**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# SUALTI AKINTI TÜRBİN KANATLARINA UYGUN SÜPERKAVİTASYON YAPAN HİDROFOİL KESİTLERİNİN HİDRODİNAMİK PERFORMANSLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Volkan ÇAKIR**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı**

**HAZİRAN 2016**

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# SUALTI AKINTI TÜRBİN KANATLARINA UYGUN SÜPERKAVİTASYON YAPAN HİDROFOİL KESİTLERİNİN HİDRODİNAMİK PERFORMANSLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Volkan ÇAKIR**
**508141025**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şakir BAL**

**HAZİRAN 2016**

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün **508141025** numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Volkan ÇAKIR**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"SUALTI AKINTI TÜRBİN KANATLARINA UYGUN SÜPERKAVİTASYON YAPAN HİDROFOİL KESİTLERİNİN HİDRODİNAMİK PERFORMANSLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Şakir BAL** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Emin KORKUT** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Fahri ÇELİK** .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi : 2 Mayıs 2016**
**Savunma Tarihi : 3 Haziran 2016**

*Anneme, Babama ve Eşime,*

## ÖNSÖZ

Çalışmam süresince yardımlarını eksik etmeyen, yol gösteren hocam Prof. Dr. Şakir BAL'a, tüm manevi, lojistik ve teknik desteği için de değerli insan Doç. Dr. Bahadır UĞURLU'ya teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca desteğini hiç esirgemeyen aileme ve son 9 aydır desteğini hiç esirgemeyen anlayışlı eşime de şükranlarımı sunarım.

Tez süresinde destek olan BAP biriminin tüzel şahsında devletime teşekkür ederim.

Haziran 2016

Volkan ÇAKIR
(Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisi)

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

**ÖNSÖZ** ..... **vii**
**İÇİNDEKİLER** ..... **ix**
**KISALTMALAR** ..... **xi**
**SEMBOLLER** ..... **xiii**
**ÇİZELGE LİSTESİ** ..... **xv**
**ŞEKİL LİSTESİ** ..... **xvii**
**ÖZET** ..... **xix**
**SUMMARY** ..... **xxi**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
1.1 Tezin Amacı ..... 2
1.2 Tezin Kapsamı ..... 3
1.3 Literatür Özeti ..... 4
**2. KAVİTASYON – SÜPERKAVİTASYON** ..... **7**
2.1 Kavitasyon ..... 7
2.1.1 Kavitasyon çeşitleri ..... 7
2.2 Süperkavitasyon ..... 9
2.2.1 Süperkavitasyon ayrılma noktası ..... 10
2.2.2 Süperkavitasyon kapanış modeli ..... 10
2.2.3 Süperkavitasyonun etkileri ..... 12
**3. MATEMATİK FORMÜLASYON** ..... **17**
3.1 Süreklilik Denklemi ..... 17
3.2 Sınır Şartları ..... 18
**4. SAYISAL ÇÖZÜM METODU** ..... **21**
4.1 Ayrıklaştırma ..... 21
4.2 Sayısal Çözüm ..... 22
4.3 Green Fonksiyonu ve Özdeşliği ..... 23
4.4 Panel (Sınır Elemanlar) Yöntemi ..... 23
**5. SAYISAL SONUÇLAR** ..... **27**
5.1 Lineer ve Lineer Olmayan Teori Çözümünün Etkisi ..... 27
5.2 Kalınlık Etkisi ..... 30
5.3 Süperkavitasyon Boyunun Etkisi ..... 35
5.4 Hidrofoil Kesit Geometrisinin Etkisi ..... 39
5.5 Sehim Etkisi ..... 48
5.6 Fiziksel Parametrik Bir Çalışma ..... 51
**6. SONUÇ** ..... **57**
**KAYNAKLAR** ..... **61**
**EKLER** ..... **63**
**ÖZGEÇMİŞ** ..... **71**

## KISALTMALAR

**BEM** **:** Boundary Element Theory (Sınır elemanlar metodu)
**Lin** **:** Lineer
**MCT** **:** Marine Current Turbine (Sualtı akıntı türbini)
**NACA** : National Aeronautics and Space Administration
**Non. L.** **:** Lineer olmayan

## SEMBOLLER

| | |
|---|---|
| **α** | **:** Hücum Açısı |
| **c** | **:** Kiriş Uzunluğu |
| **d** | **:** Kiriş Kalınlığı |
| **l** | **:** Süperkavitasyon Boyu |
| **n** | **:** Normal |
| $\mathbf{P_s}$ | **:** Statik Basınç |
| $\mathbf{P_v}$ | **:** Buharlaşma Basıncı |
| **U** | **:** Gelen Akım Hızı |
| **σ** | **:** Kavitasyon Sayısı |
| **ϕ** | **:** Pertürbasyon Hız Potansiyeli |
| **Φ** | **:** Toplam Hız Potansiyeli |

## ÇİZELGE LİSTESİ

**Sayfa**

**Çizelge 5.1 :** Lineer ve lineer olmayan teori çözümlerinin kavitasyon sayısına (σ) etkisi. ..... 29
**Çizelge 5.2 :** NACA 16006, 12 ve 15 için 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda kavitasyon sayıları. ..... 32
**Çizelge 5.3 :** Maksimum kalınlık oranının kaldırma ve direnç katsayıları oranına(Cl/Cd) etkisi..... 34
**Çizelge 5.4 :** NACA16006'nın çeşitli süperkavitasyon boylarında ki kavitasyon sayıları..... 38
**Çizelge 5.5 :** NACA0024, S-814 ve NACA0024'e S-814 sehimi uygulanmış 3 kesitin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda kavitasyon hacmi değerleri... 41
**Çizelge 5.6 :** Seaflow çalışma koşullarına air bazı değerler. ..... 52
**Çizelge A.1 :** S-814 kesitinin geometri değerleri ……...69

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

**Şekil 1.1 :** Süperkavitasyon yapan torpido, Shkval [2]. ..... 2
**Şekil 1.2 :** Sualtı akıntı türbini [3]. ..... 3
**Şekil 2.1 :** Tabaka kavitasyonu [19] ..... 8
**Şekil 2.2 :** Uç girdap kavitasyonu [25]. ..... 8
**Şekil 2.3 :** Süperkavitasyon [26]..... 9
**Şekil 2.4 :** Bazı süperkavitasyon parametrelerinin görseli. ..... 10
**Şekil 2.5 :** Süperkavitasyon Riabouchinsky kapanış modeli [1]. ..... 11
**Şekil 2.6 :** Süperkavitasyon Wu kapanış modeli [1]..... 11
**Şekil 2.7 :** Süperkavitasyon Tulin spiral vortices kapanış modeli [1]. ..... 12
**Şekil 2.8 :** Süperkavitasyon End-parabola kapanış modeli. ..... 12
**Şekil 2.9 :** Pervane kavitasyonu [29]. ..... 14
**Şekil 2.10 :** Kavitasyonun pervane yüzeyine etkisi [30]. ..... 14
**Şekil 2.11 :** Süperkavitasyon yapan sualtı akıntı türbin pervanesi [31]. ..... 15
**Şekil 2.12 :** Süperkavitasyon yapan sualtı akıntı türbini pervanesi diagramı [31]. ... 15
**Şekil 3.1 :** Hidrofoil kesitine ait bazı büyüklükler..... 17
**Şekil 4.1 :** Kosinüs ayrıklaştırması [23] ……21
**Şekil 4.2 :** S814 hidrofoil kesitinin 30 ve 150 panel olarak ayrıklaştırılması..... 25
**Şekil 5.1 :** NACA 0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda lineer ve lineer olmayan çözümlerin karşılaştırılması. ..... 28
**Şekil 5.2 :** NACA 16006 hidrofoil kesitinin 1.1-1.4 l/c süperkavitasyon boylarında lineer ve lineer olmayan çözümün kavitasyon sayıları sonuçlarının karşılaştırılması..... 29
**Şekil 5.3 :** NACA 16006 ve 16012 hidrofoil kesitlerinin 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda lineer ve lineer olmayan çözümün kavitasyon sayısı sonuçlarının karşılaştırılması..... 30
**Şekil 5.4 :** NACA 16006 ve 16012 hidrofoillerinin 1.4 l/c süperkavite durumundaki profil görünüşü. ..... 31
**Şekil 5.5 :** Kalınlığın kavitasyon sayısı üzerinde etkisi. ..... 31
**Şekil 5.6 :** Kalınlığın kaldırma katsayısı (Cl) üzerinde etkisi..... 32
**Şekil 5.7 :** Kalınlığın direnç katsayısı (Cd) üzerinde etkisi. ..... 33
**Şekil 5.8 :** Kalınlığın, kaldırma ve direnç katsayısı oranına (Cl/Cd) etkisi. ..... 33
**Şekil 5.9 :** Kalınlığın süperkavitasyon hacmine etkisi..... 35
**Şekil 5.10 :** Süperkavitasyon boyunun NACA16006 hidrofoil kesitinin kavitasyon sayısına etkisi..... 36
**Şekil 5.11 :** Süperkavitasyon boyunun NACA16012 hidrofoil kesitinin kavitasyon sayısına etkisi..... 36
**Şekil 5.12 :** Süperkavitasyon boyunun NACA 16006'nın Cl ve Cd değerlerine etkisi. ..... 37
**Şekil 5.13 :** Süperkavitasyon boyunun NACA 16012'nin Cl ve Cd değerlerine etkisi. ..... 38

**Şekil 5.14 :** NACA 16006 hidrofoil kesitinin, 1.1 ve 1.4 l/c süperkavitasyon boylarında ki Cl/Cd değerleri. ..... 39
**Şekil 5.15 :** NACA 0024 ve S814 hidrofoil kesitleri. ..... 40
**Şekil 5.16 :** NACA 0024 ve S814 profil kesitlerinin 1.4 l/c süperkavitasyon durumunda şekli. ..... 40
**Şekil 5.17 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kavitasyon numaralarının karşılaştırılması. ..... 42
**Şekil 5.18 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kavitasyon hacimlerinin karşılaştırılması. ..... 42
**Şekil 5.19 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kaldırma ve direnç katsayılarının karşılaştırılması. ..... 43
**Şekil 5.20 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kaldırma ve direnç katsayıları oranlarının karşılaştırılması. ..... 44
**Şekil 5.21 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 profil şekli. ..... 45
**Şekil 5.22 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin kavitasyon numaralarının karşılaştırılması. ..... 46
**Şekil 5.23 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin süperkavitasyon hacimlerinin karşılaştırılması. ..... 46
**Şekil 5.24 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin kaldırma ve direnç katsayılarının karşılaştırılması. ..... 47
**Şekil 5.25 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin kaldırma ve direnç katsayıları oranlarının karşılaştırılması. ..... 48
**Şekil 5.26 :** NACA64A012 hidrofoil kesitinin 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda profil şekli. ..... 48
**Şekil 5.27 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c profil şekli. ..... 49
**Şekil 5.28 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c kavitasyon sayıları karşılaştırılması. ..... 50
**Şekil 5.29 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c kaldırma ve direnç katsayıları karşılaştırılması. ..... 50
**Şekil 5.30 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c kaldırma ve direnç katsayıları oranlarının karşılaştırılması. ..... 51
**Şekil 5.31 :** Seaflow [35]. ..... 52
**Şekil 5.32 :** Farklı derinlik durumları için kavitasyon sayıları. ..... 53
**Şekil 5.33 :** Farklı derinlikler için süperkavitasyon profil şekli. ..... 54
**Şekil 5.34 :** Süperkavitasyon boyunun derinlik ile değişimi. ..... 54
**Şekil 5.35 :** Farklı derinliklerde kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları. ..... 55
**Şekil 5.36 :** Farklı derinliklerde kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları oranı. ..... 55
**Şekil 5.37 :** Farklı derinliklerde süperkavitasyon hacmi. ..... 56
**Şekil A.1 :** NACA 0012 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 8 derece hücum açısında basınç katsayıları. ..... 65
**Şekil A.2 :** NACA 0012 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 15 derece hücum açısında basınç katsayıları. ..... 65
**Şekil A.3 :** NACA 0012 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 8 ve 15 derece hücum açısında basınç katsayıları. ..... 66
**Şekil A.4 :** S-814 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 0 ve 8 derece hücum açısında basınç katsayıları. ..... 66
**Şekil A.5 :** S-814 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 0 derece hücum açısında basınç katsayıları. ..... 67

# SÜPERKAVİTASYON YAPAN HİDROFOİL KESİTLERİNİN HİDRODİNAMİK PERFORMANSLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

## ÖZET

Akışkan içerisinde hareket eden bir cismin hızı arttıkça Bernoulli prensibi gereği yerel basıncı düşer. Eğer bu düşüş, sabit sıcaklıktaki buharlaşma basıncının altına inerse akışkanın sıvı yapısı bozulmaya başlar ve o bölgelerde sıvı, gaz haline geçer buharlaşır. Bu duruma kavitasyon adı verilir. Kavitasyon buharlaşmanın, sıcaklık artırımıyla meydana gelen kavram olan kaynamanın, basıncın düşürülerek yapılması olayıdır. Bu nedenle soğuk kaynama olarak da adlandırılır.

Bazı durumlarda yerel hızlar o kadar artar ve kavitasyon boyutları o kadar büyür ki, tüm yüzeyi kaplar ve cisim kavitasyon baloncuğunun içerisinde kalır. Bu durum ise süperkavitasyon olarak adlandırılır. Süperkavitasyonu özel yapan ise, giriş ucundaki belirli bir bölge haricinde cisim ile akışkanın ilişkisinin kesilmiş olmasıdır. Yani sıvı akışkan cisim yüzeyine temas etmez.

Kısmi- ve süper-kavitasyon mühendislik uygulamalarında genel olarak istenmeyen bir durumdur. Zira sistemin hidrodinamik performansını düşürebilir, cisim üzerinde zamanla hasara yol açabilir ve gürültüye sebep verebilir. Bu sonuçlarından dolayı kısmi- ve süper-kavitasyon istenmez.

Süperkavitasyon, kavitasyon olayının artmasından meydana gelir. Süperkavitasyon durumuna gelmiş bazı hidrofoil kesitlerinde bu durum kaçınılmazdır. Çalışma şartlarından dolayı bu olaya maruz kalmaktadır.

Sualtı akıntı türbinlerinde, pervane çapları çok büyüktür ve serbest su yüzeyine yakın çalışabilmektedirler. Pervane çapının büyüklüğü yüksek teğetsel hızlara sebep olurken, serbest su yüzeyine yakın çalışmak da hidrostatik basınçtan faydalanmaya engel olur. Bu iki sonuç ise süperkavitasyona bir sebep olabilir.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, süperkavitasyon yapan hidrofoil kesitlerinin hidrodinamik performansları incelenmiş ve bazı geometrik ve hidrodinamik parametrelerin bu performansa etkileri araştırılmıştır. Sayısal analizler için bir sınır eleman yöntemi (Boundary Element Method-BEM) kullanılmıştır. Süperkavitasyon yapan hidrofoil üzerine kaynak/kuyu ve dipol dağılımı yapılarak gerekli sınır şartları sağlanmış ve sistem çözülmüştür. Sualtı akıntı türbinleri için de yöntem uygulanmıştır.

Öncelikle kalınlığın, süperkavitasyon yapan hidrofoil kesitinin hidrodinamik performansına etkisini incelemek için, kalınlıkları dışında tüm geometrik özellikleri aynı olan iki hidrofoil NACA 16006 ve 16012 kesitleri seçilmiş ve sayısal analizleri yapılmıştır.

Süperkavitasyon boyunun hidrodinamik performansa etkisini saptamak için ise 1.1 ve 1.4 l/c süperkavitasyon boyları arasında değerler sabit tutularak hesaplamalar gerçekleştirilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Hidrofoil geometrisinin performansa etkisini incelemek amacıyla ise yaklaşık aynı maksimum kalınlık oranlarına sahip NACA 0024 ve sualtı akıntı türbin kesitlerinde kullanılan S-814 hidrofoil kesitleri kullanılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır.

Ayrıca süperkavitasyon yapan hidrofoil kesitleri için iki boyutta ortaya atılmış iki teori olan lineer ve lineer olmayan teori sonuçları da karşılaştırılmıştır.

Son olarak maksimum sehim oranının etkisi de NACA64A012 hidrofili ile incelenmiş ve sehimsiz durumla karşılaştırmalar yapılıp sonuçlar elde edilmiştir.

Daha sonra ise pratikte gerçekleştirilmiş bir uygulama için yöntem uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların sualtı akıntı türbin kanat kesitleri tasarımında önemli faydalar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

## NUMERICAL INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PERFORMANCE OF SUPERCAVITATING HYDROFOIL SECTION

## SUMMARY

When a body which travels in liquid medium is accelerated, the local pressure of the medium is reduce according to Bernoulli principle. Also, if the local pressure drops below vaporization pressure at this temperature, the composition of liquid flow breaks down. This condition is called cavitation.

Cavitation that is the appearance of vapor cavities inside a homogeneous liquid medium occurs under low pressure. Cavitation generally occurs because of the increment of the local velocities which cause a decrease in the local pressure according to Bernoulli principle.

Under some conditions, occurrence of cavitation excessively increase, the hydrofoil (blade section) is engulfed in cavitation bubble. This condition is called "Supercavitation".

Under supercavity condition, the liquid do not touch the surface of hydrofoil. Therefore, actual friction and lift of the hydrofoil reduce. This is a fact which make supercavitation different from cavitation. Reduce of actual friction is positive effect of supercavitation. However, supercavitation is negative matter in engineering application because it also reduces the lift.

In some situation, supercavitation can be inevitable issue. For example, in marine current turbine (MCT), diameter of propeller can be high and they can work close to the free water surface.

High diameter causes high tangential velocities, and working close to the free water surface causes obstruct to benefit from hydrostatic pressure. These two reason, together or sole, make supercavitation to inevitable.

In this study, Boundary element method (BEM) is applied for the solution. The calculations for BEM are done by a code of supercavitating 2D (two-dimensional) panel method. This program is based on the potential theory, and it is Dirichlet-type.

The calculations include both linear and non-linear theories and the related solutions. The supercavity is assumed to be a constant pressure sheet, and it closes at its trailing edge. It is continuous at the cavity trailing edge.

The cavity detachment point on the suction side of the blade section is assumed to be known and assumed that the cavity detaches also from the pressure side at the blade section or blade trailing edge. The solution for two-dimensional blade sections is assumed to be fixed-length. In the fixed length solution, the cavity length is assumed to be known and the cavitation number is determined.

The nonlinear cavity boundary and cavitation number are determined by an iterative process, in which the dynamic boundary condition is satisfied on successive guesses of the cavity surface, and the kinematic boundary condition is used to update the surface. In the beginning of each successive iteration, the panels (elements of the discretized surface) are moved to their new positions, and the influence coefficients are recomputed. The iterations continue until both kinematic and dynamic conditions are satisfied over the computed cavity surface. The first iteration is supercavity surface of solution of the linear theory.

The flow over the hydrofoils is taken as irrotational, inviscid and incompressible according to the potential theory. The total and perturbation velocity potentials of flow around hydrofoil satisfy the Laplace equation. There are boundary conditions that should be satisfied over the hydrofoil surface.

