

## HAVA JET İTKİLERİ KULLANARAK MÜHENDİSLİK YAPILARININ AKTİF TİTREŞİM KONTROLÜ

<sup>1</sup>Berkan HIZARCI , <sup>2</sup>Zeki KIRAL 

<sup>1</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İzmir, TÜRKİYE

<sup>1</sup>berkan.hizarci@deu.edu.tr, <sup>2</sup>zeki.kiral@deu.edu.tr

(Geliş/Received: 25.09.2019; Kabul/Accepted in Revised Form: 01.11.2019)

**ÖZ:** Yapısal cevap kontrol sistemlerinin araştırılması ve geliştirilmesi araştırmacıların önemli bir ilgi alanıdır. Farklı dinamik yüklerin etkisi altında mühendislik yapılarının titreşim tepkilerini azaltmak için yapısal kontrol sistemlerinin kullanılması bir gereklilik haline gelmiştir. Yapısal cevap kontrolü kavramını uygulanabilir bir teknolojiye dönüştürmek için ciddi çabalar sarf edilmiştir. Farklı çalışma ortamlarında veya operasyonel işlemlerde kullanılan yapıların dinamik davranışlarının iyileştirilmesi için yenilikçi aktif titreşim kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu konuda, hava jet itkileri kullanılarak yapıların titreşimlerini azaltma düşüncesi hala araştırılmaya ve uygulamaya açıktır. Bu çalışmada, örnek bir mühendislik yapısının harmonik zemin zorlaması altında verdiği cevaplar ve hava jet itkileri yardımıyla titreşim kontrolü incelenmiştir. Harmonik zemin zorlaması, yapının en yüksek yer değiştirmeye sahip olduğu birinci doğal frekans civarında verilmiştir. Yapının titreşim kontrolü için, durum geri besleme kontrol yöntemi kullanılmıştır. Örnek yapının titreşim kontrolü için gerekli olan kuvvetler hesaplanmıştır. Ayrıca, Matlab Simscape Multibody yardımıyla hem sistemin fiziksel olarak modellenmesi, hem de oluşan titreşimin görselleştirilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve önerilen sistem ile yapının titreşimlerini sönmülenebileceği sonucuna ulaşılmıştır. Son olarak, kontrol kuvvetlerinin sisteme hava jet itkileri kullanılarak verilmesi için lüle tasarımı yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Hava jet itkisi, Lüle, Titreşim azaltma, Yapısal cevap, Durum geri besleme kontrol

### Active Vibration Control of Engineering Structures Using Air Jet Pulses

**ABSTRACT:** Research and development of structural response control systems are an important area of interest for researchers. Under the different static and dynamic loads, it has become a necessity to use structural control systems in order to reduce the vibration response of engineering structures. Serious efforts have been made to transform the structural response control concept into a viable technology. Innovative active vibration control systems are needed to improve the structural dynamic behavior of structures used in different operating environments or operational processes. In this regard, the idea of reducing the vibrations of structures using air jet pulses remains to be investigated and implemented. In this study, the response patterns of the sample structure and vibration control via air jet pulses under harmonic base excitation were examined. Harmonic base excitation was given around the first natural frequency at which the structure has the highest displacement. State-feedback control method was used for vibration control of the structure. The forces required for vibration control of the sample structure were calculated. In addition, with the help of Matlab Simscape Multibody, physical modeling of the system and visualization of the vibration were provided. The results were compared and it was observed that the vibration of the structure can be damped via proposed system. Finally, the nozzle design was conducted to provide control forces with air jet impulses to the system.

**Key Words:** Air jet pulse, Nozzle, Vibration suppression, Structural response, State-feedback control

## GİRİŞ (INTRODUCTION)

Mühendislik yapılarındaki yükler statik ve dinamik uyarımlar olarak sınıflandırılabilir. Statik bir yük zamanla değişmez ve yapı üzerinde ivmelenme oluşturmazken, dinamik bir yük zamanla değişir ve böylece yapı içinde ivmeli yer değiştirmeler oluşturur. Dinamik yükler harmonik, periyodik ve rastgele yapıda olabilir. Genel olarak, mühendislik yapılarına etki eden dinamik yükler, türbinler, elektrik motorları, fanlar, dönen miller vb. döner makinelerde dengesizlikten kaynaklanan harmonik kuvvetler nedeniyle meydana gelir. Örneğin, bir çamaşır makinesinin tamburundaki dengesiz kıyafet yüklemesi çamaşır makinesinin yapısına etki eden harmonik bir kuvvettir. Bir süre çalıştıktan sonra, yapı üzerindeki harmonik yüklenme nedeniyle meydana gelen aşırı titreşim, çamaşır makinesinin bir kısmında arızaya neden olabilir (Şanlıtürk ve Çelikel, 2009). Bu konudaki ikinci örnek için araba tekerlekleri verilebilir. Bir arabanın tekerlekleri dengeli olmadığında, dönen tekerleklerde harmonik kuvvetler oluşur. Tekerleklerin dönme hızı, aracın süspansiyon sisteminin dikey yöndeki doğal frekansına yakınsa, aracın süspansiyon sistemindeki dikey yer değiştirme genliği artar. Rasgele dinamik bir yük için, binalara etki eden depremler veya rüzgarlar örnek olarak verilebilir.

Mühendislik yapıları, maruz kaldıkları yıkıcı yüklerden sonra da işlevlerini sürdürme yeteneğine sahip olmalıdır. Yapıların bu tür yüklerle dayanmasını sağlamak amacıyla, yapısal mukavemet, direngenlik ve sönüm oranında uygun değerlerin sağlanması esastır. Örneğin, binaların depreme karşı dayanıklı olabilmesi için, yapısal elemanların yeterli dayanımlarının yanında bu dayanımlarını sürdürebilmeleri için elemanların sünek olmaları gerekmektedir (Yüksel ve Foroughi, 2019). Fakat, malzeme teknolojisindeki gelişmeler neticesinde malzeme mukavemeti artırılırken malzemenin diğer özellikleri aynı oranda artmaması bir problem teşkil eder. Bu nedenle, özellikle esneme kapasitesi fazla olan yüksek yapılarda büyük deplasmanların pratik açıdan kontrol edilmesi ek kontrol sistemlerinin kullanılmasını gerektirmektedir (Aldemir ve Aydın, 2005). Malzeme teknolojisindeki sınırlamalar nedeniyle, araştırmacılar farklı yükler altındaki yapıların titreşim tepkisini azaltmak için kullanılacak yapısal kontrol sistemlerini geliştirmişlerdir. Bu sistemler, yükler nedeniyle oluşan enerjiyi yansıtarak ve/veya yutarak daha güvenli ve dayanıklı çalışma koşulları sağlamak için uygun bir çözümdür. Pasif, yarı aktif, aktif ve hibrit olmak üzere dört ana tip yapısal cevap kontrol sistemi mevcuttur. Pasif ve yarı aktif cihazların maliyet verimliliği ve güvenilirliğine rağmen, bu sistemler yapısal kontrolü için sınırlı bir kapasiteye sahiptir. Örneğin, pasif sistemler basit mekanizmalara sahiptir ve üretilmeleri kolaydır, ancak farklı dinamik uyarımlara uyum sağlayamazlar. Yarı aktif cihazların dinamik uyarımlara cevabı, içerdikleri pasif cihazların maksimum kapasitesi ile sınırlıdır. Aktif yapısal kontrol sistemleri, bir kontrol kuvveti veya hareketi yardımıyla yapıya doğrudan enerji aktarırlar. Bu sistemler, yapı tepkisi üzerinde etkili kontrol ve farklı dinamik yüklere adaptasyon yeteneği gibi avantajlara sahiptir. Öte yandan, farklı dinamik yüklere karşı etkili olabilmek için önemli miktarda dış enerji gerektirebilirler. Aktif yapısal kontrol sistemlerinde kullanılan kontrol yöntemleri için, bang-bang kontrol, giriş şekillendirme (Conker ve diğ., 2015), oransal integral türev denetleyicisi (PID) (Gülbahçe ve diğ., 2015), durum geri besleme yöntemi (Özdemir ve Maden, 2013), bulanık mantık kontrol (Çakan ve diğ., 2015) örnek olarak gösterilebilir. Hibrit yapısal kontrol sistemleri ise, pasif, yarı aktif ve aktif yapısal kontrol sistemlerinin seri veya paralel bağlanması ile oluşturulur. Son birkaç on yıl boyunca, çeşitli araştırmacı grupları tarafından farklı tipte yapısal kontrol sistemleri ve algoritmaları araştırılmış, geliştirilmiş ve üretilmiştir. Bu yapısal kontrol sistemlerinin birçoğu başarılı bir şekilde uygulanmakla birlikte, yapı ömrü boyunca maliyet, dış güce bağımlılık ve mekanik karmaşıklık ile ilgili zorluklar yaygın olarak kullanılmalarını geciktirmiştir.

