

Delft Hidrofoili Etrafında Kaviteasyonlu Akış İncelemeleri

Onur Usta¹

ousta@dho.edu.tr¹

¹Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu, Milli Savunma Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

ÖZET

Bu çalışmada, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak Delft hidrofoili etrafındaki kaviteasyonlu akış modellemesi sunulmaktadır. Bu kapsamda 3 boyutlu Delft hidrofoilinin, 2 farklı kaviteasyonlu akış koşulunda direnç ve kaldırma kuvvetleri, hidrofoilin yüzeyi üzerinde oluşan kaviteasyonun hacmi ve hidrofoil yüzeyinde oluşan kaviteasyon paterni HAD analizleri ile elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürden alınan hem kaviteasyon tüneli deney sonuçları ile, hem de çeşitli sayısal analiz çalışmaları sonuçları ile kıyaslanarak oluşturulan HAD modelinin geçerliliği sağlanmıştır.

Kaviteasyonu HAD ile doğru bir şekilde modelleyebilmek için; kaviteasyonlu bir akışın özellikleri olan türbülans, zamana göre ani hız ve basınç dalgalanmaları, iki fazlı akış, sıvı fazdan buhar fazına geçişteki kütle transferi, üç boyutluluk, viskozite, kaviteasyon kabarcıklarının dinamiği ve kabarcıklar arasındaki etkileşim gibi özelliklerin hepsi aynı anda çözüme dahil edilmelidir. Bu çalışmada, kaviteasyonlu akıştaki yukarıda bahsedilen özellikler çeşitli modeller kullanılarak hızla gelişen hesaplama teknolojisi vasıtasıyla modellenmiştir. Sayısal analizlerde üç boyutlu, zamana bağlı kaviteasyonlu akışın çözdürülmesinde Ayrık Girdap Simülasyonu (DES) modeli kullanılmıştır. Türbülans, SST Menter $k-\omega$ türbülans modeli ile, iki fazlı akış VOF (Volume of Fluid) ile ve kaviteasyon da basitleştirilmiş Rayleigh-Plesset kabarcık denkleminin dayanan Schnerr-Sauer kaviteasyon modeli ile çözdürülmüştür. Analizler ilk önce incelenen iki akış koşulu için oluşturulan normal ağ örgüleri ile oluşturularak basınç ve hız dalgalanmaları ile kaviteasyon oluşan bölgeler belirlenmiştir. Sonrasında bu bölgelerdeki ağ örgüsü sıklaştırılıp iyileştirilerek analizler tekrar koşturulmuştur. Böylece HAD çalışmalarında çok önemli bir parametre olan ağ örgüsüne bağlı hatalar mümkün olduğunca giderilmiştir. Bunun yanı sıra, analizler sistematik olarak sıklaştırılmış üç farklı ağ örgüsü ve üç farklı zaman adımı ile tekrarlanmıştır. Bu analizlerden elde edilen kaldırma kuvveti sonuçları kullanılarak incelenen akış koşullarındaki sayısal belirsizlikler hesaplanmış, çalışmanın ağdan ve zamandan bağımsız olduğu gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Delft Hidrofoili, Kaviteasyon Modellemesi, Ayrık Girdap Simülasyonu (DES), Schnerr-Sauer Kaviteasyon Modeli.

Makale geçmişi: Geliş 14/02/2019 – Kabul 07/03/2019

Cavitating Flow Investigations Around the Delft Hydrofoil

Onur Usta¹

ousta@dho.edu.tr¹

¹Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Naval Academy, National Defense University, Istanbul, Turkey

ABSTRACT

In this study, cavitating flow modeling around the Delft hydrofoil by using Computational Fluid Dynamics (CFD) is presented. In this context, 2 different cavitating flow conditions around the 3-D Delft hydrofoil are simulated. Drag and lift forces, cavitation volume on the hydrofoil and cavitation pattern are processed via CFD analysis. The results obtained from the CFD analysis are validated by the cavitation tunnel test results besides the results of various numerical analysis studies obtained from the literature.

In order to model the cavitation accurately with CFD; all properties of cavitating flows such as turbulence, unsteady pressure and velocity fluctuations, two-phase flow, mass transfer from liquid phase to vapor phase, three-dimensionality, viscosity, dynamics of cavitation bubbles and interactions between bubbles should also be included in the solution. In this study, cavitating flow is simulated by using various models for the aforementioned properties by means of rapidly developing computational technology. Three-dimensional, unsteady cavitating flow around the hydrofoil is solved by the Detached Eddy Simulation (DES) technique with the SST Menter $k-\omega$ turbulence model. Two phase flow is modelled by the Volume of Fluid (VOF) method. Cavitation is modeled by the Schnerr-Sauer cavitation model, which solves the simplified Rayleigh-Plesset bubble equation. In the analysis, simulations are carried out initially using normal meshes. Thus the regions, where high pressure, velocity fluctuations and cavitation occur are determined. Then the mesh is refined in those regions. Eventually, the regions where high pressure and velocity fluctuations and cavitation occur, have better mesh resolution. Also, the mesh density in the all computational domain is increased and the mesh is enhanced to match the DES model. In this way, the computational errors related to the mesh has been minimized. In addition, the analyses are repeated with three systematically refined meshes and three different time steps. Numerical uncertainties of the analysis under simulated flow conditions are calculated by using lift force results obtained from these analysis and it is demonstrated that the study is independent of grid and time.

Keywords: Delft Hydrofoil, Cavitation Modelling, Detached Eddy Simulation (DES), Schnerr-Sauer Cavitation Model.

Article history: Received 14/02/2019 – Accepted 07/03/2019

1. Giriş

Akış hacmi içerisinde herhangi bir bölgedeki basınç seviyesi, buharlaşma basıncının altına düştüğünde soğuk kaynama olarak adlandırılan faz değişimi gerçekleşmektedir. Böyle bir durumda, akışkan içerisinde çözülmüş veya serbest haldeki kabarcıklar gözle görünür hale gelmektedir. Bu, kabarcıkların oluşması olayı kavitasyon olarak adlandırılmaktadır (Carlton, 2007).

Kavitasyon gemi pervaneleri, pompalar, türbinler hatta insan vücudu için önemli bir olgudur. Gemi pervanelerinde kavitasyon, pervanenin hidrodinamik özelliklerini, çalışma ömrünü, gürültüsünü ve gemi bünyesinde oluşan titreşimleri doğrudan etkileyen, pervane dizaynına kısıtlamalar getiren ve tam olarak anlaşılamayan karmaşık bir akışkanlar mekaniği olayıdır (Usta, 2018).

Kavitasyonlu akışın özellikleri; zamana göre değişen, karmaşık, düzensiz, üç boyutlu, yüksek Reynolds sayılı (türbülanslı), viskoz, sıvı-buhar şeklinde iki fazlı, sıkıştırılabilir ve türbülans uzunluk ölçekleri arasında enerji dönüşümü olan şekilde sıralanabilir (Li, 2012). Bu özelliklerin tamamının hesaba katıldığı bir kavitasyon modeli oluşturmak çok zordur. Bu yüzden bir takım kabul ve basitleştirmeler ile kavitasyon modelleri gerçekleştirilmektedir. Literatür incelendiğinde, çeşitli kavitasyon modelleri kullanılarak HAD analizlerinin gerçekleştirildiği pek çok çalışma görülmektedir.

1990'lı yılların başında, HAD yöntemlerindeki gelişmeler ile birlikte, Navier Stokes denklemlerinin modellenerek çözümüne dayanan türbülans modelleri ortaya çıkmıştır. Literatür incelendiğinde, 2000'li yıllara kadar Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) tekniğine dayanan sayısal modellerin yaygın araştırma konusu olduğu ve kavitasyonlu akış modellemesinin genellikle RANS kullanılarak yapıldığı görülmektedir. 2000'li yıllardan sonra ise RANS tabanlı akış modelleri geliştirilerek yeni teknikler (modeller) ortaya çıkmıştır ve günümüzde bilgisayar teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak bu modellerin kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. RANS'a alternatif olarak ortaya konan bu modeller Ayrık Girdap Simülasyonu (Detached Eddy Simulation, DES) ve Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation, LES) olarak sıralanmaktadır. Doğrudan Nümerik Simülasyon (Direct Numerical Simulation, DNS) ise Navier Stokes denklemlerinin doğrudan çözülmesine dayanmaktadır.

