

Hidrofoil Yüzeyindeki Silindirik Eklentilerin Kavite Oluşumuna Etkilerinin İncelenmesi

Metin Kemal Gökçe¹, Şafak Akgünlü², Aydın Tekerek³, Mehmet Can Durukan⁴, Alper Altınışik⁵

^{1,2,3,4,5} BMC POWER Motor ve Kontrol Teknolojileri, İstanbul, Türkiye

¹ (sorumlu yazar) kemal.gokce@bmcpower.com.tr, ORCID: 0000-0003-0393-3415

² safak.akgunlu@bmcpower.com.tr, 0000-0001-8977-9118

³ aydin.tekerek@bmcpower.com.tr, 0000-0003-0105-0782

⁴ mehmetcan.durukan@bmcpower.com.tr, 0000-0001-9358-4786

⁵ alper.altinisik@bmcpower.com.tr, 0000-0002-5092-1436

ÖZET

Bilgisayar teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımlarındaki büyük ilerlemeler, kavite alanında da gerçekçi analizlerin yapılabilmesine imkan vermiştir. Bu çalışmada NACA66₁-012 kanat profiline sahip bir hidrofoilin önder kenar bölgesinde, emme yüzeyine farklı konumlarda ve yarıçaplarda silindirik eklentiler yerleştirilmiş ve bunların kavite oluşumuna etkileri araştırılmıştır. Öncelikle orijinal hidrofoil için kavite ve kavitesiz durumda analizler gerçekleştirilmiş ve uygulanan HAD yaklaşımının literatürde bulunan deneysel ve sayısal sonuçlar kullanılarak doğrulaması yapılmıştır. Daha sonra silindirik eklentilerin yerleştirildiği, 6° hücum açısına sahip modifikasyonlu hidrofoillerin kavite ve kavitesiz durumdaki analizleri gerçekleştirilmiş ve hidrodinamik parametreleri belirlenmiştir. Analiz sonrası süreçlerde, söz konusu eklentilerin kavite oluşumuna ve diğer hidrodinamik parametrelere olan etkileri incelenmiştir. Eklentilerin bir kısmının kavite oluşumunu azalttığı, bir kısmının önemli bir etki yaratmadığı ve bir kısmının da olumsuz etki yaratarak kavite miktarını artırdığı görülmüştür. Bununla birlikte bir hidrofoilin performansını belirleyen kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin de farklı eklentilerle olumlu veya olumsuz yönde değiştiği görülmüştür. Sonuç olarak mevcut bir kanat profiline yapılacak küçük modifikasyonlarla kanat profilini değiştirmeden kavite oluşumunun olumsuz etkilerinin iyileştirilebileceği anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Hidrofoil, kavite, HAD, RANS, kanat

Makale geçmişi: Geliş 11/11/2021 – Kabul 17/12/2021

<https://doi.org/10.54926/gdt.1022039>

Investigating The Effects Of Cylindrical Appandages On Hydrofoil Surface To Formation Of Cavitation

Metin Kemal Gökçe¹, Şafak Akgünlü², Aydın Tekerek³, Mehmet Can Durukan⁴, Alper Altınışik⁵

^{1,2,3,4,5}, BMC POWER Engine and Control Technologies Inc., Istanbul, Turkey

¹(corresponding author) kemal.gokce@bmcpower.com.tr, ORCID: 0000-0003-0393-3415

² safak.akgunlu@bmcpower.com.tr, 0000-0001-8977-9118

³ aydin.tekerek@bmcpower.com.tr, 0000-0003-0105-0782

⁴ mehmetcan.durukan@bmcpower.com.tr, 0000-0001-9358-4786

⁵ alper.altinisik@bmcpower.com.tr , 0000-0002-5092-1436

ABSTRACT

In parallel with the developments in computer technologies, great improvements in computational fluid dynamics approaches enabled researchers to perform realistic cavitation analysis. In this study, cylindrical appandages which have different radius and locations are located on suction side of NACA661-012 hydrofoils leading edge. Effects of these appandages on cavitation occurrence have been investigated. Firstly, cavitating and non-cavitating analysis have been performed for original hydrofoil and CFD approach has been verified with experimental and numerical results in literature. Then cavitating simulations of modified hydrofoils with cylindrical appandages have been performed at 6° angle of attack. Effects of the appandages on cavitation formation and other hydrodynamic parameters were examined by post-processing of the simulations. It is concluded that some of the appandages reduced cavitation formation, some did not affect significantly while some of them increased the amount of cavitation. Meanwhile, the drag and lift forces which determine the performance of a hydrofoil were increased or decreased with different appandages. As a result, implementation of minor modifications on a hydrofoil without changing the characteristic profile can reduce the negative effects of cavitation.

Keywords: Hydrofoil, cavitation, CFD, RANS, airfoil

Article history: Received 11/11/2021 – Accepted 17/12/2021

1. Giriş

Kanat yapıları havacılık endüstrisinin haricinde pervane, rüzgâr türbini, turbomakine ve hidrofoiller gibi birçok farklı akışkan uygulamasında uzun yıllardır kullanılan geometrik yapılardır. Kullanım amaçları uygulamaya göre değişiklikler gösterse de çalışma teorileri temel olarak aynıdır. Kanadın baskı ve emme yüzeyleri arasında basınç farkı nedeniyle oluşan kuvvetler, bu geometrik yapıları farklı mühendislik uygulamalarında kullanışlı hale getirmiştir. Hava ortamındaki uygulamaların aksine gemi pervanesi, hidrofoiller, su ve yağ pompaları ve hidrolik turbomakineler gibi sıvı fazı ortamında çalışan kanatlarda kavitasyon önemli bir konudur.

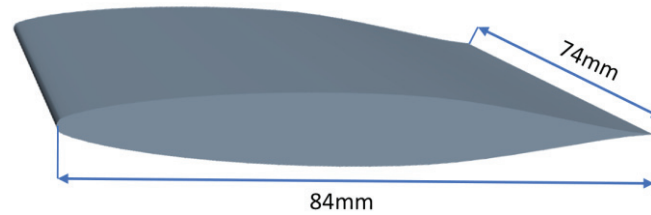
Akış ortamı içerisinde bir konumdaki yerel basıncın, akışkanın buharlaşma basıncının altına düşmesi nedeniyle buharlaşması ve buna bağlı olarak gaz kabarcıklarının oluşması kavitasyon olarak adlandırılmaktadır. Soğuk kaynama olarak da bilinen kavitasyon, endüstride turbomakine ve denizcilik uygulamalarında sıklıkla karşılaşılan bir konudur. Kabarcıkların faz değişiminin gerçekleştiği düşük basınçlı bölgeden görece yüksek basınçlı bölgelere hareket etmesi ve patlaması sonucunda şok dalgaları meydana gelmekte ve bunun sonucunda gürültü, titreşim ve malzemede erozyon gibi istenmeyen durumlar oluşmaktadır. Usta vd. KCD-193 model pervanesinin farklı koşullardaki performansını ve kavitasyona bağlı olarak oluşan erozyon karakteristiklerini HAD yaklaşımı ile incelemişlerdir. Çalışmalarında kavitasyona bağlı erozyon yoğunluğunu hesaplamak için yeni bir yaklaşım önermişlerdir (Usta vd., 2017). Sezen vd., bir gemi pervanesinin akustik özelliklerini HAD yaklaşımı ile belirlemişlerdir. Uyguladıkları hibrit çözüm yaklaşımıyla elde ettikleri sonuçların, diğer araştırma sonuçlarıyla uyumlu olduğunu belirtmişlerdir (Sezen vd., 2019). Lou vd. bir pervanenin hava ve sudaki akışkan kaynaklı titreşim ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi kullanarak birçok sayısal çalışma yapmışlar ve nihayetinde doğal frekans değerini deney sonuçlarıyla uyumlu bir şekilde hesaplayan bir ampirik formül geliştirmişlerdir (Lou vd., 2021). Endüstride oldukça yaygın karşılaşılmaması ve karmaşık oluşum mekanizması nedeniyle kavitasyon, uzun yıllardır araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmuştur. Kavitasyon oluşumunun deneysel olarak gözlemlenmesi, özel düzenekler gerektiren oldukça zahmetli süreçlerdir. İstanbul Teknik Üniversitesi'nde kurulmakta olan bir kavitasyon tünelinin yakın zamanda faaliyete geçecek olması, ülkemizde kavitasyon alanında yapılacak çalışmalar adına önemli bir adımdır. Hidrofoil etrafında kavitasyon oluşumu konusunda bilinen ilk ve en önemli çalışma Kermeen tarafından NACA66₁-012 kanat profiline sahip bir hidrofoil için gerçekleştirilen kavitasyon deneyleridir (Kermeen, 1956). Çalışmasında söz konusu hidrofoil için farklı hücum açılarında ve kavitasyon sayılarında deneyler gerçekleştirmiş ve kavitasyon konusunda açık literatüre zengin bir kaynak kazandırmıştır. Benzer şekilde Kermeen NACA44-12 kanat profiline sahip hidrofoil için de kavitasyonlu deneyler gerçekleştirmiştir (Kermeen, 1956). Son yıllardaki bilgisayar teknolojilerindeki gelişim hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yaklaşımı ile gerçekleştirilen çalışmaları da olumlu etkilemiş ve araştırmacıları kavitasyon konusunda HAD yöntemi kullanmaya teşvik etmiştir. Özellikle kavitasyon deneylerinin zorlu doğası, HAD yaklaşımının bu alanda tercih edilmesinin bir diğer nedenidir. Mortezazadeh vd., kavitasyon oluşumunu azaltmak adına hidrofoilin hücum kenarına bir takıntı eklemişler ve takıntının oluşan gaz kabarcığı boyutu üzerindeki etkilerini HAD yaklaşımı ile incelemişlerdir (Mortezazadeh vd., 2014). Sedlar vd., NACA2412 hidrofoil etrafındaki kavite olan kararsız akışı gözlemlenmek için deneysel ve sayısal yaklaşımlar uygulamışlardır. Çalışmalarında farklı türbülans modelleri kullanarak bunların kavitasyon oluşumunu belirlemedeki yetkinliklerini araştırmışlardır (Sedlar vd., 2016). Quandil vd., HAD yaklaşımı ile NACA66-012 kanat profiline sahip bir hidrofoil üzerindeki kavitasyon oluşumunu incelemişler ve sonuçlarını Kermeen tarafından elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır (Quandil vd., 2019).

