

## Kavite – Kanat Kesiti Etkileşiminin Aeroakustik Analizi

Baha ZAFER\*<sup>1</sup>, Onur Konan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Bölümü, 34309, İstanbul

<sup>2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Makina Bölümü, 34411, İstanbul

(Alınış / Received: 22.03.2016, Kabul / Accepted: 28.10.2016,  
Online Yayınlanma / Published Online: 09.01.2017)

### Anahtar Kelimeler

Kavite akışı,  
Aeroakustik,  
Pasif kontrol,  
Akustik analogi

**Özet:** Sunulan bu çalışmada zamana bağlı sıkıştırılmaz akış alanı ve aerodinamik temelli gürültü iki boyutlu kavite geometrisi için incelenmiştir. İki boyutlu zamana bağlı k-ε türbülans modeli farklı hücum açılı kanat kesiti ve θ-eğimli ön duvar için akış alanı çözümünde kullanılmıştır. Kavite geometrisi için hesaplanan sayısal akış alanı sonuçları deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Ffowcs William – Hawking (FW-H) Akustik Analogisi zamana bağlı akış alanı sonuçları girdi verisi olarak kullanılıp kavite gürültü seviyesi hesaplanmıştır. Kavite – kanat kesiti etkileşiminde pasif kontrol yöntemlerinin akustik sinyal üzerindeki etkisi çalışılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kavite – kanat kesiti ve pasif kontrol mekanizmaları için elde edilen gürültü seviyeleri farklı konumlara yerleştirilmiş mikrofonlar ile incelenmiş ve akış alanı içinde oluşan zamana bağlı yapıların özellikle 0 - 100 Hz aralığında akustik sinyale etkideği tayin edilmiştir.

## Aeroacoustic Analysis of Cavity – Airfoil Interaction

### Keywords

Cavity flow,  
Aeroacoustics,  
Passive control,  
Acoustic analogy

**Abstract:** In this study, unsteady incompressible flow field and aerodynamically generated noise of 2D cavity flows are investigated. In the case of 2D flow fields, unsteady standard k-ε turbulence model is used for flow field to observe for different angle of attack of under different front edge angles. Computed numerical results for cavity are compared and validated with experimental measurement. Unsteady flow fields results are used to compute a cavity noise using Ffowcs William – Hawking (FW-H) Acoustics Analogy. The effect of cavity – airfoil interaction with passive control on the acoustic signal is studied and results are compared. Computed noise levels for cavity - airfoil interaction and passive control mechanism are investigated for microphone which are located at different position and the effect of unsteady flow field structure on acoustic signal especially on the range of 0 – 100 Hz are computed.

\*Sorumlu yazar: baha.zafer@istanbul.edu.tr

## 1. Giriş

Kara araçlarının kapı kenarlarında, boru hatları içinde, bina dış cephe boşlukları veya uçakların mühimmat depoladıkları kısımlarda, mühimmatlarını bırakmalarının ardından oluşan geometri genel olarak kavite olarak isimlendirilir. Kavite geometrisi zaman bağlı türbülanslı akış alanının oluştuğu görece basit mühendislik yapılarıdır. Ancak kavite akış alanında oluşan “zamana bağlı değişkenlerin etkileşimleri karmaşık bir akış alanı” görüntüsü ortaya çıkartmaktadır [1].

Kavite giriş bölgesinden başlayan serbest akım ve kavite ön duvarı öncesinde oluşan sınır tabakası, ön duvardan koparken kavite içine doğru kayma takabası ayrılması oluşturur. Zamana bağlı olarak oluşan bu kayma tabakası ayrılması, kavite içinde vorteks yapılarının oluşmasını beslerken kavite arka duvarı ile etkileşime girer. Vorteks yapılarının “kavite arka duvarı ile etkileşiminin oluşturduğu zamana bağlı basınç salınımları akustik dalgalarının oluşumu” sağlar [2]. Kavite arka duvarından yayılan akustik basınç dalgası ön kavite duvarından kopan kayma tabakası ile etkileşime girerek vorteks kopma frekansını etkiler. Buna bağlı olarak akış alanı içinde oluşan yapıların, zamana bağlı değişimi akustik sinyalin oluşumunu sağlar. Akustik, akış alanını ya da akış akustik basınç dalgası oluşumunu tetikleyerek bağlaşıklık alan fiziğinin (couple-field physics) bu görece basit geometride oluşmasını sağlar. Böylece basit kavite geometrisi içinde iki yönlü bağlaşıklık etkileşim gerçekleşir. Kısaca “zamana bağlı akış alanı akustik alanın oluşumunu beslerken akustik basınç dalgaları akış alanını” etkiler [3]. Bu iki yönlü etkileşimin (two-way interaction) niteliğinin belirlenmesi, bugüne kadar yapılan birçok çalışmada incelenmiştir.

Akış alanı içinde zamana bağlı basınç verilerinde görülen şiddetli salınım hem yüksek sürüklenme kuvvetine hem de yüksek seviyeli gürültüye neden olmaktadır. Dahası yüksek Mach sayısı değerlerinde kavite içinde gerçekleşen şiddetli basınç değişimleri, “yapı üzerinde yorulmaya sebep” olabilir [2]. Hatta uçak mühimmat çıkışından bırakılan her hangi bir cisim şiddetli basınç değişimine bağlı olarak “beklenen yörüngesinin dışına çıkarak uçak gövdesinde hasar oluşturabilecek kazalara” neden olabilir [4]. Bu etkileşimin ve zaman bağlı değişimlerin kavite içindeki kanat kesiti ile etkileşimi ise görece basit olan geometriye önemli bir boyut daha getirmektedir. Kavite akışlarında görülen bu “karmaşık akış etkileşimlerini istenilen değerlerde tutmak için geliştirilen kontrol teknikleri” genel olarak ikiye ayrılmaktadır: pasif ve aktif kontrol [5].

Pasif kontrol yaklaşımlarının öne çıkan en önemli özelliği harici enerji kaynağına ihtiyaç duymaması ve genel olarak geometri üzerinde yapılan küçük değişiklikler ile başarılı sonuçlar alınmasını sağlamasıdır. Bunun yanında, gözönünde bulundurulması gereken olumsuzlukları da bünyesinde barındırmaktadır; sürüklenme kuvvetini arttırmaları, tasarım şartları dışında istenilen verimliliği göstermemeleri gibi. Akış alanının zamana bağlı karakteri düşünüldüğünde bu olumsuzlukların adapte edilebilir teknikler ile yer değiştirmesi gerektiği düşünülebilir. Aktif kontrol teknikleri üzerinde çok fazla çalışılmış ve önemli mühendislik başarıları elde edilmiştir. Ancak “enerji ihtiyacının birçok durumda operasyonel kullanımlar için çok yüksek değerler talep etmesi” nedeniyle uygulamaya çok fazla aktarılamamıştır [6].

“Akış alanı ile akustik alan arasındaki karşılıklı ilişkinin” tayin edilmesi hem deneysel hem de sayısal çalışmalar için

önemli araştırma alanlarından biridir [7]. Aerodinamik basınç değişimleri yanında çok küçük ölçekli akustik basınç alanının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yaklaşımı kullanılarak çözülmesi hem ayrıklaştırma alanının sayısal ağ yapısının sık dokunmasını hem de “yüksek mertebeden ayrıklaştırma şeması” kullanımını gerektirdiğinden [8] “aeroakustik araştırmalarında” Lighthill [9] tarafından teklif edilen Akustik Analoji yaklaşımı sıklıkla kullanılmaktadır. Akustik Analoji yaklaşımında temel esas, akustik sinyalin olduğu kaynak alanı ile yayılma alanını birbirinden ayırmaktır. Böylece akış alanı değişkenlerinin zamana bağlı karakterine göre oluşan büyüklükler gürültü oluşumunun kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Kaynağı tanımlayan değişkenler ise yayılımı veren dalga denkleminin sağ tarafında kaynak terimi olarak alınmaktadır. Böylece kaynaktan tanımlanan “basınç büyüklüğü (akış alanı) ile dalga fonksiyonu içinde tanımlanan basınç (akustik alan)” aynı değildir. İki alan arasındaki ilişki basitleştirilmiştir [10].

