

PASİF AKIŞ KONTROL YÖNTEMLERİNİN KAVİTE GÜRÜLTÜSÜNE ETKİSİNİN OPENFOAM KULLANILARAK SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Oğuzhan Demir¹
Roketsan A.Ş., Ankara

Bayram Çelik²
İstanbul Teknik Üniversitesi,
İstanbul

Kürşad Melih Güleren³
Eskişehir Teknik Üniversitesi,
Eskişehir

ÖZET

Kavite akışları havacılık ve aeroakustik alanlarında yıllardır ilgiyle araştırılan önemli bir mühendislik problemidir. Basit bir geometriye sahip olmasına rağmen, kavite akışlarının fiziği görüldüğünden daha karmaşıktır. Bu çalışmada, açık bir kavitenin farklı pasif akış kontrol yöntemleri kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) incelemeleri yapılmış ve bu yöntemlerin akış alanına etkileri gözlemlenmiştir. Pasif kontrol yöntemleri olarak arka duvar geometrisinin değiştirildiği, kavite öncesine spoyler yerleştirildiği ve bu iki yöntemin birlikte uygulandığı durumlar incelenmiştir. Yapılan çalışmalar üç boyutlu bir şekilde, Ayrık Burgaç Benzetimi (ing. Detached Eddy Simulation) yapılarak yürütülmüş ve sayısal analizler için açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM kullanılmıştır. Serbest akış Mach hızının 0.85, Reynolds sayısının ise yaklaşık 2.0×10^7 olduğu çalışmalarda, referans alınan kavitenin uzunluk/derinlik oranı (L/D) 5, genişlik/derinlik (W/D) oranı ise 1'dir. Elde edilen sonuçlar hem deneysel hem de sayısal verilerle kıyaslanmıştır. Mach sayısı, türbülans yoğunluğu, türbülanslı yapılar, OASPL gibi incelemeler yapılarak pasif kontrol yöntemlerinin normal bir kaviteye oranla meydana getirdiği değişiklikler araştırılmıştır. Pasif bir kontrol yöntemi kullanılarak kavite alt duvarı boyunca hesaplanan OASPL değerlerinin yaklaşık ~ 10 dB düştüğü gözlemlenmiştir. Ek olarak, kavite alt duvarı boyunca yerleştirilen basınç ölçerler, basıncın pasif bir kontrol yöntemi kullanıldığında daha az salındığını göstermiştir.

GİRİŞ

Kavite akışları, dahili mühimmat depolarının (ing. internal weapon bay) ortaya çıkmaya başladığı 1950'lerden bu zamana havacılık alanında önemli bir araştırma konusu olarak boy göstermiştir [Krishnamurty, 1955; Roshko, 1955]. Zaman içerisinde hem deneysel [Rossiter, 1960] hem de sayısal olarak [Shih, Hamed ve Yeuan, 1994] çokça araştırılmıştır ve günümüzde halen çalışılmaktadır. Dahili mühimmat depoları, radar kesit alanı ve aerodinamik ısınma gibi fenomenlerin azaltılmasında önemli etkilere sahip olma gibi birçok avantaja sahiptir. Dahili bir mühimmat deposu havada açıldığı zaman oluşan akışa kavite akışı denir (Şekil 1). Kavite akışları aynı zamanda yolcu uçaklarının iniş takımları, arabaların açılır tavanları (ing. sunroof) gibi yerlerde de görülebilir. Bu tür akışlar kararsız bir yapıya sahip olmakla beraber yüksek basınç salınımları ve akustik dalgalar oluşturmakta, yüksek gürültülerin oluşmasına sebebiyet vermekte ve hatta yapısal bütünlüğü bozabilecek düzeyde titreşimlerin oluşmasına neden olabilmektedir.

¹ Mühendis, Roketsan A.Ş., E-posta: oguzhan.demir.1@roketan.com.tr

² Doç. Dr., Uçak ve Uzay Mühendisliği Fakültesi, İTÜ, E-posta: celikbay@itu.edu.tr

³ Prof. Dr., Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, ESTU; E-posta: kmguleren@eskisehir.edu.tr



Şekil 1. Dahili mühimmat deposu örnekleri.

Kavitelerin oluşturduğu kararsız, türbülanslı ve yüksek gürültülü akış ortamlarını sönmüleyebilmek adına pasif ve aktif akış kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Pasif akış kontrol yöntemleri harici herhangi bir enerjiye gerek duymadan, genellikle geometrik değişimlerle sağlanır. Aktif yöntemler ise sisteme harici bir etki veya enerji eklenmesi ile çalışırlar.

Bu çalışmada, kavite akışları sayısal bir şekilde incelenmiştir. Kavite arka duvarının yeniden şekillendirilmesi, kavite önüne spoyler yerleştirilmesi veya bu iki yöntemin bir arada uygulanması gibi çeşitli pasif akış kontrol yöntemleri uygulanarak bu yöntemlerin akış alanına etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Analizler üç boyutlu bir şekilde, Ayrık Burgaç Benzetimi yapılarak, 0.85 Mach hızında, yaklaşık 10^7 Re sayısında, OpenFOAM yazılımı [Jasak, Jemcov ve Tukovic, 2007; Greenshields, 2015] kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel verilerle ve birbirleriyle, genellikle OASPL bazında karşılaştırılmıştır. Ek olarak, Mach sayıları, türbülans yoğunlukları ve türbülanslı yapılar da incelenmiştir.

