



# DENİZ PERVANESİ KAVİTASYON GÜRÜLTÜSÜNÜN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ

*Investigation of Cavitation Noise of Marine Propeller using Computational Fluid Dynamics*

Emre ALPMAN  
Levent A. KAVURMACIOĞLU

## ÖZET

Bu çalışmada dört kanatlı jenerik bir deniz pervanesi etrafındaki kavitasyon ve buna bağlı gürültü analizi açık kaynaklı hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı OpenFOAM ile gerçekleştirilmiştir. Program ilk önce sabit bir NACA 66 hidrofil etrafındaki kavitasyon içeren bir akış için denenmiş ve elde edilen tahminlerin problem için uygun olduğu değerlendirilmiştir. Pervane etrafındaki akış analizleri ise hareketli ağılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan çözümlerde kavitasyon bölgesinin akış alanı içerisindeki dağılımı ve hareketi gözlemlenmiştir. İki farklı yöntemle yapılan akustik analizde ise oluşan gürültü seviyelerinin çok yüksek ve gürültünün geniş bantlı yapıda olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Deniz pervanesi, kavitasyon, gürültü analizi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, OpenFOAM.

## ABSTRACT

In this study the cavitation occurring around a four bladed generic marine propeller and the resulting noise analyses were performed using the open source computational fluid dynamics software OpenFOAM. The software is first tested for a flow around a fixed NACA 66 hydrofoil including cavitation and the predictions were evaluated to be appropriate for the problem. The flow analyses around the propeller were performed using dynamic meshes. The distribution and motion of the cavitation region inside the flow field were observed from the results obtained. The acoustic analyses performed using two different methodologies predicted the noise levels to be quite high and it had a broadband nature.

**Key Words:** Marine propeller, cavitation, acoustic analysis, computational fluid dynamics, OpenFOAM.

## 1. GİRİŞ

Deniz içerisinde çalışan bir pervane kanadının uç kısımlarında çizgisel hız yüksek olduğu için basınç düşmektedir. Basıncın suyun yerel buhar basıncının altına düşmesi halinde ise suyun içerisinde buhar kabarcıkları meydana gelmektedir ve bu olaya kavitasyon adı verilmektedir [1]. Oluşan buhar kabarcıkları daha sonra yüksek sıvı basıncı altında ezilerek içeriye doğru patladıklarında bir basınç dalgası meydana gelmektedir [1]. Bu basınç dalgası katı yüzeylere zarar verdiği gibi kavitasyon gürültüsüne de sebep olmaktadır [2,3,4]. Bununla birlikte zamanla değişen kavitasyon oluşumu deniz pervanesi gibi hidrolik turbomakinelerin performans değişimlerinin arkasındaki temel sebep olarak görülmektedir [2]. Ayrıca deniz pervanesinin yarattığı gürültünün deniz ekosistemi üzerinde de olumsuz etkileri olduğu gösterilmiştir [5,6,7]. Bu sebeplerden dolayı deniz pervanesinin kavitasyon gürültüsünün azaltılması büyük önem taşımaktadır [8]. Su içerisindeki hareketli kanatlar üzerinde oluşan kavitasyonun doğru bir şekilde tahmin edilmesi, yapılması planlanan azaltma çalışmaları için önemli bir adımdır.

Bu çalışmada deniz pervanesi etrafındaki kavitasyon ve oluşan kavitasyon gürültüsü hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile incelenecektir. Bunun için açık kaynaklı OpenFOAM (<https://openfoam.org/>) yazılımı kullanılacaktır. Kavitasyon içeren akış simülasyonları, akışın içerdiği faz değişimi ve buna bağlı ani ve yüksek miktardaki yoğunluk değişiklikleri sebebiyle oldukça zorlayıcıdır [9]. Bu amaçla kullanılacak çözücünün bu tür çok fazlı akışları inceleyebilecek kapasiteye sahip olması gerekmektedir. OpenFOAM yazılımının interPhaseChangeFoam [10] çözücüsü bu özellikleri taşımaktadır ve daha önce kavitasyon analizi için kullanılmıştır [11]. Bu çözücü sıkıştırılmaz ve karışmaz akışkanların izotermal ortamda faz değişimi içeren akışlarının simülasyonu için geliştirilmiştir. Çözücünün aynı zamanda dinamik çözüm ağlarının kullanımına da izin veren interPhaseChangeDyMFoam isimli bir versiyonu da mevcuttur. Bu versiyon akış alanını sabit ve dönen alt alanlara ayrılmasına olanak sağladığından dolayı deniz pervanesi analizlerinde için oldukça elverişlidir.

Çözücünün kavitasyon simülasyonlarındaki yetkinliğini denemek amacıyla ilk önce sabit bir NACA 66 hidrofil geometrisi üzerindeki su akışı incelenmiştir. Bu hidrofil üzerindeki akış analizleri zamana bağlı değişen kavitasyon çalışmaları için kullanılan önemli kıyaslama problemlerinden biri olarak kabul edilmektedir [2,4,11,12]. Daha sonra çözücünün hareketli çözüm ağları içeren versiyonu ile dört kanatlı jenerik bir gemi pervanesi etrafındaki akış analizleri gerçekleştirilmiştir. Gemi pervanesi etrafındaki akış simülasyonları gerçekleştirildikten sonra elde edilen basınç dalgalanmaları ile akustik analiz yapılmıştır. Burada OpenFOAM yazılımının *noise* işlem sonrası fonksiyonu ile birlikte çok yaygın bir akustik analiz yöntemi olan Ffowcs Willams-Hawkins (FW-H) metodu kullanılmıştır [13].