First it is kinematic boundary condition which means that the flow must be tangential to the hydrofoil and the cavity surface.

Second, the dynamic boundary condition requires that the pressure on the cavity surface is constant and equal to vaporization pressure. This condition is satisfied by moving the hydrofoil geometry so that on the cavity surface the pressure coefficient (-CP) values are equal to the cavitation number ($\sigma$).

The third condition to be satisfied is the supercavity termination condition. This is satisfied by the end-parabola method which is similar to the cavity height model for partial cavitation.

Finally, the last boundary condition is the Kutta condition. The Kutta condition means that velocity must be finite at the trailing edge of the hydrofoil. This condition is satisfied during source and doublet distribution.

There are five parameters which is investigated to determine effect of performance of supercavitating hydrofoil section.

First parameter is maximum thickness ratio. To determine effect of maximum thickness ratio on performance of supercavitating hydrofoil section, NACA 16006 and 16012 sections are chosen and compared. All hydrodynamic and geometric properties of these two hydrofoil section is same except maximum thickness. This make possible to determine maximum thickness effect.

On purpose of investigate of effect of supercavitation length on performance, some calculation is made for supercavitation length between 1.1 and 1.4 l/c. For this calculation, NACA 16006 and NACA 16012 hydrofoil sections are used. Cavity number, lift and drag coefficients, cavity volume and shape are found for these hydrofoil sections at 1.1-1.4 l/c supercavitation length.

In an attempt to find effect of geometric properties on performance of supercavitating hydrofoil section, NACA 0024 and S-814 which is used in Marine Current Turbines (MCT) are selected. These two section have approximately same maximum thickness. On purpose of same reason, NACA 64A012, NACA 16012 and NACA 0012 hydrofoil sections are selected and compared. These hydrofoil sections have same maximum thickness ratio but maximum thickness location of these are different.

Also, solutions of linear and non-linear theory are compared. Some calculation is made and compared among theories. As known well, the nonlinear theory of supercavitating hydrofoil is linearized by Tulin. This theory had some problem but there is some correction for it. This linearized theory and non-linear theory are compared. This calculation is performed for many different combinations.

With the intent of determine effect of maximum camber ratio on performance of supercavitating hydrofoil section, NACA64A012 hydrofoil section is selected. Parabolic camber is used. Some calculations are made for with camber and without it.

# 1. GİRİŞ

Bir akışkan içerisinde, ortam basıncının, akışkanın o sıcaklıktaki buharlaşma basıncının altına düşmesiyle, akışkan parçacıkları, basıncın buharlaşma basıncının altına düştüğü yerde gaz haline geçmeye başlar, sıvının bütüncül yapısı parçalanır. Bu hadiseye "kavitasyon" adı verilir. Bu olay bazı mühendislik uygulamalarında gözlemlenebilmektedir.

Kavitasyon, genelde, akışkan içerisinde ki yerel hızlardaki artış nedeniyle, yerel basınçların düşmesinden kaynaklanır. Bernoulli ilkesi gereğince, akışkanın hızı arttığında, basıncı da düşer. Bu yüzden, akışkanın içerisinde gerçekleşen yerel hızlardaki artış, yerel basıncın düşmesine neden olarak, kavitasyon hadisesini meydana getirir.

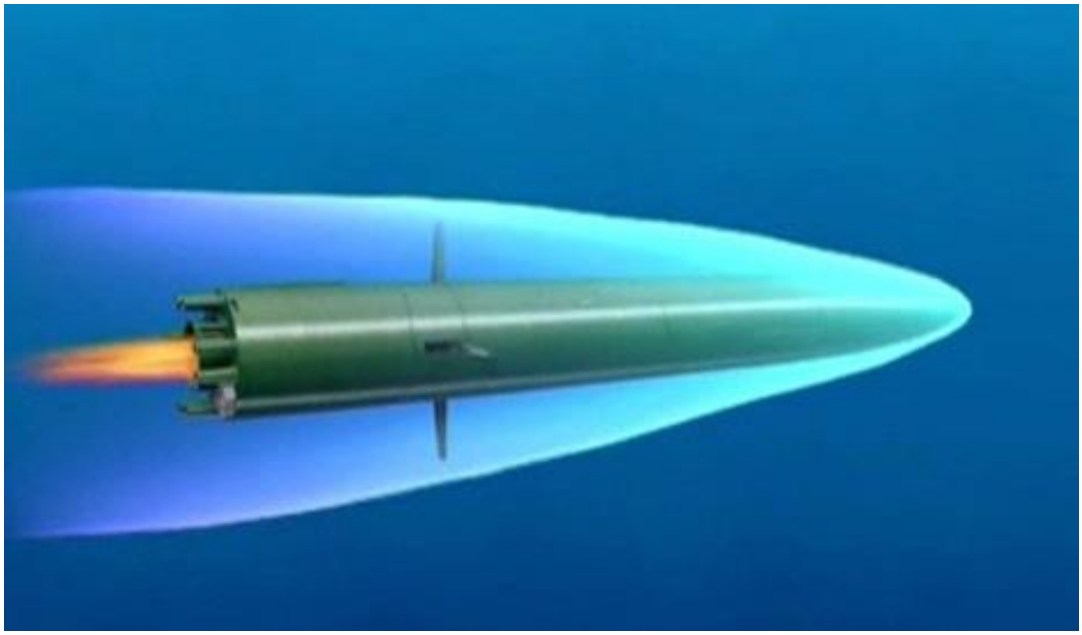
Statik ve nerdeyse statik akışkanlarda da kavitasyon hadisesi gözlemlenebilir. Akışkan depolama tankında serbest su yüzeyine etki eden bir osile basınç alanın oluşturduğu kavitasyon, buna örnek olarak verilebilir. Bu tip kavitasyon, akustik kavitasyon olarak isimlendirilir [1].

Kavitasyon, mühendislik uygulamalarında genellikle istenilmeyen bir olgudur. Ama medikal alanda faydalarından yararlanıldığı durumlar vardır. Hatta mühendislik uygulamalarında da bunun gibi örnekler vardır. Bu konuda en bilinen örnek, süperkavitasyondur.

Süperkavitasyon, akışkan içerisinde ki cismin veya hidrofilin, sadece bir kısmının değil, bir yüzeyinin veya tamamının kavitasyon kabarcığının içerisinde kalması olayıdır. Bu tür akışlarda, bağıl hızlar ve yerel basınç farkları çok yükselmiştir. Akışkan veya cisim, yüksek hızlara çıktığı zaman bu hadise kaçınılmazdır. Süperkavitasyon, kavitasyon boyunun, referans boyunu (bu çalışmada kesit boyu) geçmesi olarak da ifade edilir.

Bu hadise bazı mühendislik uygulamalarında çeşitli nedenlerle (direnci düşürmek vs.) istenir. Örnek olarak Şekil 1.1'de ki Rus süperkavitasyon yapan torpidosu Shkval

(hızlı) verilebilir. Torpido süperkavitasyon sayesinde sürtünme kuvvetinin büyük bir kısmından kurtulup yüksek hızlara çıkartılmıştır.



**Şekil 1.1 :** Süperkavitasyon yapan torpido, Shkval [2].

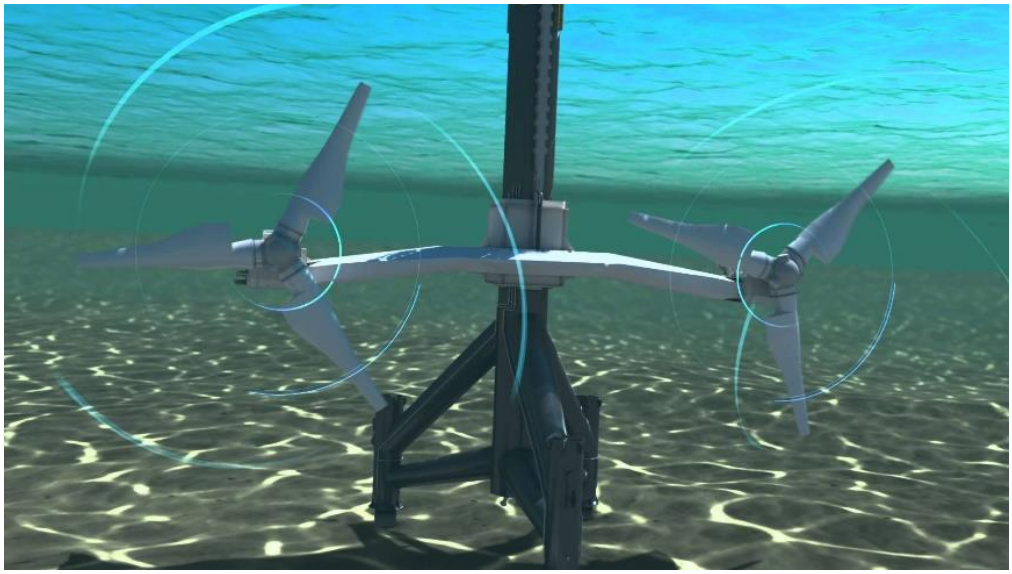
Kaldırma kuvveti istenen uygulamalarda ise süperkavitasyondan kaçınılır. Genellikle pervane veya kanat akışlarında lift veya tork istendiğinden, süperkavitasyon da bu uygulamalarda istenmeyen hadisedir. Su altı akıntı türbinlerinde meydana gelen hadise de buna örnektir. Şekil 1.2'de bir sualtı akıntı türbini gösterilmiştir.

## 1.1 Tezin Amacı

Akışkan içerisinde, çok yüksek hızlarda çalışan hidrofoillerin süperkavitasyon yapması ihtimalinin olduğu, hatta kaçınılamaz olduğu durumlar vardır. Sualtı akıntı türbinleri böyle koşullarda çalışmaktadır. Bu durumlarla, hangi şartlarda karşılaşılabileceği ve bu durumlardan mümkünse kaçınılabilmesi için gerekli veriler hesaplanmış. Eğer kaçınılamıyorsa da hidrofoilin bu şartlarda nasıl performans sergilediği incelenmiştir. Bu tez çalışmasının asıl amacı, sualtı akıntı türbinlerinde karşılaşılan süperkavitasyon olgusunu incelemektir.

Hidrofoil kesitleri olarak; NACA 4 ve 5 basamaklı serileri ve su altı akıntı türbinlerinde kullanılan S-814 profili seçilmiş ve incelenmiştir. Bu profillerin belirli parametreleri değiştirilerek, bu parametrelerin performanslarına olan etkileri

incelenmiştir. Bunların yapılmasındaki amaç, profillerin belirtilen koşullarda ki davranışlarını ve değerlerini saptamaktır.



**Şekil 1.2 :** Sualtı akıntı türbini [3].

## 1.2 Tezin Kapsamı

Bu tez kapsamında, seçilen hidrofoil kesitlerinin, farklı parametre kombinasyonlarında ve açılarında süperkavitasyon performansları incelenmiştir ve sualtı akıntı türbinleri için uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

Bu sayısal yöntem, potansiyel tabanlı bir sınır eleman (panel) yöntemi kullanarak, girilen geometrinin, verilen koşullarda ki süperkavitasyon özelliklerini çözmektedir. Bu yöntemde girdi olarak; panel sayısı, iterasyon sayısı (lineer olmayan teorinin çözümü için), süperkavitasyon boyu, süperkavitasyon başlangıç noktası, geçiş bölgesi uzunluğu, hidrofoil geometrisi (ya da kalınlıkları), sehim geometrisi, hücum açısı, kalınlık ve hidrofoil oranı, sehim ve hidrofoil oranı verilmektedir.

Çıktı olarak ise verilen durum için kavitasyon sayısı (hem lineer hem non-lineer teori için), kaldırma kuvveti katsayısı, direnç katsayısı elde edilir. Girilen ve çıktı olarak alınan tüm parametreler boyutsuzdur. Aynı zamanda hidrofoil ve üzerindeki süperkavitasyon şekli iki farklı teoriye göre elde edilir [4].

Öncelikle NACA 4 ve 5 serisi hidrofoiller ele alınmıştır. 4 Serisi olarak simetrik olan NACA 0012 ele alınmış ve parametreler değiştirilerek, etkileri elde edilen veriler

ışığında incelenmiştir. Daha sonra NACA 16006 ve 16012 incelenmiş ve kalınlık etkisi (profil sayısındaki 006 ve 012 kalınlıkları temsil etmektedir: maksimum kalınlık oranları %6 ve %12) incelenmiştir. Bu hidrofoil kesitleriyle, farklı süperkavitasyon boylarında performans değişimleri incelenmiştir. Daha sonra belirli açılarda sehim verilerek, sehimin süperkavitasyon durumunda performansa etkisi incelenmiştir.

Geometrinin süperkavitasyon durumuna etkisini incelemek amacıyla, sualtı akıntı türbinlerinin kanat kesiti olarak kullanılan S-814 hidrofoil kesiti ile kendisiyle yaklaşık aynı maksimum kalınlık oranına (%24) sahip NACA0024 simetrik hidrofoil kesiti karşılaştırılmış ve süperkavitasyon durumunda performansa etkileri incelenmiştir.

Geometrinin etkisini incelemek amacıyla aynı zamanda NACA kesitleri kendi aralarında da karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma için NACA 0012, 16012 ve 64A012 kesitleri seçilmiştir. Bu kesitler %12 maksimum kalınlık oranına sahip ve sehimsiz kesitlerdir. Bu özellikle geometrinin etkisini gözlemleyebilmeyi mümkün kılmıştır.

Ayrıca, sayısal analizler, hem Ulhman'ın lineer olmayan teorisiyle, hem de Tulin tarafından lineerleştirilen teori ile yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Bu iki çözüm arasında ki fark, çeşitli parametreler de incelenmiştir.

Daha sonra ise pratikte gerçekleştirilmiş bir çalışma için örnek olarak yöntem uygulanmıştır.

### 1.3 Literatür Özeti

"Kavitasyon" kelimesi İngiliz bilimsel literatürüne 19.yy'ın sonlarında girmiştir. Kavitasyon ile alakalı dönen makinalarla ilgili ilk tanımlama Torricelli, daha sonra da Euler ve Newton'un yaptığı görülmektedir. Kavitasyonun olumsuz etkilerinden (gemi pervaneleri için) ilk bahseden Parson (1893) olmuştur. Parson, aynı zamanda ilk kavitasyon tünelini inşa eden kişidir. Kavitasyon sayısıyla ilgili Thoma ve Leroux 1923-1925 yılları arasında ilk tanımlamalarda bulunmuşlardır [1].

Kavitasyon ile alakalı öncelikle kabarcık dinamiği (bubble dynamics) üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu konuda Rayleigh (1927), Lamb (1923) öne çıkmaktadır. Kabarcık, küresel olarak modellenip teorik ve deneysel birçok çalışma yapılmıştır. Daha sonrasındaki çalışmalar daha çok iz teorisi üzerinden yürümüştür. Bu teoriye

göre, iz bölgesinde basınç üniformdur ve çevreleyen yüzeydeki teğetsel hızlar sürekli değildir. Tulin ve Wu bu teoriyi, slender body teorisine adapte edip lineerleştirmişlerdir [1].

Kavitasyonlu akış problemi ilk olarak hodograf tekniği ile Helmhotz ve Kirchoff tarafından formüle edilmiştir [5, 6]. Analitik sonucu bulanabilen bazı basit geometrilerin (düz levha, köşe gibi) çözümü ise Kutzhenov, Terentev, Cox ve Clayden tarafından yapılmıştır [7, 8].

Lineer teori ilk olarak Tulin [9] tarafından, süperkavitasyon yapan sıfır hücum aşısında simetrik hidrofoil kesiti için geliştirilmiştir. Bu teori daha sonraları Tulin ve Burkart [10]'da genelleştirilmiş bir sehimde sıfır kavitasyon sayısı için geliştirilmiştir. Süperkavitasyon yapan düz levha akışında herhangi bir kavitasyon sayısı için akışı çözen lineer teori de Tulin [11] tarafından geliştirilmiştir. Lineer teori, kalınlık arttıkça süperkavitasyon boyunun artmasını öngörmüştür fakat lineer olmayan teori ve deney sonuçları tersini söylemektedir. Bu sıkıntı sonradan geliştirilen düzeltmelerle ortadan kalkmıştır.

Hanaoka [12], lineerleştirilmiş kısmi ve süperkavitasyon yapan hidrofoil kesiti akış problemini, hidrofoil etrafında şiddeti bilinmeyen hidrofoil ve kavitasyon üzerinde kaynak ve dipol dağılımı integral denklemi haline getirmiştir.

Bal [13] çalışmasında, bu çalışmada kullanılan yöntemle diğer metotları ve deney sonuçlarını karşılaştırmıştır. Elde edilen sonuçlar yöntemin doğruluğunu göstermektedir. [14] çalışmasında ise aynı metodu serbest su yüzeyi altında gerçekleştirmiştir ve serbest su yüzeyinin deformasyonu elde edilmiştir. Bu çalışmada, serbest su yüzeyini sağlayan Green fonksiyonu kullanılmıştır. Çelik vd. [15] çalışmasında ise kısmi kavitasyon ve farklı bir kapanış modeli için bu metot ile ticari CFD yazılımdan yapılan hesaplamalar farklı Reynolds sayılarında elde edilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan yöntem, [16]'da MIT'nin kavitasyon tünelinde deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Yine yapılan bazı deney ve karşılaştırma sonuçları [17, 18]'de verilmiştir. Bu karşılaştırmalar sonucunda yöntem doğrulanmıştır.

Sınır elemanlar metodunun çeşitli iteratif uygulamaları yapılmıştır. Bal [19] çalışmasında da iteratif sınır elemanları yöntemi podlu bir pervane için kullanılmış ve

pod-pervane arasında iteratif bir çözüm aranmıştır. [20] çalışmasında ise aynı metot optimum gemi pervanesi için yapılmıştır. Kinnas, [21] çalışmasında ise yöntemi üç boyutlu pervanenin performansını incelemek için kullanmıştır.

Kavitasyon ile alakalı çalışmalar, kabarcık dinamiği üzerinden de ilerlemiştir. Kabarcık dinamiği ile alakalı çalışmalar iki fazlı akışların mekanik özellikleri ile ilgilidir. Küresel kabarcıkların dinamiği, kabarcıkların çökmesi veya patlaması, kararsız osile kabarcıkların dinamiği, homojen kabarcıklı akışlar üzerine çalışmalar yapılmış ve derinleştirilmiştir [22].

Sayısal yöntemlerle çözüm ise ilerleyen yıllarda geliştirilmeye devam etmiştir. Pertürbasyon tekniğine dayanan çözümler ve sınır elemanlar yöntemi çözümleri zenginleştirilmiştir. Farklı uygulamalar için özel çözümler belirli kabuller eşliğinde geliştirilmiştir. Sınır elemanları metodunun dolaylı çözümleri olarak kabul edilen panel metotları hidrodinamik ve aerodinamik alanlarında sıklıkla kullanılagelmiş ve farklı çözümler sunulmuştur [23].

