

TRANSONİK AKIŞLARDA GİRDAP ÜRETEÇLERİNİN KAVİTE GÜRÜLTÜSÜNE ETKİSİ

Oğuzhan Demir¹ ve Bayram Çelik²
İstanbul Teknik Üniversitesi
İstanbul

Kürşad Melih Güleren³
Eskişehir Teknik Üniversitesi
Eskişehir

ÖZET

Bu çalışmada son yıllarda özellikle savaş uçakları üzerinde çalışılan akış problemlerinden biri olan kavite akışlarının pasif kontrolünde girdap üreteçlerinin etkisi incelenmiştir. Kavite akışlarında karşılaşılan basınç dalgalanmalarını ve bunların sonucunda ortaya çıkan gürültüyü azaltmaya yönelik olarak düşünülen çeşitli girdap üreteci geometrileri kavite önüne yerleştirilmiştir. Çalışmalar açık kavite olarak nitelendirilen uzunluk/derinlik oranı (L/D) 5, genişlik/derinlik oranı (W/D) 1 olan bir kavite geometrisi üzerinde yürütülmüştür. Analizlerde açık kaynak kodlu bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) çözücüsü olan OpenFOAM kullanılmış ve sayısal çalışmalar Ayrılmış Girdap Benzetimi (Detached Eddy Simulation-DES) yöntemi uygulanarak tamamlanmıştır. Yürütülen çalışmalar sonucunda temiz kavite olarak nitelendirilen, kontrol yöntemi içermeyen akışlara göre girdap üreteçleri kontrol yönteminin kavite duvarlarında göreceli olarak bir gürültü azalmasını sağladığı gözlemlenmiştir.

GİRİŞ

Kavite akışları aerodinamik ve aeroakustik alanlarında karşılaşılan ve 1950'lerden beri ilgi ile incelenen bir akış türüdür [Krishnamurty, 1955; Rossiter, 1962]. Yolcu uçaklarında iniş takımları, savaş uçaklarında ise mühimmat hazneleri kavite özelliği göstermektedir (Şekil 1). Bu tür akışlarda karşılaşılan basınç salınımları, güçlü akustik dalgalar ve akışın kararsız yapısı, problemi görece olarak basit bir geometriye sahip olmasına rağmen fiziksel olarak zorlayıcı bir hale getirmektedir. Karşılaşılan basınç dalgalanmaları ve oluşan yüksek gürültü sonucunda mühimmat bırakılması esnasında istenmeyen yapısal hasarlar oluşabilmektedir. Ayrıca kavite kaynaklı gürültüler, motor kaynaklı gürültülere yakın seviyelere gelebilmekte ve pilotlar açısından zorlayıcı durumlara yol açabilmektedir.



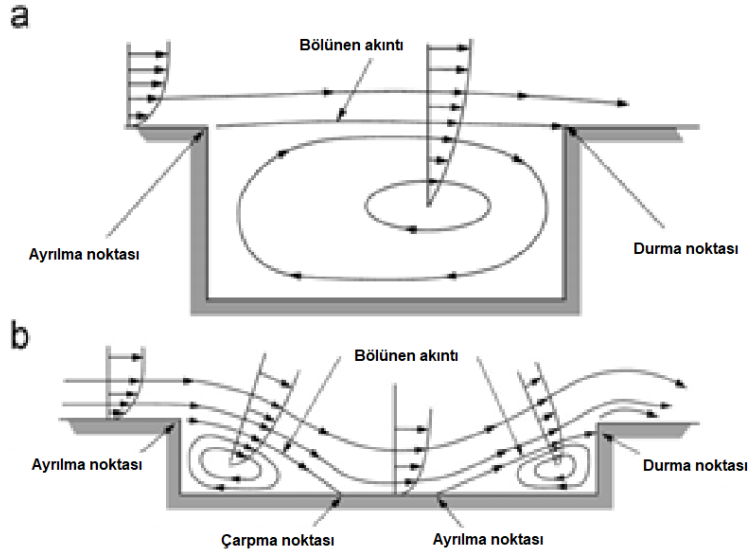
Şekil 1. Uçaklarda karşılaşılan tipik kavite örnekleri:
Mühimmat haznesi (solda) ve iniş takımı (sağda)

¹ Yüksek Lisans Öğr., Uçak Müh. Böl., E-posta: demirog16@itu.edu.tr

² Yrd. Doç. Dr., Uzay Müh. Böl., E-posta: celikbay@itu.edu.tr

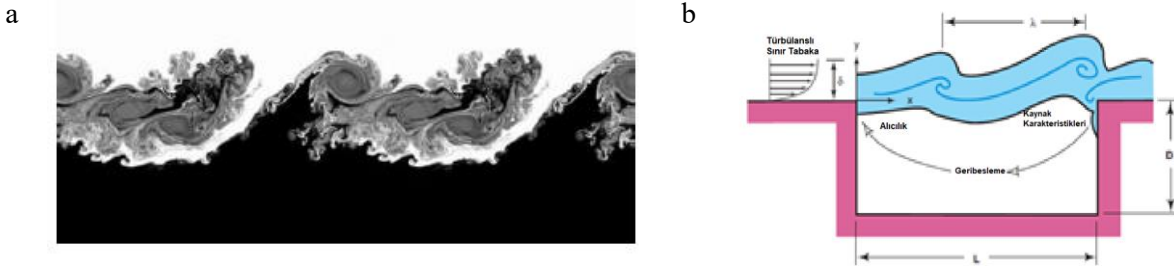
³ Doç. Dr., Pilotaj Bölümü, E-posta: kmguleren@anadolu.edu.tr

Kavite akışları sesaltı hızlarda kayma tabakasının davranışına bağlı olarak açık ve kapalı kavite olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Eğer kayma tabakası kaviteyi aşabilecek enerjiye sahipse ve kavite arka duvarına veya arka akım duvarına çarparsa bu akış açık kavite olarak değerlendirilir. Kayma tabakası bu enerjiye sahip değilse ve kavite içerisinde, kavite tabanına çarparsa bu akış kapalı kavite olarak nitelendirilir (Şekil 2).



