



KAVİTE ÇIKIŞ KENARININ GÜRÜLTÜ SEVİYESİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

¹Sercan YAĞMUR , ²Sercan DOĞAN 

Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya,
TÜRKİYE

¹syagmur@ktun.edu.tr, ²sercandogan@ktun.edu.tr

Geliş/Received: 21.04.2022; Kabul/Accepted in Revised Form: 27.07.2022

ÖZ: Çalışmada, dikdörtgen kesitli kavite içinde akan akış nedeniyle oluşan gürültü seviyesi ve kavite etrafındaki akış yapıları sayısal olarak incelenmiştir. Araştırma bulgularına göre kavite kesitinde değişiklikler yapılarak gürültü seviyesinin azaltılması amaçlanmıştır. Öncelikle, dikdörtgen kesitli kavite uygulaması için sayısal analizler yapılarak elde edilen akış yapısı sonuçları literatürdeki çalışmalarla doğrulanmıştır. Daha sonra, en yüksek gürültü seviyesinin olduğu kavite çıkış kenarı için $r/h=0.1, 0.2, 0.5, 0.75$ ve 1.0 çap oranlarında beş farklı geometri tasarlanmıştır ve bu geometriler için sonuçları doğrulanan SST $k-\omega$ türbülans modeli ile $10-35$ m/s hız aralığında sayısal analizler yapılmıştır. Dikdörtgen kesitli ve çıkış kenarı beş farklı çap oranı ile tasarlanmış kavite akış sonuçları görsel ve sayısal veriler halinde sunulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre özellikle artan çap oranı ile gürültü seviyesinde azalma tespit edilmiştir. Artan çap oranıyla tüm hızlar için gürültü seviyelerinde en yüksek %26 en düşük %15 oranında azalmalar gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçları, uygulamada kullanılan kavite geometrilerinin tasarımına bağlı olarak gürültü seviyesinin azaltılmasında araştırmacılar için yol gösterici nitelikte olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Desibel, Gürültü Seviyesi, HAD, Kavite, SST $k-\omega$

Investigation of the Effect of Cavity Trailing Edge on Noise Level

ABSTRACT: In this study, the noise level caused by the fluid flow in the rectangular cavity and the flow structures around the cavity were numerically investigated. According to the findings, it aims to reduce the noise level by making changes in the cavity section. First, the results of the flow structure obtained by performing numerical analysis for the rectangular-section cavity application were validated by the studies in the literature. Then, five different geometries with diameter ratios of $r/h=0.1, 0.2, 0.5, 0.75$ and 1.0 were designed for the trailing edge of the cavity where the highest noise level occurs and for these geometries, numerical analyzes were done with the SST $k-\omega$ turbulence model, the results of which were validated, at the range of $10-35$ m/s uniform velocity. Cavity flow results designed with rectangular cross-section and five different diameter ratios on the trailing edge are presented as contours and numerical data. According to the results obtained, a decrease in the noise level was determined, especially with the increasing diameter ratio. With an increase in diameter ratio, noise levels decreased in the range of $15\%-26\%$ for all cases. The results are recommendations for researchers in reducing the noise level depending on the design of the cavity geometries used in practice.

Keywords: Cavity, CFD, Decibel, Noise Level, SST $k-\omega$

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Katı yüzeyler üzerindeki boşluk veya oyuklar üzerinden geçen akış olarak tanımlanan kavite akışları, son yıllarda birçok araştırmacı tarafından incelenen akışkanlar mekaniğinin temel konularındandır. Kavite geometrisi küt bir tasarımda olması nedeniyle etrafında karmaşık bir akış

yapısı oluşmaktadır. Bu durum, basınç, hız, yoğunluk ve ses seviyelerinde değişimlere neden olabilmektedir. Uçak iniş takımları, denizaltı araçlar, trenlerdeki körük bağlantıları, otomobillerde açılan cam ve tavan uygulamaları gibi çeşitli aerodinamik ve hidrodinamik yüzeylerde kasıtlı veya tesadüfi olarak kaviteleler ile sıklıkla karşılaşılabilir. Bu tür kavite yüzeyleri kompleks akış yapısına bağlı olarak yüksek sürtünme kuvveti, gürültü ve titreşime neden olmaktadır (Özsoy ve Aslan, 2011).

Mach sayısı (Ma) ve Reynolds sayısı (Re) gibi parametreler kavite geometrisi (h/L) üzerinden ayrılan akışın yapısını önemli ölçüde etkilemektedir. Kavite içerisindeki kararsız akış yapısı nedeniyle kavite giriş kenarından kopan girdaplar, kavite çıkış kenarına çarparak güçlü akustik dalgalanmalara sebep olmaktadır (Rockwell ve Naudascher, 1978). Bu nedenle karmaşık akış yapısının zamana bağlı değişiminden kaynaklanan rahatsız edici gürültünün, özellikle gürültü oluşturan yüzey üzerinde yapılan değişiklikler ile sonlandırılması önemli araştırma alanlarından biri olmuştur. Literatürdeki çalışmaların birçoğu sonik ve süpersonik hız seviyelerinde yapılmıştır. Buna karşın düşük Ma sayısında sıkıştırılmaz akış yapısı için yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır. Krishnamurthy (1955), kavite derinliğinin sabit olduğu Ma sayısının 0.2–1.5 aralığında farklı kavite uzunluklarında yapmış olduğu deneylerde; kaviteye bağlı olarak meydana gelen akustik basınç dalgalanmalarının, sınır tabaka bölgesindeki akış yapısına (laminer veya türbülanslı), kavite boyutlarına ve Ma sayısına bağlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca, akustik dalgalanma şiddetinin laminer akış şartlarında türbülanslı duruma göre daha yüksek çıktığı ve bu durumun Ma sayısının artmasına da bağlı olduğunu belirtmiştir. Chen ve diğ. (2014) yapmış oldukları deneysel çalışmada, Re sayısının sabit derinlik boy oranına sahip dikdörtgen kavitedeki akış yapısına etkisini Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçme (PIV) yöntemiyle incelemişlerdir. Kavite bölgesindeki akış yapısı üzerinde Re sayısı değişiminin etkili olduğunu ve artması ile Re gerilmelerinin arttığını belirlemişlerdir.

Sciacchitano ve diğ. (2021) uzunluk derinlik oranının 8.4 olduğu kavite akışı $Re=6.3-19 \times 10^3$ aralığında PIV yöntemi ile incelemiştir. Ayrıca, standart ve SST $k-\omega$ türbülans modelini kullandıkları sayısal analiz sonuçları ile kıyaslamışlardır. Hem deneysel hem de sayısal analiz sonuçlarında giriş ve çıkış kenarına yakın bölgelerde ikincil girdap bileşenlerinin olduğu görülmüştür. Çıkış kenarı bölgesinde ise türbülans kinetik enerji değerinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca deneysel sonuçlar ile kıyaslandığında, SST $k-\omega$ türbülans modeli sonuçlarının standart $k-\omega$ sonuçlarına göre daha uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Noger ve diğ. (2000) hızlı trenlerin üstünde yer alan elektrik direklerinin yerleştirildiği dikdörtgen kesitli kavite bölgesinin aerodinamik ve akustik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir ve kavite çıkış bölgesinin büyük bir gürültü kaynağı olduğunu belirlemişlerdir. Akış hızının arttıkça ses şiddetinin arttığını ve yüksek ses şiddetinin daha yüksek frekanslarda gerçekleştiğini belirlemişlerdir. Ayrıca kavite ön kenarından gelen kayma tabakası ile kavite içerisindeki etkileşim nedeniyle kavite aşağı akış bölgesinde daha yüksek türbülans yoğunluğu tespit etmişlerdir.

