



KAVİTE AKIŞININ AEROAKUSTİK ANALİZİ

Baha ZAFER* ve Furkan COŞGUN**

*İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
34315 Avcılar/İstanbul, baha.zafer@istanbul.edu.tr

**İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isı Akışkan
34437 Beyoğlu/İstanbul, frkncosgn@gmail.com

(Geliş Tarihi: 15.04.2017, Kabul Tarihi: 15.05.2018)

Özet: Bu çalışmada düşük Mach sayısı için zamana bağlı 2 boyutlu kavite akışı ve kavite boyunca akış kaynaklı aerodinamik gürültü incelenmiştir. İki boyutlu akış alanı çözümlerinde, iki farklı zamana bağlı Yeniden-Temas-Eden Girdap Benzetimi (DES) türbülans modelleri kavite akışlarını gözlemlemek için kullanılmıştır. DES ayrıklaştırmasında hibrit model olarak, iki denklemlili SST $k-\omega$ ve tek taşınım denklemlili Spalart-Allmaras türbülans modelleri kullanılmıştır. Bunlara ek olarak farklı sayısal ayrıklaştırma algoritma ve sayısal yöntemleri de düşük Mach sayılarında kavite akışını incelemek için kullanılmıştır. Kavite geometrisi için hesaplanan sayısal sonuçlar düşük Mach sayısı şartları altında, deneysel veriler ile hem akış alanı değişkenleri hem de akustik sinyal verileri için karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Zamana bağlı akış alanı sonuçları, Ffowcs Williams–Hawkins (FW-H) Akustik Analjisi çözümleri için girdi verisi olarak kullanılıp kavite gürültü değerleri hesaplanmıştır ve deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Kavite gürültüsüne ait deneysel veriler ile 500-1500 Hz frekans aralığında uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kavite Akışı, Aeroakustik, Düşük Reynolds Sayısı, Akustik Analjisi

AEROACOUSTICS ANALYSIS OF CAVITY FLOW

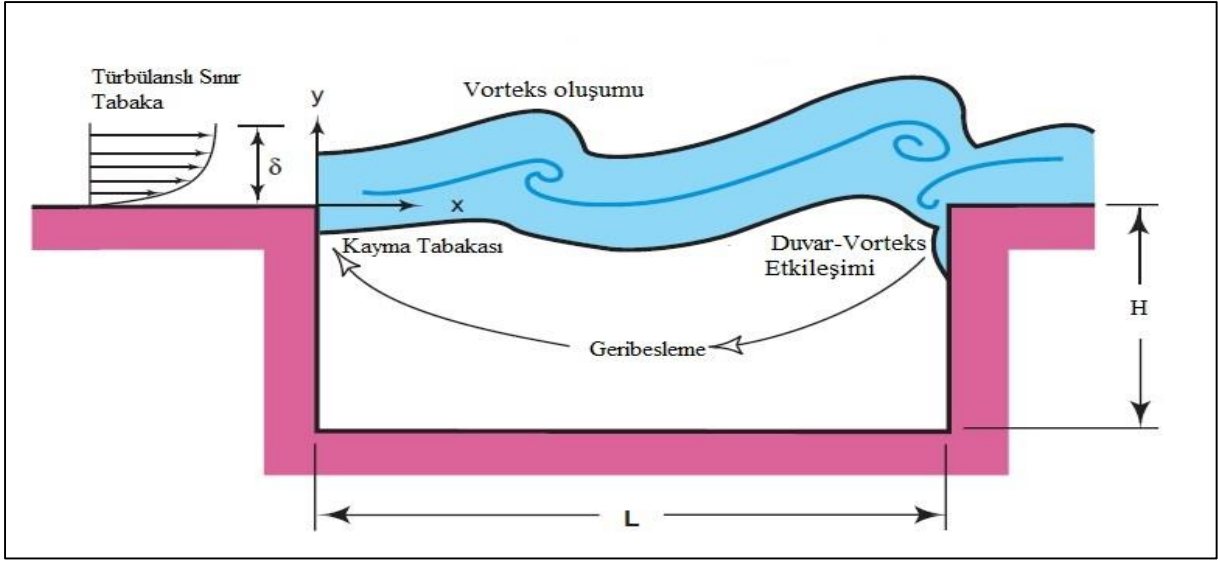
Abstract: In this study, unsteady low Mach number flow field and aerodynamically generated noise of 2D cavity flows are investigated. In the case of 2D flow fields, different unsteady Detached Eddy Simulation (DES) turbulence models are used to observe cavity flow field. SST $k-\omega$ with two transport equations and Spalart-Allmaras with one transport equation are used to calculate near field to take in account wall effect in which DES is used. In addition to these, different discretization algorithms and approaches are employed to calculate the flow field and to account the acoustic level. Computed numerical results for cavity flow are compared and validated with an experimental measurement of low Mach numbers for the flow field quantities and acoustic signals. All unsteady flow fields results are used to compute a cavity noise using Ffowcs Williams–Hawkins (FW-H) Acoustics Analogy and compared with experimental data. At 500 – 1500 Hz, well agreement is observed between numerical result and the experimental data which are conducted for cavity noise.

Keywords: Cavity Flow, Aeroacoustics, Low Reynolds Number, Acoustic Analogy

GİRİŞ

Kavite geometrisi boyunca zamana bağlı akış ve bu akış tipinin yol açtığı sorunlar, üzerinde dikkatle durulan konulardır. Bu tip akışlarda, akış alanı içerisinde bulunan görece basit bir geometriye sahip kavite profili, akış alanında istenmeyen titreşim problemleri ve rahatsızlık verici seviyelerde gürültü oluşumunun kaynağıdır (Lawson ve Barakos, 2011). Görece basit bu profil hem akış alanı hesaplamaları hem de akustik alanı hesaplamalarında önemli bir yer tutmaktadır. Kavite akışlarının doğası Şekil 1'de gösterilmektedir. Yaklaşan serbest akımın giriş bölgesi alt duvarıyla etkileşiminden oluşan sınır tabaka, kavite ön duvarından sonra koparak kayma tabakasını oluşturur. Kayma tabakası, kavite uzunluğu boyunca ilerler ve nihayetinde kavite arka duvarına yakın bir bölgede kavite duvarlarıyla etkileşir

(Colonius vd, 2002). Bu bölgede oluşan, kayma gerilme tabakası-duvar etkileşimi başlıca akustik kaynak olarak kabul edilir. Bu etkileşimden oluşan akustik dalgalar, arka duvardan ön duvara doğru yayılır ve ön duvarda oluşan kayma tabakası ile etkileşir ve ön duvardaki akım kopma sıklığını değiştirir. Akış alanı ile akustik alan arasındaki bu karşılıklı ilişki (*coupled fields*-bağlaşik alanlar) önemli araştırma konularından biridir (Cattafesta vd, 2008). Akış alanı içinde oluşan zamana bağlı aerodinamik basınç değişimleri yanında çok küçük ölçekli akustik basınç alanının, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı kullanılarak çözülmesi hem hesaplama alanının sayısal ağ yapısının sık dokunmasını hem de yüksek mertebeden ayrıklaştırma şeması kullanımını gerektirmektedir (Tam,2004).



Şekil 1. Kavite akışı ve ses oluşumu (Lawson ve Barakos, 2011)

Bundan dolayı aeroakustik araştırmalarında Lighthill (Lighthill, 1952) tarafından teklif edilen Akustik Analoji yaklaşımına sıklıkla başvurulmaktadır.

Literatürde deneysel ve sayısal çalışmaların önemli bir kısmında yüksek Mach sayısı için kavite akış problemi incelenmiştir. Ancak düşük Mach sayısı, deneysel ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile çok fazla çalışılmamıştır (Khanal vd, 2009-Malone vd, 200). Mendonca ve diğerleri, 2003'de k-ε DES modelinde ikinci mertebeden merkezi fark yaklaşımı ile yaklaşık 1.1×10^6 sayısal ağ yapısını, M-219 kavite akışını modellemek için kullanmıştır. 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. Shieh ve Morris 2001'de kendi sayısal kodlarını URANS, Spalart-Allmaras ve hibrit DES modellerini kapsayacak şekilde geliştirmiştir. Dördüncü mertebeden açık Runge Kutta, zaman ayrıklaştırmasında kullanılırken, Disipasyon İlişkisi Korunumu (dissipation relation preserving-drp) şeması mekânsal ayrıklaştırma için tanımlanmıştır. Sayısal hesaplamalarda kavite kayma gerilmesi tabaka salınımları tanımlanmıştır. Baysal ve Srinivasan'da 1991 yılında RANS yaklaşımını sonlu hacimler yöntemini kullanarak Baldwin-Lomax türbülans modeli için geliştirmiştir ve akış ayrılması, ön duvar sınır tabaka gelişimi ve arka duvar-vorteks etkileşimini incelenmiştir. Fugisang ve Cain ise 1992'de kavite kanalı boyunca Baldwin-Lomax türbülans modelini kullanırken, kavite içinde Doğrudan Sayısal Benzeşim (direct numerical simulation-DNS) yaklaşımı ile zorlanmış kayma gerilmesi tabakasının kavite içi zamana bağlı değişkenlere etkisini ve kayma gerilme tabakası ile arka duvar etkileşimini incelenmiştir. Bu etkileşim daha önce de bahsedildiği gibi akış kaynaklı gürültünün oluşumunu sağlayan temel dinamiklerdir.

Bu çalışmadaki düşük Mach sayısı için akış alanı çözümleri Fluent ticari sonlu hacim çözücüsü kullanılarak yapılmıştır. Akış alanına ait Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) sonuçları deneysel çalışma

ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Ayrıca belirlenen Reynolds ($Re_h=1.9 \times 10^4$) ve Mach sayıları ($M_\infty=0.03$) için elde edilen hesaplama alanına ait zamana bağlı değişimler ile Akustik Analoji yaklaşımı kullanılarak kavite gürültü seviyesi incelenmiştir. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile Akustik Analoji yaklaşımının birlikte kullanılması tüm hesaplama alanın çözülmesini gerektirmeden Ffowcs Williams-Hawkins (FW-H) yaklaşımı ile kavite gürültü seviyesinin belirlenmesini sağlamaktadır.

