



Zamana bağlı sıkıştırılmaz kavite akışının aeroakustik analizi

Baha Zafer*, Furkan Coşgun

¹İstanbul Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kavite akışına ait Rossiter modları incelenmiş ve FW-H Akustik Analoji sonuçları ile karşılaştırılmıştır
- FW-H denklemleri geçişli iç yüzey ile 3 boyutlu kavite için incelenmiştir
- Türbülansın kavite gürültüsüne etkisi gösterilmiştir

Makale Bilgileri

Geliş: 30.06.2015

Kabul: 05.05.2016

DOI:

10.17341/gummfd.34239

Anahtar Kelimeler:

Kavite akışı,
aeroakustik,
düşük reynolds sayısı,
akustik analoji

ÖZET

Bu çalışmada, 2 ve 3 boyutlu kavite profili boyunca sıkıştırılmaz, zamana bağlı akış alanı ve aerodinamik kaynaklı aeroakustik gürültü incelenmiştir. 2 boyutlu akış alanının çözümünde türbülans modeli olarak Standart k- ϵ , Standart k- ω ve SST k- ω kullanılırken, 3 boyutlu çözümlerde Standart k- ω modeli ile hesaplama alanı çözülmüştür. Düşük Reynolds ve Mach Sayısı için kavite içi ve çevresindeki hesaplanan akış alanı sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Hem 2 boyutlu hem de 3 boyutlu akış alanına ait zamana bağlı değişkenler, Ffowcs William-Hawkings (FW-H) Akustik Analoji yaklaşımı kullanılarak kavite gürültüsü hesaplanmıştır. 3 boyutlu kavite için, geçişli iç yüzey yaklaşımı kullanılarak quadrapol teriminin aeroakustik gürültü sonuçlarına etkisi gösterilmiştir.

Aeroacoustics investigation of unsteady incompressible cavity flow

H I G H L I G H T S

- Rossiter modes of cavity are investigated and compared with FW-H Acoustic Analogy
- FW-H equations are investigated by using permeable interior surface for 3D cavity
- Turbulence effects on the cavity noise is shown

Article Info

Received: 30.06.2015

Accepted: 05.05.2016

DOI

10.17341/gummfd.34239

Keywords:

Cavity flow,
aeroacoustics,
low reynolds number,
acoustic analogy

ABSTRACT

In this study, unsteady incompressible flow field and aerodynamically generated noise of 2D and 3D cavity flows are investigated. In the case of 2D flow fields, standard k- ϵ , standard k- ω and SST k- ω is used and in the 3D case, flow field is computed using standard k- ω turbulence model. All numerical results are compared and validated with experimental measurement for Low Reynolds and Mach numbers. All unsteady flow fields results are used to compute a cavity noise using Ffowcs William – Hawking (FW-H) Acoustics Analogy. In the case of 3D cavity, the effect of quadrapole terms on the aerodynamically generated noise is investigated defining permeable interior surface.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

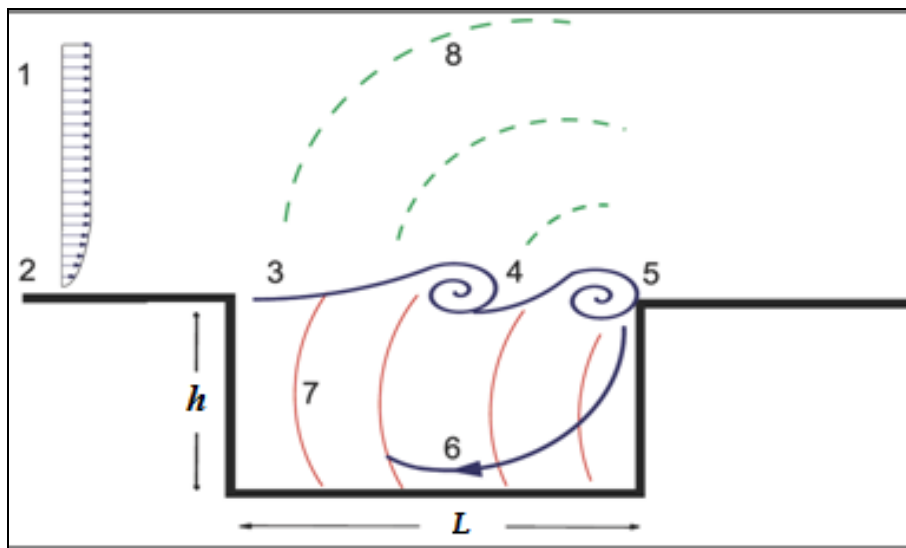
Kavite akışları mühendislik alanında birçok yapı, araç ve üründe görülen önemli bir akış tipidir. Uçak iniş takımları, savaş uçaklarındaki füze yuvaları, liman girişleri, yüksek katlı yapıların etrafındaki rüzgâr hareketleri ile

otomobillerin kapı oyukları ve ön cam kenar boşlukları kavite akışının incelendiği önemli mühendislik problemleridir [1]. Aerodinamik etkilerin yanında akış alanının zamana bağlı karakterinden kaynaklanan rahatsızlık verici gürültünün yeni tasarımlar ile sonlandırılması son yıllarda önemle üzerinde durulan araştırma alanlarından

* Sorumlu Yazar/Corresponding author: baha.zafer@istanbul.edu.tr / Tel: 0212 473 70 00 / 18024

[2]. Kavite geometrileri görece basit olmalarına rağmen hem akış alanı hem de akustik hesaplamalar açısından önemli bir yer tutmaktadır. Kavite akış alanında Şekil 1, giriş kısmından kaviteye doğru ilerleyen Serbest Akımın (1) kavite ön kısmındaki duvar ile etkileşiminden oluşan Sınır Tabaka (2) kavite ön duvarından hemen sonra Tabaka Kayma Akımını (3) oluşturur. Ön duvardan kavite içine doğru kopan Vorteks Yapıları (4) zaman bağlı karakterlerini korumalarının yanında, kopan bu yapıların Kavite Arka Duvarı ile Etkileşimi (5) kavite içinde Girdap Sirkülasyon Bölgelerini (6) oluşturmaktadır. Ön duvardan kopan vorteks ve girdap sirkülasyonun beslediği Zamana Bağlı Basınç Değişimi (7) Akustik Basınç Yayılımını (8) doğurmaktadır [3]. Akustik yayılım, arka duvardan ön duvara doğru takip ettiği yörüngesinde ön duvardan kopan vorteks yapılarını, akış alanındaki zamana bağlı değişimlere ek olarak etkilemekte ve vorteksin kopma sıklığını değiştirmektedir [1]. Akış alanı ile akustik alan arasındaki bu karşılıklı ilişki (coupled fields) önemli araştırma alanlarından biridir. Ancak aerodinamik basınç değişimleri yanında çok küçük ölçekli akustik basınç alanının hesaplamalı akışkanlar mekaniği yaklaşımı kullanılarak çözülmesi hem ayrıklaştırma alanının sayısal ağ yapısının sık dokunmasını hem de yüksek mertebeden ayrıklaştırma şeması kullanımını gerektirdiğinden [4] aeroakustik araştırmalarında Lighthill [5] tarafından teklif edilen Akustik Analoji yaklaşımı sıklıkla kullanılmaktadır. Literatürde deneysel ve sayısal çalışmaların önemli bir kısmında yüksek Reynolds ve Mach Sayısı için kavite akış problemi incelenmiştir. Ancak düşük Reynolds ve Mach Sayısı deneysel ve hesaplamalı akışkanlar mekaniği yaklaşımı ile ilgili çok çalışma bulunmamaktadır [6]. Temmerman ve diğerleri [7] uRANS modeline duvar yakın bölgesini EARSM yaklaşımı ile modelleyen türbülans modelini M-219 kavite geometrisine uygulamıştır. Ashworth [8] aynı geometriyi Spalart-Allmaras türbülans modeli ile çözmüştür. Bu çalışmalarda iki farklı türbülans modeli, DES yaklaşımının geçiş