## 2. METODOLOJİ

Çalışma kapsamındaki sayısal çözümleri için OpenFOAM yazılımının çok fazlı akış çözücülerinden biri olan interPhaseChangeFoam ve onun hareketli çözüm ağları için uygun olan versiyonu interPhaseChangeDyMFoam kullanılmıştır. Bu çözücü akışkan hacmi (Volume of Fluid) yöntemini içermektedir. Detaylar ve denklemler için [11] numaralı kaynağa bakılabilir. Bu yöntemde faz değişimi buhar hacim oranı ( $\alpha$ ) adı verilen boyutsuz bir değişkenle yapılmaktadır. Bu değişkenin bir olası o noktada yalnız sıvının, sıfır olması ise o noktada yalnızca buharın olduğunu göstermektedir. Çalışma kapsamında sıvı olarak su alınmıştır. Çözümler sabit sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve suyun buhar basıncı ise 2300 Pa olarak alınmıştır.

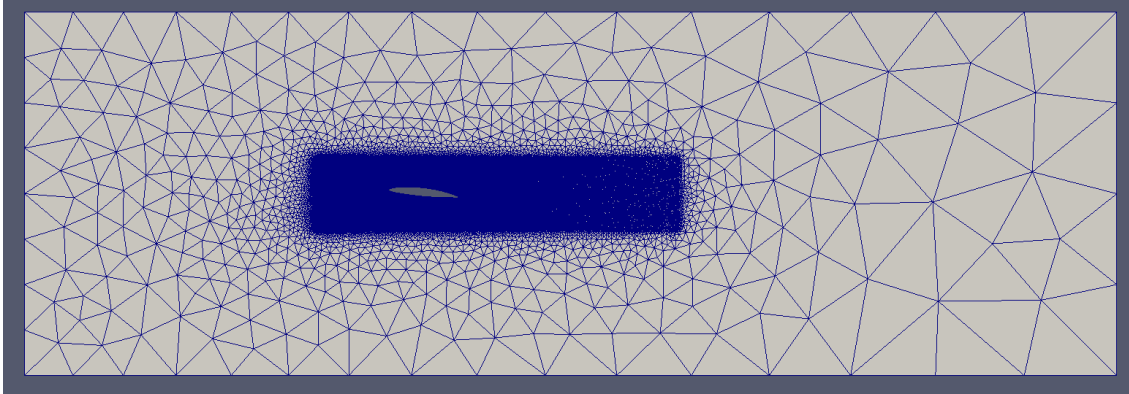
Sayısal çözümler için üretilen çözüm ağları için OpenFOAM yazılımının snappyHexMesh fonksiyonu ile açık kaynaklı Gmsh (<http://gmsh.info/>) programı kullanılmıştır. Pervane çözümlerinde akış alanında hem hareketli hem de sabit geometriler bulunduğu için bu çözümlerde pervane etrafındaki ağın pervane ile birlikte dönmesi ve bunun dışında kalan bölgedeki ağın sabit olması sağlanmıştır. Hareketli ve sabit ağlar arasındaki sınırdaki rastgele ağ arayüzü (arbitrary mesh interface) sınır koşulu uygulanmıştır. Bütün sayısal çözümler MPI (Message Passing Interface) kullanılarak paralel olarak gerçekleştirilmiştir.

## 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

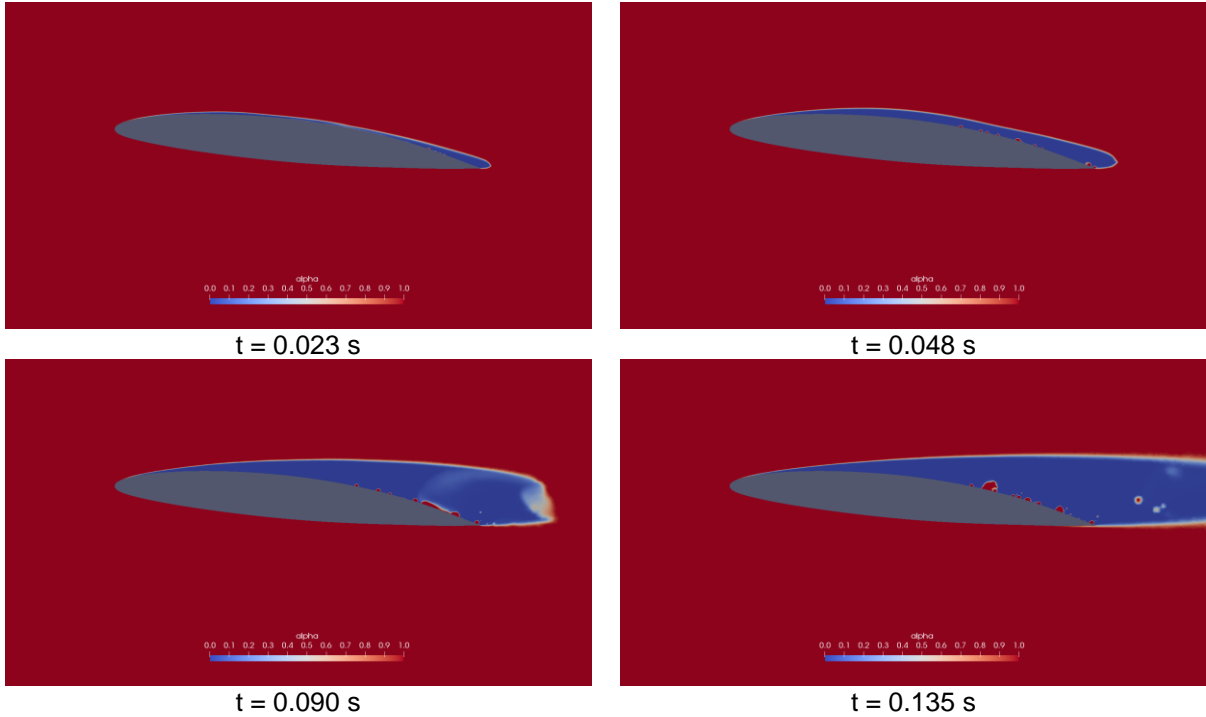
### 3.1 NACA 66 Hidrofil Etrafındaki Akış Çözümleri