# 2. KAVİTASYON – SÜPERKAVİTASYON

## 2.1 Kavitasyon

Kaynama olarak bilinen, bir sıvıya ısı verilerek (sabit basınçta) gaz fazına geçirmek yani buharlaştırma olayının, sabit sıcaklıkta basıncın değiştirilerek meydana geldiği duruma "kavitasyon" denir. Bir nevi soğuk kaynama olarak da adlandırılabilir. Kavitasyonun oluşma sebebi, akışkan içerisindeki bir noktada yerel basıncın, ortam sıcaklığındaki buharlaşma basıncının altına düşmesi olarak tanımlanabilir. Bu durumda akışkan yapısı parçalanır ve akışkan o bölgede kaynamaya başlar [1].

Bu günlük hayatta da gözlenebilen bir durumdur. Örneğin, bir şırınga vasıtasıyla bir akışkan emilimi yapılırken, emme basıncını oluşturan kol hızlı çekildiğinde, haznenin içerisinde kabarcıklar meydana geldiği görülür. Bunun sebebi, şırınganın ucundaki iğne kesitinin dar olması ve emme basıncının etkisiyle hız artar ve basınç azalır. Bu da yukarıda belirtilen olaya, yani kavitasyona sebebiyet verir.

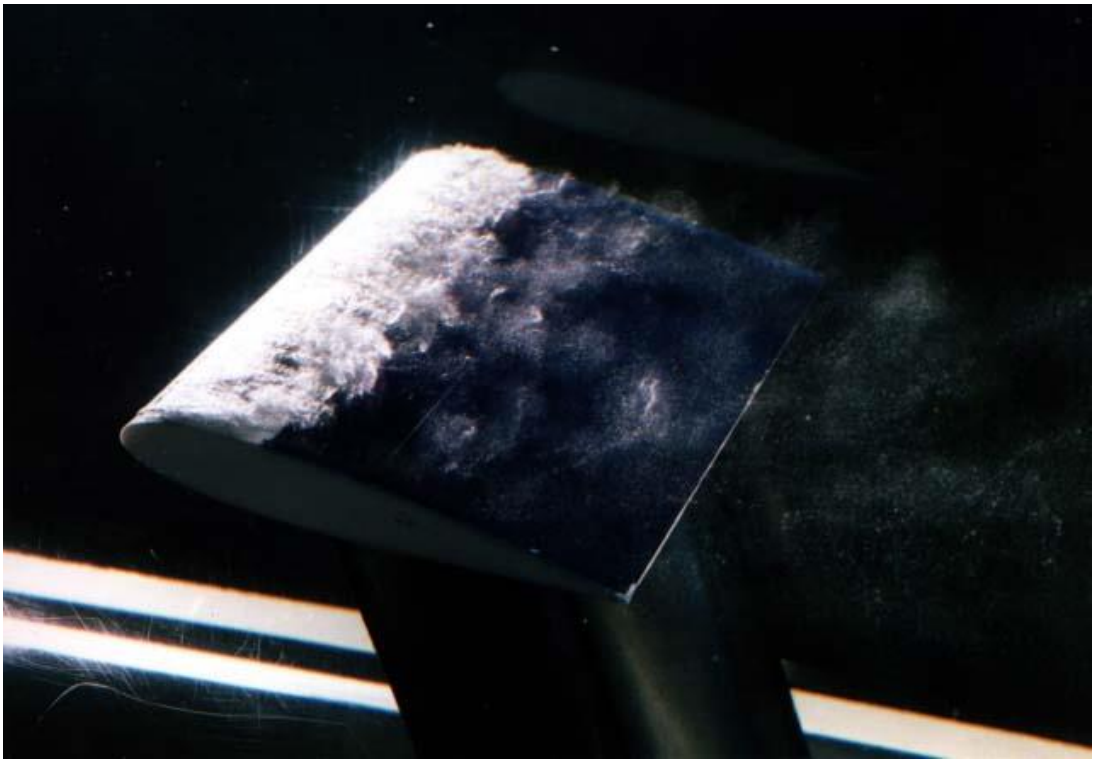
### 2.1.1 Kavitasyon çeşitleri

Özellikle sualtı akıntı türbin ve pervane kanatlarında karşılaşılan kavitasyon olgusu çeşitli parametrelere göre sınıflandırılabilir. Bunlardan bazıları; uç kavitasyonu, sırt kavitasyonu, tabaka kavitasyonu, kabarcık kavitasyonu, girdap kavitasyonudur. Bu çalışmada, sadece kaldırıcı yüzeydeki tabaka kavitasyonu incelenmiştir.

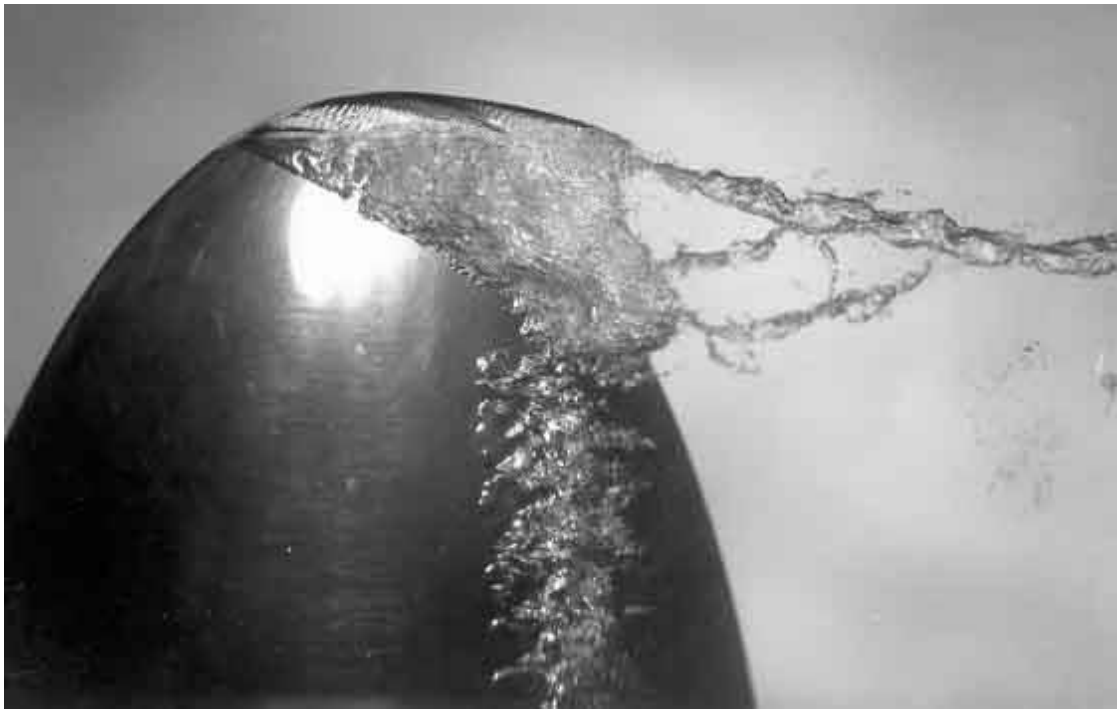
Tabaka kavitasyonu (sheet cavitation), hidrofoilin (pozitif geliş açısına göre) genelde sırt kısmında gerçekleşen bir hadisedir (ve bu çalışmada öyle kabul edilmiştir). Tabaka kavitasyonunun meydana gelme sebebi, hidrofoilin giriş ucunda yerel hızların çok yüksek olması sebebiyle belirli noktalarda oluşan emme basınçlarıdır. Bu bölgelerdeki basınçlar, buharlaşma basıncının altına indiğinden, kavitasyon meydana gelir ve bu kavitasyon hidrofoil yüzeyi kaplar. Yani akışkan kavitasyon bölgesinde hidrofoil ile temas etmez. Bu da hem kaldırma kuvvetini, hem de direnci bir miktar düşürür.

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi, tabaka kavitasyonu hidrofoilin giriş ucunda meydana gelmektedir.

Bir diğer kavitasyon çeşidi ise uç girdap kavitasyonudur. Pervane kanatlarının uç kısımlarında ve pervane göbeğinde görülür. Basınç farkından kaynaklanan girdaplar meydana gelir. Şekil 2.2'de uç girdap kavitasyonu gösterilmiştir.



**Şekil 2.1 :** Tabaka kavitasyonu [24].

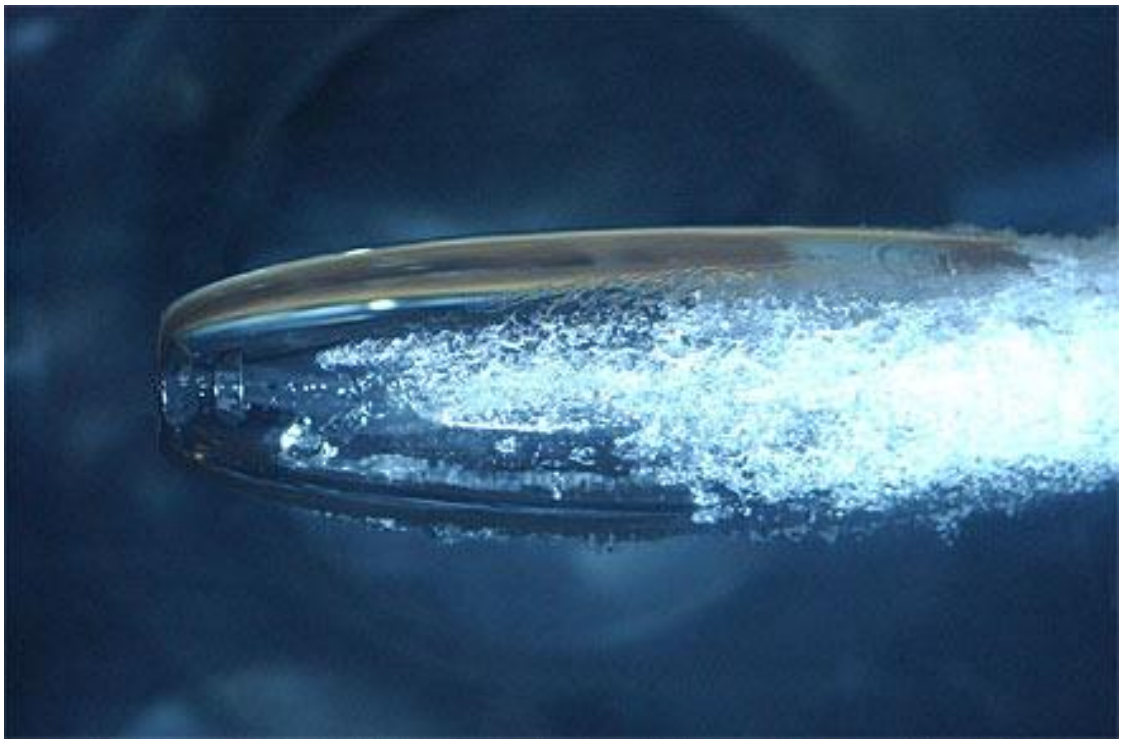


**Şekil 2.2 :** Uç girdap kavitasyonu [25].

## 2.2 Süperkavitasyon

Kavitasyon sayısı azaldıkça (yani kavitasyon ihtimali arttıkça), hidrofoil üzerindeki kavitasyon uzunluğu ve hacmi artar. Bu artışla, kavitasyon boyu hidrofoil boyuna ulaşır ve geçmeye başlar. Bu duruma süperkavitasyon adı verilir. Bu bağıl hızlarda, akışkanın içerisinde kavitasyonsuz bir hidrofoil kullanmak pratik olarak imkânsız hale gelmiş olur. Bu tip akışlar için kullanılan kesik hidrofoiller (truncated hidrofoils) de mevcuttur. [1]. Bir süperkavitasyon yapan hidrofoilin görünümü Şekil 2.3'de verilmiştir.

Süperkavitasyon mühendislik uygulamalarında karşılaşılabilen bir durumdur. Şekil 1.1'de buna askeri bir örnek olarak Shkval, Rus torpidosu, verilmiştir. Bu torpido belirli konfigürasyonlardan geçirilerek İran'a da satılmıştır [27]. Almanya kendi süperkavitasyonlu torpidosunda test aşamasındadır ve Amerika'nın da çalışmalarını sürdürdüğü bilinmektedir [28].



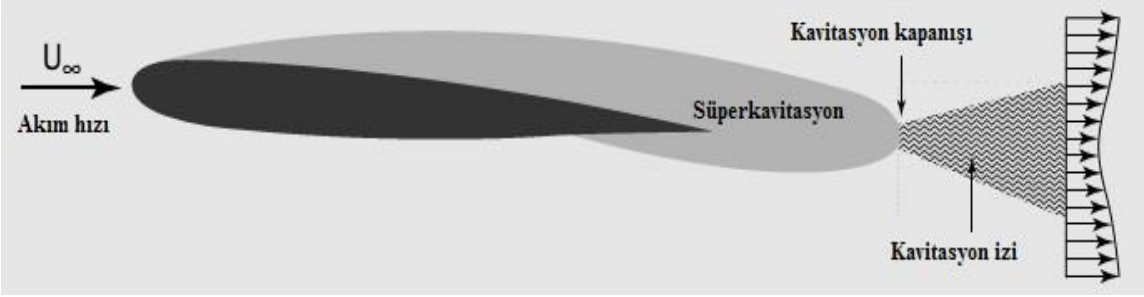
**Şekil 2.3 :** Süperkavitasyon [26].

Sualtında hareket eden torpidonun veya herhangi bir hidrofoilin giriş ucu kısmına küt bir şekil olan kavitatör yerleştirilerek yerel hızlar aniden arttırılır ve daha giriş ucundan itibaren süperkavitasyona geçmesi sağlanır. Kavitatör için farklı uygulamalar da vardır. Örneğin, kavitatör kısmında sıcaklığı arttırmak (çeşitli kimyasal süreçlerle)

veya gaz takviyeli süperkavitasyon (ventilated supercavitation) denilen, yani giriş ucundan gaz takviyesiyle, yöntemlerle gerçekleştirilmektedir [22]. Tüm bu yöntemlerde ki amaç, deniz suyunun yüzeyle olan temasını en aza indirip, sürtünme kuvvetini ve direnci azaltmaktır.

### 2.2.1 Süperkavitasyon ayrılma noktası

Eğer özel bir durum yoksa (basamak, keskin köşe gibi), ayrılma pozisyonu "a priori" olarak görülür. Yani sadece tahmin edilebilir. Bunun içinde iki tane ana ayrılma kriteri vardır. Bunlar Villat-Armstrong kriteri ve laminer ayrılma kriteridir. Villat-Armstrong kriterine göre ayrılma minimum basıncın olduğu yerde olurken, laminer ayrılma kriterinde ayrılma, sınır tabakanın başladığı yerde olur [1]. Bu tez çalışmasında, ayrılmanın olduğu yer girdi olarak verilmiş ve pozisyonunun etkisi incelenmiştir. Şekil 2.4'de bazı olgular görselleştirilmiştir.




**Şekil 2.4 :** Bazı süperkavitasyon parametrelerinin görseli.

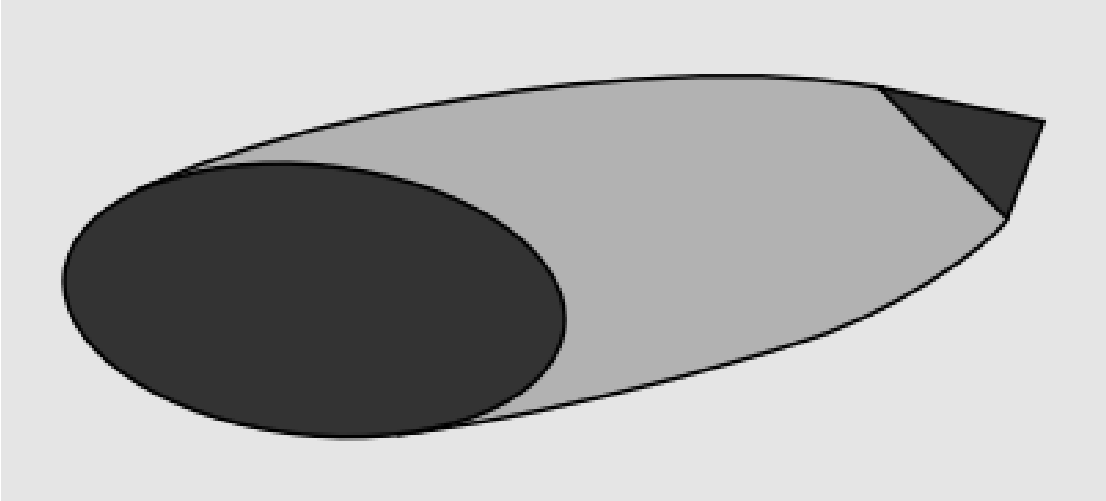
### 2.2.2 Süperkavitasyon kapanış modeli

Kavitasyonun kapanış şekli karmaşık bir olaydır. Bu nedenle matematiksel modellemelerinde bazı kabuller yapılarak kapanış modelleri türetilmiştir. Her model belli varsayımlar yaparak bu sorunu çözmeye çalışmıştır.

Bu modellerden bazıları; Riabouchinsky modeli, re-entrant jet modeli, Wu modeli, Tulin spiral modeli ve end-parabola modeli.

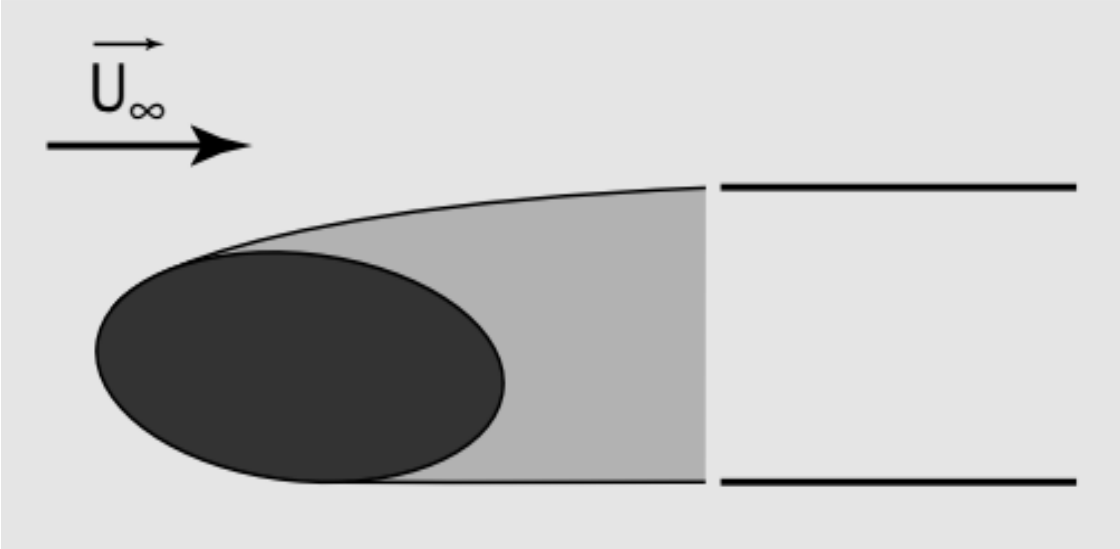
Bu tez çalışmasında kullanılan panel yönteminde end-parabola modelini kullanmaktadır [4].