SAYISAL YAKLAŞIM

Akış alanına ait zamana bağlı bünye denklemlerinin sayısal ayrıklaştırması ticari hesaplamalı akışkanlar dinamiği çözücüsü ile gerçekleştirilmiştir. Mekânsal ayrıklaştırmalar için sonlu hacim yaklaşımı kullanılırken zamansal ayrıklaştırma için kapalı zaman ilerlemeli çözücü (*implicit time advancement*) kullanılmıştır. Sıkıştırılmaz akış alanı çözümlerinde basınç-hız bağımlılığını ayrıklaştırmak için farklı durumlarda sonlu hacimler çözücüsünün sağladığı, simple, coupled ve simplec algoritmalarının her üçü de kullanılmıştır. Mekânsal ayrıklaştırma da ise, farklı durumlarda momentum bağıntıları için ikinci mertebeden ileri gidişli şema (second order upwind scheme), üçüncü mertebeden muscl (third order muscl) ve sınırlandırılmış merkezi fark şeması (bounded central differencing) kullanılmıştır. Zamansal ayrıklaştırmalarda ise, tüm analizlerde sınırlandırılmış ikinci mertebeden ileri gidişli şema (bounded second order implicit) kullanılmıştır. Akış alanına ait korunum denklemleri integral formunda Eş. (1)'de verilmiştir (FLUENT Theory Guide, 2011).

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

Akış çözüm vektörü W , taşınım akı matrisi F ve viskoz akı matrisi G ;

$$W = \begin{Bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{Bmatrix}, F = \begin{Bmatrix} \rho V \\ \rho V u + p_i \\ \rho V v + p_j \\ \rho V w + p_k \\ V(\rho E + p) \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$G = \begin{Bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ \tau_{ij} v_j + q \end{Bmatrix}, H = \begin{Bmatrix} 0 \\ f_x \\ f_y \\ f_z \\ \rho(f_i v_j \delta_{ij}) + q_h \end{Bmatrix} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Sırasıyla ρ akışkanın yoğunluğu, $\vec{v} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$ hız vektörü, V kontravariant hız iken tanımı $V = \vec{v} \cdot \vec{n}$ olarak verilmiştir ve \vec{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 hacme etkiyen kuvvetleri (yerçekimi 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, yoğunluk 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.

$$\frac{\partial W}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial t} \iiint Q dV + \iint (F - G) \cdot dA = \iiint H dV \quad (4)$$

Q çözüm vektörü, basıncında tanımlandığı birincil değişkenlere göre yeniden yazılır ve ön-koşullandırma matrisi:

$$Q = \begin{Bmatrix} p \\ u \\ v \\ w \\ T \end{Bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial Q} = \begin{bmatrix} \rho_p & 0 & 0 & 0 & \rho_T \\ \rho_p u & \rho & 0 & 0 & \rho_T u \\ \rho_p v & 0 & \rho & 0 & \rho_T v \\ \rho_p w & 0 & 0 & \rho & \rho_T w \\ \rho_p H - \delta & \rho u & \rho v & \rho w & \rho_T H + \rho C_p \end{bmatrix}$$

$$(6) \quad \rho_p = \frac{\partial \rho}{\partial p}, \quad \rho_T = \frac{\partial \rho}{\partial T} \quad (7)$$

Sıkıştırılmaz akış için $\delta = 0$ alınır. Böylece sıkıştırılmaz akış alanı çözümlerinde kullanılan ayrıklaştırma şeması elde edilir (FLUENT Theory Guide, 2011). Eş. (3)'deki τ_{ij} ise türbülans kayma (*Reynolds stress*) gerilmesi Boussinesq yaklaşımına göre aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\tau_{ij} = -\overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \quad (8)$$

Denklemdaki $\overline{u_i}$ ve $\overline{u_j}$ türbülans hızının ani değişimleri (*fluctuation*), μ_t türbülans viskozitesi, δ_{ij} ise Kronecker Delta'dır.

Bu çalışmada SST k- ω ve Spalart-Allmaras RANS modelli DES türbülans uygulamaları gerçekleştirilmiştir. DES uygulamalarında, duvardan uzak bölgelerde ayrıklaştırılmış akış alanı değişkenlerinin filtre edilmiş hali olan Büyük Girdap Benzetimi (large eddy simulation) kullanılırken, yakın duvar bölgelerinde zamana bağlı RANS modelleri kullanılmaktadır. LES bölgeleri genellikle ana türbülans bölgeleriyle eşleşmiştir ki bu bölgelerde geniş türbülans seviyeleri baskın bir rol oynamaktadır.

Genellikle hibrit LES/RANS modeli olarak anılan DES modelleri genellikle iç akış simülasyonları için RANS modelleri ile LES modelini birleştirir. DES modelleri LES modeline göre daha az fakat, RANS modellerine kıyasla daha çok hesaplama maliyeti doğurmaktadır. LES modeli için kullanılan ana denklemler zamana bağlı Navier-Stokes denklemlerinin filtrelenmesi sonucu elde edilmiştir. Filtre edilmiş değişken aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Wagner vd, 2007):

$$\overline{\phi}(x) = \int_D \phi(x') G(x, x') dx \quad (9)$$

G çözülmüş girdapların skalasını belirleyen filtre fonksiyonu iken D akış alanını temsil etmektedir. Sonlu hacimler ayrıklaştırması dolaylı olarak filtre etme işlemini destekler.

$$\overline{\phi}(x) = \frac{1}{V} \int_V \phi(x') dx', x' \in V \quad (10)$$

Ayrıklaştırılmış V , hesaplama hücrelerinin hacmini temsil etmektedir. Navier-Stokes denklemlerinin filtre edilme işlemi:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\overline{u_i}) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\overline{u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u_i u_j}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_j} (\overline{u_i}) - \frac{\tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (12)$$

τ_{ij} subgrid-scale stress olarak tanımlanır:

$$\tau_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (13)$$

Hesaplamalarda DES modeli için belirlediğimiz RANS modellerinden biri SST k- ω türbülans modelidir. SST k- ω modeli Standart k- ω modeline benzer bir forma sahiptir (Wilcox, 2006).

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}) + G_k - Y_k + S_k \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (15)$$

Bu denklemlerde, G_k ortalama hız gradyeni sebebiyle oluşan türbülans kinetik enerjisini, G_ω türbülans enerji yitimi oluşumunu, Γ_k ve Γ_ω sırasıyla türbülans kinetik enerjisi ve türbülans enerji yitiminin etkili yayılımını, Y_k ve Y_ω sırasıyla türbülans kinetik enerjisindeki ve enerji yitimindeki, türbülansın yol açtığı yok oluşları temsil etmektedir. Ayrıca D_ω ters difüzyon, S_k ve S_ω kaynak terimlerini temsil eder. DES için, SST k- ω modelindeki Y_k terimi değiştirilir:

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega f_{b^*} \quad (16)$$

$$f_{b^*} = \max\left(\frac{L_t}{C_{des} \Delta}, 1\right) \quad (17)$$

$$L_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega} \quad (18)$$

Δ maksimum sayısal ağ aralığını, L_t de türbülans uzunluk skalasını temsil ederken, C_{des} ayarlama sabitidir ve değeri DES modeli için 0.61'dir (FLUENT Theory Guide, 2011). DES modeli için kullanmış olduğumuz diğer RANS modeli tek denklemlili Spalart-Allmaras için transport denklemi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} u_i) = G_v - Y_v + S_v + \frac{1}{\sigma_v} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_j} \right)^2 \right] \quad (19)$$

\tilde{v} türbülans kinematik viskozitesini, G_v türbülans viskozitesi üretimini ve Y_v türbülans viskozitesi yok oluşunu temsil etmektedir. σ_v ve C_{b2} denklem sabitleridir, ν ise moleküler viskozitedir. S_v taşınım denklemindeki kaynak terimidir

HESAPLAMA ALANI

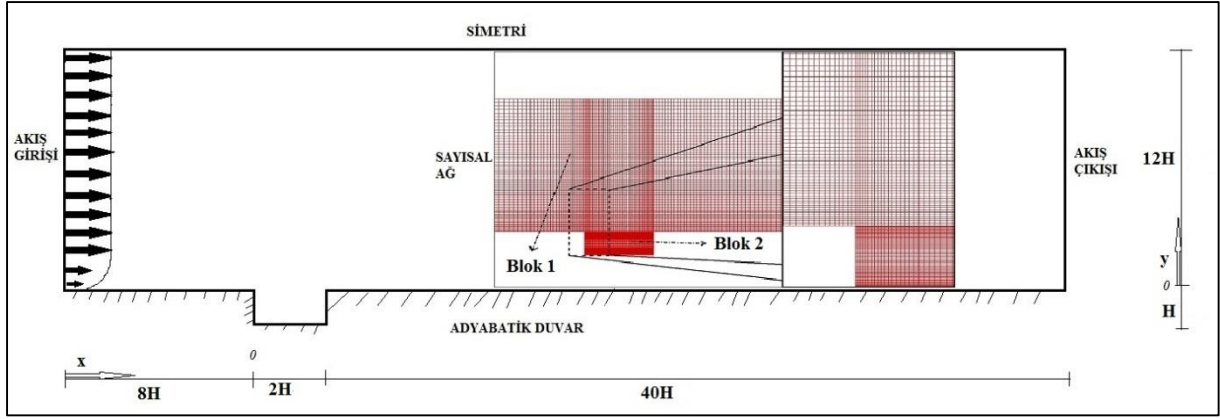
Sayısal çözüm için oluşturulan hesaplama alanı Şekil 2'de gösterilmiştir. Hesaplama alanı deneysel çalışmaya uygun şekilde hazırlanmıştır. Kavitenin basamak yüksekliği $H = 15$ mm ve uzunluğu $L = 30$ mm alınmıştır. Hesaplama alanı kavite ön duvarından $8H$ kadar önce başlayıp, kavite arka duvarından sonra $40H$ uzaklığında son bulmuştur. Hesaplama alanının yüksekliği, kavite bölgesindeki zamana bağlı değişkenlerin, hesaplama sırasında simetri sınır koşulundan minimum seviyede etkilenmesini sağlayacak şekilde $12H$ olarak belirlenmiştir. Çıkış uzunluğunun, giriş uzunluğunun 5 katı olarak belirlenmesi, kavite içinde oluşan zamana bağlı değişkenlerin sınır şartına bağlı olarak sayısal hata

