

# SES ALTI KAVİTE AKIŞLARININ EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ İLE GENELLEŞTİRİLMİŞ BİR MODELİNİN OLUŞTURULMASI

Mehmet Önder EFE<sup>1</sup>, Marco DEBIASI<sup>2</sup>, Peng YAN<sup>3</sup>, Hitay ÖZBAY<sup>4</sup>, Mohammad SAMIMY<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, TR-06530 Ankara, Türkiye, e-posta: onderefe@ieee.org

<sup>2,5</sup>Mechanical Engineering Department, The Ohio State University, OH43210, Columbus, U.S.A., e-mail: debiasi.1@osu.edu

<sup>3</sup>Electrical Engineering Department, The Ohio State University, OH43210, Columbus, U.S.A., e-mail: yan.39@osu.edu

<sup>4</sup>Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bilkent Üniversitesi, TR-06800 Ankara, Türkiye, e-posta: ozbay@ece.osu.edu

*Anahtar sözcükler: Aerodinamik Akışlar, Modelleme, En Küçük Kareler Yöntemi*

## ABSTRACT

*This paper presents a modeling study carried out on an aerodynamic flow system. The experimental setup is a rectangular cavity and the modeling problem is to predict the pressure fluctuations at the bottom of the cavity. A simple structure is used to predict the behavior and a test case has been presented to demonstrate the modeling performance.*

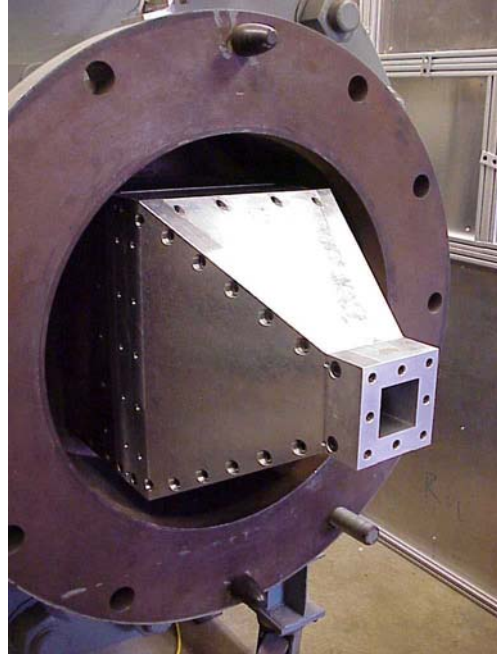
## 1. GİRİŞ

Aerodinamik akışların denetimi son yıllarda özellikle savunma sanayiindeki potansiyel uygulamalarından dolayı ilgi çekmektedir. Bu konuda önde gelen gruplardan biri The Ohio State University’de Collaborative Center of Control Science bünyesinde toplanmıştır. Özellikle ayrışım teknikleri kullanarak akışı temsil eden fiziksel büyüklüklerin baskın kiplerinin elde edilmesiyle Navier-Stokes denklemleri ile tasvir edilen uzayda sürekli prosesi sınırdan kontrol etmeyi mümkün kılacak sonlu boyutlu modellerin elde edilmesi bu grubun çalışma konularındandır. Bu yönde geçmişte yapılmış çalışmalar [1-11] kaynaklarında ve bu kaynaklardan erişilebilecek referanslarda bulunabilir.

## 2. DENEY DÜZENEGİ

Temel olarak ele alınan problem, aktif (geribeslemeli) kontrol uygulayarak hava araçlarının yüzey sürtünmesini azaltabilecek bir mekanizma geliştirmektir. Bu sebeple düşünülen ilk yapı dikdörtgensel bir kavite (oyuk) üzerinde önce ses altı akışlar için model geliştirme, ardından