Riabouchinsky modeli, süperkavitasyon kapanış yerinin düz bir şekilde bittiğini kabul eder ve buna göre matematiksel modeli oluşturulmuştur. Şekil 2.5'de bu modelin görseli verilmiştir.



**Şekil 2.5 :** Süperkavitasyon Riabouchinsky kapanış modeli [1].

Bir diğer kapanış modeli olan Wu modelinde, üst ve alt akım hatları sonsuza kadar düz şekilde devam ettiği varsayılır ve bu hatlar düz levha olarak kabul edilir. Wu kapanış modeli Şekil 2.6'de gösterilmiştir.

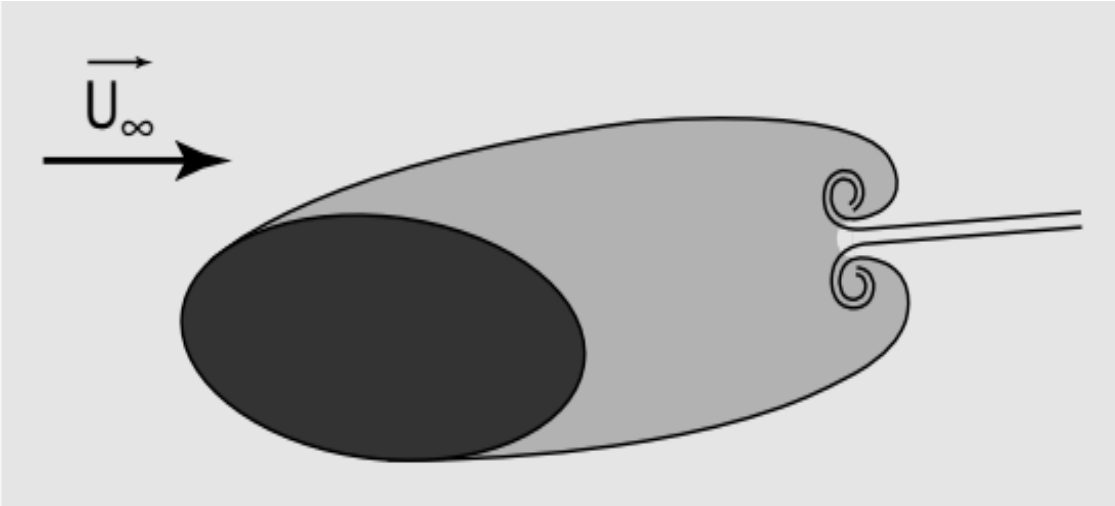



**Şekil 2.6 :** Süperkavitasyon Wu kapanış modeli [1].

Tulin'in süperkavitasyon kapanış modelinde ise, kapanış şekli ters dönümlü iki vorteks ile tanımlanır ve matematiksel olarak modellenir. Bu model gözlemlerden oluşturulmuştur.

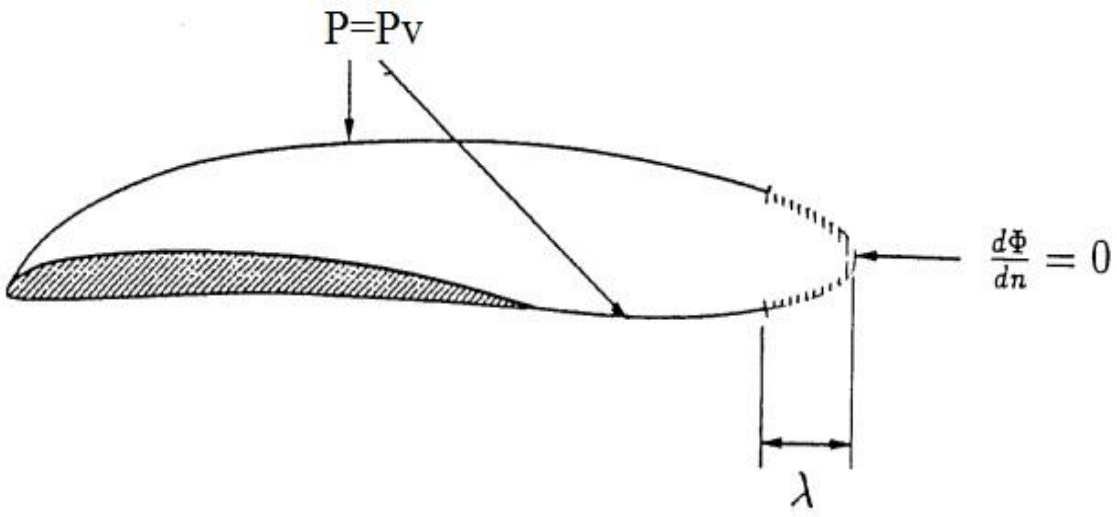
Şekil 2.7'de Tulin spiral vortices süperkavitasyon kapanış modeli gösterilmiştir.

Şekil 2.7'de gösterilen Tulin spiral vortices modeli, iz modeli olarak kullanılmakta ve bazı uygulamalarda ayrılma noktasını tespit için kullanılmıştır.




**Şekil 2.7 :** Süperkavitasyon Tulin spiral vortices kapanış modeli [1].

Son kapanış modeli olarak bu çalışmada kullanılan End-parabola yönteminde, Süperkavitasyonun kapanış şekli parabolik bir levha gibi tanımlanır ve matematiksel olarak bu şekilde modellenir. Bu kapanış modeli Riabouchinsky kapanış modelinin biraz daha geliştirilmiş şeklidir. Şekil 2.8'de parabolik bitiş (End-parabola) kapanış modeli gösterilmiştir.




**Şekil 2.8 :** Süperkavitasyon End-parabola kapanış modeli.

### 2.2.3 Süperkavitasyonun etkileri

Kavitasyonun meydana geldiği noktadan itibaren, basınç buharlaşma basıncına düşer ve bu durum hidrofoilin performansını olumsuz etkiler. Kaldırma kuvveti genelde düşer, yüksek hızlardan dolayı kaldırma kuvvetinden kaynaklanan direnç kuvveti de

artar. Fakat bu durum potansiyel akış için geçerlidir. Viskoz akışta ise sürtünme dirençleri azalır.

Simetrik hidrofoillerde sıfır derece hücum açısında, eğer hidrofoil süperkavitasyon yapıyorsa, hidrofoil kavitasyon kabarcığının içinde kalır. Önder kenar hariç, hidrofoilin yüzeyi ıslanmaz ve viskoz sürtünme kuvveti önemli düzeyde azalır, hidrofoil su kabarcığının içinde gitmeye başlar. Bu teknoloji günümüzde torpidolarda kullanılmaktadır.

Simetrik hidrofoiller için, sıfır derece hücum açısı istisna bir durum olduğundan bu çalışmada kullanılan simetrik hidrofoiller için (örneğin, NACA 0012) için bu durum hesaplanmamıştır. Böyle bir durumda hidrofoilin iki yüzeyinde de kavitasyon meydana gelir.

Kavitasyon sualtında yeterli hızda hareket eden her cisimde görülebilir. Yüksek devirli pervanelerde de kavitasyon problemi yaşanmaktadır.

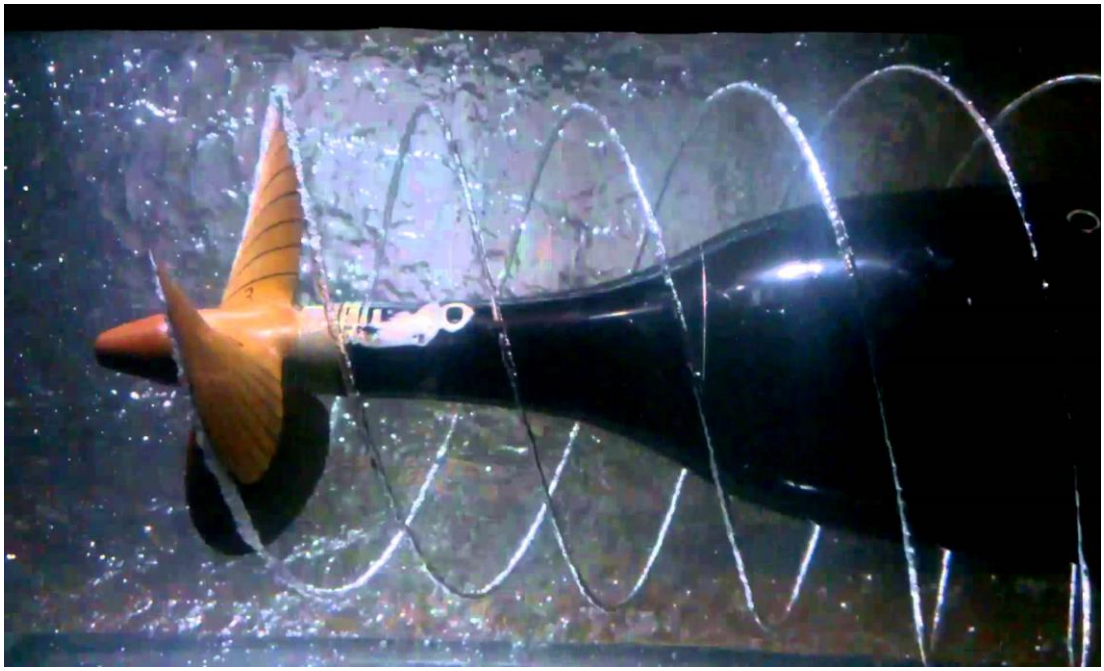
Pervanenin dönüşü nedeniyle, pervanenin gemiye bakan yüzünde basınç düşüşü meydana gelir. Bu basınç düşüşü deniz suyunun o sıcaklıktaki buharlaşma basıncının altında olursa, kavitasyon meydana gelir. Pervane kavitasyonu Şekil 2.9'da gösterilmiştir.

Kavitasyon kabarcıkları hem performans kaybına sebep olur, hem de bu kabarcıklar pervaneye çarparak patlarlar ve pervanenin zamanla zarar görmesine sebep olurlar. Ayrıca basınç farkı akustik problemleri de meydana getirir ve askeri uygulamalarda önem arz eden gürültü problemini doğurur.

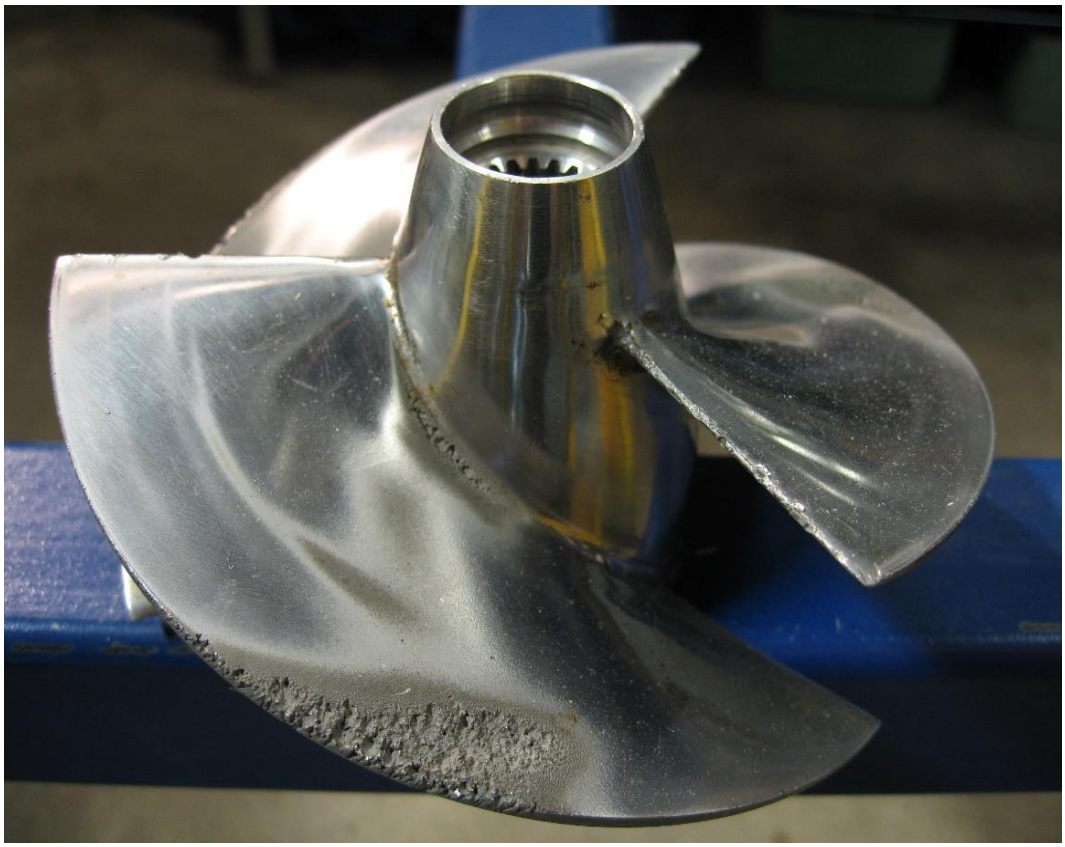
Pervane devri belirli bir seviyeyi geçtikten sonra ise süperkavitasyonla karşılaşır. Bu durumda basınç farkı olan bölge artmıştır ve pervane dengesiz çalışmaya başlar. Pervaneye gelen yükler artık homojen olmaz. Bu durum şaftta veya gemi gövdesinde hasarlara yol açar. Tabi ki titreşim problemleriyle karşılaşılmasına da sebep olur. Süperkavitasyonun pervaneye verdiği zarar Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

Sualtı akıntı türbinleri, tork istenen yani kaldırma kuvveti istenen uygulamalardandır. Çünkü amaç, pervanenin dönmesi sağlanarak jeneratörden enerji üretmektir.

Pervane uçlarında gerçekleşen süperkavitasyon ise kaldırma kuvvetini düşürür. Bu da türbin verimini olumsuz olarak etkilemekte ve enerji kaybına yol açmaktadır. Şekil 2.11'de süperkavitasyon yapan sualtı akıntı türbini kanadı gösterilmiştir.



**Şekil 2.9 :** Pervane kavitasyonu [29].

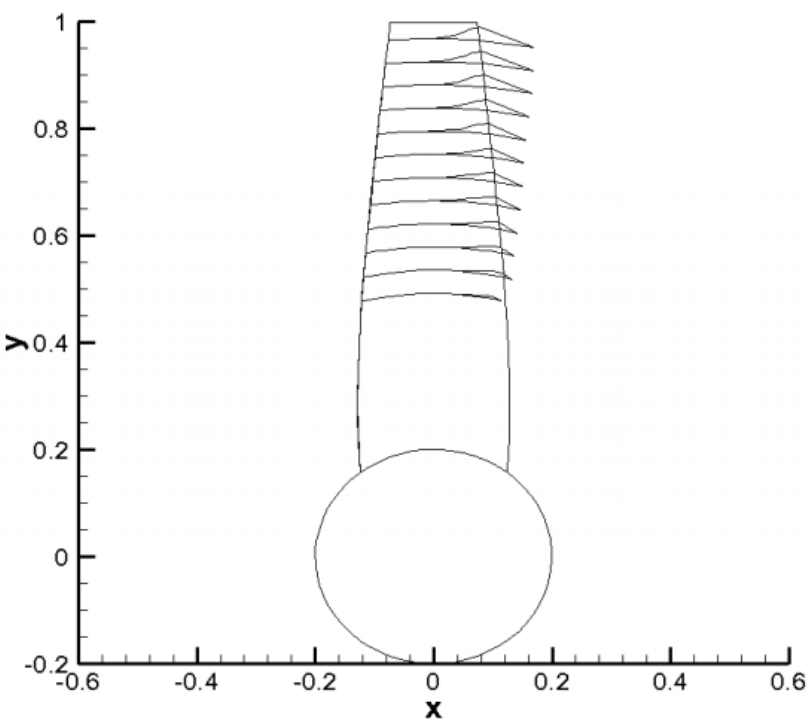


**Şekil 2.10 :** Kavitasyonun pervane yüzeyine etkisi [30].



**Şekil 2.11 :** Süperkavitasyon yapan sualtı akıntı türbin pervanesi [31].

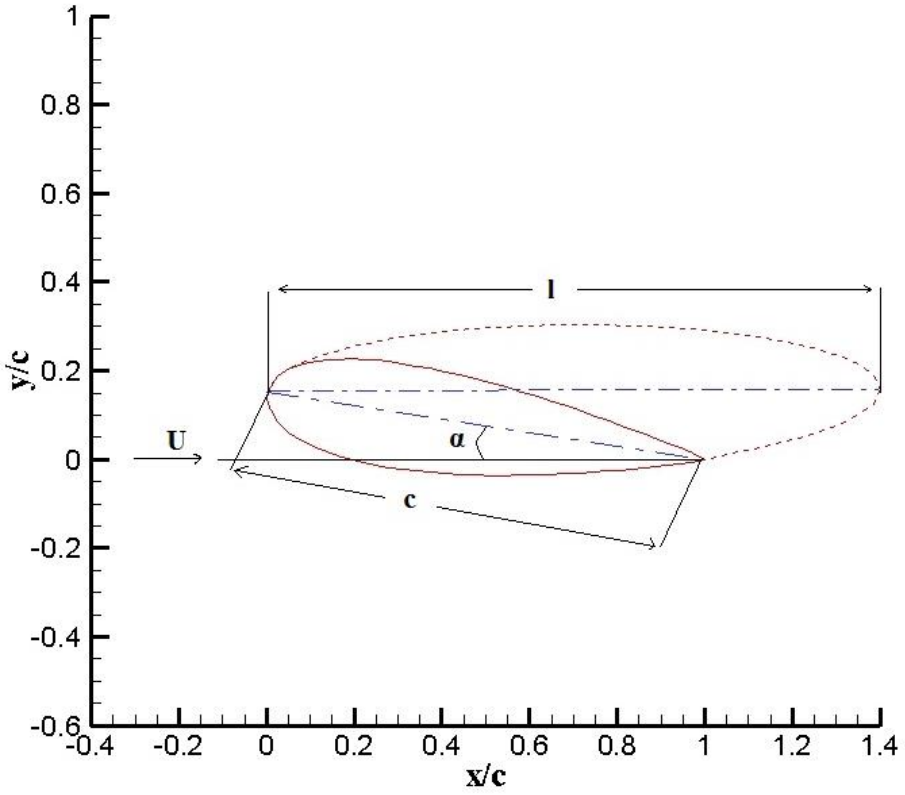
Şekil 2.12'de ise Şekil 2.11'de gösterilen sualtı akıntı türbini pervanesinin süperkavitasyon diyagramı gösterilmiştir.




**Şekil 2.12 :** Süperkavitasyon yapan sualtı akıntı türbini pervanesi diyagramı [31].

## 3. MATEMATİK FORMÜLASYON

Öncelikle, iki boyutlu hidrofoil etrafındaki akış potansiyel akış olarak kabul edilmiştir. Yani akış, sıkıştırılamaz, viskoz olmayan ve dönümsüzdür. Şekil 3.1'de hidrofoil kesitine ait bazı özellikler gösterilmiştir.




