

TRANSONİK KAVİTE AKIŞININ AÇIK KAYNAKLI HESAPLAMALI AEROAKUSTİK ANALİZİ

Ali Can FADIL *^{ID}
Baha ZAFER **^{ID}

Alınma: 30.12.2022; düzeltme: 20.06.2023; kabul: 23.06.2023

Öz: Bu çalışmada Mach sayısı 0.85 ve Reynolds sayısı 1.3×10^7 için zamana bağlı 3 boyutlu kavite akışı ve kavite boyunca anlık basınç salınımlarından kaynaklı oluşan gürültü açık kaynaklı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çözücüsü olan OpenFOAM kullanılarak incelenmiştir. Akış alanı modellenmesinin gürültü oluşumuna etkisini gözlemlemek için iki farklı akış alanı modellenmesi yapılmıştır. Akış alanı modelinin etkisine ek olarak duvar bölgesindeki ağ sıklığı ve ağdaki hücrelerin büyüme oranlarının aeroakustik bulgular üzerindeki etkisi incelenmiştir. Üç boyutlu akış alanının zamana bağlı incelemelerinde, Büyük Burgaç Benzetimi (LES) ve Ayrık Burgaç Benzetimi (DES) olmak üzere iki türbülans modeli kullanılmıştır. LES analizlerinde küçük girdap yapılarını çözmek için Smagorinsky ve WALE olmak üzere iki ağ-altı ölçek modeli kullanılmıştır. DES analizlerinde Spalart-Allmaras tabanlı DDES, IDDES ve SST k- ω tabanlı DES olmak üzere üç model kullanılmıştır. Transonik kavite için hesaplanan sayısal sonuçlar deneysel ve nümerik sonuçlarla hem konum hem frekans uzayında akustik sinyal verisi için karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Analizler sonucu elde edilen konum uzayındaki Ortalama Ses Basınç Düzeyi verisi kavite gürültüsüne ait deneysel veri ile benzer davranışı gösterse de 8-10 desibellik bir sapma görülmüştür. Frekans uzayındaki Ses Basınç Düzeyi sonuçlarında ise Rossiter modları belirgin şekilde gözükmemektedir ve hem deneysel hem nümerik çalışmaya yakın sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kavite Akışı, Mühimmat Yuvası, Aeroakustik, Sıkıştırılabilir Akış, Transonik Akış, OpenFOAM

Open-Source Computational Aeroacoustics Analysis of Transonic Cavity Flow

Abstract: In this study, unsteady three dimensional cavity flow and aerodynamically generated noise for Mach number 0.85 and Reynolds number 1.3×10^7 were investigated using OpenFOAM. In order to observe the effect of flow field modeling on noise generation, two flow field modeling were performed. In addition to the effect of the flow field model, the effect of the density of the grid in the wall region and the growth rates of the cells on the aeroacoustics findings were investigated. Two turbulence models were used for unsteady investigations, namely the Large-Eddy Simulation (LES) and the Detached-Eddy Simulation (DES). Two subgrid-scale models, Smagorinsky and Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity, were used to resolve small eddies in LES. Three models, namely Spalart-Allmaras based DDES, IDDES and SST k- ω based DES, were used in DES analyses. Results calculated for the cavity were verified by comparing the reference studies results with the acoustic signal data in both location and frequency space. Although the Overall Sound Pressure Level data obtained as a result of the analyzes showed similar behavior with the experimental data, a deviation of 8-10 decibels was observed. In the Sound Pressure Level results, Rossiter modes are visible and results are compatible with both experimental and numerical studies.

Keywords: Cavity flow, Weapon Bay, Aeroacoustics, Compressible Flow, Transonic Flow, OpenFOAM

* Aerodinamik ve Aeroakustik Mühendisi, Baykar Technologies, 34488, Başakşehir/İstanbul

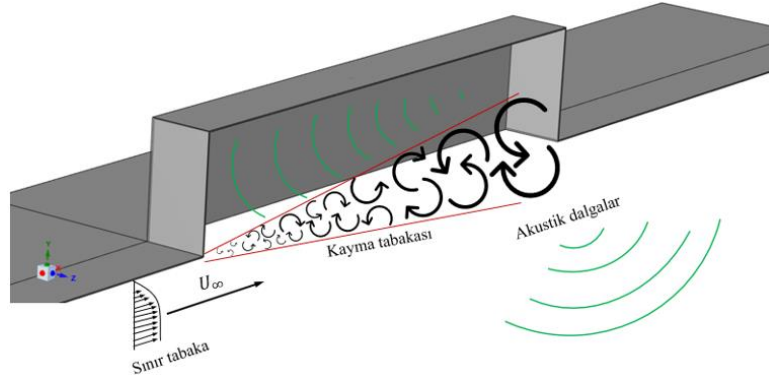
* Uçak Mühendisliği, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak/İstanbul.

** Uçak Mühendisliği, Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 34469, Maslak/İstanbul.

İletişim Yazarı: Ali Can Fadıl (fadil19@itu.edu.tr, alican.fadil@baykartech.com)

1. GİRİŞ

Kavite akışları günümüzde pek çok yerde karşılaşılabilecek bir akış tipidir. Uçakların iniş takımları, otomobillerin açılır tavanları ve kapı oyukları, savaş uçaklarının mühimmat depoları bunlara örnektir. Fakat kavite akışlarının ilgi odağı olmasının esas sebebi kavite üzerindeki akış probleminin savaş uçaklarının silah yuvalarını temsil etmesidir. Bu bağlamda kavite akışları 1940'lı yıllardan günümüze kadar önemli bir çalışma alanı oluşturmuştur. Geometrik olarak modellenmesi görece kolay olan kavite profili akış ve akustik alan arasında bulundurduğu sürekli etkileşim bakımından akış-akustik alan etkileşimi incelemelerinde çalışmaların yoğunlaştığı bir alandır (Cattafesta ve diğerleri., 2008). Ayrıca transonik bölgede akışın doğrusal olmayan karmaşık davranışları ve kritik Mach sayısına bağlı olarak görülebilecek şok, genişleme dalgası gibi yapıların birbiri ile olabilecek etkileşimleri kavite akışları üzerinde bir çok çalışma olmasının sebeplerindendir (Lawson & Barakos, 2011). Günümüz yüksek süratli modern insanlı ve insansız savaş uçaklarında radar izinin mümkün olduğunca azaltılması amacıyla mühimmatlar gövde içerisinde olacak şekilde tasarlanmaktadır (Loupy ve diğerleri., 2017). Savaş uçağı yüksek süratle seyrederken mühimmat bırakımı esnasında silah yuvasının kapakları açılır. Bu esnada kavite akışı meydana gelir. Uçak yüzeyinde gelişen sınır tabaka kavitenin ön kenarına geldiğinde yüzeyden ayrılarak kayma tabakasını oluşturur. Kayma tabakası kavite boyunca ilerleyerek kavite arka duvarı ile etkileşime girerek akustik dalgaları oluşturur. Oluşan akustik dalgalar kaviteden dışarı doğru ve kavite içerisinde ön duvara doğru ilerler. Ön duvar ile etkileşime giren akustik dalgalar, sınır tabakanın ön duvardan ayrılma periyodunu etkiler. Bu durum geri besleme mekanizması olarak adlandırılır. Kavite akışı ve geri besleme mekanizması Şekil 1'de gösterilmiştir. Kavite akışlarında oluşan akustik sinyaller rezonanslı frekans bölgeleri nedeniyle yapısal elemanlar üzerinde büyük yükler oluşturur. Rezonanslı frekans bölgeleri geniş bant gürültüsü ve Rossiter modları olarak adlandırılan dar bant tonlarını içerir. Geniş bant gürültüsü serbest akımın katkısı ile oluşan düşük enerjili gürültüdür. Rossiter modları akış içerisindeki geri besleme mekanizması, şok - vorteks, şok - şok, kayma tabakası - şok gibi etkileşimler tarafından üretilir (Rossiter, 1964).



Şekil 1:

Kavite akışı ve geri besleme mekanizması.