Günümüzde, aktif yapısal kontrol sistemlerinin dış güce bağımlılığını azaltmayı amaçlayan ve rüzgar türbinleri veya vinçler gibi farklı çalışma ortamlarında veya operasyonel işlemlerde kullanılabilecek yenilikçi aktif titreşim kontrol sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu nedenle, bu çalışmada hava jet itkilerinin bir aktif titreşim kontrol yöntemi olarak uygulanabilirliği araştırılmıştır. Hava jet itkilerinin kullanılmasındaki amaç, sürdürülebilir enerji olan havanın kullanılması ile aktif yapısal kontrol sistemlerinin dezavantajı olan yüksek enerji gereksinimini aza indirmektir. Böyle bir sistemin, örnek olarak, endüstride ürünlerin konveyör hattı veya vinç ile taşıma esnasında meydana gelen

titreşimlerin azaltılmasına yönelik olarak fabrikalarda farklı işlemler için mevcut bulunan basınçlı havanın kullanılması ile uygulamaya aktarılabilmesi düşünülmektedir. Literatürde jet itkileri ile titreşim kontrolü hakkında bazı küçük ölçekli araştırmalar yapılmıştır. Brambilla'nın 1999 yılında yaptığı aktif yapısal kontrol için jet itki aktüatörü tasarımı ve uygulaması bu konuda yapılan ilk çalışmalardan biridir (Brambilla, 1999). Bu çalışmada, düşey düzlemde konumlandırılmış bir kiriş ve üstünde bir kütle kullanılmıştır. Kütle üzerinde lüleler bulunmaktadır. Yapı, sarsma tablası yardımıyla zeminden farklı frekanslarda harmonik uyarılara maruz bırakılmaktadır. Yapıdaki titreşim ivme değeri, önceden ayarlanmış ivme eşik seviyesinin üstünde olduğunda lüleler sabit bir kuvvet uygulayacak şekilde aktif hale getirilmektedir. Fujimoto ve Cao tarafından 2002 yılında benzer bir çalışma iki dikey kiriş için yapılmış olup, kayan kip kontrol yöntemi kullanılarak lüleler sayesinde sisteme verilen kuvvet kontrol edilmiştir (Fujimoto ve Cao, 2002). Bu konudaki son çalışma, Karaikos ve diğ. tarafından 2016 yılında yine tek kiriş ve bir kütle modeli kullanılarak yapılmıştır (Karaikos ve diğ., 2016). Diğer çalışmalardan farklı olarak, zemin zorlaması tek tonlu ve çok tonlu harmonik sinyal ve deprem benzetimi için rastgele sinyal olarak verilmiştir. Bu çalışmada da, sınırlandırılmış durum kontrol yöntemi kullanılmıştır. Farklı eşik seviyesi ve kuvvet değerleri için en uygun kontrol değerleri bulunmuştur.

Jet itkileri ile aktif titreşim kontrolünün, mühendislik yapılarına gerçek ve geniş bir şekilde uygulanmasından önce, örnek yapılar üzerinde titreşimin azaltılmasına yönelik fizibilite çalışmalarının yapılması gerekmektedir. Bu çalışmanın amacı, hava jet itkilerini bir kontrol kuvveti olarak kullanarak örnek bir mühendislik yapısının titreşim kontrolünü durum geri besleme yöntemi ile gerçekleştirmektir. Örnek yapı literatürdeki çalışmalardan farklı olarak, iki kat ve dört kolondan oluşan basitleştirilmiş bir bina modeli olarak seçilmiştir. Sistem, iki serbestlik dereceli topaklanmış parametrelili sistem olarak modellenmiştir. Ek olarak, yapının Matlab Simscape Multibody modeli, gövdeleri, eklemleri ve kısıtlamaları, kuvvet elemanlarını temsil eden bloklar da kullanılarak oluşturulmuştur. Bu sayede oluşturulan yapının hem fiziksel olarak modellenmesi hem de görselleştirilmesi sağlanmıştır. Doğal frekans civarındaki harmonik kuvvetin neden olduğu titreşim tepkisi yapının dayanıklılığı için çok önemlidir. Bu nedenle, frekansı yapının birinci doğal frekansına yakın olan bir harmonik zemin zorlaması yapıya uygulanmıştır. Yapının aktif titreşim kontrolü için durum geri besleme yöntemi kullanılmıştır. Hedeflenen zaman cevabı kriterlerine göre, sistem kutuplarının yerleri belirlenmiştir. Durum geri besleme yöntemi ile yapının titreşimi kontrol altına alınmaya çalışılmıştır. Yapının titreşim kontrolünde gerekli olan maksimum kuvvet değerini verebilecek şekilde bir lüle tasarımı gerçekleştirilmiştir.

## ÖRNEK MÜHENDİSLİK YAPISI (SAMPLE ENGINEERING STRUCTURE)

### İki Serbestlik Dereceli Topaklanmış Parametrelili Model (Two Degrees of Freedom Lumped-Parameter Model)

Şekil 1'de gösterilen kolonlar ve kütlelerden oluşan basitleştirilmiş bina modeli için kinetik enerji, potansiyel enerji ve sanal iş ifadeleri sırasıyla Denklem 1, 2 ve 3'deki gibi yazılabilir.

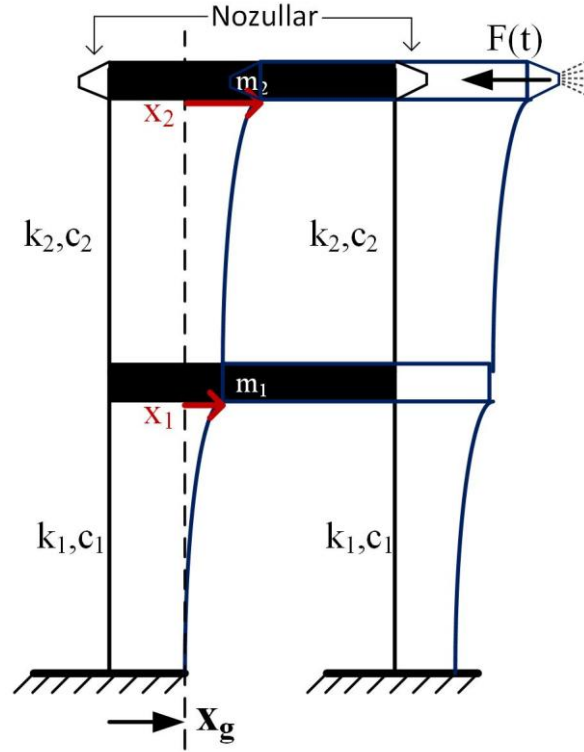
$$T = \frac{1}{2} m_1 (\dot{x}_g + \dot{x}_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (\dot{x}_g + \dot{x}_2)^2 \quad (1)$$

$$V = \frac{1}{2} (2k_1) x_1^2 + \frac{1}{2} (2k_2) (x_2 - x_1)^2 \quad (2)$$

$$\delta W = 2c_1 \dot{x}_1 \delta x_1 + 2c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \delta (x_2 - x_1) - F(t) \delta x_2 \quad (3)$$

Denklem 1, 2 ve 3 ile Şekil 1'de görülen  $m_1$  ve  $m_2$  sırasıyla birinci ve ikinci katların kütleleri,  $k_1$  ve  $k_2$  kolonların eğilme direngenlikleri,  $c_1$  ve  $c_2$  kolonlar için viskoz sönüm katsayıları,  $x_g$  zemin zorlaması nedeniyle oluşan yer değiştirme,  $F(t)$  lüleler vasıtasıyla oluşturulan itme kuvvetidir. Genelleştirilmiş

koordinatlar  $x_1$  ve  $x_2$ , katların zemin yer değiştirmesine göre bağıl yatay yer değiştirmesi olarak seçilmiştir. Sistemin hareket denklemlerini elde etmek için Langrange denklemi kullanılır.