**Şekil 3.1 :** Hidrofoil kesitine ait bazı özellikler.

### 3.1 Süreklilik Denklemi

Akış potansiyel olduğu için, hız potansiyeli Denklem 3.1'i yani Laplace denklemini sağlamalıdır.

$$\nabla^2\Phi(x,y) = 0 \tag{3.1}$$

Burada toplam akış potansiyeli, dış akım potansiyeli ve pertürbasyon potansiyelinin toplamıdır. Denklem 3.2'de görülebilir. Burada, Ux gelen akımı, ϕ(x,y) ise pertürbasyon potansiyelini temsil etmektedir.

$$\Phi(\mathrm{x},\mathrm{y}) = Ux + \phi(x,y) \tag{3.2}$$

İki boyutlu hidrofoil etrafında potansiyel akış için sağlanması gereken bazı sınır şartları vardır. Denklem 3.1'de süreklilik sınır şartı verilmiştir.

### 3.2 Sınır Şartları

Bir diğer sınır şartı da kinematik sınır şartıdır. Kinematik sınır şartı, akışın hidrofoil ve süperkavitasyon yüzeyinde teğetsel olmasını ifade eder. Başka bir deyişle, hidrofoilin sınırından akım giriş çıkışı olmaması koşulunun gereğidir. Bu sınır koşulu Denklem 3.3'de matematiksel olarak gösterilmiştir.

$$\frac{\partial\phi(\mathrm{x},\mathrm{y})}{\partial \mathrm{n}} = -\vec{\mathrm{U}}.\vec{\mathrm{n}} \tag{3.3}$$

Denklem 3.3'de $\vec{\mathrm{U}}$ gelen akımın hızını, $\vec{\mathrm{n}}$ vektörü ise hidrofoil yüzeyine dik birim vektörü temsil etmektedir.

Dinamik sınır şartı ise süperkavite yüzeyindeki basıncın, ortam sıcaklığındaki buharlaşma basıncına eşit olmasını sağlar. Denklem 3.4 ve 3.5'de bu şart tanımlanmıştır kavitasyon sayısı $-C_P$ olduğu durumda bu şart sağlanır. Denklem 3.4'de gösterilen σ katsayısına kavitasyon sayısı denir.

$$\sigma = \frac{\mathrm{P} - \mathrm{P_v}}{\frac{1}{2}\rho \mathrm{U}^2} \tag{3.4}$$

$$\mathrm{C_P} = \frac{\mathrm{P_s} - \mathrm{P}}{\frac{1}{2}\rho \mathrm{U}^2} \tag{3.5}$$

$$\sigma \leq -\mathrm{C_P} \tag{3.6}$$

Dinamik sınır şartı Denklem 3.6'da tanımlandığı gibi, süperkavitasyon kabarcığı içerisindeki basıncın, ortam sıcaklığındaki buharlaşma basıncına eşit olması ile çözülür. Aranan ilişki Denklem 3.7'de verilmiştir.

$$|q_c| = \left|\vec{U}\right|\sqrt{(1+\sigma)} \tag{3.7}$$

Bu sınır şartı sağlanana kadar kavitasyon şeklinde iteratif bir yer değiştirme yapılır. Panellere bölünen süperkavitasyon kabarcığının panelleri bu şart sağlanana kadar iteratif olarak hareket ettirilir. Bu iterasyonun sonucunda ise bu şart sağlanmış olur. Başlangıç iterasyonu ise lineer teoriden gelen süperkavitasyon şeklidir [4].

Bir diğer sınır şartı ise Kutta şartı olarak adlandırılır. Kutta şartı hidrofoilin çıkış ucunda ki hızın sonlu olması gerekliliğini sağlar. Denklem 3.8'de bu şart gösterilmiştir.

$$\nabla\phi_{\text{çıkış}} = \text{sonlu} \tag{3.8}$$

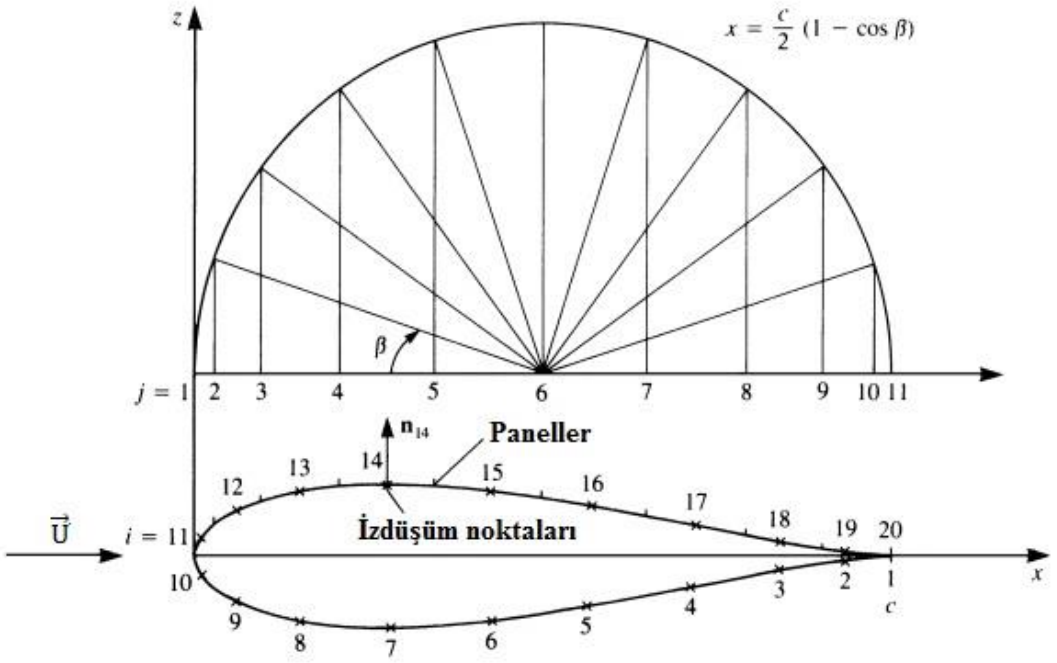
Sağlanması gereken son sınır şartı ise, süperkavitasyon kapanış şart. Fiziksel olarak kavitasyon ve süperkavitasyon kapanışı kararsız olaylardır. Bu yüzden gözlemlerle ortaya çıkan bazı matematiksel kapanış modelleri vardır. Bu çalışmada ise bu şart parabolik kapanış (end-parabola) yaklaşımı ile sağlanmıştır. Bu yaklaşımda, süperkavitasyon kapanışı parabolik kabul edilmiş ve buna göre ayrıklaştırmalar yapılmıştır.

# 4. SAYISAL ÇÖZÜM METODU

Sınır eleman metodu, kısmi diferansiyel denklemleri çözmekte kullanılan sayısal bir metottur. Bu metot tüm akış alanı yerine sınırlarda çözüm yaparak sonuca ulaşan hızlı bir yöntemdir.

## 4.1 Ayrıklaştırma

Birçok sayısal metotta olduğu gibi öncelikle problemi küçük parçalara ayırmakla başlanır. Bu çalışma iki boyutta yapıldığı için problem tek boyutlu elemanlara bölünür. Öncelikle sınır elemanları yönteminde, sonlu elemanların veya hacmin aksine, tüm hesap alanı değil sadece sınırlar ayrıklaştırılır. Yerleştirme örneği Şekil 4.1'de verilmiştir.




**Şekil 4.1 :** Kosinüs ayrıklaştırması [23].

Bu çalışmada ayrıklaştırma işlemi iki boyutta kosinüs yöntemi ile yapılmıştır. Bu yöntemde hidrofoil kesitinin kort boyunda ki bir çapta çember çizilir ve bu çember eleman sayısı kadar açılara bölünüp dilimlenir. Çember üzerindeki noktaların kort

doğrultusundaki koordinatları aynı kalır ve kalınlık yönündeki koordinatlar hidrofoil üzerine iz düşürülür. Bu sayede gradyeni yüksek olan kıvrımlı yerlerde daha fazla panel elde edilmiş olur ve hesap güvenilirliği artar.

### 4.2 Sayısal Çözüm

Bölüm 3'de ki matematiksel ifadeler, modellemeler sonucunda sayısal analiz için uygun hale getirilmektedir.

Kinematik sınır şartı Denklem 4.1'de kaynak/kuyu ve vorteks dağılımı şeklinde gösterilmiştir.

$$-\frac{q}{2}+\frac{1}{2\pi}\int_0^1 \frac{\Upsilon(\xi)d\xi}{\xi-x}=\vec{U}\frac{\partial n}{\partial x};0<x<1,y=0 \tag{4.1}$$

Burada $\xi$ değerleri yerel eksen takımındaki koordinatlardır. $\Upsilon$ değerleri vorteks şiddetini ve q değerleri de kaynak/kuyu şiddeti değerlerini göstermektedir. Dinamik sınır koşulu ise Denklem 4.2'de ki halini almaktadır.

$$-\frac{\Upsilon}{2}+\frac{1}{2\pi}\int_0^1 \frac{\Upsilon(\xi)d\xi}{\xi-x}-\frac{q}{2}\vec{U}=0\,;0<x<l,y=0 \tag{4.2}$$

Kutta şartı da Denklem 4.3'de gösterilmiştir.

$$\Upsilon(1)=0 \tag{4.3}$$

Süperkavitasyon kabarcığının kapandığını gösteren ifade ise Denklem 4.4'de verilmiştir.

$$\int_0^1 \mathrm{q}(x)dx=0 \tag{4.4}$$

### 4.3 Green Fonksiyonu ve Özdeşliği

Kısmi diferansiyel denklemin çözümü için Green Fonksiyonları vardır. Bu fonksiyonlar, en genel haliyle, Denklem 4.5'de ki gibi diferansiyel denklemi dirac delta fonksiyonuna eşitleyerek bulunur.

$$\mathrm{F}(\mathrm{x},\mathrm{s}) = \delta(\mathrm{s}-\mathrm{x}) \tag{4.5}$$

Potansiyel akış için, hız potansiyelinin Laplace denklemini sağlaması gerektiği önceki bölümde bahsedilmişti. Laplace denklemi Denklem 4.5'deki şartı sağlayarak çözüldüğünde iki boyutlu Laplace denklemin çözümü olan Green Fonksiyonu elde edilir ve Denklem 4.6'da verilmiştir.

$$\mathrm{G} = \frac{1}{2\pi}\ln\mathrm{r} \tag{4.6}$$

Kısmı diferansiyel denklemin Green Fonksiyonu bulunduktan sonra, Green'in 3.özdeşliğine uygulanır ve hız potansiyelinin ana denklemi elde edilmiş olur. Green'in 3.özdeşliği Denklem 4.7'de verilmiştir.

$$\pi\phi = \int_{S_B}\left(\phi\frac{\partial \mathrm{G}}{\partial \mathrm{n}} - \frac{\partial\phi}{\partial \mathrm{n}}\mathrm{G}\right)\mathrm{dS} \tag{4.7}$$

Denklem 4.7'de bulunan fonksiyon ve Denklem 3.3'deki kinematik sınır şartından gelen denklem yerlerine konulursa Denklem 4.8 elde edilmiş olur.

$$\pi\phi = \int_{S_B}\left(\phi\frac{\partial \ln\mathrm{r}}{\partial \mathrm{n}} - (\vec{\mathrm{U}}.\vec{\mathrm{n}})\ln\mathrm{r}\right)\mathrm{dS} \tag{4.8}$$

### 4.4 Panel (Sınır Elemanlar) Yöntemi

Panel yönteminde bulduğumuz Green Fonksiyonuna kaynak/kuyu adı verilir. Matematiksel olarak bulduğumuz bu denklem fiziksel olarak noktasal bir kaynak gibi davranır. Denklem 4.9'da iki boyutlu noktasal bir kaynak/kuyu için hız potansiyeli ifadesi potansiyeli verilmiştir.

$$\Phi(x,z) = \frac{q}{2\pi}ln\sqrt{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2} \tag{4.9}$$

Ayrıklaştırdığımız yüzeylere bu kaynak/kuyular dağıtılır ve her bir panel (ayrıklaştırılmış parçalardan her biri) üzerinde çözüm yapılır. Simetrik cisimler için kaynak/kuyu dağılımı yeterli iken, asimetrik cisimlerde noktasal çeviri kaynağı vortex dağılımı yapılır. Denklem 4.10'da iki boyutlu noktasal bir dipol için hız potansiyeli ifadesi verilmiştir.

$$\Phi(x,z) = \frac{-\mu}{2\pi} \frac{z - z_0}{(x - x_0)^2 + (z - z_0)^2} \tag{4.10}$$

Simetrik cisimler için çözülmesi gereken özdeşlik Denklem 4.11'de verilmiştir. Burada i çözüm aranan paneli, j ise etkilendiği ve etkilediği diğer panelleri temsil etmektedir.

$$0 = \frac{\lambda_i}{2} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \frac{\lambda_j}{2} \int_{S_j} \frac{\partial}{\partial n_i} (\ln r_{ij}) dS_j + \vec{U} \cos \beta_{ij} \tag{4.11}$$

Burada asıl bilinmeyen ve çözülmeye çalışılanlar panellere dağıtılan kaynak ve kuyuların büyüklüğünü ifade eden λ ve dipol şiddetlerini ifade eden μ değerleridir. Katsayılar matrisi oluşturulup, bu büyüklükler çözüldükten sonra, hız potansiyeli alanı çözülmüş olur. Dipol dağılımları da eklenince Denklem 4.12'de ki halini alır.

$$0 = \frac{\lambda_i}{2} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \frac{\lambda_j}{2} \int_{S_j} \frac{\partial}{\partial n_i} (\ln r_{ij}) dS_j + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N} \frac{\mu_j}{2} \int_{S_j} \frac{\partial}{\partial n_i} (\ln r_{ij}) dS_j + \vec{U} \cos \beta_{ij} \tag{4.12}$$

Sonuç olarak çözülmesi gereken denklem sistemi Denklem 4.13'de ki gibi katsayılar matrisi ve sağ taraf vektörü şeklinde ayrıştırılabilir.

$$\sum_{j=1}^{N} B_j \sigma_j + \sum_{j=1}^{N} C_j \mu_j + \Phi_\infty = 0 \tag{4.13}$$

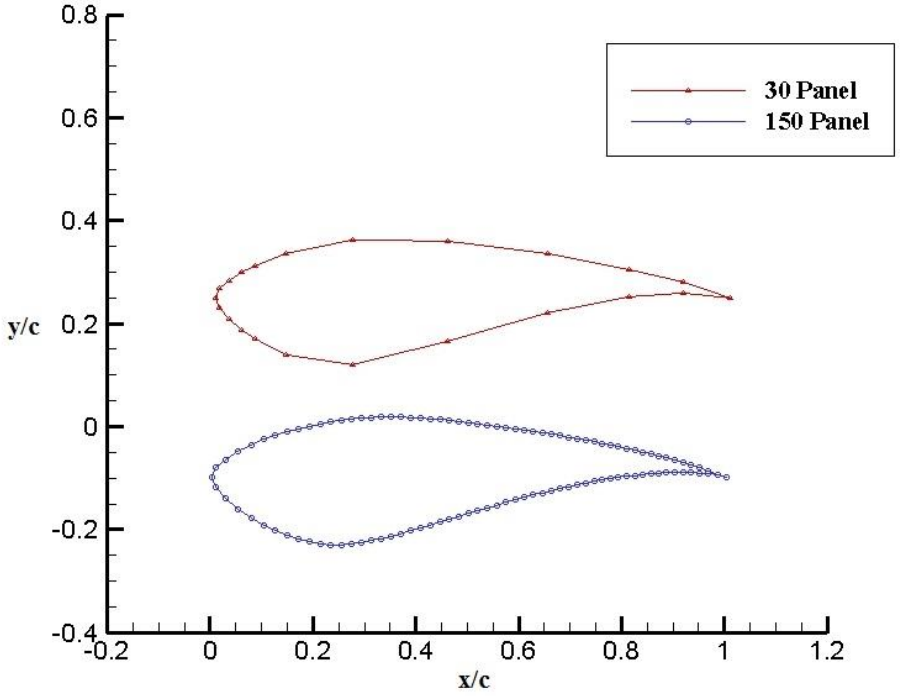
Denklem 4.7'nin çözülmesiyle kaynak/kuyu şiddetlerinin matrisi olan $B_j$ ve dipol şiddetlerinin matrisi $C_j$ elde edilir. Sağ taraf vektörünü oluşturan bilinen değerler ise gelen akım hızının normal bileşenleridir.

Artık dipol ve kaynak/kuyu şiddetleri bilindiği için, potansiyel ve hız alanı çözülmüş olur. Potansiyelin türevinden her noktadaki hızlar bulunabilir. Bulunan hızlarla

Bernoulli prensibinden basınçlar elde edilir. Denklem 4.14'de basınç teriminin elde edilişi gösterilmiştir.

$$C_P = 1 - \frac{U^2}{{U_\infty}^2} \tag{4.13}$$

Çalışmada her hidrofoil kesiti ayrıklaştırılırken 200 panel kullanılmıştır. Panel sayısının geometriye etkisi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.




**Şekil 4.2 :** S814 hidrofoil kesitinin 30 ve 150 panel olarak ayrıklaştırılması.

# 5. SAYISAL SONUÇLAR

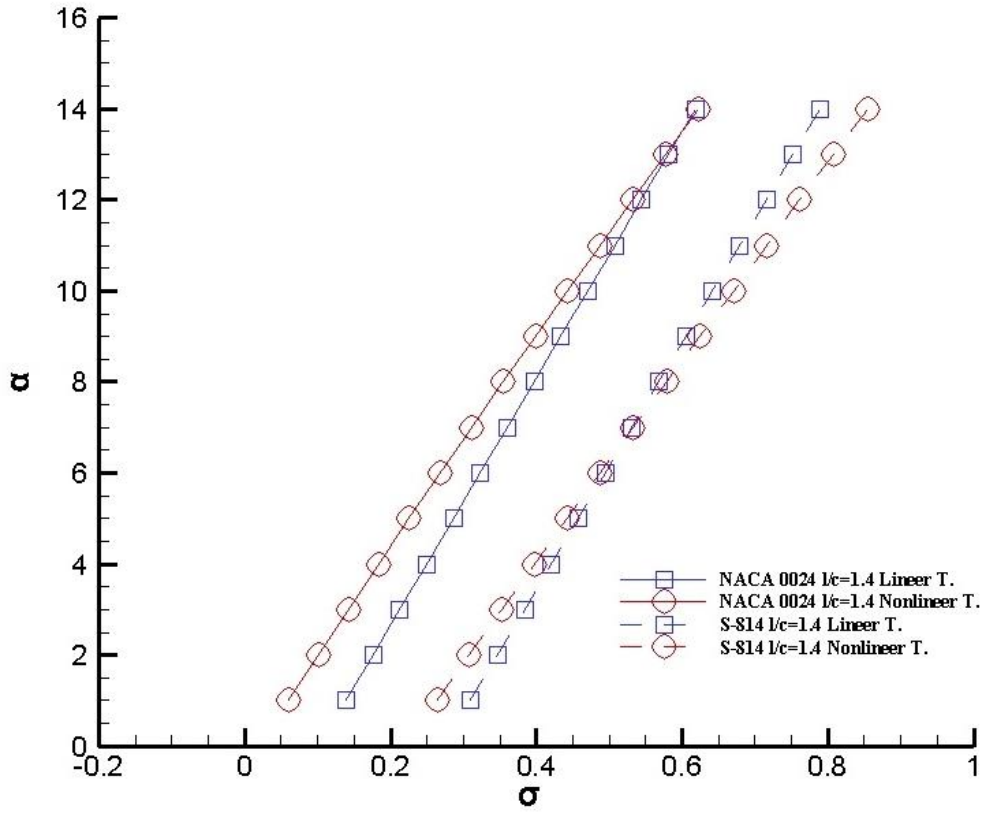
Süperkavitasyon durumunda, hidrofoilin performansını etkileyen çeşitli parametreler vardır. Bu çalışmada öncelikle lineer ve lineer olmayan teorik çözümler karşılaştırılmıştır. Daha sonra şu parametrelerin etkileri incelenmiştir: Kalınlık, süperkavitasyon boyu, hidrofoil geometrisi ve sehim etkisi. Kullanılan NACA0012, NACA0024, NACA16006, NACA16012, NACA16015, NACA64A012 ve S814 hidrofoil kesitlerinin koordinat değerleri [32]'den elde edilmiştir.