fonksiyonuna göre akış alanı içinde otomatik olarak belirlenmekte ve LES-URANS hibrit yaklaşımına göre hesaplama zamanının daha düşük olmasını sağlamaktadır. Liggett ve Smith [9] kendi sayısal kodlarını Menter $k-\omega$ kayma gerilmesi iletimi RANS yaklaşımı ile DES modelini alt-ağ-ölçekli (subgrid scale) türbülans modelini içerecek şekilde geliştirmiş ve literatürde bulunan hibrit olmayan uRANS türbülans modelleri ile karşılaştırmışlardır. Çalışma Mach sayısı $M_\infty = 0,85$ için akış alanı ve kavite tarafından üretilen akustik sinyali sayısal olarak hesaplamıştır ve SST $k-\omega$ DES hibrit modelinin deneysel veriler ile daha uyumlu sonuçlar ürettiği görülmüştür. Chen vd [10] Reynolds sayısının, derin olmayan açık kavite geometrisi için akış alanına olan etkisini RANS yaklaşımı kullanarak incelemişlerdir. Kompenhans vd. [11], hem iki hem de üç boyutlu kavite akışları için Kapalı Büyük Girdap Benzeşimi (Implicit Large Eddy Simulation) yaklaşımı ile yüksek Reynolds ve Mach Sayısı için kavite içi akış alanını çözmüştür. Ayrıca akış alanı içindeki akustik rezonans ilişkileri Rossiter modları için 2000 Hz kadar incelenmiştir. Akış ile akustik alan arasındaki ilişkinin incelendiği bir başka araştırma konusu ise pasif kontrol teknikleridir. Bu kontrol tekniklerinden bazıları; kavite ön duvarı öncesine konulan cisim [12], arka duvara yarı eğim verilmesi [13, 14] ya da tam eğim verilmesi [15] ya da kavite ön duvar yakınına farklı yarıçaplara sahip silindirik cisim konularak [16] sağlanabilmektedir. Shaaban ve Mohany [12] tarafından kavite önüne yerleştirilen küt cisim $M_\infty = 0,45$ olarak tanımlanmış giriş hızı için akustik SPL değerinin 30dB artmasına neden olmuştur. Pey ve Chua [13] ile Pey ve diğerleri [14], kavite arka duvarının 0,25 ve 0,5 katında 3 farklı açı için yarı eğimli altı farklı duvar konfigürasyonu denemişlerdir. Pasif kontrol için düzenlenmemiş kaviteye göre arka duvar basınç değerlerinde en az %30, en çok %60 oranında azalma gözlemlenmiştir. Vikramaditya ve Kurian ise, kavite arka duvarına 45° ve 60° 'lik tam eğim vermiştir [15].



Şekil 1. Kavite akışı ve ses oluşumu [3] (Cavity flow and sound generation)

Yüksek Mach Sayısı için yapılan bu çalışmada kavite içinde oluşan şok yapılarına bağlı olarak akış-akustik alan etkileşimine dair önemli veriler elde edilmiştir. En önemli netice, arka duvarın tam eğimi durumunda yaklaşık 20 dB lik bir gürültü seviyesi azalmasıdır. Martinez ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmada [16], kavite önüne yerleştirilen silindirik tel cisim ile akış alanı içindeki yüksek frekanslı akış yapıları uyarılmış ve ilk Rossiter modu için 2/3 oranında azalma gözlenmiştir. Fugisang ve Cain [17] ise kavite kanalı boyunca Baldwin-Lomax türbülans modelini, kavite içinde ise Doğrudan Sayısal Benzeşim (Direct Numerical Simulation - DNS) yaklaşımı kullanılmıştır. Ayrıca aynı çalışmada, zorlanmış kayma gerilme tabakasının kavite içi zamana bağlı değişkenlere etkisi ile arka duvar etkileşimi incelenmiştir. Bu etkileşim daha önce de bahsedildiği gibi akış kaynaklı gürültünün oluşumunu sağlayan temel dinamiktir. Kavite ön duvarından ayrılan kayma gerilme tabakasının kavite ağızındaki dalga cephesi oluşumları Dijital Çizgi Schlieren tekniği ile incelenmiştir [18]. Oluşan dalga cephesi yapıları ile Rossiter modları arasındaki ilişki yüksek Mach Sayısı için tespit edilmiştir. Bu çalışmada, düşük Reynolds ve Mach Sayısı için akış alanı değişkenleri, Fluent ticari sonlu hacim çözücüsü kullanılarak hem iki boyutta farklı türbülans modelleri için hem de üç boyutta standart k- ω modeli için incelenmiştir. Akış alanına ait HAD sonuçları deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca düşük Reynolds ($Re_h = 4000$) ve Mach sayıları ($M_\infty = 0,035$) için elde edilen hesaplama alanına ait zamana bağlı değişimler, Akustik Analoji yaklaşımı kullanılarak kavite gürültü seviyesi incelenmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile Akustik Analoji yaklaşımının birlikte kullanılması tüm hesaplama alanının çözülmesini gerektirmeden Ffows William–Hawkins (FW-H) yaklaşımı ile kavite gürültü seviyesinin belirlenmesini sağlamaktadır. Kavite gürültüsüne ait akustik sinyal Fluent içinde bulunan FW-H akustik modülü kullanılarak hesaplanmıştır.

2. SAYISAL YAKLAŞIM (NUMERICAL METHOD)

Akış alanına ait zamana bağlı bünye denklemlerinin sayısal ayrıklaştırması Fluent ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, akış alanı içindeki değişkenlerin ayrıklaştırılmasında birim hacim için korunum ilkelerini sağlayan sonlu hacim yaklaşımı kullanılırken birim zaman adımına bağlı, Akustik çözümlerde kullanılacak birim frekans adımını istenilen aralıkta tutmayı kolaylaştıracak kapalı zaman şemaları kullanılmıştır [19]. Hem mekansal hem de zamansal ayrıklaştırmada ikinci mertebeden ileri gidişli şema (second order upwind scheme) kullanılmıştır. Akış alanına ait korunum denklemleri integral formunda Eşitlik 1’de verilmiştir [20].

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V W dV + \oint (F - G) \cdot dA = \int_V H dV \quad (1)$$

Akış çözüm vektörü W , konvektif akı matrisi F ve vizkoz akı matrisi G ise Eşitlik 2’de ifade edilmiştir;

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho V \\ \rho V u + p i \\ \rho V v + p j \\ \rho V w + p k \\ V(\rho E + p) \end{Bmatrix}, G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}$$

$$H = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_x \\ f_y \\ f_z \\ \rho(f_i v_j \delta_{ij}) + \dot{q}_h \end{Bmatrix} \quad (2)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Sırasıyla ρ akışkanın yoğunluğu, $v = ui + vj + wk$ hız vektörü, V kontravariant hız iken tanımı, $V = v \cdot n$ olarak verilmiştir ve n yüzey normali olarak tanımlanmıştır. E birim kütledeki toplam enerji, p basınç iken τ_{ij} viskoz gerilim tansörü ve q ısı akısı olarak tanımlanmıştır. H kaynak teriminde ise f_i hacmi etkileyen kuvvetleri (yerçekimi, Coriolis ivmesi v.b.) ve q_h terimi ise hacim içinde üretilen zamana bağlı ısı kaynağını göstermektedir. Düşük Mach Sayılı akışlar için süreklilik bağıntısında zamana bağlı terimin, yoğunluğu sabit olduğundan düşmesine bağlı olarak momentum denkleminin çözümünde zorluk ortaya çıkmaktadır. Navier-Stokes denklemlerinin sayısal formunda bu sorun ön-koşullandırma (preconditioning) ile ortadan kaldırılır. Zamana göre türev terimi, ön koşullandırma matrisi ile çarpılır. Böylece Eşitlik 3’de çözüm için kullanılan bünye bağıntıları en genel şekilde ifade edilir.

