



## SESALTI KAVİTE – CİSİM ETKİLEŞİMİNİN AEROAKUSTİK ANALİZİ

Onur Konan<sup>1</sup> ve Baha Zafer<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İstanbul Üniversitesi, İstanbul

<sup>2</sup>İstanbul Üniversitesi, İstanbul

### ABSTRACT

In this study which was made of computational fluid dynamics inside a cavity geometry was researched about acoustic results. The flow field and acoustic data were evaluated. The results which are conducted by changing the geometry were observed. Variation was developed for determining the ideal geometry. Comparisons were made by changing the boundary conditions.

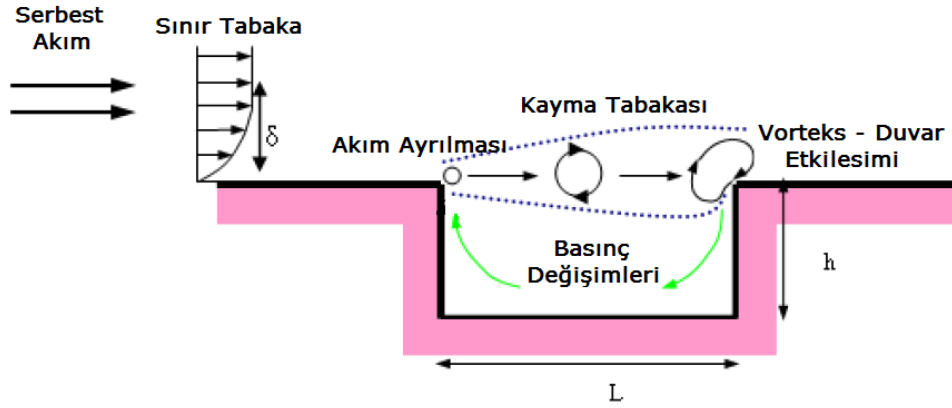
### ÖZET

Bir kavite geometrisi içindeki akışın hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri ile analizlerinin yapıldığı bu çalışmada, akustik sonuçlar üzerine incelemeler yapıldı. Elde edilen akış alanı ve akustik verileri değerlendirildi. Geometri üzerinde değişiklikler yapılarak sonuçlara etkisi gözlemlendi. İdeal geometrinin saptanması için farklı varyasyonlar geliştirildi. Sınır koşulları değiştirilerek karşılaştırmalar yapıldı.

### GİRİŞ

Kara araçlarının kapı kenarlarında, boru hatları içinde veya uçakların mühimmat depoladıkları kısımlarında, mühimmatlarını bırakmalarının ardından oluşan geometri genel olarak kavite olarak isimlendirilir. Kavite bölgesi türbülanslı akış alanının gözlemlendiği görece basit yapılardır. Ancak kavite akış alanında oluşan zamana bağlı değişkenlerin etkileşimleri karmaşık bir akış alanı görüntüsü ortaya çıkartmaktadır [1]. Kavite giriş bölgesinden başlayan serbest akım sınır tabakası, kavite içine doğru kayma takabası ayrılması oluşturur. Oluşan yapı kavite içinde vorteks yapılarının oluşmasını sağlarken kavite arka duvarı ile etkileşime girer, Şekil 1. Oluşan vorteks yapılarının kavite içinde oluşturduğu zamana bağlı basınç değişimleri akustik dalgalarının oluşumu besler. Kavite arka duvarından yayılan akustik dalgalar kayma tabakasının oluşumunu besleyen ön kavite duvarı ile etkileşime girerek vorteks oluşumunu tetikler. Böylece görece basit kavite geometrisi akış alanı içinde iki taraflı bağlı etkileşim gerçekleşir. Akış alanı akustik oluşumunu beslerken akustik basınç dalgaları akış alanını etkiler [2]. Bu iki yönlü etkileşim birçok çalışma ile incelenmiştir.

Bu etkileşimin ve zaman bağlı değişimlerin kavite içindeki cisim ile etkileşimi ise görece basit olan geometriye önemli bir boyut daha getirmektedir. Akış alanı ile akustik alan arasındaki bu karşılıklı ilişki önemli araştırma alanlarından biridir [3]. Ancak aerodinamik basınç değişimleri yanında çok küçük ölçekli akustik basınç alanının hesaplamalı akışkanlar mekaniği yaklaşımı kullanarak çözülmesi hem ayrıklaştırma alanının sayısal ağ yapısının sık dokunmasını hem de yüksek mertebeden ayrıklaştırma şeması kullanımı gerektirdiğinden [4] aeroakustik araştırmalarında Lighthill [5] tarafından teklif edilen Akustik Analoji yaklaşımı sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmada sesaltı düşük Reynolds ve Mach sayısı için kavite ve cisim etkileşimi aeroakustik özellikleri içerecek şekilde incelenmiştir. Akış alanına sayısal sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmış, akış alanına ait değişkenler ise FW-H Akustik Analojisi yardımıyla aeroakustik gürültü seviyesinin belirlenmesinde kullanılmıştır.