Literatürde kavite akışı ile ilgili pek çok deneysel ve nümerik çalışma mevcuttur. Zafer ve Coşgun tarafından 2018 yılında gerçekleştirilen nümerik çalışmada iki boyutlu kavite akışı DES türbülans modelinin Spalart-Allmaras ve SST $k-\omega$ tabanlı uygulamaları yapılmıştır. Bu çalışmanın hız dağılımı, girdap hız büyüklüğü ve akım çizgileri incelendiğinde SST $k-\omega$ tabanlı DES uygulamasının başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

Zafer ve Konan tarafından 2016 yılında yapılan nümerik çalışmada kavite-kanat etkileşimi ve kavite pasif kontrol metotları $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarında kanat firar kenarı ve kavite arka duvarı bölgesinde yoğun girdap bölgesi

görülmüştür. Kavite ön duvarına eğim verilerek ise akış alanındaki ortalama statik basınç değerinin değişimi incelenmiştir. 2022 yılında yayımlanan bir çalışmada elastik kavite duvarlarının transonik hızlarda gürültü üretimi üzerindeki etkileri M 219 kavitesi için incelenmiştir. Bu çalışmada da kullanılmış olan Spalart-Allmaras tabanlı IDDES ile simüle edilen çalışmada bazı Rossiter modlarının enerjisinin azalması sonucu rezonanslı modların enerjilerini kavite duvarlarına transfer ettiği öne sürülmüştür (Nilsson et al., 2022). Ticari ve açık kaynaklı olmayan (in-house) China Aerodynamics Research & Development Center (CARDC) NNW-Flowstar kodu ile yürütülen bir çalışmada ise M 219 kavite içerisine yerleştirilen jenerik bir mühimmat modeli ile birlikte Spalart-Allmaras tabanlı IDDES türbülans modeli kullanılarak simüle edilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen sayısal bulgulara dayanılarak kullanılan kodun deneysel çalışmalar ile büyük oranda uyum gösterdiği iddia edilmiştir. Buna ek olarak, mühimmatın varlığının kayma tabakasının erken dağılmasına sebep olduğu fakat temiz kaviteye kıyasla gürültü bakımından pek farklılık göstermediği görülmüştür (Zheng et al., 2022). Radar kesit alanını azaltmak amacı ile kullanılan geometri modifikasyonuna sahip bir M 219 kavitenin ticari yazılımlar ile gerçekleştirilen analizinde kavite içerisindeki rezonanslı frekansların bastırılması ve akustik basınç seviyesinin azaltılması amacı ile aktif kontrol metotları kullanılmıştır. Aktif kontrol metodu olarak kavite ön kenarından üfleme uygulanarak sınır tabakanın yörünge ve tutarlılığının değiştirilmesi amaçlanmıştır. Transonik ve süperonik koşullarda gerçekleştirilen çalışmada uygulanan aktif kontrol metodunun akustik gürültü seviyesini azaltmada ve rezonans modlarını bastırmada etkili olduğu görülmüştür (Bacci & Saddington, 2023). Overset çözüm ağı metodu kullanılarak mühimmat ayrılması modellenen bir diğer çalışma ise yine CARDC tarafından geliştirilen ticari ve açık kaynaklı olmayan bir çözücü olan FlowStar ile gerçekleştirilmiştir. SST k- ω tabanlı IDDES türbülans modeli ile gerçekleştirilen çalışmada kavite ön kenarına yerleştirilecek bir aerodinamik saptırıcının (spoiler) sınır tabaka kalınlığına bağlı olarak uzunluğunun mühimmat yörüngesi ve silah yuvası aeroakustiği üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada aerodinamik saptırıcının uzunluğunun artışı ile birlikte olumsuz aeroakustik etkilerde sönümlenme gözlenirken hava aracının sürüklenmesinde azımsanmayacak bir artışa sebep olduğu görülmüştür. Bu nedenle aerodinamik saptırıcı tasarımlarında saptırıcı uzunluğunun titizlikle tespit edilmesinin gerekliliği anlaşılmıştır (Cui et al., 2022). Alman Havacılık ve Uzay Merkezi tarafından transonik akışlar için geliştirilen ticari ve açık kaynaklı olmayan TAU kodu ile gerçekleştirilen bir çalışmada ise DES ve ölçek uyarlamalı simülasyon (scale adaptive simulation) kullanılarak 0.8 Mach koşullarında çalışmalar yürütülmüştür. Kapaklı ve kapaksız durumlar için yürütülen çalışmada DES modelinin Rossiter modlarını yakalamada mükemmel sonuçlar verdiği fakat ölçek uyarlamalı simülasyon modelinin de hesaplama maliyeti açısından çok daha verimli olduğu görülmüştür (Rajkumar et al., 2023).

Son yıllarda açık kaynaklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yazılımı olan OpenFOAM (Greenshields, 2018) ile M 219 kavitenin kapaklı ve kapaksız incelemeleri yapılmıştır ve bu incelemelerde Large - Eddy Simulation (LES) modelinin *kEqn* ve *dynamicKEqn* ağ-altı ölçek (SGS) modelleri ve Detached – Eddy Simulation (DES) türbülans modelinin hem Spalart-Allmaras tabanlı hem SST k- ω tabanlı Delayed Detached – Eddy Simulation (DDES), Improved Delayed Detached – Eddy Simulation (IDDES) uygulamaları ile transonik koşullarda makul düzeyde sonuçlar alınmıştır (Fadıl & Zafer, 2022a, 2022b). Demir ve diğerleri tarafından 2021 yılında yapılan çalışmada M 219 kavite çeşitli pasif kontrol metotları kullanılarak OpenFOAM ile incelenmiştir. Çalışmaları sonucunda boyutsuz duvar uzunluğunun sonuçlar üzerinde önemli bir etkisi olduğunu görmüşlerdir ve kullandıkları pasif kontrol metotları ile 9 dB'e kadar gürültü seviyesini azaltmışlardır. Gelisli ve diğerleri, 2019 yılında gerçekleştirdikleri çalışmada ses üstü kavite akışlarında aktif ve pasif kontrol metotlarının akustik sinyal üzerindeki etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmada pasif kontrol yöntemlerinin basınç dalgalanmalarını sönümlemede daha etkili olduğu fakat aktif kontrol metotlarının ise gerçek uçuş şartlarına daha kolay entegre edilebileceği görülmüştür. İki farklı açık kaynaklı HAD kodu olan SU2 ve OpenFOAM kullanılarak transonik

koşullarda gerçekleştirilen analizlerin sonuçlarının ticari Fluent yazılımı ile kıyaslandığı bir çalışmada ise OpenFOAM ile elde edilen sayısal bulguların Fluent ile çok yakın mertebelerde olduğu, fakat SU2 yazılımının bazı parametrelerde diğerlerinden farklı sonuç verdiği görülmüştür (Guleren et al., 2018). OpenFOAM kullanılarak yürütülen, kavite içerisindeki rezonansı azaltmak amacıyla ile kavite önüne dalgalı bir yüzey tanımlanması ile 0.3 Mach koşullarında gerçekleştirilen bir çalışmada ise dalgalı yüzeyin kavite rezonansını azaltıcı etkide bulunduğu görülmüştür (Abderrahmane et al., 2019). OpenFOAM ile yürütülen bir diğer çalışmada ise kavite önüne yerleştirilen girdap üreteçlerinin kavite gürültüsüne etkisi incelenmiştir (Demir et al., 2018). Açık kaynaklı OpenFOAM yazılımı ile transonik koşullarda M 219 kavite için yürütülen bir diğer çalışmada ise Rossiter modları hem kapaklı hem kapaksız durumlar için başarılı şekilde yakalanmıştır. Buna ek olarak arka duvar bölgesindeki yüksek basınç salınımları iki durum için de gösterilmiştir (Fadıl & Zafer, 2023).

Literatürde bulunan nümerik çalışmalar ticari ve ticari olmayan kodlar ile yürütülmesine bağlı olarak iki kısımda kolaylıkla sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırmaya ek olarak bir alt sınıflandırma ise ticari olmayan kodları açık kaynaklı ve açık kaynaklı olmayan kodlar olarak sınırlandırarak yapılabilir. Bu alt sınıflandırmanın tanımında önemli bir ayırım belirleyicidir: erişilebilirlik. Erişilebilirliğe göre sadece birkaç HAD kodu, barındırdığı türbülans modelleri, akış denklemlerinin ve çözüm ağının ayrıklaştırma teknikleri gibi ayrıntıları incelemek ve arzu edildiğinde düzenlemeler yapmak isteyen herkese tamamı ile açıktır. Dolayısı ile bu çalışmada kullanılmak üzere erişilebilir olması sebebi ile OpenFOAM seçilmiştir. Literatürde M 219 kavitesi hakkında deneysel ve nümerik pek çok çalışma olmasına rağmen açık kaynaklı HAD kodları kullanılarak gerçekleştirilen çalışma sayısı oldukça azdır. Bu bağlamda, bu çalışmada transonik kavite akış çalışmasının açık kaynak kodlu HAD yazılımı kullanılarak doğrulanması amaçlanmıştır. Ayrıca farklı türbülans modelleri ile elde edilen sayısal bulgular karşılaştırılarak büyük akış ayrılması içeren aeroakustik problemler için Türkçe kaynak oluşturması hedeflenmiştir.

2. SAYISAL YAKLAŞIM

Akış alanına ait zamana bağlı korunum denklemlerinin sayısal ayrıklaştırılması açık kaynaklı bir sonlu hacimler çözücüsü olan OpenFOAM ile gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırılabilir akış alanı çözümlerinde hız-basınç bağılıklığı ayrıklaştırmalarında SIMPLE ve PISO algoritmalarının hibrit hali olan PIMPLE kullanılmıştır. Zaman terimi ikinci dereceden (*backward*), gradyen terimi ikinci dereceden (*Gauss linear*), konvektif terim ayrıklaştırmaları ikinci dereceden (*Gauss linearUpwind grad(U)* ve *Gauss linearLimited 1*) ve yayılım terimi ikinci dereceden (*Gauss linear corrected*) metotları ile ayrıklaştırılmıştır. Akış alanına ait korunum denklemleri Eş. (1)'de verilmiştir.