Bu çalışmada sesaltı düşük Mach sayısı için kavite – kanat kesiti etkileşimi aeroakustik özellikleri içerecek şekilde incelenmiştir. Akış alanına ait kavite içine yerleştirilen dikey kontrol istasyonlardan alınan sayısal sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Kavite içine yerleştirilen kanat kesiti farklı hücum açıları ile konumlandırılmış ve akış alanı ile akustik sinyal üzerinde oluşturduğu etki araştırılmıştır. Ayrıca pasif kontrol yöntemlerinden geometri değişimi yaklaşımı kavite ön duvarına eğim verilmek suretiyle sayısal olarak çözülmüştür. Hem kavite – kanat kesiti etkileşimi hem de pasif kontrol yöntemine ait zamana bağlı akış alanı değişkenleri Ffowcs William – Hawkings (FW-H) Akustik Analjisi yardımıyla aeroakustik gürültü seviyesinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Elde

edilen akustik sinyaller kavite kanalı, kavite içi ve kavite uzak alanına yerleştirilen farklı mikrofon konumlarına göre incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Akış alanına ait zamana bağlı denklemlerin sayısal ayrıklaştırması ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü Fluent ile gerçekleştirilmiştir. Mekansal ayrıklaştırma için sonlu hacim yaklaşımı kullanılırken zamansal ayrıklaştırma için kapalı şemalar kullanılmıştır. Düşük Mach sayısı durumunda ise basınç temelli çözücü SIMPLE ile akış alanı değişkenleri ayrıklaştırılmıştır [11]. Gerçekleştirilen hesaplamalarda, yakınsama kriteri tüm akış alanı değişkenleri için  $10^{-6}$  alınmış ve hesaplama alanında birim zaman adımı  $10^{-4}$  s olarak alınmıştır. Akış alanına ait korunum denklemleri Eşitlik 1 ve 2’de verilmiştir [11]:

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemleri:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2)$$

Eşitlik 1 ve 2’de yer alan hız alanı,  $p$  basınç, yoğunluk olarak tanımlanmış iken (dinamik) viskozite olarak ifade edilmiştir. Bu çalışmada, duvar yakınındaki akış alanı değişkenlerinin doğru çözümü önem kazandığı için zamana bağlı  $k$ - $\epsilon$  türbülans modeli kullanılmıştır. İki denklemlilikli model ailesine dahil olan bu model, türbülans kinetik enerjisi ( $k$ ) ve türbülans kinetik enerjisi dispasyon oranı ( $\epsilon$ ) için taşınım denklemlerini çözmektedir.

Zamana bağlı k-ε modeli akışın tam gelişmiş olduğu ve duvar yakınında türbülans gerilme tensörü üretim miktarı ile türbülans kinetik enerjisi dispasyonunun eşit olduğu lokal denge durumunu ön kabul olarak alır [11]. Standart k-ε modeli denklemleri aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

Yukarıdaki Eşitlik 3 ve 4'de görülen türbülans viskozitesi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Ayrıca standart k-ε türbülans modelinde serbest akım hız gradyantına bağlı olarak üretilen türbülans kinetik enerji  $G_k$  terimi ile ifade edilmiş ve aşağıdaki tanımlanmıştır:

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (6)$$

Denklemlerin tamamında yer alan katsayılar ise;

$$\begin{aligned} C_{\varepsilon 1} &= 1.44, & C_{\varepsilon 2} &= 1.92, \\ C_\mu &= 0.09, & \sigma_k &= 1.0, \\ \sigma_\varepsilon &= 1.3 \end{aligned} \quad (7)$$

şeklinde verilmiştir [11]. Hesaplama alanı girişinde sınır şartı olarak

türbülans şiddeti % 2 ve uzak alanda % 0 verilmiştir.

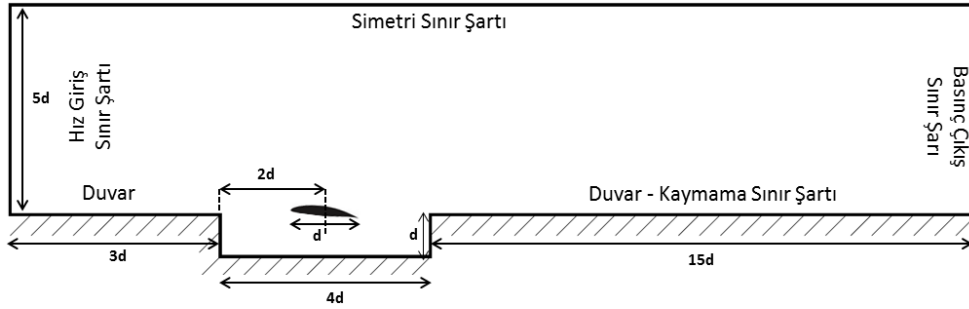
## 2.1. Hesaplama alanı ve sayısal ağ yapısı

Bu çalışmada ele alınan kanal içerisindeki kavite akışına ait hesaplama alanı Şekil 1'de gösterilmektedir. Kavitenin derinliği (basamağı)  $h = d$  ve uzunluğu  $L = 4d$  olarak alınmıştır. Geometriye ait boyutlar Özsoy ve diğerlerinin [12] von Karman Enstitüsünde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalar ile karşılaştırılabilecek şekilde belirlenmiştir. Hesaplama alanı, kavitenin ön duvarından üç basamak uzunluğu kadar önde başlamakta ve kavite arka duvarından itibaren de 15 basamak boyu uzunluğuna kadar devam etmektedir. Böylece kavite içinde oluşan ve arka tarafa doğru yayılan zamana bağlı vorteks yapılarının hesaplama alanı sınırlarına yaklaşmadan sayısal dispasyon etkisiyle bozucu etkisini azaltmaktır. 2 boyutlu sayısal analizde tüm durumlar için aynı ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama alanı iki ana kısımdan oluşmaktadır: kavite içi ve kanal bölgesi. Kavite ön ve arka duvarlarının hemen sonrası ile öncesinde oluşan dinamik vorteks yapılarının doğru analiz edilebilmesi için sayısal ağ bu bölgelerde sıklaştırılmıştır. Ayrıca kavite zemin duvarı civarında zamana bağlı basınç değişimlerinin doğru çözümlenebilmesi için ağ yapısı  $y+$  değerinin tüm duvarlarda 1'den küçük olmasını sağlayacak şekilde sıklaştırılmıştır. Belirlenen geometrik uzunluklar hem boş kavite hem de kanat kesiti içeren kavite için aynı şekilde kullanılmıştır. Üçüncü durumda ise kavite ön duvarına pasif kontrol mekanizmasını sağlaması için eğim verilmiştir, Şekil 2.

Kavite içine yerleştirilen kanat kesiti NACA 0012 olarak seçilmiştir. Kavite ön duvarı hem düz hem de  $\theta$ -eğimli durumlar için 2 farklı hucüm açısı için

incelenmiştir:  $\alpha = 0^\circ$  ve  $\alpha = -5^\circ$ . Ön duvar eğim açısı ise  $\theta = 30^\circ, 45^\circ$  ve  $90^\circ$  (düz ön duvar) olarak alınmıştır, Tablo 1. Ön duvar eğimine bağlı olarak hesaplama alanı ile kavite ön duvarı arasındaki mesafe azalacağından,  $\theta = 30^\circ$  ve  $45^\circ$  için yapılan analizlerde sınır tabaka gelişiminin sağlanabilmesi adına kısalan

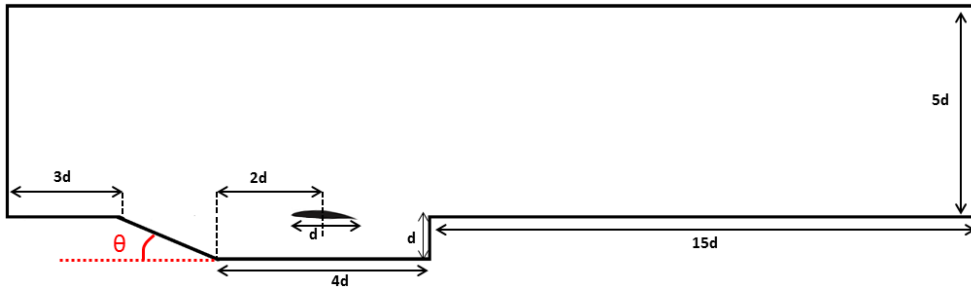
giriş uzunlukları 3 kavite derinliği boyuna uzatılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Reynolds sayısı ( $Re_h = 4000$ ) ve Mach sayısı ( $M = 0.035$ ) için elde edilen hesaplama alanına ait zamana bağlı değişkenler akustik alanın tayininde kullanılmıştır.