Şekil 1. Kavite içindeki akış yapısı<sup>[1]</sup>.

Bu sayısal çalışmada 2 ana durum ele alınmıştır. Birinci durumda boş kavite akış alanı incelenmiştir. İkinci durumda ise, kavite içine taşıma yüzeyi özelliğine sahip damla profil yerleştirilerek kavite-cisim etkileşimi incelenmiştir. Kavite içine yerleştirilen damla profilin akış alanı ve akustik basınç değerleri üzerindeki etkisi farklı açılar için hesaplanmıştır.

### SAYISAL YAKLAŞIM

Akış alanının ait zamana bağlı bünye denklemlerinin sayısal ayrıklaştırması ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Mekânsal ayrıklaştırma için sonlu hacim yaklaşımı kullanılırken zamansal ayrıklaştırma için kapalı basınç temelli çözücü ile hem mekansal hem de zamansal ayrıklaştırmada ikinci mertebeden ileri gidişli şema (upwind scheme) kullanılmıştır. Akış alanının ait korunum denklemleri Denklem 1’de verilmiştir [6].

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$$

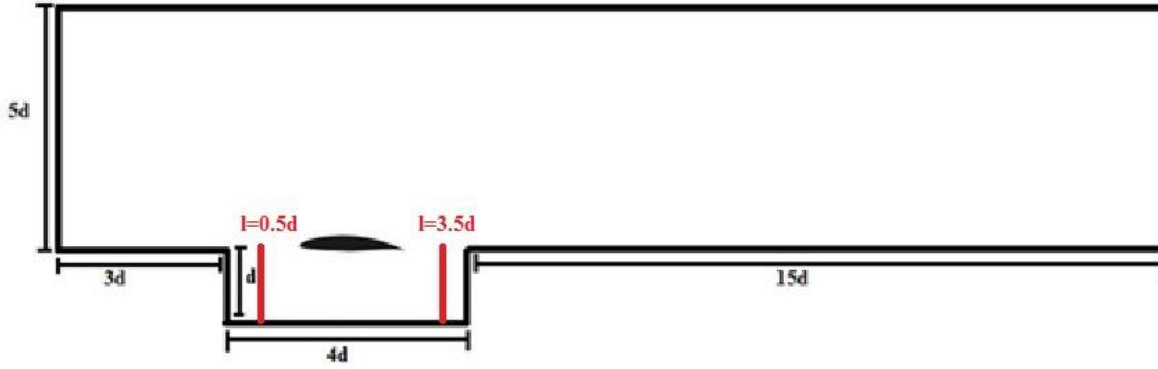
$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + f_i \quad (1)$$

Denklem 1’de  $u_i$  hız alanı,  $p$  basınç,  $f_i$  kontrol hacmine etki eden dış kuvvet ve  $Re$  Reynolds sayısıdır.

Çalışmanın analiz aşamasında öncelikle sınır koşulları belirlenmiştir. Buna göre hız, Reynolds sayısı, mikrofön noktaları gibi koşullarda çeşitli varyasyonlar oluşturuldu. Boş kavite için gerçekleştirilen sayısal analizde kavite derinliği 20 mm, Reynolds sayısı 4000 ve bu doğrultuda hız 2.92 m/s olarak belirlendi. İkinci sayısal varyasyonda ise, kavite geometrisinin orta eksenine damla profil konuldu ve kavite ön duvarına eğim verildi.

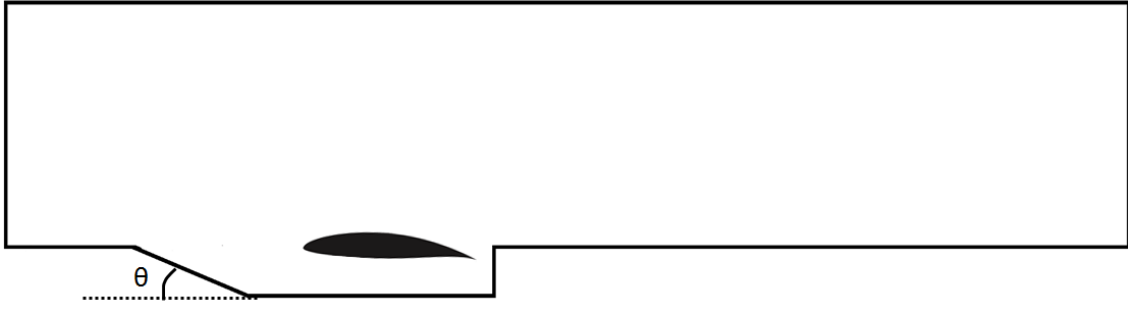
### HESAPLAMA ALANI VE SAYISAL AĞ YAPISI