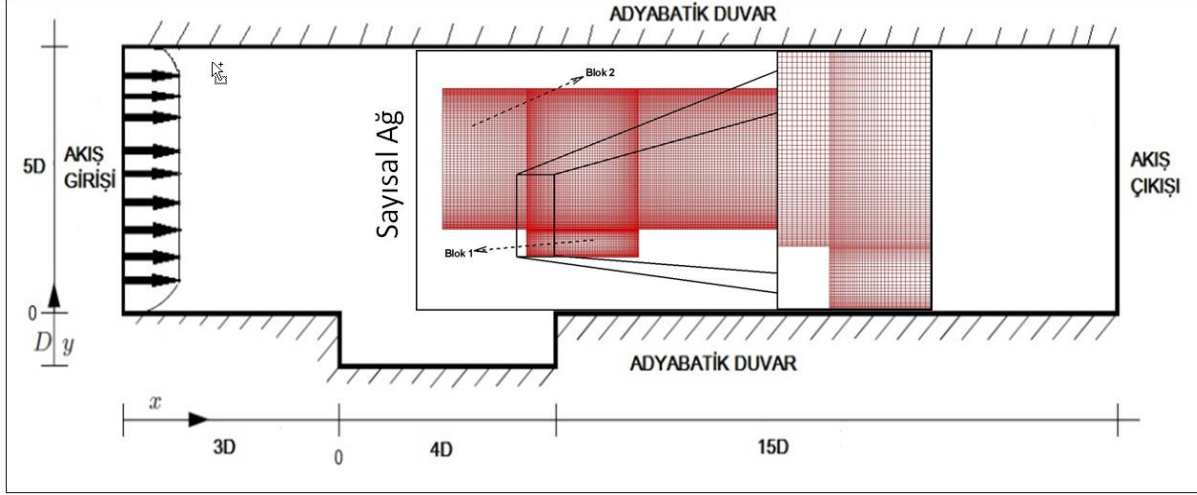
$$\frac{\partial W}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint (F - G) \cdot dA = \int_V H dV \quad (3)$$

Q çözüm vektörü Eşitlik 4’de basıncında tanımlandığı birincil değişkenlere göre yeniden yazılır ve ön-koşullandırma matrisi ile birlikte Eşitlik 4’de verilmiştir.

$$Q = \begin{Bmatrix} p \\ u \\ v \\ w \\ T \end{Bmatrix}, \frac{\partial W}{\partial Q} =$$

$$\begin{bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \rho_p u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \rho_p v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \rho_p w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \rho_p H - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H + \rho C_p \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\rho_p = \partial \rho / \partial p$, $\rho_T = \partial \rho / \partial T$ tanımlanırken, sıkıştırılmaz akış için $\rho = 0$ alınır. Böylece sıkıştırılmaz akış alanı çözümlerinde kullanılan ayrıklaştırma şeması elde edilir [19].



Şekil 2. 2Boyutlu hesaplama alanı ve sayısal ağ yapısı (2D computational domain and mesh)

Eşitlik 1 ve 2'de τ_{ij} ise türbülans kayma (Reynolds stress) gerilmesi Boussinesq yaklaşımına göre aşağıdaki, Eşitlik 5'deki gibi ifade edilir.

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (5)$$

denklemdaki u'_i ve u'_j ise türbülans hız ani değişimlerini (fluctuation), μ_t türbülans viskozitesi, δ_{ij} ise Kronecker Delta'dır. Bu çalışmada üç farklı türbülans modeli kullanılmıştır. İlk model Standart k- ϵ [20], iken kullanılan diğer iki model k- ω sınıfındadır. Standart k- ω modeli [20] sınır tabaka akışlarında yüksek başarı sağlamaktadır. Kavite akışlarında zamana bağlı değişkenlerin davranışını belirleyen ana etken duvarlar olduğundan, bu model türbülanslı akışlar için uygun görülmüştür. Diğer k- ω modeli ise kayma gerilmesinin taşınımının hesabından kaynaklanan hatanın düzeltilmesiyle elde edilen SST k- ω modelidir [21].

2.1. Hesaplama Alanı (Computational Domain)

Sayısal çözüm için oluşturulan hesaplama alanı Şekil 2'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmada [22, 23] belirtildiği gibi, $h=D$, $L=4D$ için hesaplama alanı oluşturulmuştur. Kavite basamak yüksekliği $D=5$ mm olarak alınmıştır. Kavite içinde oluşan zamana bağlı değişkenlerin sınır şartına bağlı olarak sayısal hata birikimini önlemek için, çıkış uzunluğu, giriş uzunluğunun yaklaşık 5 katı alınmıştır. Üç boyutlu hesaplama alanında, aynı geometriye $5D$ uzunluğunda genişlik verilmiştir. 3 boyutlu hesaplama alanı için daha önceki durumlara ek olarak (Tablo 1) iki yeni inceleme eklenmiştir: Durum 5 ve Durum 6. Durum 5'de hesaplama alanı alt duvarları akustik kaynağı olarak alınırken, Durum 6'da akış alanını bozmayan nitelikteki geçişken iç yüzey (permeable interior surface) kullanılmıştır (Şekil 3). Bu yüzey, kavitenin D kadar önünden ve arkasından, kaviteyi içine alır ve orijin ekseninden itibaren $2D$ yüksekliğindedir,

Tablo 1, 2 boyutlu sayısal analizde tüm durumlar için aynı ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama alanı iki ana kısımdan oluşmaktadır: kavite ve kanal bölgesi. Kavite ön ve arka duvarlarının hemen sonrası ile öncesinde oluşan dinamik vorteks yapılarının doğru analiz edilebilmesi için sayısal ağ 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. 2-boyutlu hesaplama alanına ait sayısal ağ yapısı Şekil 2 'de verilmiştir.

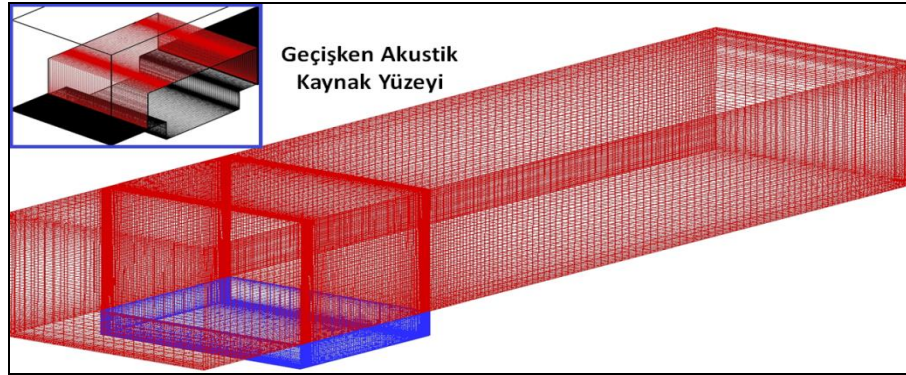
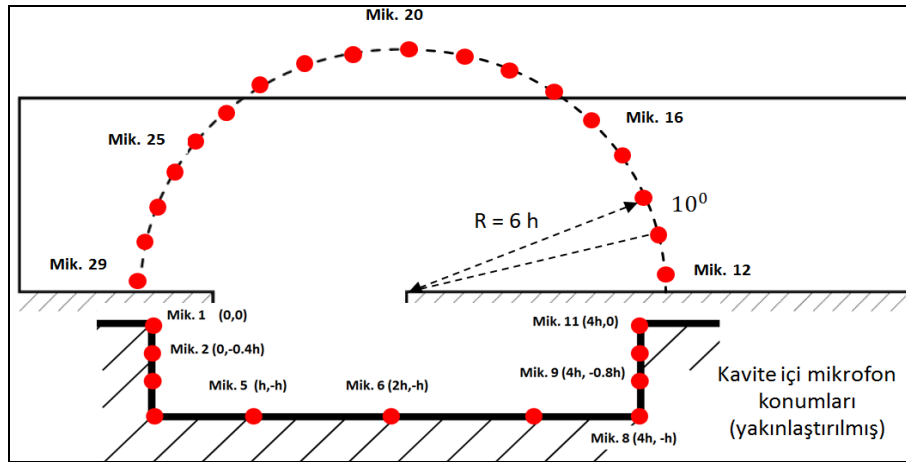
2.2. Ffowcs Williams-Hawkings modeli (Ffowcs William-Hawkings model)

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 lineer olmayan kaynak terimli dalga denklemi formunda elde etmiştir. Temelde, akışın uzak alanı ile yakın alanını birbirinden ayırmış 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. Akış içerisindeki katı yüzey ve bu yüzeyin hareketi sonucu oluşan gürültü etkisini ilk defa teklif eden Ffowcs William-Hawkings'dır [24]. Ffows Williams ve Hawkings (FW-H) denklemi;

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_0} \frac{\partial p'}{\partial t^2} - \nabla p' &= \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{ T_{ij} H(f) \} \\ - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} \\ + \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f) \} \end{aligned} \quad (6)$$