Sayısal çözümler için kullanılacak interPhaseChangeFoam çözücüsünün kavitasyon içeren problemlerdeki yetkinliğini denemek amacıyla ilk önce kavitasyon içeren akış çözümleri için yaygın olarak kullanılmış sabit bir NACA 66 hidrofil geometrisi [2,3,4,8,11] üzerindeki iki boyutlu su akışı incelenmiştir. Bunun için yatay yöndeki akışa 6 derecelik hücum açısıyla yerleştirilmiş hidrofil etrafında açık kaynaklı Gmsh yazılımı kullanılarak yapısal olmayan bir çözüm ağı üretilmiştir. Hidrofil etrafında sıklaştırılmış ağın resmi Şekil 1'de gösterilmektedir. Burada ağ yaklaşık 1.2 milyon hücreden oluşmaktadır.

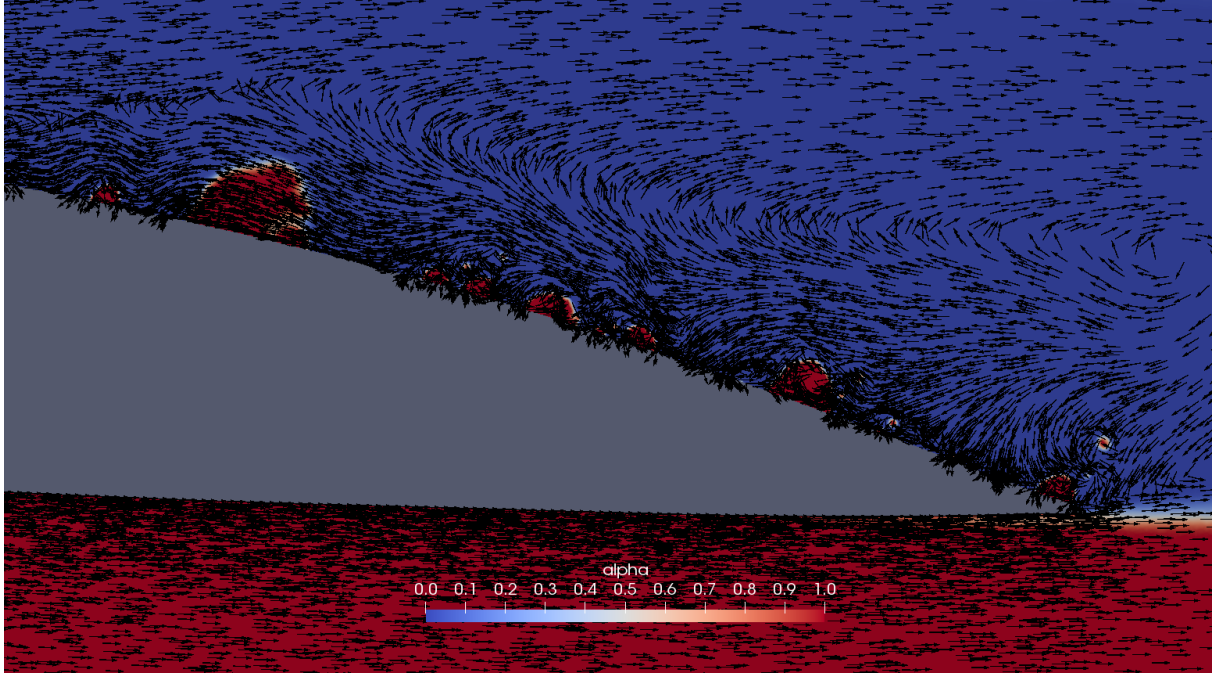
Sayısal çözümler için akış alanının giriş sınırında su hızı 5.33 m/s olarak, çıkış sınırında ise basınç kaviteye katsayısı 1.25 olacak şekilde ayarlanmıştır [4,11]. Akış türbülanslı kabul edilip, türbülans modeli olarak standart k- $\epsilon$  modeli kullanılmıştır. Ağ, oluşan sınır tabakayı çözümleyecek kadar sık olmadığı için hidrofili yüzeyinde duvar fonksiyonları kullanılmıştır. Toplamda 0.3 saniyelik reel zamana karşılık gelecek çözümler yapılmıştır. Farklı zamanlarda elde edilen buhar hacmi oranı dağılımları Şekil 2’de gösterilmektedir. Burada oranın sıfır olması bölgede tamamen buhar olduğunu, bir olması ise tamamen su olduğunu göstermektedir. Resimlerde kaviteye bölgesinin gittikçe genişlediği ve akıntı yönünde ilerlediği görülmektedir. Bu konfigürasyon için daha önce yapılmış deneysel [4] ve sayısal [11] çalışmalarda kaviteye bölgesi büyüme aşamasında iken hidrofili yüzeyinden ayrılmış ve hidrofili yüzeyinde anlık kaviteye azalması gözlemlenmiştir [4,11]. Burada elde edilen sonuçlarda bu şekilde bir kopma görülmemekle birlikte özellikle  $t = 0.09$  ve  $0.135$  saniyedeki çözümlerde hidrofili üzerindeki kaviteyasyonun kaybolduğu kırmızı bölgeler açık bir şekilde görülebilmektedir. Hidrofilin firar kenarına yakın bu bölgedeki hız vektörleri Şekil 3’te gösterilmektedir. Bu şekilden bölgedeki akış ayrılması ve oluşan ters yöndeki akım rahatlıkla görülebilmektedir. Literatürdeki deneysel çalışmalar ile görülen farkın sebebinin temel olarak sınır tabakanın tam çözümlenememesi ve kullanılan türbülans modelinin yetersiz olabileceği düşünülmektedir. Bununla birlikte sonuçlar çözücünün kapasitesinin test edilmesi konusunda olumludur.