YÖNTEM

Bu çalışmada yer alan HAD analizleri, açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. OpenFOAM, dünya genelinde yaygın bir kullanıcı kitlesine sahiptir ve birçok farklı araştırma ekibi tarafından sürekli geliştirilmeye devam etmektedir. Mevcut problem türbülanslı, zamana bağlı, sıkıştırılabilir bir dış aerodinamik akış problemidir ve Navier-Stokes denklemleri tarafından yönetilmektedir. Ses geçişi (*ing. transonic*) bölgesinde 0.85 Mach sayısında, deniz seviyesinde yapılan HAD analizlerinde OpenFOAM yazılımının sıkıştırılabilir ve türbülanslı akışlar için basınç-temelli olarak yazılan alt çözücüsü rhoPimpleFoam kullanılmıştır. Türbülans modellemesi olarak $k - \omega SST$ modelini temel alan Ayrık Burgaç Benzetimi yöntemi kullanılmıştır [Menter, Kuntz ve Langtry, 2003]. Ayrık Burgaç Benzetimi, Zamana Bağlı Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (URANS) ile Büyük Burgaç Benzetimi (LES) arasında hibrit bir yöntem olarak bilinmekte ve iki tarafın da avantajlarından yararlanılmasına olanak veren, yaygın bir yöntemdir. Bu yöntem kısaca, duvar bölgelerinde URANS, uzak alanlarda ise LES çözümüne geçiş yapılmasını sağlar.

Zamana bağlı analizler bir akış parçacığının kaviteyi 50 defa geçebileceği süre boyunca (CTS) devam ettirilmiştir. Bu analizlerde ilk 10 CTS akışın kendini toparlaması ve fiziksel olmayan fenomenleri sönmülemesi için yürütülmüştür. Son 40 CTS'e ait parametrelerin ortalaması alınmış ve son işleme için kullanılmıştır. Zaman adımı, Courant sayısı 1'i aşmayacak şekilde çözücü tarafından belirlenmiştir.

Bu çalışmada yürütülen HAD analizleri, İstanbul Teknik Üniversitesi'nde bulunan Ulusal Yüksek Başarımli Hesaplama Merkezi (UHeM) kullanılarak yürütülmüştür.

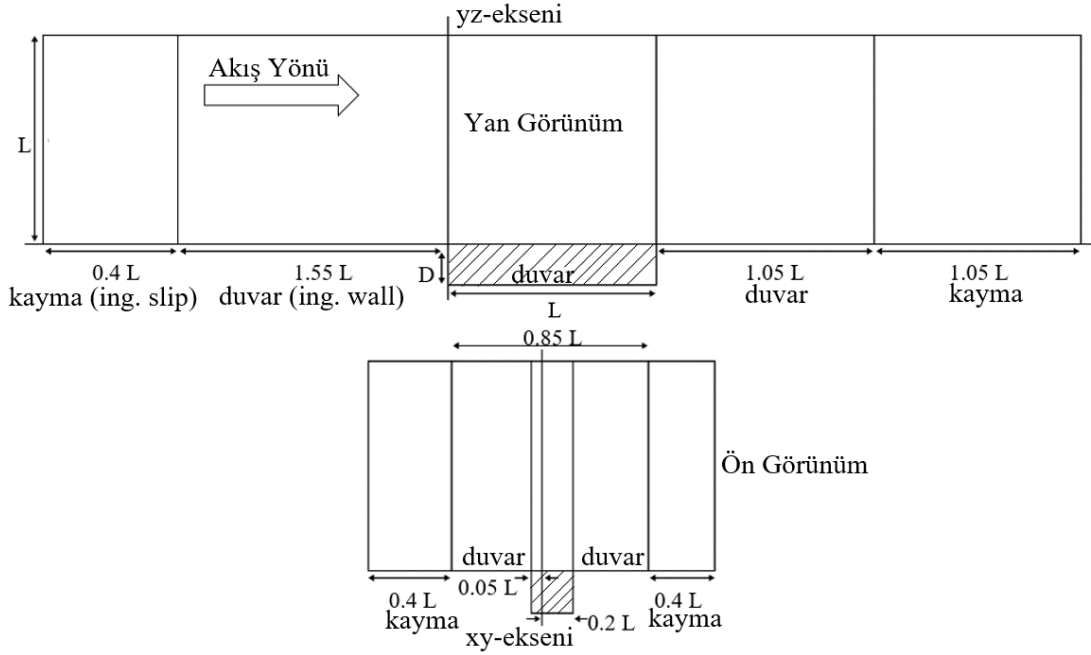
UYGULAMALAR

Bu çalışmada, M219 olarak isimlendirilen ve literatürde çokça çalışılan [Lawson ve Barakos, 2009] bir kavite referans alınmıştır. M219, dikdörtgensel bir kesite sahip ve herhangi bir aktif/pasif kontrol yöntemi içermeyen, L/D oranı 5, W/D oranı 1 olan bir kavitedir. Basınç salınımlarını sönmülemek ve üretilen OASPL değerlerini azaltmak için bu kavite geometrisine çeşitli pasif kontrol yöntemleri uygulanmıştır. Bu yöntemler, Tablo 1'de özetlenmektedir.

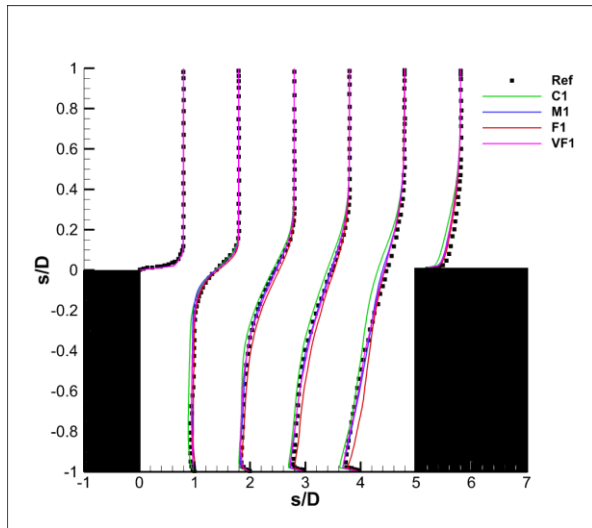
Tablo 1. Uygulanan pasif akış kontrol yöntemleri.