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

Eş. (1)'de gösterilen W akış çözüm vektörünü temsil ederken, F taşınım akı matrisi ve G viskoz akı matrisini, H ise kaynak terimini temsil etmektedir. Bu değişkenler aşağıda sırası ile gösterilmiştir.

$$W = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$F = \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho V u + p i \\ \rho V v + p j \\ \rho V w + p k \\ V(\rho E + p) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xi} \\ \tau_{yi} \\ \tau_{zi} \\ [\tau_{ij} v_j + q] \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ f_x \\ f_y \\ f_z \\ [\rho(f_i v_j \delta_{ij} + q_h)] \end{bmatrix} \quad (5)$$

Yukarıdaki eşitliklerde görülen ρ akışkanın yoğunluğu, V kontravariant hız vektörünün tanımı $V = \vec{v} \cdot \vec{n}$ 'dir ve burada \vec{n} yüzey normalidir. E enerji, p basınç, τ_{ij} viskoz kayma gerilmesi tensörü ve q ısı akısıdır. Kaynak teriminde yer alan f_i terimi hacme etkiyen yer çekimi gibi kuvvetleri ve q_h hacim içerisindeki zamana bağlı ısı üretimini temsil etmektedir.

Bu çalışmada SST k- ω tabanlı DES ve Spalart-Allmaras tabanlı DDES, IDDES ve LES türbülans uygulamaları gerçekleştirilmiştir. DES uygulamalarında sınır tabakanın dışında kalan bölgeler LES ile çözülürken sınır tabaka içerisi Zamana Bağlı Reynolds-Ortalama Navier-Stokes (URANS) modeli ile çözülürken (Spalart ve diğerleri., 1997). LES modelinin hesaplama maliyetinin fazlalığından kaçınılmak istendiği durumlarda LES-URANS modellerinin hibrit hali olan DES türbülans modelleri sıklıkla kullanılmaktadır. LES çözümleri korunum denklemlerinin filtrelenmesi ile elde edilir (Leonard, 1975). Filtre edilmiş değişkenler Eş. (6)'daki gibi tanımlanır:

$$\bar{\phi}(x) = \int_D \bar{\phi}(x') G(x, x') dx \quad (6)$$

Eş. (6)'da D akış alanını temsil ederken G çözülmüş büyük girdapların ölçeğini belirleyen filtre fonksiyonudur. Bu aşamadan sonra değişkenler filtrelenmiş ve filtrelenmemiş olarak iki grupta incelenecektir.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (7)$$

Eş. (7)'de $\bar{\phi}$ filtrelenmiş değişkenler akış içerisindeki yeterince büyük ölçekli olan ve LES ile çözülebilen akışkan hareketlerini temsil etmektedir. ϕ' ile gösterilen filtrelenmemiş kısım ise küçük ölçekli akış hareketlerini temsil etmektedir ve SGS ile modellenmektedir. Diferansiyel formda Navier-Stokes denklemleri filtrelenmiş şekilde aşağıda verilmiştir.

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\sigma}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho} c_v \bar{T})}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{\rho} c_v \bar{T} \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{q}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial Q_i}{\partial x_j} - p \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \sigma_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (10)$$

Eş. (9)'da τ_{ij} SGS kayma gerilmesini temsil etmektedir ve Eş. (11)'deki gibi tanımlanır.

$$\tau_{ij} = \bar{\rho}(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j) \quad (11)$$

Yürütülen analizlerde kullanılan Smagorinsky SGS modeli Smagorinsky tarafından 1960'lı yıllarda geliştirilmiştir. Bu model SGS kayma gerilmesi ile çözülmüş kısımdaki gerinim oranı tensörü (strain rate tensor) arasında doğrusal bir ilişki olduğunu varsayan girdap viskozitesi varsayımına dayanır ve Eş. (12)'de verilen ağ-altı ölçek viskozitesi Smagorinsky modeli için Eş. (13)'deki gibi hesaplanır (Smagorinsky, 1963).

$$v_{sgs} = C_k \Delta \sqrt{k_{sgs}} \quad (12)$$

$$v_{sgs} = C_k \sqrt{\frac{C_k}{C_\varepsilon} \Delta^2} \left| \tau_{ij} + C_\varepsilon \frac{k_{sgs}^{1.5}}{\Delta} \right| \quad (13)$$

Eş. (13)'te görülen C_k ve C_ε terimleri dinamik olarak belirlenen model sabitleri, k_{sgs} ise ağ-altı ölçekte kinetik enerjiyi temsil etmektedir. Δ ağ-altı uzunluk ölçeğidir. Bu çalışmada yürütülen analizlerde Δ değeri hesaplanırken *vanDriest*, *cubeRootVol*, *IDDESDelta* metotları kullanılmıştır. Kullanılan bir diğer SGS modeli olan WALE'de ise ağ-altı ölçek viskozite değeri (Eş. (17)) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k_{sgs} = \left(\frac{C_w \Delta}{C_k} \right)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (14)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (15)$$

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_k \partial \bar{u}_j}{\partial x_i \partial x_k} + \frac{\partial \bar{u}_k \partial \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_k} \right) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_k \partial \bar{u}_l}{\partial x_l \partial x_k} \quad (16)$$

$$v_{sgs} = (C_\omega \Delta)^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (17)$$

Hesaplamalarda kullanılan SST k- ω tabanlı DES türbülans modeli için transport denklemleri Eş. (18) ve Eş. (19)'da verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (18)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega \quad (19)$$

Eş. (18)'de G_k türbülans kinetik enerji üretimini, Y_k türbülans kinetik enerji yitimini, S_k ise kaynak terimini, Γ_k türbülans kinetik enerji yayılımını temsil etmektedir. Benzer şekilde Eş. (19)'da G_ω türbülans yitim oranı oluşumunu, Y_ω türbülans yitim oranındaki yitimi, S_ω kaynak terimini, D_ω ters yitimi, Γ_ω türbülans yitim oranı yayılımını temsil etmektedir. URANS modelleri için Y_k terimi Eş. (20)'deki gibi tanımlanır.

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega f_{\beta^*} \quad (20)$$

Eş. (20)'de f_{β^*} ile gösterilen bölümlü fonksiyonun değeri 1'dir. DES modelinde bu terim değiştirilerek Eş. (21)'deki gibi kullanılır.

$$Y_k = \rho \beta^* k \omega f_{DES} \quad (21)$$

Eş. (21)'de gösterilen f_{DES} terimi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$f_{DES} = \max\left(\frac{L_t}{C_{DES}\Delta_{max}}, 1\right) \quad (22)$$

Eş. (22)'de C_{DES} kalibrasyon sabiti olup değeri 0.61'dir. Δ_{max} sayısal ağ arasındaki en büyük mesafedir. L_t ise türbülans uzunluk ölçeğini temsil etmekte olup aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$L_t = \frac{\sqrt{k}}{\beta^*\omega} \quad (23)$$

DES modeli için kullanılan diğer URANS modeli olan Spalart-Allmaras'a ait türbülans viskozitesi için tek denklemlerli transport denklemi Eş. (24)'de verilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\tilde{v}u_j) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu + \rho\tilde{v})\frac{\partial\tilde{v}}{\partial x_j}\right\} + C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\tilde{v}}{\partial x_j}\right)^2\right] - Y_v + S_{\tilde{v}} \quad (24)$$

Eş. (24)'de görülen G_v terimi türbülans kinetik enerji oluşumunu, Y_v SGS bölgesinde oluşan türbülans viskozitesinin yayılımını, $S_{\tilde{v}}$ kaynak terimini temsil ederken $\sigma_{\tilde{v}}$ ve C_{b2} sabitlerdir. DES modellerinde özellikle yapısal olmayan hücrelerden oluşan akış alanlarında URANS - LES geçişlerinde oluşabilen bir takım problemler görülebilmektedir (Spalart ve diğerleri., 2006). Oluşabilecek problemlerin önüne geçme amacı ile Spalart ve diğerleri tarafından 2006 yılında DDES modeli önerilmiştir. DDES modeli Eş. (25)'de gösterilen formülasyonu kullanır.

$$r_d = \frac{\nu_t + \nu}{\sqrt{U_{i,j}U_{i,j}\kappa^2 d^2}} \quad (25)$$

Eş. (25)'de görülen ν_t kinematik türbülans viskozitesini, ν kinematik viskozite, $U_{i,j}$ hız gradyanlarını, κ karman sabitini ve d duvara olan mesafeyi temsil etmektedir. r_d sınır tabaka içerisinde logaritmik bölgede iken 1 değerine eşitken sınır tabaka kenarına yaklaştıkça 0 değerine yaklaşır.

$$f_d = 1 - \tanh[(8r_d)^3] \quad (26)$$

Eş. (26)'da f_d geciktirme fonksiyonunu temsil etmektedir. r_d 'nin sınır tabaka kenarında 0 değerini almasından kaynaklı olarak bu noktadan itibaren f_d 1 değerini alır. Bu değerin 1 olması URANS – LES geçişine olanak sağlar. 1997 yılında Spalart ve diğerleri tarafından önerilen DES modelinde uzunluk skalası Eş. (27)'deki gibi ifade edilirken DDES modelinde Eş. (28)'deki gibi ifade edilir.