## 5.1 Lineer ve Lineer Olmayan Teori Çözümünün Etkisi

Hesaplamalarda hem lineer hem lineer olmayan teori ile çözümler yapılmış ve değerler elde edilmiştir. Bu iki teoride yapılan çözümlerde sadece kavitasyon sayısı karşılaştırılmıştır. Fakat bu karşılaştırma da farklı süperkavitasyon boylarında ve kalınlıklarda incelenip, bu yönlerdeki davranışı da incelenmiştir. Lineer teori, Ulhman'ın lineer olmayan teorisini lineerleştiren Tulin tarafından geliştirilmiştir [9]. İlk olarak 0 hücum açısındaki süperkavitasyon yapan hidrofoil için geliştirilen bu teori daha sonra Tulin ve Burkart tarafından genel bir sehim eğrisindeki kesitler için uygulanabilir hale getirilmiştir [10]. Yapılan düzeltmelerden önce lineer teorinin bazı problemleri vardır. Kesit kalınlığı arttıkça kavitasyon boyu ve hacmi, lineer olmayan teorinin ve deney sonuçlarının tersi davranmaktaydı. Çeşitli düzenlemelerden sonra bu problem çözülmüştür. Şekil 5.1'de NACA 0024 ve S-814 hidrofoil kesitleri için lineer ve lineer olmayan teori çözümleri verilmiştir.

Şekil 5.1'de görüldüğü gibi, sonuçlar iki teori çözümü arasında farklılık göstermektedir. Çizelge 5.1'de de kavitasyon sayıları verilmiştir. Bu farkın daha net gözlemlenebilmesi ve süperkavitasyon boyuyla da değişiminin incelenebilmesi için, seçilen bir hidrofoil kesitinin farklı süperkavitasyon boylarındaki iki çözümün farkı incelenmiş ve Şekil 5.2'de verilmiştir.

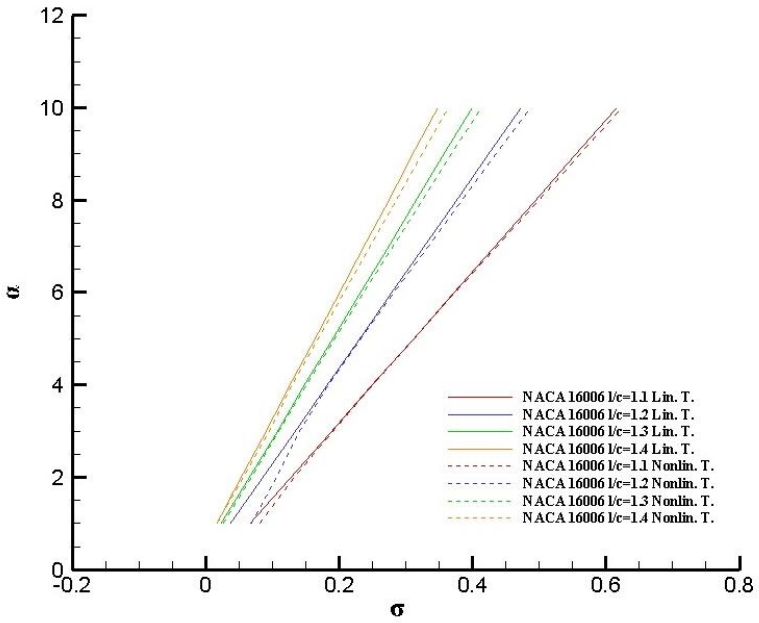
Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, dört farklı süperkavitasyon boyunda NACA 16006 için lineer ve lineer olmayan teori çözümleri farklı hücum açılarında verilmiştir. Hücum açısı arttıkça iki çözüm arasında ki farkın da açıldığı görülmektedir.




**Şekil 5.1 :** NACA 0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda lineer ve lineer olmayan çözümlerin karşılaştırılması.

Süperkavitasyon boyuyla değişimi incelendikten sonra, kalınlığın çözümler üzerinde etkisi incelenmiştir. Bunun için NACA 16006 ve 16012 hidrofoil kesitleri kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 5.3'de verilmiştir.

Şekil 5.3'de görüldüğü gibi, NACA16006, yani ince olan hidrofoil, için iki çözüm arasında ki fark ilk hücum açısından itibaren olup artan hücum açısıyla daha fazla açılmaktadır. Kalın olan NACA16012 hidrofoil kesitinde ise kesişim noktası 8° hücum açısında gerçekleşmektedir.



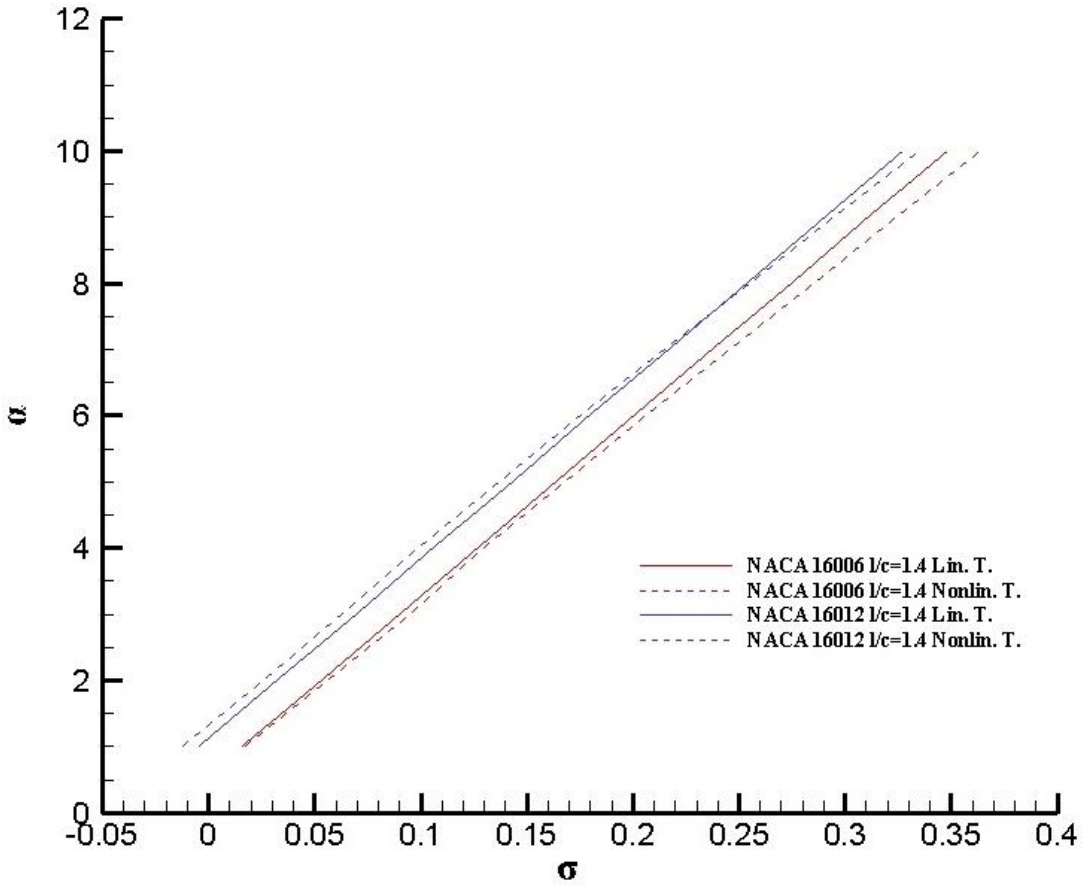

**Şekil 5.2 :** NACA 16006 hidrofoil kesitinin 1.1-1.4 l/c süperkavitasyon boylarında lineer ve lineer olmayan çözümün kavitasyon sayıları sonuçlarının karşılaştırılması.

**Çizelge 5.1 :** Lineer ve lineer olmayan teori çözümlerinin kavitasyon sayısına (σ) etkisi.

| | NACA 0024 | | S814 | | NACA0024(S814 sehim) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| α(°) | Lin. σ | NL. σ | Lin. σ | NL. σ | Lin. σ | NL. σ |
| 1 | 0,1389 | 0,0611 | 0,3099 | 0,2640 | 0,2308 | 0,1753 |
| 3 | 0,2126 | 0,1426 | 0,3837 | 0,3525 | 0,3045 | 0,2608 |
| 5 | 0,2864 | 0,2261 | 0,4574 | 0,4424 | 0,3782 | 0,3479 |
| 7 | 0,3601 | 0,3116 | 0,5311 | 0,5333 | 0,4520 | 0,4363 |
| 9 | 0,4338 | 0,3987 | 0,6048 | 0,6247 | 0,5257 | 0,5257 |
| 11 | 0,5075 | 0,4872 | 0,6785 | 0,7160 | 0,5994 | 0,6158 |
| 13 | 0,5812 | 0,5768 | 0,7523 | 0,8072 | 0,6731 | 0,7061 |

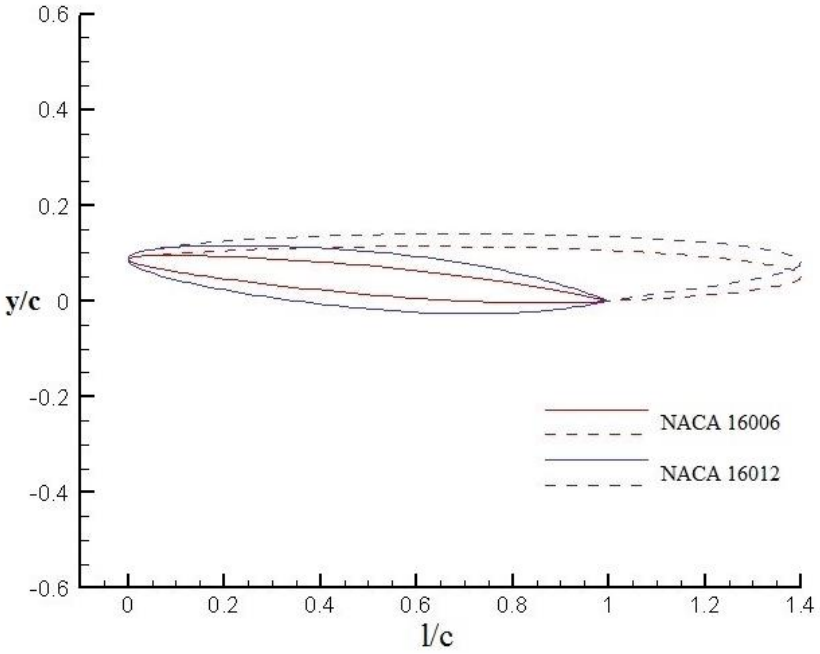
## 5.2 Kalınlık Etkisi

Süperkavitasyon yapan hidrofoilin kalınlığının etkisini incelemek için, NACA 16006, NACA 16012 ve NACA 16015 kesitleri seçilmiştir. Bu üç kesitin kalınlıkları dışında tüm geometrik ve hidrodinamik özellikleri aynıdır. Bu özellik de kalınlığın etkisini açıkça gözlemleyebilmeyi sağlamaktadır. Şekil 5.4'de NACA 16006 ve 16012 hidrofoillerinin, 1.4 l/c süperkavitasyon yaptığı örnek bir durumun kesit görüntüsü verilmiştir.

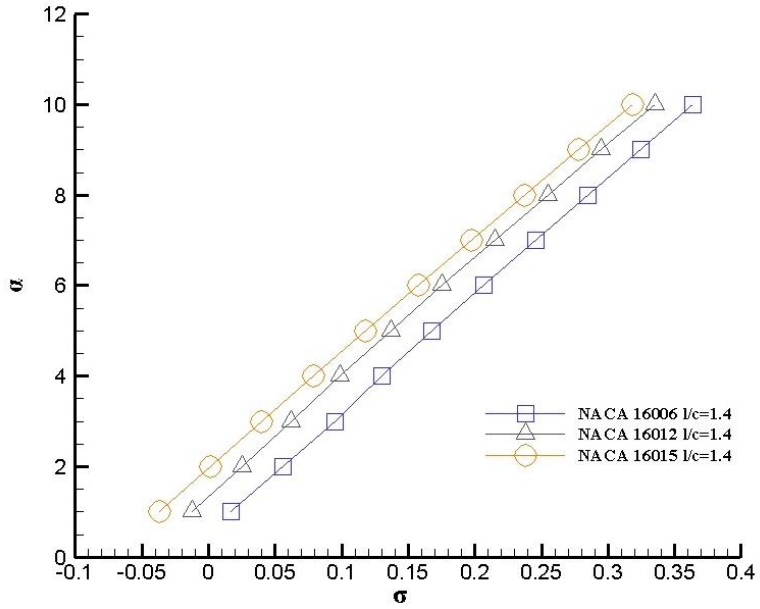



**Şekil 5.3 :** NACA 16006 ve 16012 hidrofoil kesitlerinin 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda lineer ve lineer olmayan çözümün kavitasyon sayısı sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 5.5'de NACA 16006, 16012, 16015 hidrofoillerinin 1,4 l/c süperkavite boyunda kavitasyon sayısının değişimi farklı açılarda verilmiştir. Kalınlık arttıkça kavitasyon sayısının azaldığı görülmektedir.




**Şekil 5.4 :** NACA 16006 ve 16012 hidrofoillerinin 1.4 l/c süperkavite durumundaki profil görünüşü.

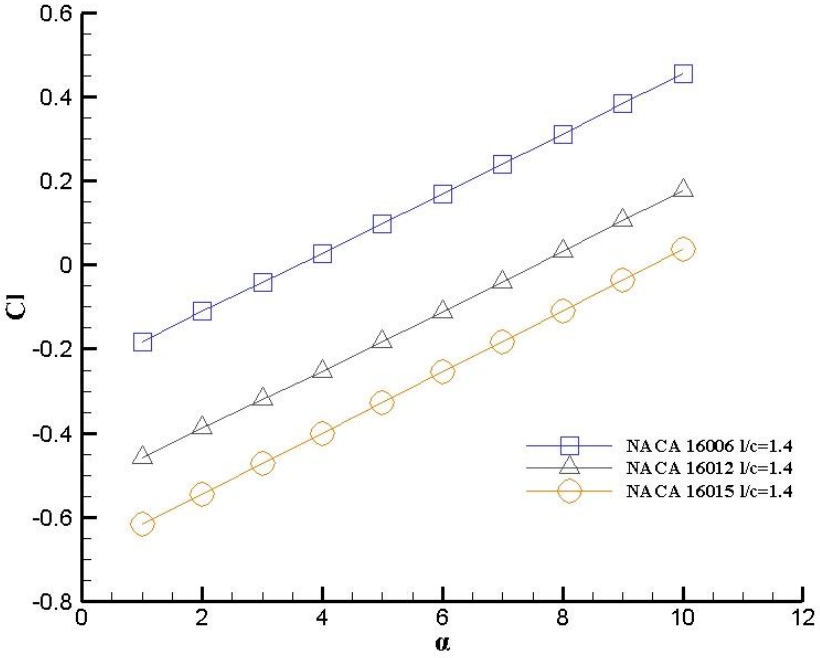



**Şekil 5.5 :** Kalınlığın kavitasyon sayısı üzerinde etkisi.

Şekil 5.6'da ise karşılaştırılan her üç hidrofoilin kesitinin yine aynı süperkavitasyon boylarında kaldırma kuvveti katsayıları verilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü üzere ince olan kesit, yani NACA 16006, daha yüksek değerlere sahiptir. Kalınlığın kaldırma katsayısına (Cl) olan etkisi görülmektedir. Çizelge 5.2'de ise NACA 16006-16012 ve 16015 foillerinin kavitasyon sayıları verilmiştir.

**Çizelge 5.2 :** NACA 16006, 12 ve 15 için 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda kavitasyon sayıları.

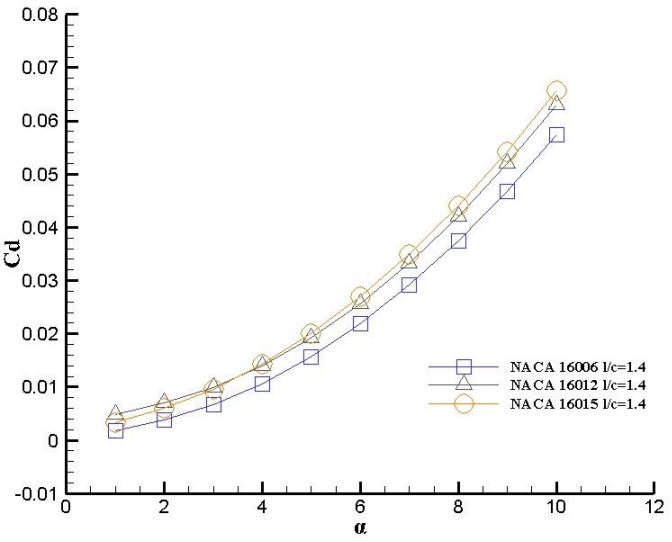
| α(°) | NACA16006 | NACA16012 | NACA16015 |
|---|---|---|---|
| 2 | 0.0559 | 0.02567 | 0.00137 |
| 5 | 0.16801 | 0.13674 | 0.19159 |
| 10 | 0.36394 | 0.33508 | 0.26882 |




**Şekil 5.6 :** Kalınlığın kaldırma katsayısı (Cl) üzerinde etkisi.

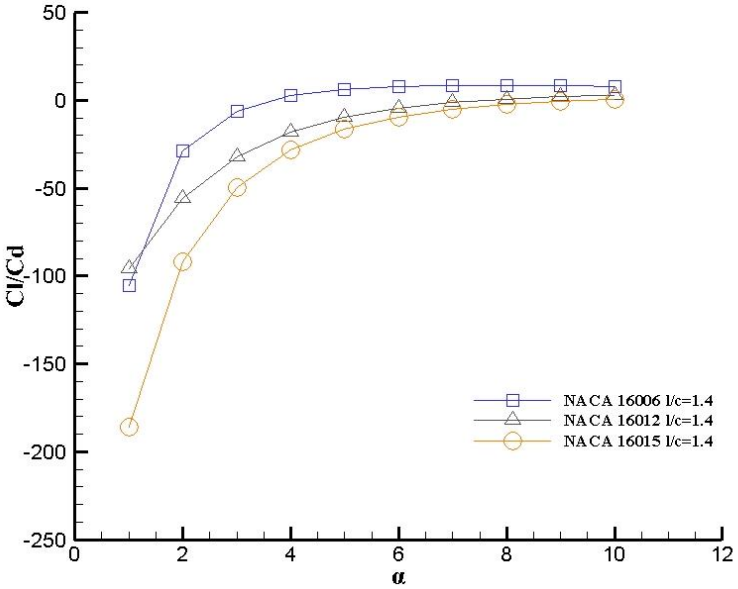
Şekil 5.7'de 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda, yine NACA 16006,16012 ve 16015 hidrofoil kesitleri direnç katsayıları verilmiştir. Bağıl olarak kalın olan NACA 16015 hidrofoil kesitinin direnç katsayısı tüm hücum açılarında daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca bu katsayı artan hücum açısına bağlı olarak neredeyse eksplonansiyel artmıştır.