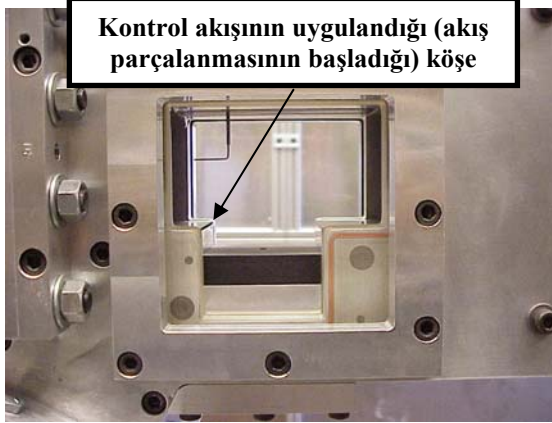
kontrol sistemi tasarımı yapmak şeklindedir. Probleme deneysel bir çözüm üretebilmek için Şekil 1’de gösterilen hava pompası kullanılmış ve huni biçimli bir ağızlık ile istenen Mach sayısındaki akış test kısmına yönlendirilebilmiştir. Test kısmı, Şekil 2’de yakından gösterilen dikdörtgensel bir kaviteden ibarettir.



Şekil 1. Huni ağızlıklı hava pompası

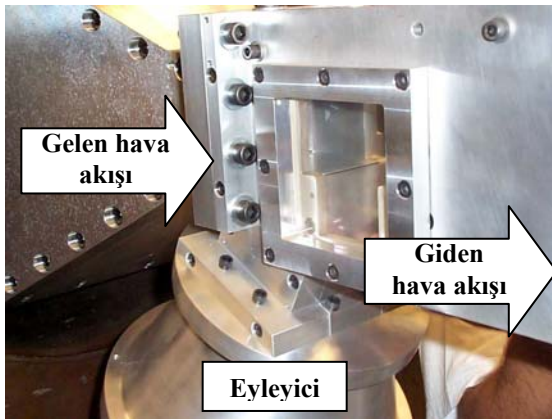
Şekil 2’deki kavite, en = 12.7mm, boy = 50.8mm ve en/boy oranı 1/4 olan bir geometriye sahiptir. Kavite, lazer görüntüleme imkanına elverişli olarak üretilmiş ve her iki tarafından pencereli olarak imal edilmiştir. Bu çalışmada ele alınan problem ses altı

akışlar için ele alınmış, özellikle akışın tek kipli ve çok kipli rezonans arzettiği rejimler de kapsanmış ve geliştirilen model her biri için doğrulanmıştır.



Şekil 2. Dikdörtgenel kavite

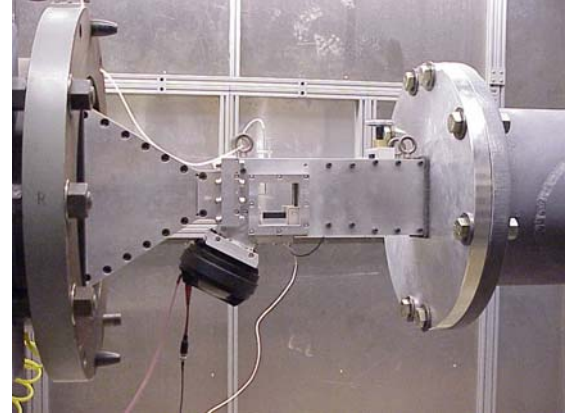
Hava pompası çalıştırıldığında, akış yönündeki basamak geçilir geçilmez akışta kararsız parçalanmalar (separasyon) başlar. Parçalanmış basınç dalgalarının bir kısmı karşı duvara çarpıp geri döner ve kavite içerisinde oldukça karmaşık ve türbülans içeren bir akış alanının ortaya çıkmasına sebep olur. Bu karmaşık akış alanı istenmeyen basınç dalgaları içerir ki bu dalgalar geometrik düzensizliğin sebep olduğu istenmeyen etkilerdir. Bu dalgaların etkisini bertaraf etmek amacıyla parçalanmanın başladığı akış yönündeki köşeden kontrol akışı uygulamak suretiyle toplam sonuca etki etmek bu projede düşünülen yöntemdir. Şekil 2’de ve Şekil 3’te eyleyici ve eyleyicinin sisteme etki ettiği kontrol girişi basamağın köşe kısmında açıkça görülmektedir.