Literatürde bir hidrofoil etrafındaki kavitasyon oluşumuna etki eden parametrik değişen takıntıların incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada NACA66₁-012 kanat profiline sahip bir hidrofoilin üst (emme) yüzey-önder kenar bölgesinde yer alan farklı konumlarda ve boyutlardaki silindirik eklentilerin, kavitasyon oluşumu üzerindeki etkileri ticari bir HAD yazılımı kullanılarak incelenmiştir. Uygulanan HAD yaklaşımının doğrulanması için öncelikle bir ağ yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonrasında elde edilen sonuçlar, söz konusu kanat profiline ait literatürde bulunan kavitasyonsuz ve kavitasyonlu durumdaki deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır (Kermeen, 1957). Sonuçların uyumlu olduğunun belirlenmesinin ardından 6° hücum açısına sahip, eklentili hidrofoil tasarımlarının kavitasyonlu durumdaki analizleri gerçekleştirilmiştir.

2. Hidrofoil Geometrisi ve HAD Modelinin Oluşturulması

2.1. NACA66₁-012 Hidrofoil Geometrisi

Bu çalışmada simetrik NACA66₁-012 kanat profiline sahip hidrofoil kullanılmıştır. Hidrofoilin boyutları, Kermeen'in kavitasyon tüneli deneylerinde kullandığı boyutlarla aynı olup kanat boyu ve genişliği sırasıyla 84 mm ve 74 mm'dir (Kermeen, 1956). Şekil 1'de söz konusu hidrofoilin kesit görüntüsü, Tablo 1'de ise çalışmada kullanılan NACA66₁-012 kanat profilinin koordinatları görülmektedir.



Şekil 1. NACA66₁-012 kanat görünüşü

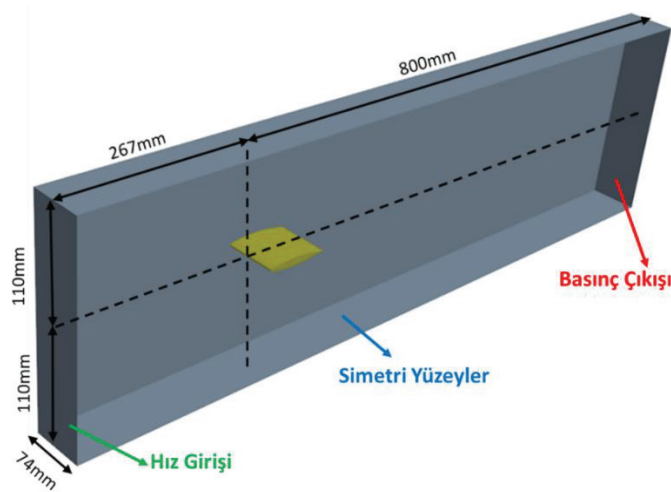
Tablo 1. NACA66₁-012 kanat profili koordinatları

X [mm]	Y [mm]	X [mm]	Y [mm]
0	0	33.6	4.995
0.42	0.761	37.8	5.040
0.63	0.913	42	5.011
1.05	1.141	46.2	4.902
2.1	1.519	50.4	4.694
4.2	2.097	54.6	4.317
6.3	2.551	58.8	3.793
8.4	2.937	63	3.164
12.6	3.557	67.2	2.473
16.8	4.033	71.4	1.750
21	4.400	75.6	1.037
25.2	4.677	79.8	0.398
29.4	4.874	84	0

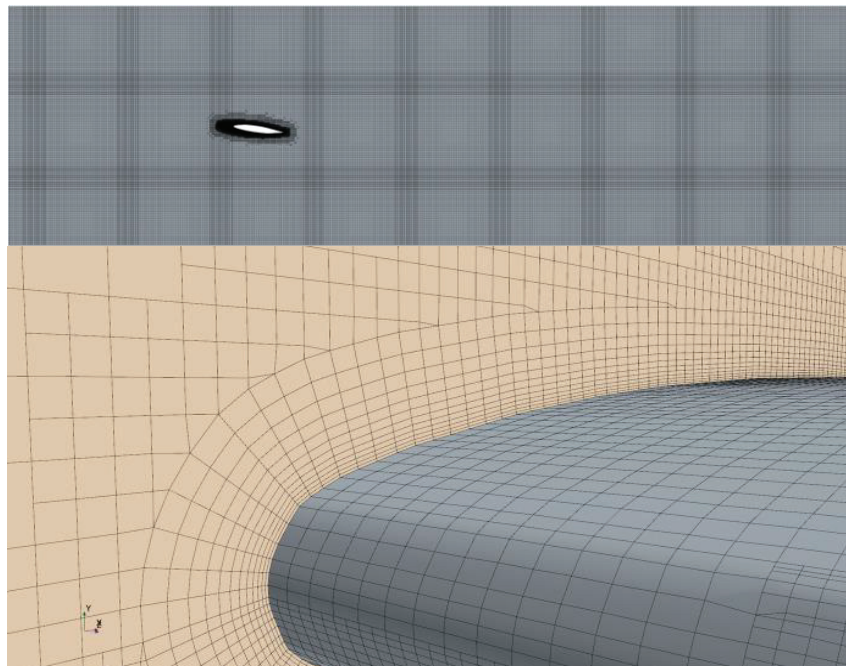
2.2. HAD Akış Çevresi ve Ağ Yakınsama Çalışması

2.2.1. Akış çevresi ve ağ yapısının oluşturulması

Yukarıda geometrik özellikleri verilen NACA66₁-012 hidrofoilin HAD yaklaşımı ile analiz edilebilmesi için gerekli olan akış çevresinin (domain) görüntüsü, temel boyutları ve yüzey sınır şartları Şekil 2'deki gibidir. Akış çevresinin genişliği, hidrofoilin genişliği ile aynı tutularak (74 mm) akım ayrılması kaynaklı etkilerin önüne geçilmesi ve dolayısıyla iki boyutlu ideal akışa yakın sonuçlar elde edilmesi hedeflenmiştir. Akış çevresinin diğer boyutları, hidrofoil etrafındaki akışı etkilemeyecek şekilde Quandil vd. tarafından yapılan çalışma önerilen boyutlar dikkate alınarak belirlenmiştir (Quandil vd., 2019). Daha sonra söz konusu akış çevresi için Şekil 3'te gösterildiği gibi ağ elemanları oluşturulmuştur. Hidrofoil yüzeyleri etrafında sınır tabakadaki akışın doğru bir şekilde modellenebilmesi için uygun kalınlıkta ve sistematik olarak büyüyen prizma tabakaları kullanılmıştır.



Şekil 2. HAD analizlerinde kullanılan akış çevresinin genel görünümü



Şekil 3. Akış çevresi içerisinde oluşturulan ağ yapılarının genel görünümü

2.2.2. Ağ Yakınsama Çalışması

HAD yaklaşımı ile elde edilecek sonuçların güvenilirliği açısından ağ yakınsama çalışmasının gerçekleştirilmesi önemlidir. Bu kısımda akış çevresinde oluşturulacak ağ yapıları için bir ağ yakınsama çalışması gerçekleştirilmiştir. Uygulanan ağ yakınsama çalışması Stern vd. tarafından geliştirilmiş bir yöntem olup, yöntem hakkında daha detaylı bilgi için referans çalışma incelenebilir (Stern vd., 2001).

Ağ yakınsama çalışması için analizler zamandan bağımsız olarak, hidrofoilin kavitsyonsuz durumu için gerçekleştirilmiştir. HAD yaklaşımında kullanılan fiziksel parametreler ve modeller bir sonraki bölümde paylaşılmıştır. Çalışma için 6° hücum açısına sahip NACA66₁-012 hidrofoilin kavitsyonsuz durumdaki kaldırma katsayısı (C_L) parametresi dikkate alınmıştır. Analizler deneysel sonuçlarla (Abbott vd., 1945) uyumluluk açısından 3.10^6 Reynolds sayısı (Re) için gerçekleştirilmiştir. Ağ tasfiye katsayısı (r_G), $\sqrt{2}$ olarak tercih edilmiş ve eleman boyutları bu doğrultuda değiştirilerek, 2 numaralı ağ yapısı esas model olmak üzere (bkz. Şekil 3), üç farklı ağ yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ağ yapılarının ağ eleman sayıları ve bu ağ yapıları ile elde edilen C_L sonuçları Tablo 2’de paylaşılmıştır.