Tablo 1. 2 Boyutlu hesaplama alanı için sınır koşulları ve türbülans modelleri
 (Boundary conditions and turbulence models for 2D computational domain)

| Durum | Akış-Girişi | Üst Sınır | Alt Sınır | Akış-Çıkışı | Zaman Adımı | Türbülans Modeli |
|-------|---|-----------|-----------|---------------|-------------|------------------|
| 1 | Hız Girişi | Duvar | Duvar | Basınç Çıkışı | e-04 | Standart k-ε |
| 2 | Hız Girişi | Duvar | Duvar | Basınç Çıkışı | e-04 | SST k-ω |
| 3 | Hız Girişi | Duvar | Duvar | Basınç Çıkışı | e-04 | Standart k-ω |
| 4 | Hız Girişi | Duvar | Duvar | Basınç Çıkışı | e-05 | Standart k-ω |
| 5 | Akustik Kaynak : Hesaplama alt duvarı ve kavite | | | | e-05 | Standart k-ω |
| 6 | Akustik Kaynak : Geçişli iç yüzey | | | | e-05 | Standart k-ω |


Şekil 3. 3 Boyutlu sayısal ağ yapısı ve geçişli iç yüzey (3D mesh and permeable interior surface)

Şekil 4. Kavite mikrofön konumları (Microphone location of cavity)

Eşitlik 6'da 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 normali doğrultusundaki bileşenidir. $\delta(f)$ 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 matematiksel bir yüzeyi belirtir. Kaynak terimlerinin tanım aralığını genelleştirmeyi ve serbest uzayda Green fonksiyonu çözümlerini geçerli kılar. Bu yüzey ($f = 0$) akustik kaynak yüzeyin tanımlar ve cismin sızdırmaz yüzeyi veya cisim içeren kapalı bir geçirgen yüzey olarak tanımlanabilir. T_{ij} Lighthill gerilme tansörü Eşitlik 7'de tanımlanmıştır.

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (7)$$

P_{ij} terimi ise Stokes akışları için şu şekilde verilir en genel formda Eşitlik 8'de gösterilmiştir.

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (8)$$

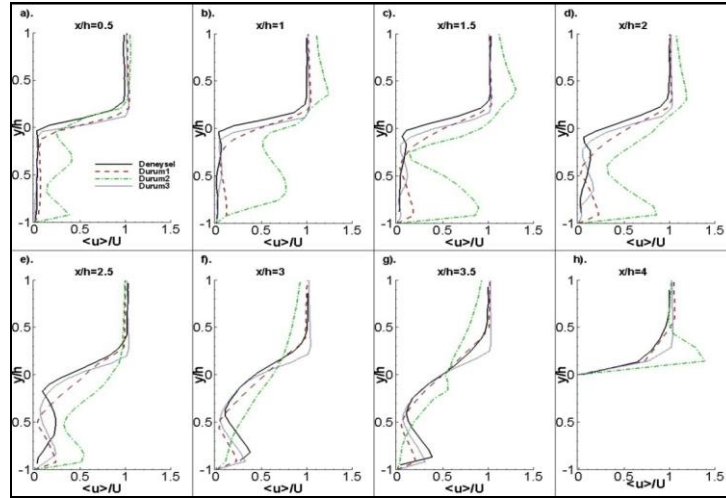
Eşitlik 6'nın çözümü serbest uzayda Green fonksiyonu $\delta(\mathbf{g})/4\pi r$ kullanılarak elde edilir. Çözüm iki tip integral içerir: yüzey ve hacim integralleri. Yüzey integralleri monopollü ve dipollü akustik kaynaklarını tanımlarken hacim integralleri dış alanın kaynak yüzeyindeki quadrapollü terimini temsil eder. Şekil 4' de görüldüğü gibi 11 tane mikrofön, kavite bölgesindeki ön, alt ve arka duvara belirli aralıklarla yerleştirilmişken, kavite kanalı içine arka duvarın merkez noktası olduğu $R = 6h$ yarı çaplı daire üzerine

10^0 'lık açı aralıklı 18 tane mikrofon konumlandırılmıştır. Durum 6' da, Eşitlik 6 geçişi iç yüzey (permable interior surface) ile quadrapol terimini dâhil edecek şekilde genelleştirilebilir. Geçişli iç yüzey üzerinden alınan zamana bağlı akış alanı değişkenleri Lighthill gerilme tansörünün, T_{ij} hesaplanmasında kullanılır ve kavite gürültüsüne türbülans etkisi hesaplanır.

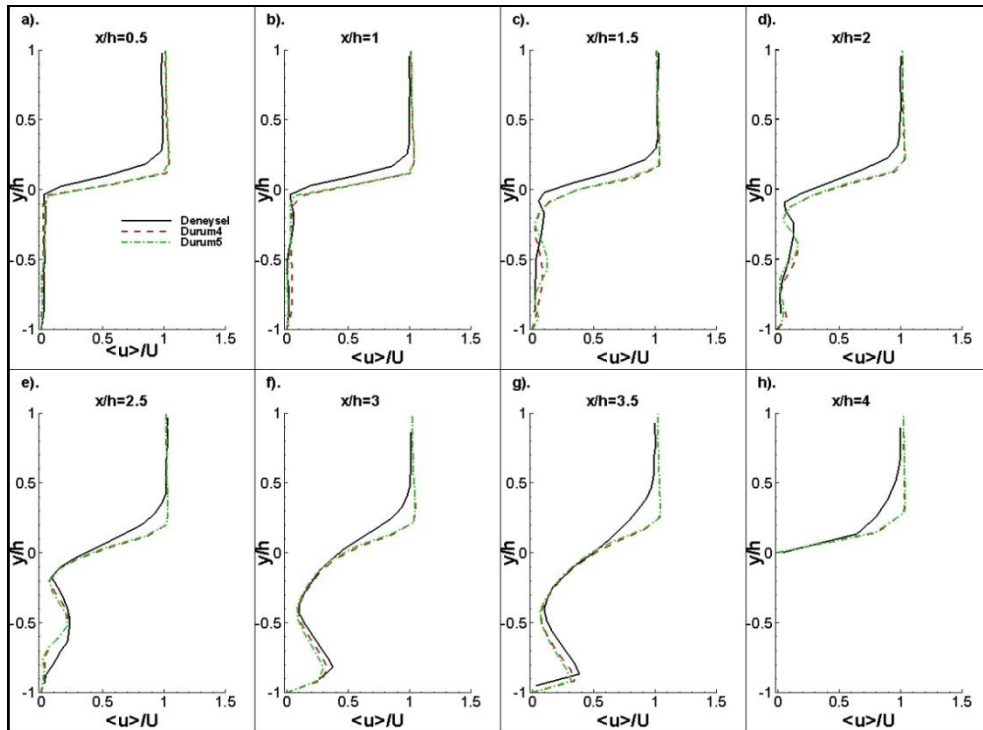
3. SAYISAL BULGULAR (NUMERICAL RESULTS)

Düşük Mach ve Reynolds Sayısı için yeteri kadar deneysel çalışma gerçekleştirilmemiş olsa da son dönemlerde Parçacık Görüntülemeli Akış Ölçümü (Particle Image

Velocimetry-PIV) tekniğinin gelişmesine bağlı olarak farklı kavite geometrileri için deney sonuçları literatüre kazandırılmaktadır [6]. Bu çalışmada kavite akış sonuçları, L/D oranı 4 için PIV ölçüm tekniği ile elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmaya ait ayrıntılar, Özsoy ve diğerleri [22] ile Özsoy ve Aslan [23]'ün araştırmalarında bulunabilir. Hesaplama alanı girişine deneysel veriler ile karşılaştıracak şekilde üniform hız profili 11,68 m/s olarak verilmiş ve Re_h değeri 4000 alınmıştır. Yakınsama kriteri tüm akış alanı değişkenleri için 10^{-6} alınmış ve toplam hesaplama süresi 0,064s'ye kadar 128 000 yinleme adımı kullanılmıştır. Şekil 5'te verilen $x/h=3$, $x/h=3,5$ ve $x/h=4$ istasyonlarında görülen büyük