Kaldırma ve direnç katsayıları elde edildikten sonra, performans açısından çok önemli bir parametre olan Cl/Cd katsayısını elde edebiliriz. Şekil 5.8'de ise bu katsayıların hücum açısına göre değişimi her iki hidrofoil kesiti için verilmiştir.




**Şekil 5.7 :** Kalınlığın direnç katsayısı (Cd) üzerinde etkisi.

Şekil 5.8'de, süperkavitasyon boyunun 1.4 l/c olduğu küçük hücum açılarında Cl/Cd oranında radikal düşüşler görülmektedir. Bunun sebebi ise, küçük hücum açılarında büyük süperkavitasyon boyları elde etmek için hızların çok yükselmiş olmasındandır. Yapılan hesaplamalarda, sabit süperkavitasyon boyu dikte edilmesi bu sonucu doğurmuştur. Çizelge 5.3'de ise NACA 16006,16012 ve 16015 hidrofoil kesitlerinin Cl/Cd oranları verilmiştir.

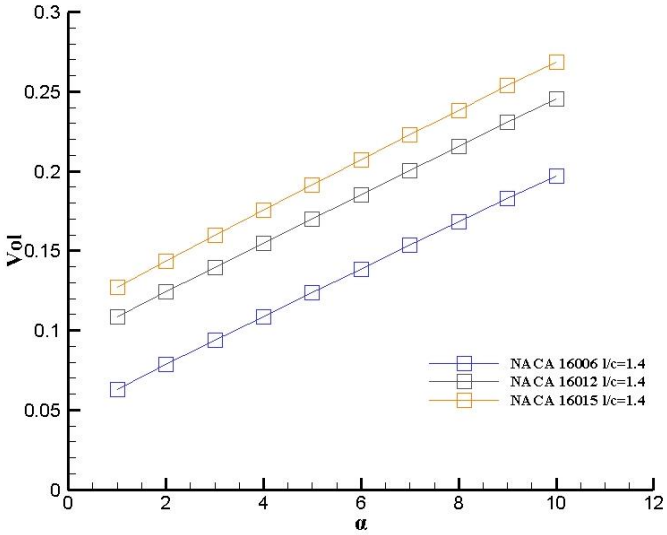



**Şekil 5.8 :** Kalınlığın, kaldırma ve direnç katsayısı oranına (Cl/Cd) etkisi.

**Çizelge 5.3 :** Maksimum kalınlık oranının kaldırma ve direnç katsayıları oranına(Cl/Cd) etkisi

| α(°) | NACA16006 | NACA16012 | NACA16015 |
|---|---|---|---|
| 1 | -105,397 | -95,998 | -185,834 |
| 2 | -28,916 | -55,737 | -91,879 |
| 3 | -6,260 | -32,213 | -49,376 |
| 4 | 2,531 | -18,182 | -28,056 |
| 5 | 6,208 | -9,592 | -16,349 |
| 6 | 7,718 | -4,393 | -9,472 |
| 7 | 8,259 | -1,214 | -5,213 |
| 8 | 8,340 | 0,769 | -2,470 |
| 9 | 8,201 | 2,026 | -0,651 |
| 10 | 7,955 | 2,830 | 0,583 |

Yapılan her hesaplama sonucunda, kesit ve süperkavitasyon şekli elde edilmektedir. Bu şekilden yola çıkarak süperkavitasyon hacmi elde edilmiştir. Kalınlığın süperkavitasyon hacmi üzerine etkisi incelemek için aynı iki hidrofoil kesitleri kullanılmıştır. Şekil 5.9'da 0 ve 10 derece hücum açılarında ki değişim gösterilmektedir.




**Şekil 5.9 :** Kalınlığın süperkavitasyon hacmine etkisi.

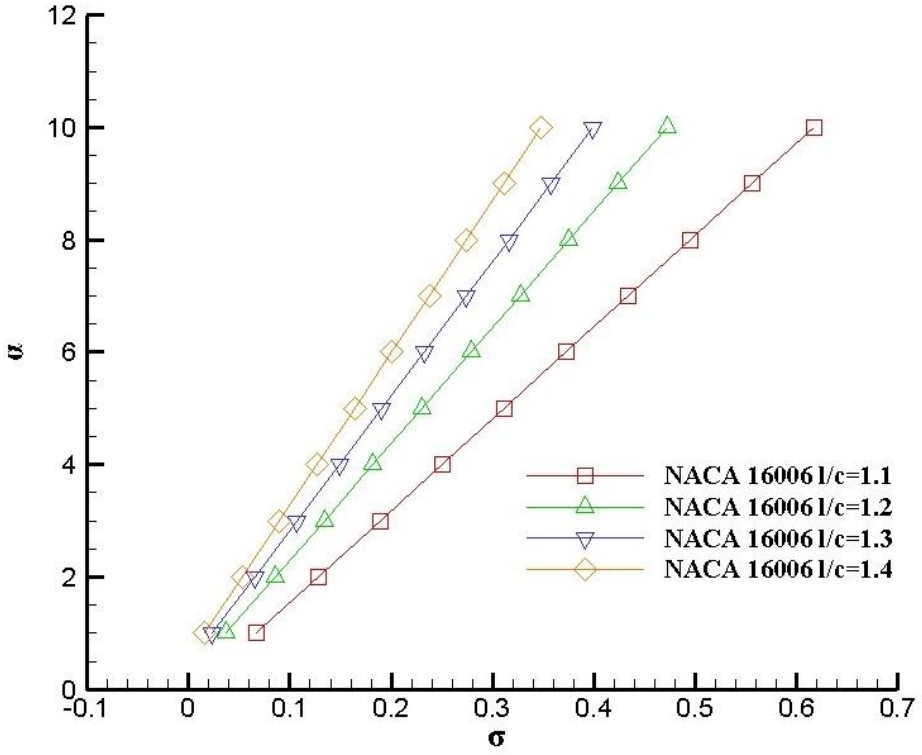
### 5.3 Süperkavitasyon Boyunun Etkisi

Kavitasyon veya süperkavitasyon boyunun tespiti zor bir konudur. Çünkü kavitasyon kapanışları rahat gözlemlenebilen bir olgu değildir. Bu yüzden de bazı matematiksel kabuller vardır. Bu matematiksel modellere "kapanış modelleri" denir. Bu modellere örnek olarak; Riabouchinsky modeli, re-entrant jet modeli, Wu modeli, Tulin spiral vortices modeli verilebilir. Bu çalışmada kapanış modeli olarak end-parabola modeli esas alınmıştır.

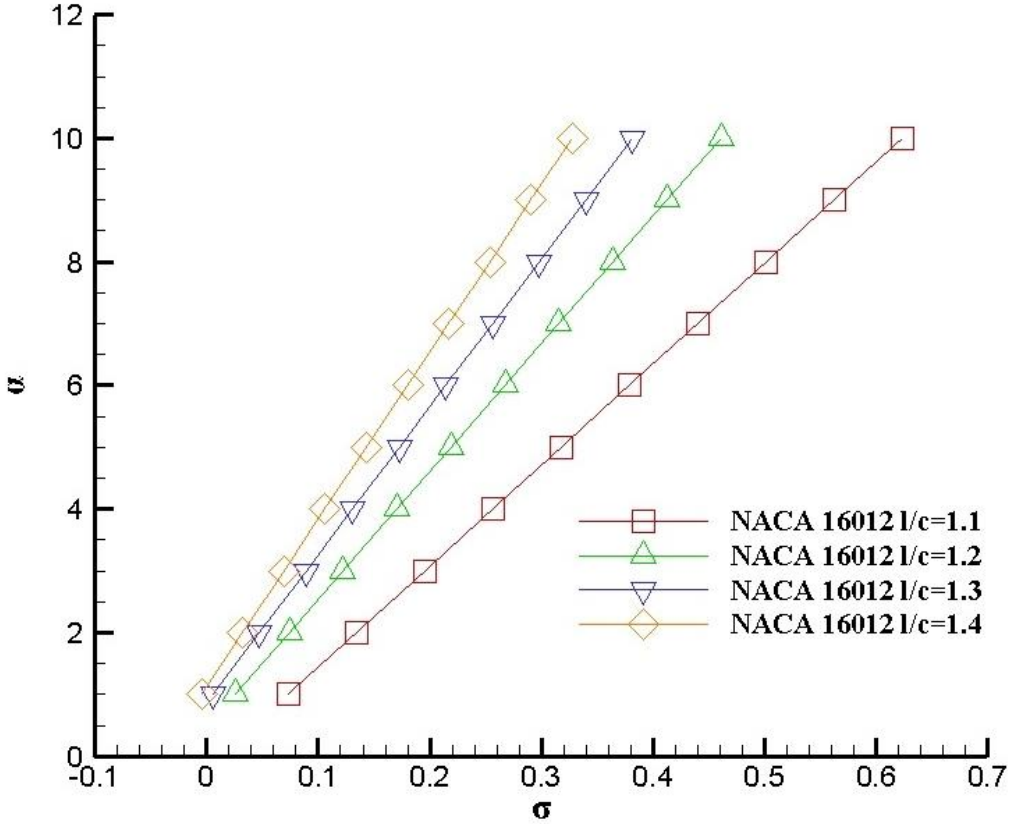
End-parabola modeli, süperkavitasyon kabarcığının kapanış ucunun parabolik olarak bittiğini varsayar. Yani, kapanış şekli tam bilinemeyen fiziksel durumu, net gözlemlenebilen sınırların alt ve üst uçlarını parabolik bir çizgi ile tamamlayarak çözüm arar. Bu modelin güvenilirliği deneylerle sabittir [4]. End-parabola metodunu gösteren bir kesit Şekil 2.8'de verilmiştir.

Süperkavitasyon boyunun hidrofoil performansına olan etkisini incelemek için, hidrofoil 1.1 ve 1.4 l/c süperkavitasyon boyları sabit tutularak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar 1° ile 10° hücum açılarında gerçekleştirilmiştir. NACA 16006 için yapılan hesaplamaların sonucunda süperkavitasyon boyunun kavitasyon sayısına etkisi Şekil 5.10'da verilmiştir.

Şekil 5.10'da görüldüğü gibi, süperkavitasyon boyunun artması, kavitasyon sayısını her hücum açısında azaltmaktadır. Aynı hesaplamalar NACA 16012 içinde yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 5.11'de verilmiştir.




**Şekil 5.10 :** Süperkavitasyon boyunun NACA16006 hidrofoil kesitinin kavitasyon sayısına etkisi.



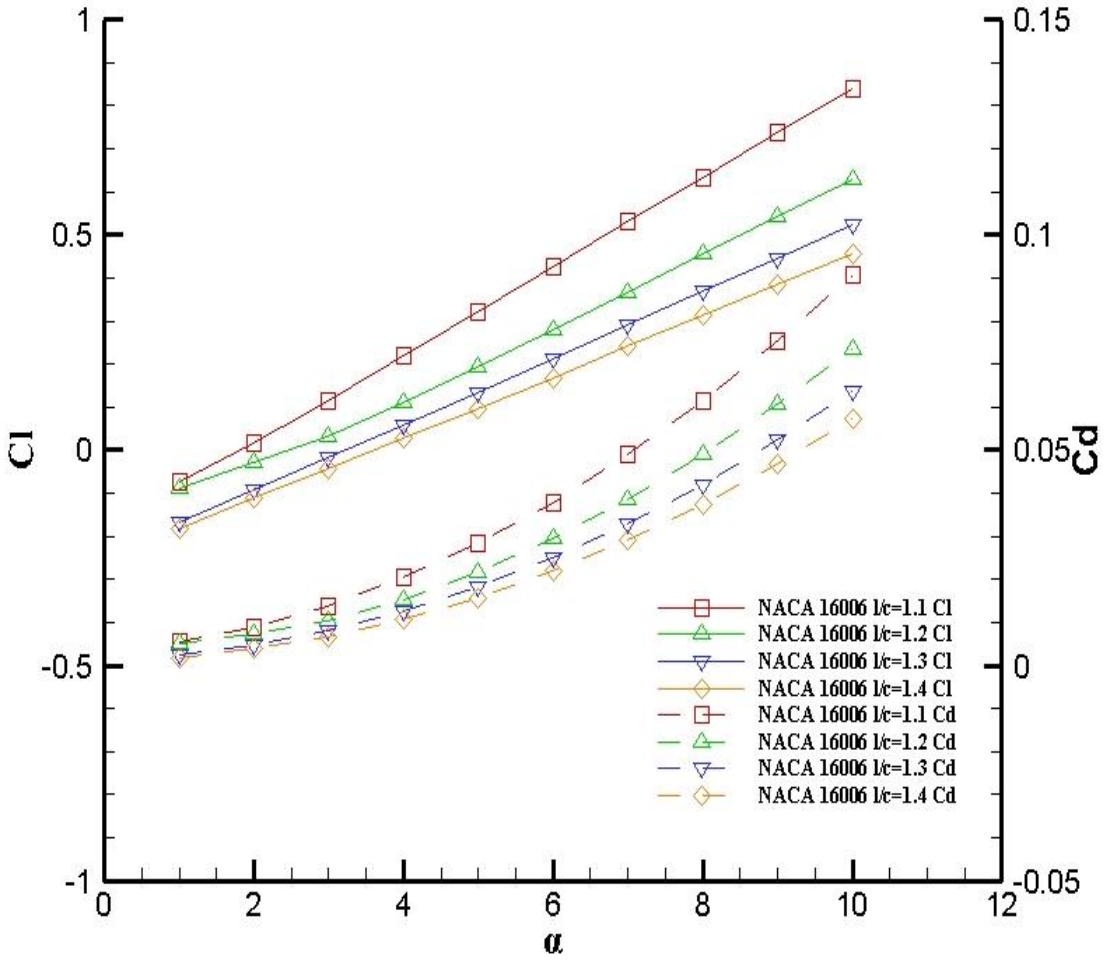

**Şekil 5.11 :** Süperkavitasyon boyunun NACA16012 hidrofoil kesitinin kavitasyon sayısına etkisi.

Şekil 5.12'de, NACA 16006 için süperkavitasyon boyunun kaldırma kuvveti ve direnç katsayılarına etkisi gösterilmektedir. Çizelge 5.4'de ise farklı süperkavitasyon boyları için kavitasyon sayıları verilmiştir.

Şekil 5.12'de görüldüğü üzere, süperkavitasyon boyunun artması kaldırma kuvveti katsayısını düşürmektedir.

Aynı zamanda da, direnç katsayısı olan Cd değerini de düşürmektedir. Bunun nedeni potansiyel akıştaki direncin kaldırma kuvvetinden kaynaklı olmasıdır. Şekil 5.13 ise, NACA 16012 aynı hesaplamaların sonucudur.

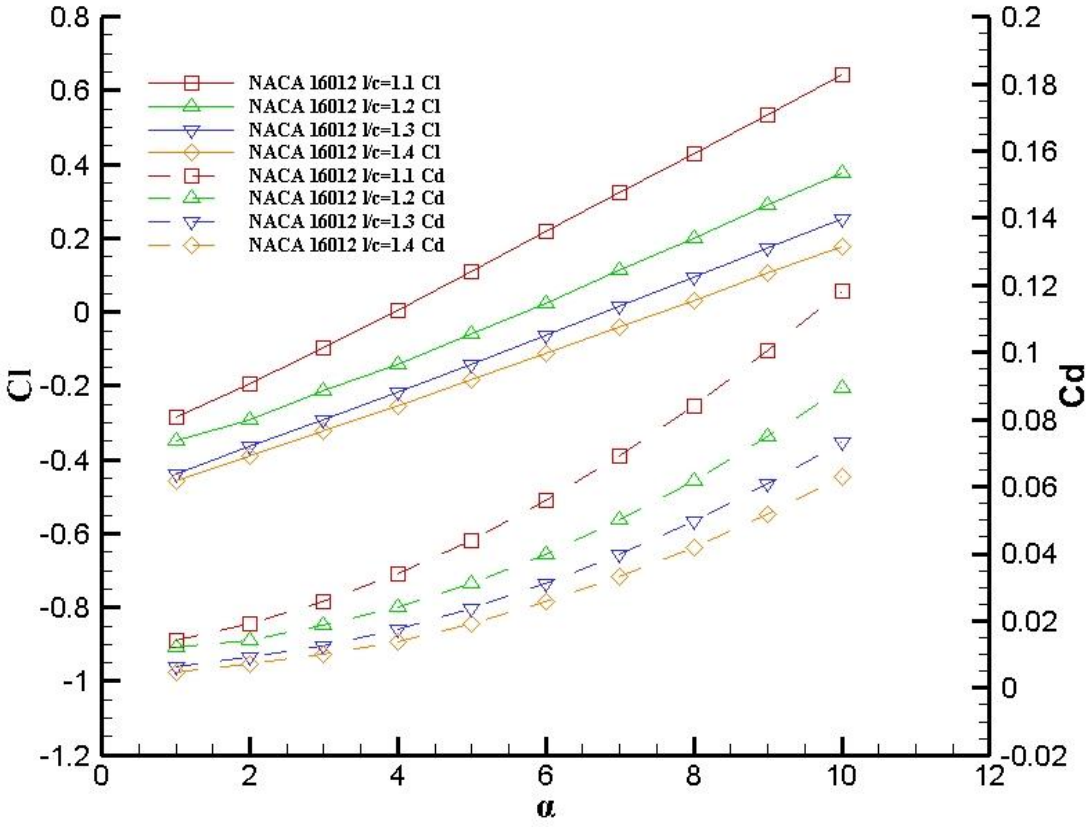
Kaldırma ve direnç katsayıları bulunduktan sonra, performans için önemli bir parametre olan, bu katsayıların oranı (Cl/Cd) bulunmuştur. NACA 16006 için bulunan sonuçlar Şekil 5.14'de verilmiştir.