Tablo 2. Farklı ağ yapılarıyla elde edilen kaldırma katsayısı değerleri

	Deney (Abbott vd.)	Ağ Yapısı 1	Ağ Yapısı 2	Ağ Yapısı 3
Eleman Sayısı	-	7,647,450	4,283,875	1,876,421
C_L	0.642	0.6753	0.6630	0.6754

Stern vd. tarafından geliştirilen yaklaşım ile elde edilen onaylama (verification) parametreleri ise Tablo 3’teki gibi gerçekleşmiştir.

Tablo 3. Ağ yakınsama çalışması sonucunda elde edilen onaylama parametreleri

ϵ_{32}	ϵ_{21}	R_{G_2}	r_G	p_g	δ_{RE}	C_G	U_G
0.0124	-0.0123	-0.9919	1.414	1.068	0.028	0.448	0.0277

R_{G_2} değerinin 0’dan küçük gerçekleşmesi, yukarıdaki ağ yapısı sistemi ile elde edilen C_L sonuçlarının salınımlı bir yakınsama yaptığını ifade etmektedir (Stern vd., 2001). İteratif belirsizlik U_I , 2.10^{-6} mertebelerinde gerçekleştiğinden ihmal edilmiş ve nümerik belirsizlik U_N ’nin direkt olarak ağ yapısı belirsizliği U_G ’ye eşit olduğu kabul edilmiştir. Bu durumda nümerik belirsizlik $U_N=U_G=0.0277$ şeklinde gerçekleşmiştir. Yapılan bu çalışma ile, esas model (Ağ Yapısı 2) ile elde edilen sonuçtaki belirsizlik değeri belirlenmiş ve HAD yaklaşımı ile söz konusu sınır şartlarındaki kaldırma katsayısı değeri C_L , **0.663 ± 0.0277 (± 4.2)** olarak hesaplanmıştır.

Karşılaştırmalı hata değeri E ise Denklem 1’deki gibi hesaplanır:

$$E = |D - S| \quad (1)$$

Burada D deney sonucunu, S ise esas model (S_{G_2}) ile elde edilen analiz sonucunu ifade etmektedir. Tablo 4’te bu ifadeler dikkate alınarak belirlenmiş doğrulama (validation) parametreleri verilmiştir.

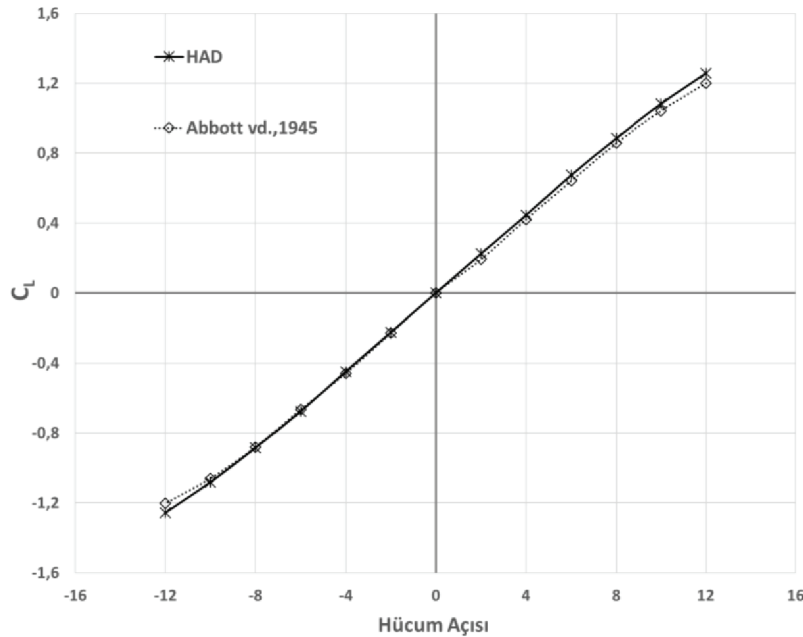
Tablo 4. Analizler için doğrulama parametreleri

Deney (D)	Analiz (S_{G_2})	Hata (E)	% Hata (E)
0.642	0.663	0.021	3.3

Ağ yakınsama çalışması sonucunda hesaplanan hata değerinin, gerçekleşen nümerik belirsizlik değerinden küçük olmasıyla ($E < U_N$) ağ yapısı doğrulanmış olmaktadır. Böylelikle çalışma kapsamında kullanılacak olan ağ yapısı (Ağ Yapısı 2) belirlenmiştir. Bu ağ yapısında söz konusu Reynolds sayısında kanat yüzeyinde hesaplanan ortalama y^+ değeri yaklaşık '28' olarak hesaplanmıştır.

2.3. Doğrulanmış Ağ Yapısının Deney Verileriyle Karşılaştırılması

Ağ yakınsama çalışmasının ardından doğrulanmış olan ağ yapısı ile kavitasyonsuz durumda, farklı hücum açılarındaki NACA66₁-012 hidrofoili için HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 4'te gösterilmektedir. Şekil 4'te paylaşılan sonuçlar incelendiğinde doğrulanmış ağ yapısının neredeyse bütün hücum açılarında deneyle uyumlu sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 4. Kaviteyonsuz durumdaki sonuçların karşılaştırılması (Abbott vd., 1945)

3. Kaviteyonsuz Hidrofoil HAD Analizleri

Uygun ağ yapısının belirlenmesinin ardından bu bölümde 6° hücum açısına sahip, orijinal ve modifiye edilmiş NACA66₁-012 hidrofoilleri etrafındaki kaviteyonsuz akışın HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu hücum açısının tercih edilmesinin nedeni, kaviteyon oluşumunun düşük açılara görece daha fazla gerçekleşecek olmasıdır. Daha yüksek hücum açılarındaki ise akım ayrılmaları, girdap kopmaları gibi zamana oldukça bağlı oluşumlar baskınlaşacağından zamandan bağımsız analiz yaklaşımı gerçekçi olmayacaktır. Analizler, bir önceki bölümde uygulanan HAD yaklaşımından farklı olarak kaviteyon oluşumunu modelleyebilmek adına zamana bağlı ve çift fazlı olarak gerçekleştirilmiştir. Kaviteyon oluşumu literatürde de sıklıkla rastlanan Schnerr-Sauerr kaviteyon modeli kullanılarak analiz edilmiştir. Analizler sıkıştırılmaz akış kabulü ile gerçekleştirilmiş ve k-epsilon türbülans modeli tercih edilmiştir. Bu türbülans modelinin tercih edilmesinin nedeni literatürde de benzer akış problemleri için

tercih ediliyor olmasıdır (Mortezazadeh vd., 2014, Yang vd., 2013). Sıcaklık değişiminin etkisi ihmal edildiğinden, enerji denklemleri etkinleştirilmemiştir. Tablo 5'te kavitasyonlu durumdaki HAD analizlerinde kullanılan modeller ve parametreler gösterilmektedir.

Tablo 5'te belirtilen ρ_s ve $\rho_{s,v}$ sırasıyla suyun ve su buharının yoğunluğunu μ_s ve $\mu_{s,v}$ ise sırasıyla suyun ve su buharının dinamik viskozitesini ifade etmektedir. Ölçekleme faktörü (+) ve ölçekleme faktörü (-) parametreleri ise ilgili kavitasyon modelinde sırasıyla; sıvıdan buhar fazına geçiş ile buhardan sıvı faza geçiş hızı faktörlerini ifade etmektedir. Ölçekleme faktörü (+) değerinin 1'den yüksek bir değer seçilmesi durumunda buhar oluşum hızı yükselmekte ve beraberinde kavitasyon oluşumu artmaktadır. Benzer şekilde 1'den küçük seçilmesi durumundaysa buhar oluşumu zorlaşmakta ve kavitasyon miktarı azalmaktadır. Ölçekleme faktörü (-) değerinin 1'den yüksek tercih edilmesi durumunda buhar fazından sıvı faza geçiş hızı artmakta ve oluşan buharın sıvı faza dönmesi kolaylaşmaktadır. Bu değer 1'den küçük bir değer olması durumunda oluşan buharın sıvı haline gelmesi zorlaşmaktadır. Özetle, söz konusu parametreler akışkanla ilgili olup literatürde su ile gerçekleştirilen kavitasyon çalışmalarında 1 olarak kabul edilmiştir.