birikimini önlemek içindir. Tüm hesaplamalar için aynı sayısal ağ yapısı kullanılmıştır. Hesaplama alanı iki ana kısımdan oluşur: kavite ve kanal bölgesi. Oluşan dinamik vorteks yapılarının doğru analiz edilebilmesi için kavite ön ve arka duvarlarının hemen sonrası ile öncesinde sayısal ağ sıklaştırılmıştır. Ana hesaplama alanımızda toplam 446,000 hücre bulunmaktadır. Kullanmış olduğumuz ticari kodun 0 ile 1 arasında değerlendirme yapan ağ yapısı kalite kontrolünde, mesh yapımızın kalitesi 1 çıkmıştır (FLUENT Theory Guide, 2011). Tablo 1'de üzerinde durduğumuz 6 durum için ayrıntılar verilmiştir. Tüm durumlarda zaman adımı 10^{-05} saniye olarak belirlenmiştir. Tüm durumlarda akış girişinde sabit hız, akış çıkışında sabit basınç sınır koşulları kullanılmışken, alt sınırdaki kaymama sınır koşulu üst sınırdaki ise simetri koşulları kullanılmıştır. *Durum 1* ve *Durum 2* için DES modeli yardımcı URANS yaklaşımı Spalart Allmaras iken diğer durumlarda SST $k-\omega$ kullanılmıştır. Tüm durumlarda yer çekimi hesaba katılmıştır ve yer çekimi kuvveti 9.81 m/s² olarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda kullanılan akışkan 300 K sıcaklığındaki havadır.

Durum 1'de dalgalanan hız algoritması için spektral sentezleyici (*spectral synthesizer*) kullanılmıştır. Diğer durumların hiçbirinde herhangi bir dalgalanan hız algoritması kullanılmamıştır. Akış alanı içerisinde mevcut ortalama akış alanı özelliklerine ek olarak, rastgele, zamana bağlı ve farklı skalalardaki türbülans kaynaklı salınım bileşenleri de mevcuttur. Bu stokastik bileşenler, büyük girdap simülasyonu (LES) çalışmaları gerçekleştirilirken, türbülanslı akış girişlerinde tanımlanmak zorundadır. Dalgalanan hız bileşenleri, sınırlarda, farklı rastgele akış üretici metotları kullanılarak hesaplanır ve tanımlanmış ortalama hıza eklenerek hesaba dahil edilmiş olur. Bu metotlardan biride Spektral Sentezleyicidir. Bu metot, uygun istatistik yaklaşımlarla Fourier Harmonilerini üretir ve ortalama alana ekleyerek, akış girişinde, türbülans hareketini hesaba dahil eder (Smirnov vd, 2001).

Tablo 1. Durumlar arası farklılıklar ve DES için kullanılan RANS modelleri

Durum	RANS Modeli	Çözücü Tipi	Gradyen Ölçümü	Daimi Çözüm
1	Spalart-Allmaras	Simple	Hücre Merkezli En Küçük Kareler	Gerçekleşmedi
2	Spalart-Allmaras	Simple	Hücre Merkezli En Küçük Kareler	Gerçekleşti
3	SST $k-\omega$	Simple	Hücre Merkezli En Küçük Kareler	Gerçekleşmedi
4	SST $k-\omega$	Simple	Hücre Merkezli En Küçük Kareler	Gerçekleşti
5	SST $k-\omega$	Simple	Hücre Merkezli Green Teorem	Gerçekleşti
6	SST $k-\omega$	Simplec	Hücre Merkezli En Küçük Kareler	Gerçekleşti



Şekil 2. Hesaplama alanı ve sayısal ağ yapısı

Ayrıca *Durum 1* ve *Durum 3* dışındaki tüm hesaplamalar için zamana bağlı çözümlerden önce 5000 yineleme adımlı sürekli rejim çözümleri (*steady state*) koşmuştur. Bu durum zamana bağlı hesaplamaların, çözüm başlangıçlarındaki kararsızlıklar sebebiyle oluşan hata birikimini azaltmaktadır. *Durum 2*'de Coupled çözüm yapılmışken *Durum 6*'da Simplec algoritması kullanılmıştır. Bunların dışındaki tüm durumlar için ayrıklaştırma algoritması Simple olarak belirlenmiştir.

Durum 5'de değişken gradyen çözümünde Green Gauss Cell-Based metodu kullanılmışken diğer bütün durumlar için Least Squares Cell-Based metodundan yararlanılmıştır. Kullanmakta olduğumuz ticari kodun, tüm değişkenleri hücre merkezine yerleştirdiğini göz önünde bulundurursak, hücre merkezli Green metodu, düğüm merkezli metotlarda olduğu gibi, ekstra bir kontrol hacmi oluşturmakla vakit harcamayacak ve en küçük kareler metodundaki gibi, kompakt formdaki bir matrisi oluşturmak ve çözmekle de uğraşmayacaktır. Bu durum, hücre merkezli Green Teoreminin Gradyen ölçümlerinde kullanılmasını, çözümü hızlandıran bir etken haline getirecektir. Yapısal nümerik ağlarda, Green Teoreminin gradyen ölçümlerinde kullanılması ikincil akı hesaplamalarını daha hassas çözmeyi sağlayabilmektedir. En küçük kareler metodu ise özellikle yapısal olmayan sayısal ağlarda önerilmektedir. Bu bilgiler ışığında, yapısal nümerik ağ sistemine sahip akış alanımız için, hücre merkezli Green teoremi kullanımının sayısal çözümümüzü daha hassas hale getireceği tahmin edilmiştir. Fakat bu sonuç, çözüm sırasında kullanmış olduğumuz diğer yaklaşımlarla da ilişkilidir.

FFOWCS WILLIAMS-HAWKINGS DENKLEMİ

Aerodinamik temelli oluşan sesin anlaşılmasında ve teorik bir zemine oturtulmasında en önemli adım 1952 yılında Lighthill (Lighthill, 1952) 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 Williams-Hawkings'dir (Ffowcs Williams ve Hawkings, 1969). Ffowcs Williams ve Hawkings (FW-H) denklemi:

$$\frac{1}{a_0} \frac{\partial p'}{\partial t^2} - \nabla p' = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{ T_{ij} H(f) \} - \frac{\partial}{\partial x_i} \{ [P_{ij} n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f) \} + \frac{\partial}{\partial t} \{ [\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f) \} \quad (20)$$

Eş. (20)'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 bileşenidir. $\delta(f)$ ve $H(f)$ sırasıyla Dirac Delta ve Heaviside fonksiyonunu işaret etmektedir. p' uzak bölgedeki ses basıncıdır. $f = 0$ ise sınırsız uzaydaki matematiksel bir yüzeyi belirtir. Kaynak terimlerinin tanım aralığını genelleştirmeyi ve serbest uzayda Green fonksiyonu çözümlerini geçerli kılar. Bu yüzey akustik kaynak yüzeyini tanımlar ve cismin sızdırmaz yüzeyi ile veya cisim içeren kapalı bir geçirgen yüzey olarak tanımlanabilir. T_{ij} Lighthill gerilme tansörü Eş. (21)'de tanımlanmıştır:

$$T_{ij} = \rho u_i u_j + P_{ij} - a_0^2 (\rho - \rho_0) \delta_{ij} \quad (21)$$

P_{ij} ise Stokes akışları için şu şekilde verilir:

$$P_{ij} = p \delta_{ij} - \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \quad (22)$$

Eş. (20)'nin çözümü iki tip integral içerir: yüzey ve hacim integralleri. Yüzey integralleri monopol ve dipol akustik kaynaklarını tanımlarken, hacim integralleri dış alanın kaynak yüzeyindeki Kuadrupol terimini temsil eder. Kavite içerisinde ve uzak bölgede konumlandırılmış mikrofonlar Şekil 3'de gösterilmiştir. On biri kavite içerisine, dördü kavite dışarısına toplam on beş mikrofon, ele alınan deneysel çalışmaya uygun bir şekilde yerleştirilmiştir (Parkhi, 2009). Referans ses basıncı değeri 2×10^{-5} Pa alınmıştır. Verilen sıcaklık ve

atmosfer basıncı değerleri için belirlenen ses hızı ise 340 m/s'dir.