Şekil 2. Sesaltı hızlarda kavite tipleri: a) Açık kavite b) Kapalı kavite

Açık kavitelere akışı kontrol eden ana parametreler akustik zorlama ve kayma tabakası kararsızlıklarıdır. Kayma tabakası kararsızlığı, Kelvin-Helmholtz kararsızlıklarının ortaya çıkması sonucu Kelvin-Helmholtz girdaplarının oluşmasını ifade etmektedir (Şekil 3). Burdaki girdap formasyonunun temel sebebi serbest akım ve kavite bölgesi arasındaki hız farkı olarak belirtilebilir. Kayma tabakasının hareketine bağlı olarak bir geribesleme mekanizmasının oluştuğu görülmektedir. Oluşan girdaplar kayma tabakası ile birlikte yol katedip kavite arka duvarına çarptığı zaman basınç dalgaları oluşur ve yukarı akım yönünde hareket etmeye başlar. Bu esnada, oluşan dalgalar sınır tabakanın ayrılma noktasında gelen kayma tabakası ile çarpışır ve belirli bir frekansta bu tabakayı uyarır, bu yapı akustik zorlama olarak bilinir. Yukarı akım yönünde hareket eden akustik dalgalar gürültünün temel kaynağıdır.



Şekil 3. Kelvin-Helmholtz girdapları

(a) Genel gösterim (b) Kavite gösterimi [Cattafesta, Song, Williams, Rowley, Alvi, 2008]

Oluşan gürültüyü ve basınç salınımlarını sönmleme amacıyla çeşitli kontrol yöntemler (aktif ve pasif) uygulanabilmektedir. Pasif yöntemler herhangi bir enerji gerektirmeyen, genellikle geometrik modifikasyonlar içeren yöntemlerdir. Aktif yöntemler ise sisteme harici bir etkiye bulunulması veya enerji eklenmesi ile çalışırlar. Kavite akışların pasif yöntemlerinde hız kesici kanat, girdap üreticileri ve kavite geometrisinde yapılan değişiklikler örnek olarak gösterilebilir. Ani genişleyen akış problemlerinde en önemli parametrelerden birisi olan akış yönünde gelişen ve genellikle kavite orta kısımlarında beliren girdaplar bu üreticiler tarafından da üretilebilmektedir [Karadogan ve Rockwell, 1983]. Pasif kontrol yöntemler kapsamında yapılan yeni çalışmalar delta şekilli veya eğimli hız kesici kanatların efektif bir kontrol yöntemi olduğunu fakat bunların boyutlandırılmalarının rezonans sönmlemelerinde kritik bir rol üstlendiğini göstermektedir [Bolduc, Elsayed ve Ziada, 2013].

Ayrıca, kavite öncesindeki yukarı akım duvarının çukurlu bir yapıda olması pasif bir kontrol yöntemi olarak literatürde yerini almıştır [Wang, Li ve Yang, 2016].

Bu çalışma kapsamında farklı geometrilerdeki hareketsiz girdap üreteçlerinin pasif bir kontrol yöntemi olarak uygulanabilirliği incelenmiş ve gerek basınç salınımlarına gerek ise ortalama ses basınç tayf düzeyine etkileri araştırılmıştır.

YÖNTEM

Türbülanslı sıkıştırılabilir bir dış akış problemi olan mevcut problem için yönetici denklemler süreklilik, moment ve enerji denklemleridir. Ek olarak, $k - \omega$ **SSTDES** türbülans modeli uygulanmıştır ve bu denklemler kısaca aşağıda belirtilmiştir. Yürütülen nümerik çalışmalara dair genel varsayımlar şu şekilde sıralanabilir:

- Sıkıştırılabilir gaz
- Kimyasal reaksiyon ihmal
- Transonik akış
- Mükemmel gaz denklemi
- Newtonian akışkan
- Yerçekimi etkilerinin ihmal
- İhmal edilebilir radyasyon

Daimi olmayan süreklilik, moment ve enerji denklemleri aşağıda tensör gösterimi ile kısaca belirtilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial[(\rho E + p)u_j]}{\partial x_j} = \frac{\partial(\sigma_{ij}u_i)}{\partial x_j} - \frac{\partial q_j}{\partial x_j} \quad (3)$$

Yukarıda verilen denklemlerde t ve x_i sırasıyla x Kartezyen sisteminde zamansal ve uzaysal koordinatları, u_i ise akışkan parçacığının hızını belirtmektedir. Daha önce belirtildiği üzere iki denklemler modelden esinlenen (türbülans kinetik enerji: k , türbülans özel dağılım oranı: ω) $k - \omega$ **SSTDES** türbülans modeli kullanılmıştır ve bu denklemler aşağıda belirtilmiştir.

$$\frac{D}{Dt}(\rho\omega) = \nabla \cdot (\rho D_\omega \nabla \omega) + \rho\gamma \frac{G}{\nu} - \frac{2}{3}\rho\gamma\omega(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho\beta\omega^2 - \rho(F_1 - 1)CD_{k\omega} + S_\omega \quad (4)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \min(\rho G, (c_1\beta^*)\rho k\omega) - \frac{2}{3}\rho k(\nabla \cdot \mathbf{u}) - \rho \frac{k^{1.5}}{\tilde{d}} + S_k \quad (5)$$

Uzunluk ölçeği \tilde{d} için

$$\min(C_{DES}\Delta, \frac{\sqrt{k}}{\beta^*})$$

Türbülans viskozite için

$$\nu_t = a_1 \frac{k}{\max(a_1\omega, b_1F_{23}S)}$$

Hesaplamaları yapılabilir.