Tablo 5. Kavitasyonlu HAD analizlerinde kullanılan model ve parametreler

Türbülans Modeli	k-epsilon
Zaman Adımı	1×10^{-4} s
ρ_s	997.5 kg/m ³
$\rho_{s,v}$	0.595 kg/m ³
μ_s	8.887×10^{-4} Pa-s
$\mu_{s,v}$	1.268×10^{-5} Pa-s
P_v	3170.34 Pa
V_∞	12.12 m/s
Kavitasyon Modeli	Schnerr-Sauer
Ölçekleme Faktörü (+)	1
Ölçekleme Faktörü (-)	1

Kavitasyon oluşumu boyutsuz bir katsayı olan kavitasyon sayısına (σ) bağlı olarak incelenir ve bu ifade Denklem 2'deki gibi hesaplanmaktadır:

$$\sigma = \frac{(P_0 - P_v)}{\frac{1}{2} \rho_s V_\infty^2} \quad (2)$$

Burada P_0 referans basıncı, P_v suyun buharlaşma basıncını ve V_∞ ise serbest akış hızını ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında ele alınan farklı kavitasyon sayıları, yukardaki ifade içerisinde yer alan referans basınç (P_0) değiştirilip, diğer tüm parametreler sabit tutularak elde edilmiştir.

3.1 Orijinal NACA661-012 Kavitasyonlu HAD Analizleri

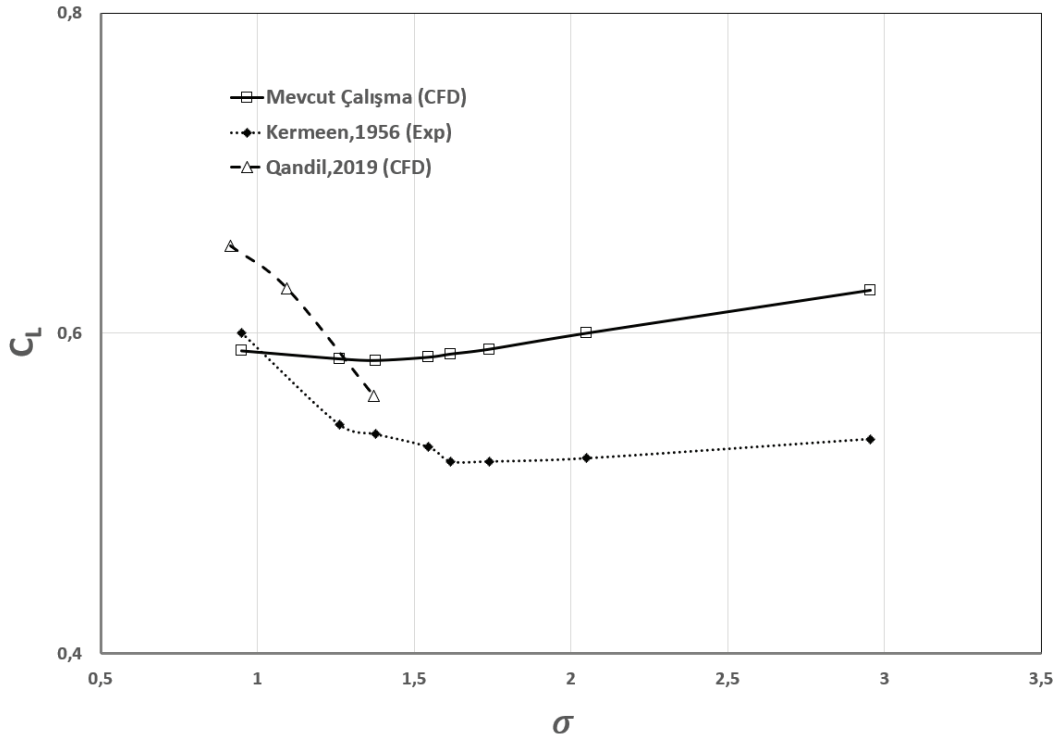
Bu kısımda 6° hücum açısına sahip orijinal NACA66₁-012 hidrofoilin, 0.950-2.955 kavitasyon sayıları aralığındaki HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu kavitasyon sayılarının seçilmesinin nedeni, analiz sınır şartlarının literatürde bulunan deneysel sınır şartları ile uyumlu olmasının hedeflenmesidir (Kermeen, 1956). Farklı kavitasyon sayıları Tablo 5'te ifade edilen değerler sabit tutulup, referans basınçlar ise Tablo 6'daki gibi değiştirilerek elde edilmiştir.

Tablo 6. Farklı kavitasyon sayıları için uygulanan referans basınç değerleri

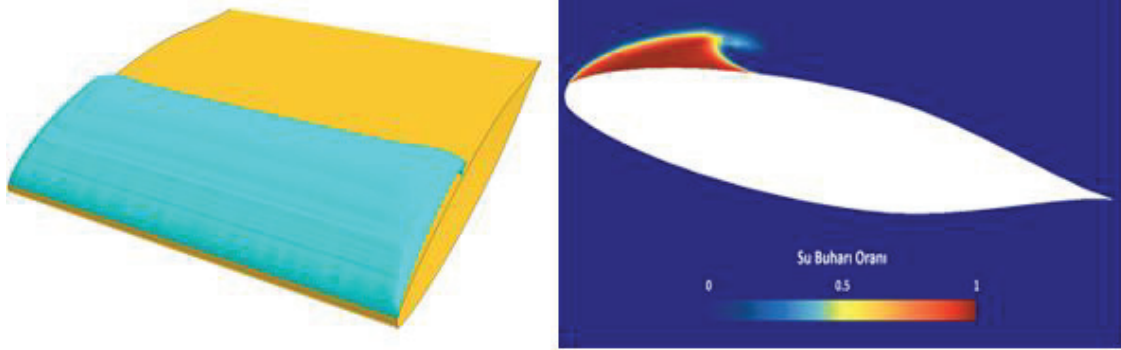
Kavitasyon Sayısı (σ)	Referans Basınç (kPa)
0.950	73.602
1.261	96.659
1.378	105.333
1.545	117.714
1.617	123.052
1.739	132.097
2.048	155.006
2.955	222.250

Şekil 5'te söz konusu sınır şartlarında gerçekleştirilen HAD analizlerinin, deneysel sonuçlarla ve literatürde bulunan ve HAD yaklaşımı uygulanan başka bir çalışmanın sonuçları ile karşılaştırmaları görülmektedir (Qandil vd., 2019). Şekil 5 incelendiğinde mevcut çalışmada uygulanan HAD yaklaşımı ile özellikle düşük kavitasyon sayılarında (yüksek kavitasyon riski olan bölgede) literatürdeki sonuçlarla uyumlu sonuçlar elde edilmektedir.

Şekil 6'da çalışma kapsamında kavitasyon riski en yüksek olan 0.95 kavitasyon sayısındaki analiz sonrası görseller paylaşılmıştır. Görsellerden de anlaşılacağı üzere hidrofoil etrafında kavitasyon oluşumu beklendiği gibi, kanadın önder kenar kısmında ve emme yüzeyi etrafında gerçekleşmiştir. Söz konusu hücum açısında kavitasyonsuz durumdaki kaldırma katsayısı C_L **0.675** değerindeyken kavitasyonlu durumda **0.585**'e düşmüştür. Benzer şekilde kanat sürüklenme katsayısı C_D kavitasyonsuz durumda **0.0163** iken kavitasyonlu durumda **0.0297**'ye yükselmiştir.



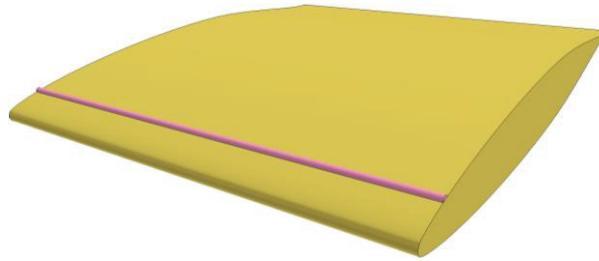
Şekil 5. Kavitasyonlu durumdaki sonuçların literatürdeki verilerle karşılaştırılması



Şekil 6. 6° hücum açısında ve 0.95 kavitasyon sayısında orijinal hidrofoil etrafındaki kavitasyon oluşumu

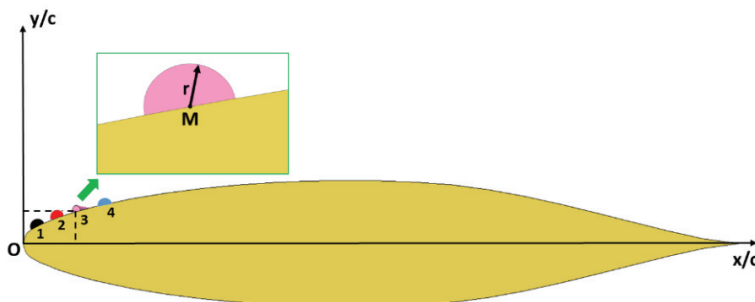
3.2 Modifiye Edilmiş NACA661-012 Kavitasyonlu HAD Analizleri

Bir önceki kısımda orijinal NACA66₁-012 hidrofoili için farklı kavitasyon sayılarında gerçekleştirilen analizlerin ardından, bu kısımda kavitasyon gözlenen bölgede yapılacak geometrik modifikasyonların kavitasyon oluşumu üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu bağlamda hidrofoilin önder kenar bölgesinde ve emme yüzeyi tarafına, Şekil 7'de de bir örneği gösterilen, kanat genişliği boyunca uzanan yarım silindirik eklentiler yerleştirilmiştir. Eklentilerin konumları, kavitasyonun genellikle yoğun olarak gerçekleştiği emme yüzeyi tarafında %10 kord uzunluğu bölgesinde 4 ayrı istasyon olacak şekilde tercih edilmiştir. Yarıçap büyüklükleri ise mevcut çalışmada sırasıyla 0.3, 0.4 ve 0.5 mm değerlerini sağlayacak şekilde oluşturulmuştur.