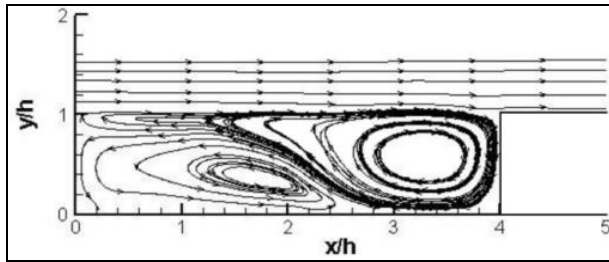


Şekil 5. Üç farklı türbülans modeli için 2 boyutlu kavite içi hız profilleri (Velocity profiles of 2D cavity for three different turbulence models)



Şekil 6. 2 ve 3 boyutlu kavite içi hız profilleri (Velocity profiles of 2D and 3D cavity)

vorteks yapısına ait hız profilleri ($\langle u \rangle = [u^2 + v^2]^{1/2}$), Durum 1 ve Durum 3 türbülans modellerinin kullanıldığı sonuçların deneysel veriler ile kabul edilebilir aralıkta uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. SST k- ω türbülans modeli ile deneysel sonuçlar arasında ise kabul edilebilir uyum görülmemiştir. SST k- ω modelinin daha yüksek hızlar içinde deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında kabul edilebilir sınırların dışında kaldığı, başka çalışmalarda da rapor edilmiştir [25]. Durum 5'te akış alanı 3 boyutlu ve türbülans modeli Standard k- ω alınırken zaman adımı $1,0 \times 10^{-5}$ olarak Durum 4 ile aynı tanımlanmıştır. Şekil 6'da Durum 4 ve Durum 5 için hız profilleri kavite içindeki farklı istasyonlar için deneysel veriler ile karşılaştırılmış ve sayısal sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki uyum açık olarak gözlemlenmiştir. Durum 5 için kavite içi hız profilleri orta eksen üzerinden alınmıştır. Yan yüzeyler simetri sınır koşuluyla tanımlanmış olsa da Durum 5'in 3 boyutluluk etkilerinin dahil edilmesi nedeniyle Durum 4'e göre deneysel veriler ile daha uyumlu olduğu görülmektedir (Şekil 6). Şekil 7 ve Şekil 8'de verilen 2 boyutlu akım çizgileri incelendiğinde deneysel PIV sonuçlarında [22, 23] kavite içinde ters yönlü iki vorteks yapısı gözlemlenmiştir. Ön duvara yakın olan küçük vorteks yapısı için merkez noktası $x/h = 2$ ve $y/h = 0,4$ olarak belirlenmişken, arka duvara yakın bölgedeki büyük vorteks yapısına ait merkez $x/h = 3,5$ ve $y/h = 0,5$ bulunmuştur. Sayısal analiz sonucunda üç türbülans modelinden Durum 1 ve Durum 3 kavite içinde farklı istasyonlarda hız dağılımına ait deneysel sonuçlar için Durum 2'ye göre daha fazla uyumlu olsalar da, Durum 3'te kullanılan Standard k- ω türbülans modeli akım çizgileri açısından deneysel veriler ile çok daha uyumlu sonuçlar üretmiştir. Durum 3 için kavite içinde ters yönlü iki vorteks yapısı elde edilmiştir. Vorteks merkez konumları deneysel sonuçlar ile uyumludur. Durum 1'de kavite içinde tek merkezli vorteks yapısı gözlemlenmişken Durum 2'de üç farklı vorteks yapısı elde edilmiştir. Hem kavite içindeki hız profili dağılımı hem de kavite içi vorteks yapısına ait deneysel veriler ile en iyi uyum Durum 3 ile yapılan hesaplamalar neticesinde elde edilmiştir (Şekil 8).



Şekil 7. Deneysel kavite içi akım çizgileri [22, 23]
(Experimental streamlines of cavity)

4. AEROAKUSTİK BULGULAR (AEROACOUSTICS RESULTS)

Kavite ve kanal içine yerleştirilen mikrofon konumları 2 boyutlu akış için Şekil 4'de verilmiştir ve aynı konumlar 3 boyutlu kavitenin genişlik ekseninin orta düzlemi ($z/h=0,5$) içinde kullanılmıştır. Akustik hesapların yapılabilmesi için

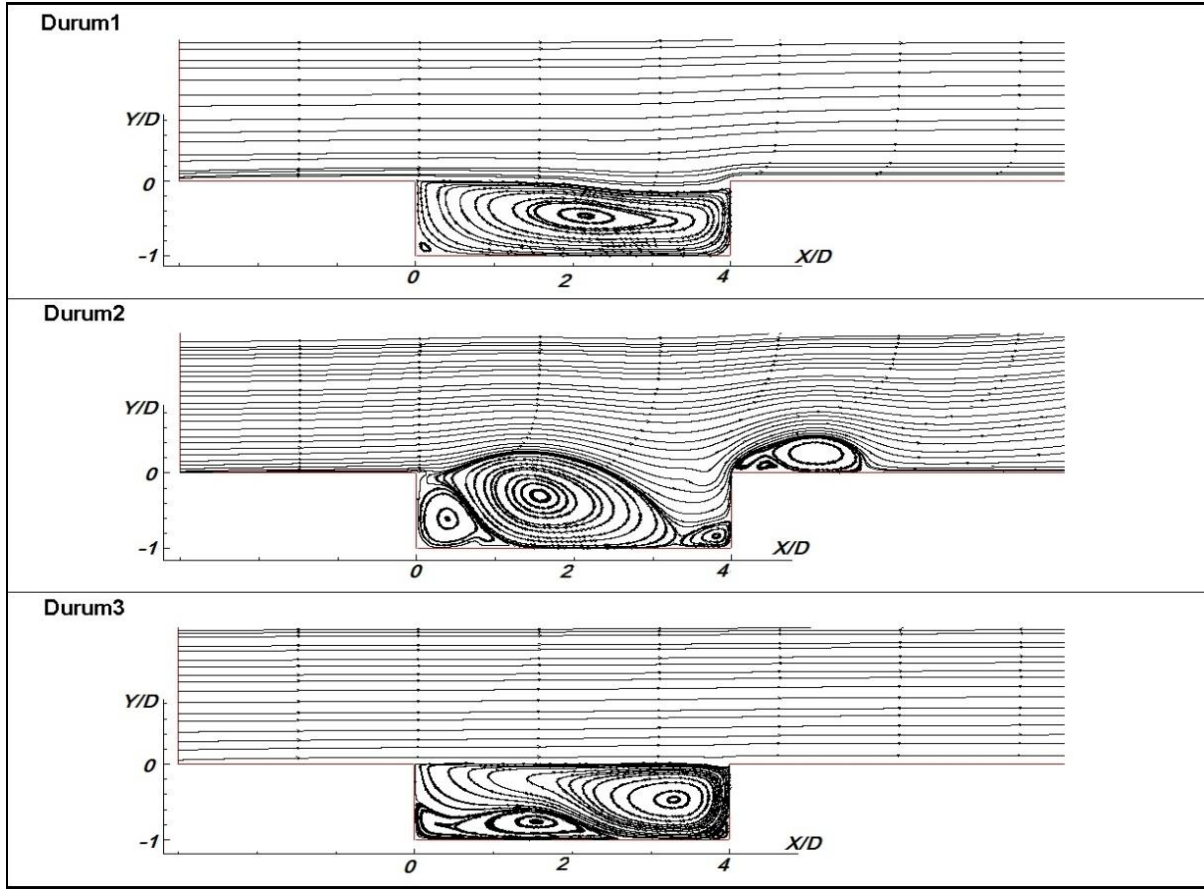
zamana bağlı basınç değişkeni, FFT analizlerinde kullanılmak üzere örnekleme frekansı 5 kHz olacak şekilde $t_{\text{son}} = 0,064$ s. süresinde kaydedilmiştir. Ses Basınç Düzeyi (Sound Pressure Level), zamana bağlı basınç değerlerinin ilgili zaman aralığında RMS (Root Mean Square) büyüklükleri kullanılarak desibel cinsinden hesaplanmıştır (Eşitlik 9).

$$SPL = 20 \log \left(\frac{p'_{\text{rms}}}{p_{\text{ref}}} \right) \quad \text{ve} \quad p_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ Pa} \quad (9)$$