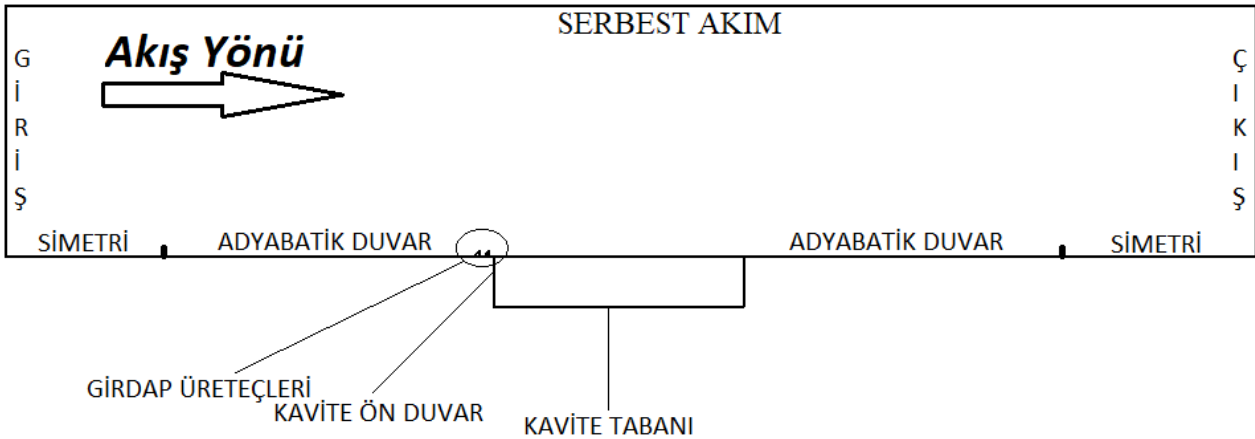
Yürütülen sayısal çalışmalar, açık kaynak kodlu bir akış çözücüsü olan OpenFOAM kullanılarak yürütülmüştür [Jasak, Jemcov ve Tukovic, 2007]. OpenFOAM, HAD konusunda yaygın bir kullanıcı kitlesine ve geniş bir içeriğe sahiptir. Analizler, transonik rejimde 0.85 Mach sayısında, basınç ve sıcaklık değerleri olarak ise deniz seviyesi baz alınarak yürütülmüştür. Sıkıştırılabilir bir akış çözümlenmesi yapıldığı için OpenFOAM alt modüllerinden basınç-temelli, türbülanslı ve sıkıştırılabilir akışları çözmeye yarayan rhoPimpleFoam modülü kullanılmıştır. Konvektif terimler yüksek mertebeden ayrıştırılmış (limitedCubicV1), gradyan terimler ve türbülans terimleri ilk mertebeden upwind şeması ile ayrıştırılmıştır. Başlangıç şartları olarak ($t=0$ anında) tamaiyle çözülmüş bir kavite analizine ait değerler kullanılmıştır. Sınır şartları ise hız için girişte Dirichlet çıkışta Neumann tipi olarak belirlenmiştir. Basınç için OpenFOAM içerisinde yansımaya neden olmayan bir sınır şartı olarak tanımlanan waveTransmissive kullanılmıştır. Duvarlar, bu sınırlardan net ısı akısı sıfır olduğu için adyabatik olarak belirlenmiştir. $y+$ değeri göz önünde bulundurularak log-law bölgede olunması sebebiyle, türbülans parametreleri için standart duvar fonksiyonları kullanılmıştır.

Kavite yüksekliği baz alınarak hesaplanan Reynolds sayısı yaklaşık olarak 10^6 değerindedir. Zamana bağlı analizler bir akış parçacığının kaviteyi 50 defa geçebileceği süre boyunca (konvektif zaman ölçeği- CTS) devam ettirilmiş ve son 40 CTS'e ait parametrelerin ortalaması alınmış, son işleme süreci için kullanılmıştır. Courant sayısı 1'e denk gelecek şekilde zaman adımı otomatik olarak çözücü tarafından belirlenmiştir. Bu durum ise yaklaşık 1 milyon iterasyona denk gelmektedir. Çözüm yöntemi olarak k-w SST DES yöntemi tercih edilmiştir. DES, URANS (Daimi olmayan Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes) ve LES (Büyük Girdap Benzetimi) çözümlerini kombine ederek duvar yakınlığında RANS, diğer bölgelerde ise LES yöntemine geçiş yapabilen ve literatürde yaygın bir şekilde kullanılan bir benzetim tekniğidir.