$$\tilde{d}_{DES} = \min(d, C_{des}\Delta_{max}) \quad (27)$$

$$\tilde{d}_{DDES} = d - f_d \max(0, d - C_{des}\Delta_{max}) \quad (28)$$

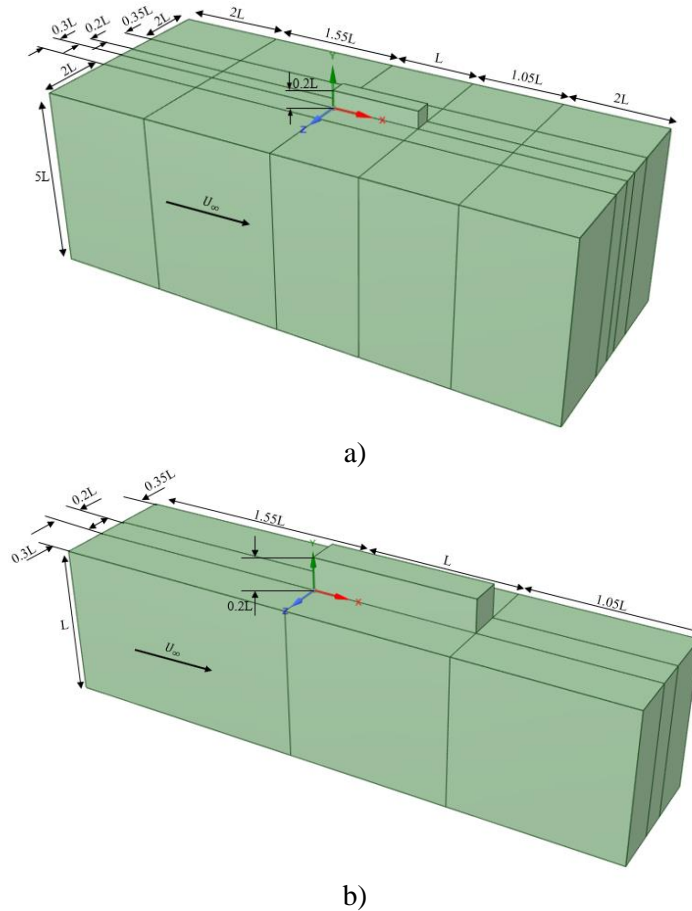
Sınır tabaka içerisinde, yani f_d 'nin 0 olduğu yerlerde, Eş. (28) URANS modellerde olduğu $\tilde{d} = d$ haline gelir. Geri kalan bölgede, yani f_d 'nin 1 olduğu yerlerde, Eş. (28) geçerli olur. Bu durum sınır tabaka içerisinde URANS, sınır tabakanın dışının ise LES ile çözüldüğünü garanti eder (Spalart ve diğerleri., 2006). Bu çalışmada Shur ve diğerleri tarafından 2008 yılında önerilen, yüksek Reynolds sayılarında ve oldukça türbülanslı akışlarda güçlü ve tutarlı sonuçlar sunabileceği iddia edilen IDDES modeli kullanılmıştır. Bu model DDES ile Duvar-Modelli LES (WMLES) modellerinin hibrit halidir ve DDES modelinde olduğu gibi uzunluk skalasının değiştirilmesi yaklaşımı ile çalışır.

$$\tilde{d}_{WMLES} = f_B(1 + f_e)d - (1 - f_B)C_{des}\Delta_{max}f_d = 1 - \tanh[(8r_d)^3] \quad (29)$$

Eş. (29)'da f_B LES modunda 0 değerine eşitken URANS modunda 1 değerine eşittir (Shur ve diğerleri., 2008).

2.1. HESAPLAMA ALANI

Bu çalışmada uzunluk-derinlik oranı 5 olan ve literatürde M219 olarak bilinen üç boyutlu kavite geometrisi analiz edilmiştir. Sayısal çözümlerde kullanılan iki farklı akış alanı Şekil 2’de gösterilmiştir. Kavitenin uzunluğu $L=0.508$ metredir. Akış alanına ait diğer uzunluklar kavite uzunluğu referans alınarak Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2a’da gösterilen hesaplama alanı referans alınan sayısal çalışmaya uygun şekilde hazırlanmıştır (Lawson & Barakos, 2010). Şekil 2a’da hesaplama alanlarında kavite ön kenarından $3.55L$ kadar önce başlarken, $4.05L$ kadar sonra sona ermektedir. Ayrıca akış alanı, akış doğrultusuna dik mesafede $5L$ mesafeye kadar gitmektedir. Sayısal çalışmalarda akış alanları, tanımlanan sınır koşullarına bağlı olarak birikecek hata birikimini azaltma amacı ile yeterince büyük seçilir. Şekil 2a’da gösterilen akış alanı ile yapılan çözümlerde akış alanının dış kısmında bulunan $2L$ uzunluğundaki alanlara *kayma* sınır koşulu tanımlanmıştır. Akış alanının büyüklüğünün ve *kayma* sınır koşulu tanımlanan bölgelerin etkisini gözlemlemek için akış alanı küçültülerek Şekil 2b’de gösterilen akış alanı oluşturulmuştur. Hesaplama maliyetini azaltmak için akış alanı kavite genişliğinin yarı mesafesinden ikiye bölünmüştür. Bölme işleminin gerçekleştiği yüzeye *simetri* sınır koşulu tanımlanmıştır. Kavite ve kaviteyi çevreleyen 8 yüzeye *kaymama*, yan ve alt yüzeylere ise *uzak-alan* sınır koşulu tanımlanmıştır. Akışın girdiği yüzeylere *giriş* çıktığı yüzeylere de *çıkış* sınır koşulu verilmiştir.



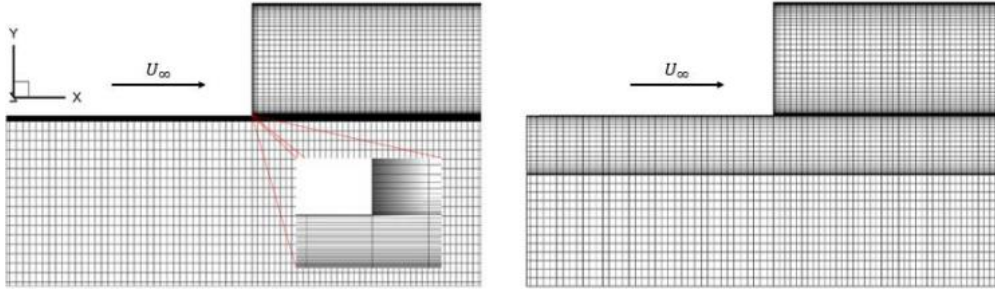
Şekil 2:

Analizlerde kullanılan hesaplama alanları: (a) Q ağ yapısı için kullanılan akış alanı, (b) S ve K ağ yapıları için kullanılan akış alanı.

Yürütülen analizlerde üç farklı ağ yapısı kullanılmıştır. Kullanılan ilk ağ yapısı (Q) referans alınan sayısal çalışma göz önüne alınarak oluşturulmuştur (Lawson & Barakos, 2010). Ağdan bağımsızlığı referans çalışmada elde edilen sayısal bulgular ile gösterilmiş olan bu çözüm ağında kavite içerisinde akış doğrultusu normalinde 160 hücre bulunurken boyutsuz duvar mesafesinin (y^+) bağlı olduğu bir parametre olan ilk hücre yüksekliği ise $10^{-4}L$ 'dir. Ortadan ikiye bölünmüş kavitenin geri kalan 0.1L'lik enine uzunluğuna ise eşit aralıklı 40 hücre tanımlanmıştır. Kavite içerisine kavite uzunluğu boyunca 540 hücre tanımlanmıştır. Bu şekilde kavite içerisinde yaklaşık olarak 3,5 milyon hücre bulunmaktadır. Kavite ön kenarından uzanan 1.55L uzunluğundaki yüzeye akış doğrultusunda 3120 hücre tanımlanmıştır. Akış doğrultusuna normal yönde 0.01L kadar mesafeye ise 40 hücre tanımlanmıştır. 40 hücreden oluşan ilk katmanın üstünden itibaren *uzak-alan* kısmına kadar olan bölgeye de 40 hücre tanımlanmıştır. Kavite arka kenarından itibaren 1.05L'lik kısım için 120 hücre, en dış kısımlarda bulunan 2L'lik kısımlara ise 20'şer hücre tanımlanmıştır. Bu şekilde Şekil 2a için oluşturulan ağ yapısı toplamda 33 milyon hücre içermektedir. Bu sayısal ağın kalite ölçütleri en büyük en/boy oranı değeri 500, en büyük çarpıklık 9.8×10^{-9} ve en büyük dik olmama değeri 9.5×10^{-5} 'tir. Mevcut hali ile hesaplama maliyetinin oldukça yüksek olmasından dolayı referans çalışmada kullanılan ağ yapısına sadık kalınarak hücre sayısında daha fazla artışa gidilmemiştir. Kullanılan ikinci ağ yapısı (S) ise Şekil 2a'daki akış alanında bulunan *kayma* sınır koşuluna sahip bölgelerin çıkarılması ile elde edilmiştir ve *kayma* bölgeleri haricinde kalan kısım yine referans çalışma göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Yani Şekil 2b'de gösterilen akış alanı referans çalışmada anlatıldığı gibi ayrıklaştırılmıştır (Lawson & Barakos, 2010). S ile temsil edilen sayısal ağda ise kalite ölçütleri en büyük en/boy oranı değeri 256, en büyük çarpıklık 1.9×10^{-9} ve en büyük dik olmama değeri 2.2×10^{-5} 'tir. Analizlerde kullanılan diğer ağ yapısında (K) kavite içerisinde akışa normal doğrultuda 120 hücre bulunurken ilk hücre yüksekliği referans çalışmada olduğu gibi $10^{-4}L$ 'dir. 0.1L'lik genişliğe ise eşit aralıklı 30 hücre tanımlanmıştır. Kavite içerisine kavite uzunluğu boyunca 400 hücre tanımlanmıştır. Bu şekilde kavite içerisinde yaklaşık olarak 1,5 milyon hücre bulunmaktadır. Kavite ön kenarından uzanan 1.55L uzunluğundaki yüzeye akış doğrultusunda yaklaşık olarak 2300 hücre tanımlanmıştır ve böylece toplamda yaklaşık olarak 20 milyon hücreden oluşan çözüm ağı oluşturulmuştur. Kullanılan ilk iki ağ yapısında akış doğrultusuna normal yönde 0.01L kadar mesafeye 40 hücre tanımlanmıştır. Üçüncü ağ yapısında bu mesafe 10 kat artırılarak hücre sayısı da 10 azaltılmıştır. 30 hücreden oluşan ilk katmanın üstünden itibaren *uzak-alan* kısmına kadar olan bölgeye de 30 hücre tanımlanmıştır. Kavite arka kenarından itibaren 1.05L'lik kısım için 90 hücre tanımlanmıştır ve böylece toplamda yaklaşık olarak 12 milyon hücreden oluşan çözüm ağı oluşturulmuştur. K ile temsil edilen sayısal ağda ise kalite ölçütleri en büyük en/boy oranı değeri 116, en büyük çarpıklık 2.6×10^{-12} ve en büyük dik olmama değeri 0'dır. Üç ağ yapısı için belirtilen kalite ölçütü değerleri OpenFOAM çözücüsü için çok yüksek kalitededir. Kavite civarındaki ağ yapısındaki farklılıklar Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu çalışma toplamda 20 adet 2 soketli AMD EPYC 7352 24-Core Processor tip işlemciden oluşan yüksek performanslı sunucuda gerçekleştirilmiştir. Analizlerde paralel çalıştırılan çekirdek sayısı ve çözüm süreleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Paralel hesaplama detayları.