Şekil 1. Zemin uyarımına maruz iki katlı basitleştirilmiş bina şeması

Figure 1. Simplified two-storey building scheme exposed to base excitation

Langrange fonksiyonu (L) ve Langrange denklemi sırasıyla Denklem 4 ve 5'de görülebilir. Burada,  $x_i$  ( $i=1$  ve  $2$ ) olmak üzere, Denklem 1, 2 ve 3'de bulunan ifadeleri Denklem 5'de kullanarak sistemin hareket denklemleri elde edilir. Sistemin hareket denklemlerinin matris formundaki gösterimi Denklem 6'da verilmiştir.

$$L = T - V \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial x_i} = Q_i \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2c_1 + 2c_2 & -2c_2 \\ -2c_2 & 2c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_1 + 2k_2 & -2k_2 \\ -2k_2 & 2k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -m_1 \ddot{x}_g \\ -F(t) - m_2 \ddot{x}_g \end{bmatrix} \quad (6)$$

Denklem 6'da verilen hareket denklemleri gösterimi sadeleştirilirse,

$$[M]\ddot{q} + [D]\dot{q} + [K]q = -[L_c]F(t) - [M][L_g]\ddot{x}_g \quad (7)$$

elde edilir. Burada  $q$  genelleştirilmiş koordinatı,  $(\cdot)$  zamana bağlı türevi,  $[M]$ ,  $[D]$  ve  $[K]$  sırasıyla sistemin kütle, sönüm ve direngenlik matrislerini ifade eder. Denklem 7'nin durum uzayı ile ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir.  $[L_c]$  kontrol kuvvetinin giriş matrisi ve  $[L_g]$  zemin zorlamasının giriş matrisi olmak üzere diğer ifadelerin içerikleri Denklem 9'da verilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= Az(t) + B_c F(t) + B_g \ddot{x}_g(t) \\ y(t) &= Cz(t) \end{aligned} \quad (8)$$

$$z(t) = \begin{bmatrix} q(t) \\ \dot{q}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 2} & I_{2 \times 2} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$B_c = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 2} \\ -M^{-1}L_c \end{bmatrix}, \quad B_g = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 2} \\ -L_g \end{bmatrix}, \quad C = I_{4 \times 4}, \quad L_c = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad L_g = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Denklem 9'da,  $0_{n \times n}$ ,  $n \times n$  boyutlu sıfır matris,  $I_{n \times n}$ ,  $n \times n$  boyutlu birim matris,  $B_c$  aktif kontrol kuvvetinin yerleşimini gösteren girdi matrisidir.  $B_g$  zemin zorlaması için girdi matrisidir ve  $C$  sensörlerin yerlerini gösteren çıktı matrisidir. Tüm durumlar elde edilmek istenirse,  $C$  birim matris olarak seçilir. Sistemin durum uzayındaki ifadesi, sistemin sayısal benzetiminde kolaylık sağlar.

Örnek mühendislik yapısının malzeme ve tasarım parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir. Yapıda kullanılan dört adet dikdörtgen kesitli kolon eş özelliklere sahiptir. Kolonların malzemesi alüminyum olarak seçilmiştir. Kolonların eş dağılımlı eğilme rijitliğine sahip olduğu ve eksenel rijitlikleri büyük olduğu için boyuna uzamadıkları varsayılmıştır.

**Çizelge 1.** Yapının malzeme ve tasarım parametreleri

*Table 1. Material and design parameters of the structure*

Parametre	Sembol	Değer
Elastisite Modülü	E	69 GPa
Uzunluk	L	0.54 m
Genişlik	B	0.05 m
Kalınlık	h	0.004 m
Eğilme Eksen Etrafında Alan Atalet Momenti	I	$2.667 \times 10^{-10} \text{ m}^4$
Sönüm katsayısı	c	0.19 Ns/m
İlk katın kütlesi	$m_1$	3 kg
İkinci katın kütlesi+Lülelerin kütlesi	$m_2$	3 kg

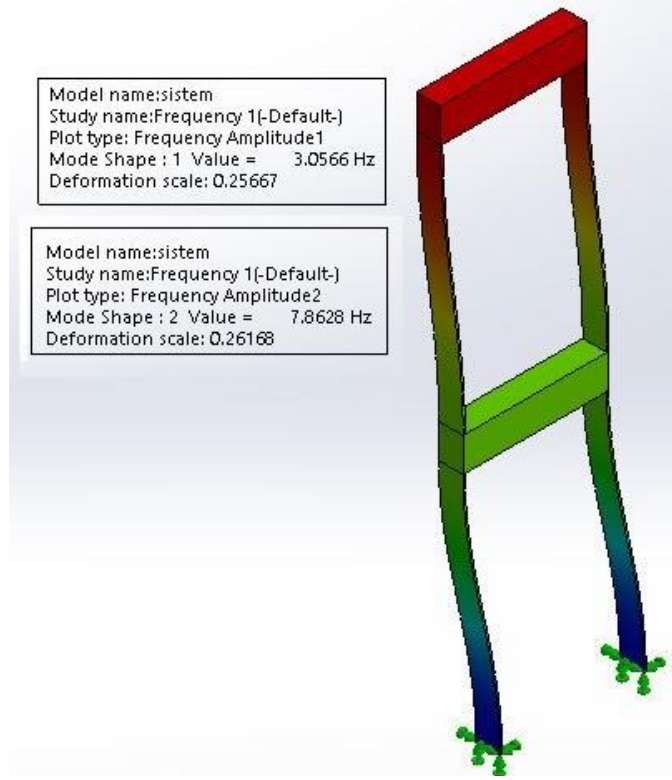
Şekil 1'de görülen yapıda kolonlar zemin ve kütleler arası sabitlenmiştir. Kütlelerin rijit olduğu varsayılarak, Şekil 1'deki her bir kolonun enine direngenlik değerinin formülü (Chopra, 2001),

$$k_{1,2} = \frac{12EI}{L^3} \quad (10)$$

kullanarak kolonların direngenlik değerleri Çizelge 1'de verilen değerler olarak bulunabilir. Sistemin doğal frekanslarının bulunması özdeğer problemidir ve Denklem 11 yardımıyla çözümlenebilir (Chopra, 2001).

$$\det[[K] - w_n^2[M]] = 0 \quad (11)$$

İki serbestlik dereceli olarak modellenmiş sistemin doğal frekansları  $f_1$  ve  $f_2$  sırasıyla 3.00 Hz ve 7.87 Hz olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Şekil 2'de görülebileceği gibi SolidWorks programı ile doğrulanmıştır.



Şekil 2. SolidWorks yazılımı ile sistemin frekans analizi

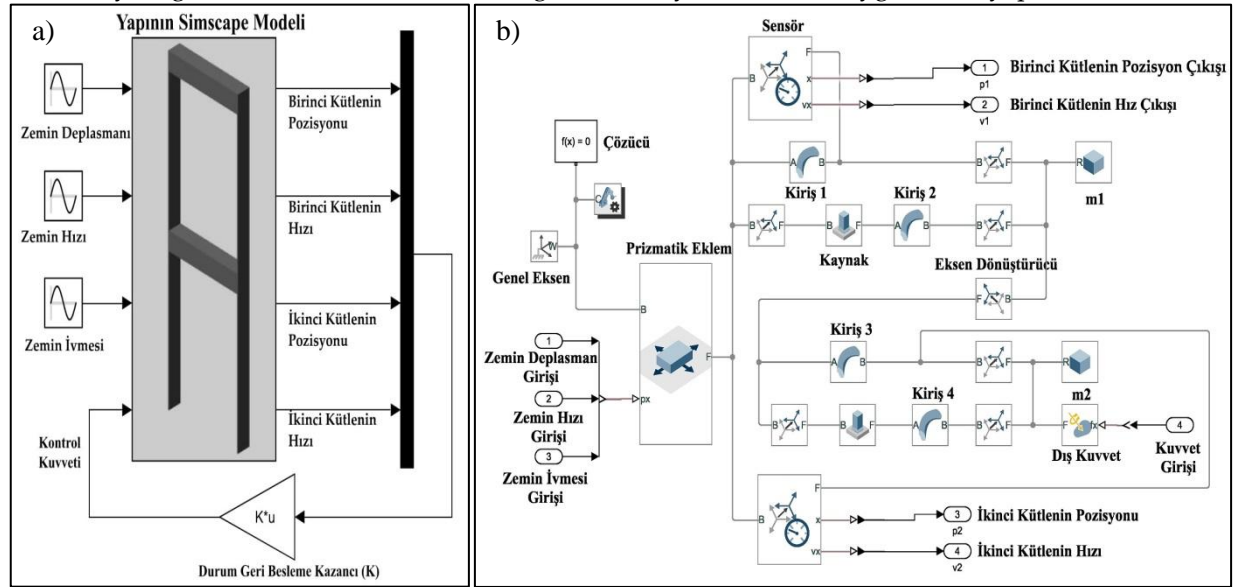
*Figure 2. Frequency analysis of the system with SolidWorks*