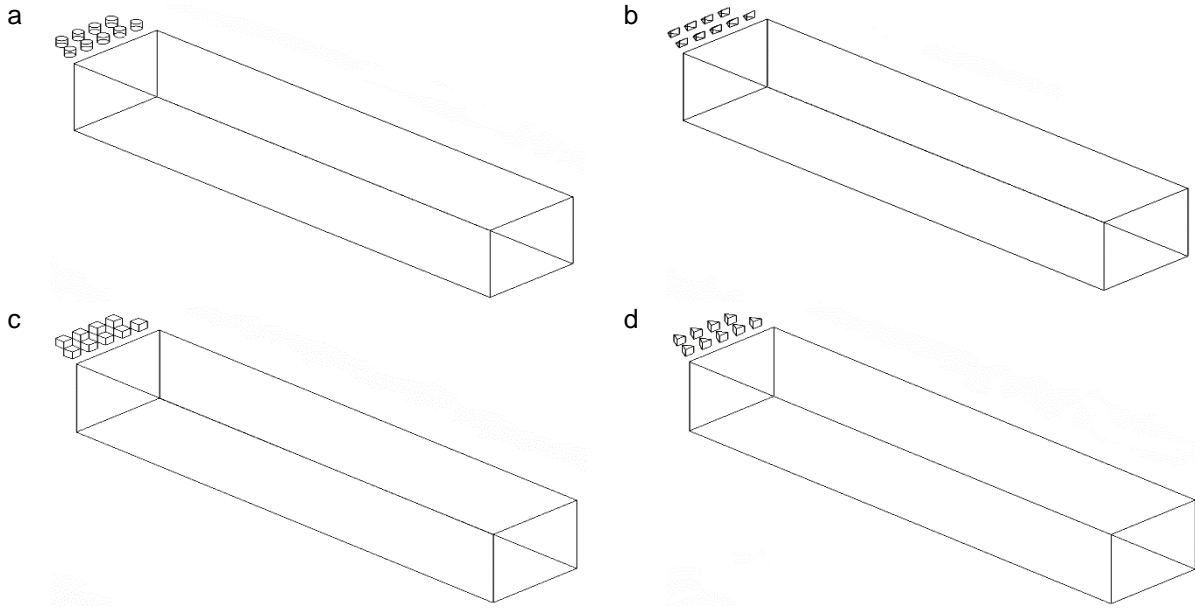
Bu çalışma kapsamında yürütülen nümerik analizler İstanbul Teknik Üniversitesi bünyesinde bulunan Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi (UHeM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

UYGULAMALAR

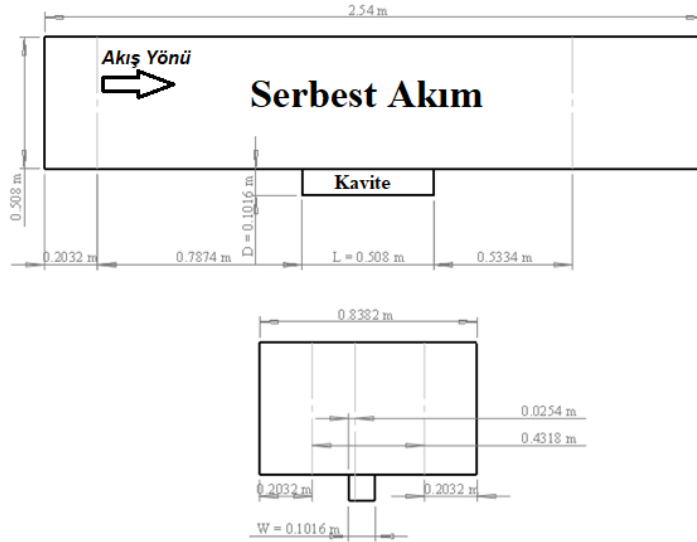
Çalışma kapsamında uygulanan ve kavite öncesinde bulunan yukarı akım duvarı olarak nitelendirilen duvara yerleştirilen farklı geometrilerdeki girdap üreteçleri ve akış alanına ait sınır şartları aşağıdaki şekiller aracılığıyla gösterilmiştir (Şekil 4 ve Şekil 5). Akış alanına ait ölçüler ise Şekil 6 ile sunulmuştur.



Şekil 4. Sayısal akış alanının taslağı



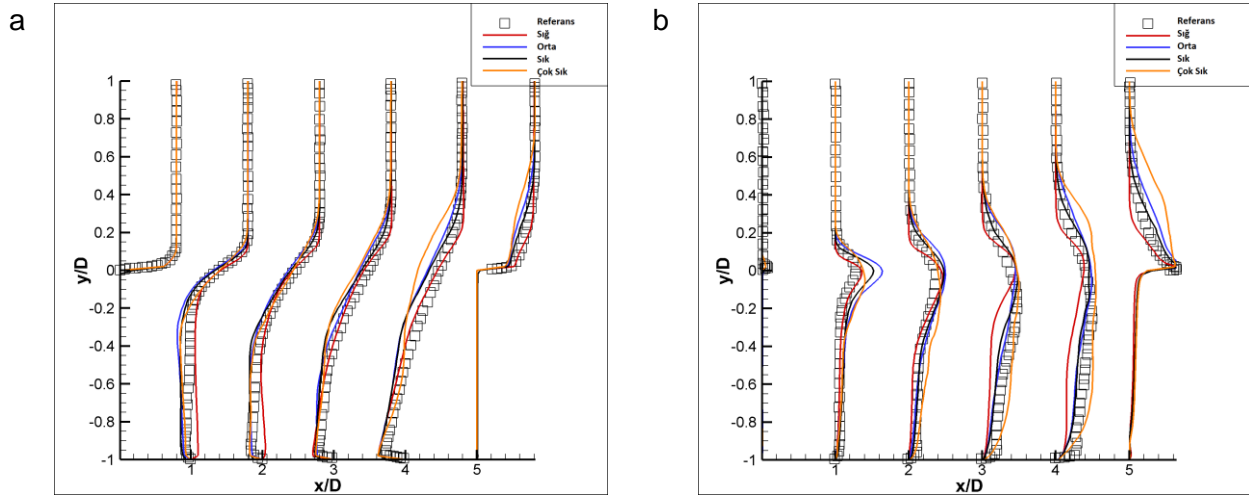
Şekil 5. Farklı geometrilerdeki girdap üreteçleri: a) Silindirik (VG_C09) b) Delta (VG_D09) c) Dikdörtgenel (CG_S09) d) Üçgenel (VG_T09)



