma sistemlerinin dinamik karakteristiği, yalnızca kanalın geometrik ve malzeme özelliklerinden değil, aynı zamanda destek koşulları, bağlantı noktalarının konumu ve yapısal ilavelerden (örneğin yay, kütle, tij gibi bağlantı elemanları) de etkilenmektedir. Bu nedenle, mühendislik tasarımı sürecinde kanalın modal davranışının önceden analiz edilmesi ve gerektiğinde yapısal değişikliklerle sistemin dinamik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir.

Havalandırma kanallarının titreşim analizi yapısal bütünlük ve akustik performans açısından büyük önem taşımaktadır. Havalandırma sistemlerinde farklı sınır koşullarının dinamik etkileri üzerine yapılan çalışmalar, bu elemanların sistemin doğal frekanslarının belirlenmesinde önemli bir etkisi olduğunu göstermiştir. Chavan ve Venkatesham [1], dikdörtgen kesitli kanalların serbest titreşim analizinde sınır koşullarının (sabit, basit mesnetli, serbest) doğal frekanslar üzerindeki belirleyici etkisini vurgulamış ve Rayleigh-Ritz yöntemiyle farklı mesnet durumlarını dikkate alan doğrulanmış bir model sunmuşlardır. Tang ve arkadaşları [2],

büyük havalandırma kanallarını taşıyan askı sistemlerinin deprem gibi sarsıntılara karşı dayanıklılığını incelemiş ve bu tür analizlerin sistemin güvenli çalışması için önemli olduğunu göstermiştir. Bautista Ordoñez ve ekibi [3] ise, havalandırma kanallarında oluşan titreşimleri bilgisayar ortamında modelleyerek, karmaşık sistemlerde bile titreşimlerin nasıl yayılacağını ve hangi parçalarda sorun çıkabileceğini önceden tahmin etmenin mümkün olduğunu göstermiştir.

Bu kapsamda, Makine Mühendisleri Odası (MMO) da havalandırma kanallarında karşılaşılan titreşim sorunlarına yönelik çeşitli eğitim ve çalışmalar yürütmüşlerdir. MMO tarafından düzenlenen eğitimde [4], havalandırma kanalları gibi mekanik tesisat elemanlarının titreşim analizine yönelik temel bilgiler ve uygulamalar sunulmuştur. Ayrıca, yine MMO tarafından düzenlenen başka bir eğitim kapsamında [5], mekanik tesisat hatlarının ve ekipmanlarının deprem yükü altındaki davranışı, titreşim yalıtımı ve kontrolü gibi konular detaylı olarak ele alınmıştır. Bu eğitimler, hem mühendislerin hem de uygulayıcıların havalandırma kanallarında karşılaşılabilecekleri titreşim ve gürültü sorunlarına karşı bilinçlenmesini ve doğru mühendislik uygulamalarını teşvik etmektedir.

Günümüzde mühendislik yapılarının dinamik davranışlarının anlaşılması ve optimize edilmesi amacıyla sayısal analiz yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle ANSYS gibi sonlu elemanlar tabanlı yazılımlar, yapıların doğal frekanslarının, mod şekillerinin ve sönümlenme özelliklerinin belirlenmesinde önemli avantajlar sunmaktadır. Literatürde, farklı yapı elemanlarının ve montajların titreşim karakteristiklerinin incelenmesi için paket programlar ile gerçekleştirilen çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Kovalovs ve

arkadaşları [6], ANSYS paket programı kullanarak eksenel çekme yükü altındaki lamine kompozit silindirlerin doğal frekanslarını ve mod şekillerini incelemişlerdir. Bu çalışma, kompozit malzemelerin dinamik davranışlarının anlaşılması açısından önemli bulgular sunmaktadır. Benzer şekilde, Ahiwale ve çalışma arkadaşları [7], çatlaklı ankastre kirişlerin titreşim analizini ANSYS ortamında gerçekleştirerek, yapısal hasarların doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerindeki etkilerini ortaya koymuşlardır. Ayrıca, Saini ve ekibi [8], doğal elyaf takviyeli epoksi kompozitlerin titreşim karakteristiklerini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz ederek, malzeme türünün dinamik performans üzerindeki rolünü vurgulamışlardır. Bu çalışmalar, ANSYS yazılımının farklı malzeme ve yapı tiplerinde titreşim analizleri için etkin bir araç olduğunu göstermektedir.