Literatürde yapılan çalışmalarda, akustik probleminin üstesinden gelmek için en sıklıkla kullanılan yöntemler genellikle pasif akış kontrol yöntemleridir. Bu yöntem ile kavite akış ön duvarında ve arka duvarında yapılan geometrik değişiklikler ile akustik, basınç ve titreşim kaynaklı durumlar kontrol edilmektedir. Zhang ve diğ. (1998) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanarak yaptıkları analizde; dikdörtgen kesitli kavite geometrisinin çıkış kenarı dairesel yuvarlatılarak ve farklı açılarda eğim verilerek akış karakteristiği üzerindeki etkisini $Ma=1.5$ durumu için incelemişlerdir. Çıkış kenar geometrisi üzerindeki dairesel ve eğimli geometrik modifikasyonun salınımı ve yüksek basınç kaynaklı sürüklenmeyi azalttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, dikdörtgen kesite kıyasla ses basınç seviyesinin eğimli yüzeyde (SPL) 11.6 dB, dairesel kesitlide ise 6.3 dB düştüğünü hesaplamışlardır. Vikramaditya ve Kurian (2009), süpersonik hızlarda kavite çıkış duvar modifikasyonunun ses basınç seviyesine ve akış karakteristiğine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Eğim açısının 45° olduğu durumda kavite içerisindeki ses basınç seviyesini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Ancak, eğimin 15° ve 30° olduğu durumda ses basınç seviyesini arttırdığını belirlemişlerdir. Wang ve diğ. (2012), basitleştirilmiş bir kavite modeline sahip bir otomobil açılır tavanından gelen akustik şiddetini HAD kullanarak araştırmışlardır. Ayrıca, rüzgâr tüneline yaptıkları deney sonuçları ile HAD sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Açılır tavanda meydana gelen çarpma sesinin; akış ayrılmasının periyodikliği,

kavite ön kenarından oluşan girdap kopması ve kavitenin arka kenarındaki girdap çarpması nedeniyle oluştuğunu belirtmişlerdir. Deneysel ve sayısal sonuçlara göre; akış hızı yeterince yüksek olduğunda kavite ön duvarına yerleştirilen bir saptırıcının çarpma gürültüsünü azaltmadığını tespit etmişlerdir. Ancak, boşluk kademeli bir saptırıcı kullanıldığında nispeten yüksek akış hızlarında çarpma gürültüsünün etkili bir şekilde kontrol edilmesini sağlamışlardır. Zhang ve diğ. (1999), Ma sayısı 1.5 ve 2.5 durumları için kavite giriş kenarında dairesel rampa ve eğim geometrisinin ses basınç seviyesine etkisini sayısal olarak incelemişlerdir. Kavite giriş kenarı geometrisinin dairesel rampa olduğu durumda, Ma= 2.5'te kavite duvarındaki ses basınç seviyesini (SPL) azalttığını görmüşlerdir. Ancak, Ma=1.5'te SPL'deki değişimin ihmal edilebilir olduğunu belirlemişlerdir. Giriş kenarının dairesel eğimli olduğu durumda ise kavite duvarındaki ses basınç seviyesi her iki Mach sayısında da azalmıştır. Malhotra ve Vaidyanathan (2016), kavite çıkış kenarını, girişi kenarına oranla %10 kısaltarak basınç dalgalanması ve akustik seviyesine etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Temel referans duruma kıyasla, kısa kenarlı geometrinin Rossiter modları arasında basınç salınımlarının tonal bileşenlerinde bir azalmaya yol açtığını belirlemişlerdir. Mancini ve diğ. (2019), dikdörtgen kesitli kavite akış içerisinde çıkış duvar modifikasyonlarının basınç salınımları üzerindeki etkilerini Ma=0.85 ve 1.35'te HAD yöntemi ile incelemişlerdir. Çıkış duvar rampa açısı eğiminin, kavite içindeki basınç salınımlarını bastırmada etkili olduğu ve özellikle 45° duvar açılarında 15 dB kadar düştüğü görülürken, 15° eğimde kayda değer bir etkinin görülmediğini belirtmişlerdir. Kim ve diğ. (2020) Ma=0.25'te yaptıkları analizlerde, kavite giriş ve çıkış kenarlarına eş zamanlı dairesel ve dik eğim vererek akış karakteristiği ve akustik etkileri açısından incelemişlerdir. Kavite giriş ve çıkış ağzındaki geometri, dairesel kesitli olduğu durumda türbülans şiddetinin azaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, gürültü seviyesinde yaklaşık %20 azalma olduğunu belirlemişlerdir.

Araştırmacılar tarafından kavite akış kontrolünde kullanılan yaygın pasif yöntemler arasında rüzgarlıklar, girdap oluşturmalar, ön ve arka duvar geometrisi değişiklikleri yer almaktadır. Akış fiziğini anlamak için halen çeşitli deneysel ve sayısal çalışmalar yürütülmektedir. Mevcut çalışmamızda, kavite çıkış kenarına 0.1-1.0 aralığında dairesel eğim verilerek oluşturulan beş farklı geometrik modifikasyonun ve kavite serbest akım giriş hızının gürültü ve akış karakteristiğine etkisi SST k- ω türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Sayısal Modelleme (Numerical Method)

Sayısal analizler, Şekil 1'de gösterilen Özsoy ve diğ. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmanın referans test bölümünü temsil eden iki boyutlu bir geometri üzerinde Reynolds ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denkleminin çözülmesine dayanmaktadır. Analizler, ticari bir yazılım olan ANSYS-Fluent programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kavite üzerindeki akışın kararlı, sıkıştırılmaz ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Akış çözümü için kullanılan kütle korunumu ve momentum denklemleri aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$\text{Kütlenin korunumu;} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Momentum denklemleri;} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i u_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left((v + v_t) \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

Türbülanslı akış yapısını modellemek için farklı uygulamalarda da kullanılan en yaygın türbülans modellerinden biri olan Shear-Stress Transport (SST) k- ω kullanılmıştır. Menter (1994) çalışmasında SST k- ω türbülans modelinin, girdap-viskozite formülasyonuna taşıma etkilerinin dahil edilmesiyle akış ayrılmasını ve ters basınç gradyanlarını iyi bir şekilde modelleyeceğini belirtmiştir. SST k- ω türbülans modeli, sınır tabaka bölgesinde k- ω modelini, serbest kayma bölgesinde k- ϵ modelinin bir fonksiyonunu kullandığı hibrit bir modeldir. SST k- ω türbülans modeli için taşınım denklemleri;

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \tilde{P}_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i \omega)}{\partial x_i} = \gamma \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (4)$$

Burada; ρ akışkanın yoğunluğunu, x_i ve x_j konumu, u_i ; x_i konumundaki hız bileşenini, k türbülans kinetik enerji terimini, ω türbülans yayılım oranını, β ve σ ; denklem sabitini, F_1 karışım fonksiyonunu, μ_t türbülans viskozitesini, S gerinim hızının ölçüsünü ve P_k üretim terimini ifade etmektedir.