Şekil 6. Akış alanının ölçüler ile gösterimi

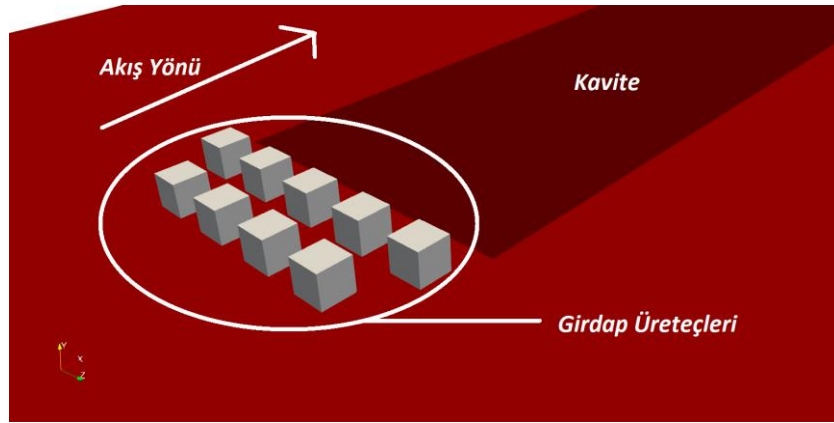
Literatürde sıklıkla karşılaşılan ve kavite akışlarında önemli bir referans olarak kullanılan M219 kavite çalışması [Larchevêque, Sagaut, Lê ve Comte, 2004] baz alınarak yürütülen analizler için hareketsiz girdap üreteçleri durumu incelenmiştir.

Girdap üretici analizlerine başlanılmadan önce OpenFOAM doğrulama ve ağ bağımsızlığı testleri yürütülmüştür. Kavite üzerinde belirli istasyonlarda hız ve türbülans kinetik enerji profilleri çıkarılmıştır (Şekil 7) [Güleren, Türk, Demircan ve Demir, 2018]. Kullanılan ağlar, Sığ (1.2 Milyon hücre), Orta (2.9 Milyon Hücre), Sık (4.9 Milyon Hücre) ve Çok Sık (9.6 Milyon Hücre) olarak nitelendirilmiştir.

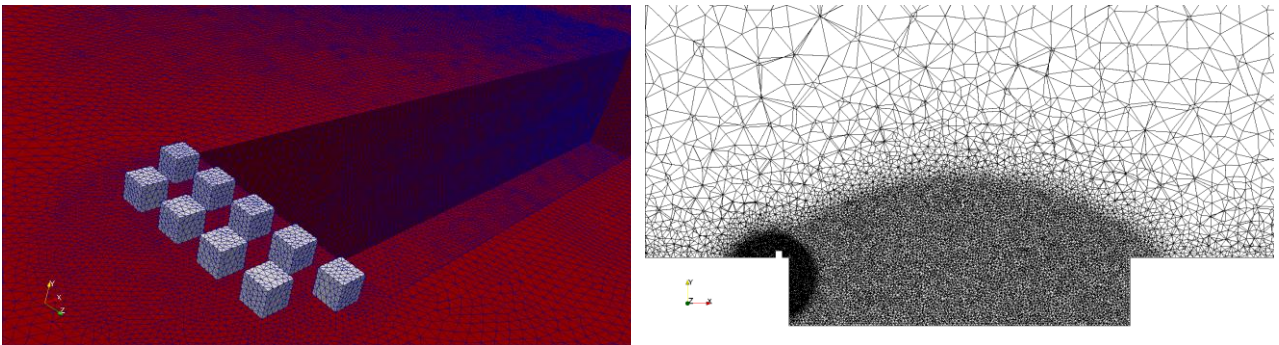


Şekil 7. Kavite boyunca ağ bağımsızlığı testi sonuçları
a) Hız profili b) Türbülans Kinetik Enerji profili

Girdap üretici analizleri kapsamında, sayısı yaklaşık olarak 3 milyon olan yapısız ağ örgüleri oluşturulmuş ve hücre sayıları ve sıklığı her bir yöntem için benzer tutulmuştur. İlk yöntem olarak, kavite önüne yerleştirilen dikdörtgenel üreticiler analiz edilmiştir, bu çalışmaya ait geometrik yapılar Şekil 8'de, ağ yapıları ise Şekil 9'da görülebilir.