Ayrıca, kütle ve yay değişiklikleriyle yapılan düz ve ters yapısal değişikliklerin modal analizine odaklanan bazı çalışmalar da dikkat çekmektedir. Çakar [9], sistemin bazı doğal frekanslarını değiştirmeden kütle ve rijitlik modifikasyonu yapılmasına olanak tanıyan yöntemler geliştirmiştir. Hüseyinoğlu ve Çakar [10], sistemdeki belirli doğal frekansların sabit tutulmasını sağlamak amacıyla rijitlik parametrelerinin yeniden düzenlenmesine dayalı bir yaklaşım önermiştir. Ayrıca Çakar [11], yalnızca kütle modifikasyonlarına dayanarak sistemin doğal frekanslarının istenilen değerlere kaydırılmasına olanak tanıyan ters yapısal değişiklik yöntemlerini ortaya koymuştur.

Havalandırma sistemleri, özellikle binalarda, araçlarda ve endüstriyel tesislerde iç hava kalitesini sağlamak ve ısı konforu artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde yer alan havalandırma kanalları ise genellikle ince cidarlı ve geniş yüzey alanına sahip olmaları nedeniyle çevresel titreşim kaynaklarına karşı oldukça hassastır. Fanlar, motorlar veya dış ortamdaki gelen dinamik uyarılar, bu kanallarda yapısal titreşimlerin oluşmasına neden olabilmekte; bu da hem sistemin çalışma verimliliğini düşürmekte hem de istenmeyen gürültü seviyelerine neden olmaktadır. Dolayısıyla, havalandırma kanallarının dinamik davranışlarının doğru şekilde anlaşılması, gürültü kontrolü, yapısal

güvenlik ve kullanıcı konforu açısından büyük önem taşımaktadır.

Mevcut literatürde, genellikle kiriş, plaka veya boru benzeri yapılar ile akışkan taşıyan boruların dinamik karakteristikleri üzerine çok sayıda çalışma bulunmasına rağmen, gerçekçi havalandırma kanalı geometrilerine ve destekleme koşullarına sahip sistemlerin detaylı modal analizine yeterince yer verilmediği görülmektedir. Özellikle kanalın desteklendiği noktaların konumunun doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerindeki etkileri sınırlı sayıda çalışmada ele alınmıştır. Ayrıca, birçok çalışmada idealize edilmiş sınır koşulları ve homojen yapılar esas alınmış, ancak pratikte karşılaşılan askı elemanları (örneğin tij bağlantıları) gibi parametrelerin yapısal dinamikler üzerindeki etkileri yeterince araştırılmamıştır.

Bu bağlamda, sunulan çalışmada tipik bir kare kesitli havalandırma kanalı parçasının dinamik davranışı, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanılarak sayısal olarak incelenmiş; özellikle kanalın desteklenme konfigürasyonlarının doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu yönüyle çalışma, hem literatürdeki boşluğu doldurmayı hem de uygulamaya dönük mühendislik tasarımlarında kullanılabilecek dinamik öngörüler sağlamayı amaçlamaktadır.

## 2. ANALİZ MODELİ

Gerçek havalandırma sistemleri, birbirine bağlanmış çok sayıda kanal elemanından, farklı geometrilere ve boyutlara sahip bağlantı elemanlarından, çok noktalı askı sistemlerinden ve çeşitli sınır koşullarından oluşan oldukça karmaşık yapılar içermektedir. Bu tür sistemlerde, kanal bölümleri genellikle birbirlerine cıvatalı, kaynaklı veya flanşlı bağlantılarla monte edilmekte ve yapıların üst kısımlarına tij, askı çubuğu, travers ya da esnek askı aparatları gibi elemanlarla sabitlenmektedir. Bu bağlantı konfigürasyonları sistemin dinamik cevabını önemli ölçüde etkilemekte, özellikle mod şekillerinin lokalize olmasına, mod çiftleşmelerine veya rezonans durumlarının ortaya çıkmasına neden olabilmektedir. Şekil 1.'de bir fabrikada uygulaması yapılmış havalandırma kanalının bir bölümü gösterilmiştir.



Şekil 1. Bir fabrikanın havalandırma kanalı

Ancak bu çalışma kapsamında, sistemin temel dinamik karakteristiklerini daha yalın ve kontrol edilebilir bir yapıda değerlendirebilmek amacıyla, idealize edilmiş bir analiz modeli tercih edilmiştir. Modelde, tek kare kesitli düz bir hava kanalı parçacığı ve bu kanala iki noktadan rijit olarak bağlanan tij tipi bağlantı elemanı esas alınmıştır. Bu yaklaşım, sistemin geometrik ve yapısal özelliklerinin modal parametreler üzerindeki etkisini izole bir şekilde değerlendirme imkanı sunarken; aynı zamanda kanalın desteklenme biçiminin doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerindeki etkisini net biçimde ortaya koymak açısından avantaj sağlamaktadır.