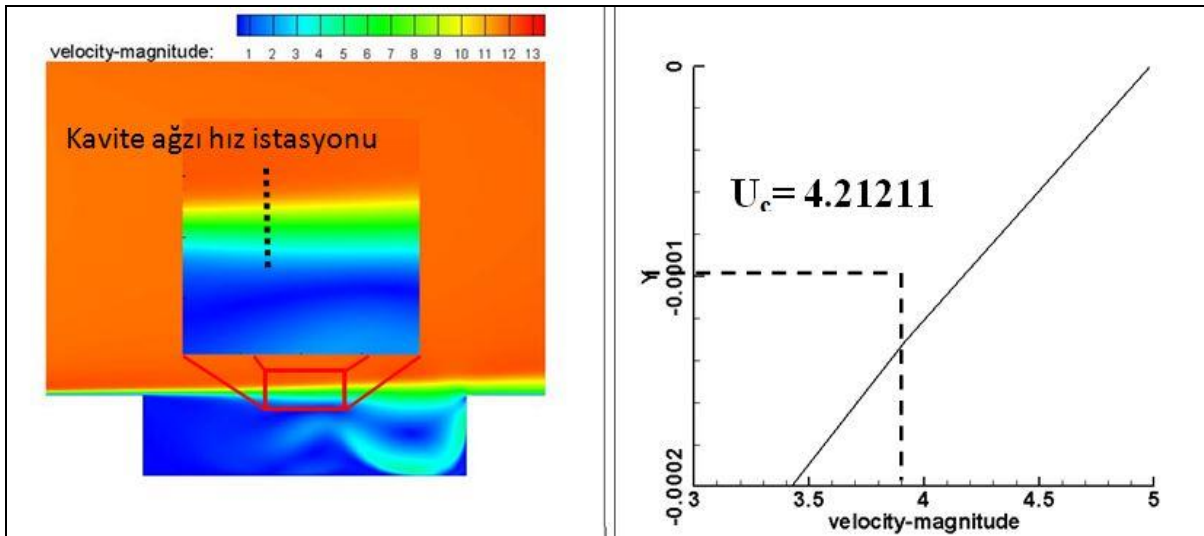
2 boyutlu sayısal çözümüne ait üç farklı türbülans model için akustik sonuçlar Şekil 10-11'de verilmiştir. Durum 4'de zaman adımı 1/10 oranında azaltılmıştır. Zaman adımının azaltılması ile örnekleme frekansı artmış, ayrıca birim frekans adımı azaldığından SPL değerlerindeki frekansa bağlı değişim daha iyi temsil edilebilmiştir. Kavite içinde akış alanı-akustik etkileşimine bağlı gürültü sinyaline ait frekans değerleri, ilk kez Rossiter tarafında teklif edilen bağıntı ile hesaplanmaktadır [26]:

$$f_m = \frac{U_\infty}{L} \frac{m - \alpha}{M_\infty + \frac{1}{\kappa}} \quad (10)$$

m ilgili frekansın mod indeksini gösterirken U_∞ serbest akım hızını, M_∞ ise Mach Sayısını ve L kavite uzunluğudur. Eşitlik 10'da verilen iki değişkenden α , kavite ön duvarından kopan iki vorteks arasında faz gecikmesi iken κ , kavite içinde oluşan vorteksin yayılım hızının serbest akım hızına oranı olarak verilmektedir [26]. Bu iki değişken için genel olarak kabul edilen değerler, $\alpha = 0,25$ ve $\kappa = 0,57$ 'dir. Ancak bu iki değişkene ait değerler genel olarak $0,1 < M_\infty < 0,8$ aralığındaki kavite akışı için belirlenmiştir. $M_\infty < 0,1$ den küçük kavite akışları için her ne kadar α değişkeni 0,25 alınsa da, κ değişkeninin nasıl seçilmesi gerektiği üzerine hala önemli bir uzlaşma sağlanamamıştır [6, 16, 27]. Çok düşük Mach ve Reynolds Sayısı için yapılmış deneysel çalışmaların azlığı bu iki değişken değerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu çalışmada kavite içinde hesaplanan hız kontürü kullanılarak vorteks yayılım hızı, U_c belirlenmiştir (Şekil 9a-b). Kavite merkez düzleminde 0,002 mm aşağıda alınan hız dağılımı profiline ait ortalama hız değeri 4,21211 m/s olarak hesaplanmıştır, Şekil 9b. $\kappa = U_c/U_\infty$ bağıntısı kullanılarak hesaplanmıştır [27]. Eşitlik 10'da verilen değişkenler $\alpha = 0,25$, $\kappa = 0,36$ olarak alınırsa ve $M_\infty = 0,035$ ve $L = 0,02$ m alındığında mod 1 ($m=1$) için Rossiter frekansı $f_1 = 155,6$ Hz, mod 2 ($m=2$) $f_2 = 311,2$ Hz ve mod 3 ($m=3$) değeri $f_3 = 466,8$ Hz olarak hesaplanır. Durum 1 ve Durum 3 türbülans modellerine karşılık gelen akustik sinyalinde, frekans dağılımında çoklu SPL'e ait tepe yapıları görülmemişken, Durum 2'de tepe frekansları SPL dağılımında yakalanmıştır. Ancak Durum 2 için kavite içi hız dağılımları ve akım çizgileri deneysel veriler ile kabul edilebilir aralıkta sonuç vermediğinden ve ayrıca Durum 2'ye ait SPL-frekans dağılımında görülen tepe noktaları Rossiter modları ile uyumluluk göstermediğinden



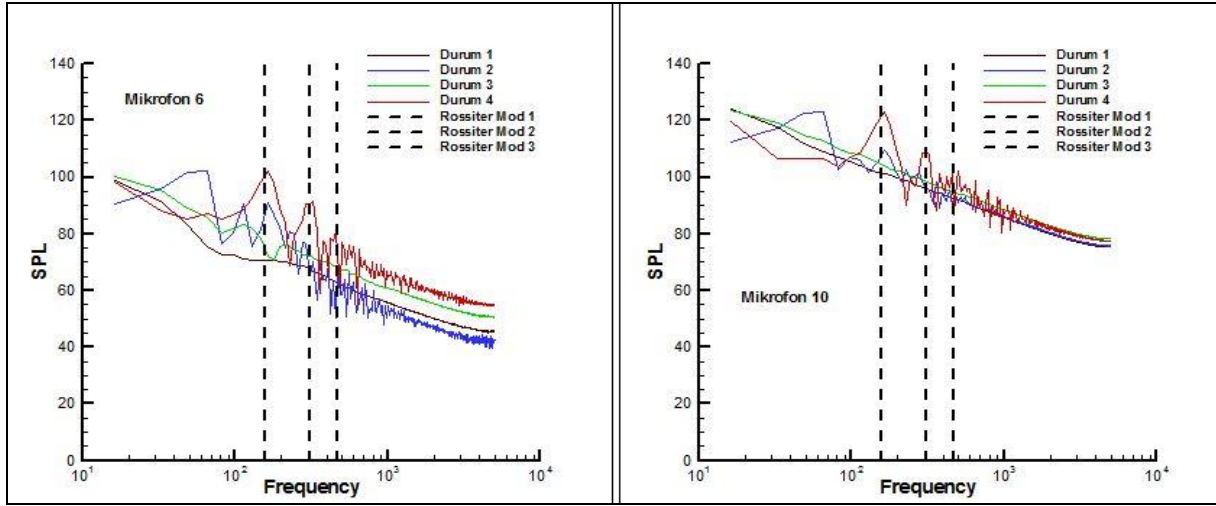
Şekil 8. Sayısal kavite içi akım çizgileri (Numerical streamlines of cavity)