Şekil 7. Yarım silindirik eklentiye sahip örnek hidrofoil modeli (Eklenti 9)

Söz konusu yarım silindirik eklentilerin değişken parametreleri kanat kesiti üzerindeki konumları ve taban yarıçapları olup, kesit üzerinde Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 8. Yarım silindirik eklentilerin değişken parametrelerinin gösterimi

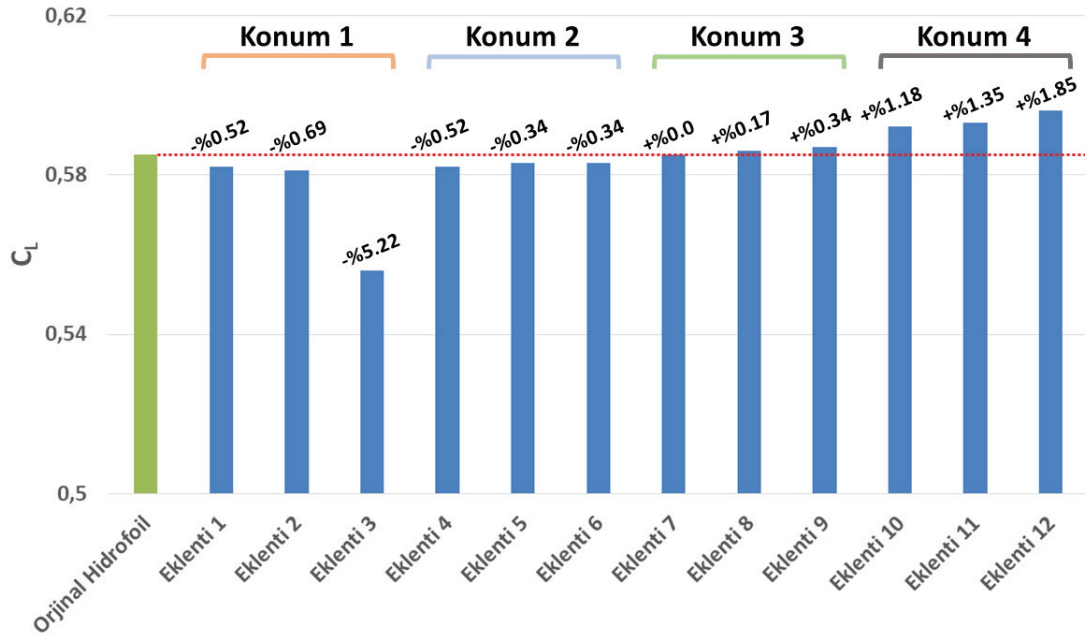
Tablo 7. Silindirik eklentilerin konumları ve yarıçapları

Konum	Model	x/c	y/c	r/c
1	Eklenti 1	0.025	0.01808	3.57×10^{-3}
	Eklenti 2	0.025	0.01808	4.76×10^{-3}
	Eklenti 3	0.025	0.01808	5.95×10^{-3}
2	Eklenti 4	0.050	0.02496	3.57×10^{-3}
	Eklenti 5	0.050	0.02496	4.76×10^{-3}
	Eklenti 6	0.050	0.02496	5.95×10^{-3}
3	Eklenti 7	0.075	0.03037	3.57×10^{-3}
	Eklenti 8	0.075	0.03037	4.76×10^{-3}
	Eklenti 9	0.075	0.03037	5.95×10^{-3}
4	Eklenti 10	0.100	0.03480	3.57×10^{-3}
	Eklenti 11	0.100	0.03480	4.76×10^{-3}
	Eklenti 12	0.100	0.03480	5.95×10^{-3}

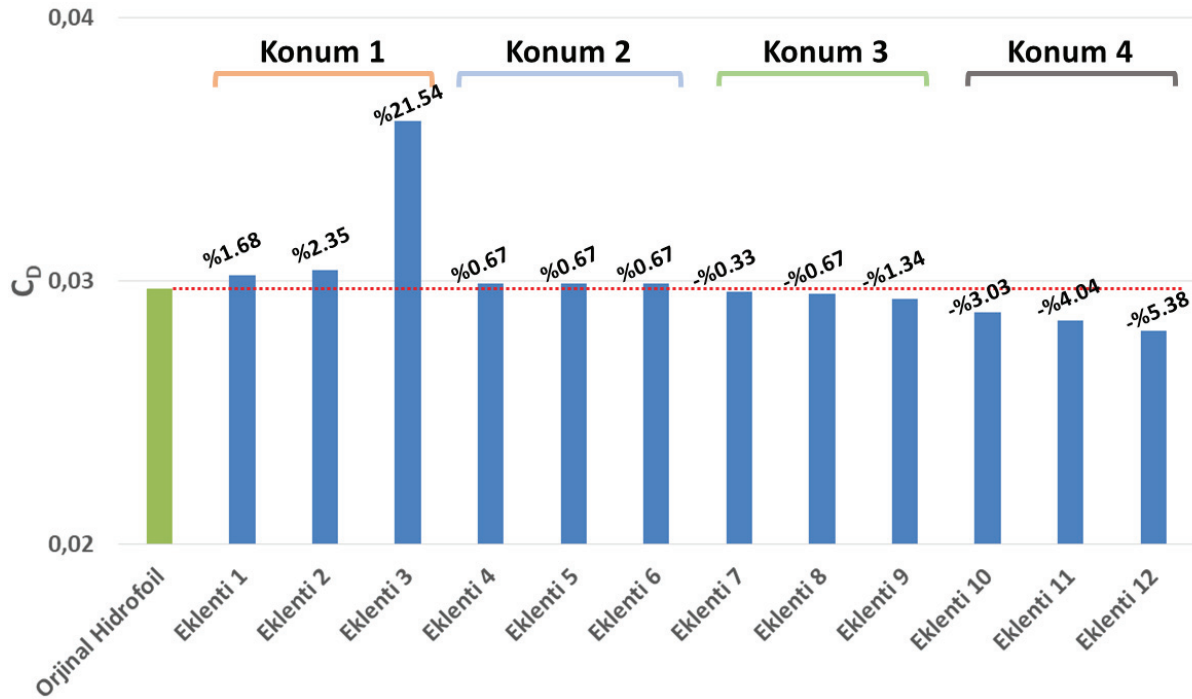
Tablo 7’de merkez konumları ve yarıçapları verilen yarım silindirik eklentiler yapılarak 12 farklı NACA66₁-012 hidrofoil geometrisi oluşturulmuştur. Tablo 7 incelendiğinde yapılan eklentilerin 4 farklı konumda ve her konumda 3 ayrı yarıçap değerine sahip olduğu görülebilmektedir. Böylece eklentilerin konumlarının ve çaplarının kavitasyon oluşumu üzerindeki etkilerinin yorumlanabilmesi hedeflenmiştir. Oluşturulan 12 hidrofoilin, 6° hücum açısında, bir önceki kısımdaki orijinal hidrofoil analizlerinde uygulanan HAD yaklaşımı ile 1.545 kavitasyon sayısındaki analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde kanat kaldırma ve sürüklenme katsayıları ile birlikte, kavitasyon oluşum miktarını belirleyebilmek adına akış çevresi içerisinde oluşan su buharı hacimleri de hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ise Tablo 8’de paylaşılmıştır.

Tablo 8. Eklentili hidrofoiller için 1.545 kavitasyon sayısı için elde edilen sonuçlar