Konfigürasyon	Gösterim	Kısa Açıklama
M219 Temiz Kavite	M219CC	Kontrol yöntemi içermeyen temiz kavite
Arka Duvar Konfigürasyonları	PAW1	Arka duvarın 45° eğimlendirilmesi
	PAW2	Arka duvarın 45° yarı-eğimlendirilmesi
	PAW3	Merdiven şeklinde arka duvar
	PAW4	Eğri şeklinde arka duvar
Spoiler Konfigürasyonları	PSP1	Kavite öncesine yerleştirilmiş dikdörtgensel çubuk
	PSP2	Kavitenin 0.1L öncesine yerleştirilmiş dikdörtgensel çubuk
Birleştirilmiş Konfigürasyonlar	PC1	PAW1 ve PSP1 kombinasyonu
	PC2	PAW1 ve PSP2 kombinasyonu

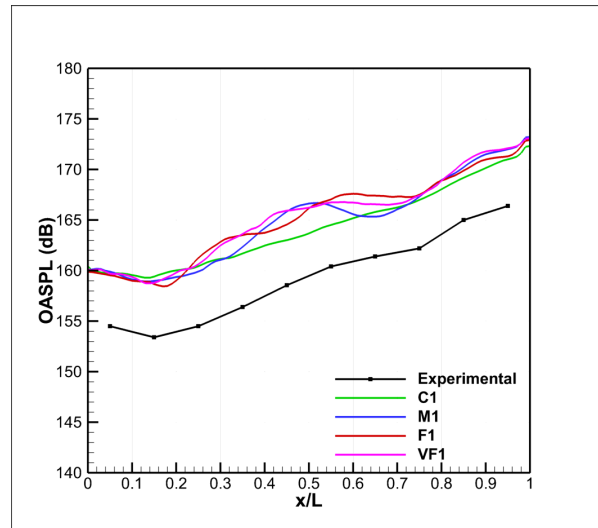
Sayısal akış alanı, Şekil 2’de gösterildiği gibi kavite bölgesinin ön-arka-yan yapışık yüzeylerinde duvar (*ing. wall*) ve bu yapışık yüzeylere yapışık olarak da kayma (*ing. slip*) bölgeleri içermektedir. Kayma bölgeleri, sayısal sınırların neden olduğu akışın yanlış evrimi ve değişikliğini ihmal edilebilir olmasını sağlama amacıyla eklenmiştir. Şekil 2’deki taranmış bölge, kavite bölgesini işaret etmektedir.

Şekil 2. Mevcut problem için sayısal akış alanı, $L=0.508$ m.

Öncelikle M219 kavitesi (M219CC) analiz edilmiş ve sonuçlar, referans olarak alınan sayısal çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu incelenmiştir [Larcheveque, Sagaut, Le ve Comte, 2004]. M219CC ile yürütülen analizlerde, kavite üzerinde belirli istasyonlarda hız profillerine ait değerler toplanmış ve bu sonuçlar çerçevesinde çözüm ağı bağımsızlığı hassasiyet analizleri yapılmıştır. Bu hassasiyet analizlerinde sırasıyla 1.2 milyon (C1), 3 milyon (M1), 6 milyon (F1) ve 10 milyon (VF1) yapısal elemana sahip olan çözüm ağları oluşturulmuştur. Şekil 3a’daki ortalama hız profilleri incelendiği zaman, M1 çözüm ağının referans çalışma ile uyum içerisinde olduğu görülebilmektedir. Kavite tabanı boyunca yerleştirilen basınç ölçerlerden elde edilen OASPL dağılım sonuçları ise referans olarak alınan deneysel çalışma ile karşılaştırılmıştır [Nightingale, Ross ve Foster, 2005]. Şekil 3b’deki sonuçlar incelendiğinde, M1 çözüm ağının bir miktar fazla tahmin (*ing. overprediction*) yapmasına rağmen deneysel verilerle benzer bir davranışta olduğu görülmektedir.