Akışta meydana gelen akustik değişimler ise Navier-Stokes denklemlerinin çözülmesiyle tamamen karakterize edilebilir. Ancak, akışkanın akustik enerjisi dinamik enerjisinden ve akustik basınç değişimleri dinamik basınç değişimlerinden çok daha küçüktür. Bu nedenle, temel akış dinamiği ve akustiğin zaman ölçekleri birbiriyle uyumlu değildir. Bu nedenle zaman bağımlı analizlerin yapıldığı endüstriyel uygulamalardaki akustik problemlerin çözümü oldukça zor olmaktadır (Mohamud ve Johnson, 2006). Literatürde yapılan çalışmalar neticesinde üretilen sesin belirgin bir tonu olmadığı kabul edildiğinde, kararlı durum RANS çözümünden elde edilen türbülans şiddetleri, geniş bant kaynak gürültüsünün (Broadband Noise Sources, BNS) ölçüsünü sağlamak için yarı deneysel korelasyonlarla birlikte kullanılabilir. BNS oldukça pratik akustik tasarım modeli olmasına rağmen, alıcı konumlarında herhangi bir ton gürültü bilgisi veya gürültü spektrumu sağlamaması en büyük dezavantajlarından biridir. Bunun yerine, kaynaktan yayılan gürültünün sadece yaklaşık bir ölçüsünü hesaplamaktadır (Horváth ve Vad, 2009). ANSYS-Fluent modelinde birden fazla BNS modeli bulunmaktadır. Çalışma kapsamında kullanılan Proudman'ın modeli, Lighthill'in Navier-Stokes denklemlerine dayanan akustik teorisinden türetilmiştir (Proudman, 1952). Proudman'ın modeli esas olarak türbülanslı gürültü olarak da bilinen akış ayrılmalarından ve türbülanslı sınır tabakası içindeki türbülans çalkantılarından kaynaklanmaktadır (Zhang ve diğ., 2014). Birim hacim başına akustik güç için Proudman tarafından aşağıdaki analitik ifade türetilmiştir:

$$P_A = c \rho_0 \left(\frac{u^3}{l} \right) \frac{u^5}{a_0^5} \quad (5)$$

Denklemden, c Proudman tarafından bulunan model sabitini, ρ_0 yoğunluğu, a_0 ses hızını, l türbülans uzunluk ölçeğini ve u türbülans hızını ifade etmektedir. Akustik güç L_p ise desibel (dB) cinsinden aşağıdaki denklem ile hesaplanmaktadır.

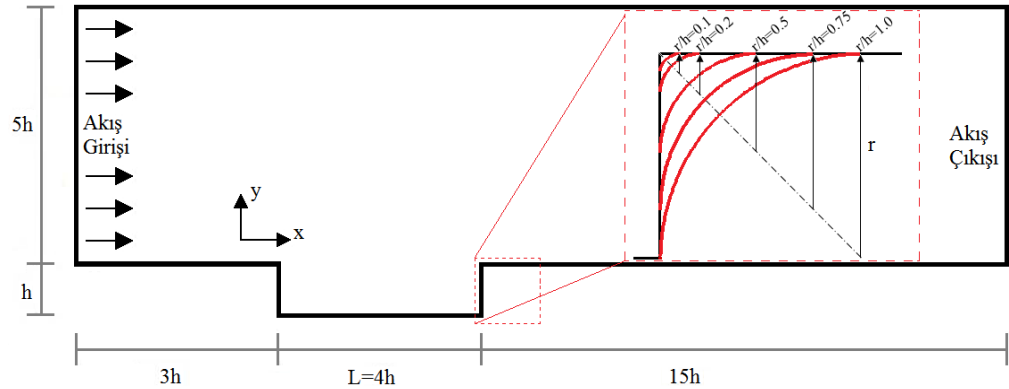
$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right) \quad (6)$$

Analizlerde referans akustik güç, $P_{ref} = 10^{-12} W$ olarak alınmıştır (ANSYS, 2009).

Akış Hacmi ve Sınır Şartları (Flow Domain and Boundary Conditions)

Sayısal analizler için oluşturulan iki boyutlu akış hacmi Şekil 1'de gösterilmiştir. Özsoy ve diğ. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmanın geometrik ölçüleri dikkate alınarak, kavite derinliği $h=20$ mm, kavite uzunluğu ise $L=4h$ olarak belirlenmiştir. Kanal giriş ile kavite giriş kenarı arasındaki uzunluk $3h$, kavite çıkış kenarı ile kanal çıkışı arasındaki mesafe ise $15h$ uzunluğundadır. Kanal giriş yüksekliği ise girişten çıkışa kadar sabit ve $5h$ yüksekliğindedir.

Dikdörtgen kavite geometrisi referans model olarak alınmıştır. Dikdörtgen geometriye ek kavite derinliği sabit tutularak, Şekil 1'de detayı görülen kavite çıkış kenarı $r/h=0.1$ ile 1.0 arasında değişen bir r yarıçapı ile yuvarlatılmıştır.

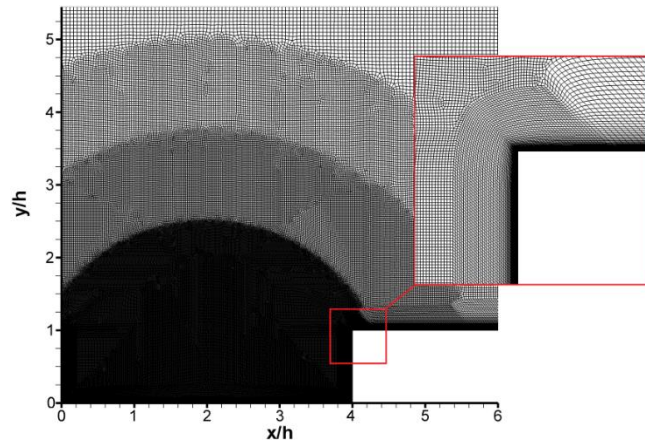


Şekil 1. Akış hacmi ve sınır şartları

Figure 1. Computational flow domain and boundary condition.

İki boyutlu çözüm alanında kavite taban yüzeyine ve üst duvarına kaymama sınır koşulu (no-slip) tanımlanırken, çıkış sınırında basınç çıkışı sınır şartı tanımlanmıştır. Akış alanının akış girişinde ise üniform hız girişi sınır şartı tanımlanmıştır. Yapılan analizlerde model doğrulaması için $Re_h = 4 \times 10^3$ değerinde analizler yapılmıştır. Daha sonra, her bir geometrik konfigürasyon için serbest akışın $U_\infty = 10-35$ m/s hızları için kavite derinliğine bağlı olarak Reynolds sayıları $Re_h = 1.33-4.66 \times 10^4$ aralığında değiştirilmiştir. Çözümde basınç-hız eşlemede COUPLED algoritması kullanılmıştır. Basınç ve momentum denklemlerinin ayrıştırılmasında ikinci mertebeden sonlu farklar şeması kullanılmıştır. Tüm akış alanı değişkenleri için 10^{-6} mertebesine kadar yakınsama sağlanmıştır.

Akış hacmi için ANSYS-Meshing modülünde blok tipi yapısal ağ Şekil 2'deki gibi oluşturulmuştur. Kavite bölgesine yaklaştıkça kademe kademe hücre boyutları küçültülmüştür ve yüksek hız gradyanlarının beklendiği kavite bölgesi yakınında yoğunlaştırılmıştır. Ayrıca kanal zemin duvarı boyunca basınç değişimlerinin doğru çözümlenebilmesi için ağ yapısı, y^+ değerinin tüm duvarlarda 1'den küçük olmasını sağlayacak şekilde sıklaştırılmıştır. Akış hacmi boyunca kanal taban duvarında 0.005 mm başlangıç yüksekliğinde 1.05 artırma oranına sahip 80 katmanlı sınır tabaka ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısından bağımsız çözümler elde edebilmek için farklı ölçeklendirmeler ile eleman boyutları ve buna bağlı olarak sayıları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Yapılan nihai ölçeklendirmeler ile oluşturulan ağ yapılarından bağımsız çözümlerin sağlandığı yaklaşık 251,473 elemandan oluşan ağ yapısı kullanılmıştır. Farklı geometrik modifikasyonlar için de aynı ölçekler kullanılmıştır. Yarıçapın artmasıyla birlikte akış alanının artmasından dolayı eleman sayısında da bir miktar artış olmuştur.