Şekil 1 NACA 6 hidrofili etrafındaki çözüm ağı



Şekil 2 Farklı zamanlardaki buhar hacim oranı ( $\alpha$ ) dağılımları



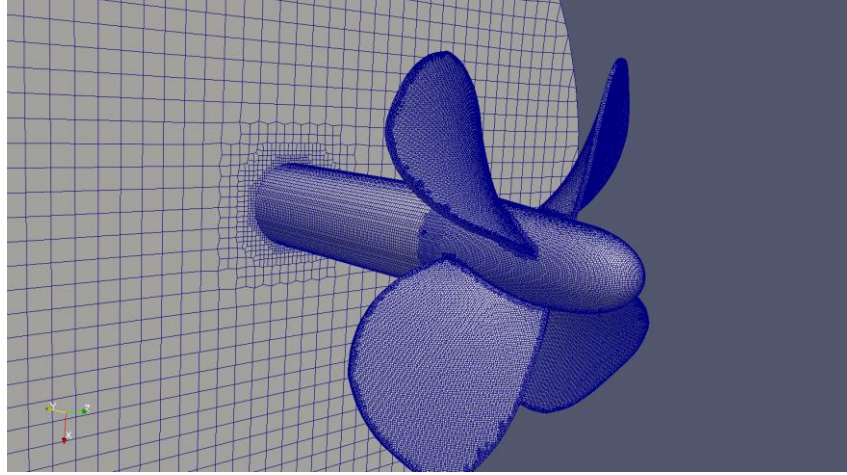
Şekil 3 t = 0.135. saniyedeki akış hızı vektörleri

### 3.2 Deniz Pervanesi Etrafındaki Akış ve Gürültü Analizi

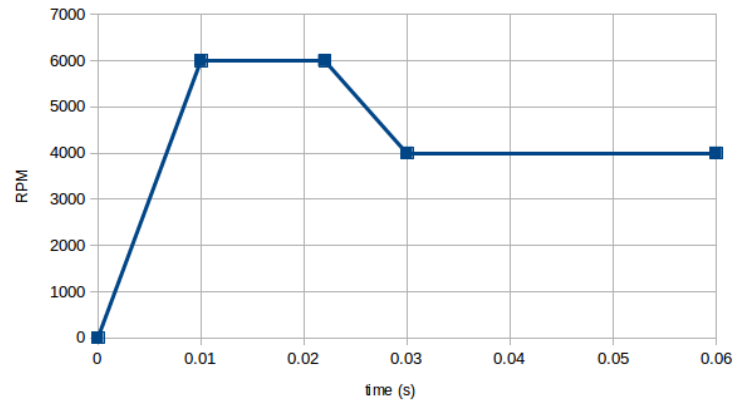
Bu bölümde dört kanatlı jenerik bir deniz pervanesi etrafında incelenen akış içerisindeki kaviteasyon ve kaviteasyona bağlı gürültü analizi sonuçları sunulmaktadır. Çözümde kullanılan deniz pervanesi geometrisi ve yüzey ağı Şekil 4'ten görülebilir. Akış alanındaki çözüm ağı OpenFOAM yazılımının snappyHexMesh ağ üreticisi kullanılarak üretilmiştir. Ağdaki hücre büyüklüğü ve sayısı pervanenin ürettiği itme kuvveti için ağ bağımsızlığı çözümü yapılarak belirlenmiştir ve son durumda yaklaşık 2.8 milyon hücreden oluşmaktadır. Akış içerisindeki türbülans ve zamana bağlı değişen diğer yapıları çözümleyebilmek için Büyük Girdap Benzetimi (Large Eddy Simulation, LES) yöntemi kullanılmıştır. Burada çözümlenemeyen ağ altı yapıları modelleyebilmek için OpenFOAM içerisindeki tek denklemlilik bir model olan  $kE_{eqn}$  modeli uygulanmıştır. Bu model yazarlar tarafından akustik analiz içeren daha önceki çalışmalarında kullanılmıştır [14,15,16].