	Çekirdek Sayısı	Analiz Süresi (Gün)
Q1 - WALE	144	2.6
S1 - DDES	96	2.9
S1 - SST k- ω	96	1.9
K1 - IDDES	96	1.1
K1 - Smagorinsky	96	0.8



Şekil 3:
Kavite civarında ağ yapısındaki farklılıklar.

Bu çalışmada gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar Lawson ve Barakos tarafından 2010 yılında yapılan sayısal çalışma ve Nightingale ve diğerleri tarafından 2005 yılında yapılan deneysel çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda açık kaynak kodlu OpenFOAM’da yürütülen analizlerde kullanılan başlangıç koşulları bu çalışmalar referans alınarak belirlenmiştir. Başlangıç koşulları Tablo 2’de sunulmuştur. Gerçekleştirilen analizlere ait ağ yapısı, türbülans modeli ve notasyon bilgileri Tablo 3’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Başlangıç koşulları.

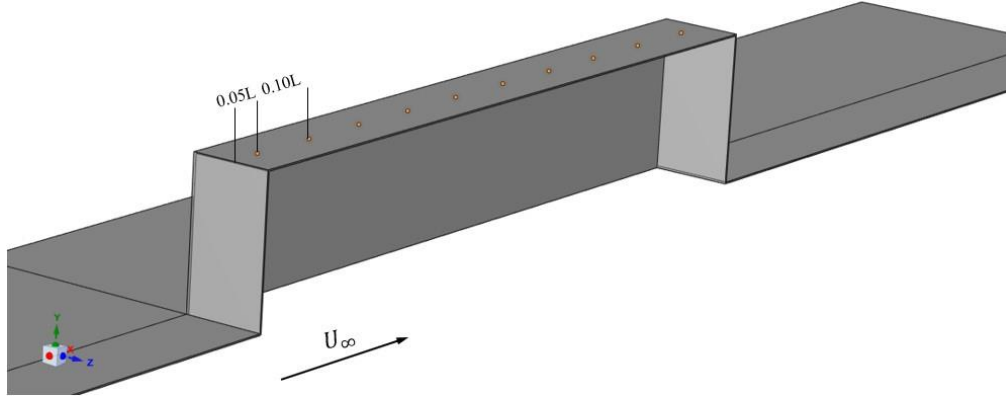
Değişkenler	Değerler
Akışkan	Hava
Ma_∞	0,85
Re_L	$1,3 \times 10^7$
U_∞ (m/s)	278,19
P_∞ (Pa)	101325
T_∞ (K)	305

Tablo 3. Analizlere ait model ve notasyon bilgileri.

Ağ	Türbülans modeli	Notasyon
Q	LES – WALE	Q1 - WALE
S	DES – DDES	S1 - DDES
S	DES - SST k- ω	S1 - SST k- ω
K	DES - IDDES	K1 - IDDES
K	LES - Smagorinsky	K1 - Smagorinsky

2.2. AEROAKUSTİK BULGULAR

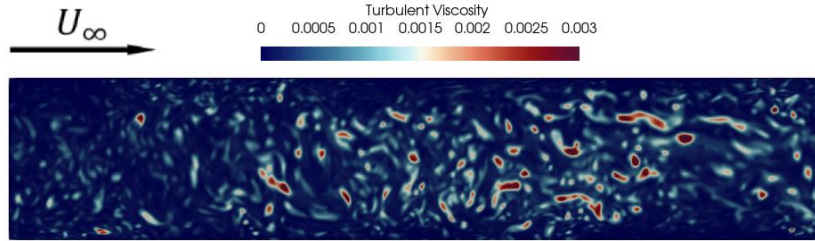
Çalışmanın bu bölümünde 3 boyutlu transonik kavite için yürütülen analizlerden elde edilen Ortalama Ses Basınç Seviyesi (OASPL) ve Ses Basınç Seviyesi (SPL) sonuçları verilmiştir. Transonik bölgede akışın doğrusal olmayan davranışları ve yüksek yoğunluklu türbülanslı yapıları DES ve LES türbülans modelleri kullanılarak çözümlenmiştir. Kavite tavanına tanımlanan Kulite transdüserler ile her zaman adımında her transdüser için basınç verisi kaydedilmiştir. Kulite transdüserlerin konumları Şekil 4’te gösterilmiştir.



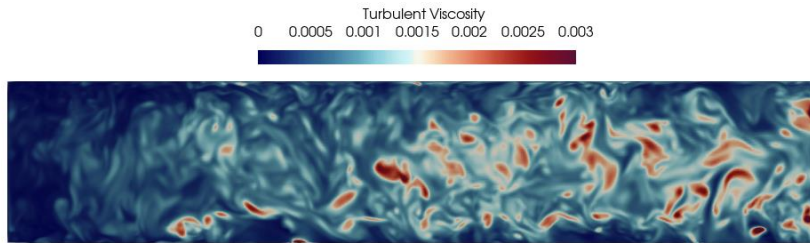
Şekil 4:

Kavite tavanına tanımlanan kulite transdüserlerin konumları.

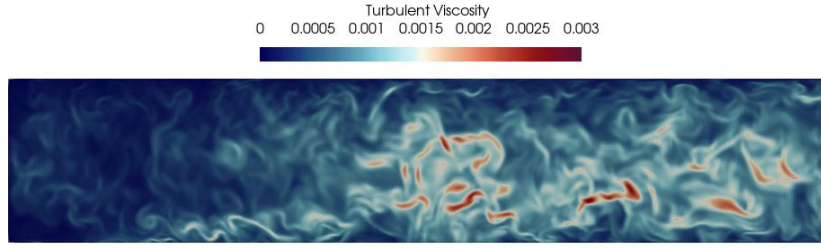
Analiz boyunca maksimum CFL sayısının 1 değerini aşmaması için zaman adımı en küçük hücre boyutunun serbest akış hızına oranlanması ile belirlenmiş olup bu değer yaklaşık olarak 1.7×10^{-3} saniyedir. Akışkanın kaviteyi toplamda 1000 zaman adımında kat etmesi için zaman adımı boyutu 1.7×10^{-6} olarak belirlenmiştir. Analizler bir akışkan partikülünün analiz edilen kaviteyi kat etmesi için gereken sürenin 35 katı kadar bir süre için gerçekleştirilmiştir. Sonuçların yanıltıcı olmasını engellemek için akış alanın kararlı duruma geldiği zaman adımına kadar kaydedilen veri sinyal hesaplamalarında kullanılmamıştır. Kullanılan basınç verisi referans çalışmalar ile uyumlu olarak örnekleme frekansı 6 kHz olacak şekilde bir kod yardımı ile okutulmuştur. Basınç verisinin aritmetik ortalaması kullanılarak basınç verisi normalleştirilmiştir. Normalleştirilmiş basınç verisi kullanılarak karekök ortalama değeri hesaplanmıştır. Karekök ortalama değeri kullanılarak kavite boyunca ses basınç seviyesi değişimini gözlemlemeye yarayan OASPL değerleri hesaplanmıştır.