SAYILAR BULGULAR

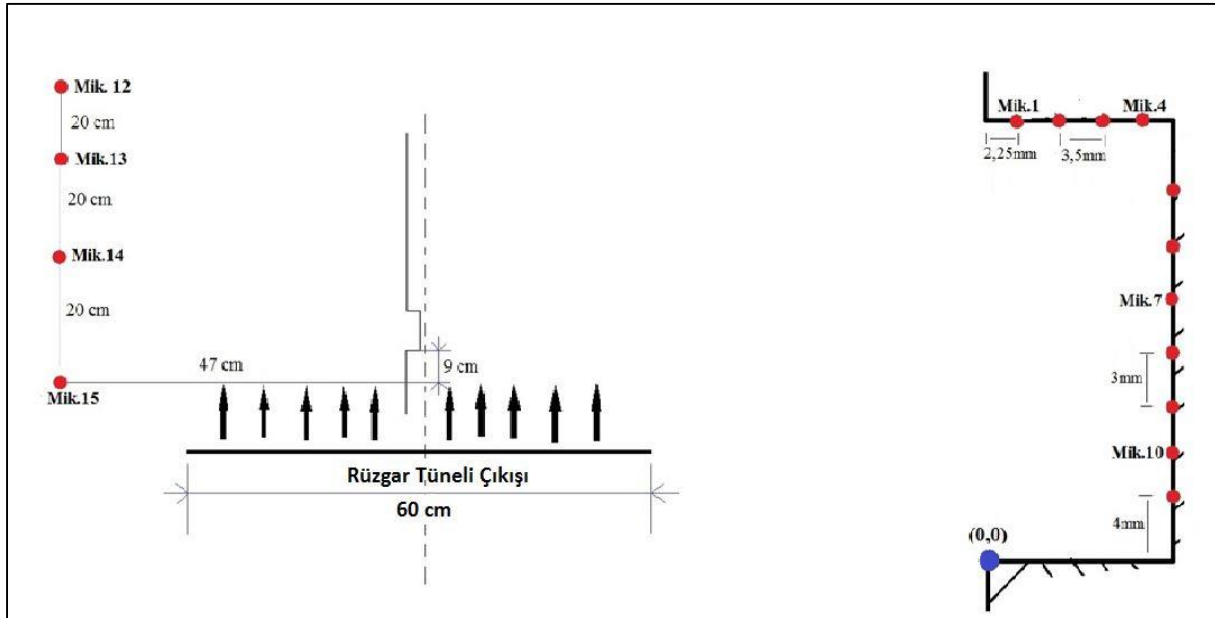
Düşük Mach sayıları için deneysel çalışmalar çok fazla gerçekleştirilmemiş olsa da son dönemlerde Parçacık Görüntülemeli Akış Ölçümü (Particle Image Velocimetry-PIV) tekniğinin gelişmesine bağlı olarak, farklı kavite geometrileri için ölçüm sonuçları literatüre kazandırılmaktadır (Crook vd, 2013). Bu çalışmadaki kavite içi akış sonuçları, L/D oranı 2 için PIV ölçüm tekniği ile elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışma Delf University of Technology bünyesindeki aerodinamik laboratuvarlarında düşük türbülanslı yatay rüzgâr tünellerinde gerçekleştirilmiştir (Parkhi, 2009). Rüzgâr tüneli, dairesel kesitli çıkışa sahip olup çapı 0.6 m'dir. Akustik ölçümlerin minimum seviyede etkilenmesi için anekroik tünel kullanılmıştır. Sessizlik seviyesinin korunması adına tünel çıkışı testere ağzı bir geometriye sahiptir. Deneysel çalışmaya ait teknik ayrıntılar, Parhi'de (Parkhi, 2009) bulunabilir. Hesaplama alanı girişine deneysel veriler ile karşılaştıracak şekilde sabit hız profili 10 m/s olarak verilmiş ve Re_h değeri 1.9×10^4 alınmıştır. Yakınsama kriteri tüm akış alanı değişkenleri için 10^{-6} alınmış ve 120,000 yinleme adımı kullanılmıştır. Esas sayısal ağ yapısı, çözümün sayısal ağdan bağımsızlık testleri gerçekleştirilerek belirlenmiştir. 5 farklı sayısal ağ için analizler gerçekleştirilmiştir. Kavite kayma tabakası içerisine

yerleştirilen alıcıdan elde edilen zamana bağlı statik basınç verilerinin zaman ortalaması değerlerindeki değişimin %2 'den düşük olduğu durum, ağdan bağımsızlık çalışmaları için belirlenen kriterdir.

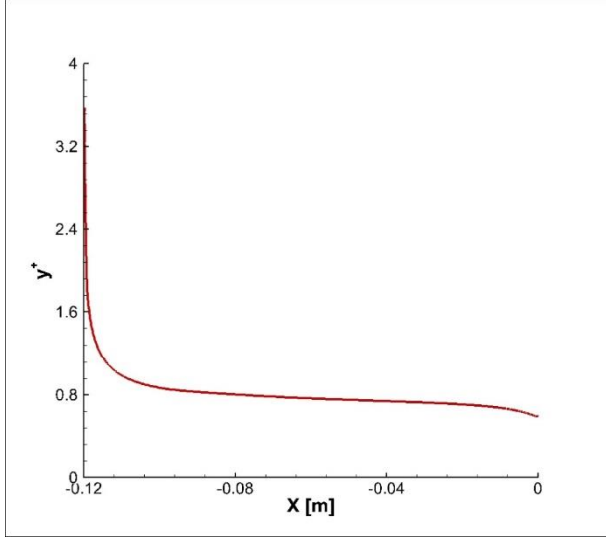
Tablo 2. Sayısal Ağdan Bağımsızlık testlerinde kullanılan yapıların eleman sayısı

	Hücre Sayısı
Mesh 1	100000
Mesh 2	200000
Mesh 3	446000
Mesh 4	500000
Mesh 5	750000

Yakın duvar bölgesini modellemede geleneksel olarak iki farklı yaklaşım vardır. Bunlardan ilki duvara yakın alt laminer tabakayı ve onun üst kısmı tampon geçiş bölgesini çözmeden ve bazı yarı deneysel yaklaşımlar ile hesap yapar. Bu yaklaşımlara *duvar fonksiyonları* adı verilmektedir. Bazı türbülans modelleri ise bu alt laminer tabakayı da çözebilecek şekilde yazılmışlardır. Bu yaklaşıma da *yakın-duvar modellemesi* denir. SST k- ω modeli için 5'den küçük 1'e yakın y^+ değerleri yakın duvar modellemesinin başarılı bir şekilde gerçekleşmesini sağlayacaktır. Bu doğrultuda, alan içerisindeki maksimum y^+ değerinin 5'den küçük tutulmasına dikkat edilmiştir. Akış alanı içerisindeki en büyük y^+ değeri 3.4'tür. Kanal girişinden kavite ön duvarına kadarki y^+ değerleri Şekil 4'de gösterilmektedir.

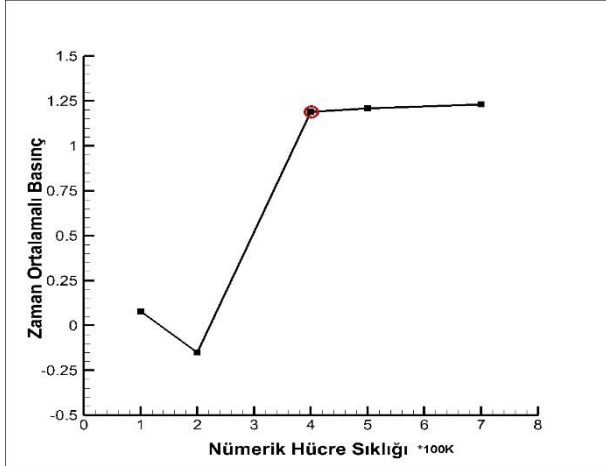


Şekil 3. Kavite içi ve dışı mikروفon konumları



Şekil 4. Kavite öncesi kanal boyunca $y+$ dağılımı

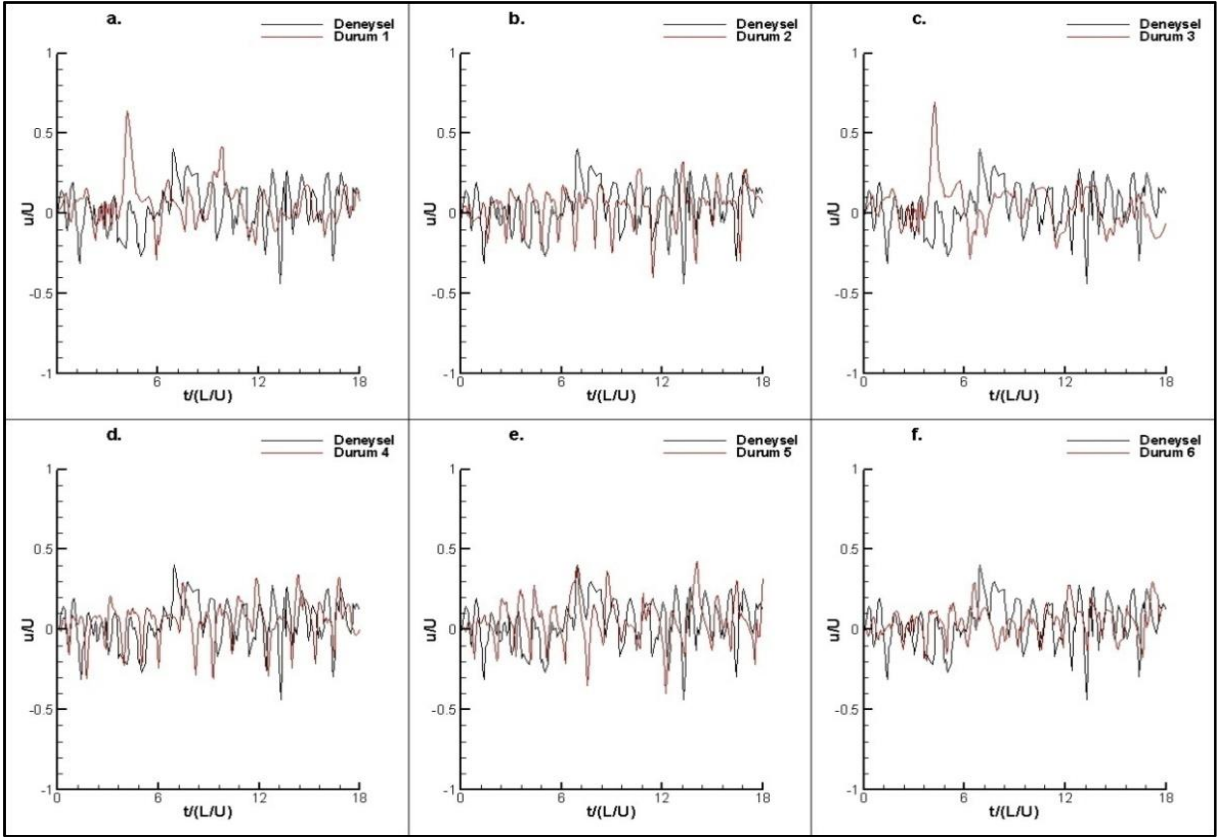
Şekil 6-8'de elde edilen sayısal U_x , U_y ve C_p değerleri ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Şekil 6 ile Şekil 7'de x eksenleri, serbest akımın hız değeri ile boyutsuz hale getirilmiştir. Hız bileşenleri için değerler (0.027,0)'a konumlanan kontrol noktasından okutulmuşken, basınç değerleri (0.0285,0) noktasından alınmıştır. Özellikle hızın x ve y bileşenleri için yapılan karşılaştırmalar deneysel verilerle çok iyi uyum sağlamaktadır. Basınç değerlerinde ise *Durum 1* dışındaki hesaplamalarda sayısal sonuçlar kabul edilebilir aralıktadır. Fakat sayısal sonuç grafiklerinin genlik değerleri olması gerektiğinden daha büyüktür. *Durum 2*, 4, 5 ve 6'da U_x ve U_y değerleri için oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