### Yapının Matlab Simscape Multibody Modeli (Matlab Simscape Multibody Model of the Structure)

Fiziksel sistemleri modelleyen ve simüle eden Simscape, Simulink'in alt uygulamasıdır. Simscape, Simulink ortamında fiziksel sistemlerin hızlı bir şekilde oluşturulmasını sağlar. Simscape ile, blok şemaları ve diğer model parametreleriyle bütünleşen fiziksel bağlantılara dayalı modeller oluşturulabilir. Gövdeleri, eklemleri, kısıtlamaları, kuvvet elemanlarını ve sensörleri temsil eden bloklar ile çoklu sistemler oluşturulabilir. Simscape Multibody, tüm mekanik sistem için hareket denklemlerini formüle eden ve çözen bir sayısal benzetim programıdır. Robotlar, araç süspansiyonları ve uçak iniş takımları gibi üç boyutlu (3B) mekanik sistemler için çoklu bir benzetim ortamı sağlar. Modeli ve sistem dinamiklerini görselleştirmeyi ve oluşturulan sistemin üç boyutlu animasyonunu sağlar. Mekaniksel sistemlerin hem görselleştirilmesi hem de sonuçların karşılaştırılması ve doğrulanması amacıyla Matlab Simscape Multibody sıklıkla kullanılan bir programdır. Bu programın kullanımıyla, gerçek sistemler üzerinde yapılacak çalışmalar öncesinde ele alınan yapı hakkında önemli bilgiler sağlanabilir.

Bu çalışma için, Simscape modeli üzerinde kurgulanan kontrol şeması ve ele alınan örnek yapının Simscape modeli Şekil 3(a) ve Şekil 3(b)'de sırasıyla verilmiştir. Simscape modelinde, yapının tabanını uyarmak için bir prizmatik eklem kullanılmıştır. Yapıyı ifade etmek için, esnek kiriş ve kütle kullanılır. Kütlelerin tabana göre bağlı yer değiştirmesini, hızını ve ivmesini ölçmek için dönüşüm sensörü kullanılmıştır. Zemin zorlaması yapıya yer değiştirme, hız ve ivme olarak uygulanmıştır. Yapının Simscape Multibody ile modeli ile, hem iki serbestlik dereceli matematiksel model ile sonuçların kıyaslanması ve doğrulanması, hem de Bölüm 4'de anlatılan kontrolcünün Simscape modeline

uygulanarak sonuçların görselleştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu noktada, pnömatik sistemlerin Multibody ile görselleştirilme imkanı olmadığından lüle yerine kuvvet uygulaması yapılmıştır.

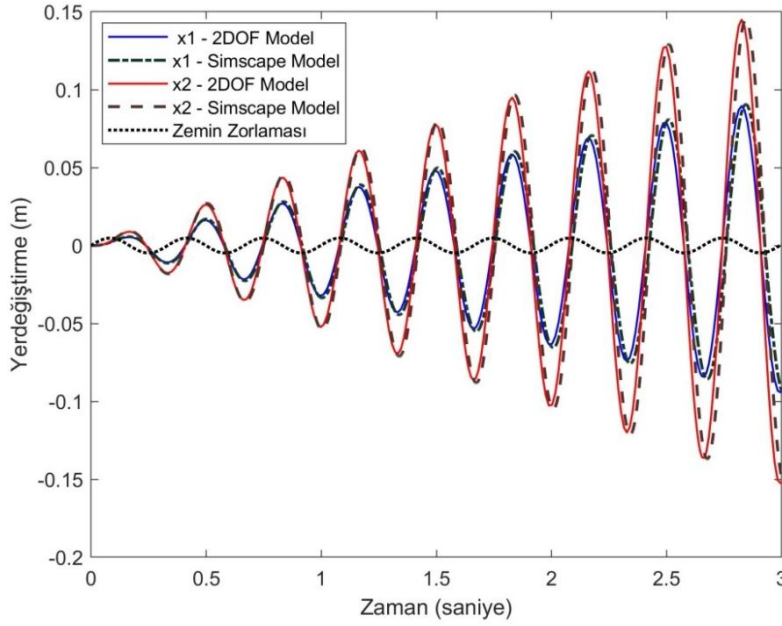


Şekil 3. (a) Simscape Kontrol Şeması, (b) Yapının Simscape Modeli  
Figure 3. (a) Control Scheme in Simscape, (b) Matlab Simscape Multibody Model of the Structure

### HARMONİK ZEMİN ZORLAMASI (HARMONIC BASE EXCITATION)

Yapının zemini, Denklem 12'de verilen belirli genlik ve frekans değeri için sinüsoidal forma sahip tek tonlu bir harmonik yer değiştirmeye maruz bırakılmıştır. Burada,  $U$  uyarma genliği ve  $\Omega$  uyarma frekansdır.  $U$  ve  $\Omega$ , sırasıyla 4.8 milimetre ve 18.9 rad/s (3 Hz) olarak seçilmiştir. Zemin yer değiştirmesinin sinüsoidal olması, yapı üzerinde sinüsoidal ivme değişimlerine ve dolayısıyla dinamik yüklere neden olur. Harmonik zemin zorlaması altında  $m_1$  ve  $m_2$  kütlelerinin yaptığı yer değiştirmeler hem matematiksel model hem de Simscape modeli için Şekil 4'de verilmiştir.

$$x_g(t) = U \sin(\Omega t) \quad \dot{x}_g(t) = U\Omega \cos(\Omega t) \quad \ddot{x}_g(t) = -U\Omega^2 \sin(\Omega t) \quad (12)$$



**Şekil 4.** Zemin zorlaması altında kütlelerin yer değiştirmeleri

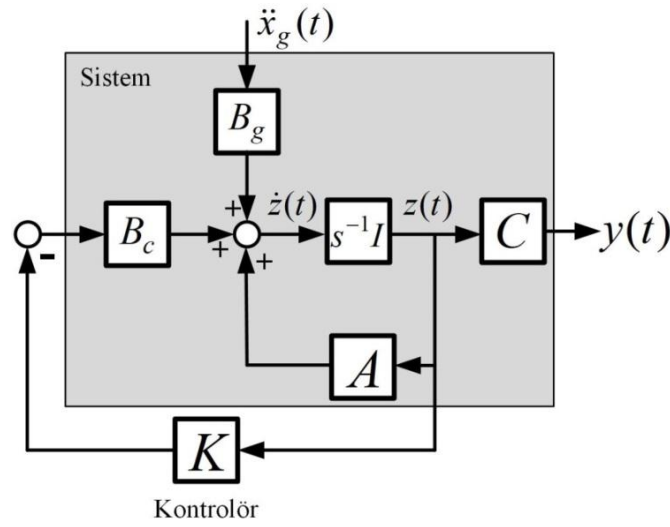
*Figure 4.* Displacement of masses under base excitation

Sistemin birinci doğal frekansına yakın olması açısından, zemin uyarımı frekansı 3 Hz olarak özellikle seçilmiştir. Yapıda bulunan ikinci kütle bu uyarıma genliği için en fazla yer değiştirmeyi bu frekansta yapmaktadır. Aktif titreşim kontrol sisteminin bu zor durumla başa çıkması istenmektedir. Şekil 4'den görüldüğü gibi, zemin zorlaması sistemin birinci doğal frekansında verildiğinde yapının  $m_1$  ve  $m_2$  kütlelerinin yer değiştirmeleri zamanla artmaktadır. Bu, rezonans dediğimiz yapısal problemin ortaya çıktığının göstergesidir. Kütlelerin yer değiştirmesi, zeminin yer değiştirme genliğinin çok üstündedir. Bu durumda, yapının çok uzun süre ayakta kalamayacağı düşünülmektedir. Ayrıca Şekil 4'den görülebileceği gibi, Simscape sonuçları ile iki serbestlik dereceli matematiksel model sonuçları oldukça uyumludur.