Şekil 1. Kavite-kanat kesiti etkileşimi için genel görünüm

Tablo 1. Sayısal olarak incelenen kavite – cisim etkileşimine ait geometri değişkenleri

	Kavite – Kanat Kesiti Etkileşimi	Hücum açısı $\alpha$	Ön duvar açısı $\theta$
Durum 1	-	-	$90^\circ$
Durum 2	Var	$0^\circ$	$90^\circ$
Durum 3	Var	$-5^\circ$	$90^\circ$
Durum 4	Var	$-5^\circ$	$45^\circ$
Durum 5	Var	$-5^\circ$	$30^\circ$



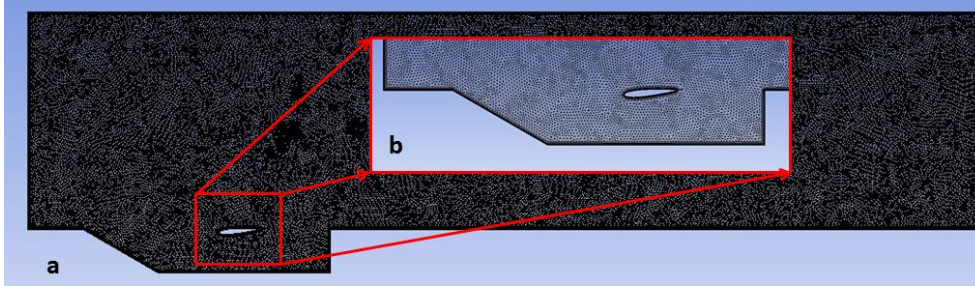
Şekil 2.  $\theta^\circ$ -eğimli kavite-kanat kesiti etkileşimi için genel görünüm

Sayısal ağ yapısı, hesaplama alanı girişinden gelen serbest akımın duvar üzerinde oluşturacağı sınır tabakayı

yakalayacak şekilde duvar yakınında sık dokunmuştur.

Ayrıca kavite ön ve arka duvarlarından kopan ve etkileşen vorteks yapılarının doğru çözümlenmesi için bu bölgelerde de sayısal ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Sayısal ağ örgü sayısı boş kavite için 104.120 hücreden oluşurken, kavite-kanat kesiti etkileşimde kullanılan ağ

yapısında 116.410 hücre ve ön duvar eğim açısı  $30^\circ$  için 132.300 ile  $\theta = 45^\circ$  için ise 128.356 hücre bulunmaktadır. Kavitenin içine kanat kesitinin yerleştirildiği analizlerde ise, sayısal ağ yapısı cisim yakınında sıklaştırılarak oluşturulmuştur, Şekil 3a-b.



**Şekil 3.** (a) Kavite - kanat kesiti etkileşimi sayısal ağ yapısı genel görünümü, b) Kavite ön duvarı eğimli kanat kesiti yakın çevresinde sıklaşan ağ örgüsü (detay kırmızı çerçeve ile gösterilmiştir)

## 2.2. Aeroakustik model

Aerodinamik temelli oluşan sesin anlaşılmasında ve teorik bir zemine oturtulmasında en önemli adım 1950'li yıllarda Lighthill [8] tarafından atılmıştır. Lighthill süreklilik ve momentum korunum denklemlerini dalga denklemi formunda yazarak kaynak terimli yeni bir denklem elde etmiştir. Temelde, akışın uzak ile yakın alanını birbirinden ayırmıştır yani sesi üreten kaynak ile sesin yayıldığı ortam arasında hiçbir etkileşim olmadığını kabul etmiştir. Aeroakustikte geliştirilen bu yaklaşım Akustik Analoji (AA) olarak bilinmektedir. Lighthill denklemi tüm akış alanında ve hiçbir katı yüzey olmadığında ya da katı yüzeyin etkisi ihmal edildiğinde geçerlidir. Lighthill denklemleri herhangi bir şekil ve herhangi bir hız büyüklüğüne sahip yüzey için Ffowcs Williams ve Hawkins (FW-H) tarafından genelleştirilmiş fonksiyonlar teorisi kullanılarak yeniden tanımlanmış ve genelleştirilmiştir [13]. FW-H denklemlerinde de sol taraf dalga denklemi formunda iken sağ tarafta üç kaynak terimi tanımlanmıştır.

Bunlar en genel anlamlarıyla kalınlık (thickness), yük (loading) ve quarupol (quadropole) terimleridir. Bu denklemde sağ taraftaki kaynak terimlerinden ilk quadrupol terimi iken tanımı eşitlik 7'de verilmiştir. İkinci terim ise yük terimi ve sonuncusu ise kalınlık terimi olarak tanımlanmıştır:

$$\frac{1}{\alpha_0} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - \nabla^2 p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{[P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f)\} + \frac{\partial}{\partial t} \{[\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f)\} \quad (7)$$

Eşitlik 7'de  $u_i$  akış hızının  $x_i$  doğrultusundaki bileşeni,  $u_n$  akış hızının yüzey normali doğrultusundaki bileşeni iken,  $v_i$  yüzey hızının  $x_i$  doğrultusundaki bileşeni ve  $v_n$  yüzey hızının yüzey normali doğrultusundaki bileşendir.  $\delta(f)$  ve  $H(f)$  sırasıyla Dirac Delta ve Heaviside fonksiyonunu

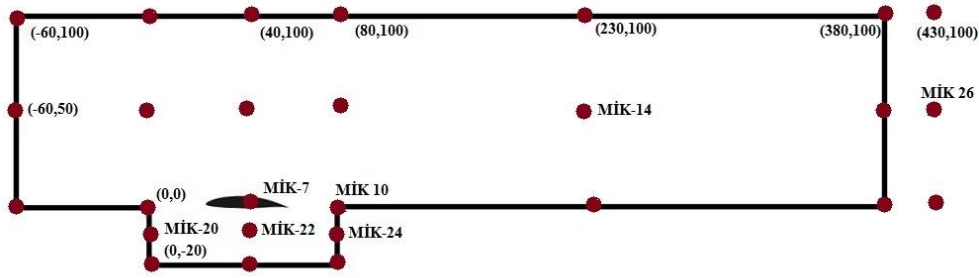
işaret etmektedir.  $p'$  uzak bölgedeki ses basıncıdır ( $p' = p - p_0$ ).  $f = 0$  ise sınırsız uzaydaki dış akış probleminde ( $f > 0$ ) matematiksel bir yüzeyi belirtir. Bu matematiksel yüzey gerçek bir yüzey ile üst üste gelebileceği gibi akış alanı içinde geçişkenli (permable surface) yüzey olarak da tanımlanabilir. Böylece teorik incelemeyi ve tanım fonksiyonunu genelleştirmeyi kolaylaştırır ve serbest uzayda Green fonksiyonu çözümleri geçerli olur.  $T_{ij}$  Lighthill gerilme tensörü Eşitlik 8'de tanımlanmıştır.

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (8)$$

$P_{ij}$  basınçlı gerilme tensörüdür. Stokes akışları için şu şekilde verilir;

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (9)$$

Akış alanı içinde hesaplanan zamana bağlı değişkenlerin girdi olarak kullanıldığı Akustik Analoji yaklaşımında boş kavite, kavite-kanat kesiti etkileşimi ile  $\theta$ -eğimli kaviteye ait akustik sinyal sonuçları hesaplama alanı içine yerleştirilen 27 mikrofon kullanılarak hesaplanmıştır, Şekil 4. Bu mikrofonlar önce kavite kanalı boyunca ardından kavite içine ve son olarak uzak alana yerleştirilmiş ve bu sıralamaya göre numaralandırılmıştır.