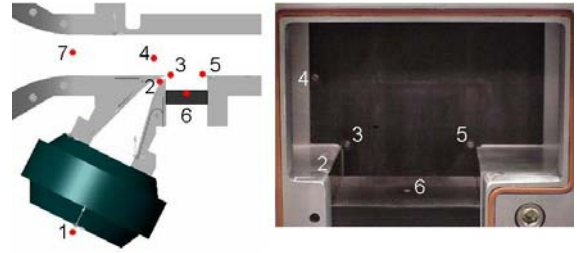
Şekil 3. Dikdörtgenel kavite, kontrol sinyalinin giriş ağız ve sentetik eyleyici

Tüm sistemin genel görünüşü ise Şekil 4’te betimlenmiştir. Hava pompası ile sisteme giren akışkan (hava), sistemi ucu açık bir bağlantı ile terk etmektedir. Kontrol mühendisliği açısından bakıldığında, temel meselelerden birisi sistemden

veri okumaktır. Bu sebeple Şekil 5’te gösterildiği gibi kavite içerisine Kulite dinamik basınç transdüserleri yerleştirilmiştir. Bu yerleşim rastgele yapılmamış, örneğin akıştaki parçalanmanın başladığı nokta gibi ya da kavitenin zemini gibi akış alanının karakteristik özellikler taşıyabileceği kritik noktalar seçilmiştir.



Şekil 4. Tüm sistemin görünümü



Şekil 5. Basınç transdüserlerinin yerleşimi ve numaralandırılması

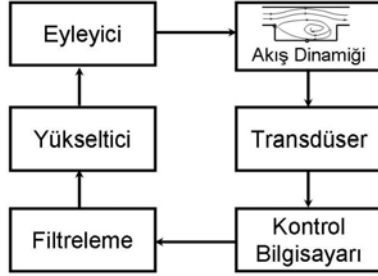
Tablo 1’de her bir transduserin ismi, ölçtüğü büyüklüğün sembolü ve anlamı verilmektedir.

Tablo-1. Ölçülen büyüklükler ve fiziksel anlamları

Trans. No	Değişken	Fiziksel Anlam
S <sub>1</sub>	$u_{1,k}$	Volt olarak kontrol bilgisayarında üretilen eyleyici sinyali değeri
S <sub>2</sub>	$u_{2,k}$	Eyleyici çıkışının hemen öncesindeki basınç sinyali
S <sub>3</sub>	$u_{3,k}$	Eyleyici çıkışının hemen sonrasındaki basınç sinyali
S <sub>4</sub>	$u_{4,k}$	Kavite test kısmı öncesindeki basınç dalgalanmaları
S <sub>5</sub>	$u_{5,k}$	Akıntıya karşı duvar köşesinde oluşan basınç dalgalanmaları
S <sub>6</sub>	$d_k$	Kavite test kısmı tabanında merkezde ölçülen basınç dalgalanmaları

Deney düzeneği öyle tasarlanmıştır ki bu transdüserlerden alınan bilgi ile akış sisteminin

tanılması yapılabilir. Buraya kadar anlatılan sistem akış sistemi idi. Kontrol çevrimini kapatabilmek için yüksek hızlı bir bilgisayar, güç yükseltici ve bant geçiren filtreler ve DSP kartı içeren kontrol bilgisayarı Şekil 6'da görüldüğü gibi bağlanmışlardır.



Şekil 6. Sistem blok diyagramı

Deney düzeneği Dell Precision Workstation 650 model bir kontrol bilgisayarı üzerinde dSpace® 1103 DSP kartı çalıştırmakta, 8 kanaldan eşzamanlı olarak 50 kHz örnekleme frekansında veri okumaya olanak tanımaktadır. Kontrol sinyali (eyleyici çıkışı) Selenyum D3300Ti sıkıştırma sürücüsünün titanyum diyaframının hareketi ile elde edilmekte, eyleyici girişindeki elektriksel sinyal Crown D-150A güç yükseltici ile kuvvetlendirilmektedir. Kullanılan eyleyici belli bir frekans bandında çalışabildiği için güç yükselticiden önce bir bant geçiren bir filtre kullanılmıştır. Filtre 100Hz-10kHz bandındaki sinyalleri seçmekte, bu bandın dışında kalan bileşenleri ise söndürmektedir.