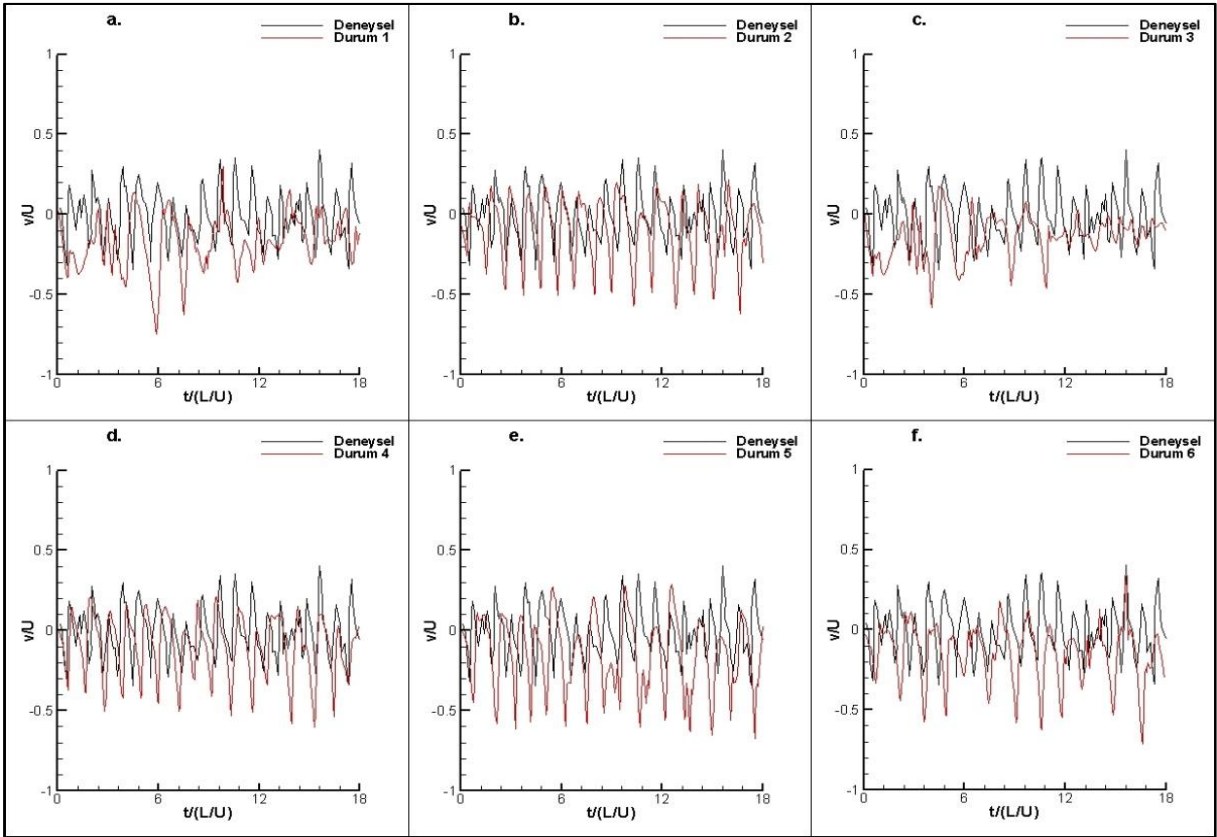
Şekil 5. Çözümün sayısal ağdan bağımsızlığı

Durum 2' nin ele alınan problemi uygun aralıklarda çözmüş olmasına rağmen, SST $k-\omega$ türbülans modeli DES'in Spalart Allmaras'a üstünlüğü gözlenmektedir. *Durum 1* ve 3'deki zaman başlarında görülen kararsızlıklar, zamana bağlı çözümden önce daimi olarak 5000 ilerleme adımı çözdürülen durumlarda gözlemlenmemiştir. Şekil 8'de verilen basınç katsayısı dağılımları, serbest akımın dinamik basınç değerine göre boyutsuzlaştırılmıştır. Zaman $t^*=18$ 'e kadar deneysel veriler ile karşılaştırıldığında kabul edilebilir aralıkta

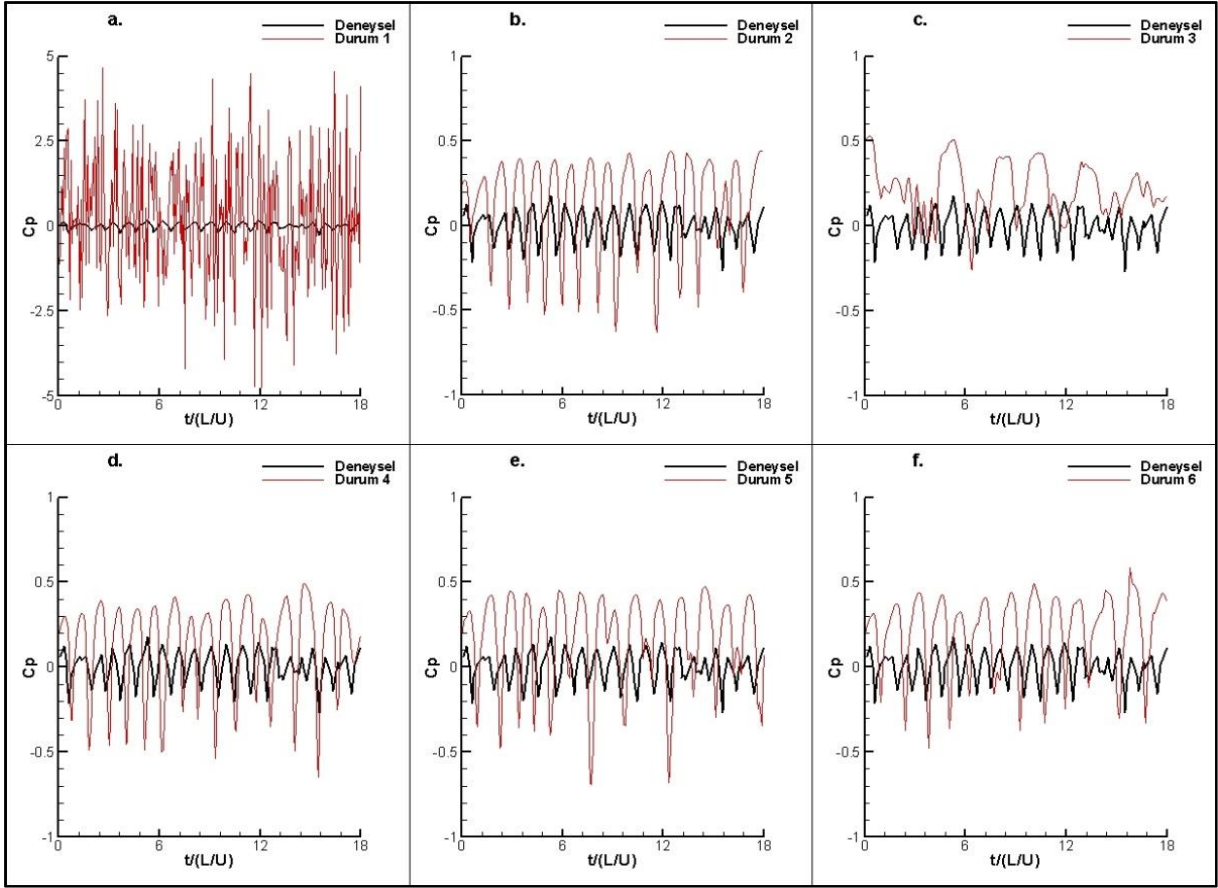
hesaplanmış olmasına rağmen, hiçbir türbülans model için x ve y yönündeki hız dağılımında elde edilen uyum oranı, basınç katsayısında görülmemiştir. Genel olarak *Durum 6* için hesaplanan sayısal sonuçların akış alanı için deneysel veri ile diğer durumlardan daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 9-11'de deneysel ve sayısal anlık hız kontur görüntüleri ve anlık akım çizgisi görüntüleri karşılaştırılmıştır. Kontur görüntüleri zaman ilerlemesinin sonlandığı anın görselleridir. Özellikle Şekil 11 göstermektedir ki deneysel ve sayısal sonuçlarda, kavite içerisinde oluşan iki adet dönel yapı, boyut ve girdap merkezlerinin konumları açısından oldukça uyumludur. Tüm durumlar ve deneysel veriler için arka duvar bölgesinde oluşan ana dönel yapının merkezi $x = 0.02$ ve $y = -0.006$ 'dır. Ana dönel yapının bir parçası olan ikincil ve daha küçük yapı, ana dönel yapının kavite yapışma noktası konumunda [reattachment point] enerjisini yeterince yitirmemesi sonucunda ana gövdeden ayrılarak oluşur. Hem deneysel akım çizgilerinde hem de sayısalda, ana yapı saat yönünde dönerken, ikincil yapı saat yönünün tersine dönmektedir. Tüm bu sonuçların ışığında, *Durum 6* 'nın en başarılı çözüm kombinasyonu olduğu gözler önüne serilmektedir. İncelenen Reynolds ve Mach sayısında, SIMPLEC algoritmasının ve DES için yardımcı türbülans modeli olarak SST $k-\omega$ 'nin üstünlüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca zamana bağlı çözümlere geçmeden evvel yapılan daimi çözümlerin zamana bağlı çözümlerde, gözle görülebilecek seviyede iyileşmelere sebep olduğu gözlemlenmiştir. İkincil dönel yapı deneysel ve sayısal karşılaştırmalarında, ana dönel yapıdaki kadar uyum gözlenirse de sonuçlar makul ve kabul edilebilir seviyededir. İkincil yapının merkezinin x konumu deneysel ve sayısal sonuçların tümü için 0.0075 m iken y konumunun değeri deneysel için -0.0125 m, sayısal sonuçlar için ortalama -0.075'dir. Bunlara ek olarak, hem deneysel hem de sayısal sonuçlarda yeniden yapışma noktası ortalama olarak (0.015,-0.015)'dir. Şekil 9 ve 10'a bakıldığı zaman deneysel sonuçlara en yakın sonucu yukarıda da olduğu gibi yine *Durum 6* verir. Kayma tabakası oluşum bölgesinde ani ve düzensiz hız değişimleri gözlenmekteyken, arka duvara ve kavite zeminine yakın bölgelerde güçlü ters akımlar oluşmaktadır. U_x kontur görüntülerinde kayma tabakası bölgesinde başlayan tanecikler arası momentum aktarımının kavite arka duvarına yaklaştıkça kavite içerisine daha derin bir şekilde nüfuz ettiği ve kitlesel bir yayılım oluşturduğu gözlenir. Şekil 12'de verilen girdap (vorticity) yapıları incelendiğinde, kayma gerilme tabakasının kavite ön duvarından kopuşu ve kavite iç bölgesine doğru oluşturduğu ana vorteks yapıları görülmektedir. Ayrıca kavite içinde konumlanan vorteks yapıları, kullanılan türbülans modellerinin hassasiyetine göre gözlemlenmiştir. *Durum 2* ve *Durum 6*'da kavite arka duvarının alt tarafında, küçük ve en yüksek şiddete sahip girdap yapıları görülmüşken, kavite arka duvarının üst tarafı, hesaplama alanı çıkışına doğru yüksek şiddetli duvar girdabı yapıları hesaplanmıştır, Şekil 12.