Şekil 4. Kavite hesaplama alanı içine yerleştirilen mikrofon konumları

Ses Basınç Seviye (SPL)'si hesaplanmasında kullanılan bağıntı Eşitlik 10'da verilmiştir;

$$SPL = 20 \log_{10} \left( \frac{p'}{P_0} \right) \quad (10)$$

$p'$  akışa ait zamana bağlı akustik basınç değeri iken,  $P_0$  ise insan kulağının duyacağı minimum ses basıncını göstermektedir.  $P_0$  referans basınç değeri  $2 \times 10^{-5}$  [Pa] olarak kabul edilir. Bu referans değeri insan kulağının duyabileceği en düşük ses seviyesini işaret etmektedir. Bu değer altındaki

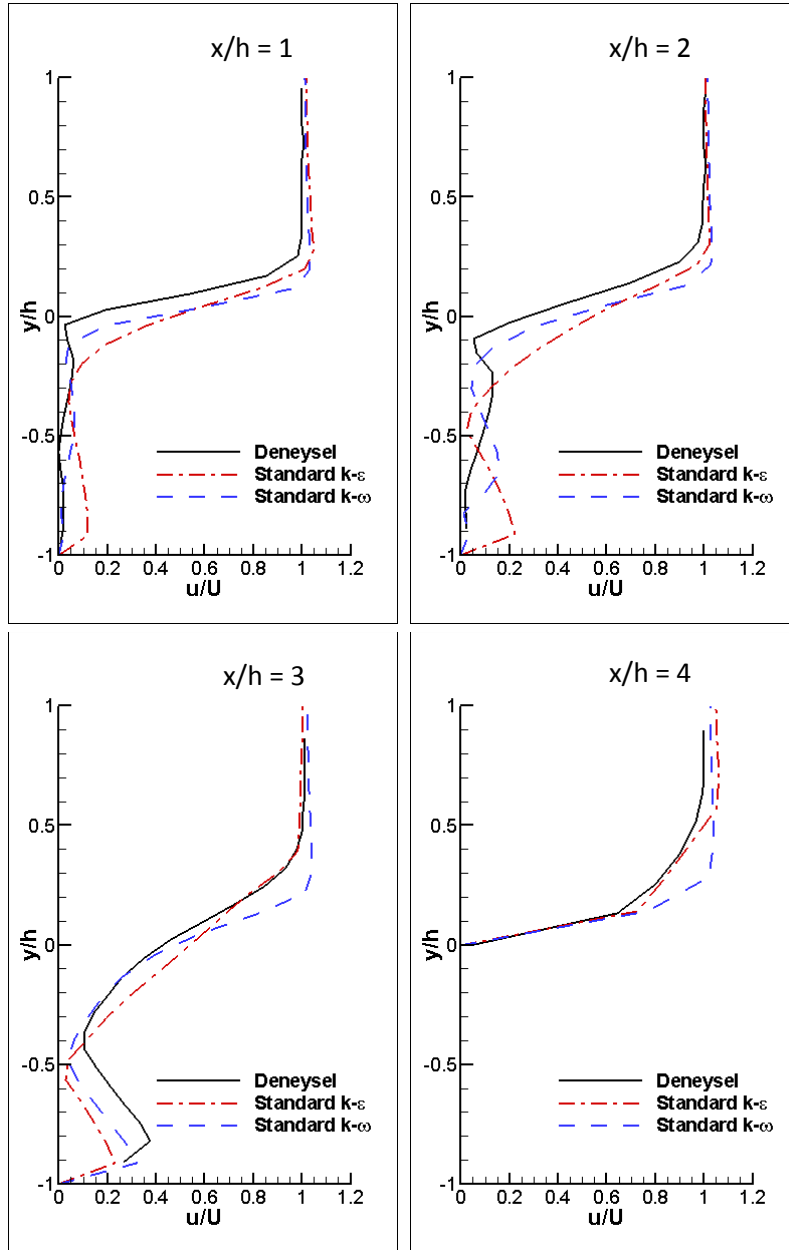
sesler insan kulağı tarafından duyulmamaktadır. SPL ölçeğinde baktığımızda ise kulağın duyamayacağı ses negatif dB değeri ile ifade edilmektedir. Negatif SPL değerlerinin fiziksel bir anlamı yoktur.

### 3. Bulgular

Düşük Mach sayısı için deneysel çalışmalar çok fazla gerçekleştirilmemiş olsa da son dönemlerde Parçacık Görüntülemeli Akış Ölçümü (Particle Image Velocimetry - PIV) ölçüm tekniğinin gelişmesine bağlı olarak farklı kavite geometrileri için ölçüm sonuçları literatüre kazandırılmaktadır [14]. Bu çalışmada kavite içi sayısal akış sonuçları, L/D oranı 4 için PIV ölçüm

teknîği ile elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaya ait ayrıntılar, Özsoy ve diğerlerinde [12] bulunabilir. Hesaplama alanı girişine deneysel veriler ile karşılaştırılacak

şekilde üniform hız profili 2.92 m/s olarak verilmiş,  $Re_h$  değeri 4000 alınmış ve toplam hesaplama süresi olan 1.28 s'ye kadar 128,000 yinleme adımı kullanılmıştır.



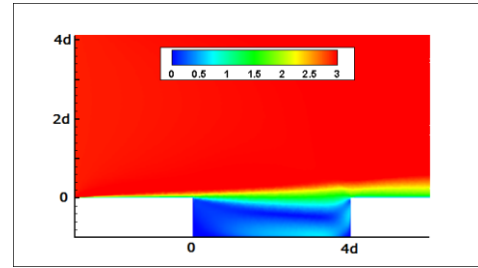
Şekil 5. İki farklı türbulans modeli için 2 boyutlu kavite içi hız profilleri



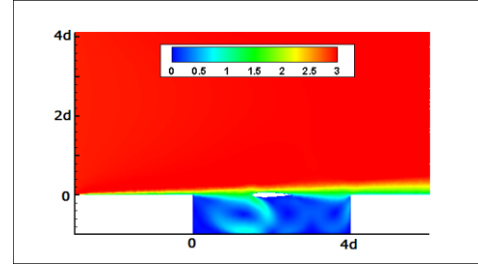
İkinci durumda ise, kavite geometrisinin orta eksenine kanat kesiti konulmuş ve farklı hücum açıları için sayısal çözüm gerçekleştirilmiştir. İncelenen son durumda ise, ikinci durumda olduğu gibi kavite ortasında kanat kesiti olacak şekilde, kavite ön duvarı üç farklı  $\theta$ -eğim açısı için incelenmiştir. Şekil 5'de kavite ön duvarı kavite içi ve kavite arka duvarının hemen üzerinden alınan hız profilleri zamana bağlı  $k$ - $\epsilon$  türbülans modeli ile hesaplanmıştır. Ayrıca Zafer ve Coşgun [15] tarafından elde edilen  $k$ - $\omega$  türbülans modeli ile birlikte deneysel veriler karşılaştırılmıştır. Kavite içine yerleştirilen dört farklı dikey profilden ( $x/h = 1,2,3$  ve  $4$ ) veri alınmış ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Özellikle  $x/h = 3$  ve  $x/h = 4$  istasyonlarında görülen büyük vorteks yapısına ait hız profilleri için kabul edilebilir aralıkta uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Zamana bağlı akış alanı çözümleri 5 farklı durum için incelenmiş ve Şekil 6-8'de verilmiştir. Kavite ön duvarından kopan kayma gerilme tabakasının kavite içinde oluşturduğu vorteks yapılarının cisim ile etkileşimi ve ön duvar eğimine bağlı davranışları hız büyüklüğü, akım çizgileri ve girdap (vorticity) kontörleri göz önüne alınarak incelenmiştir. Boş kavite için ön duvardan kopan kayma gerilme tabakası kavite içinde çok şiddetli hız alanı değişimi oluşturmadan arka duvara ulaşmış ve kavite kanalı ile içi arasında perde vazifesi görmüş gibidir, Şekil 6a. Ön duvar eğimi  $\theta = 90^\circ$  için boş durum ve kavite içinin tam ortasına konulan NACA 0012 kanat kesiti ile kavite – kanat kesiti etkileşiminin akış alanına olan etkisi gözlemlenmiştir. Kanat kesiti için hücum açısı  $\alpha = 0^\circ$  alındığında kavite arka duvarı ile etkileşen kayma gerilme tabakası kalınlığının azaldığı görülmüştür. Ayrıca ön duvardan kopan kayma tabakası kanat kesiti hücum kenarı ile etkileşime girerek kavite içinde vorteks yapılarının oluşumunu