#### **AKTİF TİTREŞİM SÖNÜMLEME İÇİN DURUM GERİ BESLEME KONTROL TASARIMI (STATE-FEEDBACK CONTROL DESIGN FOR ACTIVE VIBRATION SUPPRESSION)**

Bu bölümde, yapı için kontrolcü tasarımına yönelik olarak durum geri besleme yöntemi ele alınmıştır. Bu kontrol yönteminde amaç, kapalı devre sistemin kutuplarını, durum geri besleme kazancı ile sistemin istenen zaman cevabını vereceği şekilde yerleştirmektir. Bu yöntem için, tüm durum değişkenleri kontrol edilebilir olmalı ve geri besleme için uygun olmalıdır. Eğer sistem tamamen durum kontrol edilebilir ise, kapalı devre sistemin kutupları durum geri besleme ve uygun durum geri besleme kazanç matrisi ile istenen herhangi bir yere yerleştirilebilir. Böylelikle, kontrolcü tarafından uygulanacak kontrol işareti sayesinde sistem istenen zaman cevabını üretir. Durum geri besleme kontrol sisteminin blok şeması Şekil 5'de görülebilir. Burada,  $A$  sistem matrisidir ve sistemin kutuplarının yerlerini belirler.





Şekil 5. Durum geri besleme kontrol sisteminin blok şeması

Figure 5. Block diagram of the state feedback control system

Bu çalışmada aşağıdaki geribildirim kontrol yasası kullanılmıştır (Kuo ve Bir, 2005).

$$F(t) = -Kz(t) \quad (13)$$

Burada, K durum geri besleme kazancıdır. Denklem 13, Denklem 8'de yerine yazılırsa,

$$\dot{z}(t) = (A - B_c K)z(t) + B_g \ddot{x}_g(t) \quad (14)$$

Geri besleme kontrol yasası gereği K kontrol kazancı sistemin kutuplarını değiştirir. Çünkü eski sistem matrisi [A] yerine artık yeni sistem matrisi [A-B<sub>c</sub>\*K] mevcuttur. Kararlılık ve geçici cevap özellikleri, [A-B<sub>c</sub>K] matrisinin öz değerleri ile belirlenir. Keyfi kutup yerleştirme için gerekli ve yeterli şart kontrol edilebilirliklidir. Kontrol edilebilirlik matrisi (Kuo ve Bir, 2005), Denklem 15'de verilmiştir. Tamamen kontrol edilebilir bir sistem için, M matrisinin "full rank" olması şarttır. Bu çalışma için, kontrol edilebilirlik matrisinin rank'ı 4 olmalıdır.

$$M = \begin{bmatrix} B & AB & K & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (15)$$

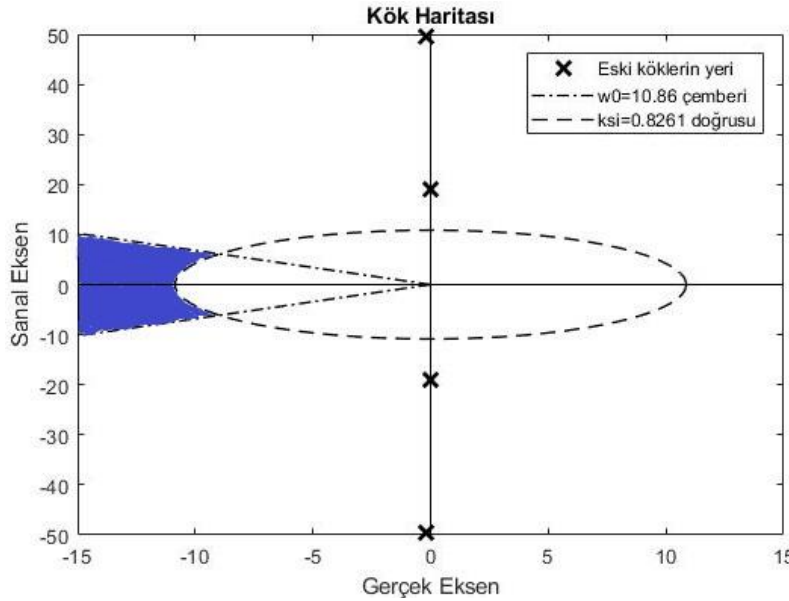
Kapalı devre sistemin yeni özdeğerleri olan kutuplar istenen zaman uzayı özellikleri ile belirlenebilir. Örneğin, sistemin baskın kutuplarının gerçek kısmını 2-3 kat sola kaydırmak, sönüm oranlarında ve sistemin doğal frekansında iyileştirmelere neden olur. Diğer taraftan kutupların sola doğru çok fazla hareket etmesi, kontrol kuvvetinin artmasına neden olur. Bu nedenle, kontrol çabası ile sistem yanıtı arasında bir optimizasyon ilişkisi mevcuttur. Bu optimizasyon problemi, doğrusal kuadratik regülatör (LQR) gibi yöntemler ile çözülebilir. Eğer, kapalı çevrim sisteminin yeni özdeğerleri olan kutuplar istenen zaman uzayı cevabı için belirlenmiş ise, K durum geri kazanım matrisi bulunabilir. K matrisini belirlemek için pek çok yöntem vardır. En çok tercih edilenler, sistem durum denklemini kontrol edilebilir kanonik forma dönüştüren dönüşüm matrisi (T), karakteristik denklemlerin katsayılarını eşitleyen doğrudan ikame yöntemi, Bass-Gura yöntemi ve Ackermann yöntemidir.

Sistemin kutupları, Denklem 9'daki A matrisinin özdeğerleridir. A matrisinin özdeğerleri,  $\det|sI - A| = 0$  formülü yardımıyla bulunabilir. Buna göre, sistemin iki adet eşlenik (toplam dört adet) kutbu,  $-0.1745 \pm 49.4707i$  ve  $-0.0255 \pm 18.8962i$  olarak bulunmuştur. Bu sistemin zemin zorlaması altında hedeflenen zaman uzayı özellikleri, aşımın %1'den ve yerleşme zamanı (T<sub>s</sub>)'nin 0.5 saniyeden az olması şeklinde belirlenmiştir. Bunun için, iki adet eşlenik baskın kutupların sönüm oranının  $\xi > 0.8261$  ve

sönümsüz doğal frekansın  $\omega_0 > 10.86$  (rad/s) olması gerektiği Denklem 16 ve 17’de sırasıyla verilen aşım ve yerleşme zamanı formülleri yardımıyla bulunur. Buna göre köklerin seçilebileceği alan Şekil 6’da mavi renk ile verilmiştir. Mavi renkli alan eksi sonsuza doğru gitmektedir (Kuo ve Bir, 2005).