Şekil 6. Gözlem noktasındaki zamana göre U_x hız değerleri



Şekil 7. Gözlem noktasındaki zamana göre U_y hız değerleri



Şekil 8. Gözlem noktasındaki zamana göre C_p değerleri

AEROAKUSTİK BULGULAR

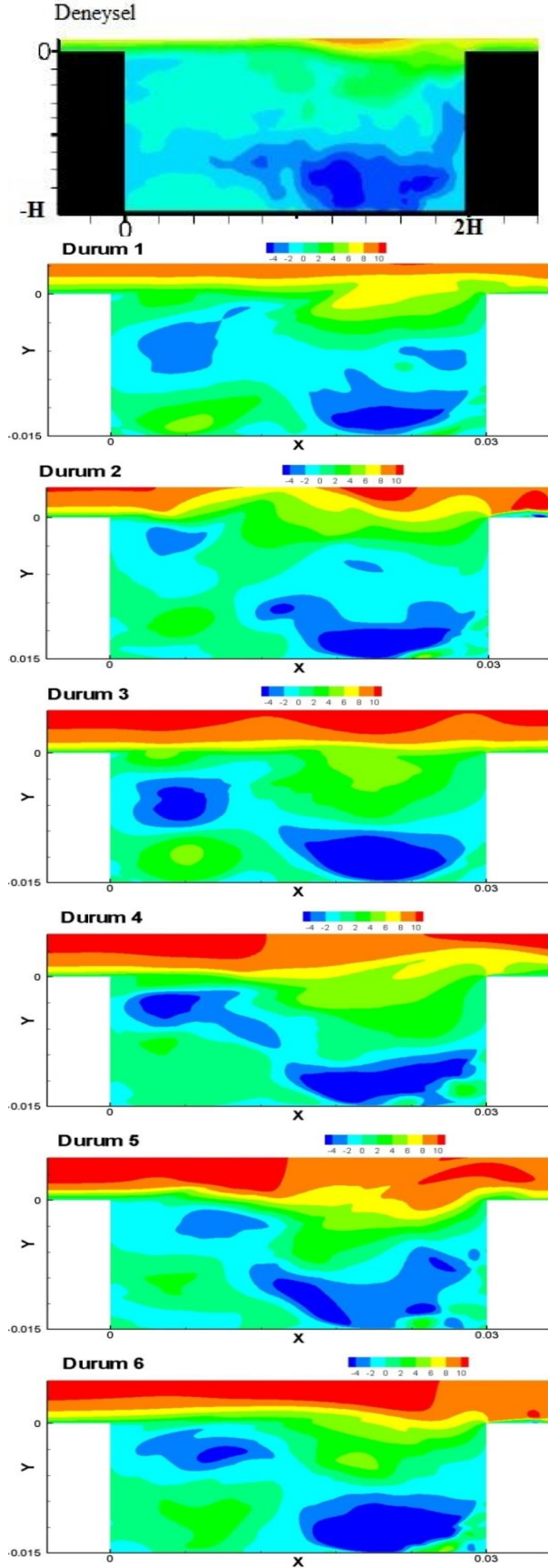
Kavite ve kanal içine yerleştirilen mikrofon konumları 2 boyutlu akış için Şekil 3'de verilmiştir. Deneysel çalışmada Mikrofon 13 ve Mikrofon 14 olarak tanımlanan alıcılar, kavite arka duvarı ve hesaplama alanının çıkışına doğru, kaviteden 47 cm uzağa konumlandırılmıştır. Zamana bağlı akış alanı değişkenlerinin girdi olarak kullanıldığı Ffowcs Williams–Hawkins Akustik Analoji yaklaşımı ile uzak alan akustik sinyal verileri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır, Şekil 13-14. Akustik hesapların yapılabilmesi için zaman bağlı basınç değişkeni, akış alanındaki düzensizlikleri kapsayan ilk 0.02 saniyeden sonra örnekleme frekansı 5 kHz olacak şekilde $t_{son} = 0.06$ 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, Eş. (23). 2 boyutlu sayısal çözüme ait altı farklı durum için akustik sonuçlar Şekil 13-14'de verilmiştir. Tüm durumlar için zaman adımı 10^{-05} s. olarak alınmıştır.

$$SPL = 20 \log \left(\frac{P'_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (23)$$

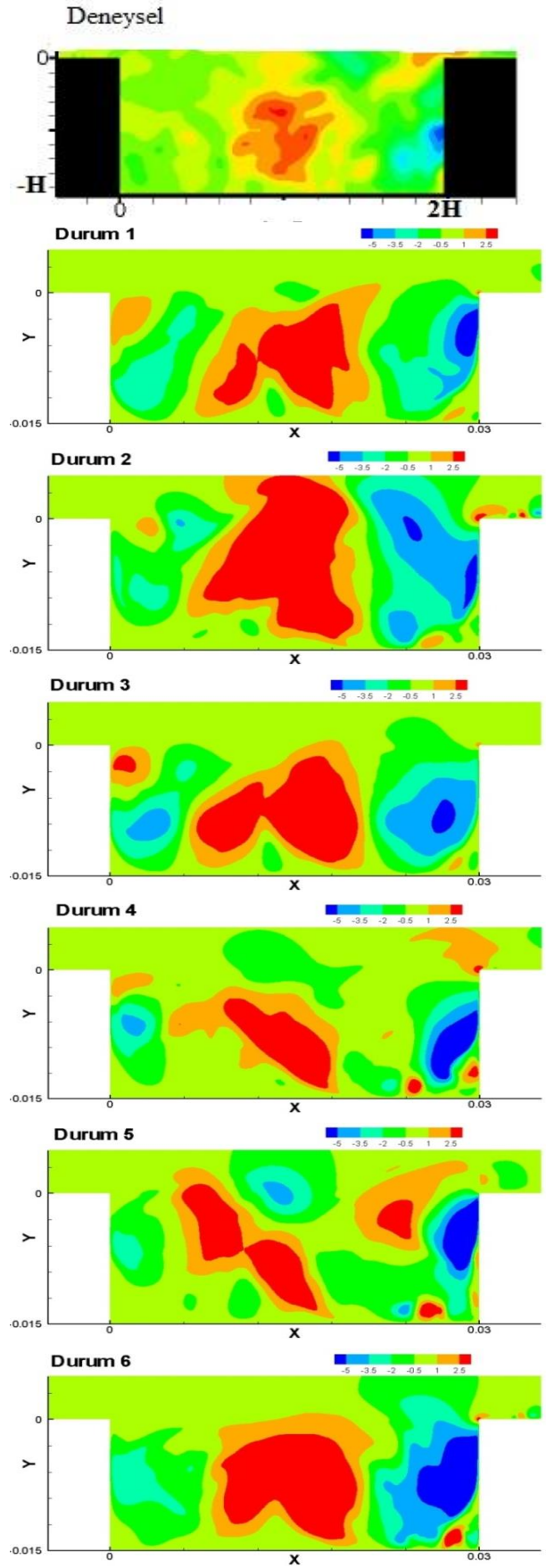
$$P_{ref} = 2 \times 10^{-05} Pa$$

Zaman adımı, hem zamana bağlı akış alanı değişkenlerinin doğru çözülmesi, hem de birim frekans