Sayısal çözümler için başlangıçta akış alanındaki suyun durgun olduğu kabul edilmiştir. Daha sonra  $t = 0$ 'dan itibaren yine Şekil 4'de görülen giriş yüzeyine dik 15m/s değerinde hız sınır koşulu uygulanmıştır. Yine başlangıçta durgun vaziyetteki pervaneye ise Şekil 5'te gösterilen dönme hızı uygulanmıştır. Buna göre pervane sürekli akış içerisinde 4000 rpm ile dönmektedir. Toplamda  $t = 0.058$  saniyelik reel zamana karşılık gelen sayısal çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu pervanenin yaklaşık 4.23 devir yapmasına denk gelmektedir.

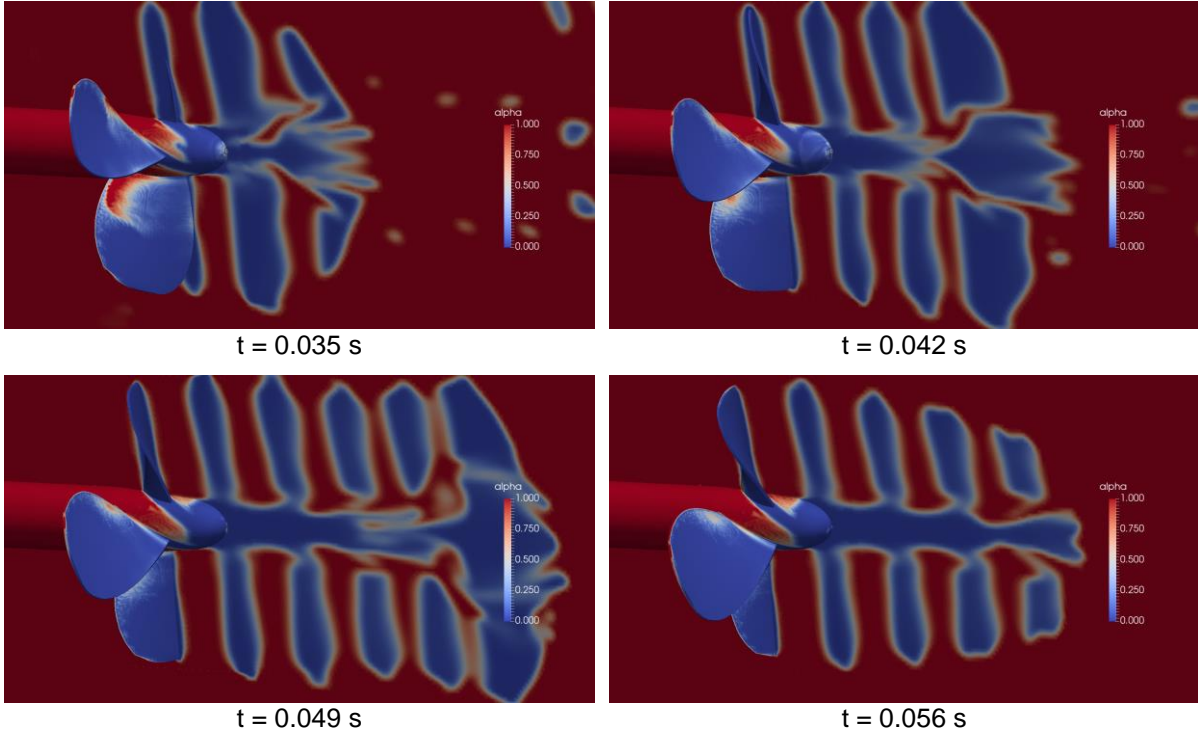
Pervanenin dönme hızı sabitlendikten sonra elde edilen buhar hacim oranının ( $\alpha$ ) pervane kanatlar ve pervaneyi ortadan kesen dikey bir yüzey üzerindeki farklı zamanlardaki dağılımı Şekil 6'da sunulmuştur. Burada kaviteasyonun neredeyse bütün pervane yüzeyine yayıldığı ve akıntı yönünde periyodik bir şekilde ilerlediği görülmektedir. Aynı zamanlarda elde edilmiş buhar hacim oranının 0.5 olduğu izo-yüzeyler ise Şekil 7'de gösterilmektedir. Bu şekilden de kaviteasyon bölgesinin kanatlardan koparak akış yönünde ilerlediğini ve pervaneden yeterince uzaklaşınca küçülerek kaybolduğu görülebilir. Kaviteasyon bölgesinin yok olmasında pervaneden uzaklaştıkça basıncın düşmesi kadar çözüm ağı aralığının genişlemesi de sorumludur.