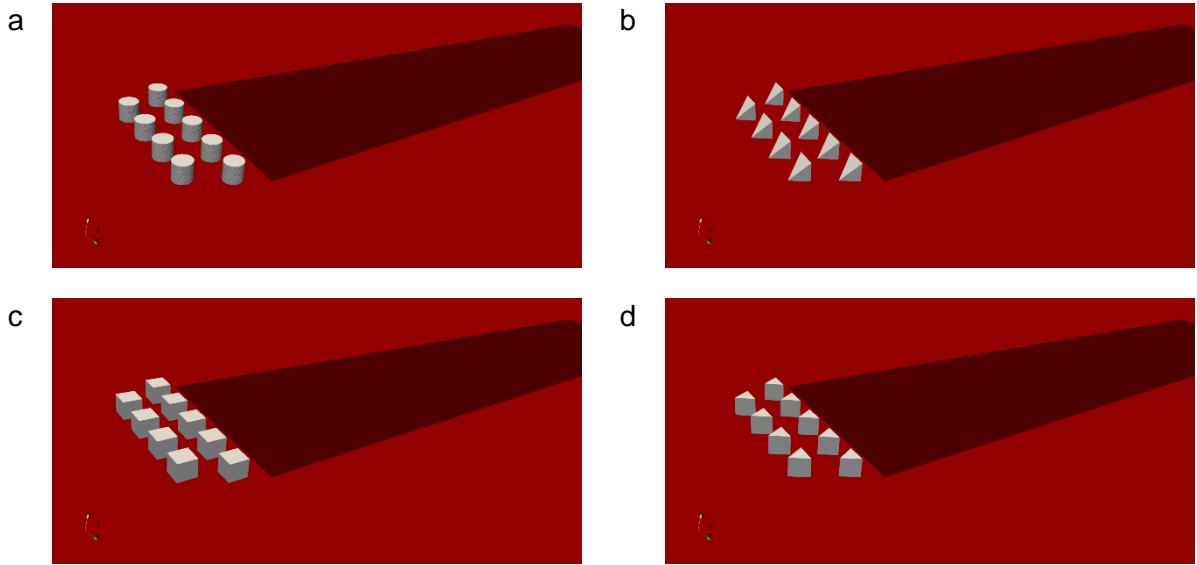


Şekil 8. Dikdörtgenel girdap üreticileri konfigürasyonu (VG_S09) yakınlaştırılmış izometrik görünüm



Şekil 9. Girdap üretici analizi için oluşturulan yapısız ağ örgüsü:
İzometrik görünüm (solda) yakınlaştırılmış yan kesit (sağda)

Diğer yöntemlere ait yakınlaştırılmış izometrik geometri gösterimleri ise Şekil 10 aracılığıyla verilmiştir.



Şekil 10. Uygulanan girdap üretici kontrol yöntemleri:
a) VG_C09 b) VG_D09 c) VG_S09 d) VG_T09

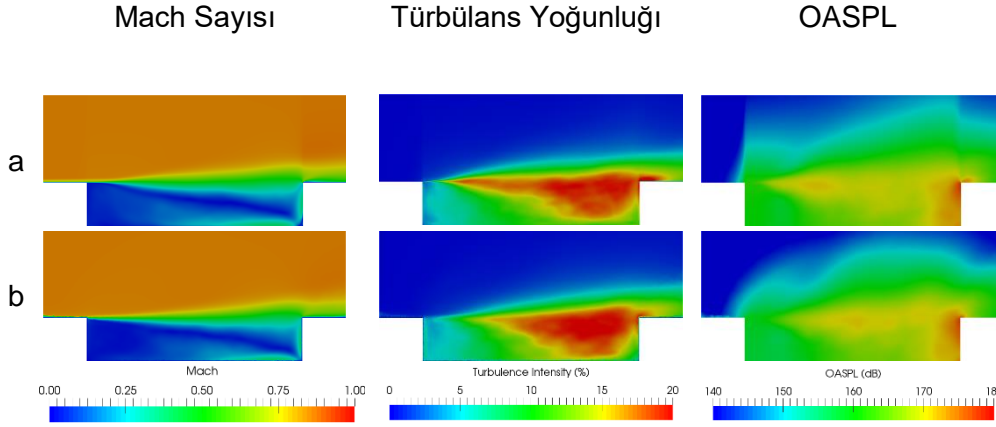
Hücre sayısını ve kalitesini benzer seviyede tutarak oluşturulan ağlara ait kontrol parametreleri Tablo 1 aracılığıyla verilmiştir. Daha iyi bir çözünürlüğe sahip olmak için bir tanesi kavite bölgesi bir tanesi de girdap üretici bölgesi olmak üzere iki adet etki küresi (sphere of influence) oluşturulmuştur (Şekil 9).

Tablo 1. Oluşturulan ağlara ait ana kontrol parametreleri

| Konfigürasyon | Parametre | Değer |
|---------------|------------------------|---------|
| VG_S09 | Hücre Sayısı | 3058406 |
| | Ortalama Diklik Olmama | 67.87 |
| | Maksimum Eğrilik | 0.845 |
| VG_T09 | Hücre Sayısı | 3059811 |
| | Ortalama Diklik Olmama | 66.02 |
| | Maksimum Eğrilik | 0.766 |
| VG_C09 | Hücre Sayısı | 3059132 |
| | Ortalama Diklik Olmama | 63.75 |
| | Maksimum Eğrilik | 0.789 |
| VG_D09 | Hücre Sayısı | 3064791 |
| | Ortalama Diklik Olmama | 67.08 |
| | Maksimum Eğrilik | 0.789 |

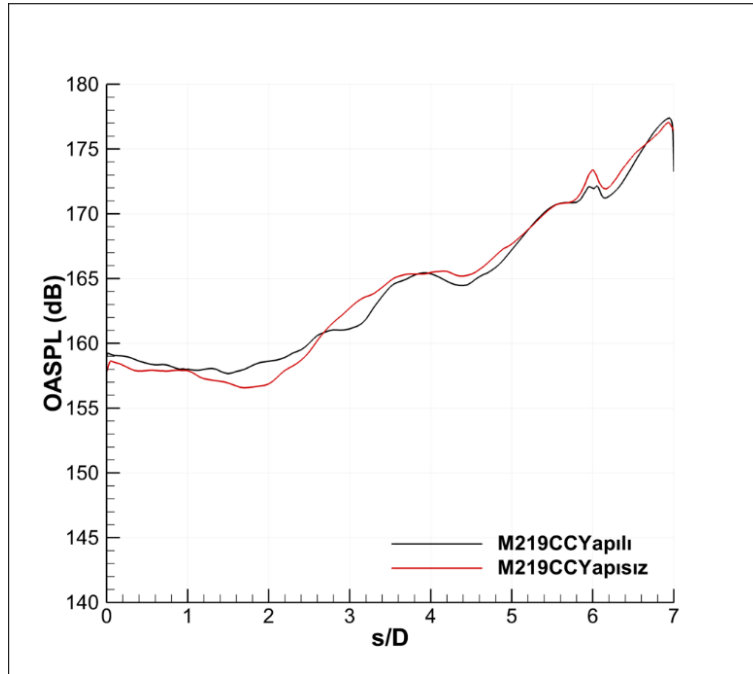
SONUÇ

M219 temiz kavite geometrisi için hem yapısal hem de yapısal olmayan ağlar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ağ örgüsünün akış konturlarına ve Şekil 12 aracılığıyla nicel bir şekilde incelendiği takdirde OASPL dağılımına ciddi bir etki etmediği görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında girdap üretici analizleri için yapısal olmayan bir ağ örgüsü kullanılması kararlaştırılmıştır.