Mevcut çalışmada incelenen Delft hidrofoilin farklı akış koşullarında kavitasyon tüneli deneyleri Foeth (2008) tarafından gerçekleştirilmiştir. Sonrasında pek çok araştırmacı, örneğin Huuva (2008), Koop (2008), Li ve diğ. (2009), Whitworth (2011), Hoekstra ve diğ. (2011), Bensow, (2011), Ji ve diğ. (2013), Lidtke ve diğ. (2014) bu deneylerin sonuçlarından faydalanarak çeşitli HAD çalışmaları gerçekleştirmişlerdir. Li ve diğ. (2009), Delft hidrofoili etrafındaki zamana göre değişen ve zamana göre değişmeyen tabaka kavitasyonunun tahmini için çok fazlı, modifiye edilmiş, RANS çözücülü SST k- ω türbülans modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada kavitasyon modeli olarak Schnerr-Sauer kavitasyon modeli uygulanmıştır. Bensow (2011), Delft hidrofoili etrafındaki kavitasyonlu akışı incelediği çalışmasında RANS, LES, DDES ve Spalart Almaras türbülans modelleri kullanmıştır. Çalışmada sıkıştırılamaz akışın zamanla değişimi ve bu akışla kavitasyon arasındaki etkileşim incelenmiştir. Her iki fazda da sıkıştırılamaz akış kabulü yapılmıştır. Çalışmada iki faz, buhar parçacığı hacmi (vapor volume fraction) uygulanarak ve ilave taşınım denklemi çözülerek modellenmiştir. Mevcut çalışmada da sadece Sauner kütle transfer modeli kullanılmıştır. Hoekstra ve diğ. (2011), RANS, LES ve DES kullanılarak foil etrafındaki akışta kavitasyon çalışmalarını derlemiş ve sayısal çalışmalarda problemin sürdüğünü belirtmiştir. Çalışmada aynı matematiksel problemin; farklı kişilerce, farklı kodlarla çözülmesi neticesinde farklı sonuçlara ulaşıldığı vurgulanmaktadır. Oysa ki denklem türleri aynı, türbülans modeli aynı, kavitasyon modeli aynı olduğundan elde edilecek sonuçların da benzer olması gerekmektedir.

İncelenen çalışmalarda belirtilen bulgular ve öneriler mevcut imkanlar ve tecrübe ile birleştirilerek, mevcut çalışma zamana göre değişen akış kabulüyle DES tekniği, SST Menter k- ω türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Literatürden incelenen çalışmalar ayrıca kullanılan türbülans modeli ne olursa olsun ağ örgüsü (grid) çözünürlüğünün HAD analizlerinde kavitasyonu modellemede kritik parametrelerden biri olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda çalışmada DES'e uygun sıklıkta ağ örgüsü oluşturulmuştur.

Çalışmanın ana amacı kavitasyonlu akış koşullarında hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon oluşumu ile hidrofoile etki eden sürtünme kuvveti ve kaldırma kuvveti değerlerini deneysel veriler ile uyumlu bir şekilde elde etmektir. Bu amaç doğrultusunda ilk bölümde verilen genel bilgiler ve literatürün ardından ikinci bölümde DES ile kavitasyonlu akış modellemesi anlatılmaktadır. 3. Bölümde Delft hidrofoilin kavitasyonlu akış analizleri ve 4. Bölümde çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Son bölümde ise çalışmadan elde edilen genel sonuçlar ve değerlendirmeler verilmiştir.

2. DES ile Kavitasyonlu Akış Modellemesi

Bazı kavitasyon türlerinin ve basınç dalgalanmalarının RANS ile doğru bir şekilde modellenemediğini ve daha doğru sonuçlar alabilmek için LES tekniği kullanılması gerektiği fikrini savunan çalışmalar mevcuttur (Bensow ve Bark, 2010; Bensow, 2011; Lidtke ve diğ., 2014). Bu bağlamda, bilgisayar teknolojisi ve HAD tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak son yıllarda LES kullanımına artan bir ilgi vardır ve LES ile kavitasyonlu akış modellemesi çalışmaları yaygınlaşmaya başlamıştır. Bununla birlikte, kavitasyonlu akış modellemesi LES ile ancak çok uzun sürelerde yapılabilmektedir, dolayısıyla RANS'a göre hesaplama maliyeti çok yüksektir. Mevcut çalışmada kullanılan Ayrık Girdap Simülasyonu (DES) yöntemi, hem RANS hem de LES özellikleri gösteren hibrit bir metottur. Matematiksel ifade ile DES, Navier-Stokes denklemlerinin duvara yakın bölgede ortalaması alınarak (RANS), uzak bölgede ise filtrelenerek (LES) çözülmesidir. Yani DES yönteminde sınır tabaka etrafında RANS denklemleri, diğer bölgelerde ise LES denklemleri çözülür. Bu sebeple de sınır tabaka etrafında RANS modeline uygun ağ örgüsü, diğer bölgelere ise LES modeline uygun ağ örgüsü oluşturulması gerekmektedir.

2.1 DES k- ω SST modelinin matematiksel ifadesi

HAD hesaplamalarında kullanılan DES k- ω SST modeli denklemlerle aşağıdaki gibidir : (Chen ve Jaw, 1998; Davidson, 2017).

$$\frac{\partial k}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P^k - \beta^* k \omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{P^k}{\nu_t} - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$F_1 = \tanh(\xi^4), \quad \xi = \min \left[\max \left\{ \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500 \nu}{d^2 \omega} \right\}, \frac{4 \sigma_{\omega_{k-\epsilon}} k}{CD_\omega d^2} \right] \quad (3)$$

$$CD_\omega = \max \left\{ 2 \sigma_{\omega_{k-\epsilon}} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right\} \quad (4)$$

$$\nu_t = \frac{\alpha_1 k}{\max(\alpha_1 \omega, |\bar{S}| F_2)} \quad (5)$$

$$F_2 = \tanh(\eta^2), \quad \eta = \max \left\{ \frac{2k^{1/2}}{\beta^* \omega d}, \frac{500 \nu}{d^2 \omega} \right\} \quad (6)$$

Burada d yukarıda da verildiği gibi duvara en yakın noktanın mesafesidir. *SST model* duvar yakınında $F_1 = 1$ değeri için $k-\omega$ modeli olarak, duvardan uzakta ise $F_1 = 0$ değerini alarak $k-\epsilon$ olarak davranır. Tüm katsayılar F_1 fonksiyonunu kullanarak $k-\omega$ ve $k-\epsilon$ modelleri arasında harmanlanır. Örneğin;

$$\alpha = F_1 \alpha_{k-\omega} + (1-F_1) \alpha_{k-\epsilon} \quad (7)$$

Sabitler aşağıdaki değerleri almaktadır:

$$\beta^* = 0.09, \quad \alpha_1 = 0.3 \quad (8)$$

$$\alpha_{k-\omega} = 5/9, \quad \beta_{k-\omega} = 3/40, \quad \sigma_{k,k-\omega} = 0.85, \quad \sigma_{\omega,k-\omega} = 0.5 \quad (9)$$

$$\alpha_{k-\epsilon} = 0.44, \quad \beta_{k-\epsilon} = 0.0828, \quad \sigma_{k,k-\epsilon} = 1, \quad \sigma_{\omega,k-\epsilon} = 0.856 \quad (10)$$

DES enerji kaybı (disipasyon) teriminde k denkleminin aşağıdaki gibi değiştirilir:

$$\beta^* k \omega \rightarrow \beta^* k \omega F_{DES}, \quad F_{DES} = \max \left\{ \frac{L_t}{C_{DES} \Delta}, 1 \right\} \quad (11)$$

$$\Delta = \max \{ \Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3 \}, \quad L_t = \frac{k^{1/2}}{\beta^* \omega} \quad (12)$$

Burada $C_{DES} = 0.61$ dir.