### 3. VERİ TOPLAMA VE MODELLEME

Modelle dayanarak teşkil etmek amacıyla, Tablo 2'de gösterilen çalışma koşulları altında okuma yapılmıştır. Burada eyleyiciyi satüre etmeyecek azami uyarma seviyesine kadar çıkılmış, mümkün olduğunca her frekansın etkisini katmak için gürültü sinyalleri, ve Rossiter frekanslarında uyarımlarla zenginleştirilmiş bir veri kümesi oluşturulmuştur.

$x_k$  değişkeni  $d_k$  değeri için bir tahmin olmak üzere, kurgulanan doğrusal model (1) denkleminde verilen şekildedir. Model için seçilen transdüser sayısı ve her bir transdüserdeki değişkende seçilen gecikme derinliği değiştirilebilir. Burada verilen model, yapılan ön çalışmalar sonucunda en çok bilgi taşıyan yardımcı transdüseri bulmak ve en basit modeli oluşturmak yönünde ortaya çıkmıştır.

$$\begin{aligned} x_k &= \theta_1 d_k + \theta_2 d_{k-1} + \theta_3 d_{k-2} + \\ &\quad \theta_4 u_{3,k} + \theta_5 u_{3,k-1} + \theta_6 u_{3,k-2} + \\ &\quad \theta_7 u_{1,k} + \theta_8 M \\ &= \underline{R}_k^T \underline{\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

Yukarıda verilen modelde  $\underline{\theta} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_8]^T$  vektörü bilinmeyen parametre vektörünü,  $M$  Mach sayısını göstermekte, regresör vektörü ise  $\underline{R}_k = [d_k \ d_{k-1} \ d_{k-2} \ u_{3,k} \ u_{3,k-1} \ u_{3,k-2} \ u_{1,k} \ M]^T$  ile gösterilmektedir. Buna göre,

$$\begin{bmatrix} x_m \\ x_{m+1} \\ \vdots \\ x_{m+p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{R}_m^T \\ \underline{R}_{m+1}^T \\ \vdots \\ \underline{R}_{m+p}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_8 \end{bmatrix} = \Phi \underline{\theta} \quad (2)$$

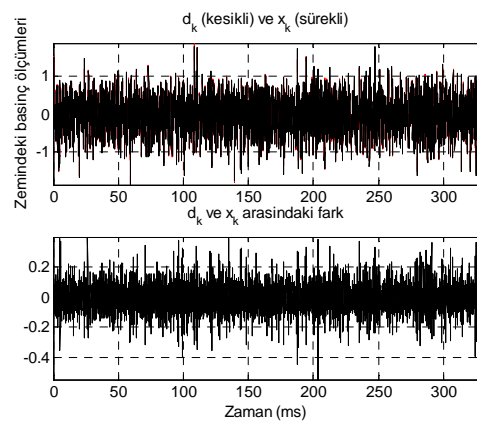
$\underline{\theta}$  değişkeninin en küçük kareler yöntemine göre elde edilebilecek değeri (3) denkleminde verilmektedir.

$$\underline{\theta} = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \underline{D} \quad (3)$$

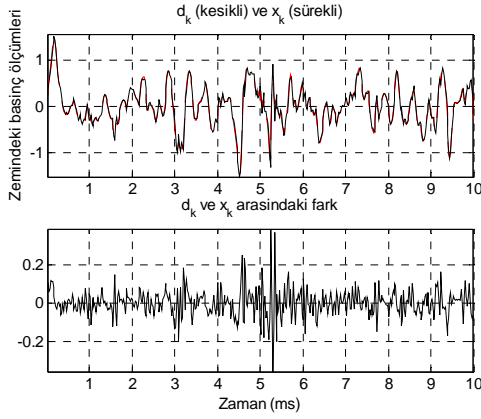
Burada  $\underline{D} := [d_m \ d_{m+1} \ \dots \ d_{m+p}]^T$  dir. Her bir sinyal türünden 16383 adet örnek alınmış ve toplam  $P=17$  adet veri grubu için  $16383 \times P$  adet satırı olan bir  $\Phi$  matrisi oluşturulmuştur.