Bu çalışmada ele alınan bir kanal içerisindeki kavite akışına ait hesaplama alanı Şekil 2’de gösterilmektedir. Kavitenin uzunluğunun derinliğine oranı 4 olarak alınmıştır. Geometriye ait boyutlar Özsoy ve diğerleri [7] von Karman Enstitüsünde gerçekleştirdiği deneysel çalışmalar ile karşılaştırılacak şekilde alınmıştır. Hesaplama alanı, kavitenin ön duvarından üç basamak uzunluğu kadar önde başlamakta ve kavite arka duvarından itibaren de 15 basamak boyu uzunluğuna kadar devam etmektedir. Belirlenen geometrik uzunluklar hem boş kavite hem de damla profil içeren kavite için aynı şekilde kullanılmıştır. Üçüncü durumda ise kavite ön duvarına eğim verilmiştir, Şekil 3.



Şekil 2. Kavite-damla profil etkileşimi için genel görünüm

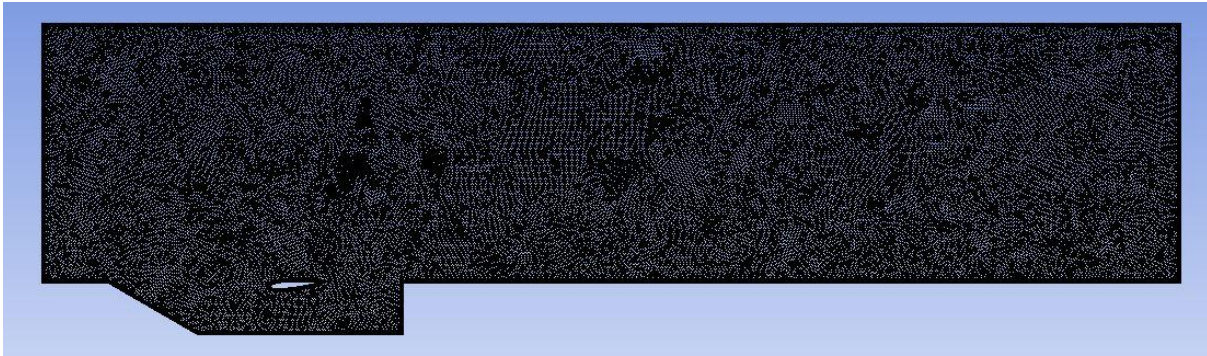
Damla profil hem düz ön duvar hem de  $\theta$  açılı eğimli ön duvar için 5 farklı hucüm açısı için incelenmiştir:  $0^\circ, \pm 2^\circ, \pm 5^\circ$ . Ön duvar eğim açısı ise  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  olarak alınmıştır.  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  yapılan analizlerde farkı görebilmek için kısalan giriş uzunlukları 3 kavite derinliği boyuna uzatılarak analizler tekrarlanmıştır.



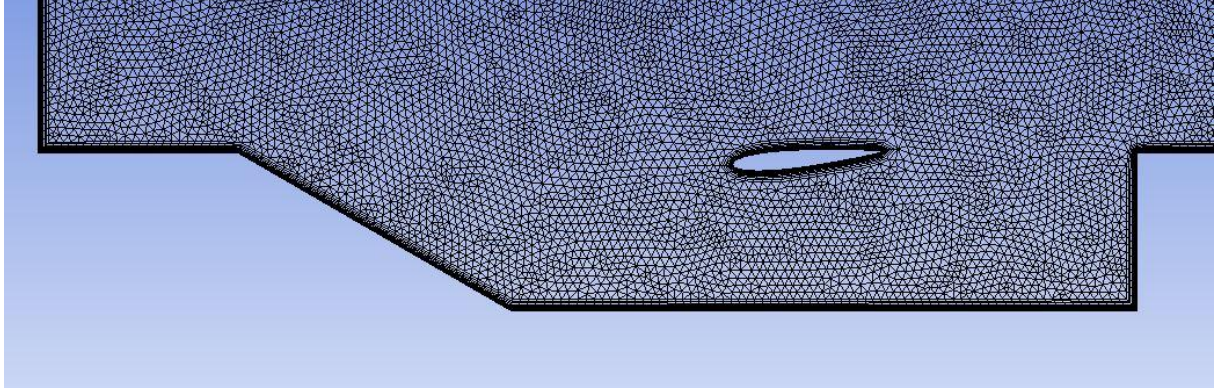
Şekil 3.  $\theta$  Açılı Eğimli Kavite-Damla Profil Etkileşimi için genel görünüm.

Sayısal ağ yapısı hesaplama alanının girişinden gelen serbest akımın duvar üzerinde oluşturacağı sınır tabakayı yakalayacak şekilde duvar yakınında sık oluşturulmuştur. Ayrıca kavite ön ve arka duvarlarından kopan ve etkileşen vorteks yapılarının doğru çözülmesi için bu bölgelerde de sayısal ağ yapısı sıklaştırılmıştır. Sayısal ağ örgü sayısı boş kavite için 104.120 hücreden oluşurken, kavite-cisim etkileşimde kullanılan ağ yapısında 116.000 hücre bulunmaktadır.