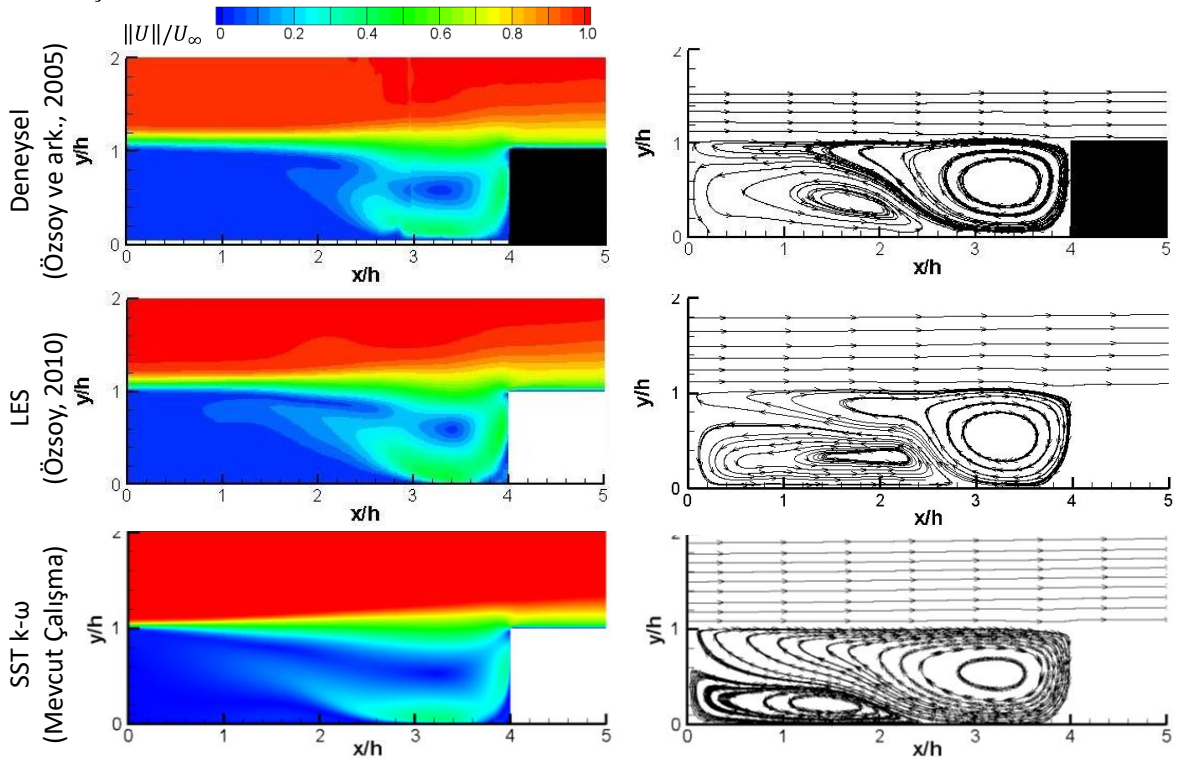
Şekil 2. Kavite bölgesi için ağ yapısı.

Figure 2. Computational grid system for the cavity model.

Sayısal Analizlerin Doğrulanması (Validation of Numerical Analysis)

Mevcut çalışma kapsamında kullanılan yöntemin doğrulanması için referans alınan dikdörtgen kesitli kavite akış alanına ait sonuçlar $Re_h=4 \times 10^3$ değeri için, Özsoy ve diğ. (2005) tarafından PIV yöntemi ile yapılan deneysel akış karakteristiğinin incelendiği sonuçlarla ve Özsoy (2010) tarafından LES türbülans modeli kullanılarak yapılan analiz sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Şekil 3'te kavite bölgesindeki ortalama bileşke hız ve akım çizgileri karşılaştırılmıştır. Bileşke hız değerleri serbest akış hızı ile boyutsuzlaştırılmıştır. Kavite boyunca ilerledikçe kayma tabakasının kavite çıkış kenarına doğru genişlediği görülmektedir. Böylece, akış kavite çıkış kenarına çarparak kavite içerisinde saat yönünde dönen baskın bir girdap bölgesine sebep olmaktadır. Kavite giriş kenarında ise saat yönünde dönen baskın girdabın altında nispeten daha küçük saat yönünde bir girdap oluşmuştur. Birbirine göre ters dönen bu girdapların boyutları ve konumları, kavite geometrisine ve akış koşullarına bağlıdır. Mevcut çalışma kapsamında yapılan analiz sonucunda elde edilen, kavite içerisindeki girdapların konumu, büyüklükleri ve yayılımı referans alınan hem deneysel hem de LES analiz sonuçları ile nitelik olarak benzerlik göstermektedir. Saat yönünde dönen baskın olan girdabın merkezi, deneysel sonuçlarda yaklaşık $x/h=3.3$ ve $y/h=0.5$ 'te oluşurken, LES sonuçlarında $x/h=3.2$ ve $y/h=0.5$ 'te oluşmuştur. SST $k-\omega$ türbülans modelinin kullanıldığı mevcut analiz sonucunda ise $x/h=3.18$ ve $y/h=0.5$ 'te tespit edilmiştir. Yine aynı şekilde kavite giriş kenarında saat yönünün tersine dönen ikincil girdabın merkezi ise deneysel sonuçlarda yaklaşık $x/h=1.7$ ve $y/h=0.3$ 'te oluşurken, LES sonuçlarında $x/h=2.0$ ve $y/h=0.35$ 'te oluşmuştur. SST $k-\omega$ modeli ile elde edilen sonuçlarda ise $x/h=1.65$ ve $y/h=0.3$ 'te belirlenmiştir.



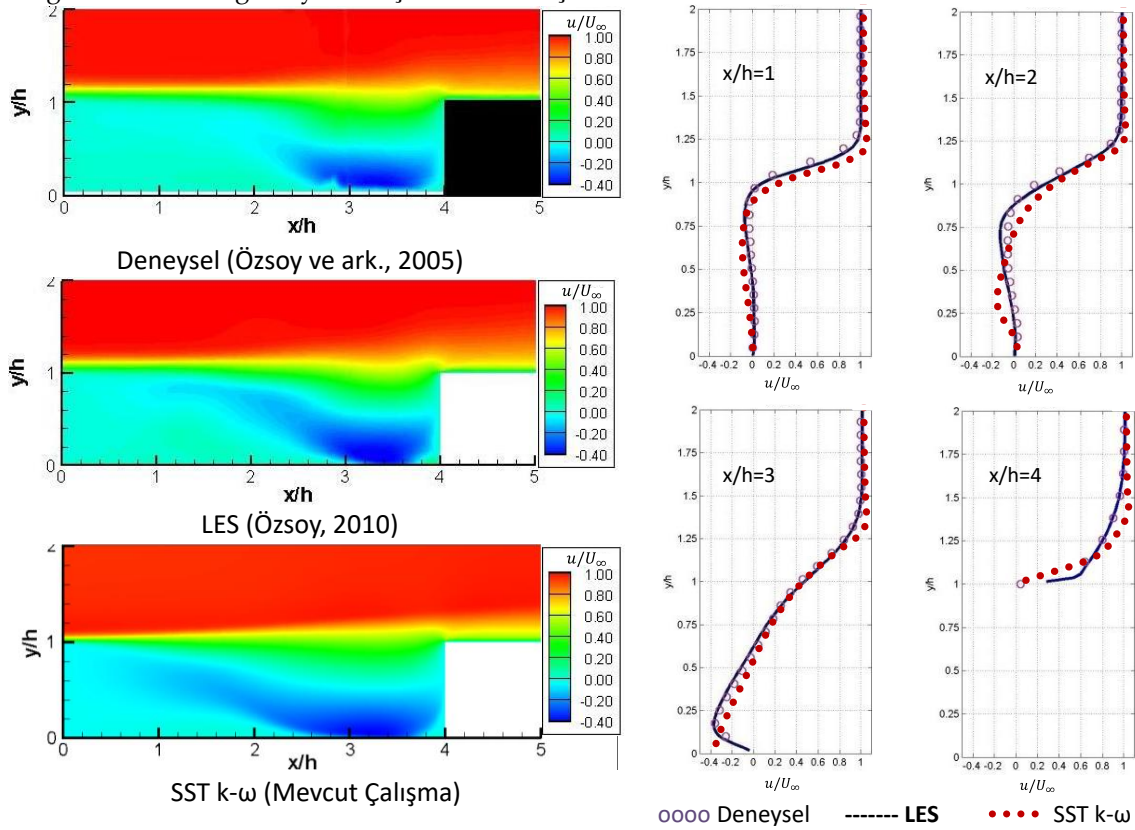
Şekil 3. $Re_h=4 \times 10^3$ için ortalama bileşke hız konturları ve akım çizgilerinin karşılaştırılması.