$$Asim = e^{-\frac{\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \quad (16)$$

$$T_s = \frac{-\ln(0.02\sqrt{1-\xi^2})}{\xi\omega_0} \quad (17)$$

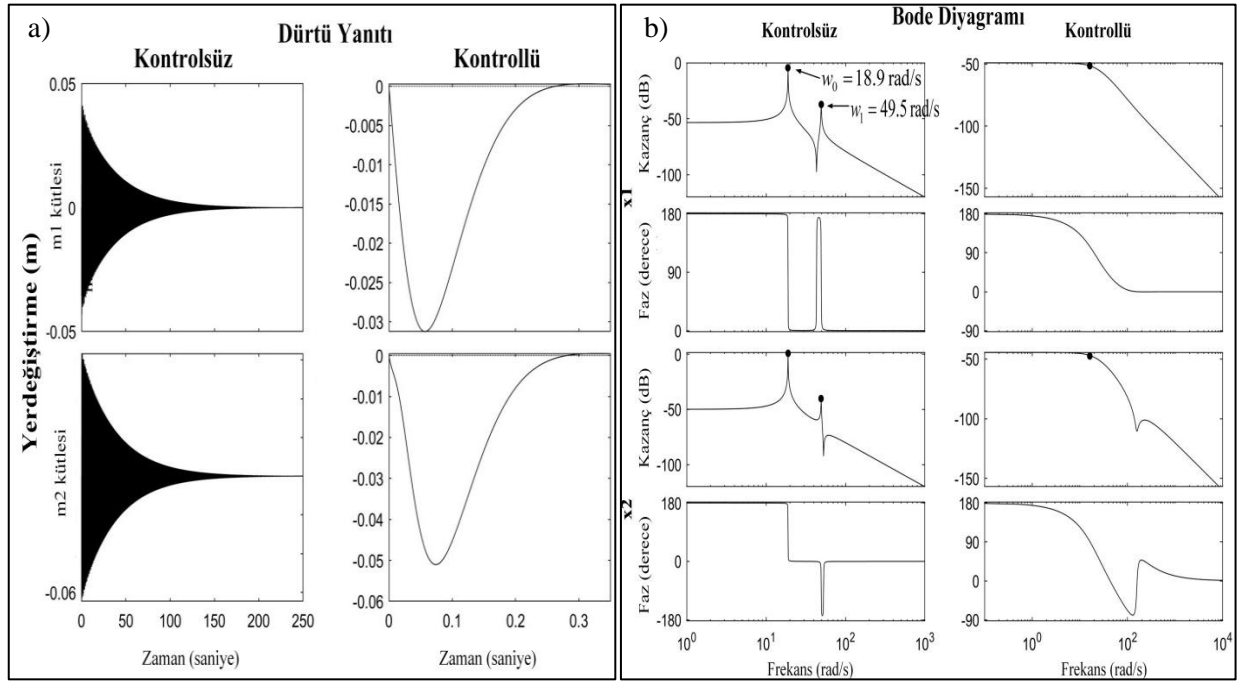


Şekil 6. İstenen zaman cevabı için yeni köklerin yerleri

Figure 6. Locations of the new roots for the desired time response

Diğer kalan iki kutup ise, baskın kutuplardan sol yarı düzleme doğru beş kat uzakta seçilir. Bu kutuplar, baskın kutuplara ne kadar yaklaşırsa geçici cevap üzerindeki etkisi o kadar büyük olur. Baskın kutuplardan ne kadar uzaklaşırsa sistem cevabı o kadar iki kutuplu istenen sistem cevabına benzer. Buna göre, istenen zaman cevabını veren kökler,  $-18.17 \pm 12.398i$  ve  $-90.8694 \pm 12.398i$  olarak seçilmiştir. K durum geri besleme kazanç Bass-Gura yöntemi yardımıyla bulunabilir. Yöntem sonucunda bulunan geri besleme kazanç değerleri  $K = [-65582 \ 37921 \ -44.98 \ 653]$  olarak elde edilmiştir.

K durum geri besleme kazançları ile kontrol edilen ve edilmeyen sistemin bozucu girişinden zemin zorlaması dürtüsü uygulandığında sistemin cevabı Şekil 7(a)'daki gibidir. Sistemin bu bozucu dürtü girişini 0.3 saniyede sönümlendiği gözlemlenmiştir. Böylelikle, istenen zaman cevabı olan yerleşme zamanının 0.5'den az olduğu görülmüştür. Sistemin Bode diyagramı Şekil 7(b)'de görülebilir. Bode diyagramı incelendiğinde kontrolsüz sistemin doğal frekanslar civarında genliğinin yüksek olduğu, kontrollü sistemin ise düşük olduğu görülmüştür. Kontrolsüz sistemin doğal frekanslarında rezonans tepeleri Şekil 7(b)'de belirgin iken, bu rezonans tepeleri  $\xi$ 'nin 0.707'den büyük alınması ile kaybolmuştur. Böylelikle, sistemin doğal frekanslarındaki zemin zorlamasında sistem rezonansa girmez. Sistemin birinci doğal frekansında zemin zorlaması altında kazanç değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 2'de verilmiştir. Bu değerler ile kontrolsüz sistemin birinci doğal frekansında yüksek genliklere sahip olduğu, kontrollü sistemin ise düşük genliklere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 7. (a) Kontrollü ve kontrolsüz sistemin dürtü yanıtı, (b) Bode diyagramı

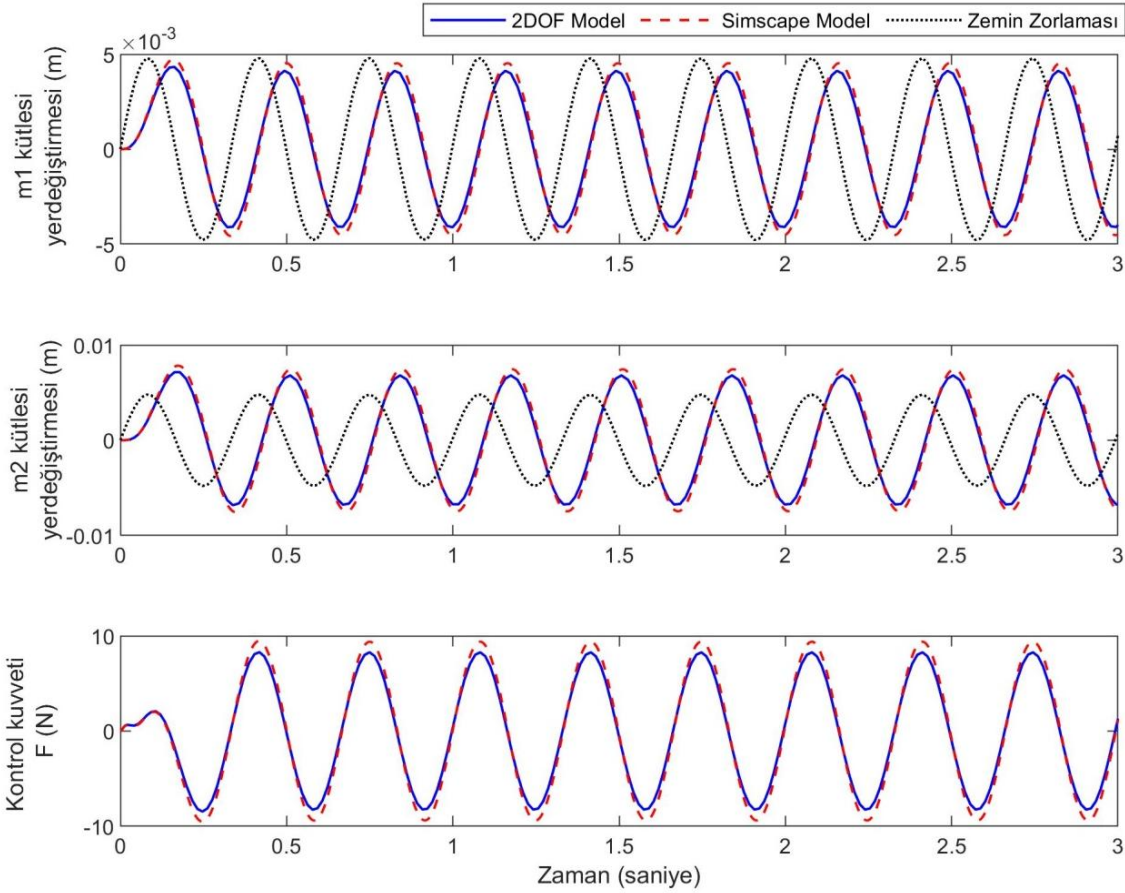
Figure 7. (a) Impulse response of controlled and uncontrolled system, (b) Bode diagram

## Çizelge 2. Sistemin birinci doğal frekansında zemin zorlaması altında Bode kazanç değerleri

Table 2. Bode gain values under base excitation at the first natural frequency of the system

Kazanç (dB) $ M(j18.9) $	Kontrolsüz	Kontrollü
1.kütle (m1)	-2.48	-52.1
2.kütle (m2)	1.7	-47.8