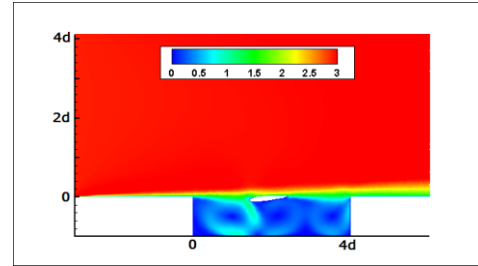
tetiklemiştir, Şekil 6b. Kavite orta noktasına konulmuş kanat kesiti hücum açısı  $\alpha = -5^\circ$  olarak alındığında ise, yine kavite içinde üç adet vorteks yapısı oluşmuştur. Oluşan vorteks yapıları Şekil 7b-c'de verilen akım çizgileri gösteriminde de açıkça görülmüştür. Ancak ikinci durumda oluşan vortekslerin hız değerleri yaklaşık olarak  $1$  m/s olarak hesaplanmıştır, Şekil 6c. Bu hücum açısı  $\alpha = 0^\circ$  olan durumdan iki kat fazla hız değeri ölçüldüğünü göstermektedir.



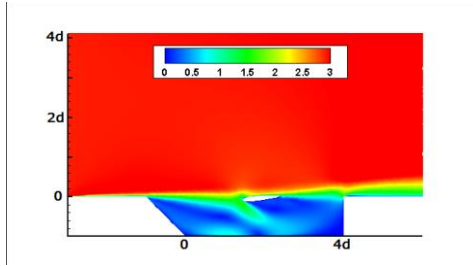
(a)



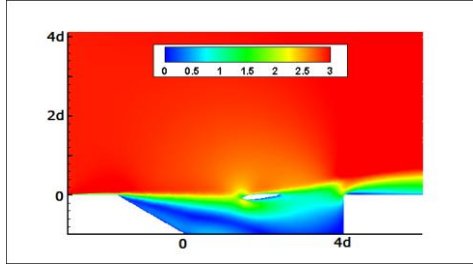
(b)



(c)



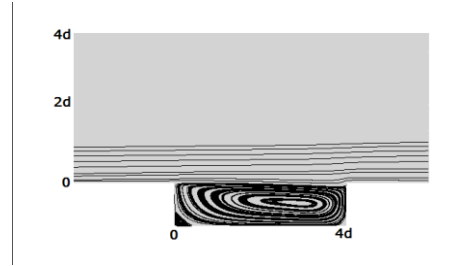
(d)



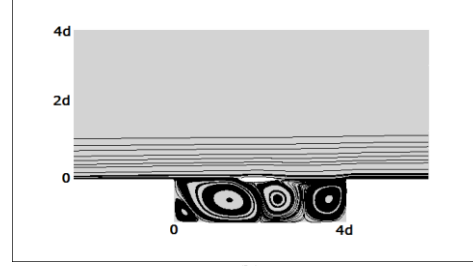
(e)

**Şekil 6.** (a) Boş kavite (1.Durum), (b)  $\theta = 90^\circ - \alpha = 0^\circ$  'li cisim (2.Durum), (c)  $\theta = 90^\circ - \alpha = -5^\circ$  'li cisim (3.Durum) (d)  $\theta = 45^\circ$  kavite girişli  $\alpha = +5^\circ$  'li cisim (4.Durum), (e)  $\theta = 30^\circ$  kavite girişli  $\alpha = -5^\circ$  'li cisim (5.Durum) için zamana bağlı hız kontörleri.

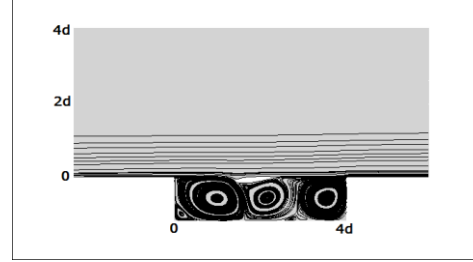
Durum III'de incelenen profile ait hücum açısı korunmakla birlikte kavite ön duvarına eğim verildiğinde, akış alanı içinde görülen üçlü vorteks sistemi kaybolmuştur, Şekil 6d-e. Ön duvar açısı  $\theta = 45^\circ$  için kanat kesiti hücum kenarı yakın alanında oluşan hız dağılımı ile firar kenarı yakın bölgesinde görülen hız dağılımı arasındaki fark 2 m/s civarında iken ön duvar açısı  $\theta = 30^\circ$  'lik durum için aynı hız farkı 1.2 m/s olarak hesaplanmıştır. Tüm bunlara ek olarak Şekil 6e' de verilen en düşük ön duvar eğimli durum için, kavite arka duvarında görülen kayma gerilme tabakası - duvar etkileşimi, şiddetli bir geçiş bölgesini oluşturduğunu işaret etmektedir.



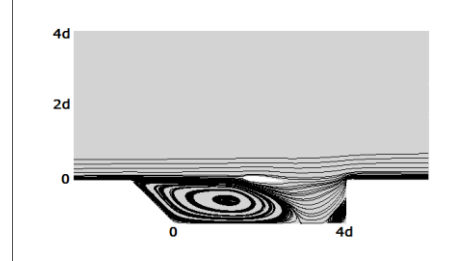
(a)



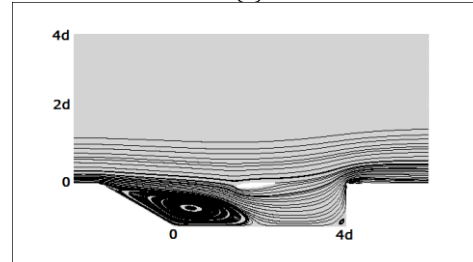
(b)



(c)



(d)

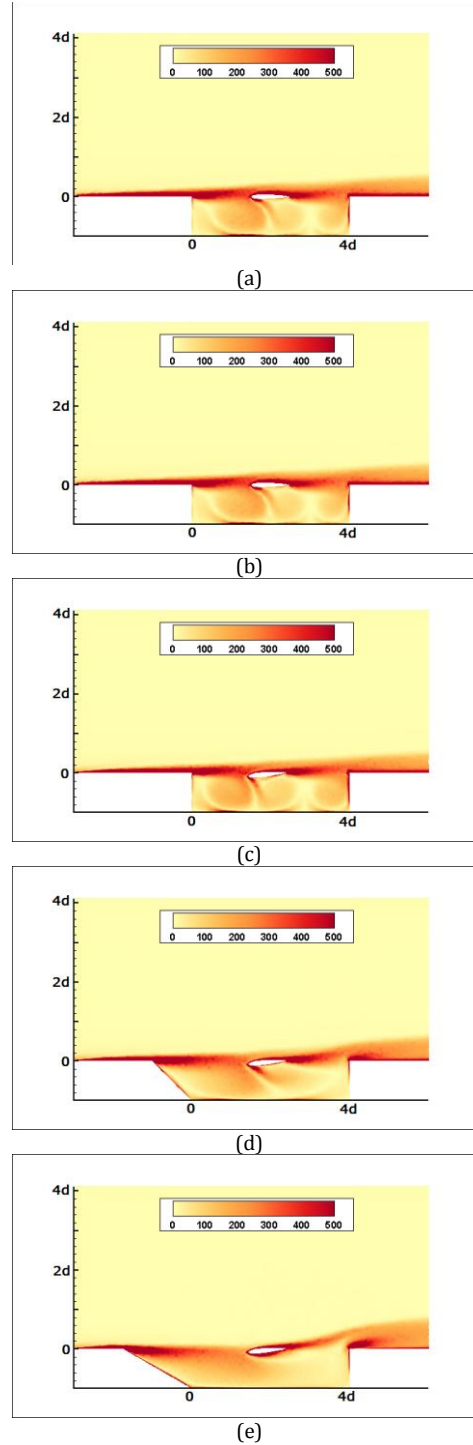


(e)

**Şekil 7.** (a) Boş kavite (1.Durum), (b)  $\theta = 90^\circ - \alpha = 0^\circ$  'li cisim (2.Durum), (c)  $\theta = 90^\circ - \alpha = -5^\circ$  'li cisim (3.Durum) (d)  $\theta = 45^\circ$  kavite girişli  $\alpha = +5^\circ$  'li cisim (4.Durum), (e)  $\theta = 30^\circ$  kavite

girişli  $\alpha=-5^\circ$ 'li cisim (5.Durum) için akış alanında görselleştirilen akım çizgileri.