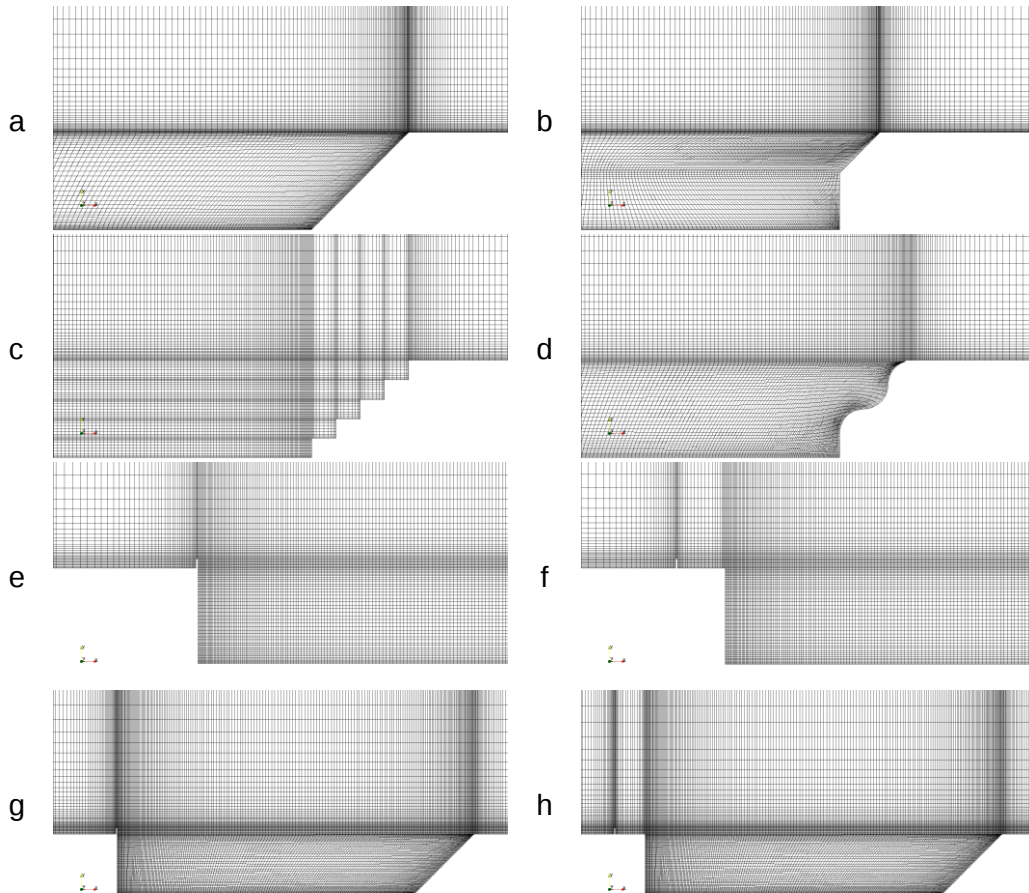
a



b

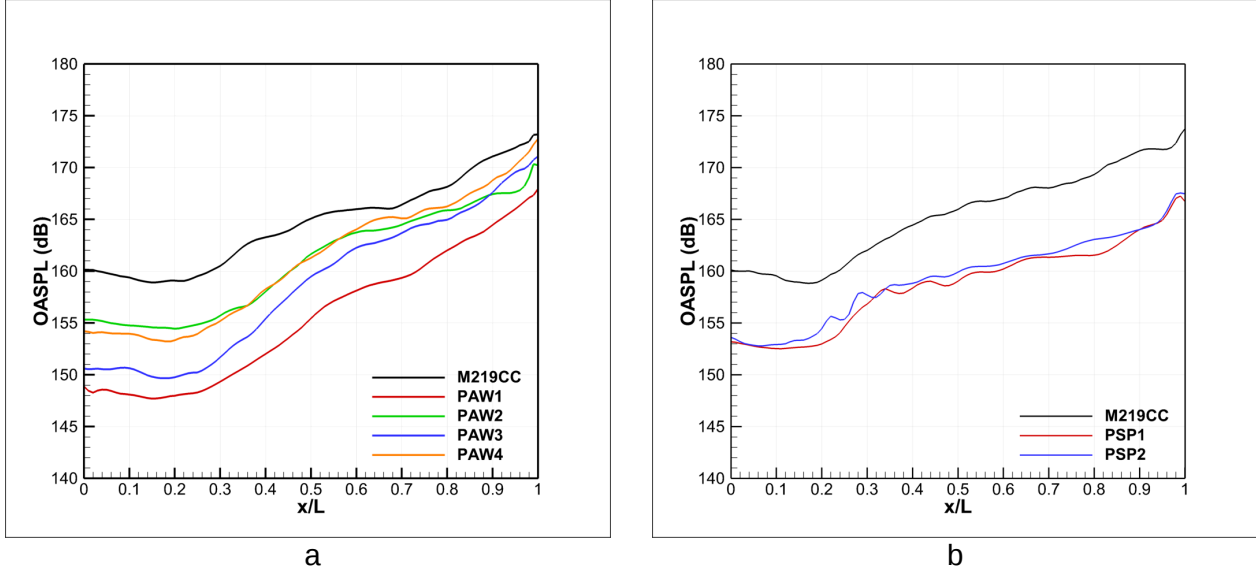
Şekil 3. Çözüm ağı bağımsızlığı hassasiyet analizleri sonuçları: a) Kavite boyunca ortalama boylamsal hız profilleri b) Kavite tabanı boyunca OASPL dağılımı.

Çözüm ağı bağımsızlığı doğrulaması yapıldıktan sonra, Tablo 1’de belirtilen pasif kontrol yöntemleri için çözüm ağı oluşturulmuştur. Bu çözüm ağları, yapısal hücreler kullanılarak ve M1 çözüm ağı olarak belirlenen referans çözüme ağına uyum sağlanarak oluşturulmuştur.



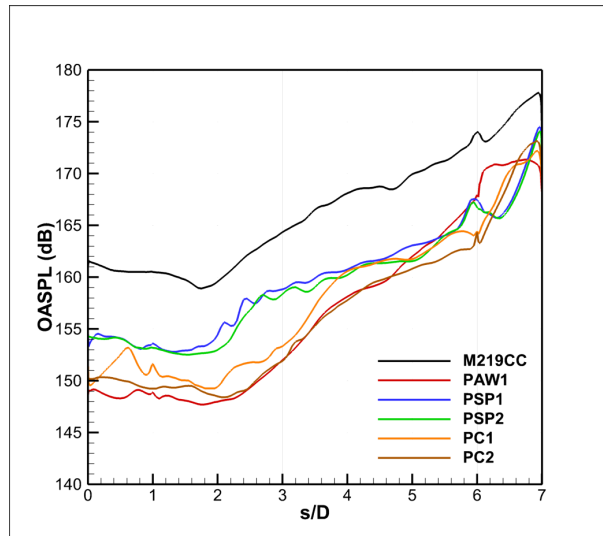
Şekil 4. Arka duvar pasif kontrol yöntemi çözüm ağları, kavite bölgesine yakınlaştırılmış yandan görünüm: a) PAW1 b) PAW2 c) PAW3 d) PAW4 e) PSP1 f) PSP2 g) PC1 h) PC2.

Pasif akış kontrol yöntemleri çalışmaları kapsamında yapılan analizlerde, M219CC probleminin zamana bağlı akış değerleri başlangıç koşulları olarak kullanılmış ve böylelikle analizlerin daha hızlı bir şekilde yürütülmesi sağlanmıştır. Arka duvar geometrisinin değiştirildiği durumlardan elde edilen OASPL sonuçları Şekil 5a'da verilmiştir. Arka duvar konfigürasyonlarının hepsinin OASPL değerlerini düşürdüğü göz çarpmaktadır. Gürültünün asıl kaynağı kavite arka duvarı olduğundan, bu yöntem başarıyla sonuçlanmıştır. PAW1 konfigürasyonunun en başarılı arka duvar pasif kontrol yöntemi olduğu ve kavitenin orta bölgelerinde yaklaşık ~ 10 dB bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Kavite önüne yerleştirilen dikdörtgensel çubukların oluşturduğu spoyler konfigürasyonlardan elde edilen OASPL sonuçları ise Şekil 5b'de verilmiştir. PSP1 ve PSP2 konfigürasyonlarından elde edilen OASPL dağılımları M219CC konfigürasyonundaki dağılıma benzemekle beraber, gürültünün azalmasına olanak sağlamıştır. Arka duvar konfigürasyonlarına benzer bir şekilde, kavite orta bölgelerinde yaklaşık ~ 10 dB bir gürültü azalması dikkat çekmektedir.