Kavitenin içine airfoil yerleştirildiği analizlerde ise, airfoil etrafındaki ağ örgüsü kopan kayma tabakası vorteks yapıları ile cismin etkileşimini doğru analiz etmek için sıklaştırılarak oluşturulmuştur, Şekil 4a-b.



(a)



(b)

Şekil 4. (a) Kavite- Damla Profil etkileşimi sayısal ağ yapısı genel görünüm, (b) Damla profil yakın çevresinde sıklaşan ağ örgüsü

### AEROAKUSTİK MODEL

Aerodinamik temelli oluşan sesin anlaşılmasında ve teorik bir zemine oturtulmasında en önemli adım 1950’li yıllarda Lighthill [5] tarafından atılmıştır. Lighthill süreklilik ve momentum denklemini dalga denklemi formunda yazarak kaynak terimli yeni bir denklem elde etmiştir. Temelde, akışın uzak alanı 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.

Analizde akustik sonuçlar için Ffowcs Williams ve Hawkings Modeli kullanıldı[8]. Bu model temelde Navier Stokes ve Süreklilik denklemlerinde türetilen ve homojen olmayan bir dalga denklemdir. Bu denklemler;

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

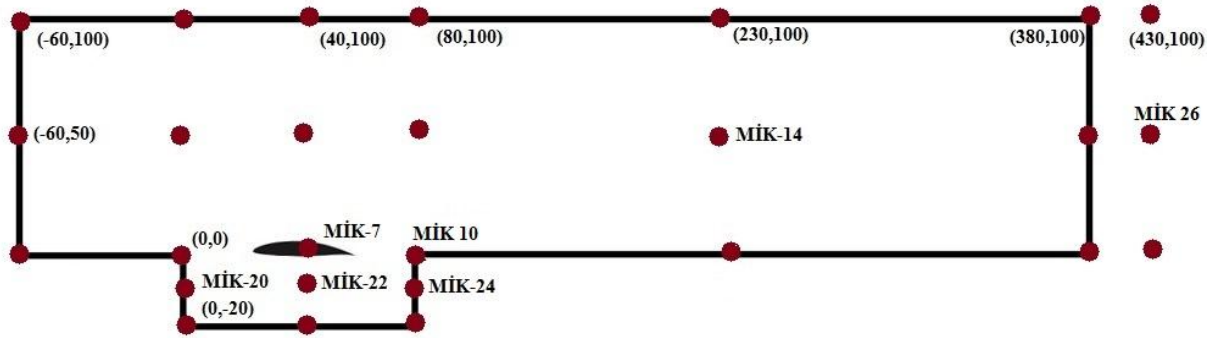
Denklem 1’de  $u_i$ , akış hızının  $x_i$  doğrultusundaki bileşeni,  $u_n$  akış hızının yüzey normali doğrultusundaki bileşeni iken,  $v_i$  yüzey hızının  $x_i$  doğrultusundaki bileşeni ve  $v_n$  yüzey hızının yüzey normali doğrultusundaki bileşendir.  $\delta(f)$  ve  $H(f)$  sırasıyla Dirac Delta 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. Teorik fonksiyonu genelleştirmeyi kolaylaştırır ve serbest uzayda Green fonksiyonu çözümleri geçerli olur. Bu yüzey ( $f = 0$ ) kaynak yüzeyine uygundur ve cismin sızdırmaz yüzeyi ile veya cismin kapalı bir geçirgen yüzey olarak tanımlanabilir.  $T_{ij}$  Lighthill gerilme tansörü Denklem 2’de tanımlanmıştır.

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (3)$$

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

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left\{ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right\} \quad (4)$$

Akış alanı içinde hesaplanan zamana bağlı değişkenlerin girdi olarak kullanıldığı Akustik Analoji yaklaşımında boş kavite ve kavite-cisim etkileşimine ait gürültü sonuçları hesaplama alanı içine yerleştirilen 27 mikrofona kullanılarak hesaplanmıştır, Şekil 5.



Şekil 5. Kavite hesaplama alanı içine yerleştirilen mikrofona konumları

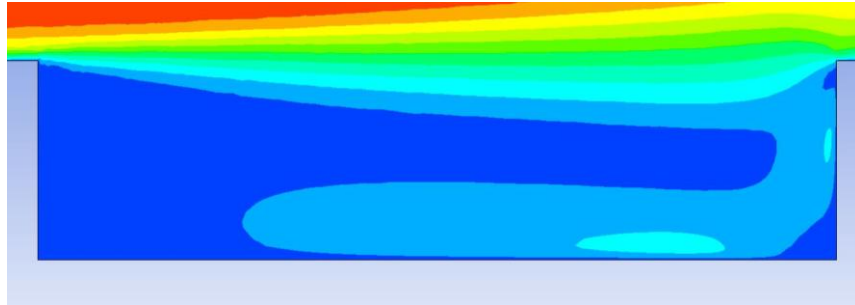
Ses Basınç Seviye'si hesaplanmasında kullanılan bağıntı Denklem 5'de verilmiştir;