Figure 3. Comparison of mean velocity magnitude contours and streamlines at $Re_h=4 \times 10^3$.

Şekil 4' te ise akış yönündeki ortalama hız bileşeni ve 4 farklı istasyondaki çizgisel hız dağılımının karşılaştırılması verilmiştir. Hem literatürde yapılan çalışmalarda hem de mevcut analiz sonuçlarında kayma tabakası boyunca hız profilindeki değişim belirgin bir şekilde görülmektedir. Kayma tabakası boyunca kavite çıkış kenarına çarpan akış dönerek geriye doğru yönelmektedir ve daha sonra kavite giriş kenarına hareket ederek tekrar kayma tabakasına karışmaktadır. Çizgisel hız dağılımında da

görüldüğü üzere, her üç sonuçta da ters akışlar en yüksek değerine kavite tabanına yakın bölgede yaklaşık $x/h=3.4$ ve $y/h=0.15$ 'te ulaşmıştır.

Kavite bölgesindeki hız bileşenlerine ait sonuçlar karşılaştırıldığında kararlı durum için yapılan mevcut analiz sonuçlarının hem deney sonuçları ile hem de kararsız çözümün zaman ortalamalı sonuçları ile nicelik ve nitelik açısından iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlardaki farklar ise üçüncü boyuttaki akış bileşeninden ve SST k- ω türbülans modelinin akış yapısını doğrudan çözmek yerine modellemesinden kaynaklanmaktadır. Ancak elde edilen sonuçlar hızlı mühendislik sonuçları için kabul edilebilir seviyededir. Bu nedenle referans alınan dikdörtgen kesitli kavite geometrisi için kullanılan yöntem hem farklı Re sayıları için hem de kavite çıkış kenarında yapılan geometrik konfigürasyonlar için kullanılmıştır.



Şekil 4. $Re_h=4 \times 10^3$ için akış yönündeki hız bileşeni konturları ve çizgisel hız profilinin karşılaştırılması.

Figure 4. Comparison of mean streamwise velocity contours and velocity profile at $Re_h=4 \times 10^3$.

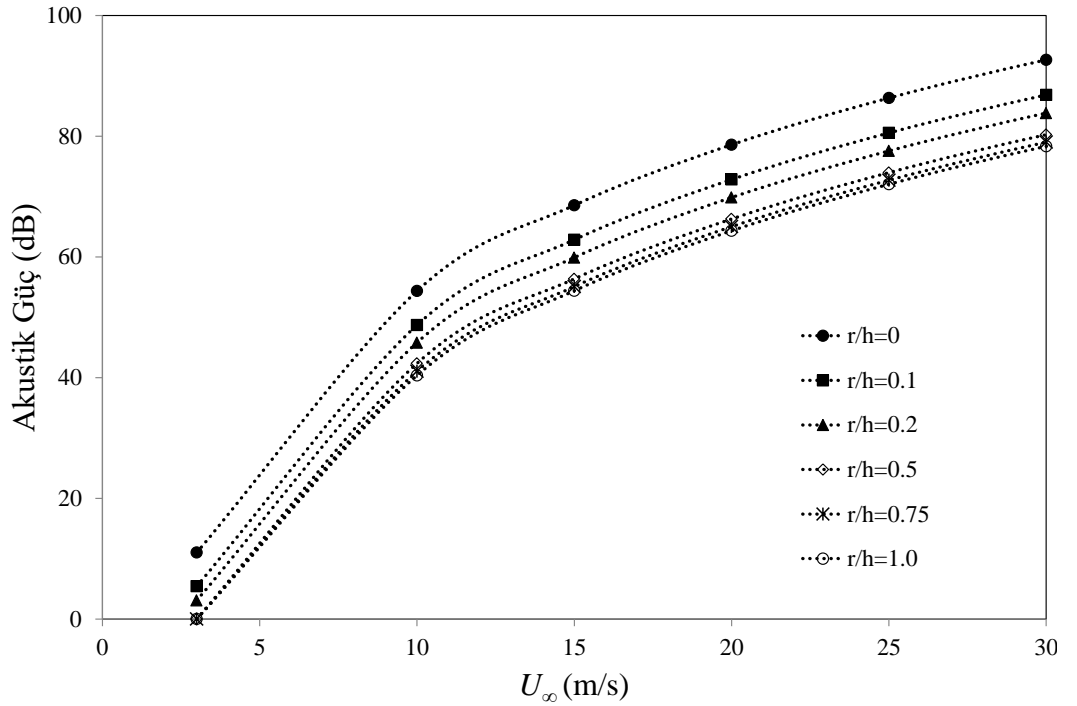
BULGULAR (FINDINGS)

Sayısal çalışmalar, dik kenarlı ve çıkış kenarının beş farklı çap oranı için tasarlandığı kavite akışı için özellikle gerçek sınır şartlarına karşılık gelen 10-35 m/s hızlar arasında yapılmıştır. Hava akışının altı farklı tasarım için sergilediği akış yapılarına ait görsel ve sayısal sonuçlar sunulmuştur. Ortalama bileşke hız konturları ($\|U\|/U_\infty$), akım çizgisi modelleri, türbülans kinetik enerji (TKE) ve gürültü seviyesi konturlarına (dB) ait görsel sonuçlar en düşük ve en yüksek Reynolds sayıları için Şekil 6, 7 ve 8'de verilmiştir. Ayrıca, farklı çap oranları ve Reynolds sayısına göre çıkış kenarındaki en yüksek gürültü seviyesinin tespit edildiği değerler Çizelge 1' de karşılaştırılmıştır ve aynı zamanda Şekil 5'te grafiksel olarak sunulmuştur.

Çizelge 1. Farklı hız değerleri ve çap oranları için en yüksek gürültü değerlerinin karşılaştırılması.

Table 1. Comparison of the highest noise values for different velocity values and r/h ratios.