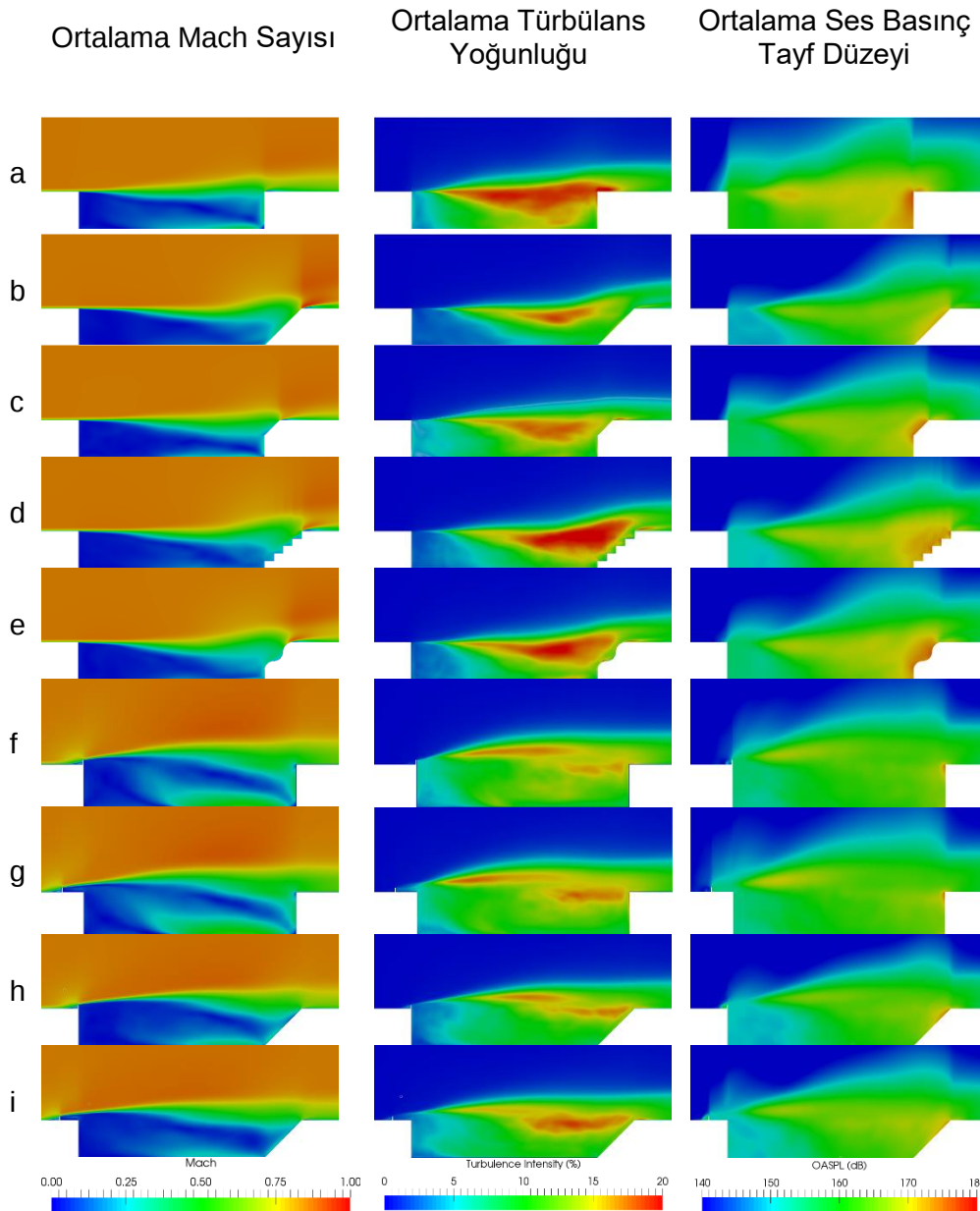
Şekil 5. Kavite tabanı OASPL dağılımı: a) Arka duvar konfigürasyonları b) Spoyler konfigürasyonları.

Son olarak, arka duvar konfigürasyonları ile spoyler konfigürasyonlarının kombinasyonlarının incelendiği durumlar ise (PC1 ve PC2) kavite tabanı boyunca değil, kavite boyunca (ön-taban-arka duvar) analiz edilmiştir. OASPL değerleri, kavite ön duvarı-tabanı-arka duvarı boyunca toplanılmış ve genel bir OASPL dağılımı çıkarılmıştır. Şekil 6 ile gösterilen bu sonuçlar, birleştirilmiş konfigürasyonların da gürültü azaltımında başarılı bir iş çıkardığını ve kavite genelinde bir gürültü önlemesi sağladığını göstermektedir.



Şekil 6. Uygulanan kontrol yöntemlerinin kavite boyunca oluşturduğu OASPL dağılımı.