Şekil 11. M219 Temiz Kavite (M219CC) akış konturları. a) Yapılı Ağ b) Yapısız Ağ

Kavite duvarlarında OASPL dağılımı ayrıca incelenmiş ve Şekil 12 ile sunulmuştur. (Şekil 12 içerisinde x – eksenine kavite duvarlarını belirtmektedir (0-1: kavite ön duvarı, 1-6: kavite alt duvarı, 6-7: kavite arka duvarı))

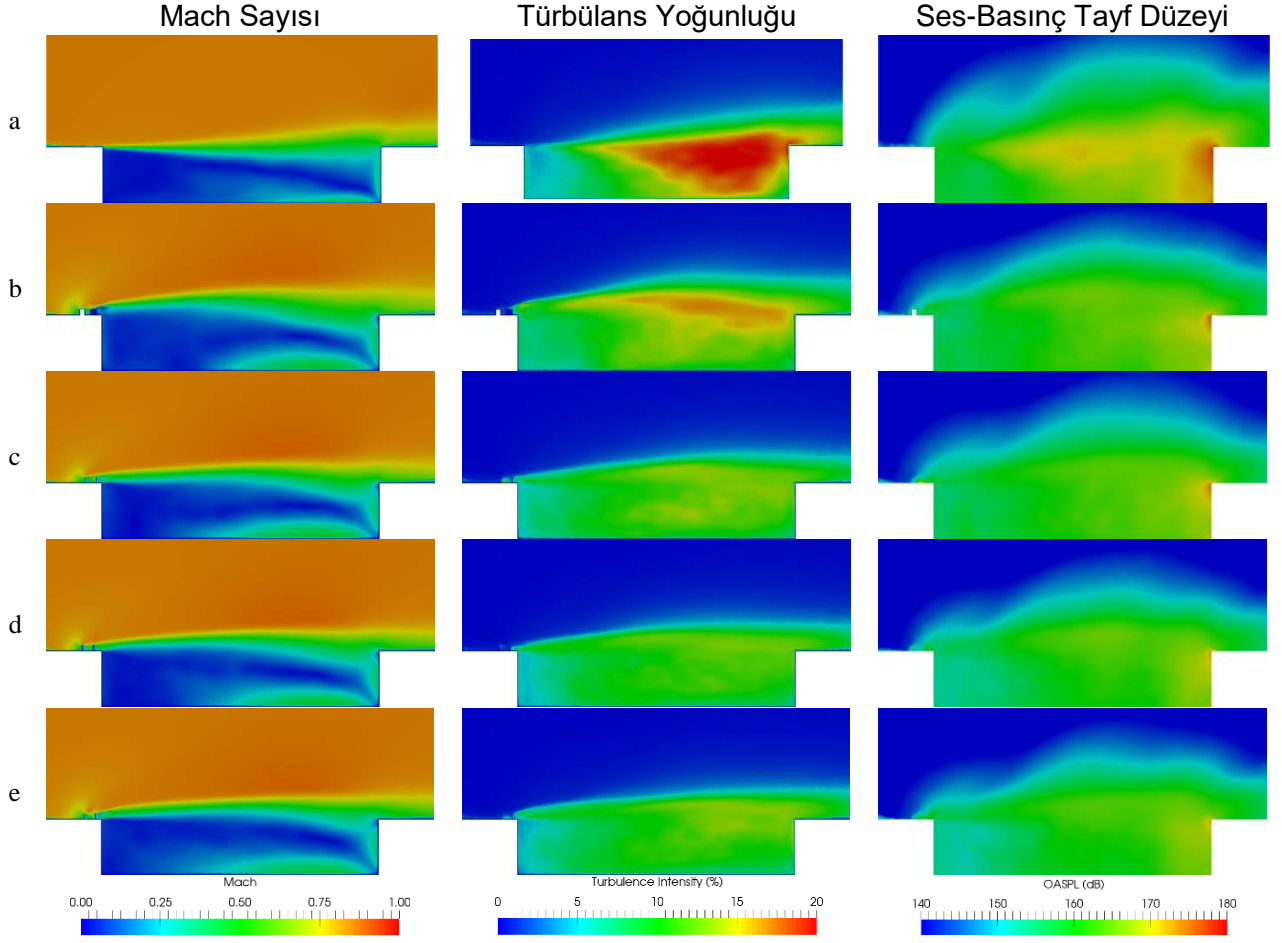


Şekil 12. M219CC kavite duvarları OASPL dağılımı

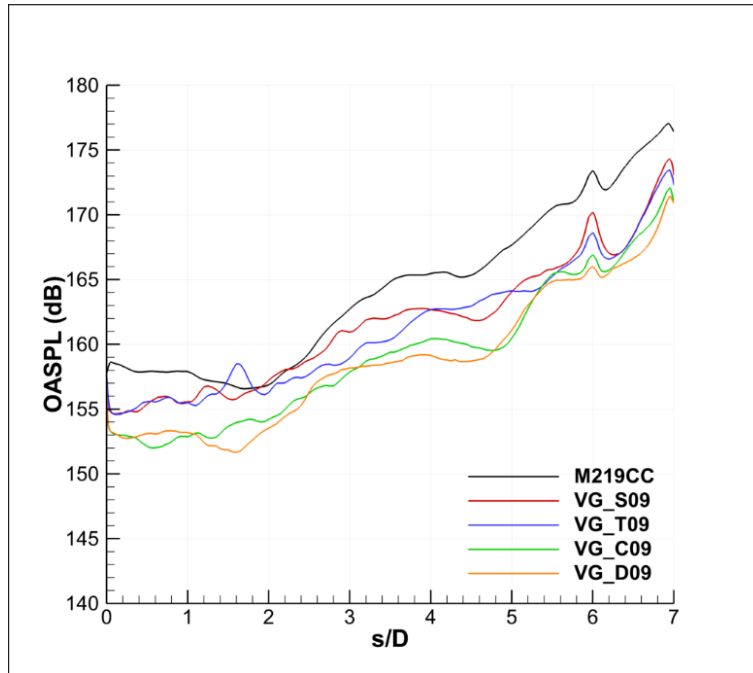
Yürütülen girdap üretici analizlerine ait akış konturları Şekil 13 ile gösterilmiştir. Ortalama Mach sayısı konturları incelenerek her bir üreticinin temiz kaviteye göre akışı biraz değiştirdiği ve kayma tabakasının kavite arka duvarının alt duvarına daha yakın olduğu kısımlara çarptığı görülebilmektedir. Türbülans yoğunluğu ise uygulanan tüm konfigürasyonlarda beklendiği gibi temiz kaviteye göre düşüş göstermiştir. Bu durumun ana sebeplerinden birisi kavite önüne yerleştirilen yapıların akışın kinetik enerjisini bölüp parçalaması ve sonuç olarak kavite içerisindeki türbülans kinetik enerjisinde bir düşüşe yol açmasıdır. Ses-Basınç Tayf Düzeyi konturları ise kavite içerisinde genel bir ses düşüşünün sağlandığını göstermektedir.

Kavite duvarlarında OASPL dağılımı ise Şekil 14 aracılığıyla incelenmiş, her bir yöntemin temiz kaviteye göre bir iyileşme sağladığı görülmüştür. Uygulanan yöntemler arasında VG_D09 konfigürasyonu bu bağlamda en efektif yöntem olarak düşünülebilir. Uygulanan yöntemlerin kavite duvarlarında oluşturduğu ortalama Ses-Basınç Tayf Düzeyleri (AOASPL) hesaplanmış ve temiz kavite geometrisine oranla ne düzeyde bir genel iyileşme sağladıkları tablo halinde verilmiştir (Tablo 2). Bu çalışma kapsamında yürütülen analizler incelenen girdap üreticilerinin genel olarak

bir ses-basınç tayf düzeyi iyileşmesine ve türbülans yoğunluğunda da azalmaya yol açtığı gözlemlenmiştir.



Şekil 13. a) Temiz kavite(M219CC) b) VG_S09 c) VG_T09 d) VG_C09 e) VG_D09



Şekil 14. Kavite duvarları boyunca OASPL dağılımı