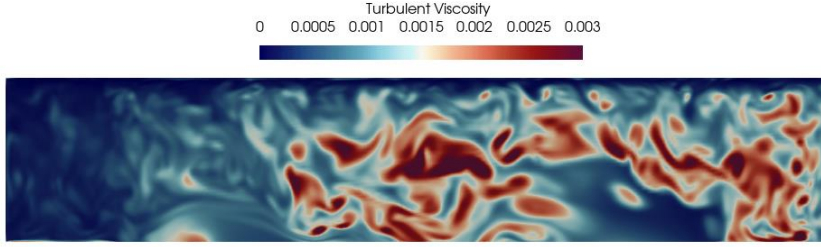
a) Q1-WALE



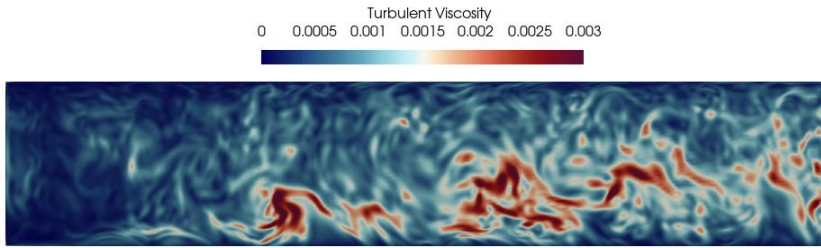
b) S1-DDES



c) S1-SST $k-\omega$



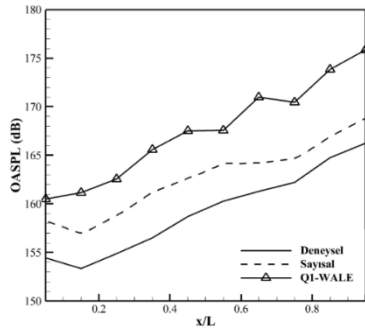
d) K1-IDDES



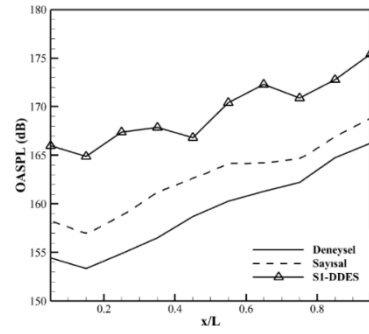
e) K1-Smagorinsky

Şekil 5:

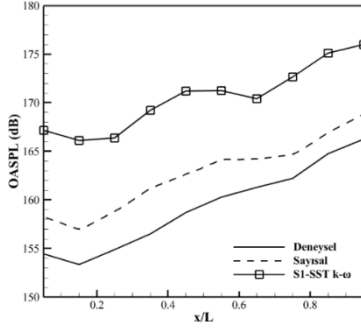
XY düzleminde kulite transdüörlerinin hizasından alınmış türbülans viskozite görüntüleri.



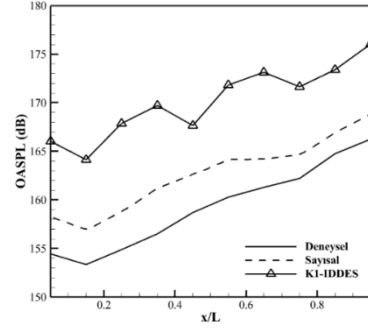
a) Q1-WALE



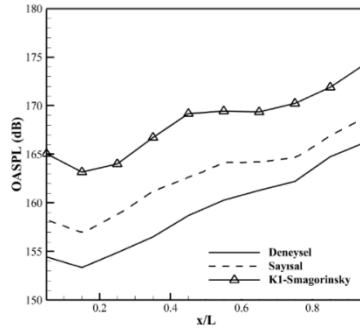
b) S1-DDES



c) S1- SST k- ω



d) K1-IDDES



e) K1-Smagorinsky

Şekil 6:

Farklı durumlar için kıyaslamalı OASPL sonuçları.

$$p' = p_i - \bar{p} \quad (30)$$

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N p_i \quad (31)$$

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (p')^2} \quad (32)$$

$$OASPL = 20 \text{LOG}_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref}} \right) \quad (33)$$

Eş. (31) ve Eş. (32)'de görülen N değeri sonuçların hesaplanmasında kullanılan veri sayısını ifade etmektedir. Eş. (33)'de görülen p_{ref} insan kulağının algılayabileceği en küçük basınç değerini ifade etmektedir ve değeri 2×10^{-5} Pa'dır (Vanco & Pierce, 1998). Analizler sonucunda elde edilen OASPL sonuçları Şekil 6'da referans çalışmalar ile kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Şekil 5'te Kulite transdüserlerinin bulunduğu eksen üzerinden alınmış olan kavite içerisindeki türbülans viskozitesi dağılımının gösteren verilmiştir. Aynı aralık içerisinde sınırlanan görseller incelendiğinde Q1-WALE durumunun diğer durumlara kıyasla çok daha küçük skalalardaki türbülans viskozitesini çözümlendiği görülmektedir. S durumları türbülans viskozitesini çözümlenme açısından kendi içinde değerlendirildiğinde iki denklemli bir tabanı olan S1-SST k- ω durumunun bir denklem tabanlı S1-DDES durumundan daha başarılı olduğu

görülmektedir. Benzer bir durum K durumları için de geçerlidir. LES modeli kullanılarak çözümlenen K1-Smagorinsky durumunun hibrit bir model olan K1-IDDES'e kıyasla akış alanı içerisindeki türbülans viskozitesini çözümlenmede daha başarılı olduğu görülmektedir. Şekil 6'da verilen sonuçlar değerlendirildiğinde kavite arka duvar bölgesinde yüksek basınç bölgelerinin oluştuğu görülmektedir. Referans alınan sayısal ve deneysel çalışmaya en yakın sonuçlar Q1-WALE durumu ile elde edilmiştir. DES türbülans modeli kullanılan durumlar kendi arasında kıyaslandığında grafik eğrisinin davranışı bakımından referans çalışmalara en çok benzeyen sonuç S1-SST k- ω durumu ile elde edilmişken desibel (dB) bakımından S1-DDES ve K1-IDDES durumları ile elde edilen sonuçlar referans çalışmalara daha yakındır.

Açık kavitelerde karakteristik bir özellik olarak gürültü spektrumu geniş bant gürültüsü ve Rossiter modları olarak adlandırılan dar bant tonları içerir (Lawson & Barakos, 2011). Rezonanslı frekansları gösteren Rossiter modları Rossiter tarafından 1960'lı yıllarda yapılan deneyler neticesinde önerilen ve Eş. (34)'te gösterilen ampirik bağıntı yardımı ile hesaplanır.

$$f_m = \frac{U_\infty}{L} \frac{(m - \alpha)}{\left[\left(\frac{1}{\kappa_v}\right) + M_\infty\right]} \quad (34)$$

$$\alpha = 0.062 \left(\frac{L}{D}\right) \quad (35)$$

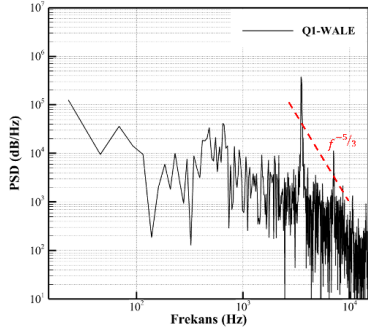
Eş. (34)'te U_∞ serbest akım hızını temsil ederken M_∞ serbest akım Mach sayıdır. κ_v kayma tabakası ile serbest akım arasındaki ilişkiye dayanan bir sabittir ve değeri 0.57'dir. f_m incelenen Rossiter modunu temsil etmektedir. α kavitenin boy-en (L/D) oranına bağlı olan ampirik bir sabittir ve Eş. (35) ile belirlenir. Rossiter tarafından önerilen bu yaklaşım 0.4 ile 1.4 Mach arasında yapılmış olan deneysel çalışmalara dayanmaktadır ve bu Mach aralığının dışında tahminlerin doğruluğu azalmaktadır. Bu durumun önüne geçmek için Rossiter'in yaklaşımının geliştirilmiş versiyonu Heller ve diğerleri tarafından 1971 yılında önerilmiştir. Geliştirilmiş Rossiter bağıntısı Eş. (36)'da verilmiştir.

$$f_m = \frac{U_\infty}{L} \frac{m - \alpha}{\frac{M_\infty}{\sqrt{1 + \frac{(\gamma - 1)}{2} M_\infty^2}} + \frac{1}{\kappa_v}} \quad (36)$$

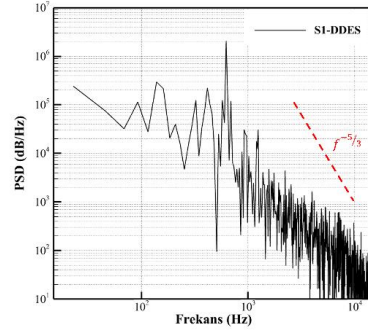
Eş. (36)'da γ hava için özgül ısılar oranını temsil etmektedir. Bu çalışmada gürültü spektrum değerleri $x/L=0.95$ konumunda bulunan kulite transdüseri tarafından kaydedilen basınç değerleri için Eş. (37) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$SPL(f) = 10 \log \left[\frac{PSD(f) \Delta f_{ref}}{p_{ref}^2} \right] \quad (37)$$

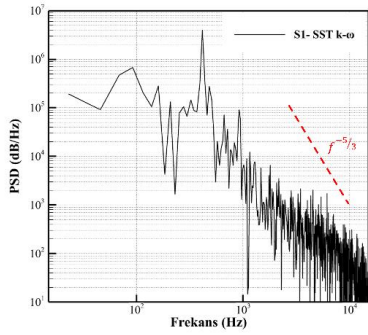
Eş. (37)'de Δf_{ref} referans frekans değeri olup genellikle değeri 1'dir (Vanco & Pierce, 1998). $x/L=0.95$ konumundaki Kulite transdüseri tarafından kaydedilen basınç verisi Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) uygulanarak bir sinyalin frekans uzayında güç içeriğini belirten Güç Spektral Yoğunluğu (PSD) değerleri hesaplanmıştır (Avallone & Baumeister, 1996). FFT uygulaması gerçekleştirilirken spektral sızıntıyı azaltmak amacı ile literatürdeki gürültü ölçümü çalışmalarında sıklıkla tercih edilen Hanning pencere metodu %50 üst üste gelme (overlap) ile uygulanmıştır.