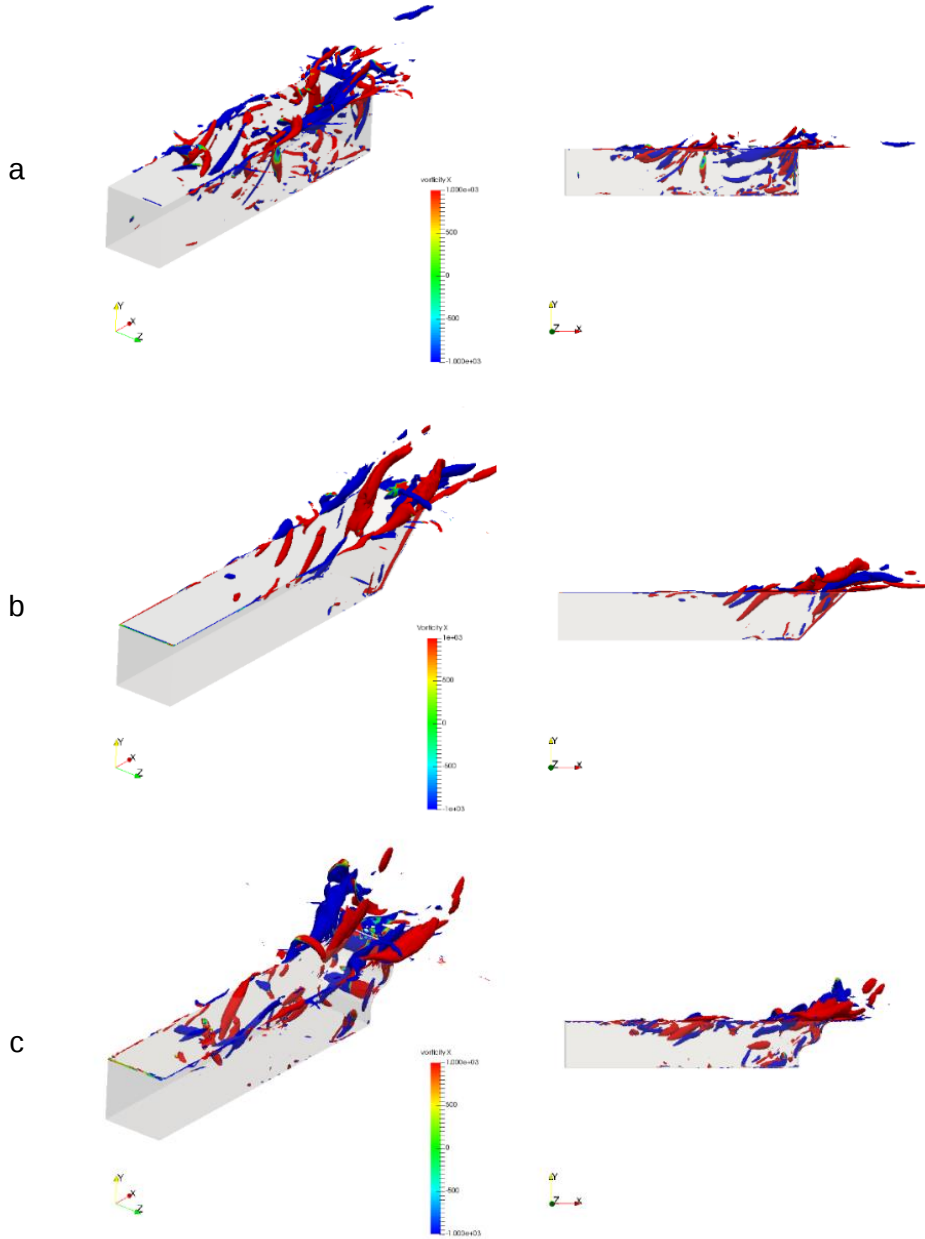
Uygulanan pasif kontrol yöntemlerinden elde edilen Mach sayısı, türbülans yoğunluğu ve OASPL konturları Şekil 7’de gösterilmiştir. Şekil 7 içerisinde ortalama Mach sayısı incelendiği takdirde, kayma tabakasının arka duvar kontrol yöntemlerinde aşağı doğru inerek, kavite tabanına daha yakın bir bölgeye çarptığı görülmüştür. Spoiler konfigürasyonlarında ise, kavite öncesindeki yükseltiden dolayı kayma tabakası belirli bir yükseklik kazanarak kavite ağzından daha yukarıya çıkmış ve dolayısıyla daha ileri bir noktaya çarpmıştır. Türbülans yoğunluğu özelinde incelemeler yapıldığında ise birçok kontrol yönteminin, temiz kavite (M219CC) sonuçlarına göre kavite içerisindeki türbülans yoğunluğu seviyelerini azalttığı görülmüştür. Özellikle spoiler konfigürasyonlarında, kayma tabakasının da yükselti kazanması ile birlikte kavite içerisindeki türbülans yoğunluğu önemli derecelerde azalmıştır. Bu durum OASPL konturlarında da görülmekte olup, ses azaltımına önemli bir etkiye bulunmuştur. OASPL konturları ise Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7 aracılığıyla sunulan kavite duvarlarındaki OASPL dağılımı grafiklerini doğrular nitelikte olup, tüm yöntemlerde temiz kaviteye göre gürültü düşüşü olmuştur.