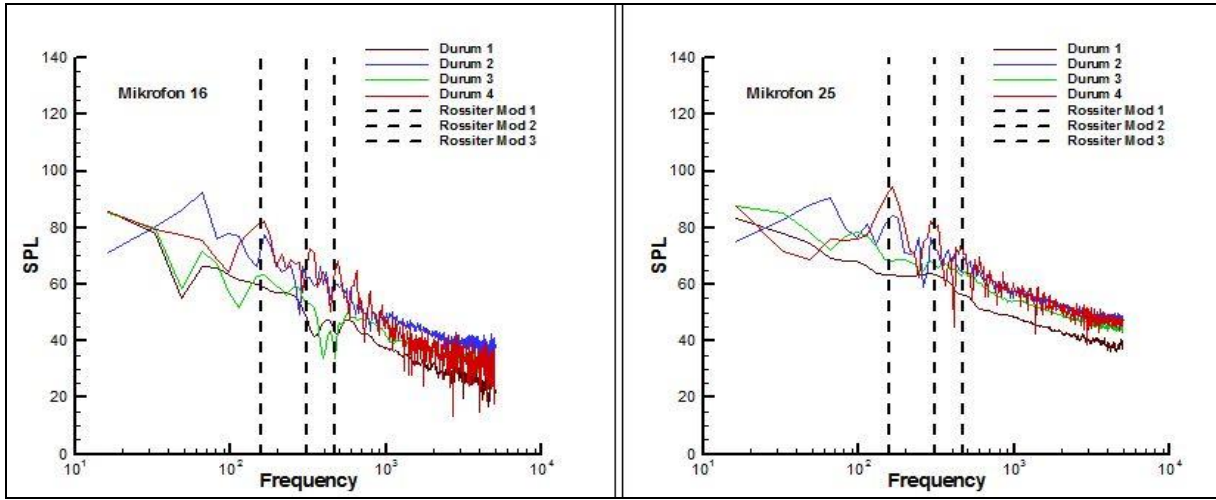
Şekil 9. Kavite ekseninde vorteks yayılım hızı (Computing of convection velocity of vortex at the cavity axis)

gözlemlenen SPL değerleri doğru kabul edilmemiştir. Durum 4 için SPL spektrumundaki frekans tepeleri açık olarak çözümlenmiş ve ilk 3 moda ait Rossiter frekansları ile uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, akustik gürültü hesaplarında akış alanının doğru çözülmesi yanında birim zaman adımının (Δt) ve buna bağlı olarak birim frekans adımının (Δf) uygun seçilmesi de önem

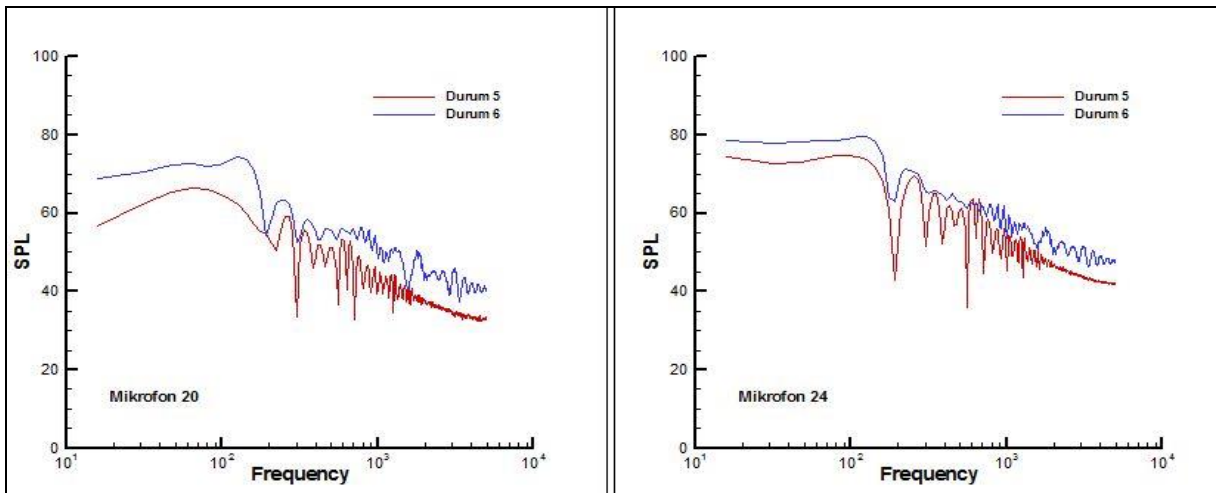
kazanmaktadır. Kavite akış alanı içinde oluşan arka duvar yakınındaki vorteks yapısının merkezi x yönünde 3,5 h iken y yönünde -0,5 h' ye konumlanmıştır. Bu konuma en yakın alıcı 10 numaralı mikrofondur. Şekil 10b'de görüldüğü gibi Rossiter Mod 1 için SPL değeri 123,054 dB, Mod 2 için 109 dB ve Mod 3 ise 98 dB olarak hesaplanmıştır. Kanal içinde yerleştirilmiş diğer mikrofönler ile aynı karakteristik



Şekil 10. Kavite içi mikrofonları için frekans-SPL sonuçları a) Mikrofon 6, b) Mikrofon10
(Frequency-SPL results for cavity interior microfone a) Microfone 6, b) Microfone 10)



Şekil 11. Kavite kanalı içinde konumlanmış mikrofonlar için Frekans-SPL sonuçları a) Mikrofon 16, b) Mikrofon 25
(Frequency-SPL results for cavity exterior microfone a) Microfone 16, b) Microfone 25)



Şekil 12. 3 boyutlu kavite akış alanı için SPL-frekans değerleri a) Mikrofon 20, b) Mikrofon 24
(Frequency-SPL results for 3D cavity flow a) Microfone 20, b) Microfone 24)

SPL dağılımını gösteren Mikrofon 6 için Rossiter Mod 1'de 101,704 dB, Mod 2 için 90,9 dB ve Mod 3 için ise 81,2 dB değerleri elde edilmiştir. Şekil 11'de ise kanal içine yerleştirilen Mikrofon 16 ve Mikrofon 25 için SPL – frekans dağılımları verilmiştir. Uzak alan ölçümleri için kullanılan bu mikrofonlarda kaydedilen desibel değerleri kavite içine yerleştirilen mikrofonlara göre yaklaşık 20 dB'lik bir azalma göstermektedir. Vorteks yapısına ait zamana bağlı basınç değişiminin en yakın mikrofondaki etkisinin yaklaşık 20 dB fazla gürültü ürettiği açık olarak gösterilmiştir. Durum 5 ve Durum 6 aynı türbülans modeliyle aynı zaman adımı kullanmalarına rağmen, ikinci durumda akış alanı içine geçişli iç yüzey (permable interior surface) yerleştirilmiş olmasıdır. Bu yerleştirilen yüzey akış alanını etkilemez, fakat türbülans etkilerine bağlı akustik kaynağın hesaplama alanı içinde tanımlanabilmesini sağlar. Durum 5 için FH-W denklemlerinde sadece yüzey terimleri hesaplanırken akustik kaynak olarak kavite ön, arka ve zemin duvarları ve dış alan zemin duvarları alınmıştır. Durum 6'da hesaplama alanı içine yerleştirilen yüzey sayesinde kavite duvarları ile geçişken yüzey arasında kalan tüm zamana bağlı hacim değişkenleri FW-H denklemlerinde verilen hacim integralinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu geçişken yüzey akustik kaynak olarak tanımlanmıştır. Böylece Eşitlik 7'de tanımlanmış T_{ij} Lighthill gerilme tansörüne ait katkı akustik sinyalde gözlemlenebilecektir. Şekil 12'de kavite kanalı içinde konumlanmış Mikrofon 20 ve Mikrofon 24 için SPL-frekans dağılımı verilmiştir. Her iki mikrofon içinde FW-H denklemlerinde verilen T_{ij} Lighthill gerilme tansörüne ait değişkenlerin etkisi SPL değerlerinde yaklaşık 5 dB artış olarak kendini göstermiştir. Yüksek frekans değerlerinde SPL verilerinde görülen hızlı değişimler türbülans etkisine bağlıdır. Türbülans, akış alanındaki enerjisi yüksek yapıları temsil ettiğinden yüksek frekanslardaki değişim türbülansa bağlı gürültü etkisini göstermektedir.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, düşük Reynolds ve Mach Sayısı için akış alanı çözümleri, ticari sonlu hacim çözücüleri kullanılarak 2 ve 3 boyutta farklı türbülans modelleri hem de zamana bağlı değişkenlerin girdi olarak alındığı Akustik Analoji yaklaşımı ile aerodinamik kaynaklı gürültü incelemiştir. Tüm zamana bağlı akış alanı sonuçları deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Farklı türbülans modelleri için deneysel verilere en yakın sonuçlar Standart k- ω ve Standart k- ϵ modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu iki modelin akım çizgileri incelendiğinde, Standart k- ω modelinin daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bundan dolayı Durum 4'te ve 3 boyutlu son iki durumda Standart k- ω modeli kullanılmıştır. Dördüncü durumda daha hassas sonuçlar için birim zaman adımı 1/10 oranında küçültülmüştür. Ayrıca ilk dört durumda farklı türbülans modellerinin ve farklı zaman adımlarının FW-H Akustik Analoji yaklaşımı kullanılarak akış alanının muhtelif noktalarına mikrofonlar yerleştirilerek akustik gürültü üzerine etkileri incelenmiştir. Deneysel veriler ile karşılaştırılan türbülans modelleri