$$SPL = 20 \log_{10} \frac{P}{P_0} \quad (5)$$

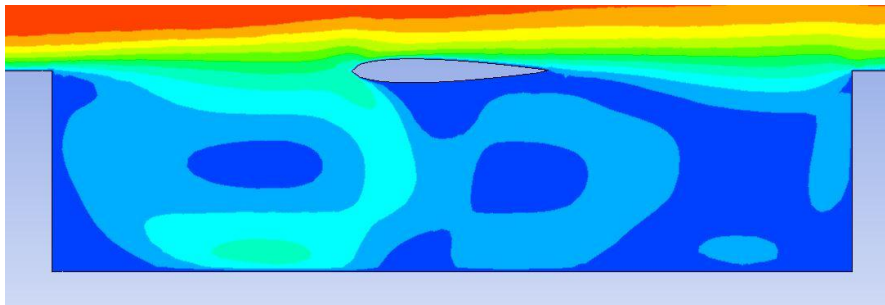
$P$  akışa ait zaman bağılı basınç değeri iken,  $P_0$  ise insan kulağının duyacağı minimum ses basıncını göstermektedir.  $P_0$  referans basınç değeri  $2 \cdot 10^{-5}$  [Pa] olarak kabul edilir.

### SAYISAL SONUÇLAR

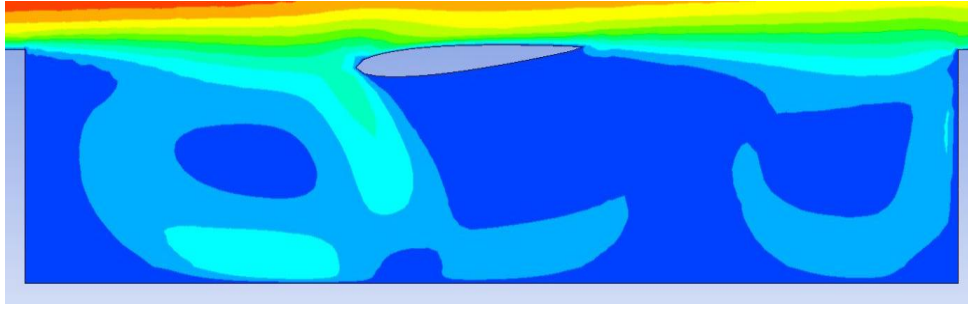
Hesaplama alanında birim zaman adımı  $10^{-4}$  sn. iken toplam hesaplama süresi 1 sn olarak alınmıştır. Elde edilen hız kontörleri boş kavite ve kavite-cisim etkileşimi için Şekil 6 a-e'de verilmiştir.



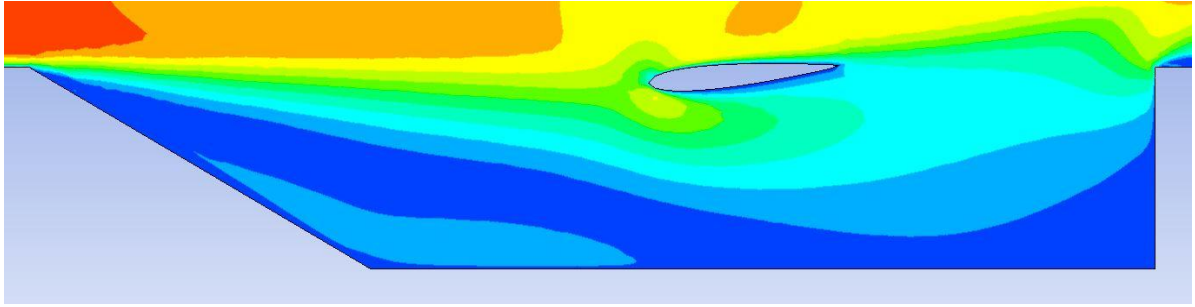
(a)



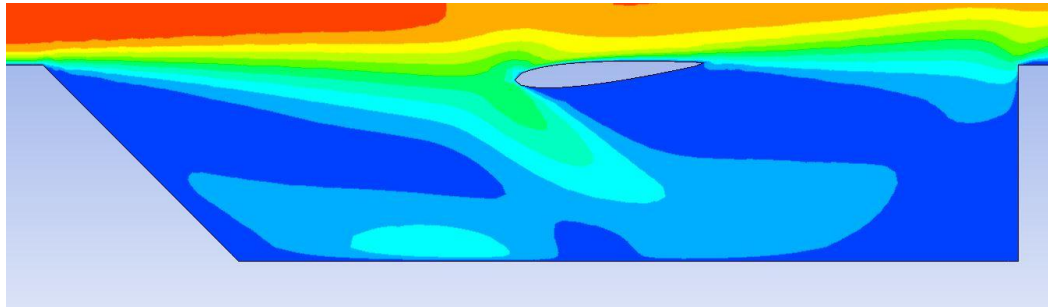
(b)