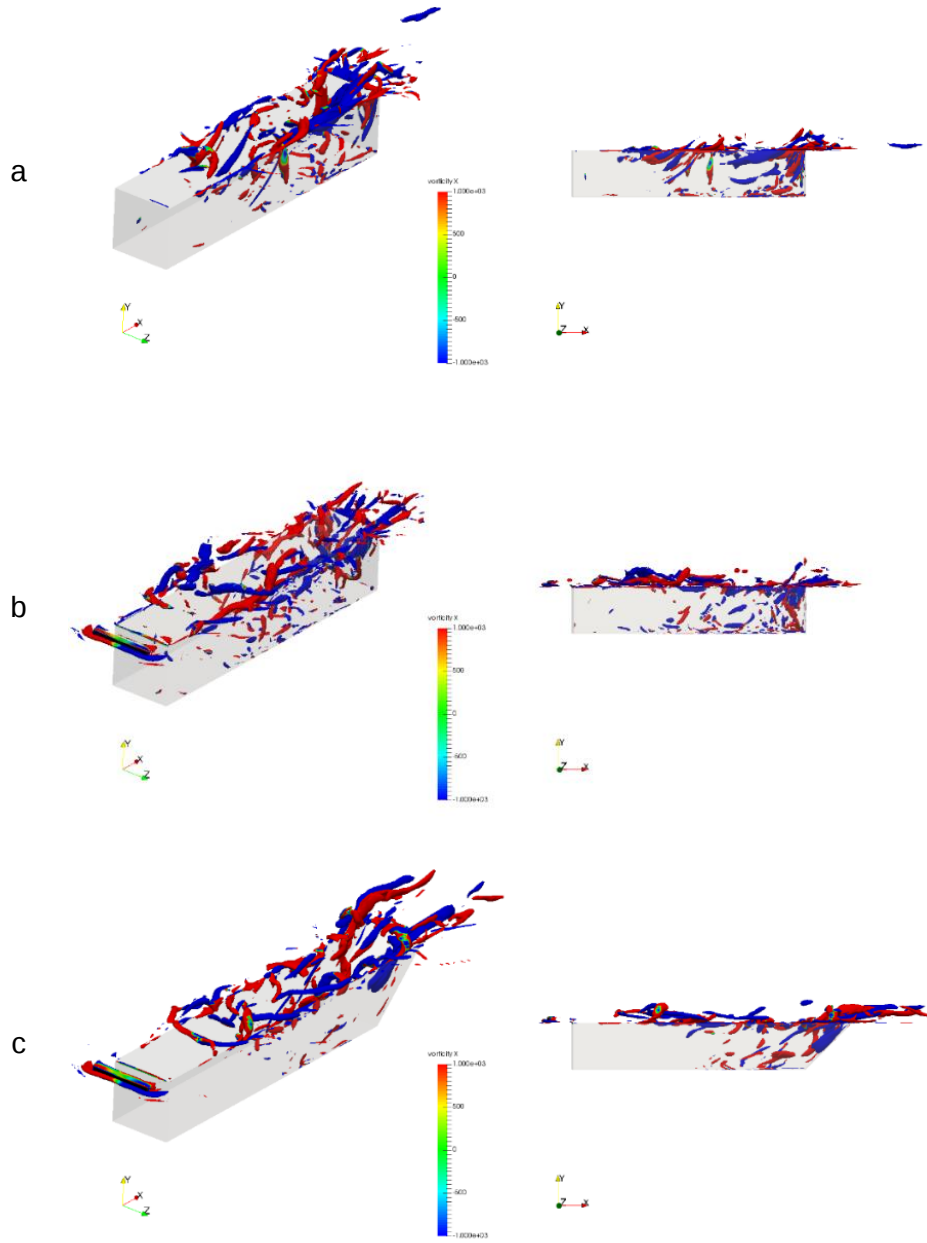
Şekil 7. Uygulanan pasif kontrol yöntemleri için akış konturları: a) M219CC b) PAW1 c) PAW2 d) PAW3 e) PAW4 f) PSP1 g) PSP2 h) PC1 i) PC2.

Son olarak, sayısal çözümler sonucunda akışın türbülanslı ve girdaplı yapısı hakkında bilgi edinilmeye çalışılmıştır. Bu anlamda, akışın girdaplı ve türbülanslı yapısını inceleme amacıyla kullanılan yöntemlerden birisi olan Q-kriteri [Pope, 2001] kullanılmıştır. Şekil 8 ve Şekil 9 ile

gösterilmiş olan sonuçlarda akış yönündeki boylamsal girdap (*ing. x-vorticity*) değerleri kullanılarak eşdeğer Q-kriteri konturları oluşturulmuştur. Eşdeğer konturlar girdap değerleri kullanılarak oluşturulduğu için, kırmızı ve mavi olarak görülen sonuçlar akışın ters yönlerde döndüğünü belirtmektedir. Sonuçlar incelendiğinde temiz kavite içerisinde ve çevresinde irili-ufaklı birçok türbülanslı koherent (*ing. coherent*) yapı olduğu görülebilmektedir. PAW1 konfigürasyonunda ise bu yapıların birçoğunun ortadan kaybolduğu ve kavite içerisindeki türbülanslı yapı sayısında önemli bir azalma olduğu görülmüştür. PAW4 konfigürasyonu incelendiğinde ise M219CC konfigürasyonunda kavitenin orta kısımlarında görülen ufak türbülanslı yapıların kaybolduğu, diğer yapıların ise arka taraflarda ve kavite sonlarında yoğunlaştığı görülmüştür. PSP1 incelendiğinde, akışın spoyler dolayısıyla kaviteye gelmeden parçalanmaya ve dönmeye başladığı görülmüştür. Spoyler etkisiyle büyük türbülanslı yapılar ortadan kalkmış ve ufak yapılara dönüşmüştür. Son olarak PC2 durumunda akış hem kaviteye gelmeden dağılmaya ve parçalanmaya başlamış, hem de türbülanslı yapılarda önemli bir azalma olmuştur.