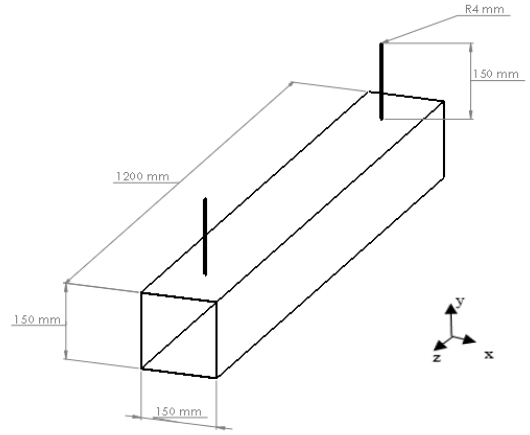
Çalışma süresince aşağıdaki kabuller benimsenmiştir:

- Kanal, homojen ve izotropik bir malzeme olan sac levha ile modellenmiştir.
- Kanal cidar kalınlığı sabit kabul edilmiş ve kesit boyunca incelme, bükülme ve imalat kaynaklı geometrik kusurlar dikkate alınmamıştır.
- Tijler doğrusal elastik davranış gösteren ve çelikten imal edilmiş silindirik elemanlar olarak modellenmiş; bağlantı noktaları rijit kabul edilmiştir.
- Kanal tijlerle (askı elemanlarıyla) sabit bir zemine asılı kabul edilmiş ve çevresel sönümlenme etkileri göz ardı edilmiştir.
- Modal analiz ve FRF hesaplamaları doğrusal elastisite teorisi çerçevesinde gerçekleştirilmiştir.

Bu şekilde oluşturulan sadeleştirilmiş model sayesinde, daha karmaşık sistemlere geçişte temel oluşturabilecek modal karakteristiklerin sistematik olarak analiz edilmesi ve karşılaştırılmasına olanak sağlanmıştır.

Çalışmada analiz konusu olarak, kare kesitli ve ince cidarlı bir havalandırma kanalı ele alınmıştır. Bu yapı, ince cidarlı olmasından dolayı hava akışı, sınır koşulları ve çevresel etkilerden kaynaklı dinamik zorlamalara karşı oldukça hassastır.

Havalandırma kanalları belirli noktalardan askı elemanları (kanal askı rotu veya tij olarak isimlendirilir) yardımıyla desteklenir. Bu bağlantılar, kanalın titreşim davranışını doğrudan etkileyen önemli parametreler arasında yer almaktadır. Bu nedenle analizde dikkate alınmıştır. Tijler çelikten imal edilmiş olup, bağlantı elemanı olarak kanalın üst yüzeyine belirli mesafelerde yerleştirilmiştir. Sistemin genel görüntüsü Şekil 2.'de verilmiştir.



Şekil 2. Sistemin teknik resim ve ölçüleri

Kanalın yapımında kullanılan çelik sac malzemenin ve tij askı aparatlarının malzeme özellikleri aşağıda Tablo 1.'de verilmiştir.

Tablo 1. Sistemde kullanılan malzemenin mekanik özellikleri

Özellik	Sembol	Birim	Sac	Askı (Tij)
			Metal	
			Değer	Değer
Elastisite Modülü	E	Pa	$2.1 \times 10^{11}$	$2.1 \times 10^{11}$
Poisson Oranı	$\nu$	–	0.3	0
Yoğunluk	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	2500	7850

Tij, analiz modelinde eşdeğer bir yay olarak modellenmiştir. Eksenel rijitlik temel alınarak eşdeğer yay sabiti  $k$ , aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

$$k = \frac{EA}{L} \quad (1)$$

Burada  $A$  kesit alanı,  $d$  tijin çapı,  $L$  ise tijin uzunluğudur.

$$d = 0,004m \Rightarrow A = \frac{\pi d^2}{4} = 1,2566 * 10^{-5}m^2 \quad (2)$$

$$L = 0,15m, E = 2 * 10^{11}Pa \quad (3)$$

$$k = \frac{(2*10^{11}*1,2566*10^{-5})}{0,15} \cong 167,540N/m \quad (4)$$

olacak şekilde bir yay sabiti elde edilmiştir.

Gerçek bir havalandırma sisteminde bağlantı elemanları hem eksenel (çekme/basınç) hem de enine (eğilme) yüklemelere maruz kalabilmektedir. Ancak bu çalışmada, tij tipi bağlantı elemanları yalnızca eksenel yönde rijitlik sağlayan doğrusal yay elemanları olarak modellenmiştir. Bundan dolayı tij için poisson oranı 0 olarak alınmıştır.