(c)



(d)

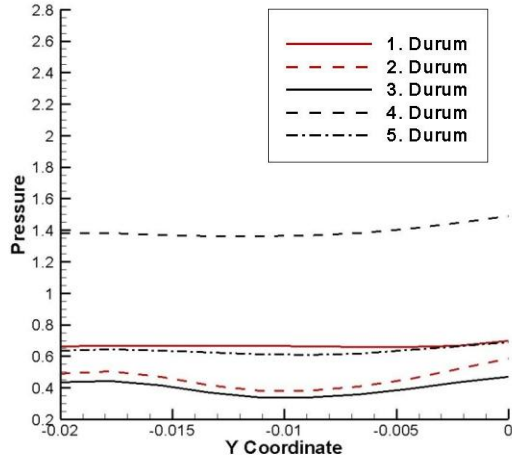


(e)

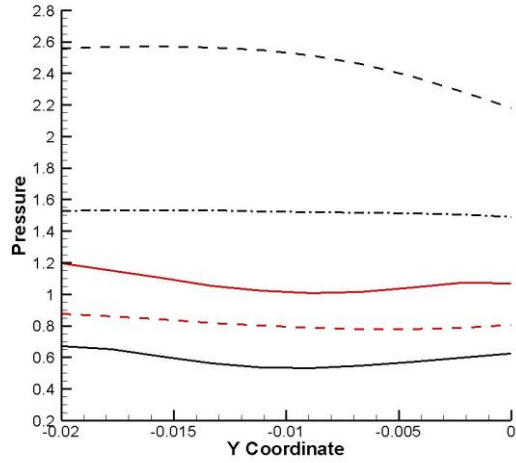
Şekil 6. (a) Boş kavite(1.Durum), (b)  $0^\circ$  'li cisim(2.Durum),(c)  $+5^\circ$  'li cisim(3.Durum) (d)  $30^\circ$  kavite girişli  $+5^\circ$  'li cisim(4.Durum), (e)  $45^\circ$  kavite girişli  $+5^\circ$  'li cisim(5.Durum) için zamana bağlı hız kontörleri.

Geometrilere kavite içerisine 0.5h ve 3.5h uzaklıklara kavite derinliği uzunluğunda sanal çizgiler çizilmiş, Şekil 2 ve bunlar üzerindeki hız, basınç ve türbülans kinetik enerjisi değerleri karşılaştırılmıştır.

Akış alanına ait zaman bağlı basınç değişimleri Denklem 5 kullanılarak Ses Basınç Seviyesi (SPL) - Frekans grafikleri elde edilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları mikrofona noktalarında karşılaştırılmış ve belirli mikrofona noktaları üzerinde belirgin farklılıklar gözlemlenmiştir, Şekil 10.

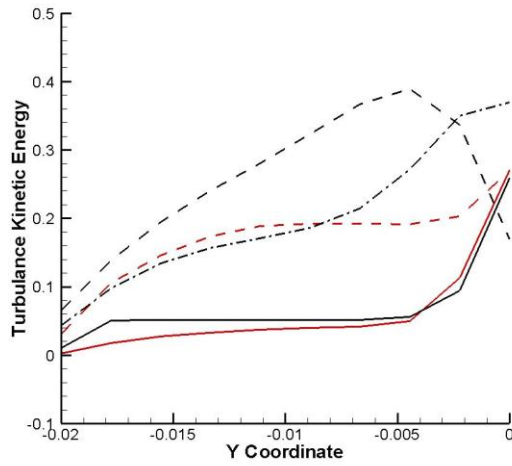


(a)

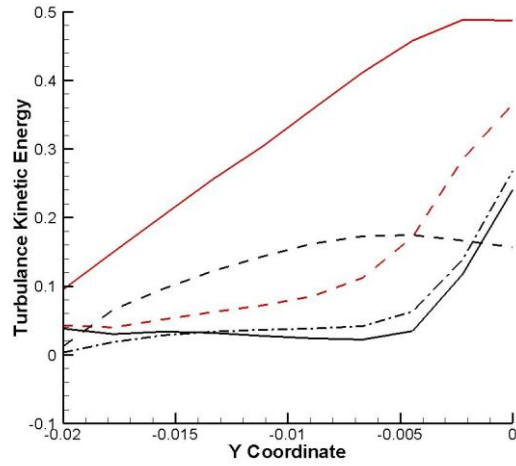


(b)