Tablo 2. Toplanan sinyallerin özellikleri ve rejimi karakterize eden parametreler

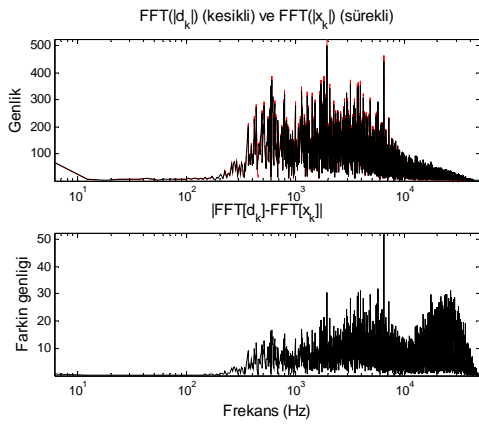
$M$	Sinyal ve rejim özellikleri
0.00	Satürasyon Altında Gürültü
0.00	Sinüzoidal 3.25kHz 2.35V
0.00	Sinüzoidal 3.92kHz 4.06V
0.25	Satürasyon Altında Gürültü
0.25	Sinüzoidal 3.25kHz 2.35V
0.25	Sinüzoidal 3.92kHz 4.06V
0.28	Satürasyon Altında Gürültü
0.28	Sinüzoidal 3.25kHz 2.35V
0.28	Sinüzoidal 3.92kHz 4.06V
0.30	Satürasyon Altında Gürültü
0.30	Sinüzoidal 3.92kHz 4.06V
0.32	Satürasyon Altında Gürültü
0.32	Sinüzoidal 3.25kHz 2.35V
0.32	Sinüzoidal 3.92kHz 4.06V
0.35	Satürasyon Altında Gürültü
0.35	Sinüzoidal 3.25kHz 2.35V
0.35	Sinüzoidal 3.92kHz 4.06V



Şekil 7. (1) modelinin zaman domeninde verdiği sonuçlar.



Şekil 8. (1) modelinin zaman domeninde verdiği sonuçların ilk 10 milisaniyelik kısmı



Şekil 9. (1) modelinin frekans domeninde verdiği sonuçlar.

Simülasyonlarda deney düzeneği Mach = 0.3 rejiminde, 2.35V genliğinde, 3.25 kHz frekansında bir sinüzoidal sinyalle uyarılmış ve veri toplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Burada kullanılan doğrulama sinyali (1) modeli üretilirken kullanılmamıştır. Böylelikle üretilen doğrusal modelin model türetme safhasında yer almayan verilere karşı göstereceği performans da değerlendirilebilecektir. Buna göre, Şekil 7’de modelin zaman domeninde ürettiği sonuçlar gösterilmektedir. Şeklin üst kısmında 16381 ardışık gözlem için (toplam 327.6 milisaniyelik bir süre) hem  $S_6$  transdüserinden okunan veri hem de modelin ürettiği cevap birlikte gösterilmiş, alt kısmında ise bu sinyaller arasındaki fark verilmiştir. Şekil 8’de ise aynı verinin ilk 10 milisaniyelik kısmı gösterilmiştir. Buna göre eğrilerin birbirine yakınlığı ve alt satırda görünen çizimlerdeki farkların küçük olması model basitliğiyle birlikte değerlendirildiğinde oldukça umut veren sonuçlardır.

Aynı verilerle 16384 noktalı hızlı Fourier dönüşümü elde edilmiş ve transdüser sinyalinin ve model çıkışının genlikleri ayrı ayrı hesaplanarak

Şekil 9’un üst kısmında gösterilmiştir. Benzer şekilde, alt kısımda ise sinyaller arasındaki fark zaman domeninde hesaplanmış ve farkın hızlı Fourier dönüşümü elde edilerek bunun genlik eğrisi Şekil 9’un alt kısmında verilmiştir. Eğrilerin birbirlerine yakın olması ve hata genliğinin kabul edilebilir ölçüde küçük olması modelin iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada ses altı kavite akışlarının modellenmesi ve kontrolü amacıyla geliştirilmiş deneysel bir düzenek üzerinde, en küçük kareler yöntemi ile oluşturulabilecek basit bir doğrusal tahmin edicinin başarımı üzerinde durulmuştur. Önerilen yaklaşımın basitliği ve beraberinde gözlemlenen olumlu sonuçlar, dinamik modellerin geliştirilebilmesi yönünde umut verici bulunmuş, kısmi diferansiyel denklemlerle ifade edilen, uzayda sürekli sistemler için yerel gözlemlere dayalı yerel modellerin kurulabileceğini ortaya koymuştur. Aerodinamik akışları betimleyen temel parametrelerden birisi olan Mach sayısının modele bir girdi olarak katılması ve Mach sayısının değişmesine rağmen modelin doğru cevap verebiliyor olması özellikle vurgulanması gereken bir husustur.