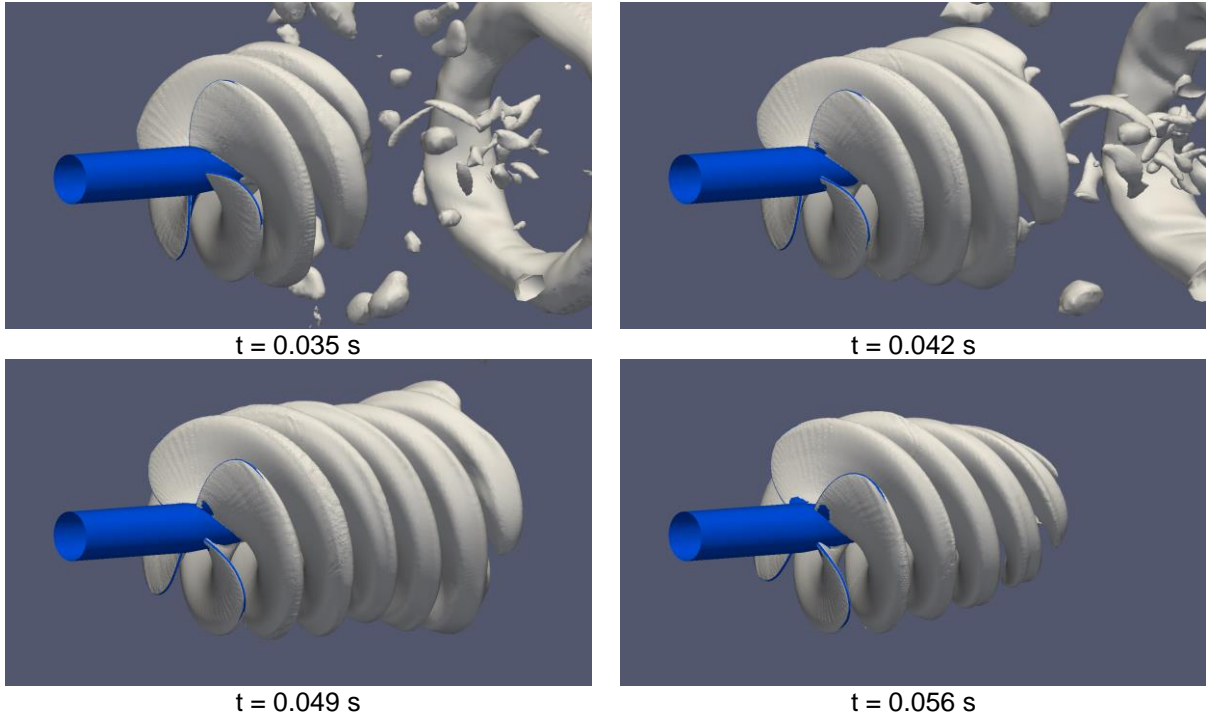
Şekil 4 Jenerik deniz pervanesi geometrisi



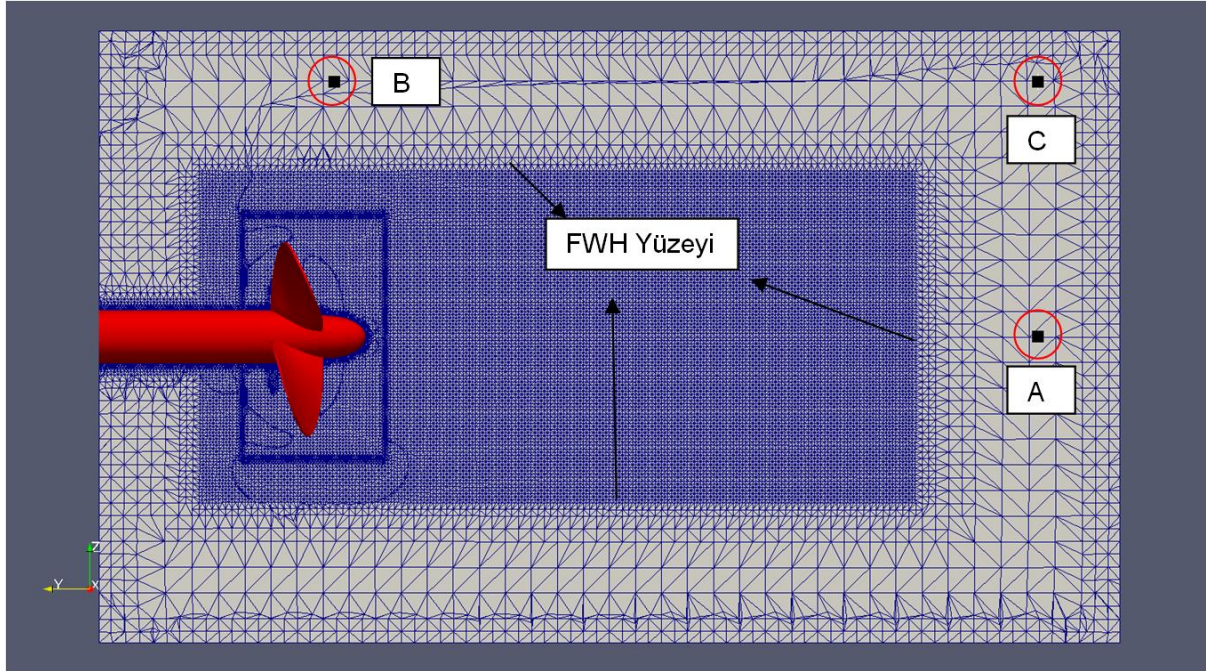
Şekil 5 Pervanenin açisal hızının zamana göre değişimi