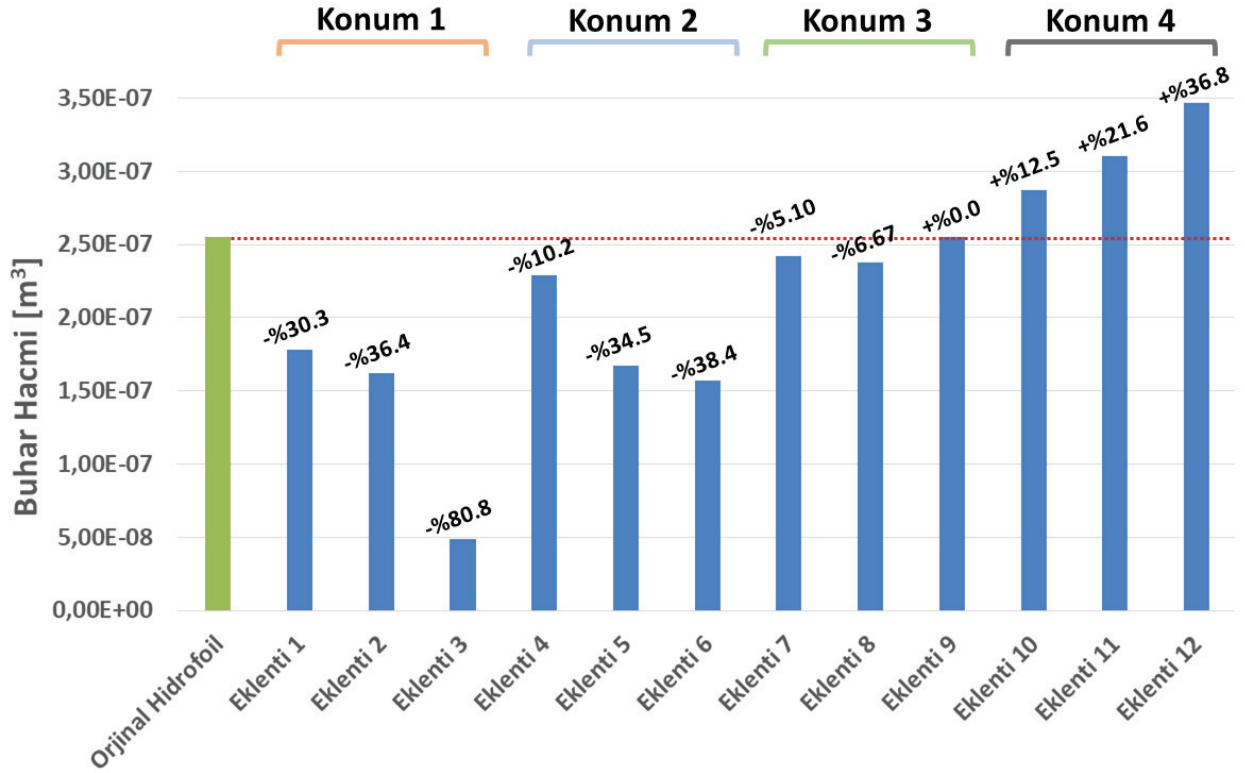
Konum	Model	C_L	C_D	C_L/C_D	Buhar Hacmi [m ³]
-	Orijinal	0.585	0.0297	19.7	2.55×10^{-7}
1	Eklenti 1	0.582	0.0302	19.3	1.78×10^{-7}
	Eklenti 2	0.581	0.0304	19.1	1.62×10^{-7}
	Eklenti 3	0.556	0.0361	15.4	4.89×10^{-8}
2	Eklenti 4	0.582	0.0299	19.5	2.29×10^{-7}
	Eklenti 5	0.583	0.0299	19.5	1.67×10^{-7}
	Eklenti 6	0.583	0.0299	19.5	1.57×10^{-7}
3	Eklenti 7	0.585	0.0296	19.8	2.42×10^{-7}
	Eklenti 8	0.586	0.0295	19.9	2.38×10^{-7}
	Eklenti 9	0.587	0.0293	20.0	2.55×10^{-7}
4	Eklenti 10	0.592	0.0288	20.6	2.87×10^{-7}
	Eklenti 11	0.593	0.0285	20.8	3.10×10^{-7}
	Eklenti 12	0.596	0.0281	21.2	3.47×10^{-7}



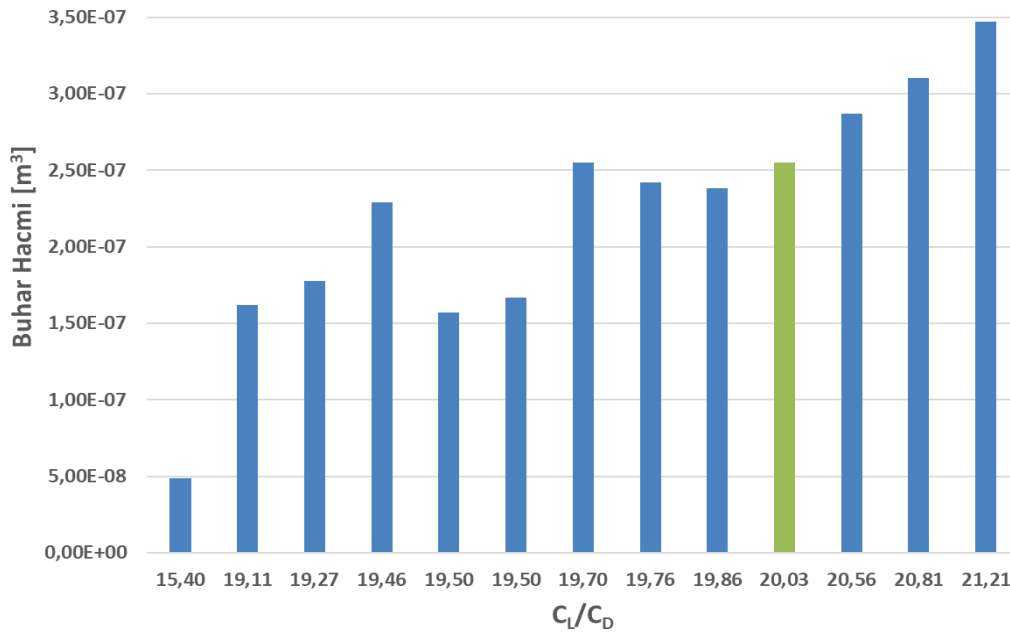
Şekil 9. 1.545 kavitasyon sayısında modifiye edilmiş hidrofiller için hesaplanan kanat kaldırma katsayıları



Şekil 10. 1.545 kavitasyon sayısında modifiye edilmiş hidrofiller için hesaplanan kanat sürüklenme katsayıları



Şekil 11. 1.545 kavitasyon sayısında modifiye edilmiş hidrofiller etrafında oluşan su buharı hacimleri



Şekil 12. 1.545 kavitasyon sayısında farklı kanat verimi değerlerinde gerçekleşen su buharı hacimleri

Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11’de eklentili hidrofoiller için kavitasyonlu durumda elde edilen kanat kaldırma, sürüklenme katsayıları ve hidrofoil etrafında oluşan su buharı hacimlerinin orijinal hidrofoil ile karşılaştırmalı grafikleri görülmektedir. Şekil 12’de ise çalışma kapsamında incelenen hidrofoillerde farklı kanat verimlerinde ortaya çıkan su buharı hacimleri gösterilmiştir. Öncelikle belirtmek gerekir ki kavitasyon oluşumu kavitasyonsuz duruma göre, orijinal hidrofoil de dâhil olmak üzere tüm hidrofoillerde kaldırma katsayısını düşürmekte ve sürüklenme katsayısını artırmaktadır. Sonuçlar

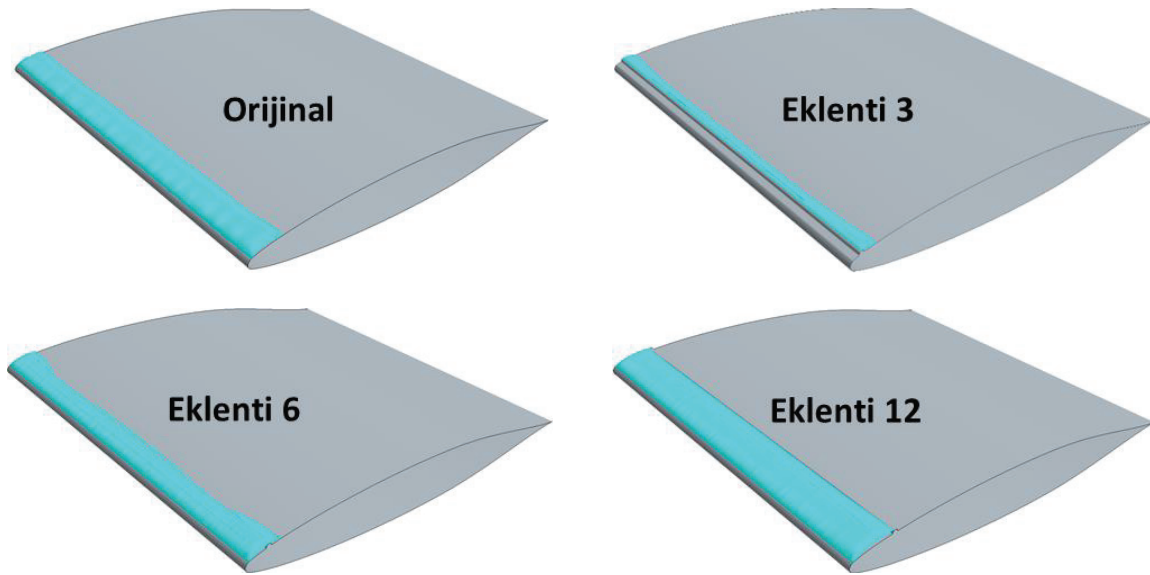
bölümünde çalışma kapsamında orijinal hidrofoile yapılan eklentilerle, bu olumsuz durum için yapılabilecek iyileştirmeler araştırılmıştır.