#### KAYNAKLAR

- [1] Rowley, C.W., Colonius, T., Murray, R. M., Dynamical Models for Control of Cavity Oscillations, AIAA Paper 2001-2126, May 2001.
- [2] Rowley, C.W., Williams, D. R., Colonius, T., Murray, R. M., MacMartin, D. G., Fabris, D., Model-Based Control of Cavity Oscillations Part II: System Identification and Analysis, AIAA Paper2002-0972, January 2002.
- [3] Rowley, C.W., Modeling, Simulation and Control of Cavity Flow Oscillations, Ph.D. Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, U.S.A., 2002.
- [4] Cattafesta, L.N., III, Garg, S., Choudhari, M., Li, F., Active Control of Flow-Induced Cavity Response, AIAA Paper 97-1804, June-July 1997.
- [5] Cattafesta, L.N., III, Garg, S., Kegerise, M. A., Jones, G.S., Experiments on Compressible Flow-Induced Cavity Oscillations, AIAA Paper 98-2912, June 1998.
- [6] Efe, M.Ö., Debiasi, M., Yan, P., Özbay, H., Samimy, M., Control of Subsonic Cavity Flows by Neural Networks - Analytical Models and Experimental Validation, 43rd AIAA AEROSPACE SCIENCES MEETING AND EXHIBIT, January 10-13, 2005, Reno, Nevada, U.S.A. (AIAA-2005-0294)

- [7] Efe, M.Ö., Debiasi, M., Özbay, H., Samimy, M., Modeling of Subsonic Cavity Flows by Neural Networks, PROC. OF THE INT. CONF. ON MECHATRONICS (ICM'04), June 3-5, İstanbul, Turkey, pp.560-565, 2004.
- [8] Yan, P., Debiasi, M., Yuan, X., Caraballo, E., Efe, M.Ö., Özbay, H., Samimy, M., DeBonis, J., Camphouse, R.C., Myatt, J.H., Serrani, A., Malone, J., Controller Design for Active Cavity Flow, 42nd AIAA AEROSPACE SCIENCES MEETING AND EXHIBIT, January 5-8, Reno, Nevada, U.S.A., 2004 (AIAA 2004-0573).
- [9] Samimy, M., Debiasi, M., Caraballo, E., Malone, J., Little, J., Özbay, H., Efe, M.Ö., Yan, P., Yuan, X., DeBonis, J., Myatt, J.H., Camphouse, R.C., Exploring Strategies for Closed-loop Cavity Flow Control, 42nd AIAA AEROSPACE SCIENCES MEETING AND EXHIBIT, January 5-8, Reno, Nevada, U.S.A., 2004, (AIAA 2004-0576).
- [10] Samimy, M., Debiasi, M., Caraballo, E., Özbay, H., Efe, M.Ö., Yuan, X., DeBonis, J., Myatt, J.H., Development of Closed-Loop Flow Control for Cavity Flows, 33rd AIAA FLUID DYNAMICS CONFERENCE AND EXHIBIT, Orlando, Florida, U.S.A., June 23-26, 2003 (AIAA 2003-4258).
- [11] Samimy, M., Debiasi, M., Caraballo, E., Özbay, H., Efe, M.Ö., Yuan, X., Myatt, J.H., DeBonis, J., Closed-Loop Active Flow Control - A Collaborative Approach, 41st AIAA AEROSPACE SCIENCES MEETING AND EXHIBIT, Jan. 6-9, Reno, Nevada, U.S.A., 2003 (AIAA 2003-0058).