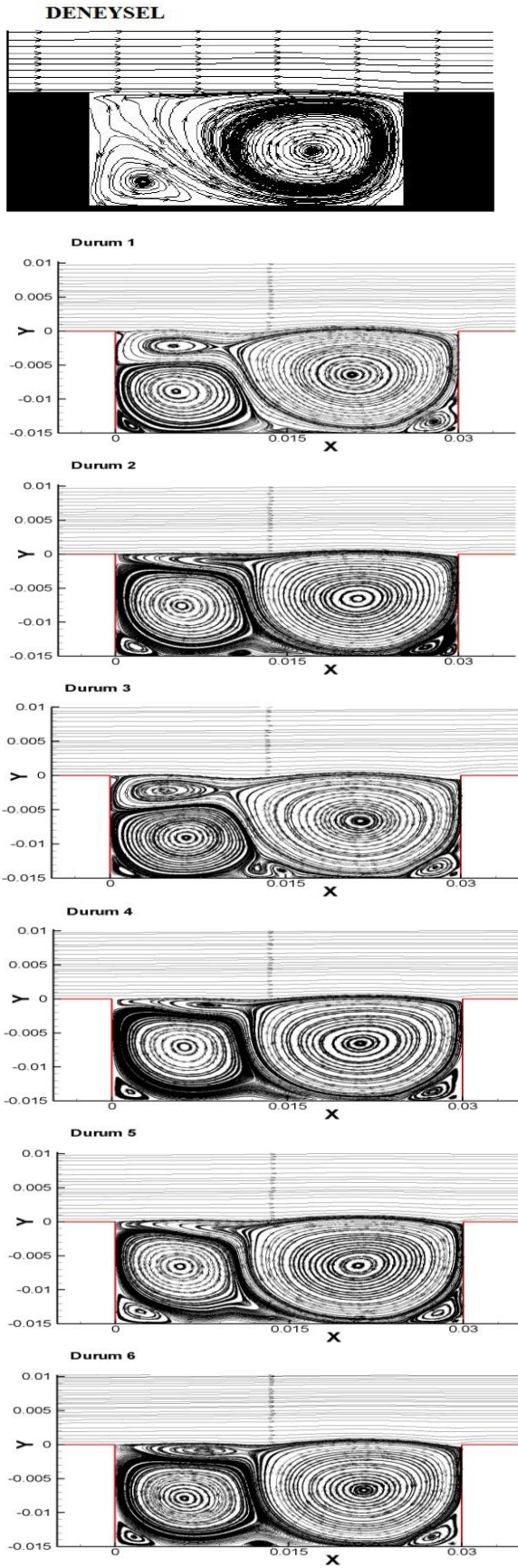
adımındaki SPL değeri değişimlerinin daha iyi temsil edilmesi için $1 \cdot e^{-05}$ olarak belirlenmiştir. *Durum 1*'e ait çözümler her iki mikrofonun konumu içinde istenilen sonuçları üretmemiştir. Özellikle Mikrofon 14'de ilk 500 frekans aralığında görülen deneysel veriden sapma, kalan beş durum içinde geçerlidir, Şekil 14. En büyük hatanın hesaplandığı 200 Hz değeri incelendiğinde deneysel veri ile sayısal akustik gürültü değeri arasında hesaplanan fark ilk durum hariç yaklaşık 30 dB civarlarındadır. Bu farkın basınç katsayısında da belirtilen ve basınç alanında görülen yüksek değerlere bağlı olduğu düşünülmektedir. 750 Hz ile 1500 Hz aralığında ise hesaplanan sonuçlar özellikle *Durum 5* ve *Durum 6* için deneysel sonuçlar ile önemli ölçüde uyumludur. Benzer biçimde, Şekil 13'de verilen Mikrofon 13 incelendiğinde ise, ilk 500 Hz için Mikrofon 14'de gözlemlenen 30 dB'lik fark *Durum 1* hariç ortalama 20 dB seviyesine gerilemiştir. Buna karşın *Durum 6*'da deneysel dağılım ile hesaplanan akustik gürültü seviyesi arasında önemli derecede uyum gözlemlenmiştir. Tüm durumlarda FW-H denkleminde kullanılmak üzere tanımlanan kaynak yüzey, kavite duvarları olup akustik sonuçlarındaki farklılıkların temel sebebi akış alanı çözümlerindeki farklılıktır. Bu nedenle bu çalışmada incelenen durumlardan *Durum 6* hem akış alanına ait zamana bağlı değişkenlerin çözülmesinde, hem de deneysel akustik sinyallerin tespitinde en iyi sonucu üretmiştir.



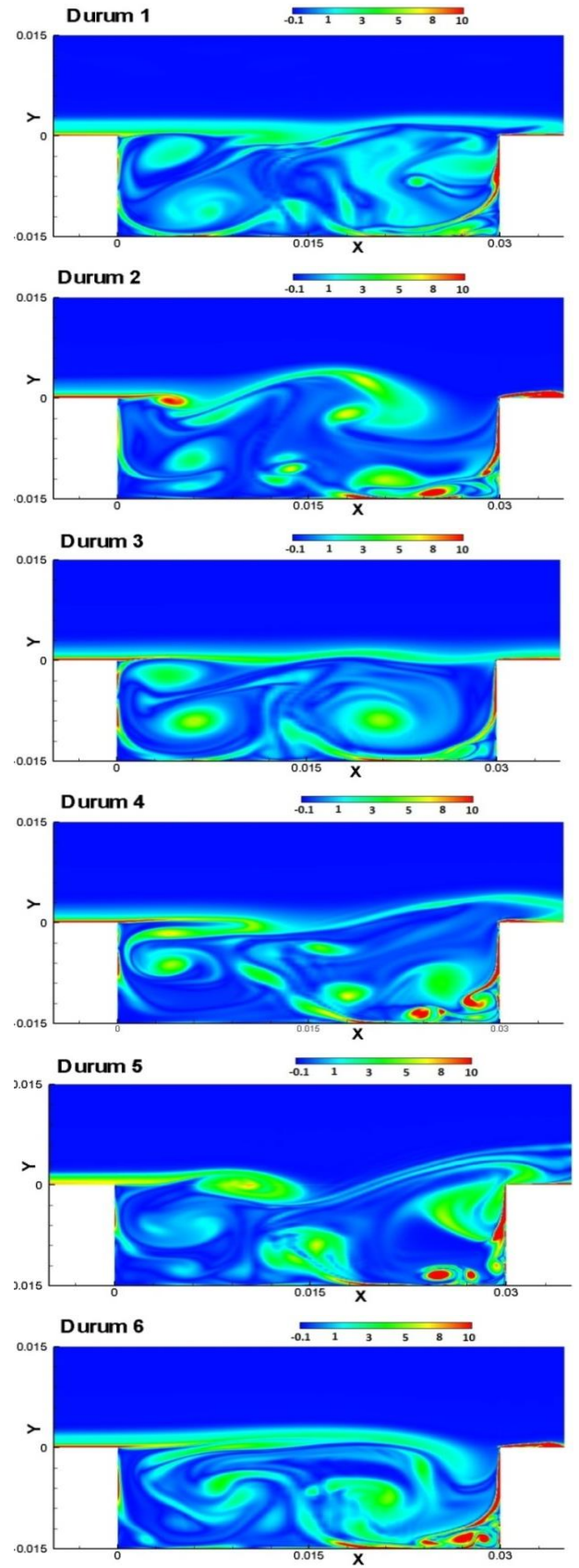
Şekil 9. Kavite içi U_x kontur görüntüleri



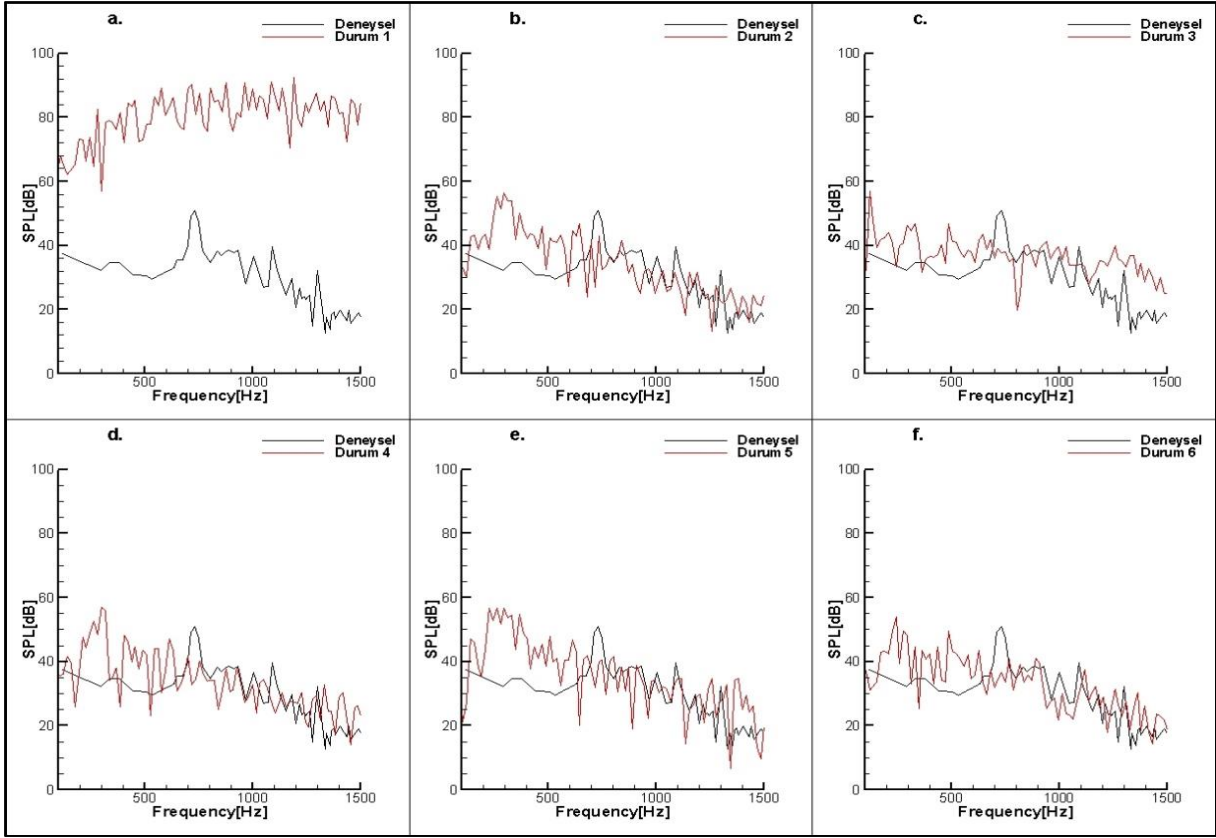
Şekil 10. Kavite içi U_y kontur görüntüleri