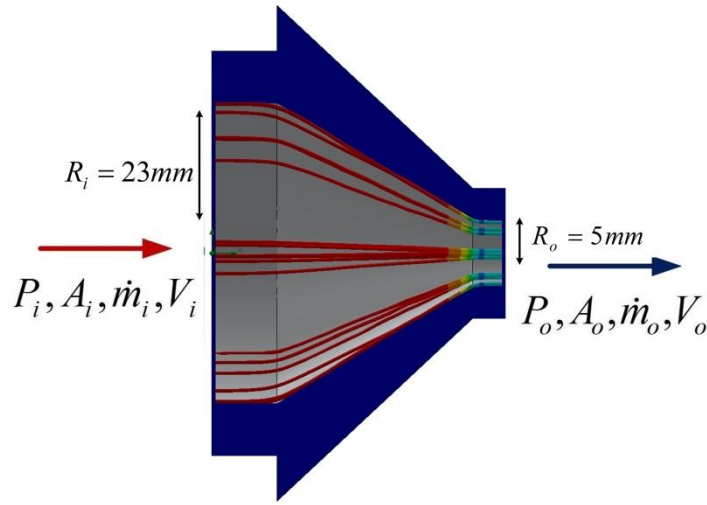
Durum geri besleme ile kontrol edilen sistem, Denklem 12’de verilen 4.8mm genlikli ve 18.9 rad/s açısal frekanslı zemin zorlamasına maruz kaldığında, kütlelerin yer değiştirmesi ve gerekli olan kontrol kuvveti Şekil 8’de görülebilir. Kontrolsüz sistemin cevabının aynı zemin zorlaması için Şekil 4’de görülebileceği gibi sonsuza gittiği bilinmektedir. Şekil 8’e göre sistemin başarılı bir şekilde kontrol edildiği görülmüştür. 4.8mm genlikli harmonik zemin zorlaması için 1. kütle için yer değiştirmesi 5 mm, 2. kütle için yer değiştirmesi 7.5 mm aralığında kalmıştır. Bu veriler ile, kontrol edilen sistemin yer değiştirmesinin zemin zorlaması ile neredeyse aynı seviyeye indiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, Simscape ile matematik model kontrollü sistem için benzer sonucu vermektedir. Bu kontrolü gerçekleştirebilmek için lüleler vasıtasıyla uygulanması gereken kontrol kuvvetinin maksimum 10N olduğu gözlemlenmiştir. Bu kontrol kuvvetini verebilecek şekilde lüle tasarımı ve gerekli basınç miktarı belirlenecektir. Daha önce yapılan çalışmalarda, Brambilla aç/kapa kontrol ile sistemini birinci doğal frekansında zemin zorlamasına maruz bıraktığında yaklaşık %20’lik bir azaltma elde edebilmiştir. Fujimoto ve Cao ise kayan kipli kontrol ile tek katlı bina deneysel modelini hava jet itkileri yardımıyla 0.4 saniye de kontrol etmeyi başarmış olmalarına rağmen, tırlama denilen kontrol işaretinin yüksek frekansta zigzag yapması problemi ile karşı karşıya kalmışlardır. Karaiskos ve diğ. ise %51’lik bir kontrol başarısı elde eder iken, uyguladıkları sınırlandırılmış durum kontrolü değişen uyarımlara veya bozucu girişe karşı duyarsızdır. Bu çalışmada, iki katlı bina modelinin kullanılması ve sadece ikinci katta bulunan birbirine zıt yönlü iki lüle ile aktif titreşim kontrolü literatürde yapılan diğer çalışmalara göre farklılık katar. Ayrıca, kontrolsüz sistem için 3. Saniyedeki ikinci katın yer değiştirmesi 0.15 m’den, kontrollü sistem için 0.005 m’ye düşmesi ile yüksek bir başarıyla titreşimin sönümlendiği hem matematiksel model hem de Matlab Simscape model üzerinden gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Durum geri besleme yöntemiyle kontrol edilen sistemin zemin zorlaması altında cevapları  
 Figure 8. Response of the system controlled by the state-feedback method under base excitation

## LÜLE TASARIMI (NOZZLE DESIGN)

İtke kuvveti, Newton'un üçüncü hareket yasası tarafından açıklanan, bir gaz kütlesinin ivmelendirilmesi ile oluşturulan bir kuvvettir. Gaz veya sıvı bir yöne doğru ivmelendirilirken itke kuvveti oluşturur ve bağlı olduğu sistemi ters yönde harekete geçirir. Gazı hızlandırmak için bir tür tahrik sistemine ihtiyaç vardır. Bu çalışmada, lüle veya nozul diye adlandırılan nispeten basit bir tahrik sistemi kullanılmıştır. Lüle, içinden gaz veya akışkan geçen, çeşitli şekillerde ve boyutlarda olabilen bir tüpe benzer. Bu çalışma için tasarlanan lüle Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu lüle 23 mm giriş yarıçapına ve 5 mm çıkış yarıçapına sahiptir ve 60 mm uzunluktadır. Bu tasarımı sınırlandıran nokta, lülenin maksimum giriş basıncı ile tek akımlı daimi akış olabilmesi ve akışın sıkıştırılmaz kabulü için Mach sayısı (Ma)'nın 0.3'ün altında olması gerekliliğidir (Elger ve diğ., 2000). Mach sayısı, hareket halindeki bir kütlenin hızının, kütlenin bulunduğu şartlardaki ses hızına oranı olarak tanımlanır. Ses hızının 30 derece sıcaklık için 343 m/s olarak kabul edilir ise, lüledeki sıkıştırılmış havanın hızının 100 m/s'den fazla olması halinde hava sıkıştırılmış olur ve yoğunluğu değişir. Bu çalışmada, sıkıştırılmış havanın hızının tüm işlem boyunca 100 m/s'nin altında kaldığı hesaplandığından dolayı havanın sıkıştırılmaz olduğu kabulü yapılmıştır. Dolayısıyla, havanın yoğunluğunun sıcaklık ile değişmediği de kabul edilmiştir.



Şekil 9. Gerekli kontrol kuvvetini elde etmek için tasarlanan lüle

Figure 9. Designed nozzle to achieve the required control force

Lülenin oluşturduğu itki kuvveti, Newton'un ikinci hareket yasasından, zaman içinde bir nesnenin momentumundaki değişikliği yardımıyla bir F kuvveti tanımlayarak bulunabilir.

$$F = \frac{m_o V_o - m_i V_i}{\Delta t} \quad (18)$$

Burada,  $m_i$  ve  $m_o$  sırasıyla giriş kütlesi ve çıkış kütlesi,  $V_i$  ve  $V_o$  giriş hızı ve çıkış hızıdır. Akışkanlarda kütle yerine kütleli debi tanımlanır. Ayrıca, F kuvvetini hesaplarken, çıkış basıncının giriş basıncından farklı olup olmadığını dikkate alan ek bir terim de mevcuttur. Akışta net bir basınç değişimi varsa, momentumda ek bir değişiklik olur. Lüle çıkış alanında, [(çıkış basıncı)-(giriş basıncı)] x giriş alanı'na eşit ek bir basınç kuvveti terimi yazılmalıdır (Elger ve diğ., 2000).