Eğer yeteri kadar sık bir çözüm ağı oluşturulmuş ise DES için yapılan değişiklik, türbülans ölçeğini RANS uzunluk ölçeğinden ($\propto k^{1/2} / \omega$) LES uzunluk ölçeğine ($\propto \Delta$) dönüştürmektedir. F_{DES} birden büyük olduğunda, k denklemindeki disipasyon terimi artarken k ve dolayısıyla da türbülans viskozitesi azalmaktadır. Momentum denklemlerinde daha küçük bir türbülans viskozitesi ile modellenen disipasyon (yani sönümlenme) azalır ve akış daha da kararsız hale gelir. Sonuç olarak türbülanslı kısmın büyük çoğunluğunun modellenmek yerine çözüldüğü durum için uğraşılır.

11 ve 12 denklemlerinden de anlaşıldığı üzere, modelin nerede RANS, nerede LES çözümü yapacağını çözüm ağının yoğunluğu belirler. Bu sebeple ağ örgüsünün DES modeline uygun şekilde oluşturulması, DES modelinden iyi sonuç alabilmek için zorunludur. Eğer ağ örgüsünün maksimum boyutu olması gerekenden büyük olursa, modelde RANS'tan LES'e geçiş olmayacağından, yani gerekli ve yeterli büyüklükteki ölçekler çözülemeyeceğinden DES modeli kullanmanın bir avantajı kalmaz (Usta, 2018).

2.2 Genel Kabarcık Denklemi

Kavitasyon kabarcığının genel denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_v \alpha) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho_v \alpha u_{v,j}) = S_e - S_c \quad (13)$$

Burada, ρ_v buhar yoğunluğu, α buhar hacmi oranı, u_v buhar fazı hızı, S_e ve S_c ise kavitasyon kabarcığının sırasıyla genişleme ve patlama esnasındaki kütle transferi terimleridir.

Kabarcık hareketleri, kabarcığının genişleme ve patlaması Rayleigh-Plesset denklemiyle hesaplanmaktadır.

$$R_B = \frac{D^2 R_B}{Dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{DR_B}{Dt} \right)^2 = \left(\frac{p_B - p}{\rho_l} \right) - \frac{4 V_l}{R_B} \frac{DR_B}{Dt} - \frac{2\gamma}{\rho_l R_B} \quad (14)$$

Burada R_B kabarcık yarıçapı, ρ_l ve ρ_B sırasıyla sıvının ve buharın yoğunluğu, γ sıvının yüzey gerilmesi, ve p_B ve p sırasıyla kabarcık yüzey basıncı ve akışkanın uzak bölgesindeki yerel basınçtır.

Yüzey gerilmesi, viskozite ve atalet (ikinci türev terimi) terimlerinin etkileri, $(p_B - p)$ farkı çok büyük olduğundan ihmal edilebilir. Böylece Rayleigh Plesset denklemi aşağıdaki hali almaktadır:

$$\frac{DR_B}{Dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_B - p}{\rho_l}} \quad (15)$$

2.3 Schnerr-Sauer kavitasyon modeli

Schnerr-Sauer kavitasyon modelinde, buharlaşma oranı kavitasyon kabarcıklarının yarıçapının bir fonksiyonudur ve kavitasyon kabarcıklarının her birinin aynı boyutta olduğu ve (yarıçapının değişmediği) ve sıvı içerisinde homojen olarak dağıldıkları varsayılmaktadır. Schnerr ve Sauer (2011), buhar yapısının (15) denklemi ile gösterilen basitleştirilmiş Rayleigh Plesset denklemiyle ifade edilen pek çok küçük küresel kabarcıktan oluştuğunu farzetmiştir.

Bu modelde buhar hacmi oranı α aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

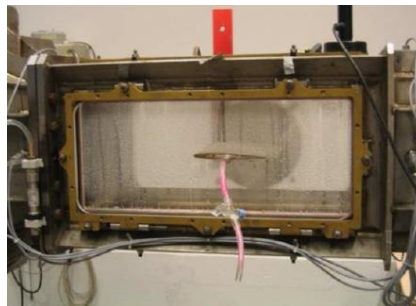
$$\alpha = \frac{n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3}{1 + n_b \frac{4}{3} \pi R_B^3} \quad (16)$$

Burada R_B kabarcık yarıçapı, n_b ise birim sıvı hacmindeki küçük küresel kabarcıkların sayısıdır. Yerel uzak bölge basıncı p , hesaplama hücresinin merkezindeki ortam basıncıdır ve (13)'deki p_B kabarcık yüzey basıncı, kabarcık yüzeyindeki sadece sıcaklığın fonksiyonu olan doyma buhar basıncına $p_v(T)$ eşit basınçtır. Daha detaylı bilgi için Usta (2018) çalışmasından yararlanılabilir.

3. Delft Hidrofoilin Kavitasyonlu Akış Analizleri

Foeth (2008), bir kavitasyon tüneline yerleştirilmiş üç boyutlu, bükülmüş (twisted) bir hidrofoil üzerinde kavitasyon akışı deneyleri gerçekleştirmiştir. Delft hidrofoili olarak adlandırılan hidrofoil, dikdörtgen biçimli NACA0009 kesitli bir kanattır.

Mevcut çalışmada, kavitasyon deneyi sonuçları Foeth (2008)'de verilen Delft hidrofoilin deneyler ile aynı koşullar oluşturularak gerçekleştirilen HAD analizleri anlatılmaktadır. Kavitasyon testleri Şekil 1'de gösterilen $L \times B \times H = 600\text{mm} \times 300\text{mm} \times 300\text{mm}$ boyutlarındaki kavitasyon tüneline gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Kavitasyon tüneli ve hidrofoilin yerleşimi (Foeth, 2008; Hoekstra ve diğ., 2011).

Foeth kavitasyon tüneline deneyleri -1° , -2° , ve -3° hücum açılarında gerçekleştirmiştir. Literatürde çeşitli HAD analizi sonuçları da bulunduğu için mevcut çalışmada sadece -2° koşulları incelenmiştir.

HAD çalışmaları ile Tablo 1’de verilen iki farklı deney koşulu için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 1. Deney ve HAD koşulları.

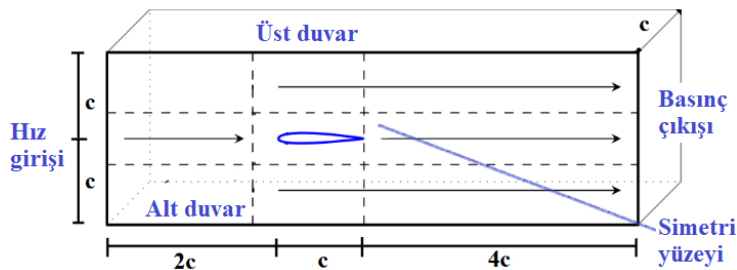
	Hücum açısı (derece)	Çıkış basıncı (kPa)	Buhar yoğunluğu (kg/m^3)	Giriş hızı (m/s)	Buhar basıncı (Pa)	Su yoğunluğu (kg/m^3)	kav. sayısı
Durum 1	-2	29	0.023	6.97	2970	998	1.07
Durum 2	-2	1375	0.023	50	2170	997.5	1.1

3.1 Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları

Sayısal analiz çalışmalarında ağ örgüsü oluşturma, analiz ve veri işleme adımlarının tamamı Star-CCM+ programında gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sayısal analiz çalışmalarında deneysel çalışmada verilen kavitasyon tüneli ve hidrofoil geometrisi boyutları aynı ölçekte oluşturulmuştur. Ancak, 3 boyutlu Delft hidrofoili geometrik olarak simetrik bir hidrofoil olduğundan akışın da simetrik olacağı öngörülmüş ve kavitasyon tüneli (hidrofoil de aynı şekilde) orta açıklık düzlemine göre tam ortadan kesilmiştir. Kesilen yüzeyin değdiği yüzey simetri yüzeyi sınır koşulu ile diğer yüzeyin ayna simetrisi olarak alınmıştır. Böylece, hesaplama hacmindeki genişlik yarıya indirilmiş, (toplam hesaplama geometrisi yarıya inmiş), gerekli bilgisayar gücü azalmış ve hesaplama süresi kısaltılmıştır.