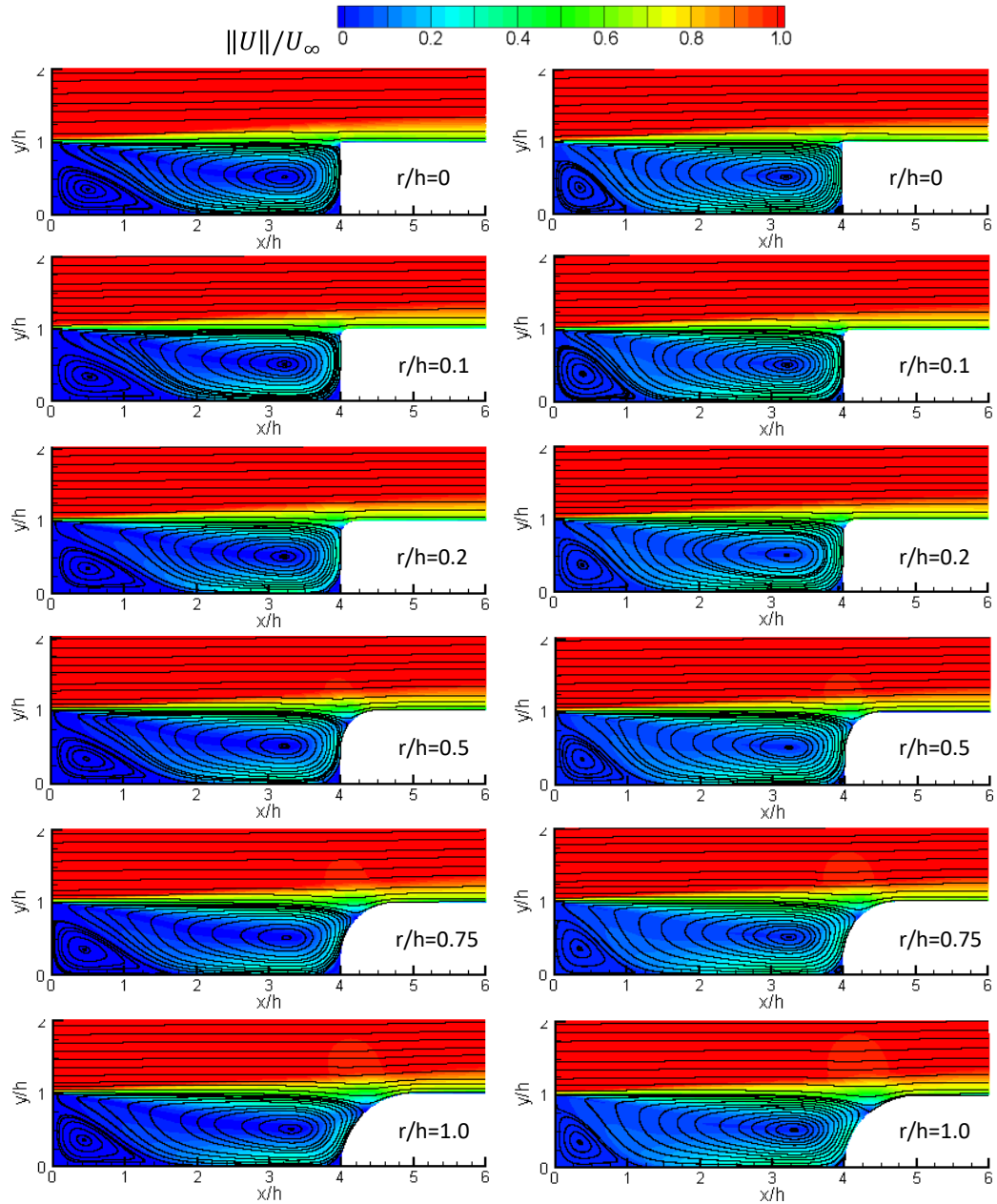
	r/h=0	r/h=0.1	r/h=0.2	r/h=0.5	r/h=0.75	r/h=1.0
3m/s	11.017	5.445	3.102	0.004	0	0
10m/s	54.358	48.711	45.804	42.354	41.047	40.367
15m/s	68.557	62.846	59.899	56.367	55.082	54.398
20m/s	78.589	72.828	69.853	66.289	65.016	64.334
25m/s	86.329	80.546	77.561	73.974	72.713	72.036
30m/s	92.654	86.844	83.835	80.254	79.013	78.330
35m/s	97.994	92.169	89.139	85.577	84.324	83.653



Şekil 5. Farklı akış hızı için kavite çıkış kanar geometrisin akustik güç seviyesine etkisinin karşılaştırılması.

Figure 5. Comparison of the effect of cavity trailing edge geometry on acoustic power level for different flow rates.

Çizelge 1’de hesaplanan değerler incelendiğinde; farklı çap oranları için tasarlanan çıkış kenar geometrisinin gürültü seviyelerinde tüm durumlar için azalma olduğu görülmüştür. Dik açılı kenar tasarımında 3 m/s ve 35 m/s hız değerleri için gürültü seviyeleri 11 dB’den 97 dB’e kadar çıkmaktadır. Ancak, artan çap oranı ile gürültü seviyelerinde düşük ve yüksek hızlarda sırasıyla %26 ve %15 seviyelerinde kayda değer azalmalar tespit edilmiştir. Hız değerleri arttığında gürültü seviyesindeki azalma yüzdesi düşük hızlara göre daha az olmuştur. En yüksek hız değeri 35 m/s için 97 dB gürültü seviyesi r/h=1.0 çap oranında 83 dB seviyelerine inmiştir. Literatürde yapılan benzer çalışmada; Kim ve diğ. (2020) yüksek hızlı trenin pantograf bölgesinde yaptıkları analizler de ise r/h=0 ile r/h=0.8 aralığında gürültü seviyesinin %20 azaldığını belirlemişlerdir.