Akış alanı içinde incelenen değişkenler ise akım çizgileri ve girdap (vorticity) dağılımıdır. Kavite ön duvarından kopan kayma gerilme tabakası içinde oluşan girdap yapısı ve arka duvar yakınındaki girdap yapıları tüm durumlar için açık olarak görülmektedir, Şekil 7a-e. Kavite ortasına yerleştirilen kanat kesiti durumunda ise hücum açısından bağımsız olarak her iki durumda da kavitede içinde üç farklı vorteks yapısı daha önce belirtildiği gibi gözlemlenmiştir, Şekil 7b-c ve Şekil 8b-c. Hücum açısı  $\alpha = -5^\circ$ 'li durumda ise, kanat kesiti arkasında görülen girdap yapısı negatif yönlü hücum açısına bağlı olarak sadece firar kenarı yakın bölgesinde yoğunlaşmıştır, Şekil 8c. Kavite – kanat kesiti etkileşime bağlı olarak kanat kesiti üzerinden kopan vorteks yapıları ile kavite arka duvarı arasında hiçbir etkileşimi görülmemiştir. Girdap kontör dağılımında, boş kavite değerlerine göre değişim görülmemiştir. Bunda oluşan vorteks yapılarının kavite içinde lokal olarak konumlanmasının etkisi belirleyicidir. Ancak kavite ön duvarına eğim verildiğinde, kanat kesiti üzerinden oluşan vorteks yapısı ile kavite arka duvarı arasında etkileşim gözlemlenmiştir.  $\theta = 45^\circ$  kavite girişli durumda kanat kesiti arkasında kopan vorteks yapısının kavite arka duvarı ile etkileşimi en yüksek değerin görüldüğü bölgenin genişlemesine neden olmuştur, Şekil 8d. Ayrıca  $\theta = 30^\circ$  için ise, cisim üzerinden kopan vorteks kavite arka duvarı ile etkileşimi en yüksek ve en yayılı değerine ulaşmıştır, Şekil 8e. Son durumda ön duvar ile kanat kesiti etkileşiminden oluşan vorteks yapısının kavite içine doğru değil kavite arka duvarına doğru ilerlediği görülmüştür.



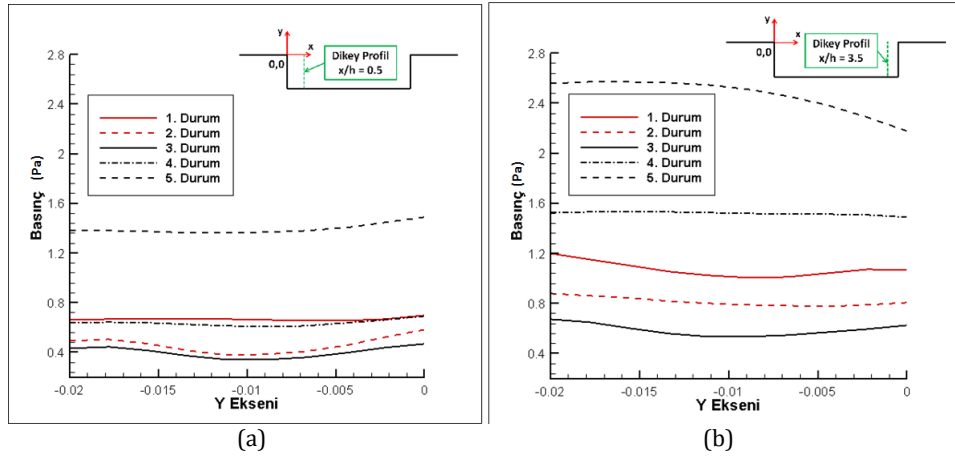
Şekil 8. (a) Boş kavite (1.Durum), (b)  $\theta = 90^\circ - \alpha=0^\circ$  'li cisim (2.Durum), (c)  $\theta = 90^\circ - \alpha=-5^\circ$  'li cisim (3.Durum) (d)  $\theta = 45^\circ$  kavite girişli  $\alpha=+5^\circ$ 'li cisim (4.Durum), (e)  $\theta = 30^\circ$  kavite

girişli  $\alpha=-5^\circ$ ’li cisim (5.Durum) için zamana bağlı girdap (vorticity) kontörleri.

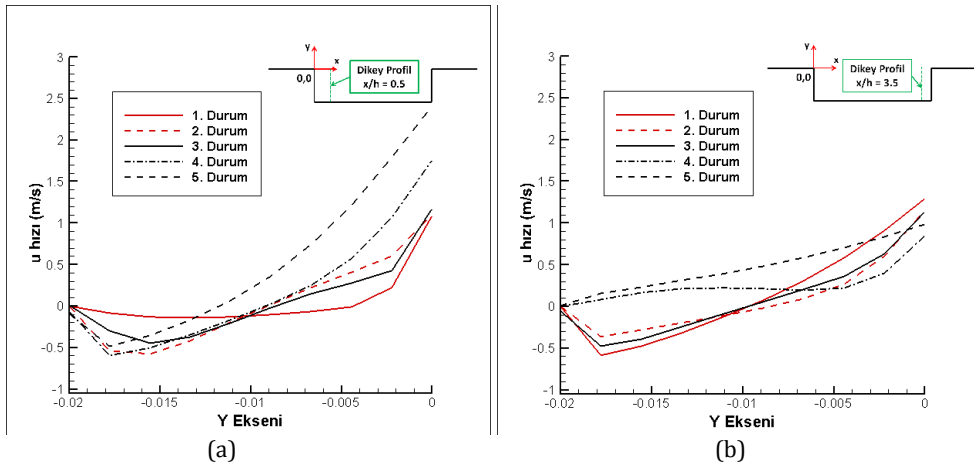
Kavite – kanat kesiti etkileşimine ait problemlerde tasarım aşamasında öncelik arka duvar bölgesindeki akış alanına ait değişkenlerin şiddetinin diğer bölgelere göre daha düşük olmasıdır [9]. Bu cisim üzerine etkiyen akış alanı büyüklüklerinin güvenli aralıkta tutulması için önemlidir. Arka duvar bölgesinde artan akış alanı değişken değerleri cisim üzerine etkiyen kuvvetleri belirleyecek ve cisimin tahliyesi sırasında dengesiz çıkışına neden olacaktır. Kavite içinde  $x = 0.5h$  ve  $x = 3.5h$  konumlarına yerleştirilen veri profilleri üzerinden akış alanına ait hız ve basınç değerleri alınmıştır. Kavite ön duvarı yakınında konumlanan veri profili üzerindeki ortalama statik basınç değerleri incelendiğinde en yüksek değerin  $\theta = 30^\circ$  eğimli ön duvar için hesaplandığı görülmektedir. Hesaplanan değer diğer dört durumun tamamından en az iki kat fazladır, Şekil 9a. Aynı şekilde arka duvar yakınına

yerleştirilmiş veri çizgisi incelendiğinde ise, yine en yüksek ortalama statik basınç değerinin  $\theta = 30^\circ$ ’lik kavite için elde edildiği görülmektedir. Bu sonuçlar ışığında ön duvar eğiminin  $\theta = 45^\circ$ ’den  $\theta = 30^\circ$ ’ye düşürülmesi bu bölümde incelenen tüm akış alanı sonuçlarına bağlı olarak pasif kontrol yöntemleri açısından istenilen etkiyi oluşturmamıştır.