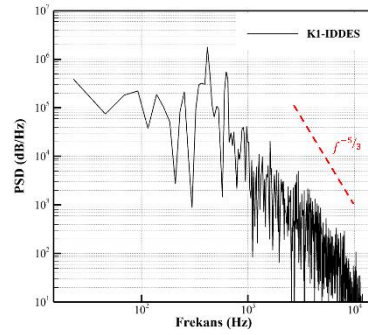
a) Q1-WALE



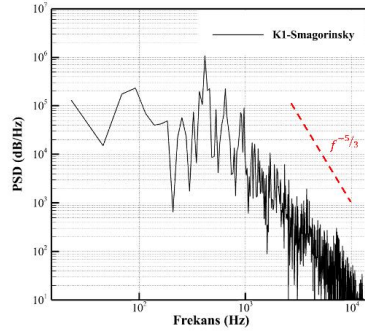
b) S1-DDES



c) S1-SST k- ω



d) K1-IDDES



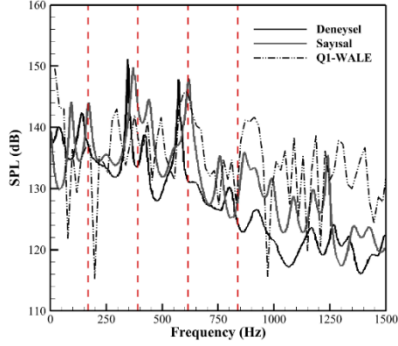
e) K1-Smagorinsky

Şekil 7:

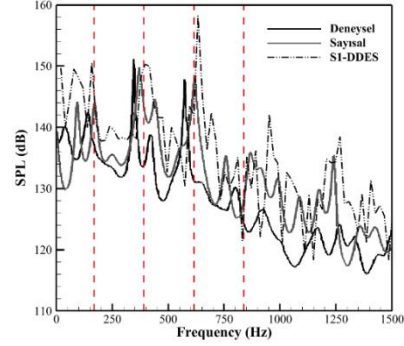
Farklı durumlar için PSD sonuçları.

Şekil 7’de logaritmik skalada verilen PSD sonuçları incelendiğinde akış alanı içerisindeki türbülansın başarılı şekilde çözümlendiği anlaşılmaktadır. Bu da yürütülen analizlerde kullanılan çözüm ağlarının LES tabanlı modeller için yeterli olduğunu göstermektedir. Hesaplanan PSD değerleri Eş. (37)’de yerine konularak SPL değerleri elde edilmiştir. Analizler sonucunda elde edilen SPL sonuçları kıyaslamalı olarak Şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8’de gösterilen SPL sonuçları değerlendirildiğinde OASPL sonuçlarından farklı olarak Q1-WALE analizinden elde edilen sonuç diğer sonuçlara kıyasla referans çalışmalardan daha uzaktadır. 1. Rossiter modunun beklendiği frekans bölgesinde pik noktası gözükmemektedir. 2. pik noktasının beklendiği yerde ise pik noktası dB bakımından düşük seviyededir. S1-DDES çalışmasında elde edilen sonuçlarda 4 pik noktası da belirgin şekilde görülmektedir. Fakat 3. pik noktası SPL bakımından referans

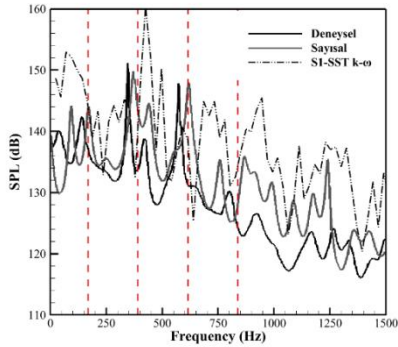
çalışmalardan yüksek seviyededir. 4. pik noktası ise referans alınan çalışmalarda olduğu gibi daha yüksek frekans bölgesinde tahmin edilmiştir.



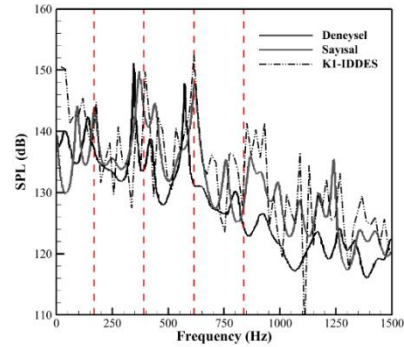
a) Q1-WALE



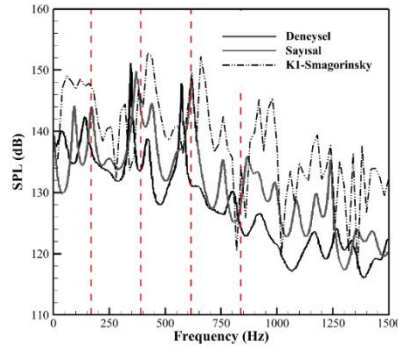
b) S1-DDES



c) S1- SST $k-\omega$



d) K1-IDDES



e) K1-Smagorinsky

Şekil 8:

Farklı durumlar için $x/L=0.95$ konumundan elde edilen kıyaslamalı SPL sonuçları.

S1-SST $k-\omega$ analizinin SPL sonucu değerlendirildiğinde alınan diğer sonuçlara göre daha başarısız bir sonuç görülmektedir. 2. pik noktası SPL bakımından oldukça yüksek bir seviyedeysen 3. pikin beklendiği frekans bölgesinde negatif yönlü bir pik bulunmaktadır. K1-IDDES analizinin SPL sonuçları yürütülen analizler arasında referans çalışmalar ile en uyumlu olanıdır. İlk 3 pik noktası da Rossiter tarafından önerilen ve Heller tarafından modifiye edilen ampirik bağıntı ile hesaplanan frekans bölgelerindedir. 4. pik noktası ise ampirik bağıntı yardımıyla hesaplanan frekans değerine çok yakın olmakla birlikte referans çalışmalar ile uyum

içerisindedir. K1-Smagorinsky analizinin SPL sonucuna bakıldığında ise 4 pik noktası da belirgin şekilde görülmekteyken pik noktalarının frekansları beklenenden bir miktar sapmalıdır.