Şekil 6 Farklı zamanlardaki buhar hacim oranı konturları



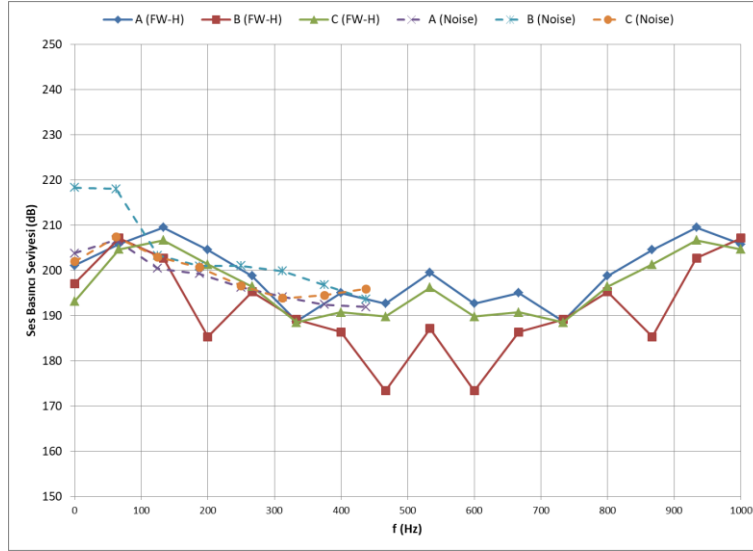
Şekil 7 Farklı zamanlardaki buhar hacim oranı izo-yüzeyleri



Şekil 8 Gürültü analizi için seçilen izleyici noktaları ve FW-H yüzeyi

Çalışma kapsamında akustik analizler için iki farklı yöntem kullanılmıştır; OpenFOAM yazılımının *noise* işlem sonrası fonksiyonu ve FW-H metodolojisi. Birinci yöntem için belirli noktalardaki basınç değerlerinin kaydedilmesi gerekmektedir. Bu iş için üç adet nokta belirlenmiştir. Bu noktalar Şekil 8'de A, B ve C olarak gösterilmiştir. İkinci yöntem için ise geçirgen bir FW-H yüzeyi tanımlanması gerekmektedir. Bu yüzey tüm doğrusal olmayan yapıları içerisinde barındıracak bir hacmi çevrelemeli

ve bu hacmin ötesinde hiçbir doğrusal olmayan yapı bulunmamalıdır. Bu çalışmada FW-H yüzeyi olarak **Şekil 8**'de gösterilen sık ve geniş ağ aralıkları arasındaki sınır alınmıştır. FW-H yöntemi ile tahmin edilecek gürültü noktaları için yine aynı A, B ve C noktaları seçilmiştir. Her iki yöntem ile belirlenen noktalarda elde edilmiş ses basınç seviyesi spektrumları **Şekil 9**'dan görülebilir. Burada *noise* fonksiyonu FW-H yöntemine kıyasla daha dar bir frekans aralığında tahminler üretebilmiştir. Buna rağmen her iki yöntem ile elde edilen ses basınç seviyeleri birbirine çok yakındır. Şekilde gösterilen değerlere bakıldığında gürültü oranının çok yüksek olduğu ve gürültünün geniş bantlı yapısı açık bir şekilde görülebilmektedir. Bu da kavitasyon kaynaklı gürültünün azaltılmasının önemini bir kez daha sergilemektedir.



**Şekil 9.** Ses basınç seviyesi spektrumu

## SONUÇ

Jenerik bir deniz pervanesinin kavitasyon kaynaklı gürültü analizi açık kaynaklı bir HAD yazılımı olan OpenFOAM ile gerçekleştirilmiştir. Burada OpenFOAM yazılımının çok fazlı akış çözücüsü *interPhaseChangeFoam* kullanılmıştır. Çözücünün kavitasyon içeren akışlardaki kapasitesini görebilmek amacıyla çözücü ilk önce sabit bir NACA 66 hidrofilik etrafındaki akış analizi için denenmiştir. Elde edilen tahminler ile daha önce yapılan deneysel çalışmalar arasında farklar olduğu gözlemlenmesine rağmen, çözücünün bazı kritik akış olaylarını nicelik olarak yakalayabildiği görülmüştür. Burada çözücü kadar kullanılan çözüm ağı ve türbülans modelinin de deneysel çalışmalar ile olan farklarda rolü olduğu değerlendirilmiştir.