Yukarıda da bahsedildiği üzere, HAD analizlerinde Foeth (2008) çalışması ile aynı boyutlarda hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Hidrofoilin kanat genişliği (kiriş uzunluğu) $c=0.15$ m’dir. Hidrofoil hesaplama bölgesinin yani kavitasyon tünelinin Şekil 2 ile gösterilen hız girişi tarafından $2c$, basınç çıkışı tarafından ise $5c$ mesafede konumlandırılmıştır. Tünelin yüksekliği $2c$, genişliği ise c ’dir. Bu mesafeler deneysel koşulların aynısıdır, simetrik olduğu için genişlik deneysel koşulların yarısı kadardır.

Kavitasyon tünelinin girişi hız girişi, çıkış kısmı basınç çıkışı, alt ve üst duvarlar ise duvar sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Delft hidrofoili de yine duvar sınır koşulu ile ifade edilmiştir. Delft hidrofoili etrafındaki kavitasyonlu akış tahminleri için oluşturulan hesaplama bölgesi ve sınır koşulları Şekil 2 ile verilmiştir.

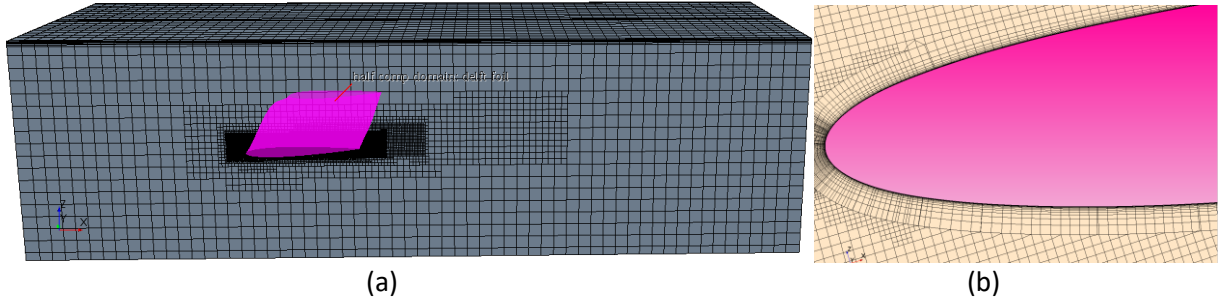


Şekil 2. Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları.

3.2 Ağ örgülerinin oluşturulması

Çalışmada DES türbülans modeli kullanıldığı için iç bölge olarak adlandırılan hidrofoil üzeri ve sınır tabaka etrafı RANS türbülans modeline, dış bölge olarak adlandırılan geri kalan bölge ise LES türbülans modeline uygun ağ örgüsü sıklığında oluşturulmuştur. Bu durum DES modelinin doğru sonuç vermesi için bir gerekliliktir (Pope, 2012; Usta, 2018).

Analizler öncelikle hız ile basıncın ani olarak değiştiği ve kavitasyon oluşumunun görüldüğü bölgeleri belirlemek için normal bir ağ örgüsü ile koşturulmuştur. Sonra bu bölgelerde daha sık ve düzgün, iyileştirilmiş ağ oluşturularak analizler tekrar edilmiştir. Bu şekilde oluşturulan iyileştirilmiş ağ örgüsü ile daha iyi sonuçlara ulaşılmıştır.



Şekil 3. (a) Hesaplama bölgesindeki ağ örgüsü, (b) hidrofoil etrafındaki ağ örgüsü.

Netice olarak Şekil 3'te gösterilen ağ örgüsü elde edilmiştir. Tablo 2'den de görülebileceği gibi normal ağ örgüsü ile gerçekleştirilen HAD analizleri kapsamında Durum 1 için 9071499, Durum 2 için ise 10678943 hücreden oluşan hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Çalışma seyrek ve yoğun ağ örgülerinde tekrarlanmış ve ağdan bağımsız hale getirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Delft hidrofoili analizlerinde kullanılan ağ örgülerindeki hücre sayıları.

	Seyrek	Normal	Yoğun
Durum 1	5705130	9071499	17066570
Durum 2	6228757	10678943	18368038

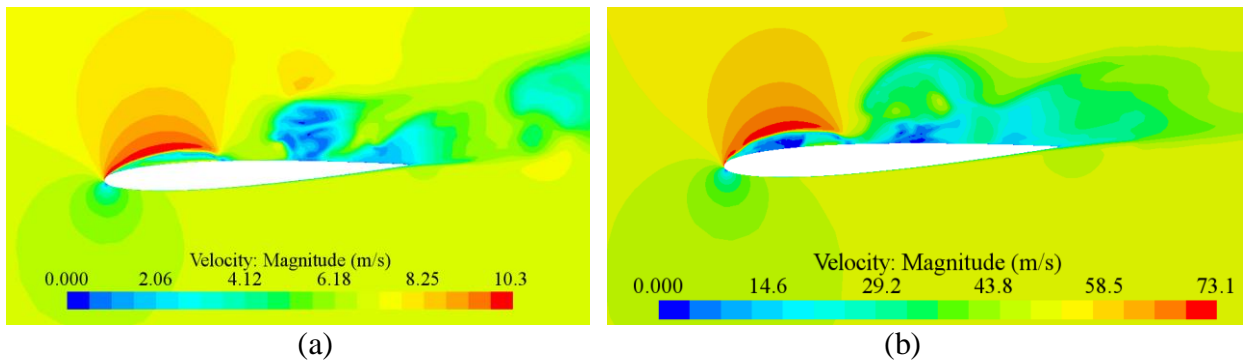
DES modelinin kullanıldığı çalışmalarda hesaplamaların doğruluğu için ağ örgüsü yanında zaman adımı da çok önemli bir parametredir. Çalışmada zaman adımı $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ olarak alınmıştır. Zaman adımından bağımsız çözüm hesaplamalarında ise ek olarak $\Delta t = 1 \times 10^{-5}$ ve $\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ alınarak analizler tekrarlanmıştır. Bu zaman adımları ile gerçekleştirilen HAD analizlerinde Normal ağ örgüsü yoğunluğu kullanılmıştır.

HAD analizlerinde stabilitenin sağlanması için bir diğer koşul da Courant sayısı (CFL) koşuludur.

$$CFL = \frac{|U\Delta t|}{\Delta x} \leq 1$$

Analizlerde her iki akış durumu için de bu koşul sağlanmıştır.

Hidrofoil etrafındaki hız konturları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. (a) Durum 1 için, (b) Durum 2 için hidrofoil etrafındaki hız konturları.

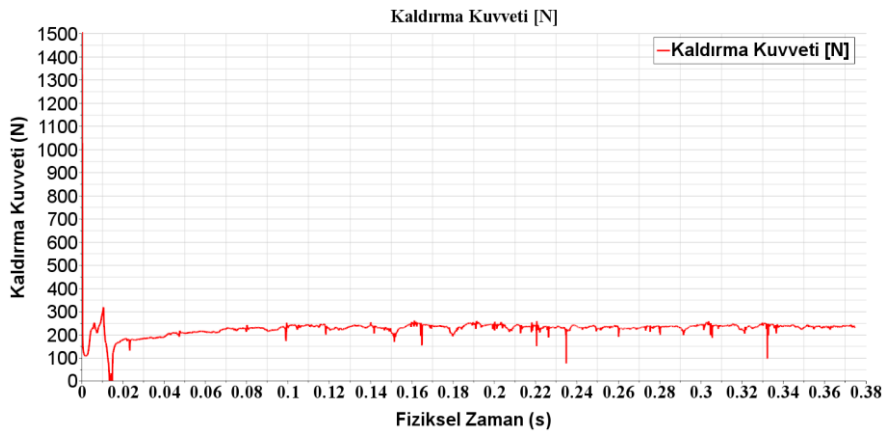
Görseller incelendiğinde, Durum 1 koşullarında en yüksek hız değerlerine hidrofoilin üst kısmında ulaşılmıştır ve bu değer 10.3 m/s civarındadır. Durum 2'de en yüksek hız değerlerine yine hidrofoilin üst kısmında ulaşılmıştır ve bu değer 73.1 m/s civarındadır.

4. Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Bu bölümde, öncelikle Delft hidrofoilin incelenen her iki akış koşulundaki kaldırma kuvveti ve direnç kuvveti tahminleri verilerek elde edilen sonuçlar literatür ile kıyaslanmıştır. Sonrasında ise hidrofoilin üzerinde oluşan kavitasyon hacmi sayısal olarak ve oluşan kavitasyon paterni de görsel olarak kıyaslanmış ve geçiremleri sunulmuştur. Sunulan grafikler ve sonuçlar Star-CCM+ programı vasıtasıyla elde edilmiştir.

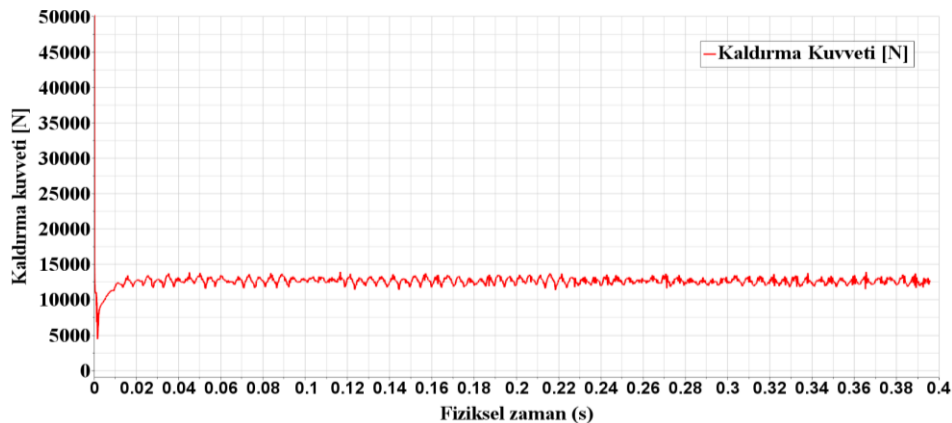
4.1. Delft hidrofoilin kaldırma kuvveti hesaplamaları

Mevcut çalışma kapsamındaki HAD analizlerinde, Normal ağ örgüsü yoğunluğu ve 2×10^{-5} zaman adımı ile Durum 1 ve Durum 2 koşulları için elde edilen kaldırma kuvveti-zaman grafikleri sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6 ile verilmektedir.



Şekil 5. Hidrofoil yüzeyindeki kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi (Durum 1).

Star-CCM+ programında analizler yakınsadıktan sonra Durum 1 için kaldırma kuvveti değerlerinin ortalaması alındığında 240.02 N olarak hesaplanmıştır. Analizlerde simetri koşulu kullanılmış ve hidrofoilin yarısı alındığından grafiklerde okunan değerler 2 ile çarpılmıştır. Dolayısıyla gerçekleştirilen HAD çalışması sonucunda Durum 1 için kaldırma kuvveti 480.04 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. Hidrofoil yüzeyindeki kaldırma kuvvetinin zamanla değişimi (Durum 2).

Durum 2 için Star-CCM+ programında analizler yakınsadıktan sonra kaldırma kuvveti değerlerinin ortalaması alındığında 12386 N olarak hesaplanmıştır. Simetri koşulu nedeniyle bu değer gerçek

değerin yarısıdır. Dolayısıyla gerçekleştirilen HAD çalışması sonucunda Durum 2 için kaldırma kuvveti 24772 N olarak hesaplanmıştır.

Geçerleme çalışmalarında hidrofoile etkiyen kaldırma kuvveti (L), Delft Üniversitesi'nin yayımladığı rapor (TU Delft, 2008) ve Maasch ve diğ. (2015) çalışmasında önerilen, aşağıda (15) no'lu denklemde verilen kaldırma kuvveti fonksiyonu yardımı ile hesaplanmıştır. Bu sonuç deney sonucu olarak kabul edilmiştir.

$$L = 10.052 U^2 \quad (15)$$

Delft hidrofoiline etki eden kaldırma kuvveti sonuçları Tablo 3'de verilmiştir. Seyrek grid, normal grid ve yoğun grid ile gerçekleştirilen HAD analizleri zaman adımı $\Delta t = 2 \times 10^{-5}$ alınarak gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı 5×10^{-5} ve 1×10^{-5} alınarak gerçekleştirilen HAD analizlerinde normal grid kullanılmıştır.

Tablo 3. Delft hidrofoiline etki eden kaldırma kuvveti sonuçları.

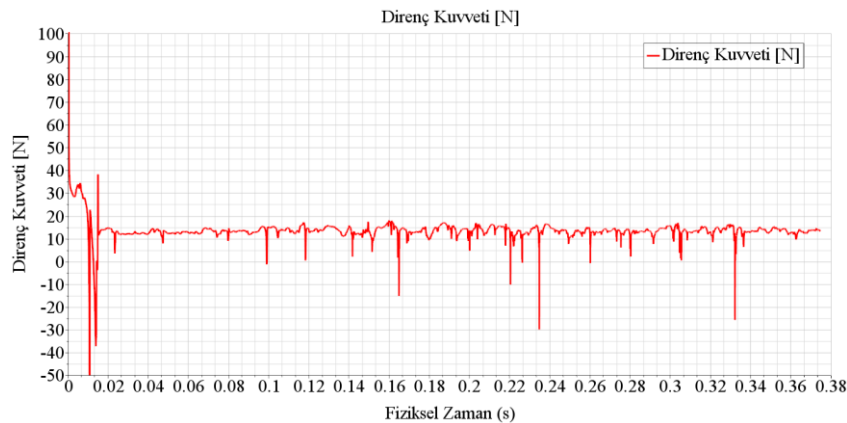
	Deney (hesaplama)	Seyrek grid ($\Delta t = 2 \times 10^{-5}$)	Normal grid ($\Delta t = 2 \times 10^{-5}$)	Yoğun grid ($\Delta t = 2 \times 10^{-5}$)	$\Delta t = 5 \times 10^{-5}$ (Normal grid)	$\Delta t = 1 \times 10^{-5}$ (Normal grid)
Durum 1	488.3 N	448.7 N	480.0 N	491.8 N	472.8 N	480.7 N
Durum 2	25130 N	24516 N	24772 N	24860 N	24652 N	24864 N

Tablo 3 incelendiği zaman, deney sonuçları ile en yakın sonuçların, Durum 1'de yoğun ağ örgüsü ile; Durum 2'de ise en düşük zaman adımında elde edildiği görülmektedir. Durum 1 için deneysel sonuçlar ile yoğun ağ ile gerçekleştirilen HAD analizleri arasındaki fark % 0.716'dır. Bununla birlikte, normal ağ yoğunluğu ve 2×10^{-5} zaman adımı ile yapılan analizlerde de aradaki fark % 1.72 kadardır. Durum 2 için deneysel sonuçlar ile en düşük zaman adımı sonuçları arasındaki fark % 1.07'dir. Normal ağ yoğunluğu ve 2×10^{-5} zaman adımı ile yapılan analizlerde ise analiz sonucu deney sonucundan % 1.44 kadar daha küçük olarak tahmin edilmiştir.

4.2 Delft hidrofoilinin direnç kuvveti hesaplamaları

Delft hidrofoili etrafındaki kavitasyonlu akış koşullarında hidrofoile etki eden direnç kuvveti için herhangi bir deneysel veriye rastlanmamıştır. Bununla birlikte, mevcut çalışmadan elde edilen sonuçlar Whitworth (2011) çalışmasında verilen sonuçlar ile kıyaslanmıştır.