Şekil 7. (a) 0.5h, (b) 3.5h çizgilerindeki basınç değerleri

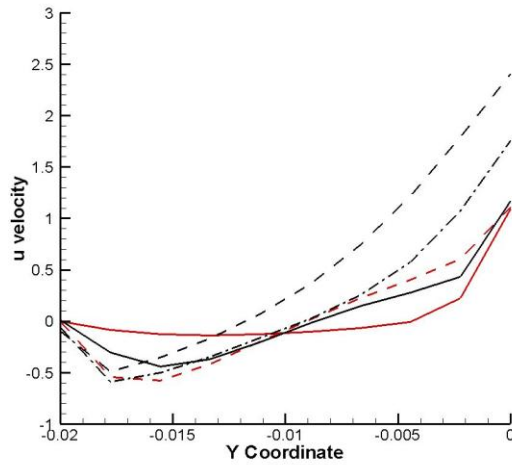


(a)

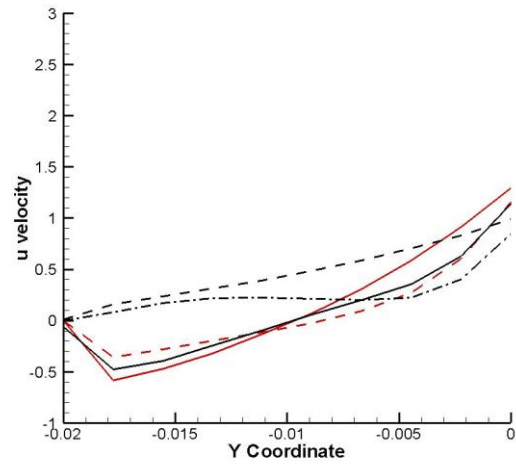


(b)

Şekil 8. (a) 0.5h, (b) 3.5h çizgilerindeki türbülans kinetik enerjisi değerleri

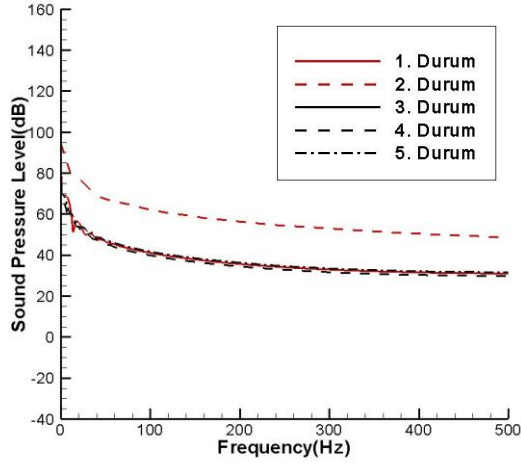


(a)

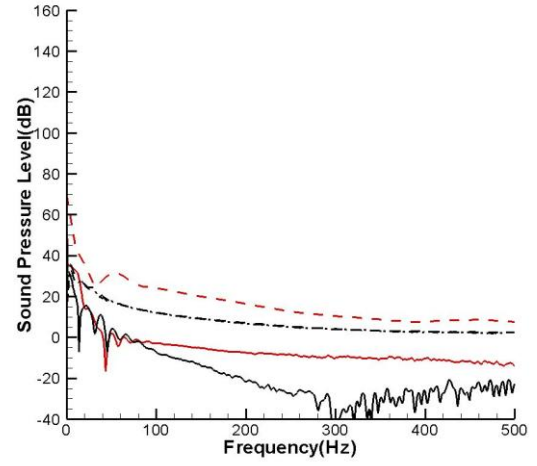


(b)

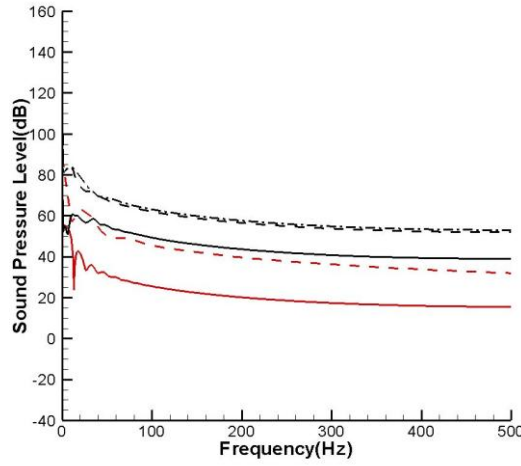
Şekil 9. (a) 0.5h, (b) 3.5h çizgilerindeki hız değerleri



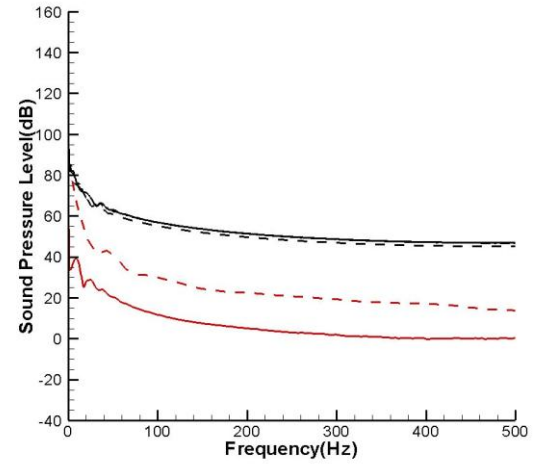
(a)