Tijler kanal sistemine genellikle gergin halde monte edilir ve çalışma sırasında ortaya çıkan titreşim yüklerini esas olarak eksenel doğrultuda taşırlar. Bu durumda tijlerin enine rijitliğinden ziyade, eksenel rijitliklerinin sisteme etkisi daha baskın hale gelir. Ayrıca, enine rijitlik etkisinin dikkate alınabilmesi için karmaşık bükülme davranışlarının, bağlantı noktalarındaki moment geçişlerinin ve rijit-dönel kısıtlamaların modellenmesi gerekecektir ki bu da modelin sadeleştirme amacına aykırıdır. Dolayısıyla bu çalışmada, tijler yalnızca doğrusal eksenel yay elemanları olarak değerlendirilmiş ve bağlantı noktalarına

uygulanan kuvvetlerin kanal üzerindeki etkisi, sadece eksenel rijitlik üzerinden modellenmiştir. Böylece, hem sayısal modelin çözüm süreleri optimize edilmiş hem de bağlantı noktası yer değişikliklerinin doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerindeki etkisi doğrudan ve izole biçimde gözlemlenebilmiştir.

### 3. SAYISAL ANALİZLER

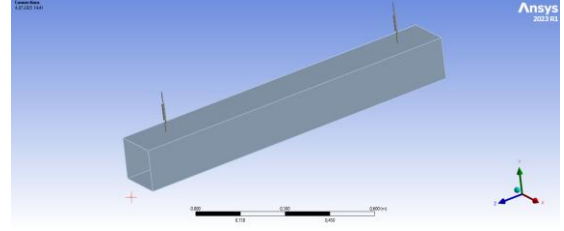
Bu bölümde, kare kesitli havalandırma kanalı parçasının ANSYS Workbench ortamında titreşim analizi gerçekleştirilmiş ve analizlerde Block Lanczos yöntemi kullanılmıştır. Amaç, kanalın doğal frekanslarını ve bu frekanslara karşılık gelen mod şekillerini belirlemektir. Elde edilen veriler, kanalın titreşim karakteristiklerinin anlaşılmasına katkı sağlamakta ve yapılacak yapısal iyileştirme çalışmalarına temel teşkil etmektedir.

Analizler kapsamında sadece kanal geometrisinin titreşim karakteristikleri değil, aynı zamanda sistemin desteklenme biçimi de dikkate alınmıştır. Bu bağlamda, kanalın rijitliğini doğrudan etkileyen tij (askı elemanı) konumlarının, modal parametreler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Orijinal durumda belirlenen tij yerleşimleri, üç farklı senaryo ile değiştirilmiş ve her bir durumda sistemin doğal frekansları yeniden hesaplanmıştır. Böylece, destek noktalarının konumlarının özellikle düşük frekanslı modlar üzerindeki etkisi ayrıntılı biçimde ortaya konmuştur.

#### 3.1. Orijinal Sistemin Sayısal Analizi

Analizi yapılan sistem, kare kesitli ve ince cidarlı bir havalandırma kanalı parçasıdır. Kanal, güncel uygulamalarda sıklıkla kullanılan belirli uzunluk, genişlik ve yükseklik ölçülerine sahip olup üç boyutlu olarak modellenmiştir. Kanal cidarlarında iç doluluk bulunmayan, içi boş bir hacim olarak tanımlanmıştır. Kanalın malzemesi sac levha olarak seçilmiş ve elastik modül, poisson oranı ve yoğunluk gibi mekanik özellikler tanımlanarak dinamik karakteristikler belirlenmiştir. Kanal tijlerle sabit zemine asılmış ve sistem dış etkilerden izole edilerek yalnızca kendi doğal titreşim davranışı analiz edilmiştir. Havalandırma kanalının üç boyutlu CAD modeli, SolidWorks ortamında

oluşturulmuş ve ANSYS Mechanical modülünde analiz için uygun malzeme tanımlamaları yapılmıştır. Analiz için gerekli mesh işlemi ise yeterli hassasiyeti sağlayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Model üzerinde 20 adet düğüm noktası (nod) belirlenmiştir. Asıl sistemde yaylar, y yönünde modelin üst yüzeyinde, 3 ve 18. nodlarına bağlanmıştır. Modelin ANSYS Mechanical ortamındaki görünümü Şekil 3.'de sunulmuştur.



Şekil 3. Modelin ANSYS Mechanical gösterimi

Sisteme ait ilk on doğal frekans değerleri Tablo 2.'de verilmiştir. Beklenildiği gibi ilk iki doğal frekans rijid modlar olup değerleri 0 Hz'dir.