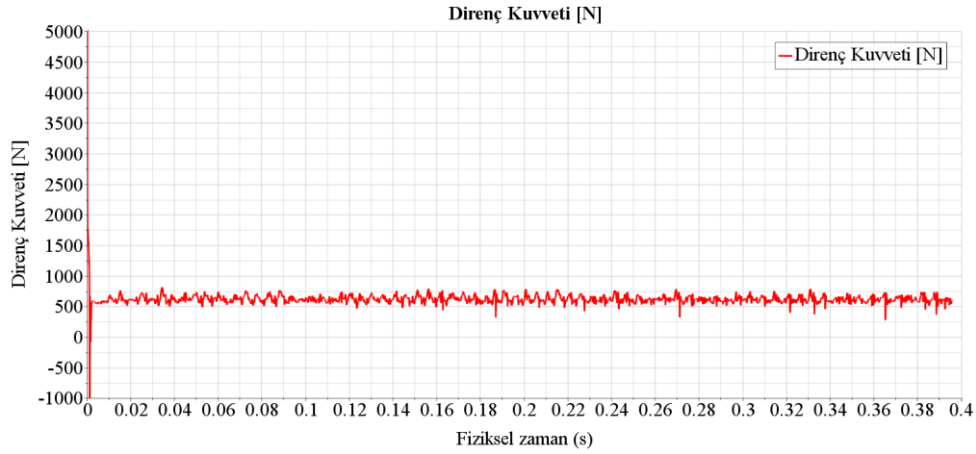
Durum A için direnç kuvvetinin zamanla değişimini gösteren Şekil 7'den görüleceği üzere, analizler yakınsadıktan sonra yarım hesaplama bölgesi için Delft hidrofoilinin direnç kuvveti yaklaşık olarak 14.5 N'dur. Buna göre hidrofoilin tamamına etki eden direnç kuvveti değeri 29 N olarak hesaplanmıştır.



Şekil 7. Hidrofoil yüzeyindeki direnç kuvvetinin zaman ile değişimi (Durum 1).

Whitworth (2011) çalışmasında direnç kuvveti yarım hidrofoil için 13.22 olarak verilmiştir. Çalışmada kaldırma kuvveti ise yaklaşık olarak 441 N olarak verilmiştir. Whitworth (2011) çalışmasındaki kaldırma kuvveti deneysel sonuçtan (488.33N) yaklaşık %10 daha küçüktür. Direnç kuvveti tahmininin de deneysel değerden bu mertebede küçük olduğunun düşünüldüğü çalışmada belirtilmiştir. Whitworth (2011) çalışmasında verilen direnç kuvveti değeri ile mevcut çalışma kapsamında gerçekleştirilen analiz sonucunda tahmin edilen direnç kuvveti arasında yaklaşık %8 kadar fark bulunmaktadır. Dolayısıyla herhangi bir deneysel veri olmamasına rağmen Whitworth (2011) çalışmasından alınan veriler değerlendirildiğinde, mevcut çalışmada elde edilen direnç kuvveti tahmininin de mantıklı olduğu düşünülmektedir.

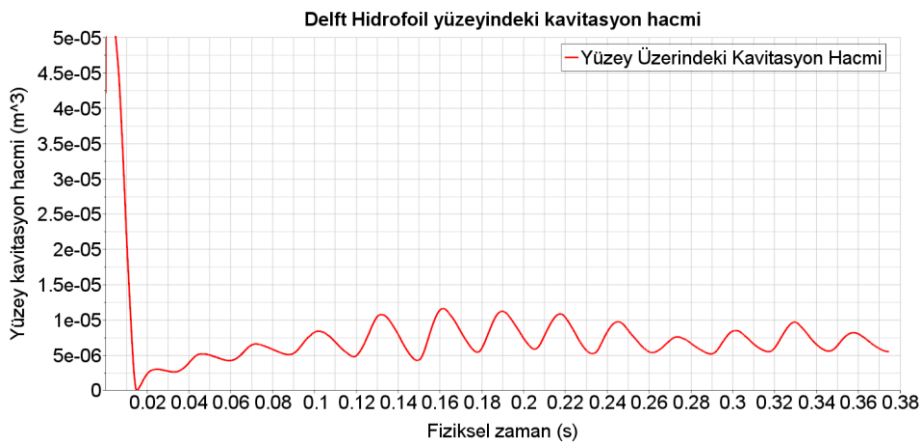
Durum 2 için Star-CCM+ programından alınan direnç kuvveti analizleri sonuçlarına göre yarım hesaplama bölgesi için Delft hidrofoilinin direnç kuvveti yaklaşık olarak 584.5 N'dur. Hidrofoilin tamamına etki eden direnç kuvveti değeri 1169 N olarak hesaplanmıştır. Deney 2 durumu için direnç kuvvetinin zamanla değişimini gösteren Şekil 8 ile verilmektedir. Literatürde Durum 2 için direnç kuvvetinin değerine ilişkin bir sonuca rastlanmamıştır.



Şekil 8. Hidrofoil yüzeyindeki direnç kuvvetinin zaman ile değişimi (Durum 2).

4.3 Delft hidrofoili yüzeyinde oluşan kavitasyon hacmi değerleri

Şekil 9, Durum 1 için Delft hidrofoili yüzeyindeki kavitasyon hacminin zaman ile değişimini göstermektedir.



Şekil 9. Hidrofoil yüzeyinde kavitasyon hacminin zaman ile değişimi (Durum 1).

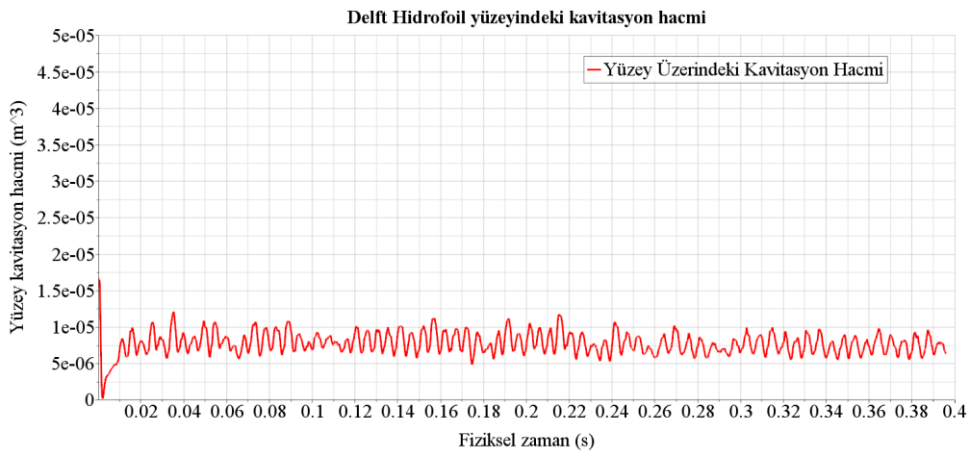
Hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon hacmini gösteren Şekil 9'dan görüleceği üzere hidrofoilin yarısı üzerindeki kavitasyon ile kaplı hacmi $5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ile $10 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ arasında değişmektedir. Hoekstra ve

diğ. (2011) çalışmasında Durum 1 koşulunda hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon hacmi değerlerini araştıran çalışma gruplarının tahminleri verilmiştir. Buna göre Chalmers Üniversitesi çalışma grubunun LES çözücüsü ile analiz ettiği çalışmada kavitasyon hacminin $4 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ile $10 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ arasında olduğu tahmin edilmiştir. Lloyd Register çalışma grubunun DES türbülans modeli kullanarak bulduğu sonuçlarda ise $4.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ile $11 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ arasında değişmekte olduğu söylenmiştir. Marin grubu ise RANS türbülans modeli kullanarak $3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ile $9.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ arasında olduğunu tahmin etmiştir. Tablo 4’de verilen değerler hidrofoilin yarısı içindir.

Tablo 4. Durum 1 için hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon hacmi tahminleri.