Ayrıca  $\theta = 45^\circ$  için hesaplanan ortalama statik basınç değerleri  $x = 0.5h$  konumundan alınan değerler için boş kavite durumu ile yakın sonuçları verirken  $x = 3.5h$  konumunda ön duvarın  $\theta = 45^\circ$  açı verildiği durumda basınç verisinde iki durum arasında % 30’luk fark gözlemlenmiştir, Şekil 9a-b. Genel olarak beklenildiği gibi kavite ön duvarında elde edilen ortalama statik basınç değerleri ile arka duvar civarında hesaplanan sonuçlar arasında incelenen tüm durumlar için yaklaşık iki katlık artış görülmüştür.



Şekil 9. (a) 0.5h, (b) 3.5h konumuna yerleştirilen veri çizgilerindeki ortalama statik basınç değerleri.



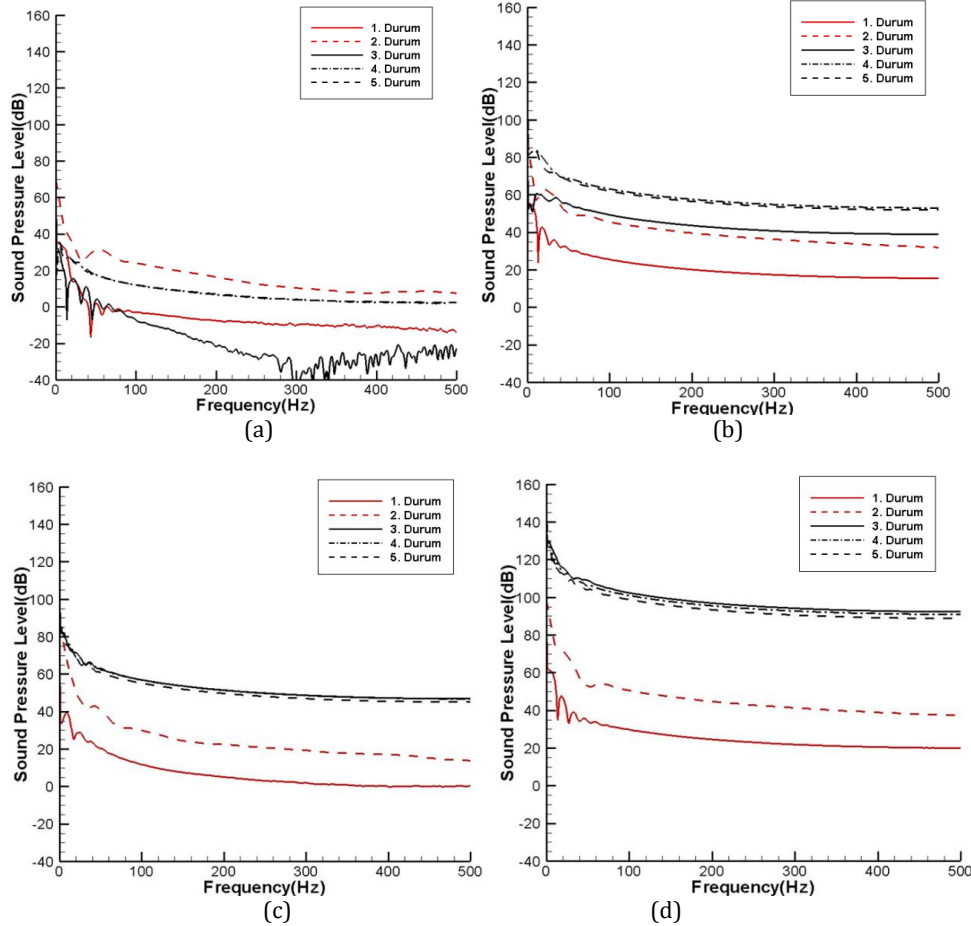
Şekil 10. (a) 0.5h, (b) 3.5h çizgilerindeki hız değerleri

Kavite içine yerleştirilen iki farklı konumdaki veri profillerinden alınan akım yönündeki hız bileşenleri incelendiğinde  $x = 0.5h$  konumunda boş kavite durumu için kavite alt duvarından  $y = -0.005$ 'e kadar hız dağılımı görülmemişken ( $u = 0$  m/s), kavite ağzında  $y = 0$  noktasında  $u = 1$  m/s değerine ulaşmıştır. Ön duvar açısının  $\theta = 90^\circ$  korunduğu Durum 2 ve Durum 3 içinde en yüksek hız değeri kavite ağzında  $u = 1$  m/s olarak hesaplanmıştır. Ancak son iki durumda kavite içine konulan cisim ile etkileşen kayma gerilem tabakasının kavite içine yönlendirdiği akış yapısına bağlı vorteks oluşumu nedeniyle  $u$  hızında negatif değer gözlemlenmiştir, Şekil 10a. Boş kavite durumu hariç incelenen durumların tümünde, kavite-kanat kesiti etkileşimi kaynaklı negatif hız dağılımı kavite basamak boyunun yarı konumuna ( $y = -0.01$ ) kadar görülmüştür. Sadece kavite ön duvar açısının  $\theta = 30^\circ$  alındığı durumda  $u = 0$  m/s hız değerine ait konum  $y = -0.013$  mm'de hesaplanmıştır. Aynı zamanda kavite ağzındaki ( $y = 0$ ) serbest akım yönündeki hız değeri tüm durumlar için en yüksek değerine ulaşmıştır,  $u = 2.5$  m/s, Şekil 10a. Kavite arka duvarına yakın konumda alınan veri profili üzerinde ise, en yüksek hız değeri tüm

durumlar için 1 m/s olarak gözlemlenmiştir, Şekil 10b. Ön duvar eğiminin  $\theta = 45^\circ$  ve  $\theta = 30^\circ$  alındığı her iki durum içinde  $x = 3.5h$  konumunda vorteks yapıları Şekil 8d-e'de görselleştirildiği gibi gözlemlenmemiştir ve buna bağlı olarak  $u$  hız değişkenleri pozitif değer almıştır. Diğer durumlarda ise  $u = 0$  m/s konumu her üç konfigürasyon içinde yaklaşık olarak  $y = -0.007$  mm'de hesaplanmıştır, Şekil 10b.

Akış alanına ait zamana bağlı basınç değişimleri Eşitlik 10 kullanılarak Ses Basınç Seviyesi (SPL) değerlerine Fourier Frekans Transformasyonu (FFT) uygulandıktan sonra frekansa bağlı olarak elde edilmiştir, Şekil 11. Dört farklı mikrofon üzerinden akustik sinyalin belirlenmesi için veri alınmıştır. Bu mikrofonlardan ilki arka duvar sonrasında kanal ortasında  $y = 230$  mm konumuna Mik. 14, kavite gürültüsüne ait uzak alan etkisini ölçmek için yerleştirilmiştir. Son üç mikrofon ise kavite içinde sırasıyla kavite ön duvarı (Mik. 20), cisim altı (Mik. 22) ve arka duvarı (Mik. 24) olmak üzere kavite basamak yüksekliğinin yarı boyuna konumlandırılmıştır, Şekil 4. Boş kavite ve hücum açısı  $\alpha = 0^\circ$  lik kanat kesiti yerleştirilmiş ön duvar açısı  $\theta = 90^\circ$  olan kavite konfigürasyonları incelendiğinde,

tüm mikrofon konumları için 100 Hz yaklaşık 20 dB' lik gürültü artışı frekansından yüksek frekanslar için gözlenmiştir, Şekil 11a-d.



Şekil 11. Kavite akışına ait SPL-frekans değerleri (a)14.mikrofon (b) 20.mikrofon (c) 22.mikrofon ve (d) 24. Mikrofon.