Tablo 2. Orijinal modelin ilk on doğal frekansı

Mode	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Frekans (Hz)	0	0	0.0157	0.0398	96.38	130.15	1232.2	1236.5	2127.2	2847.1

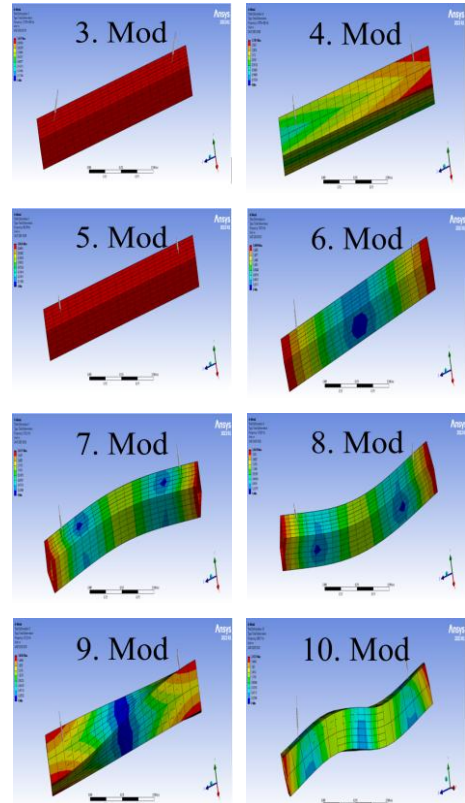
3 ve 10 arası modlara ait mod şekilleri Şekil 4'te gösterilmiştir. Yüksek mertebeden modlar genellikle daha kısa dalga boylarına ve daha karmaşık mod şekillerine sahiptir. Bu karmaşık mod şekilleri, özellikle yerel şekil değişimlerinin yoğunlaştığı bölgeleri ve yapı üzerinde stres birikiminin fazla olabileceği alanları ortaya çıkarır. Ayrıca bu modlar, dış kaynaklı geniş bantlı titreşimlerin yapıya etkisinin değerlendirilmesinde de kritik rol oynar. Böylece, titreşim kaynaklı hasarların önceden öngörülmesi ve yapısal tasarımın bu doğrultuda optimize edilmesi mümkün hale gelir.

3'ten 6'ya kadar olan modlar, sistemin düşük frekanslı titreşim davranışını temsil etmektedir. Mod 3 ve mod 4 sistemin neredeyse rijit cisim hareketlerini yansıttığından frekansları sifıra yakındır ve kanal üzerinde deformasyon çok azdır.

Mod 5'te ise, kanal boyunca herhangi bir yer değiştirme veya renk dağılımı gözlenmemektedir. Tüm kanal yapısı tek renk ile gösterilmiş ve deformasyon ölçeği sıfırdır. Fakat tijlerde y yönünde sıkışma görülmektedir.

Mod 6 ile birlikte sistemde ilk kez elastik şekil değişimleri gözlenmeye başlanmıştır. Bu modlarda kanal boyunca simetrik eğilme hareketleri meydana geldiği görülmektedir.

Mode 7 ve 8 farklı iki düzlemdeki eğilme modlarıdır. Mod 9 ilk burulma modu ve mod 10, Mode 7 ile aynı düzlemdeki ikinci eğilme modudur.



Şekil 4. Orijinal modele ait 3 ve 10 arası doğal frekans değerleri ve karşılık gelen mod şekilleri

### 3.2. Askı Yerlerinin Doğal Frekanslar Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi

Kanal sistemlerinde titreşim davranışı, sadece geometrik parametreler ve sınır koşullarından değil, aynı zamanda sistemin desteklenme şekillerinden de önemli ölçüde etkilenmektedir. Özellikle tij (askı elemanı) bağlantı noktalarının konumları, sistemin dinamik karakteristiklerini doğrudan etkilemektedir. Uygulamada, bu tijlerin yerleşimi genellikle kanalın taşıdığı yük miktarı, havalandırma çıkışı gibi aerodinamik etkiler veya montaj kolaylığı göz önünde bulundurularak belirlenir. Özellikle çıkışa yakın bölgelerde oluşabilecek titreşim artışları, uygun konumlandırılmamış tijlerle daha da şiddetli hale gelebilir. Bu nedenle, rijitliğin destek dağılımına göre yönlendirilmesi önem eder.