	Mevcut çalışma	Chalmers Üniv.	Lloyd Register	Marin
minimum (m^3)	5×10^{-6}	4×10^{-6}	4.5×10^{-6}	3×10^{-6}
maksimum (m^3)	10×10^{-6}	10×10^{-6}	11×10^{-6}	9.5×10^{-6}

Dolayısıyla mevcut çalışma kapsamında kavitasyon hacmi ile ilgili yapılan sayısal analiz çalışmaları Chalmers Üniversitesi, Lloyd Register ve Marin çalışma gruplarının sonuçları ile oldukça benzerdir. Özellikle DES türbülans modeli kullanan Lloyd Register ile oldukça yakın tahminler elde edilmesi, çalışmada yapılan modellemenin oldukça başarılı olduğunu ve doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Şekil 10, Durum 2 için Delft hidrofoili yüzeyindeki kavitasyon hacminin zaman ile değişimini göstermektedir.



Şekil 10. Hidrofoil yüzeyinde kavitasyon hacminin zaman ile değişimi (Durum 2).

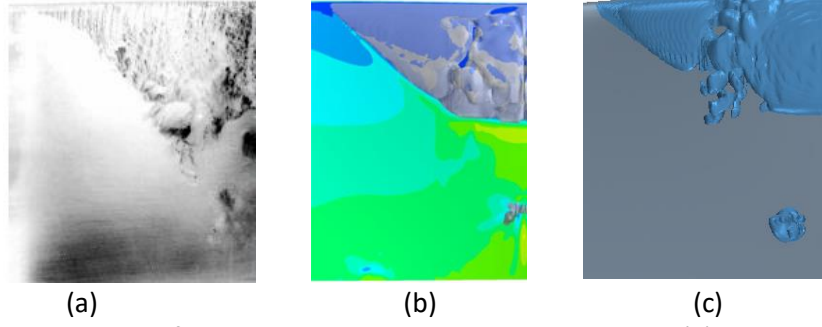
Durum 2 için hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon hacmini gösteren grafikten görüleceği üzere hidrofoilin yarısı üzerindeki kavitasyon ile kaplı hacim $6.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ ile $13 \times 10^{-6} \text{ m}^3$ arası civarındadır. Literatürde bu sonuçların kıyaslanabileceği bir bilgiye rastlanmamıştır.

Durum 2’de akış hızı Durum 1’e kıyasla daha hızlı olduğundan bu akış koşullarında hidrofoil yüzeyinde daha fazla kavitasyon oluşmuştur. Elde edilen sonuçlara göre Durum 2’de yaklaşık olarak %30 daha fazla kavitasyon oluşumu olacağı tahmin edilmiştir.

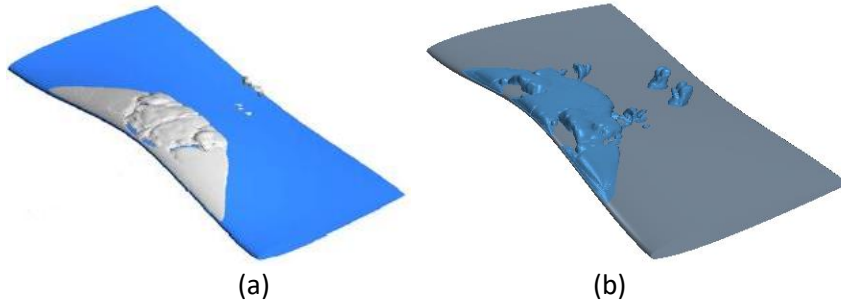
4.4 Delft hidrofoili yüzeyinde oluşan kavitasyon tahminleri

Bu bölümde, Delft hidrofoili yüzeyindeki kavitasyon oluşumu tahminleri verilmektedir.

Mevcut çalışmadan elde edilen tüm sonuçlarda buhar hacmi oranı %50 alınmıştır.

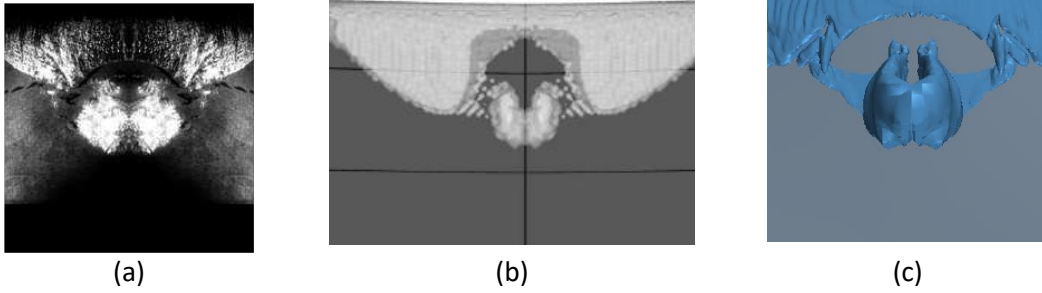


Şekil 11. Durum 1 için hidrofoilin yarısı üzerindeki kavitasyon oluşumu (a) Deneysel sonuç (Whitworth, 2011), (b) Ji ve diğ. (2013) çalışmasının sonucu ve (c) Mevcut çalışmadan elde edilen sonuç.

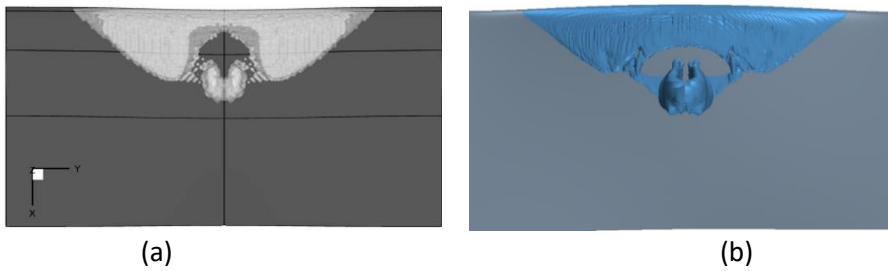


Şekil 12. Durum 1 için hidrofoil üzerindeki kavitasyon oluşumu (a) Ji ve diğ. (2013) çalışmasının sonucu, (b) Mevcut çalışmada elde edilen sonuç.

Durum 1 için elde edilen kavitasyon görselleri incelendiğinde Ji ve diğ. (2013) tarafından gerçekleştirilen sayısal çalışmada kavitasyon hacminin deneysel sonuçtan daha az olduğu görülmektedir. Bununla birlikte mevcut çalışmada elde edilen sonucun deneysel sonuç ile benzer olduğu düşünülmektedir.



Şekil 13. Durum 2 için hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon oluşumu (a) Deneysel sonucu (Foeth, 2008); (b) Koop (2008) çalışmasının sayısal sonucu ve (c) Mevcut çalışmadan elde edilen sonuç.



Şekil 14. Hidrofoil üzerindeki aynı zaman adımıdaki kavitasyon oluşumu kıyaslaması (a) Koop (2008) çalışmasının sonucu, (b) Mevcut çalışmadan elde edilen sonuç.

Şekil 13 ve Şekil 14 incelendiğinde, mevcut çalışma kapsamında elde edilen kavitasyon oluşumu tahmininin deneysel sonuç ile oldukça benzer olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, Koop (2008) çalışmasında hidrofoil yüzeyindeki kavitasyon oluşumu deneysel sonuçtan daha az olarak tahmin edilmiştir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen HAD analizlerinden elde edilen kaldırma ve direnç katsayısı sonuçları ile kavitasyon paterni resimleri başta Foeth (2008) ve Koop (2008) olmak üzere, literatürde Delft hidrofoilinün incelendiği HAD çalışmaları ile kıyaslandığında, oldukça uyumlu ve başarılı olarak tahmin edildiği tespit edilmiştir.