Kavite içine yerleştirilmiş mikrofonlar incelendiğinde Şekil 11b-d, hücum açısının  $\alpha = -5^\circ$  alınması durumunda kavite içinde kayma gerilme tabakasının cisim ile etkileşiminden oluşan vorteks yapılarının gürültü seviyesinin belirlenmesinde önemli olduğu görülmektedir. Kavite ön duvarında konumlu Mik. 20'de Durum 2 ve Durum 3 arasında ölçülen Ses Basınç Seviyesi (SPL) 20 dB civarında iken kavite ortasında (Mik. 22) bu değer 30 dB ve son olarak arka kavite üzerinde konulan Mik. 24 için yaklaşık olarak

50 dB' lik değer hesaplanmıştır. Bu değerlerin şiddetli artışı kavite içine yerleştirilen cismin eğim açısının önemini göstermektedir. Ayrıca ön duvar açısının etkisi incelendiğinde ise, Mik. 22 ve Mik. 24 konumları için akustik sinyalin her iki ön duvar açısı içinde önemli bir değişiklik vermediği görülmüştür, Şekil 11c-d. Diğer taraftan uzak alan gürültü seviyeleri ölçüldüğünde ise, ön duvar açısının derecesi önemli olmamakla birlikte genel olarak akustik gürültü değerlerinde yaklaşık 8-10 dB' lik

azalmaya neden olduğu görülmektedir, Şekil 11a. Ayrıca tüm mikrofon konumları için SPL – frekans dağılımı incelendiğinde 100 Hz'den küçük değerlerin akustik sinyal açısından önemli olduğu görülmüştür. Zamana bağlı akış alanı içinde akustik sinyale etkiyen yapılar genel olarak 0 – 100 Hz'de kendilerini göstermektedir. Daha yüksek frekans değerleri için akış alanında oluşan yapıların etkisi frekans değeri arttıkça önemsiz kalmaktadır.

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışmada görece basit olmasına rağmen akış-akustik alan etkileşimlerinde önemli bir yer tutan kavite akışı incelenmiştir. Akış alanına ait zamana bağlı değişkenler sıkıştırılmaz sonlu hacimler ayrıklaştırma şeması kullanılarak çözülmüştür. Kavite akışı kapalı basınç temelli zaman ayrıklaştırması ile k-ε türbülans modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Akış alanına ait zamana bağlı değişkenler FW-H akustik analogi yaklaşımında girdi olarak kullanılmış ve kavite içinde farklı konumlara yerleştirilmiş mikrofonlar için gürültü değerleri belirlenmiştir. İncelenen üç farklı modelden boş kavite ve kavite-kanat kesiti etkileşime dair sonuçlar akış alanı içindeki hız büyüklüğü, akım çizgileri ve girdap kontörleri verilerek incelenmiştir. Ayrıca  $\theta$ -eğimli ön duvar ile kanat kesiti etkileşimi çalışma içerisinde pasif kontrol mekanizmalarının etkisini tayin için incelenen bir başka konfigürasyon olmuştur.

Yapılan çalışmalar sonucunda kavite içi ve özellikle cisim yakın alanı ile kavite arka duvarı civarında vorteks yapıları gözlemlenmiştir. Kavite ön duvar açısı değişimi ile kanat kesiti arasındaki etkileşimin akış alanındaki ortalama statik basınç değerlerine etkisi incelenmiş ve kavite giriş açısı azaldıkça basıncın arttığı tespit edilmiştir. Kanat kesitine etkiyen kuvvetin düşük değerde

tutulması, yararlı yükün bu kuvvetler etkisiyle geri dönüp kaviteye çarpmaması için önemlidir. En düşük basınç değerine sahip olan Durum 3'ün bu tür problemler için bu çalışmada incelenen konfigürasyonlar arasında en kabul edilebilir durum olabileceği saptanmıştır. Bu sonuçlar ışığında ön duvar eğiminin  $\theta = 45^\circ$ 'den  $\theta = 30^\circ$ 'ye düşülmesi bu bölümde incelenen tüm akış alanı sonuçlarına bağlı olarak pasif kontrol yöntemleri açısından istenilen etkiyi oluşturmamıştır. Ayrıca kavite içine yerleştirilen cisme ait hücum açısı, Ses Basınç Seviyesi (SPL) değerlerindeki şiddetli artışı beslemesi nedeni ile kavite içine yerleştirilen cismin eğim açısının önemini ortaya çıkartmıştır. Boş kavite ve hücum açısı  $\alpha = 0^\circ$ 'lik kanat kesitine yerleştirilmiş kavite konfigürasyonları incelendiğinde, tüm mikrofon konumları için 100 Hz frekansından yüksek frekanslar için yaklaşık 20 dB'lik gürültü artışı gözlemlenmiştir. Bu sonuç yüksek frekans değerlerinin akustik analiz açısından daha iyi incelenmesinin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çalışma sırasında elde edilen veriler ışığında, hücum açısının değiştirilmesinin ilk elden kavite ön duvarına verilecek eğimden daha etkili olduğu sonucuna varılmıştır. Son olarak elde edilen önemli sonuçlardan bir diğeri de; tüm mikrofon konumları için SPL – frekans dağılımı incelendiğinde 100 Hz'den küçük değerlerin akustik sinyal açısından önemli olduğunun tayin edilmesidir.

#### Kaynakça

- [1] Lawson, S.J., Barakos, G.N. 2011. Review of Numerical Simulations for High-speed, Turbulent Cavity Flows, *Progress in Aerospace Sciences*, Cilt 47, s. 186-216.
- [2] Cattafesta, L.N., III, Q. Song, D. Williams, C. Rowley, Alvi, F. 2008. Active Control of Flow-Induced Cavity Oscillations, *Progress in*

- Aerospace Sciences*, Cilt 44 (7-8), s. 479-502.
- [3] Colonius T., Rowley, C. W., Basu, A. J. 2002. On Self-sustained Oscillations in Two-dimensional Compressible Flow Over Rectangular Cavities, *Journal Fluid Mechanics*, Cilt 455, s. 315-346.
- [4] Khanal, B., Knowles, K., Saddington, A. 2009. Computational Study of Cavity Flowfield at Transonic Speeds, 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Aerospace Sciences Meetings.
- [5] Malone, J., Debiasi, M., Little, J., Samimy, M. 2009. Analysis of the Spectral Relationships of Cavity Tones in Subsonic Resonant Cavity Flows. *Physics of Fluids*, Cilt 21, s. 9-15.
- [6] Chen, H., Zhong, Q., Wang, X., Li, D. 2004. Reynolds number dependence of flow past a shallow open cavity, *Science China Technological Sciences*, Cilt 57 (11), s. 2161-2171.
- [7] Thangamani, V., Knowles, K., Saddington, A. J. 2014. The Effects Of Scaling on High Subsonic Cavity Flow Oscillations and Control", *Journal of Aircraft*, Cilt 51(2), s. 424-133.
- [8] Tam, C.K.W. 2004. Computational Aeroacoustics: An Overview of Computational Challenges and Applications, *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Cilt 18, s. 547-67.
- [9] Lighthill, M. J. 1952. On Sound Generated Aerodynamically, I. General theory, *Proc. R. Soc. Lond. A*, Cilt 211, s. 564-587.
- [10] Wagner, C., Hüttl, T., Sagaut, P. 2007. Large-Eddy Simulation for Acoustics. Cambridge University Press, 554s.
- [11] Fluent Theory Guide, Ansys, Inc, Kasım 2013.
- [12] Özsoy, E., Rambaud, P., Stitou, A., Riethmüller, M. L. 2005. Vortex Characteristics in Laminar Cavity Flow at Very Low Mach Number, *Experiments in Fluids*, Cilt 38, s. 133-145.
- [13] Ffowcs Williams, J. E., Hawkings, D. L. 1969. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, *Royal Society London-Philosophical Trans Ser A*, Cilt. 264, s. 321-342.
- [14] Crook, S. D., Lau, T. C. W., Kelso, R. M. 2013. Three-dimensional flow within shallow, narrow cavities, *Journal of Fluid Mechanics*, Cilt 735, s. 587-612.
- [15] Zafer, B. ve Coşgun, F. 2016. Zamana bağlı sıkıştırılmaz kavite akışının aeroakustik analizi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, Cilt 31 (3), s. 234-249.