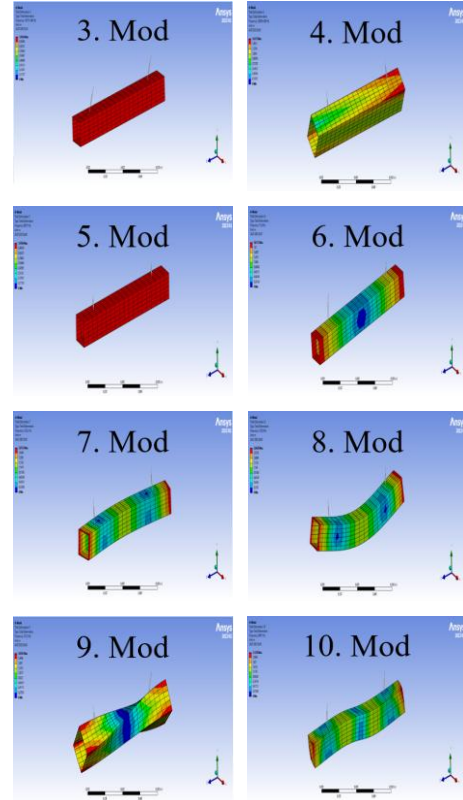
Çalışmada üç farklı yapısal modifikasyon senaryosu ele alınmış ve her durumda sistemin doğal frekanslar ve mod şekilleri üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Orijinal sistemde, kanalın üst yüzeyinde, z yönünde ve eşit aralıklarla oluşturulan 20 düğüm noktası olup tijler 3. ve 18. nodlara yerleştirilmiştir. Aşağıda bu yapıdaki modifikasyon senaryoları sırasıyla sunulmuştur:

#### 3.2.1. Birinci Modifikasyon: Tijler 4. ve 17. Nodlarda

İlk olarak orijinal sistemdeki tij bağlantıları 4 ve 17 noktalarına alınarak değiştirilen model (1. model olarak adlandırılacaktır), ANSYS Workbench ortamında yeniden analiz edilmiştir.

Doğal frekans değerleri Tablo 3'te 3. kolonda orijinal sistem ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Sistemin 3 ve 10 arası modlara ait doğal frekans değerleri ve mod şekilleri Şekil 5.'te gösterilmiştir.



Şekil 5. 1. modele ait ait 3 ve 10 arası doğal frekans değerleri ve karşılık gelen mod şekilleri

1. modelin mod şekillerinin orijinal modele göre değişmediği, sadece doğal frekansların değiştiği görülmektedir.

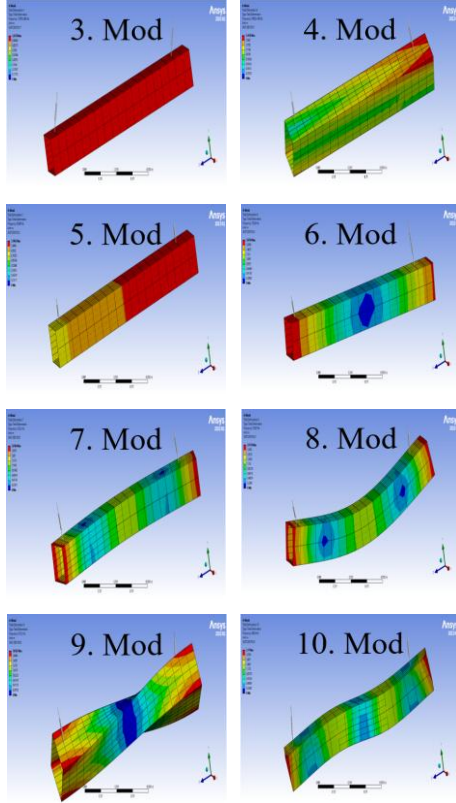
#### 3.2.2. İkinci Modifikasyon: Tijler 2. ve 18. Nodlarda

Tijlerin kanala bağlandıkları düğüm noktaları 2 ve 18. düğüm noktalarına alınarak değiştirilen model (2. model olarak adlandırılacaktır), ANSYS Workbench ortamında yeniden analiz edilmiştir.

Doğal frekans değerleri Tablo 3'te 5. kolonda orijinal sistem ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

2. modelin 3 ve 10 arası modlarına ait doğal frekanslar ve mod şekilleri Şekil 6.'da gösterilmiştir.

1. modelde olduğu gibi 2. modelde de mod şekillerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir.



Şekil 6. 2. modele ait 3 ve 10 arası doğal frekans değerleri ve karşılık gelen mod şekilleri

### 3.2.3. Üçüncü Modifikasyon: Tijler 2. ve 17. Nodlarda

Tijlerin kanala bağlandıkları düğüm noktaları 3 ve 18. düğüm noktalarından 2 ve 17. düğüm noktalarına alınarak oluşturulan model (3. model olarak adlandırılacaktır), ANSYS Workbench ortamında yeniden analiz edilmiştir.