4.4 Ağ örgüsünden ve zaman adımından bağımsız çözüm – Sayısal belirsizlik hesaplamaları

HAD analizlerinin doğruluğu ve geçerliliği hakkında sayısal değerlendirme yapılabilmesi için sayısal hataların ve belirsizliklerin hesaplanması gerekmektedir. Mevcut çalışma kapsamındaki ağ örgüsü yoğunluğu ve zaman adımı hesaplamalarında Roache (1998), Stern ve diğ., (2006) ve Celik ve diğ., (2008) çalışmalarında verilen korelasyon faktörü ve GCI yöntemleri takip edilmiştir. Sayısal belirsizlik hesaplamaları, sistematik olarak iyileştirilmiş üç farklı grid ve üç farklı zaman adımı ile gerçekleştirilen Tablo 3’de verilen kaldırma kuvveti sonuçları için gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3’ten alınan değerlere göre Durum 1 için gerçekleştirilen sayısal belirsizlik hesaplamalarına göre;

Ağ yoğunluğu kaynaklı belirsizlik için GCI indeks sonucu: $GCI_{hücre\ sayısı} = 0.01838$

Zaman adımı kaynaklı belirsizlik için GCI indeks sonucu: $GCI_{zaman\ adımı} = 0.000236$

Buna göre, Durum 1 için toplam belirsizlik;

$$\sqrt{(GCI_{hücre\ sayısı} \times 100)^2 + (GCI_{zaman\ adımı} \times 100)^2} = 1.838 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

- Sonuç olarak, gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar ve hesaplamalar neticesinde Durum 1 için sayısal belirsizlik $U_{SN} = \% 1.838$ olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3’ten alınan değerlere göre Durum 2 için gerçekleştirilen sayısal belirsizlik hesaplamalarına göre;

Ağ yoğunluğu kaynaklı belirsizlik için GCI indeks sonucu: $GCI_{hücre\ sayısı} = 0.00572$

Zaman adımı kaynaklı belirsizlik için GCI indeks sonucu: $GCI_{zaman\ adımı} = 0.01519$

Buna göre, Durum 2 için toplam belirsizlik;

$$\sqrt{(GCI_{hücre\ sayısı} \times 100)^2 + (GCI_{zaman\ adımı} \times 100)^2} = 1.624 \text{ olarak hesaplanmıştır.}$$

- Sonuç olarak, gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar ve hesaplamalar neticesinde Durum 2 için sayısal belirsizlik $U_{SN} = \% 1.624$ olarak hesaplanmıştır.

5. Genel Sonuçlar ve Değerlendirmeler

Mevcut çalışma, yazarın Gemi Pervanelerinde Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu Modellemesi başlıklı Doktora Tezi’nden türetilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen Delft hidrofoili etrafındaki kavitasyonlu akış analizlerinden yola çıkılarak aşağıdaki genel değerlendirmeler elde edilmiştir:

- Hidrofoil etrafındaki üç boyutlu, zamana bağlı kaviteasyonlu akış, Ayrık Girdap Simülasyonu (DES) tekniği ve SST (Menter) $k-\omega$ türbülans modeli ile oldukça başarılı bir şekilde modellenmiştir.
- VOF (Volume of Fluid) yöntemi ile iki fazlı akış başarılı bir şekilde modellenebilmiştir.
- Basitleştirilmiş Rayleigh-Plesset kabarcık denklemine dayanan Schnerr-Sauer kaviteasyon modeli kullanılarak, hidrofoil yüzeyinde oluşan kaviteasyon deneysel sonuçlarla uyumlu bir şekilde elde edilmiştir.
- Hız ve basıncın ani olarak değiştiği ve kaviteasyon oluşumunun görüldüğü bölgeler belirlenerek, bu bölgelerde daha sık ve düzgün, iyileştirilmiş ağ oluşturularak analizlerin tekrar koşutulması ile kaviteasyon kabarcıklarının dinamiğinin daha iyi modellendiği ve deneysel çalışmalar ile daha uyumlu sonuçlar elde edildiği saptanmıştır.
- Sınır tabaka etrafındaki ağ örgülerinin oluşturulması, kaviteasyon gibi hız ve basınç dalgalanmalarının oldukça yüksek değerlerde olduğu akışlarda çok önemlidir. Bu kapsamda, sınır tabakada oluşturulan prizma tabakasının toplam kalınlığı, sayısı ve prizma tabakalarının genişleme oranı doğru modellenemediğinde, analiz sonuçlarındaki hata miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Kaviteasyonlu akışın doğru modellenebilmesinde seçilen türbülans modeli dışında en önemli parametreler ağ örgüleri ve zaman adımdır.

6. Kaynaklar

Bensow, R.E., Bark, G. (2010). Implicit LES Predictions of the Cavitating Flow on a Propeller. J. Fluids Eng. 132, 41302. <https://doi.org/10.1115/1.4001342>

Bensow, R. E. (2011). Simulation of the unsteady cavitation on the the Delft Twist11 foil using RANS, DES and LES, Second International Symposium on Marine Propulsors Smp11, Hamburg, Germany.

Carlton, J. S. (2007). Marine Propellers and Propulsion, Second Edition, Butterworth-Heinemann.

Celik, I. B., Ghia, U., Roache, P. J., Freitas, C. J., Coleman, H. & Raad P. E. (2008). Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications, Journal of Fluids Engineering, Vol. 130.

Chen, C. J. Jaw, S. Y. (1998). Fundamentals of turbulence modeling, Washington, DC : Taylor & Francis.

Davidson, L. (2017). Fluid mechanics, turbulent flow and turbulence modeling, Division of Fluid Dynamics, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology.

Foeth, E.J. (2008). The structure of three dimensional sheet cavitation, PhD Thesis, Delft University of Technology.

Hoekstra, M., Terwisga, T. Van & Foeth, E.J. (2011). smp'11 Workshop Cavitation on Foil, - Case 1: DelftFoil, Second International Symposium on Marine Propulsors smp'11, Hamburg, Germany, June 2011.

ITTC, (2011) Recommended Procedures and Guidelines, Practical Guidelines for Ship CFD Applications, Revision 01, 7.5 – 03, 02 – 03.

Ji, B., Luo, X., Wu, Y., Peng, X., Duan, Y. (2013). Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil. *Int. J. Multiph. Flow*, Vol. 51, pp. 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.11.008>

Li, Z. (2012). Assessment of cavitation erosion with a multiphase Reynolds-Averaged Navier-Stokes Method, Ph.D. Thesis, Delft University of Technology.

Li, D. Q., Grekula, M. & Lindell, P. (2009). A modified SST k - ω turbulence model to predict the steady and unsteady sheet cavitation on 2D and 3D hydrofoils, *Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation*, Ann Arbor, Michigan, USA.

Lidtke, A.K., Turnock, S.R., Humphrey, V.F. (2014). The influence of turbulence modelling techniques on the predicted cavitation behaviour on a NACA0009 foil, in: *Proceedings of the 17th Numerical Towing Tank Symposium*.

Koop, A. H. (2008). Numerical Simulation of Unsteady Three-Dimensional Sheet Cavitation. University of Twente, PhD Thesis. <https://doi.org/10.3990/1.9789036527019>

Maasch, M., Turan, O. & Khorasanchi, M. (2015). Unsteady RANSE and detached eddy simulations of cavitating flow, *International Conference on Shipping in Changing Climates*, Glasgow, United Kingdom.

Pope, S. B. (2012). *Turbulent Flows*, Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840531>.

Roache, P. J. (1998). Verification and Validation in Computational Science and Engineering, *Comput. Sci. Eng.* 8–9.

Schnerr, G. H., Sauer, J. (2001). Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamic, 4th *International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, USA.

Stern, F., Wilson, R., Shao, J. (2006). Quantitative V&V of CFD simulations and certification of CFD codes. *Int. J. Numer. Methods Fluids* 50, 1335–1355. <https://doi.org/10.1002/flid.1090>

TU Delft Reports. (2008). Pressure and lift measurements on the Twist 11 Hydrofoil. (<http://maritimetechnology.tudelft.nl/SHS/Virtue%20Twist11%20Pressure%20&%20lift.pdf>; downloaded at 27.07.2017).

Usta, O. (2018). Gemi Pervanelerinde Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu Modellemesi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Gemi İnşaatı ve Gemi Mak. Müh. ABD, Doktora Tezi.

Vallier, A. (2013). Simulations of cavitation – from the large vapour structures to the small bubble dynamics, Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in Engineering, Lund University.

Whitworth, S. (2011). Cavitation prediction of flow over the Delft Twist 11 foil, *Second Int. Symp. Mar. Propulsors smp'11*, Hamburg, Germany.