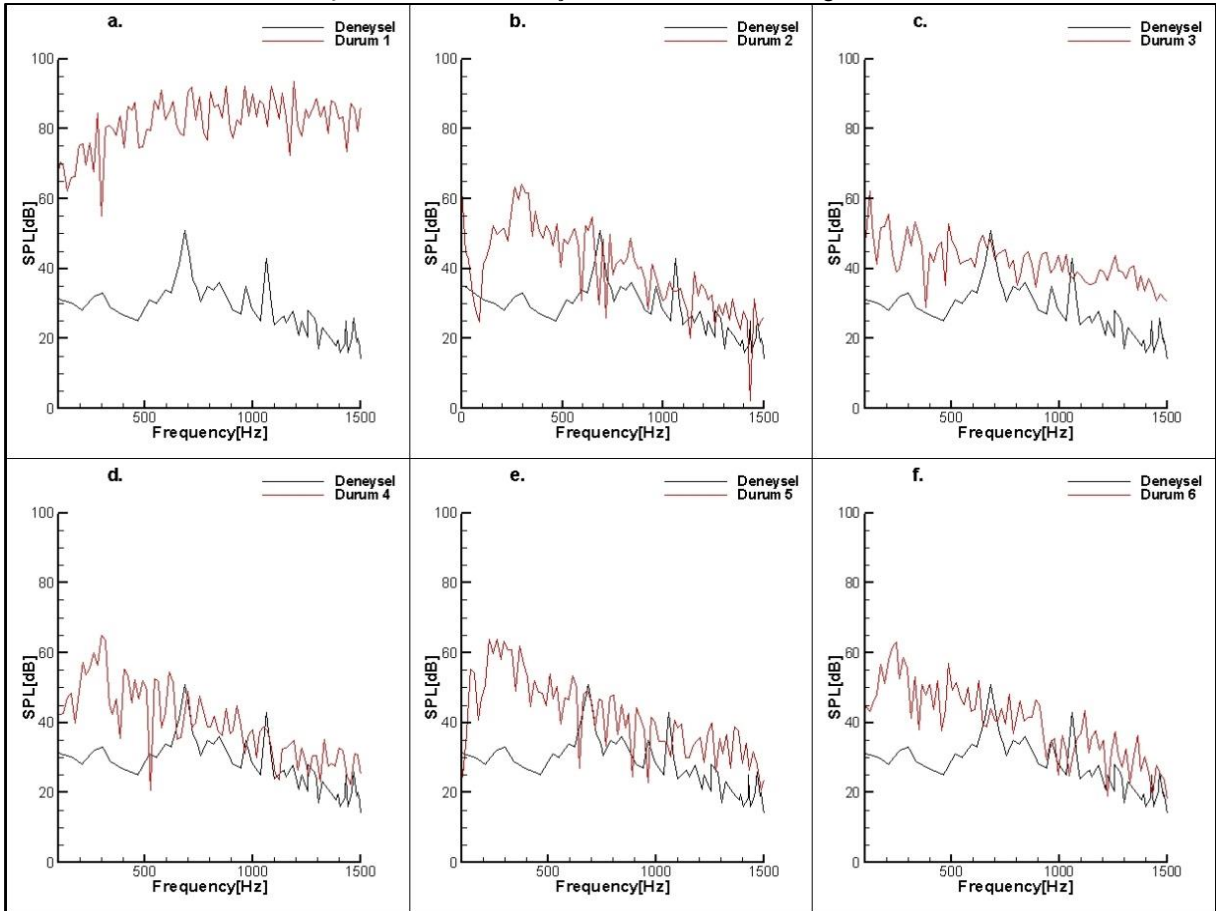
Şekil 11. Kavite içi akım çizgileri



Şekil 12. Kavite içi girdap büyüklükleri kontur görüntüleri



Şekil 13. Mikrofon 13 için Frekans - Ses basıncı değerleri



Şekil 14. Mikrofon 14 için Frekans-Ses basıncı değerleri

SONUÇ

Bu çalışmada, düşük Mach sayısı için akış alanı ticari sonlu hacim çözücüsü kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca zamana bağlı değişkenlerin girdi olarak alındığı Akustik Analoji yaklaşımı ile aerodinamik kaynaklı gürültü incelemiştir. Akış alanına ait hesaplanan, zamana bağlı x ve y yönündeki hız büyüklükleri ve basınç katsayısı sonuçları deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Farklı türbülans modelleri için deneysel verilere en yakın sonuçlar farklı DES türbülans modelleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu türbülans modelleri içinde, hesaplanan zamana bağlı akış alanı değişkenleri U_x , U_y , basınç katsayısı, vortisite hız büyüklüğü ve akım çizgileri incelendiğinde, *Durum 6*'da verilen Simplec ayrıklaştırmasının kullanıldığı SST $k-\omega$ denklemlerli DES türbülans yaklaşımının daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Farklı şekilde tanımlanan türbülans modellerine bağlı olarak hesaplanan zamana bağlı akış alanı sonuçları ve FW-H Akustik Analoji yaklaşımı ile hesaplama alanına yerleştirilen mikrofonlardaki akustik gürültü sinyali incelenmiştir. Ayrıca kavite uzak alanına yerleştirilen iki adet mikrofon üzerinde hesaplanan sayısal akustik sinyali ile deneysel veriler karşılaştırılmış ve tüm hesaplamalar göz önüne alındığında, 750 Hz ile 1500 Hz arasında, her iki mikrofon içinde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Hesaplanan akustik sinyal verilerinin deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasından, *Durum 6*'da tanımlanan türbülans modelinin daha güvenilir sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. *Durum 1*'in ise hem akış alanı açısından hem de akustik alan açısından oldukça uzak sonuçlar verdiği görülmüştür. SST $k-\omega$ modelinin Spalart-Allmaras'a üstünlüğü ve ek olarak zamana bağlı çözümlerden önce daimi yakınsamaların elde edilmesinin, zamana bağlı çözümler için iyi bir başlangıç koşulu olduğu çalışmada gözler önüne serilmiştir. Bu iki durumun etkisiyle, *Durum 1*'in en kötü sonuçları verdiği düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası FYD-2017-24688.

KAYNAKLAR

Cattafesta L.N., Song Q., Williams D., Rowley C., Alvi F., 2008. Active Control of Flow-Induced Cavity Oscillations. *Progress in Aerospace Sciences*, 44, 479-502.

Colonus T., Rowley C.W., Basu A.J., 2002. On Self-sustained Oscillations in Two-dimensional Compressible Flow Over Rectangular Cavities. *Journal Fluid Mechanics*, 455, 315-346.

Crook S.D., Lau T.C.W., Kelso R.M., 2013. Three-Dimensional Flow within Shallow and Narrow Cavities. *Journal of Fluid Mechanics*, 735, 587-612.

FLUENT Theory Guide 14.0, 2011.

Ffowcs Williams J.E., Hawkings D.L., 1969. Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. *Philosophical Transactions Royal Society Series A*, 264, 321-342.

Fuglsang, D.F., Cain, A.B., 1992. Evaluation of Shear Layer Cavity Resonance Mechanisms by Numerical Simulation. *30. AIAA Aerospace Scientific Meeting Exhibition*, Reno.

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*.

Lighthill M.J., 1952. On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory. *Proceeding Royal Society London A*, 211, 564-587.

Lawson S.J., Barakos G.N., 2011. Review of Numerical Simulations for High-speed Turbulent Cavity Flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 47, 186-216.

Malone J., Debiase M., Little J., Samimy M., 2009. Analysis of the Spectral Relationships of Cavity Tones in Subsonic Resonant Cavity Flows. *Physics of Fluids*, 21, 9-15.

Mendonca F., Allen R.C., Lewis M., 12-14 Mayıs 2003. CFD Prediction of Narrowband and Broadband Cavity Acoustics at $M=0.85$. *9. AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference and Exhibit*, South Carolina.

Parkhi D., 2009. Aeroacoustics of Cavity Flow Using Time-Resolved Particle Image Velocimetry. Yüksek Lisans Tezi, *Aerospace Engineering at Delf University of Technology*, Delf, 74

Shieh C.M., Morris P.J., 2001. Computation of Two- and Three-Dimensional Turbulent Cavity Flows. *39. AIAA Aerospace Scientific Meeting Exhibition*, Reno.

Smirnov R., Shi S., and Celik I., 2001. Random Flow Generation Technique for Large Eddy Simulations and Particle-Dynamics Modeling. *Journal of Fluids Engineering*. 123. 359-371.

Srinivasan S., Baysal O., 1991. Navier Stokes Calculations of Transonic Flows Past 3-D Cavities. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 113, 368-376.

Tam C.K.W., 2004. Computational Aeroacoustics: An Overview of Computational Challenges and Applications. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 18, 54-67.

Wagner C., Hüttl T., Sagaut P., 2007. Large-Eddy Simulation for Acoustics. *Cambridge University Press*. Wilcox D.C., 2006. Turbulence Modeling for CFD. 3. Baski, DCW Industries, Canada



Baha ZAFER

Üniversite lisans eğitimini İstanbul Teknik Üniversitesi Uzay Mühendisliğinde tamamladı. Daha sonra Uçak - Uzay Mühendisliği / Mühendislikte İleri Teknolojiler anabilim dalında yüksek lisans programına başladı. Aynı programda doktora eğitimini tamamladı. 2003-2011 yılları arasında İ.T.Ü. Uçak ve Uzay Mühendisliği Fakültesinde araştırma görevlisi olarak görev aldı. Şu anda İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümünde Doç. Dr. olarak görev yapmaktadır. 2014 – 2016 yılları arasında Florida State Üniversitesi Matematik ve Bilgisayar Araştırmaları bölümünde misafir araştırmacı olarak bulundu. Akışkanlar Mekaniği, Hesaplama Akışkanlar Dinamiği, Isı Geçişi ve Hava Araçlarının neden olduğu gürültünün incelenmesi yanında Bilim Tarihi konusundaki araştırmalarına devam etmektedir.



Furkan COŞGUN

Lisans derecesini İstanbul Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden aldı. Yüksek Lisans eğitimini ise İstanbul Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı Isı Akışkan Programı'nda tamamladı. Daha sonra İstanbul Teknik Üniversitesi Bilişim Enstitüsü Hesaplamalı Bilim ve Mühendislik Bölümü'nde Doktora eğitimine başlamıştır. Şu anda özel bir firmanın analiz bölümünde çalışmaktadır.