Doğal frekans değerleri Tablo 3'te 7. kolonda orijinal sistem ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Mod şekilleri daha önceki sistemlerde olduğu gibi yine benzer sonuçlar vermektedir.

Tablo 3. Ana model ile değiştirilmiş modellerin doğal frekans değerlerinin karşılaştırılması

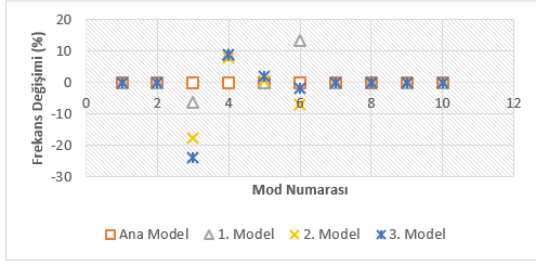
Mode	Ana Model	1. Model	Değişim	2. Model	Değişim	3. Model	Değişim
	Frekans (Hz)	Frekans (Hz)	%	Frekans (Hz)	%	Frekans (Hz)	%
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0,0157	0,0167	-6,47	0,0171	-8,74	0,0173	-10,03
4	0,0398	0,0363	8,71	0,0399	-0,42	0,0383	3,74
5	96,38	96,57	-0,20	95,89	0,51	94,66	1,78
6	130,15	112,80	13,33	139,24	-6,98	132,36	-1,70
7	1232,2	1232,2	0	1232,2	0	1232,2	0
8	1236,5	1233,9	0,21	1238,5	-0,16	1237,2	-0,06
9	2127,2	2127,2	0	2127,2	0	2127,2	0
10	2847,1	2847,1	0	2847,4	-0,01	2847,4	-0,01

Başlangıç konfigürasyonunda 3. ve 18. düğüm noktalarına yerleştirilen tijler sırasıyla (1) 4 ve 17'ye, (2) 2 ve 18'e, (3) 2 ve 17'ye taşınmıştır.

En dikkat çekici değişimler, özellikle 3. ve 4. modlar civarında görülmektedir. Doğal frekans değerlerinde belirgin azalmalar görülmüştür. Buna karşılık 4. modda doğal frekanslarda belirgin artışlar meydana gelmiştir. Ayrıca 6. modda, 1. modelde belirgin bir artış, 2. ve 3.

modelde ise azalma gözlenmiştir. Yüksek modlara (mod 7–10) doğru ise değişimlerin ihmal edilebilir seviyeye indiği görülmektedir.

Aşağıdaki grafikte, tijlerin bağlantı noktalarında yapılan üç ayrı modifikasyonun sistemin doğal frekansları üzerindeki etkileri, orijinal model referans alınarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 7. Modifikasyonlara göre doğal frekans değerlerindeki % değişim

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, kare kesitli düz bir havalandırma kanalı parçasının titreşim davranışları, sonlu elemanlar yöntemiyle sayısal olarak incelenmiştir. İlk olarak bir havalandırma kanalı parçasına iki adet askı tiji bağlanmış ve sistemin doğal frekansları ile mod şekilleri belirlenmiştir. Daha sonra, bağlantı noktalarının konumları değiştirilerek aynı analiz tekrar edilmiştir. Her modifikasyon için elde edilen mod şekilleri ve frekans değerleri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

Elde edilen bulgular, askı aparatlarının konumlarının kanalın dinamik karakteristikleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Yapısal destek elemanlarından biri olan tijlerin bağlantı noktaları, sistemin titreşimsel cevabı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, tijlerin yerleşim yerlerinin değiştirilmesiyle yapılan yapısal modifikasyonlar analiz edilmiştir. Orijinal sistemde 3. ve 18. düğüm noktalarına yerleştirilen tijler; sırasıyla (1) 4 ve 17'ye, (2) 2 ve 18'e, (3) 2 ve 17'ye kaydırılmış ve doğal frekanslar üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir.

En dikkat çekici değişimler, özellikle 3. ve 4. modlar civarında görülmektedir.

- 3. modda, frekanslar sırasıyla %6,5 (1. model), %17,8 (2. model) ve %23,9 (3. model) oranında azalmıştır.
- Buna karşılık 4. modda frekansta belirgin artışlar meydana gelmiştir.

Bu durum, düşük frekanslı modların sistemin desteklenme biçiminden oldukça etkilenebilir olduğunu göstermektedir. Ayrıca 6. modda, 1.

modelde belirgin bir artış, 2. ve 3. modelde ise azalma gözlemlenmiştir.