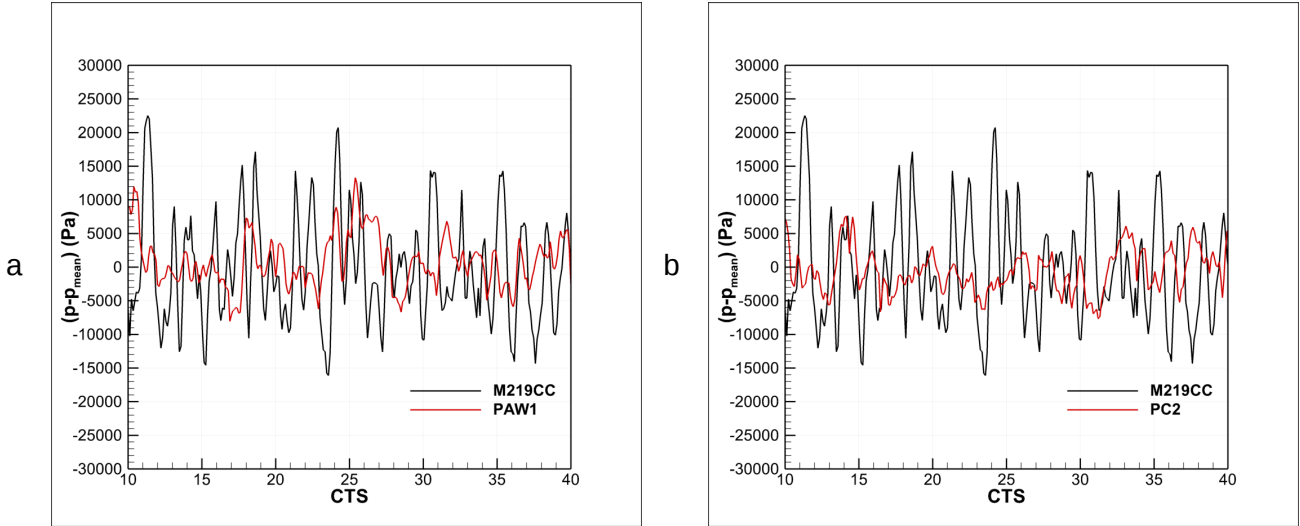


Şekil 8. Q-kriterinin boylamsal girdap değerleri ile boyanmış eşdeğer konturları: a) M219CC b) PAW1 c) PAW4.



Şekil 9. Q-kriterinin boylamsal girdap değerleri ile boyanmış eşdeğer konturları: a) M219CC b) PSP1 c) PC2.

Kavite tabanındaki basınç salınımlarını gözlemleyebilmek adına, arka duvara çok yakın bir noktada, kavite taban duvarındaki ($0.95 x/L$) basınç ölçerlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, pasif kontrol yöntemleri uygulandığı zaman görülen salınımların, temiz kavite (M219CC) durumundaki salınımlara göre önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Bu durum, Şekil 10 aracılığıyla incelenebilir. Sayısal çözümleme süresince elde edilen basınç değerleri incelendiği zaman, PAW1 olarak isimlendirilen pasif kontrol yönteminde, temiz kaviteye göre yaklaşık %50 dolaylarında bir basınç salınımı sönümlemesinin olması dikkat çekmiştir.



Şekil 10. Kavite tabanında basınç salınımları (0.95 x/L): a) M219CC-PAW1 b) M219CC-PC2.

Mevcut çalışma boyunca uygulanan pasif akış kontrol yöntemlerinin ortalama OASPL değerlerine etkileri bir tablo haline getirilmiş ve Tablo 2 aracılığıyla sunulmuştur.

Tablo 2. Uygulanan pasif kontrol yöntemleri için kavite tabanı boyunca elde edilen ortalama OASPL değerleri.

Konfigürasyon	AOASPL (dB)	Gürültü Azaltımı (dB)	Gürültü Azaltımı (%)
M219CC	164.88	--	--
PAW1	155.48	9.4	5.7011
PAW2	160.82	4.06	2.4624
PAW3	158.59	6.29	3.8149
PAW4	160.95	3.93	2.3836
PSP1	158.73	6.15	3.73
PSP2	159.35	5.53	3.354
PC1	156.21	8.67	5.2584
PC2	155.16	9.72	5.8952

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada, açık kavite özelliği gösteren bir kavite üzerindeki transonik akış ve bu akışın gürültüye etkileri, açık kaynak kodlu bir yazılım olan OpenFOAM kullanılarak, Ayırık Burgaç Benzetimi yöntemi ile sayısal olarak incelenmiştir. Uygulanan pasif akış kontrol yöntemleri ile kavite sebebiyle oluşan gürültü azaltılmaya, basınç salınımları sönümlenmeye ve akış alanı daha az kaotik bir hale getirilmeye çalışılmıştır. Özellikle arka duvar uygulamalarının önemli OASPL azalimleri sağladığı görülmüştür. Spoiler ve arka duvar konfigürasyonlarının beraber uygulandığı kontrol yöntemleri ise beklenildiği gibi iki yöntemin ayrı ayrı uygulanılmasından daha efektif olmuş ve yaklaşık %6 civarında gürültü azaltılmasını sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamındaki sayısal analizler Ulusal Yüksek Başarımlı Hesap Merkezi UHeM (<https://www.uhem.itu.edu.tr/>) bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma Türk Havacılık ve Uzay Sanayii (<https://www.tusas.com/>) tarafından, TM-2013 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. Yazar, desteklerinden dolayı yetkililere teşekkür eder.

Kaynaklar

- Krishnamurty, K., 1955. *Acoustic radiation from two-dimensional rectangular cutouts in aerodynamic surfaces*. Technical Report Technical Note 3487, National Advisor Committee For Aeronautics.
- Roshko, A., 1955. *Some Measurements of Flow in a Rectangular Cut-Out*. Technical Report 3488, NACA, California Institute of Technology.
- Rossiter, J. E., 1960. *A Preliminary Investigation into Armament Bay Buffet at Subsonic and Transonic Speeds*. Technical Memorandum 679, Royal Aircraft Establishment, Farnborough, UK.
- Shih, S. H., Hamed, A., ve Yeuan, J., 1994. *Unsteady supersonic cavity flow simulations using coupled k-epsilon and Navier-Stokes equations*. AIAA Journal, 32(10), 2015-2021.
- 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.
- Greenshields, C. J., 2015. *OpenFOAM user guide*. OpenFOAM Foundation Ltd, version, 3(1), 47.
- Menter, F. R., Kuntz, M., ve Langtry, R., 2003. *Ten years of industrial experience with the SST turbulence model*. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 4(1), 625-632.
- Lawson, S. J., ve Barakos, G. N., 2009. *Assessment of Passive Flow Control for Transonic Cavity Flow Using Detached-Eddy Simulation*. Journal of Aircraft, 46(3), 1009-1029.
- Larchevêque, L., Sagaut, P., Lê, T., 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, 265-301.
- Nightingale, D., Ross, J. A., ve Foster, G., 2005. *Cavity Unsteady Pressure Measurements from Wind-Tunnel Tests*. Technical Report, QinetiQ.
- Pope, S. B., 2001. *Turbulent flows*.