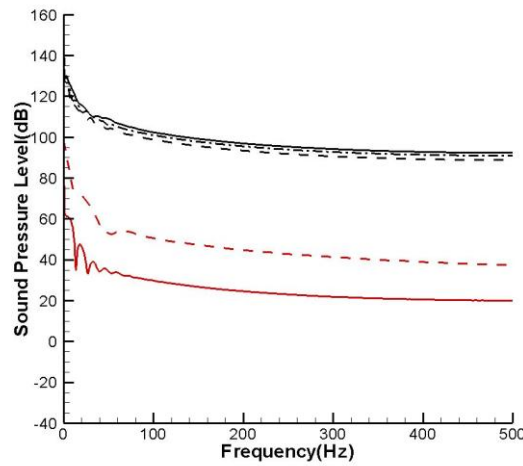
(b)



(c)



(d)



(e)

Şekil 10. Kavite akışına ait SPL-frekans değerleri (a)10. mikrofon, (b)14.mikrofon (c) 20.mikrofon (d)22.mikrofon (e)24. mikrofon

### SONUÇLAR

Bu çalışmada görece basit olmasına rağmen akış-akustik alan etkileşimlerinde önemli bir yer tutan kavite içi akışı incelenmiştir. Akış alanına ait zamana bağlı değişkenler sıkıştırılmaz sonlu hacimler ayrıklaştırma şeması kullanılarak çözülmüştür. Kavite akışı kapalı basınç temelli zaman ayrıklaştırması ile k-epsilon türbülans modeli ile hesaplanmıştır. Akış alanına ait zaman bağlı değişkenler FW-H akustik analoji yaklaşımına girdi olarak kullanılmış ve kavite için farklı konumlara yerleştirilmiş mikrofonlar için gürültü değerleri belirlenmiştir. İncelenen 3 farklı modelden boş kavite ve kavite-cisim etkileşime dair sonuçlar yukarıda verilmiştir.  $\theta$  açılı eğimli ön duvar cisim etkileşimi çalışma içerisinde incelenen başka bir konu olmuştur.

Yapılan çalışmalar sonucunda kavite içi ve etrafında vorteks yapılar gözlemlenmiştir, Şekil 6. Çeşitli damla profil ve kavite açılarının basınç etkisi görülmüştür. Kavite giriş açısı azaldıkça basıncın arttığı belirlenmiştir. Damla profil üzerine gelen kuvvetin en az olması yararlı yükün bu kuvvetler etkisiyle geri dönüp kaviteye çarpmaması için önemlidir. En düşük basınç ve türbülans kinetik enerjisine sahip olan 3 durumun bu tür problemler için en ideal çözüm olabileceği saptanmıştır. Bu çalışma dahilinde taşıma ve sürüklenme kuvvetleri hesaplanmamıştır. Ancak bu kuvvetlerin hesaplanmasıyla elde edilen sonuçlar ispatlanabilir. Geometrilere tamamlanmış kavite çıkışında hızın artmasına bağlı olarak basınçta düşüş görülmüştür.

### KAYNAKLAR

- [1] S.J. Lawson, G.N. Barakos, Review of Numerical Simulations for High-speed, Turbulent Cavity Flows, Progress in Aerospace Sciences, Volume 47, Issue 3, Pages 186-216, April 2011
- [2] T. Colonius, C. W. Rowley and A. J. Basu, On Self-sustained Oscillations in Two-dimensional Compressible Flow Over Rectangular Cavities, J. Fluid Mech., 455:315–346, 2002.
- [3] K. K. Ahuja and J. Mendoza, Effects of Cavity Dimensions, Boundary Layer, and Temperature on Cavity Noise with Emphasis on Benchmark Data to Validate Computational Aeroacoustic Codes, 1964.
- [4] Tam, C.K.W., Computational Aeroacoustics: An Overview of Computational Challenges and Applications, International Journal of Computational Fluid Dynamics, 18, 547–67, 2004
- [5] M. J. Lighthill, On Sound Generated Aerodynamically, I. General theory, Proc. R. Soc. Lond. A, vol. 211, pp. 564-587, 1952.
- [6] Fluent Theory Guide, Ansys, Inc, Kasım 2013
- [7] E. Özsoy, P. Rambaud, A. Stitou and M. L. Riethmüller, Vortex Characteristics in Laminar Cavity Flow at Very Low Mach Number, Experiments in Fluids 38, 133–145, 2005.
- [8] J. E. Ffowcs Williams and D. L. Hawkings, Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, Roy Soc London-Philosophical Trans Ser A, vol. 264, pp. 321-342, 1969.