3. SONUÇ

Bu çalışmada literatürde M 219 olarak bilinen üç boyutlu kavite $Ma_{\infty} = 0.85$ ve kavite uzunluğuna bağlı $Re_L = 1,3 \times 10^7$ değerlerinde açık kaynak kodlu bir CFD yazılımı olan OpenFOAM ile analiz edilmiştir. Yürütülen analizler OpenFOAM içerisindeki basınç tabanlı bir sıkıştırılabilir akış çözücüsü olan *rhoPimpleFoam* ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde DES ve LES türbülans modeli uygulamaları yapılmıştır. Analiz süresince kavite tavanında belirli konumlara tanımlanmış olan Kulite transdüserler ile her zaman adımında kaydedilen basınç verisi akışın durağan hale geldiği zaman adımından itibaren hesaplamalarda kullanılmıştır. Analizler sonucunda elde edilen basınç verisi kavite boyunca ses seviyesini incelemek amacı ile uygulanan matematiksel işlemler ile dB birimli OASPL verisine dönüştürülmüştür. Ayrıca kavite içindeki akış kaynaklı gürültünün barındırdığı dar bant tonlarını incelemek için FFT analizi kullanılarak belirli bir Kulite transdüseri için SPL değerleri hesaplanmıştır. Türbülans viskozitesi değerinin hesaplanma metoduna bağlı olarak birbirinden farklılaşan türbülans modellerinin sonuçlar üzerindeki etkisi açıkça görülmektedir. Şekil 5'te görüldüğü üzere akış alanı içerisinde diğer modellere kıyasla çok daha küçük skaladaki türbülans yapıları çözümlenmiştir. Bunun sonucunda da yüksek Reynolds sayılı akışlarda baskın hale gelen türbülans kaynaklı kuadropol (quadropole) gürültü etkilerinin daha doğru şekilde çözülmesine olanak sağlamıştır. Bu bağlamda değerlendirildiğinde simülasyon süresi boyunca ortalama ses basınç seviyesini ifade eden OASPL sonuçları değerlendirildiğinde referans çalışmalar ile en uyumlu sonuçlar Q1-WALE ile elde edilmiştir. DES türbülans modeli ile yapılan çalışmalar kendi içinde değerlendirildiğinde dB bakımından S1-DDES ve K1-IDDES durumları ile elde edilen sonuçlar referans çalışmalara S1-SST k- ω analizine kıyasla daha yakındır. SPL grafikleri değerlendirildiğinde sonuçlar genel olarak referans çalışmalar ile uyum içerisindedir. 1., 2., ve 3. Rossiter modları genel olarak başarılı şekilde tahmin edilmişken 4. pik bölgesinin frekansı referans çalışmalarda da olduğu gibi hafif sapmalıdır. SPL sonuçlarında K1-IDDES analizi referans çalışmalar ile uyum açısından öne çıkmaktadır. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde kullanılan üç ağ yapısı içerisinde en makul sonuçlar K1-IDDES ile elde edilmiştir. Buradan da bu çalışmada kullanılan başlangıç ve sınır koşulları için kavite içerisindeki hücre sayısının 1,5 milyon civarında olduğu ve daha büyük büyüme oranı kullanmanın bu çalışma için sonuçlarda bozulmaya yol açmadığı görülmüştür. Şekil 7'de gösterilen PSD sonuçları incelendiğinde literatürde -5/3 spektrumu olarak da bilinen Kolmogorov'un birinci hipotezi ile en uyumlu sonuçların Q1-WALE ve K1-IDDES durumları ile elde edildiği görülmektedir (Kolmogorov, 1941). Bu da büyük akış ayrılması görülen problemlerde oluşan kayma tabakası içerisindeki türbülans yapılarının çözümlenmesinin aerodinamik kaynaklı gürültü oluşumunda öneminin oldukça yüksek olduğunu vurgulamaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan yüksek performanslı hesaplama kaynağı İTÜ-TUSAŞ Hesaplamalı Mekanik Ar-Ge Laboratuvarı tarafından sağlanmıştır. Yazarlar, desteklerinden dolayı teşekkürlerini sunar.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

YAZAR KATKISI

Ali Can Fadıl: Veri toplama, veri analizi ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması.

Baha Zafer: Çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, fikirsell içeriğın eleştirel incelenmesi.

KAYNAKLAR

1. Abderrahmane, B., Rezoug, T., & Dala, L. (2019). Passive control of cavity acoustics via the use of surface waviness at subsonic flow. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91(2), 296–308. <https://doi.org/10.1108/AEAT-01-2018-0061>
2. Avallone, E. A., & Baumeister, T. I. (1996). *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers* (Tenth Edit). New York.
3. Bacci, D., & Saddington, A. J. (2023). Hilbert–Huang Spectral Analysis of Cavity Flows Incorporating Fluidic Spoilers. *AIAA Journal*, 61(1), 271–284. <https://doi.org/10.2514/1.J061917>
4. Cattafesta, 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. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.07.002>
5. Cui, P. et al. (2022). Improved Delayed Detached-Eddy Investigations on the Flow Control of the Leading-Edge Flat Spoiler of the Cavity in the Low-Aspect-Ratio Aircraft. *Aerospace*, 9(9), 1–27. <https://doi.org/10.3390/aerospace9090526>
6. Demir, O., Çelik, B., & Güleren, K. M. (2018). Transonik akışlarda girdap üreteçlerinin kavite gürültüsüne etkisi. In VII. *ULUSAL HAVACILIK VE UZAY KONFERANSI* (pp. 1–10). Samsun. Retrieved from <http://www.uhuk.org.tr/bildiri.php/UHUK-2018-117>
7. Demir, O., Çelik, B., & Güleren, K. M. (2021). Noise Reduction of Open Cavities By Passive Flow Control Methods At Transonic Speeds Using Openfoam. *Journal of Aeronautics and Space Technologies*, 14(2), 193–208. Retrieved from <https://jast.hho.msu.edu.tr/index.php/JAST/article/view/467>
8. Fadıl, A. C., & Zafer, B. (2022a). Kararsız Transonik Kavite Akışında Ağ Yapısı ve Türbülans Modelinin Akustik Basınç Üzerindeki Etkisinin OpenFOAM ile Değerlendirilmesi. In 9. *Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı* (pp. 1–10). İzmir. Retrieved from <http://uhuk.org.tr/bildiri.php/UHUK-2022-081>
9. Fadıl, A. C., & Zafer, B. (2022b). Parallel Aeroacoustic Computation of Unsteady Transonic Cavity Flow via Open CFD Source Codes. In 7. *Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Konferansı*.
10. Fadıl, A. C., & Zafer, B. (2023). Parallel aeroacoustic computation of unsteady transonic weapon bay using detached-eddy simulation via open computational fluid dynamics source codes. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, (February), 1–17. <https://doi.org/10.1002/cpe.7675>
11. Gelisli, K. A., Aradag, S., Tascioglu, Y., & Ozer, M. B. (2019). Computational fluid dynamics and proper orthogonal decomposition based control of flow over supersonic cavities. *25th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2019*, (May), 1–18. <https://doi.org/10.2514/6.2019-2694>
12. Greenshields, C. (2018). OpenFOAM user guide Version 6. *The OpenFOAM Foundation*.
13. Guleren, K. M., Turk, S., Demircan, O. M., & Demir, O. (2018). Numerical Analysis of the Cavity Flow subjected to Passive Controls Techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 326(1), 0–6. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/326/1/012015>
14. Heller, H. H., Holmes, D. G., & Covert, E. E. (1971). Flow-induced pressure oscillations in

- shallow cavities. *Journal of Sound and Vibration*, 18(4), 545–553. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(71\)90105-2](https://doi.org/10.1016/0022-460X(71)90105-2)
15. Kolmogorov, A. N. (1941). The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large Reynolds numbers. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences*, 434(1890), 9–13. <https://doi.org/10.1098/rspa.1991.0075>
 16. Lawson, S. J., & Barakos, G. N. (2010). Computational fluid dynamics analyses of flow over weapons-bay geometries. *Journal of Aircraft*, 47(5), 1605–1623. <https://doi.org/10.2514/1.C000218>
 17. Lawson, S. J., & Barakos, G. N. (2011). Review of numerical simulations for high-speed, turbulent cavity flows. *Progress in Aerospace Sciences*, 47(3), 186–216. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2010.11.002>
 18. Leonard, A. (1975). Energy cascade in large-eddy simulations of turbulent fluid flows. *Advances in Geophysics*, 18(PA), 237–248. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(08\)60464-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60464-1)
 19. Loupy, G. J. M., Barakos, G. N., & Kusyumov, A. (2017). Acoustic field around a transonic cavity flow. *International Journal of Aeroacoustics*, 16(6), 507–535. <https://doi.org/10.1177/1475472X17730459>
 20. Nightingale, D., Ross, J., & Foster, G. (2005). Cavity unsteady pressure measurements—examples from wind-tunnel tests. *Aerodynamics & Aeromechanics Systems Group, Technical Report Version 3, QinetiQ*.
 21. Nilsson, S., Yao, H. D., Karlsson, A., & Arvidson, S. (2022). Effects of Aeroelastic Walls on the Aeroacoustics in Transonic Cavity Flow †. *Aerospace*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/aerospace9110716>
 22. Rajkumar, K., Tangermann, E., Klein, M., Ketterl, S., & Winkler, A. (2023). Time - efficient simulations of fighter aircraft weapon bay. *CEAS Aeronautical Journal*, (123456789). <https://doi.org/10.1007/s13272-022-00630-1>
 23. Rossiter, J. (1964). Wind-tunnel experiments on the flow over rectangular cavities at subsonic and transonic speeds. *Royal Aircraft Establishment, TR 64037*.
 24. Shur, M. L., Spalart, P. R., Strelets, M. K., & Travin, A. K. (2008). A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modelled LES capabilities. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 29(6), 1638–1649. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.07.001>
 25. Smagorinsky, J. (1963). General circulation experiments with the primitive equations. *Monthly Weather Review*, 91, 99–164. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
 26. Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M. L., Squires, K. D., Strelets, M. K., & Travin, A. (2006). A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 20(3), 181–195. <https://doi.org/10.1007/s00162-006-0015-0>
 27. Spalart, P. R., Jou, W. H., Strelets, M. K., & Allmaras, S. R. (1997). Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid RANS/LES approach. In *Proceedings of first AFOSR international conference on DNS/LES* (Vol. 1, pp. 137–47). Greyden Press.
 28. Vanco, L., & Pierce, A. D. (1998). *Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. *Computer Music Journal* (Vol. 22). <https://doi.org/10.2307/3680971>

29. Zafer, B., & Cosgun, F. (2018). Kavite Akışının Aeroakustik Analizi. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 38(2), 25–38.
30. Zafer, B., & Konan, O. (2017). Kavite – Kanat Kesiti Etkileşiminin Aeroakustik Analizi. *Dokuz Eylül University-Faculty of Engineering Journal of Science and Engineering*, 19(59), 279–294. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2017195523>
31. Zheng, Y., Zhang, J., Li, H., Wu, X., & Jia, H. (2022). Flow Characteristic Study of High-speed Cavity Based on Detached-eddy Simulations. *Journal of Physics: Conference Series*, 2280(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2280/1/012009>