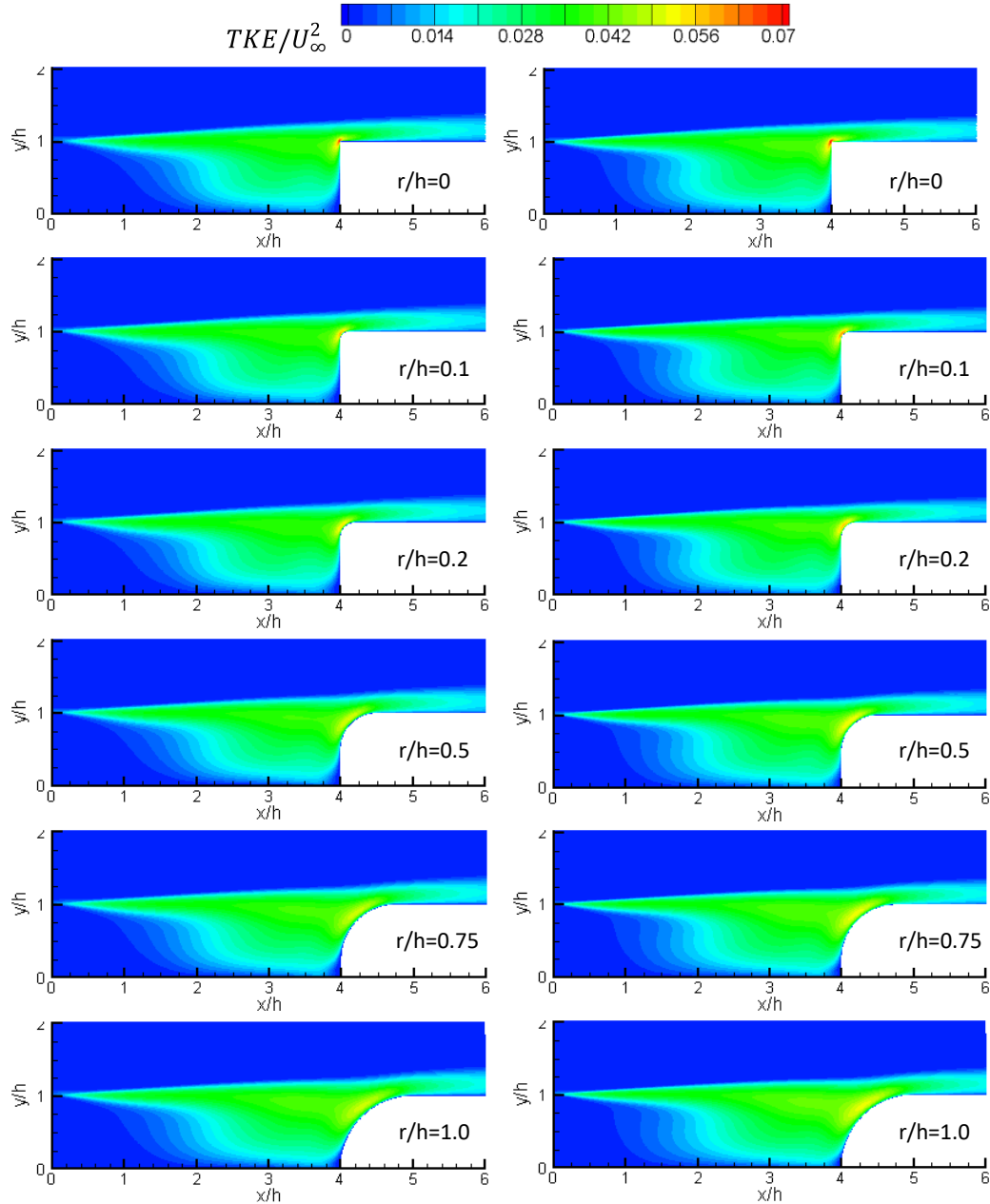


Şekil 6. Boyutsuz ortalama bileşke hız konturları ($\|U\|/U_\infty$) ve akım çizgilerinin farklı çap oranları için 10 m/s (sol sütun) ve 35 m/s (sağ sütun) hız değerlerinde karşılaştırılması.

Figure 6. Comparison of mean streamlines with non-dimensional velocity magnitude contours ($\|U\|/U_\infty$) at 10 m/s (left column) and 35 m/s (right column) for different r/h ratios.

Ortalama bileşke hız konturlarının ($\|U\|/U_\infty$) ve kontur üzerine eklenmiş akım çizgilerinin farklı çap oranları için 10 m/s ve 35 m/s hız değerlerindeki değişimleri Şekil 6'da görsel olarak sunulmuştur. Şekilde verilen bileşke hız değerleri giriş hızı (U_∞) ile x - y yönündeki mesafeler ise kavite yükseklik değeri h ile boyutsuzlaştırılmıştır. Görüntüler kavite akışın giriş kenarı, kavite boşluğu, çıkış kenarı ve devamındaki akış için verilmiştir. Kavite bölgesinde giriş kenarıyla birleşik bir adet küçük girdap oluşmuştur. Artan hız değeri ile küçük girdap boyutu kavite orta bölgesinden giriş kenarına doğru yönelmiştir. Kavitenin kalan kısmında ise bir ucu çıkış kenarında ve üst kısmı üniform hız bölgesi ile sınırlanmış büyük bir girdap daha meydana gelmiştir. Hız değerindeki artıştan dolayı küçük girdap bölgesinden boşalan alanı büyük girdap bölgesi doldurmuştur. Büyük girdap bölgesi çıkış kenarı için tasarlanan farklı çap oranlarındaki dairesel kesitle sürekli etkileşim halindedir ve artan çap oranı ile bir ucu akım yönünde uzamıştır.

Türbülans kinetik enerji konturlarının (TKE/U_∞^2) farklı çap oranları için 10 m/s ve 35 m/s hız değerlerindeki değişimleri Şekil 7'de verilmiştir. TKE değerleri, özellikle büyük girdap oluşum bölgesinde artmaya başlamıştır ve en yüksek değerlerini çıkış kenarı ile serbest akış bölgesinin birleştiği uç noktada almıştır. Hız arttıkça TKE konturlarının dağılımı da kavite içinde yayılmaya başlamıştır. Dik kesitli çıkış kenarlarında TKE konturları pik değerlere ulaşırken, çap oranının artmasıyla TKE değerleri akış yönünde azalmaya başlamıştır. Bu durum yeni tasarımın kavite akış için etkili olduğu bir pasif kontrol tekniği olarak değerlendirilmiştir. Azalan TKE değerlerine bağlı olarak gürültü seviyelerinde de azalmalar meydana gelmiştir.

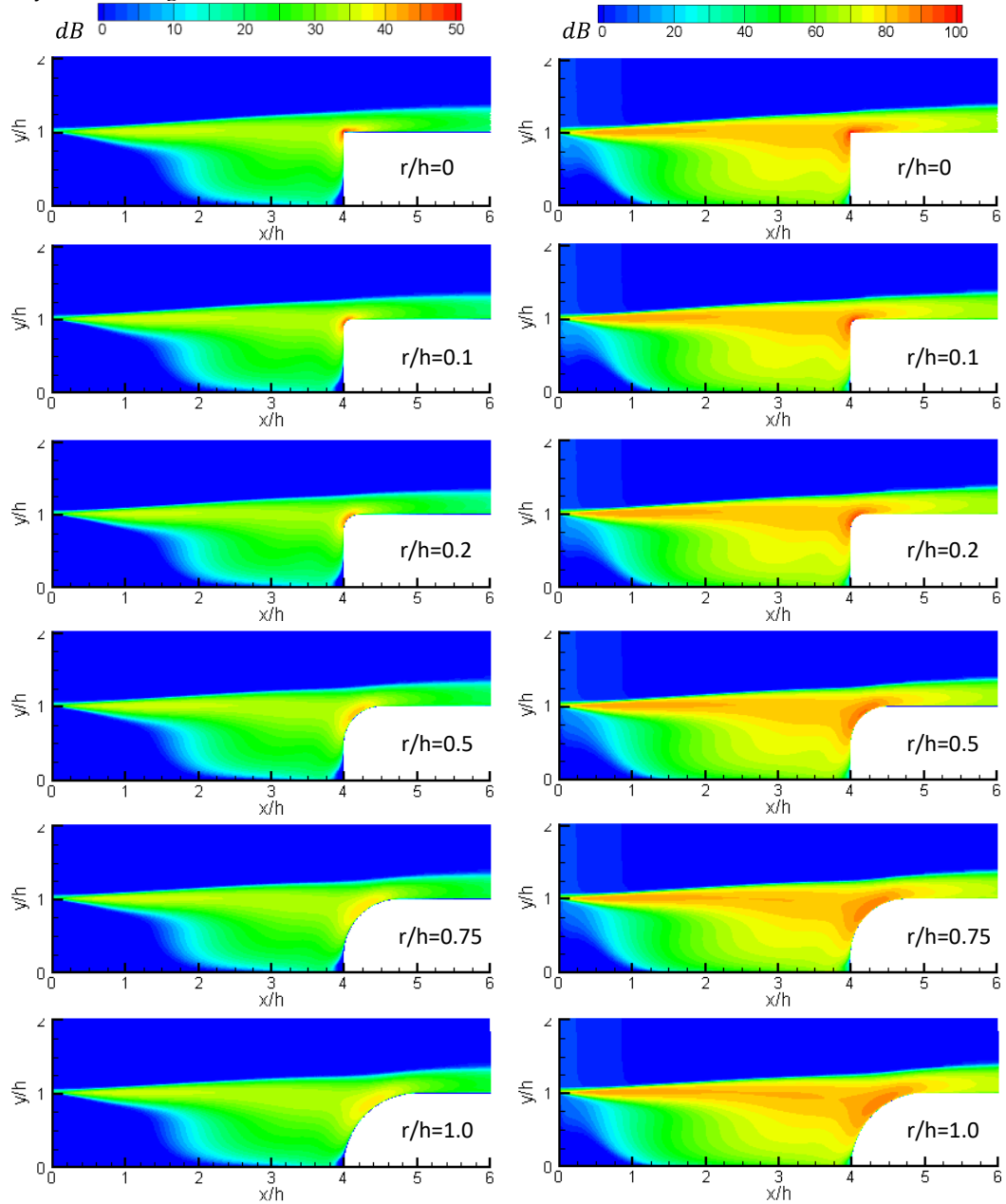


Şekil 7. Türbülans Kinetik Enerji konturlarının (TKE/U_∞^2) farklı çap oranları için 10 m/s (sol sütun) ve 35 m/s (sağ sütun) hız değerlerinde karşılaştırılması.