4. Akım Görüntüleri ve Bilimsel Tartışma

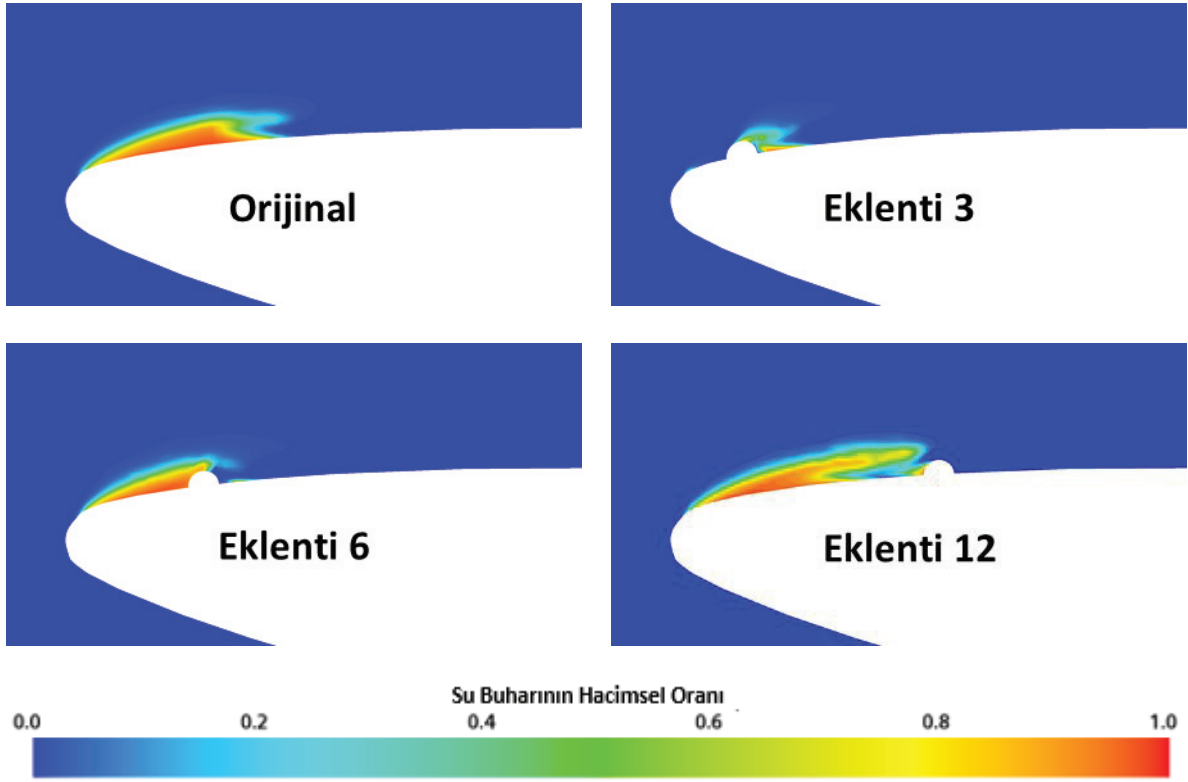
Karşılaştırmalı grafikler incelendiğinde kanat kaldırma katsayısı C_L , silindirin merkezi kuyruk kısmına doğru yaklaştıkça artmakta ve en yüksek haline 4 numaralı konumda ulaşmaktadır. 1 numaralı konuma yerleştirilen eklentiler kaldırma katsayısını görece düşürmektedir. Bununla birlikte kanat sürüklenme katsayısı C_D ise silindirin merkezinin kuyruk kısmına doğru ilerlemesiyle düşmektedir. Benzer şekilde en düşük sürüklenme katsayısı değerleri 4. Konumda gerçekleşmektedir. 1 numaralı konuma yerleştirilen eklentiler ise sürüklenme katsayısını görece artırmaktadır. En fazla su buharı da eklentinin 4. Konumda yer aldığı hidrofoillerde gerçekleşmiştir. Eklentilerin 1. Konuma yerleştirdiği hidrofoillerde ise buhar oluşumunda azalma görülmektedir.

Silindirik eklentilerin taban yarıçaplarının büyümesi 1. Konumda kaldırma katsayısını düşürürken, diğer konumlarda bir miktar artışa neden olmuştur. Benzer şekilde söz konusu yarıçapın artması 1. Konumda sürüklenme kuvvetinde artışa neden olurken, diğer konumlarda azalma sağlamıştır. Buhar oluşumu bakımından silindirin çapının artması 1. ve 2. konumlarda kavitasyon miktarını azaltırken 3. konumda önemli bir etki göstermemiş, 4. konumda ise kavitasyon oluşumunu artırmıştır.

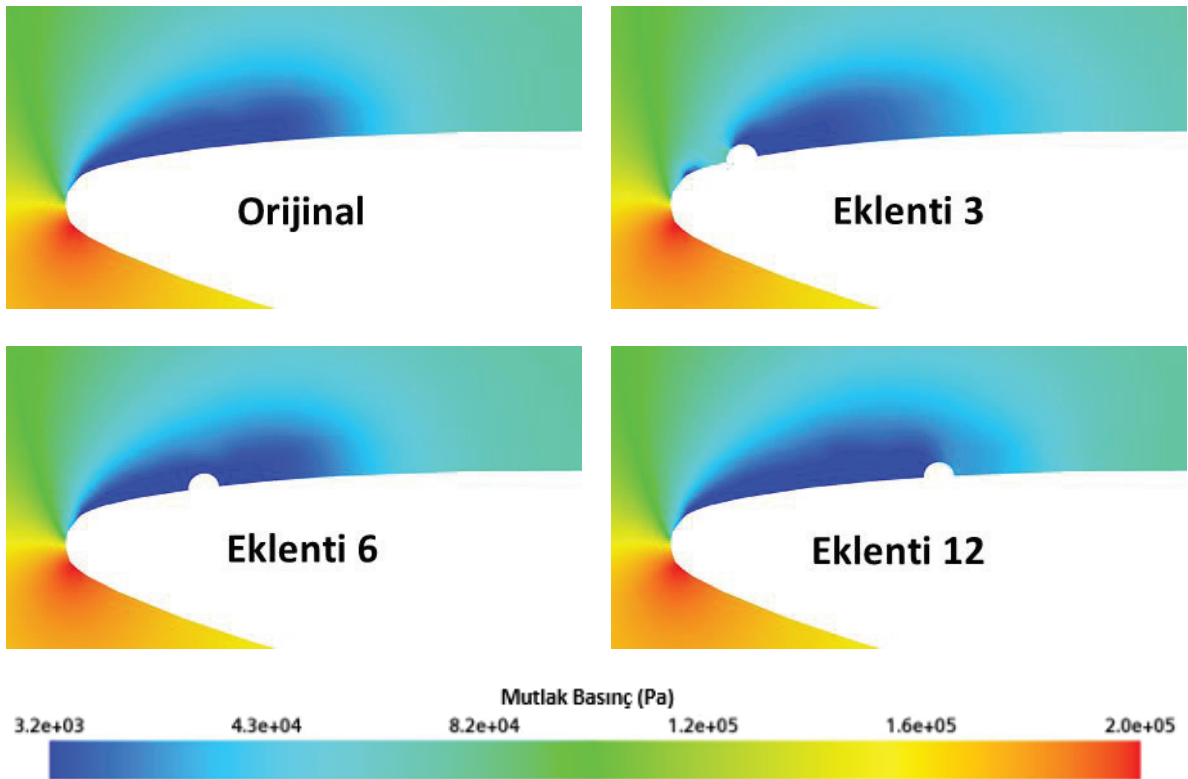
Sözü geçen karşılaştırmaları daha detaylı yapabilmek adına analiz sonrası görsellerinden faydalanılmıştır. Orijinal hidrofoil ile birlikte incelenen performans parametrelerinde önemli değişimlerin gerçekleştiği Eklenti 3 ve Eklenti 12 hidrofoillerinin analiz sonrası görselleri oluşturulmuştur. Ayrıca hidrodinamik performansı orijinal hidrofoil ile benzerlik gösteren ancak buhar oluşumu orijinal modele göre oldukça düşük olan Eklenti 6 hidrofoili de incelemeye dâhil edilmiştir.



Şekil 13. Seçilen hidrofoiller etrafındaki kavitasyon oluşumu



Şekil 14. Seçilen hidrofoillerin kanat kesiti üzerindeki buhar fazı dağılımları



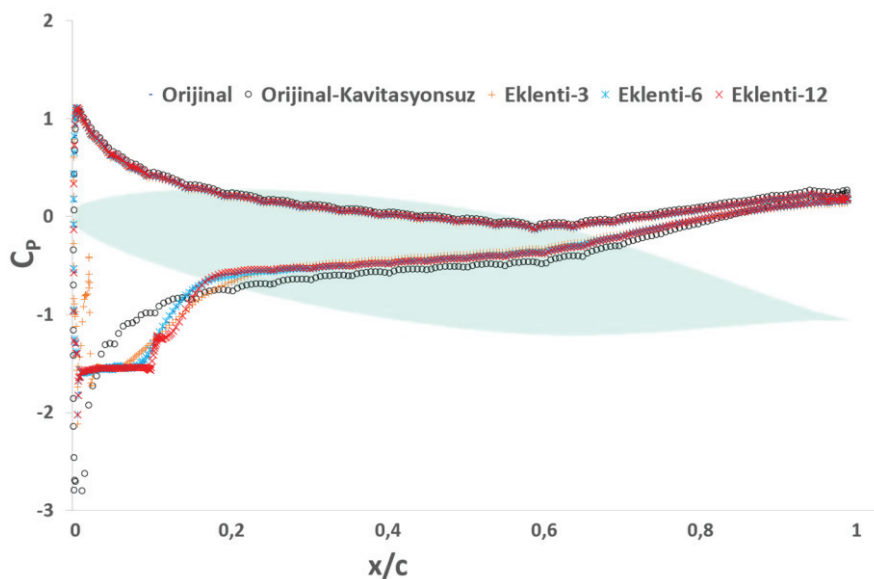
Şekil 15. Seçilen hidrofoillerin kanat kesiti üzerindeki mutlak basınç dağılımları