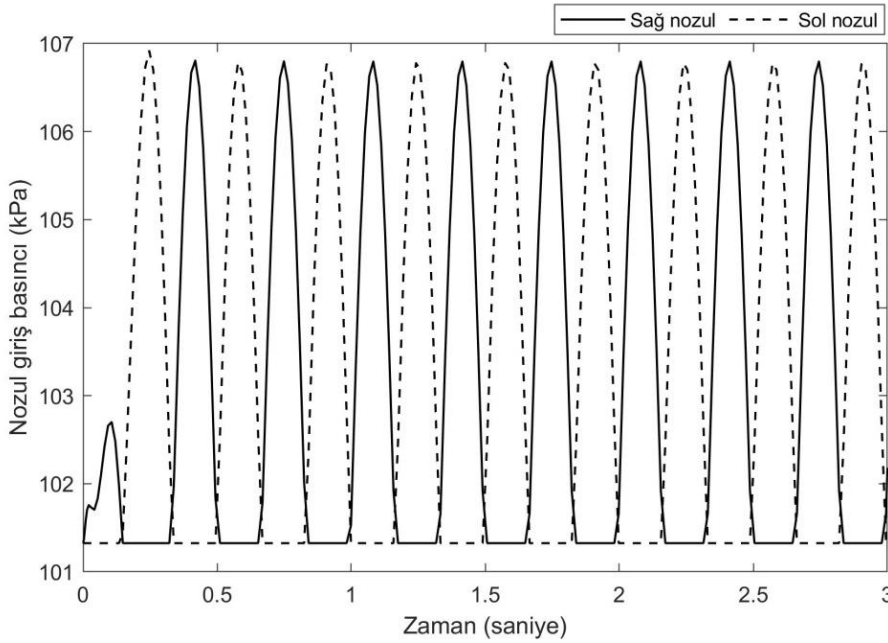
$$F = m_o V_o - m_i V_i + (P_o - P_i) A_i \quad (19)$$

Lülenin giriş basıncı lülenin uyguladığı kuvveti değiştirmektedir. Titreşim kontrolü için lülenin oluşturması gereken itme kuvveti bilinmektedir. Lülenin çıkış basıncı atmosfer basıncıdır. Denklem 20'de verilen Bernoulli denklemi ve Denklem 21'de verilen süreklilik denklemi yardımıyla lülenin girişinde ve çıkışındaki kütleli debi ve hızlar bulunabilir (Elger ve diğ., 2000). Bu değerler Denklem 19'da kullanılarak, istenen itme kuvveti (F) için, gerekli olan giriş basıncı ( $P_i$ ) bulunur.

$$\frac{P_i}{\rho g} + \frac{V_i^2}{2g} + h_i = \frac{P_o}{\rho g} + \frac{V_o^2}{2g} + h_o \quad (20)$$

$$V_i A_i = V_o A_o \quad (21)$$

Sistemin belirlenen koşullar altında kontrolü için gerekli kuvvet Şekil 8'den görülebilir. Şekil 9'da gösterilen lülenin, belirtilen kuvvetleri sağlayacak şekilde sağ ve sol lüledeki giriş basıncı değişimleri Şekil 10'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, lülelerin girişinde maksimum 107 kPa'lık bir basınç ihtiyacı vardır. Bu değişen basınç değerleri, iki lüle için de elektro-pnömatik regülatör ve valfler kullanılarak sağlanabilir. Elektro-pnömatik regülatörler, verilen elektrik sinyaliyle orantılı olarak hava basıncını ayarlarlar. Valfler ise hangi lülenin aktif olacağını belirler. Bu noktada, böyle bir kontrol uygulaması için elemanların çalışma frekansları, çözünürlükleri ve gecikme zamanları önemlidir.



Şekil 9. Gerekli kontrol kuvvetini elde etmek için lüle girişindeki basınç değişimi  
Figure 9. Pressure change at the nozzle inlet to obtain the required control force

## SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Bu çalışma, titreşim kontrolüne yönelik olarak örnek bir mühendislik yapısının modellenmesine, harmonik temel uyarımı altındaki yapısal tepkisinin hesaplanmasına ve kutup yerleştirme yöntemi kullanılarak titreşimlerinin sönümlenmesine odaklanmaktadır. Örnek mühendislik yapısı, iki katlı basitleştirilmiş bir bina modeli olarak seçilmiştir. Bu yapı, iki serbestlik dereceli topaklanmış parametrelili sistem olarak modellenmiştir. Matematik modeli doğrulamak için, yapının Simscape Multibody modeli oluşturulmuştur. Doğal frekans etrafındaki harmonik girdinin neden olduğu titreşim tepkisi yapının dayanıklılığı için çok önemlidir. Bu nedenle, yapının tepkisi, sistemin doğal frekansında uyarılması durumu için elde edilmiştir. Böylelikle, yapının kontrolü için gereken maksimum kontrol kuvvetleri elde edilmiştir. Sonuçlar, mevcut modellerin aynı zemin uyarımı altında aynı yer değiştirmelere sahip olduğunu göstermektedir. Yapının kontrolü için durum geri besleme yöntemi kullanılmıştır. Kapalı döngü kutuplarının belirlenmesi için, zaman uzayı cevabının istenen özelliklerde olması esas alınmıştır. Bu kutuplar için gereken durum geri besleme kazançları belirlenmiştir. Uygulanan durum geri besleme kontrolü ile sistemin rezonans durumu kontrol altına alınmıştır. Yapıya uygulanacak aktif kontrol kuvveti lüle yardımıyla oluşturulacak itki kuvvetidir ve sisteme uygulanmaktadır. Bu itkinin oluşması için lüle tasarımı yapılmış, lüle giriş alanında gerekli olan basınç değerleri bulunmuştur. Hava itkili aktif titreşim kontrolü sisteminin, otomatik dağıtım ve depolama, hafif yapılar, uzay istasyonlarının enerji panelleri, rüzgar türbini, robot manipülatörleri ve değerli eşya taşımacılığı gibi birçok alanda kullanılabileceği düşünülmektedir. Sonraki çalışmalar için bir deney düzeneği üzerinde gerçekçi çalışmaların yapılması planlanmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada önerilen hava jet itkileri ile aktif yapısal kontrol sisteminin, pasif bir kontrol sistemi ile birleştirilerek hibrit bir yapısal kontrol sistemi oluşturulması da düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Aldemir, Ü., Aydın, E., 2005, "Depreme dayanıklı yapı tasarımında yeni yaklaşımlar", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 435(1), ss. 81-89.
- Brambilla, M., 1999, "Design and implementation of a jet actuator for active structural control", *Journal of Structural Control*, 6(1), ss. 117-127.

- Chopra, A. K., 2001, *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*. Prentice-Hall, A.B.D.
- Conker, Ç., Bilgiç, H.H., ve Yavuz, H., 2015, "Esnek sistemlerin aktif titreşim kontrolünde konvansiyonel negatif girdi şekillendirme teknikleri ve gürbüzlüklerinin kıyaslanması", *Uluslararası Katılımlı 17. Makine Teorisi Sempozyumu*, İzmir, 14-17 Haziran 2015.
- Çakan, A., Botsalı, F., Tınkır, M., 2015, "Çeyrek araç modelinde PID ve bulanık mantık kontrolcü ile aktif titreşim kontrolü", *Uluslararası Katılımlı 17. Makine Teorisi Sempozyumu*, İzmir, 14-17 Haziran 2015.
- Elger, D.F., Williams, B.C., Crowe, C.T., Roberson, J.A., 2000, *Engineering fluid mechanics*. Wiley; 7 edition (October 24, 2000).
- Fujimoto, T., Cao, F., 2002, "Sliding mode control of framed structure vibration by an air-pulse actuator", *In Proceedings of the 41st SICE Annual Conference, SICE 2002*, Vol. 5, ss. 3066-3071.
- Gülbahçe, E., Çelik, M., Konya, K., 2015, "Aktif titreşim kontrolü için bir yapının sonlu elemanlar yöntemi ile modelinin elde edilmesi ve PID, PPF kontrolcü tasarımları", *Uluslararası Katılımlı 17. Makine Teorisi Sempozyumu*, İzmir, 14-17 Haziran 2015.
- Karaiskos, G., Papanicolaou, P., Zacharopoulos, D., 2016, "Experimental investigation of jet pulse control on flexible vibrating structures", *Mechanical Systems and Signal Processing*, 76, ss. 1-14.
- Kuo, B. C., Bir, A., 2005, *Otomatik kontrol sistemleri*, Literatür Yayınları, Türkiye.
- Özdemir, A., Maden, D., 2013, "Aktif süspansiyon sistemli çeyrek araç modelinin optimal gözlemleyiciyle kontrolü", *Sakarya University Journal of Science*, c. 17, s.2, ss. 181-187.
- Şanlıtürk, K.Y., Çelikel, S., 2009, "Çamaşır makinası dinamik modeli:serbest ve zorlanmış titreşimler", *14 Ulusal Makina Teorisi Sempozyumu*, ss. 87-97.
- Yüksel, S. B., Foughi, S., 2019, "Betonarme kolonların sargısız ve sargılı beton dayanımının analitik olarak araştırılması", *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c.7, s.3, ss. 611-629.