Figure 7. Comparison of Turbulent Kinetic Energy contours (TKE/U_∞^2) at 10 m/s (left column) and 35 m/s (right column) for different r/h ratios.

Şekil 8'de gürültü kontur değerlerinin (dB) farklı çap oranları için 10 m/s ve 35 m/s hız değerlerindeki değişimleri görsel olarak sunulmuştur. Hız değerlerindeki artışla birlikte gürültü seviyelerinde de ciddi artışlar meydana gelmiştir. Düşük hız değeri 10m/s için gürültü konturlarının pik

değerleri çıkış kenarının en üst kısmında oluşurken, 35 m/s hız değeri için giriş kenarının üst kısmından itibaren çıkış bölgesine doğru yayılan yüksek gürültü seviyeleri tespit edilmiştir. Özellikle gürültü konturlarının tek bir noktada pik değerlere ulaşmasının engellenmesi için tasarlanan dairesel kesitli çıkış kenarlarında artan çap oranı ile desibel değerlerindeki azalmalar tasarımların etkili olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yüksek hız değerinde artan çap oranına bağlı olarak gürültü konturları kavite içine doğru bir yönelim sergilemiştir.



Şekil 8. Gürültü kontur değerlerinin (dB) farklı çap oranları için 10 m/s (sol sütun) ve 35 m/s (sağ sütun) hız değerlerinde karşılaştırılması.

Figure 8. Comparison of noise contour values (dB) at 10 m/s (left column) and 35 m/s (right column) for different r/h ratios.

SONUÇ ve TARTIŞMALAR (RESULTS and DISCUSSIONS)

Dikdörtgen kesitli kavite akışları için en yüksek gürültü seviyelerinin meydana geldiği çıkış bölgesine dairesel kesitli yeni kenar tasarımı yapılmıştır. Tasarımda beş farklı çap oranı için kavite etrafındaki akış karakteristikleri ve gürültü seviyeleri sayısal olarak araştırılmıştır. Özellikle dairesel

çıkış kenarında oluşan gürültü seviyelerinin azaltılmasına yönelik sonuçlar detaylı olarak sunulmuştur. Çalışmadan elde edilen belirgin sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- Artan çap oranı ile tüm hızlar için gürültü seviyelerinde azalma olduğu tespit edilmiştir ve 10-35 m/s hız aralığında %26 ile %15 arasında düşüş hesaplanmıştır.
- Türbülans Kinetik Enerji değerleri, çap oranındaki artışa bağlı olarak dairesel kesit ile akış boyunca yayılmıştır ve değerleri azalmıştır. Kavite çıkış kenarının dik olduğu duruma göre, çıkış kenarı $r/h=1.0$ 'da Türbülans Kinetik Enerji değeri yaklaşık %30 azalmıştır.
- Çıkış kenarı için tasarlanan dairesel kesitler, akışın kaviteden çıktığı bölgede meydana gelen büyük ölçekli girdapların yapısını bozmuştur.
- Elde edilen sonuçlara göre dairesel kesitli çıkış kenar tasarımı, 10-35 m/s hız aralığında kavite uygulamaları için kullanılabilir niteliktedir.

Kavite çıkış kenarının hız çalkantıları ve gürültü seviyesi üzerinde önemli ölçüde etkili olduğu görülmektedir. SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak 2-D analizler ile yapılan analiz sonuçlarının hem deneysel hem de 3-D analiz sonuçları ile uyumu gelecekte araştırmacıların zamandan tasarruf sağlayarak optimizasyon çalışmalarında hızlı sonuç elde etmelerine olanak sağlayacaktır. Bu kapsamda gelecekteki çalışmalarda çıkış kenarına bağlı olarak akış ayrılmalarının itki kuvvetine, gürültü ve titreşimlere etkisinin incelenmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- ANSYS, 2009, ANSYS-FLUENT 12.0, Theory Guide, Section 22.3.
- Chen, H., Zhong, Q., Wang, X., Li, D., 2014, "Reynolds number dependence of flow past a shallow open cavity", *Science China Technological Sciences*, 57(11), 2161-2171.
- Horváth, C., Vad, J., 2009, "Broadband noise source model acoustical investigation on unskewed and skewed axial flow fan cascades".
- Kim, H., Hu, Z., Thompson, D., 2020, "Effect of cavity flow control on high-speed train pantograph and roof aerodynamic noise", *Railway Engineering Science*, 28(1), 54-74.
- Krishnamurty, K., 1955, "Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces" (No. NACA-TN-3487).
- Malhotra, A., Vaidyanathan, A., 2016, "Aft wall offset effects on open cavities in confined supersonic flow", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 74, 411-428.
- Mancini, S., Kolb, A., Gonzalez-Martino, I., Casalino, D., 2019, "Effects of wall modifications on pressure oscillations in high-subsonic and supersonic flows over rectangular cavities", *In 25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, (p. 2692).
- Menter, F.R., 1994, "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", *AIAA journal*, Cilt 32, Sayı 8, ss. 1598-605.
- Mohamud, O. M., Johnson, P., 2006, "Broadband noise source models as aeroacoustic tools in designing low NVH HVAC ducts", *SAE Technical Paper*, No. 2006-01-1192.
- Noger, C., Patrat, J. C., Peube, J., Peube, J. L., 2000, "Aeroacoustical study of the TGV pantograph recess" *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 563-575.
- Özsoy, E., Rambaud, P., Stitou, A., Riethmuller, M. L., 2005, "Vortex characteristics in laminar cavity flow at very low Mach number", *Experiments in fluids*, 38(2), 133-145.
- Özsoy, E., Aslan, A. R., 2011 "Üç boyutlu bir kavite üzerindeki sıkıştırılmaz akışın sayısal bir yöntemle analizi". *İTÜDERGİSİ/d*, 10(3).
- Özsoy, E., 2010, "Numerical simulation of incompressible flow over a three dimensional rectangular cavity", *Doctoral dissertation*.
- Proudman, I., 1952, "The generation of noise by isotropic turbulence", *Proceedings of the Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 214(1116), 119-132.
- Rockwell, D., Naudascher, E., 1978, "Self-sustaining oscillations of flow past cavities", 152-165.

- Sciacchitano, A., Arpino, F., Cortellessa, G., 2021, "Benchmark PIV database for the validation of CFD simulations in a transitional cavity flow", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 90, 108831.
- Vikramaditya, N. S., Kurian, J., 2009, "Pressure oscillations from cavities with ramp", *AIAA journal*, 47(12), 2974-2984.
- Wang, Y., Lee, H. C., Li, K. M., Gu, Z., Chen, J., 2012, "Experimental and numerical study of flow over a cavity for reduction of buffeting noise", *Acta Acustica united with Acustica*, 98(4), 600-610.
- Zhang, X., Rona, A., Edwards, J. A., 1998, "The effect of trailing edge geometry on cavity flow oscillation driven by a supersonic shear layer", *The Aeronautical Journal*, 102(1013), 129-136.
- Zhang, X., Chen, X. X., Rona, A., Edwards, J. A., 1999, "Attenuation of cavity flow oscillation through leading edge flow control", *Journal of Sound and Vibration*, 221(1), 23-47.
- Zhang, L., Wang, R., Wang, S., 2014, "Simulation of broadband noise sources of an axial fan under rotating stall conditions", *Advances in Mechanical Engineering*, 6, 507079.