Dört kanatlı jenerik bir deniz pervanesi çözümleri için ise *interPhaseChangeFoam* çözücüsünün hareketli çözüm ağlarına uygun versiyonu olan *interPhaseChangeDyMFoam* kullanılmıştır. Elde edilen sayısal çözümlerde kanatlar üzerinde kavitasyon bölgesi oluşumu ve bu bölgenin kanatlardan yayılarak akış yönünde ilerlediği gözlemlenmiştir. İki farklı yöntemle yapılan akustik analizlerde ise gürültü oranının çok yüksek olduğu ve gürültünün beklendiği gibi geniş bantlı bir yapıda olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- [1] ÇENGEL, Yunus A., CİMBALA, John M. Fluid mechanics fundamentals and applications. International Edition, McGraw Hill Publication, 2006, 185201.
- [2] DUCOIN, Antoine; HUANG, Biao; YOUNG, Yin Lu. Numerical modeling of unsteady cavitating flows around a stationary hydrofoil. International Journal of Rotating Machinery, 2012, 2012.



- [3] MORGUT, Mitja; NOBILE, Enrico. Numerical predictions of cavitating flow around model scale propellers by CFD and advanced model calibration. *International Journal of Rotating Machinery*, 2012, 2012.
- [4] LEROUX, Jean-Baptiste; COUTIER-DELGOSHA, Olivier; ASTOLFI, Jacques André. A joint experimental and numerical study of mechanisms associated to instability of partial cavitation on two-dimensional hydrofoil. *Physics of fluids*, 2005, 17.5: 052101.
- [5] IMO/MEPC.1/Circ.833, Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life, 2014
- [6] KIM, T., JEON, J., CHU, S., KIM, S., JOO, W. Numerical and experimental prediction methods of cavitation noise radiated by underwater propellers. In: *PROCEEDINGS of the 22nd International Congress on Acoustics, ICA 2016*. 2016.
- [7] BELIBASSAKIS K. Generation and propagation of underwater noise from marine propellers. In: *PROCEEDINGS of the Euronoise 2018*.
- [8] SEZEN, Savas; DOGRUL, Ali; BAL, Sakir. Investigation of marine propeller noise for steady and transient flow. *PROCEEDINGS BOOK*, 2016, 149.
- [9] AHUJA, Vineet; HOSANGADI, Ashvin; ARUNAJATESAN, Srinivasan. Simulations of cavitating flows using hybrid unstructured meshes. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123.2: 331-340.
- [10] [https://www.openfoam.com/documentation/cpp-guide/html/interPhaseChangeFoam\\_8C.html](https://www.openfoam.com/documentation/cpp-guide/html/interPhaseChangeFoam_8C.html)
- [11] HIDALGO, V. H., LUO, X. W., ESCALER, X., Ji, J., AGUINAGA, A.. Numerical investigation of unsteady cavitation around a NACA 66 hydrofoil using OpenFOAM. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2014. p. 052013.
- [12] LEROUX, Jean-Baptiste; ASTOLFI, Jacques André; BILLARD, Jean Yves. An experimental study of unsteady partial cavitation. *Journal of fluids engineering*, 2004, 126.1: 94-101.
- [13] WILLIAMS, JE Ffowcs; HAWKINGS, David L. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 1969, 264.1151: 321-342.
- [14] Alpman, E., "Large Eddy Simulation and Aeroacoustic Analysis for Simple Expansion Silencer Like Geometries," *International Journal of Advances on Automotive and Technology*, vol. 2 (3), pp. 168 – 174, 2018.
- [15] Alpman, E., Söylemez, E., "Aeroacoustic Analysis of an Air-Reed Instrument Using Large Eddy Simulation, 4th International Conference on Advances In Mechanical Engineering (ICAME 2018) Istanbul Türkiye, Aralık, 2018.
- [16] Tuzuner, B., Alpman, E., Kavurmacioglu, L., "Improved Delayed Detached Eddy Simulation ff Deep Cavities At Subsonic Flow Conditions," 1st International Conference on Advances in Mechanical and Mechatronics Engineering (ICAMMEN 2018), Ankara, Türkiye, Kasım, 2018

## ÖZGEÇMİŞ

### Emre ALPMAN

1977 yılı Ankara doğumludur. 1999 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Havacılık ve Uzay Mühendisliği bölümünü birincilik ile bitirmiştir. Aynı üniversitede 2001 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlamıştır. 2002 yılında doktora eğitimi için Amerika Birleşik Devletleri'nde bulunan Pensilvanya Eyalet Üniversitesi'nde Havacılık ve Uzay Mühendisliği bölümüne katılmış ve 2006 yılında doktora derecesi ile mezun olmuştur. Aralık 2006 tarihinde Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'ne öğretim üyesi olarak katılmıştır. Halen bu bölümde Doç. Dr. unvanı ile görev yapmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği, Aerodinamik, Türbülans Modelleme, Paralel İşlem, Helikopter Kararlılığı ve Kontrolü, Genetik Algoritmalar konularında çalışmaktadır..

### Levent A. KAVURMACIOĞLU

1986 yılında İTÜ Makina Fakültesinden mezun olmuştur. 1996 yılında ise yine aynı üniversitede doktora derecesini almıştır. Mart 1996 tarihinden itibaren İTÜ Makina Fakültesi öğretim üyesi olarak çalışmaya başlamıştır. Halen bu bölümde Doçent.Dr. unvanı ile görev yapmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği, Aerodinamik, Türbomakineler , Boru Hatlarında Daimi Olmayan Akışlar, Su Darbeleri , Pompalar ve Pompalama Sistemleri konularında çalışmaktadır.