Şekil 13 incelendiğinde en fazla kavitasyon oluşumunun Eklenti 12’de, en az kavitasyon oluşumunun ise Eklenti 3’te olduğu görülebilmektedir. Eklenti 6’da ise kavitasyon oluşumunun orijinal hidrofoile göre daha az olduğu belirlenmiştir. Şekil 14’te paylaşılan buhar fazı dağılımları dikkate alındığında da

buhar miktarının en fazla Eklenti 12’de olduğu görülebilmektedir. Söz konusu görselde Eklenti 3 modelindeki buhar oluşumun oldukça düşük olduğu anlaşılmaktadır. Eklenti 6 modelindeki kavitasyon oluşumu ise orijinal hidrofoile görece daha azdır. Kavitasyonun varlığı bütün durumlar için kavitasyonsuz duruma görece kanat verimliliğini düşürmektedir ancak Şekil 12’de görüleceği üzere buhar miktarındaki artışın kanat verimliliğini artırdığı görülmüştür. Bu çalışmadaki buhar hacmi parametresi tüm akış çevresi için hesaplandığından (kanattan uzak bölgeler de dahil), kanat bazında incelenen diğer hidrodinamik parametrelerin yalnızca oluşan buhar miktarıyla irdelenmesi sağlıklı olmayacaktır.

Hidrofoillerde gerçekleşen farklı kanat kaldırma ve sürüklenme katsayılarının nedenlerini araştırmak için Şekil 15 ve Şekil 16’da paylaşılan mutlak basınç dağılımlarının değerlendirilmesi faydalı olacaktır. Aşağıda her model için yapılan çıkarımlar sıralanmıştır:

- En yüksek kaldırma katsayısının olduğu Eklenti 12 modeli etrafında elde edilen mutlak basınç dağılımı incelendiğinde, kanadın emme yüzeyinde oluşan düşük basınç bölgesinin orijinal modele göre daha büyük olduğu görülebilmektedir. Baskı yüzeylerindeki basınçların neredeyse aynı olduğu dikkate alındığında (bkz. Şekil 15 ve Şekil 16) bu durumun Eklenti 12 modelindeki kaldırma kuvvetini artırdığı belirlenmiştir. Düşük basınç bölgesinin aynı zamanda kanattan uzak bölgelerde de büyümesi, oluşan kavitasyon miktarını artırmıştır. Emme yüzeyindeki basınç düşüşü, hidrofoilde oluşan sürüklenme katsayısını da bir miktar düşürmüştür.
- Eklenti 3 modelinde emme yüzeyine yerleştirilen eklenti, Şekil 15 ve Şekil 16’da de görülebileceği üzere söz konusu bölgede basınç artışına neden olarak kaldırma kuvvetini azaltmıştır. Buna neden olarak söz konusu eklentinin yüksek akışkan hızı bölgesinde yavaşlatıcı bir etki göstermesi ve buna bağlı olarak o bölgedeki basıncı artırması gösterilebilir. Söz konusu bölgedeki basıncın artması oluşan kavitasyon miktarını azaltırken, hidrofoilin sürüklenme katsayısını ciddi oranda artırmıştır.
- Eklenti 6 modelinde kanat yüzeyindeki basınç dağılımı orijinal hidrofoil ile çok benzer gerçekleşmiş ve dolayısıyla kanatta orijinal model ile çok yakın kaldırma ve sürüklenme kuvveti oluşmuştur. Bununla birlikte eklentinin ardında kalan bölgedeki basınç orijinal hidrofoile görece artmış ve bu durum kavitasyon miktarında azalmaya neden olmuştur.



Şekil 16. Hidrofoillerin kanat kesitleri üzerinde elde edilen boyutsuz basınç katsayıları

5. Sonuçlar

Mevcut çalışma kapsamında orijinal ve modifiye edilmiş NACA66₁-012 kanat profillerine sahip hidrofoillerin, 6° hücum açısındaki kavitasyon karakteristikleri incelenmiştir.

Öncelikli olarak çalışmada uygulanan HAD yaklaşımı, orijinal hidrofoil için literatürde bulunan verilerle doğrulanmıştır. Daha sonrasında orijinal hidrofoile kanat kesiti üzerinde farklı konumlarda ve yarıçaplarda silindirik eklentiler yerleştirilmiştir. Doğrulanmış HAD yaklaşımı ile analizler gerçekleştirilmiş ve yapılan geometrik modifikasyonların kavitasyon oluşumuna ve buna bağlı olarak hidrodinamik karakteristiklere olan etkileri araştırılmıştır. Farklı çapta ve konumdaki silindirik eklentilerin bir kısmının kavitasyon oluşumunu azalttığı, bir kısmının önemli bir etki yaratmadığı ve bir kısmının da olumsuz etki yaratarak kavitasyon miktarını artırdığı görülmüştür. Bununla birlikte bir hidrofoilin performansını belirleyen kaldırma ve sürükleme kuvvetlerinin de farklı eklentilerle olumlu veya olumsuz yönde değişebildiği görülmüştür.

Unutulmaması gerekir ki, bu çalışmada yalnızca NACA66₁-012 kanat profiline sahip hidrofoilin 6° hücum açısındaki durumu ele alınmıştır. Dolayısıyla çalışma kapsamında yapılan çıkarımlar yalnızca söz konusu kanat profili ve hücum açısı için geçerli olacaktır. Farklı bir kanat profili veya hücum açısında uygulanacak benzer modifikasyonlar farklı etkiler yaratabilir. Ya da kavitasyon oluşumunu engellemek adına herhangi bir geometrik modifikasyon uygulamadan farklı bir kanat profili tercih edilebilir. Bu çalışmada asıl vurgulanmak istenen, mevcut bir kanat profiline yapılacak küçük modifikasyonlarla kanat profilini değiştirmeden kavitasyonun olumsuz etkilerinin iyileştirilebildiğidir. Çalışmadan elde edilen çıkarımlarla yapılacak gelecek çalışmalarda, farklı geometride veya sayıda eklentiye sahip hidrofoillerin birden fazla hücum açısındaki kavitasyon davranışları incelenebilecek ve gerekli iyileştirmeler yapılabilecektir.

Referanslar

Usta, O., Aktaş, B., Maasch M., Turan O., Atlar M. and Korkut E., (2017). A Study On the Numerical Prediction of Cavitation Erosion for Propellers. Fifth International Symposium on Marine Propulsion smp'17, Espoo, Finland, June 2017.

Sezen S, Kinaci O.K., (2019). Incompressible Flow Assumption in Hydroacoustic Predictions of Marine Propellers. Ocean Eng 186:106138.

Lou B., Ciu H., (2021). Fluid–Structure Interaction Vibration Experiments And Numerical Verification Of A Real Marine Propeller. Polish Maritime Research 3 (111) 2021 Vol. 28; Pp. 61-7510.2478/Pomr-2021-0034

Stern, F., Wilson, R. V., Coleman, H. W. and Paterson, E. G., 2001. Comprehensive approach to verification and validation of CFD simulations –Part 1: methodology and procedures, Journal of Fluids Engineering –Transactions of ASME, 123(4), p. 793-802.

Abbott, I.H., von Doenhoff, A.E., Stivers, L.S. (1945). NACA Report No. 824 - Summary of Airfoil Data, pp. 372-386.

Mohammad D. Qandil¹, Tarek Elgammal, Ahmad I. Abbas, Ahmad I. Abdelhadi and Ryoichi S. Amano (2019). Predicting the Cavitation Phenomena Over the Hydrofoil: CFD Validation.

Kermeen, R.W. (1956). Water Tunnel Tests of THE NACA 661-012 HYDROFOIL IN NONCAVITATING AND CAVITATING FLOWS. Hydrodynamics Laboratory California Institute of Technology. Pasadenamontery, CA

Kermeen, R.W. (1956). Water Tunnel Tests of THE NACA 4412 AND WALCHNER PROFILE 7 HYDROFOILS IN NONCAVITATING AND CAVITATING FLOWS. Hydrodynamics Laboratory California Institute of Technology. Pasadenamontery, CA.

Moretzadeh, M., Katal, A., & Javadi, Khodyar. (2014). Cavitation Control on Hydrofoils. Proceedings of the International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow.

Havaldar, S.N., Pawar, S., Lele, A., Pradhan, R. & Rishi, A. (2015). Experimental Investigation of Lift for NACA 2412 Airfoil without Internal Passage with NACA 2412 Airfoil with Internal Pasage in a Subsonic Wind Tunnel. Journal of Aerospace Engineering & Technology, 5 (2).

Sedlar, M.D., Elgammal, T., Abbas, A.I., Abdelhadi, A.I. & Amano, R.S.(2019). Predicting the Cavitation Phenomena Over the Hydrofoil: CFD Validation. AIAA Scitech 2019 Forum.

Yang, J., Zhou, L., Wang, Z.W., Zhi, F.L. (2013). The effect of cavitation on the hydrofoil dynamic characteristics. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 52(6).