Yüksek modlara (mod 7–10) doğru ise değişimlerin ihmal edilebilir seviyeye indiği görülmektedir. Bu da tij konumlandırmasının özellikle ilk birkaç mod üzerindeki etkisinin belirleyici olduğunu ve bu modlarda yer değiştirme genliklerinin daha yüksek olması nedeniyle bağlantı yerlerine duyarlılığın arttığını göstermektedir.

Bu bağlamda, çalışma sonucunda elde edilen veriler, havalandırma kanallarının yapısal destek noktalarının yerleşiminin, titreşimli çalışma koşulları altında sistem performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca, bu tür sayısal analizlerin, kanal sistemlerinin tasarımında kritik frekans bölgelerinin tespit edilmesi ve gürültü/titreşim azaltma stratejilerinin geliştirilmesi açısından oldukça faydalı olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, bu çalışma, yapısal modifikasyon tekniklerinin havalandırma sistemlerinde dinamik performans optimizasyonu amacıyla kullanılabilirliğini ve bağlantı elemanlarının konumlandırılmasının tasarım sürecinde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır. Gerçekte bir havalandırma sistemi dirsekler, bağlantılar, kesit değişimleri gibi birçok karmaşık özellik barındırmasına rağmen burada bir ön çalışma olarak sadece küçük bir parçası göz önüne alınarak analiz edilmiştir. Askı elemanlarının etkisini görmek için bu yeterli görülmektedir. Ancak gelecekte yapılacak çalışmalarda, farklı bağlantı aparatları ve sınır koşullarının etkilerinin daha detaylı şekilde incelenmesi önerilmektedir. Ayrıca oldukça büyük ve detaylar içeren böyle bir sistemin tamamının analizi hiç şüphesiz büyük kapasiteli bilgisayarlara ve oldukça uzun analiz zamanına ihtiyaç duyacaktır. Bu bakımdan farklı analiz tekniklerinin araştırılması ve geliştirilmesi önemlidir.

#### 5. KAYNAKLAR

[1] Chavan, P. N., & Venkatesham, B. (2015). Free vibration analysis of a rectangular duct with different axial boundary conditions. *International Journal of Acoustics and Vibration*, 20(1), 10–14.

- [2] Tang, Y., Pan, J., Zhu, J., Xiao, D., & Wang, H. (2023). Finite element seismic analysis of large air duct hangers based on ASME-AG 1 code. In *Frontiers of Civil Engineering and Disaster Prevention and Control* (Vol. 2). CRC Press.
- [3] Bautista Ordoñez, J. & Nunes, M. (2017). HVAC duct system modeling through the component mode synthesis for structural vibration analysis. 10.26678/ABCM.COBEM201
- [4] Makina Mühendisleri Odası. (2020). Titreşime Giriş – ANSYS ile Titreşim Analizleri – ANSYS Modal Analiz Workshop. <https://makina.mmo.org.tr/egitim/4197>
- [5] Makina Mühendisleri Odası. (2022). Mekanik Tesisatta Titreşim ve Sismik Koruma Eğitimi. <https://makina.mmo.org.tr/Egitim/8941>
- [6] Kovalovs, A., Chate, A., & Kulakov, V. (2024). The modal analysis of laminated composite cylinders under axial tension loading in ANSYS. *MATEC Web of Conferences*, 396, 05007. <https://doi.org/10.1051/matecconf/202439605007>
- [7] Ahiwale, D., Madake, H., Phadtare, N., Jarande, A., & Jambhale, D. (2022). Modal analysis of cracked cantilever beam using ANSYS software. *Materials Today: Proceedings*, 56(Part 1), 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.055>
- [8] Saini, M. K., Bagha, A. K., Kumar, S., & Bahl, S. (2021). Finite element analysis for predicting the vibration characteristics of natural fiber reinforced epoxy composites. *Materials Today: Proceedings*, 41(Part 2), 223–227. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.717>
- [9] Çakar, O. (2011). Mass and stiffness modifications without changing any specified natural frequency of a structure. *Journal of Vibration and Control*, 17(5), 769–776.
- [10] Hüseyinoğlu, M., & Çakar, O. (2017). Determination of stiffness modifications to keep certain natural frequencies of a system unchanged after mass modifications. *Archive of Applied Mechanics*, 87(10), 1629–1640. <https://doi.org/10.1007/s00419-017-1276-3>
- [11] Çakar, O. (2018). A method for shifting natural frequencies of a dynamic system to desired values with concentrated mass modifications. *Journal of Vibroengineering*, 20(1), 508–515. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.18881>