Tablo 2. Girdap üretici yöntemleri ve ortalama OASPL bazında yaptıkları iyileştirmeler

| Konfigürasyon | AOASPL (dB) | İyileştirme Oranı (%) |
|---------------|-------------|-----------------------|
| M219CC | 164.27 | --- |
| VG_S09 | 161.61 | 1.62 |
| VG_T09 | 161.23 | 1.85 |
| VG_C09 | 159.18 | 3.10 |
| VG_D09 | 158.73 | 3.37 |

Kaynaklar

Bolduc, M., Elsayed, M. ve Ziada, S., 2013. *Effect of upstream edge geometry on the trapped mode resonance of ducted cavities*, In ASME PVP Conference, Paris, France, Paper No. PVP2013-97149, Temmuz 2013.

Cattafesta III, L. N., Song, Q., Williams, D. R., Rowley, C. W., & Alvi, F. S., 2008. *Active control of flow-induced cavity oscillations*. Progress in Aerospace Sciences, 44(7-8), 479-502.

Güleren, K. M., Türk, S., Demircan, O. M. ve Demir, O., 2018. *Numerical Analysis of the Cavity Flow subjected to Passive Controls Techniques*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 326 (2018): 012015

Jasak, H., Jemcov, A. ve Tukovic, Z., 2007. *OpenFOAM: A C++ Library for Complex Physics Simulations*, International Workshop on Coupled Methods in Numerical Dynamics, IUC, Dubrovnik, 19-21 Eylül 2007, 1-20.

Karadogan, H. ve Rockwell, D., 1983. *Toward Attenuation of Self-Sustained Oscillations of a Turbulent Jet Through a Cavity*, J. Fluids Eng. 105, 335.

Krishnamurty, K., 1955. *Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces*. Technical Report Technical Note 3487, National Advisor Committee For Aeronautics.

Larchevêque, L., Sagaut, P., Lê, T.H. ve Comte, P., 2004. *Large-eddy simulation of a compressible flow in a three-dimensional open cavity at high Reynolds number*, Journal of Fluid Mechanics 516 (2004): 265-301

Rossiter, J., 1962. *The effects of cavities on the buffeting of aircraft*. Technical Memorandum AERO.754, Royal Aircraft Establishment.

Wang, Y. Li, S. ve Yang, X., 2016. *Numerical investigation of the passive control of cavity flow oscillations by a dimpled non-smooth surface*, Applied Acoustics, 111, 16-24.