arasından Standart k- ω modelinin hata payının genel olarak kavite içi hız profilleri sonuçlarında daha az olduğu görülmüştür. Ayrıca Rossiter modları hesaplarına göre yapılan karşılaştırmada Standart k- ω modeli ve $\Delta t = 10^{-5}$ s için ilk üç mod değerinin FW-H Akustik Analoji kullanılarak hesaplanan akustik sinyal SPL tepe noktaları ile son derece uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. 3 boyutlu kavite analizinde, vorteks yapılarının arka duvar ile etkileşiminden kaynaklı girdap sirkülasyonuna dayalı kavite duvarı üzerinde oluşan zamana bağlı basınç değişimleri yanında kullanılan geçişli iç yüzey (permable interior surface) ile quadrapol terimlerinde hesaplanmıştır. Geçişli iç yüzeyin kaynak olarak kullanıldığı durumda türbülans etkilerine bağlı yüksek frekans değerleri için gürültü karakterinde artış gözlenmiştir.

6. SEMBOLLER (SYMBOLS)

| | |
|---------------|--|
| E | Birim kütledeki toplam enerji |
| F | Konvektif akı matrisi |
| f_m | Rossiter modları |
| G | Vizkoz akı matrisi |
| h | Kavite basamak yüksekliği |
| L | Kavite boyu |
| P | Zamana bağlı basınç |
| p'_{rms} | RMS (Root Mean Square) basıncı |
| p'_{ref} | 2×10^{-5} Pa |
| q | Isı akısı |
| u_i | Akış hızının x_i doğrultusundaki bileşeni |
| Re_h | Karakteristik uzunluğa bağlı Reynolds değeri |
| H | Kaynak terimi |
| f_j | Hacmi etkileyen kuvvetler |
| u'_i | Türbülans hız ani değişimlerini (fluctuation) |
| u_n | Akış hızının yüzey normali doğrultusundaki bileşeni |
| u | Hız vektörü |
| T_{ij} | Lighthill gerilme tansörü |
| W | Akış çözüm vektörü |
| ρ | Akışkanın yoğunluğu |
| τ_{ij} | Viskoz gerilim tansörü |
| μ_t | Türbülans viskozitesi |
| δ_{ij} | Kronecker delta |
| H(f) | Heaviside |
| M_∞ | Serbest akımın Mach sayısı |
| V | Kontravariant hızı |
| q_h | Hacim içerisindeki zamana bağlı ısı kaynağı |
| $\delta(f)$ | Dirac delta |
| u | Hız vektörünün x bileşeni |
| v | Hız vektörünün y bileşeni |
| w | Hız vektörünün z bileşeni |
| Q | Çözüm vektörü |
| U_∞ | Serbest akımın hızı |
| v_i | Yüzey hızının x_i doğrultusundaki bileşeni |
| v_n | Yüzey hızının yüzey normali doğrultusundaki bileşeni |
| p' | Uzak bölgedeki ses basıncı |

| | |
|------------|----------------------|
| p_0 | Atmosfer basıncı |
| μ | Dinamik viskozite |
| m | Mod indeksi |
| κ | Vorteks yayılım hızı |
| α | Faz gecikmesi |
| α_0 | Ses hızı |
| SPL | Ses basınç seviyesi |
| Δt | Birim zaman adımı |
| Δf | Birim frekans adımı |

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Lawson S. J., Barakos G. N., Review of numerical simulations for high-speed turbulent cavity flows, *Progress in Aerospace Sciences*, 47 (3), 186-216, 2011.
2. Güzel N., Sağın S.M., Room Acoustics In Home Theatre Design, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (2), 299-309, 2014.
3. Barone M.F., Srinivasan A., A Computational study of flow within cavities with complex geometric features, 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech AIAA 2015-0008, 2015.
4. Zhang S., Xuliang L., Hanxin Z., Chi-Wang S., High order and high resolution numerical schemes for computational aeroacoustics and their applications, *Lecture Notes in Mechanical Engineering-Fluid-Structure-Sound Interactions and Control*, 27-32, 2016.
5. Lighthill M. J., On sound generated aerodynamically I. General theory, *Proceeding Royal Society London A*, 211, 564-587, 1952.
6. Crook S. D., Lau T.C.W., Kelso R.M., Three-dimensional flow within shallow, narrow cavities, *Journal of Fluid Mechanics*, 735, 587-612, 2013.
7. Temmerman L., Tartinville B., Hirsch C., URANS investigation of the transonic M219 cavity, *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling- Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 471-481, 2012.
8. Ashworth R., Prediction of acoustic resonance phenomena for cavities detached eddy simulation, *The Conference of Royal Aero Society- QinetiQ*, UK, 2004.
9. Liggett L.D., Smith M.J., Cavity Flow assessment using advanced turbulence methods, *Journal of Aircraft*, 48 (1), 141-156, 2011.
10. Chen H., Zhong Q., Wang X., Li D., Reynolds number dependence of flow past a shallow open cavity, *Science China Technological Sciences*, 57 (11), 2161-2171, 2014.
11. Kompenhans M., Ferrer E., Chavez M., Valero E., Numerical study of three dimensional acoustic resonances in open cavities at high Reynolds numbers, *Aerospace Science and Technology*, 45, 501-511, 2015.
12. Haaban M., Mohany A., Passive control of flow-excited acoustic resonance in rectangular cavities using upstream mounted blocks, *Experimental Fluids*, 56, 2015.
13. Pey Y.Y., Chua L.P., Effects of trailing wall modifications on cavity wall pressure, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 57, 250-260, 2014.
14. Pey Y.Y., Chua L.P., Siau W.L., Effect of trailing edge ramp on cavity flow structures and pressure drag, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 45, 53-71, 2014.
15. Vikramaditya N.S., Kurian J., Experimental study of influence of trailing wall geometry on cavity oscillations in supersonic flow, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 54, 102-109, 2014.
16. Martinez M.A., Di Cicca G.M., Iovieno M., Onorato M., Control of Cavity Flow Oscillations by High Frequency Forcing, *Journal of Fluids Engineering*, 134, 128-139, 2012.
17. Fuglsang D.F., Cain A.B., Evaluation of shear layer cavity resonance mechanisms by numerical simulation, 30. AIAA Aerospace Scientific Meeting Exhibition, Reno Nevada -USA, 1992.
18. Sridhar V., Kleine H., Gai S.L., Visualization of wave propagation within a supersonic two-dimensional cavity by digital streak schlieren, *Experiments in Fluids*, 56:152, 2015.
19. Laiping Z., Ming L., Wei L., Xin H., An implicit algorithm for high-order DG/FV schemes for compressible flows on 2D arbitrary grids, *Communications in Computational Physics*, 17 (1), 287-316, 2015.
20. FLUENT Theory Guide 14.0, 2013.
21. Wilcox D.C., *Turbulence Modeling for CFD*, 3. Baskı, DCW Industries, Inc., La Canada, 2006.
22. Özsoy E., Rambaud R., Stitou A., Riethmuller M.L., Vortex characteristics in laminar cavity flow at very low Mach number, *Experiments in Fluids*, 38, 133-145, 2005.
23. Özsoy E., Aslan A.R., Üç boyutlu bir kavite üzerindeki sıkıştırılmaz akışın sayısal bir yöntemle analizi, *İTÜ Dergisi/D Mühendislik*, 10 (3), 149-159, 2011.
24. Ffowcs Williams J.E., Hawkins D.L., Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion, *Philosophical Transactions Royal Society Series A*, 264, 321-342, 1969.
25. Peng S.H., Leicher S., DES and hybrid RANS-LES modelling of unsteady pressure oscillations and flow features in a rectangular cavity, *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 97, 132-141, 2008.
26. X Gloerfelt Cavity Noise, VKI Lecture Series, Brussels, Belgium, 2009.
27. Ünalms Ö.H., Clemens N.T., Dolling D.S., Cavity oscillation mechanisms in high-speed flows, *AIAA Journal*, 42 (10), 2035-2041, 2004.