**Şekil 5.12 :** Süperkavitasyon boyunun NACA 16006'nın Cl ve Cd değerlerine etkisi.

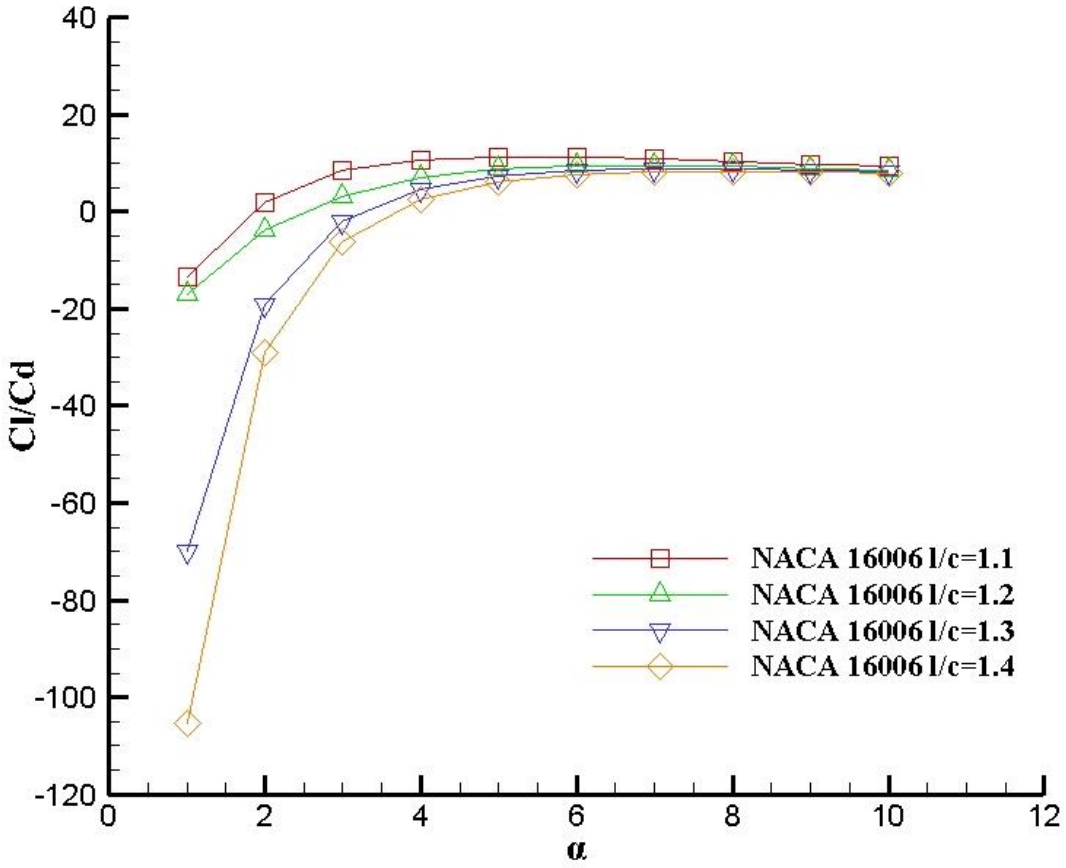
**Çizelge 5.4 :** NACA16006'nın çeşitli süperkavitasyon boylarında ki kavitasyon sayıları.

| α(°) | 1.1 l/c | 1.2 l/c | 1.3 l/c | 1.4 l/c |
|---|---|---|---|---|
| 2 | 0,1327 | 0,10579 | 0,06891 | 0,0559 |
| 8 | 0,4992 | 0,38446 | 0,32478 | 0,2851 |




**Şekil 5.13 :** Süperkavitasyon boyunun NACA 16012'nin Cl ve Cd değerlerine etkisi.

Şekil 5.14'de görüldüğü üzere, süperkavitasyon boyunun artması Cl/Cd oranını düşürmektedir. Yüksek süperkavitasyon boylarında ve küçük hücum açılarında ise bu oran radikal olarak düşmektedir. Bunun sebebi, yüksek süperkavitasyon boyunun küçük açılarda oluşmasının fiziksel olarak zor olmasından kaynaklanmaktadır.

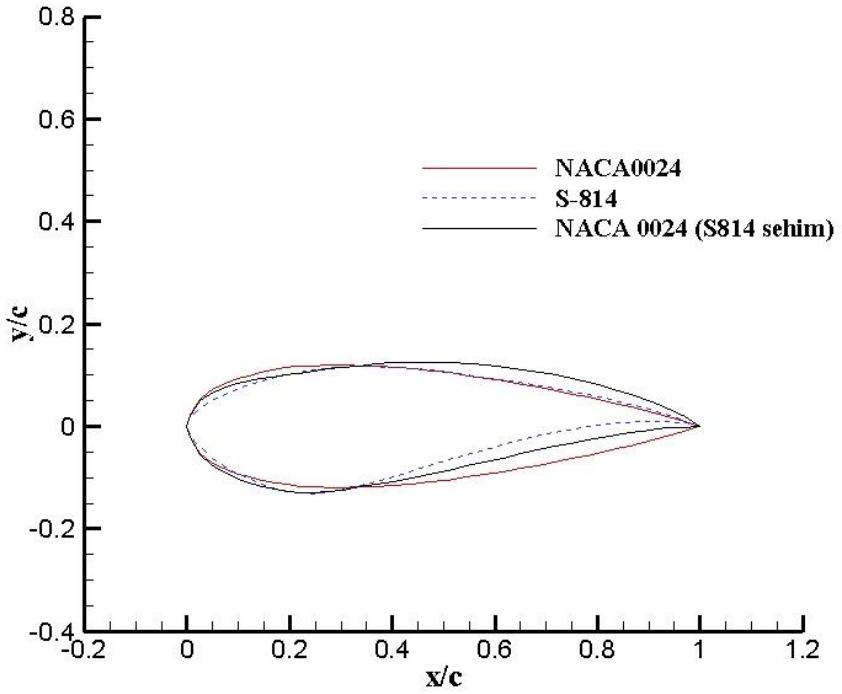



**Şekil 5.14 :** NACA 16006 hidrofoil kesitinin, 1.1 ve 1.4 l/c süperkavitasyon boylarında ki Cl/Cd değerleri.

### 5.4 Hidrofoil Kesit Geometrisinin Etkisi

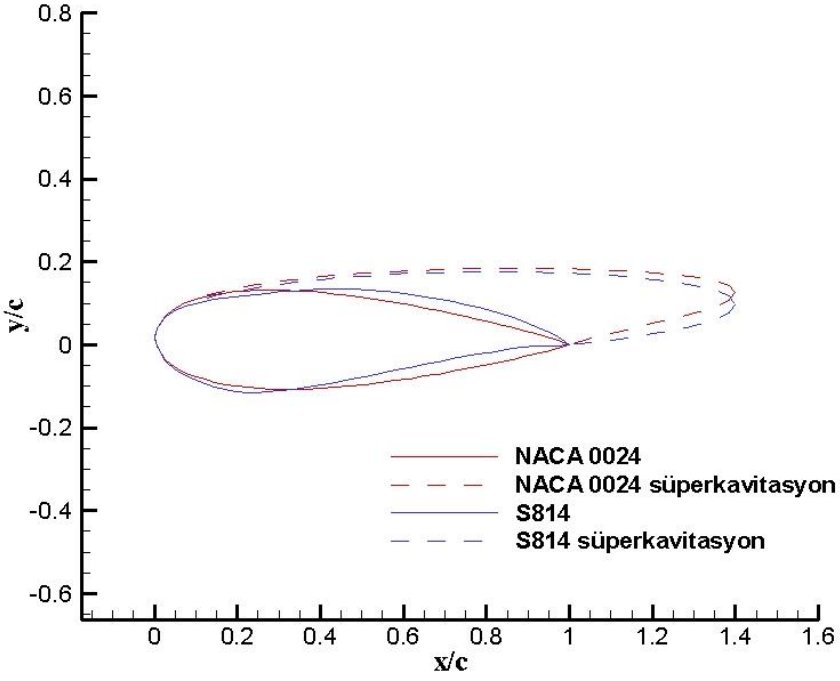
Süperkavitasyon performansı etkileyen parametrelerden biri de Hidrofoil kesitinin geometrisidir. Hidrofoil etrafındaki akışta yerel hızlar hidrofoilin geometrisine göre şekillenmektedir. Bu da yerel basınçların kesite göre şekillenmesi anlamına gelmektedir.

Hidrofoil kesitinin geometrisinin süperkavitasyon performansına etkisini incelemek için yaklaşık aynı kalınlıklara sahip NACA 0024 kesiti ve genellikle su altı akıntı türbinlerinde kullanılan S814 hidrofoil kesiti kullanılmıştır. Kalınlığın aynı olması, bu iki hidrofoil üzerinden kesit geometrisinin etkisinin incelenebilmesini mümkün kılmıştır. Ayrıca, NACA hidrofoil kesitine S814'ün sehimi eklenmiş ve hesaplamalar bu yeni kesit için de yapılmıştır. Bu üç hidrofoilin profil şekli Şekil 5.15'dedir.




**Şekil 5.15 :** NACA 0024 ve S814 hidrofoil kesitleri.

S814 hidrofoil kesitinin maksimum kalınlık oranı 0.2418'dir. NACA 0024 ise 0.24'dür. NACA 0024 simetrik bir hidrofoil kesiti iken S814 maksimum oranı 0.03 olan bir sehime sahiptir. 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda kesit görüntüsü Şekil 5.16'da verilmiştir [33].




**Şekil 5.16 :** NACA 0024 ve S814 profil kesitlerinin 1.4 l/c süperkavitasyon durumunda şekli.

Öncelikle, hidrofoil kesit geometrisinin kavitasyon sayısına etkilemek için, belirlenen iki hidrofoil kesitleriyle çeşitli hücum açılarında hesaplamalar yapılıp, sabit süperkavitasyon boylarında kavitasyon sayıları elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 5.17'de elde edilen sonuçlar gösterilmektedir. Ayrıca, çizelge 5.5'de de üç hidrofoil kesiti için kavitasyon hacimleri verilmiştir.

**Çizelge 5.5 :** NACA0024, S-814 ve NACA0024'e S-814 sehimi uygulanmış 3 kesitin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda kavitasyon hacmi değerleri.

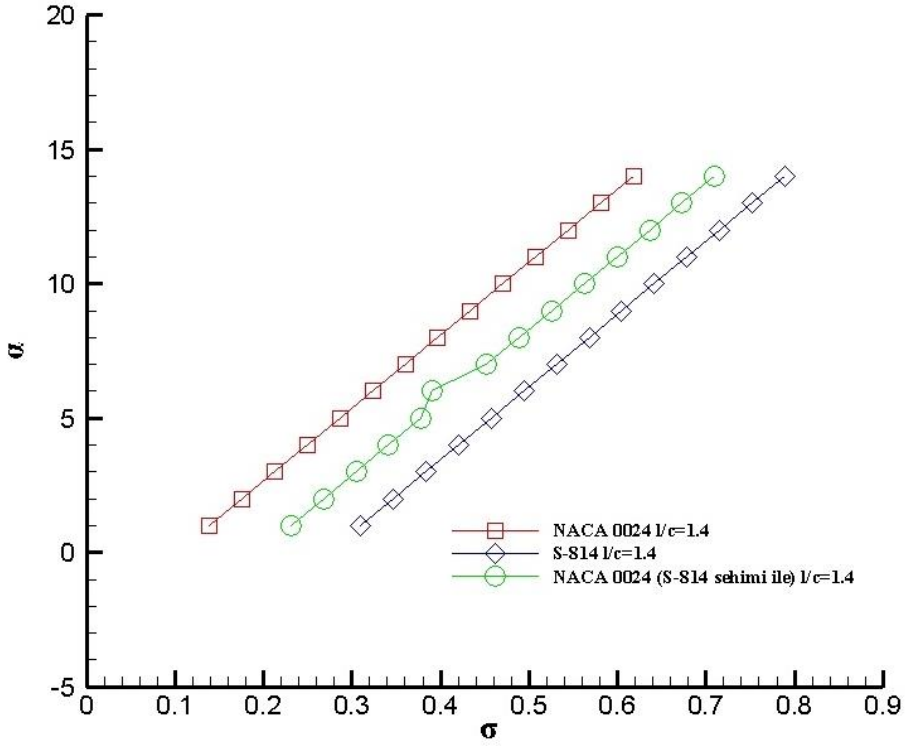
| α(°) | NACA0024 | S-814 | NACA0024(S814 sehimli) |
|---|---|---|---|
| 1 | 0,2284 | 0,2146 | 0,2263 |
| 3 | 0,2615 | 0,2469 | 0,2584 |
| 5 | 0,2941 | 0,2789 | 0,2902 |
| 7 | 0,3263 | 0,3106 | 0,3215 |
| 9 | 0,3582 | 0,3420 | 0,3525 |
| 11 | 0,3897 | 0,3731 | 0,3832 |
| 13 | 0,4210 | 0,4041 | 0,4136 |

Şekil 5.17'de görüldüğü gibi, NACA0024 hidrofoil kesitinin kavitasyon sayıları, kendisine S-814 sehimi uygulanmış olan kesitten ve su altı akıntı türbinlerinde kullanılan S-814 hidrofoil kesitinden her hücum açısında daha küçüktür.

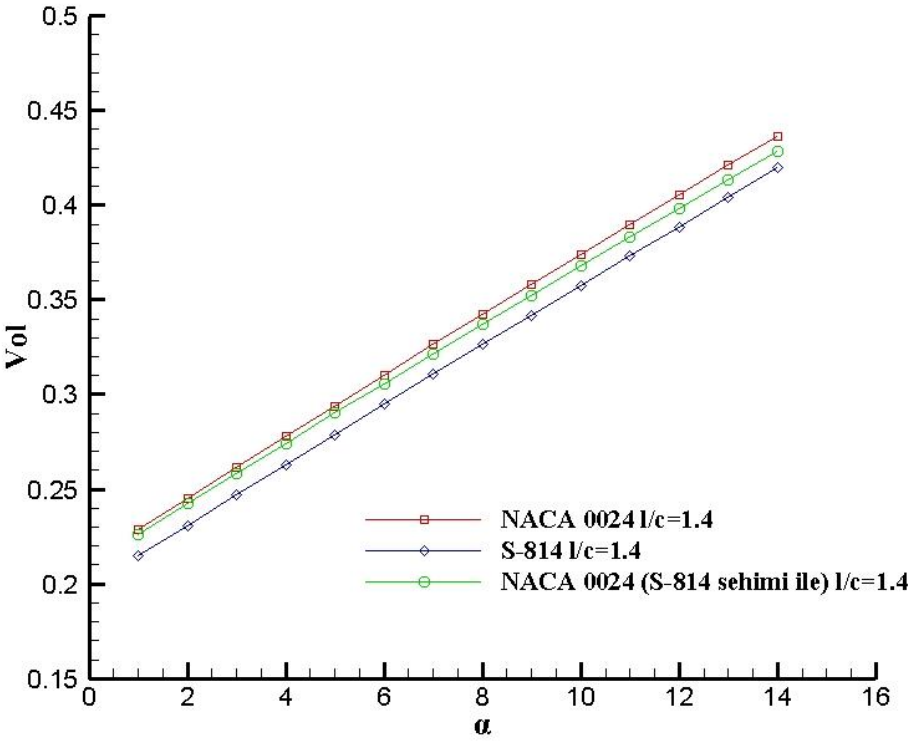
Kavitasyon sayısının küçük olması, kavitasyonun daha kolay meydana gelebildiğini göstermektedir.

Aynı maksimum kalınlık ve sehim oranlarına sahip NACA0024 (S-814 sehimli) ve S-814 hidrofoil kesitlerinden ise S-814'ün kavitasyon sayıları daha yüksektir.

Süperkavitasyon hacmi de aynı hidrofoil kesitleri için aynı şartlarda hesaplanmış ve Şekil 5.18 elde edilen veriler gösterilmiştir.




**Şekil 5.17 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kavitasyon numaralarının karşılaştırılması.



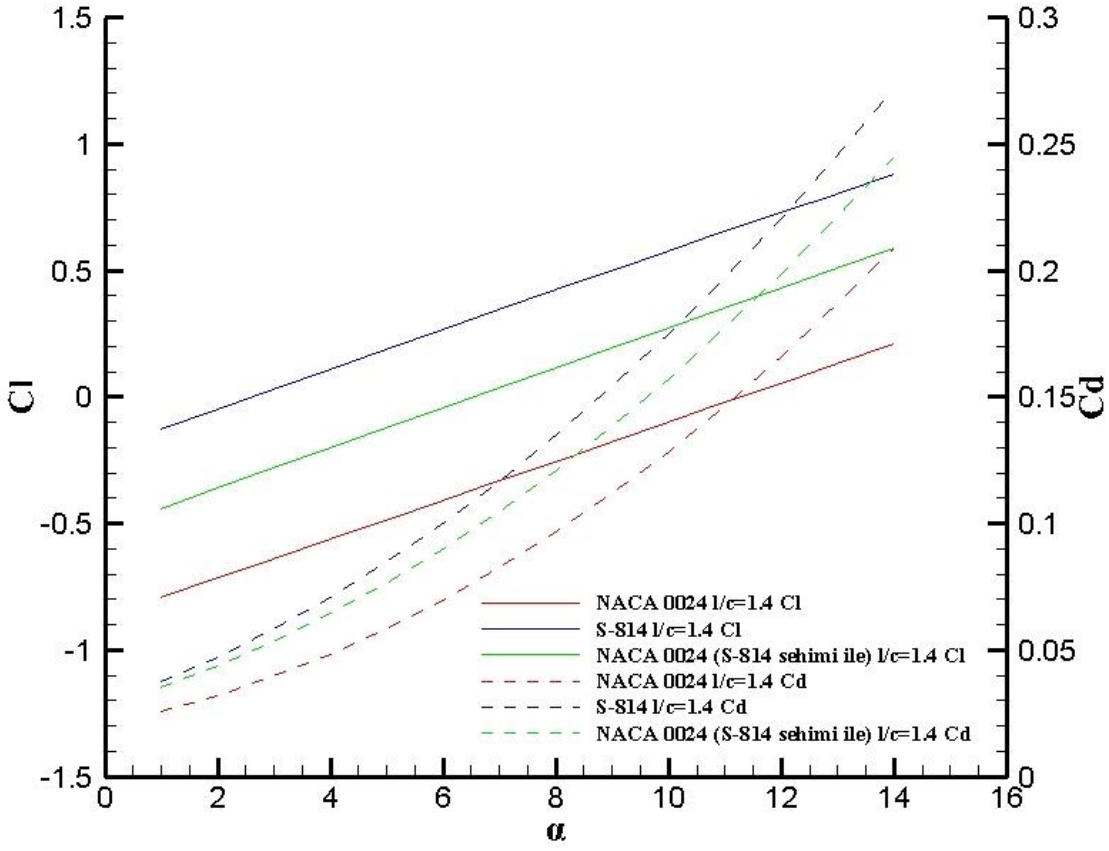

**Şekil 5.18 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kavitasyon hacimlerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.18'de görüldüğü gibi, NACA 0024'ün süperkavitasyon hacimleri her hücum açısında daha yüksektir. Bu hidrofoil kesitine S-814'ün sehimi uygulanmış versiyonu ise iki hidrofoil değerlerinin arasındadır.

Şartlar aynı tutularak, bu üç hidrofoilin hidrodinamik performansı göstermesi açısından çok önemli parametreler olan kaldırma ve direnç katsayıları farklı hücum açılarında hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Şekil 5.19'da verilmiştir.

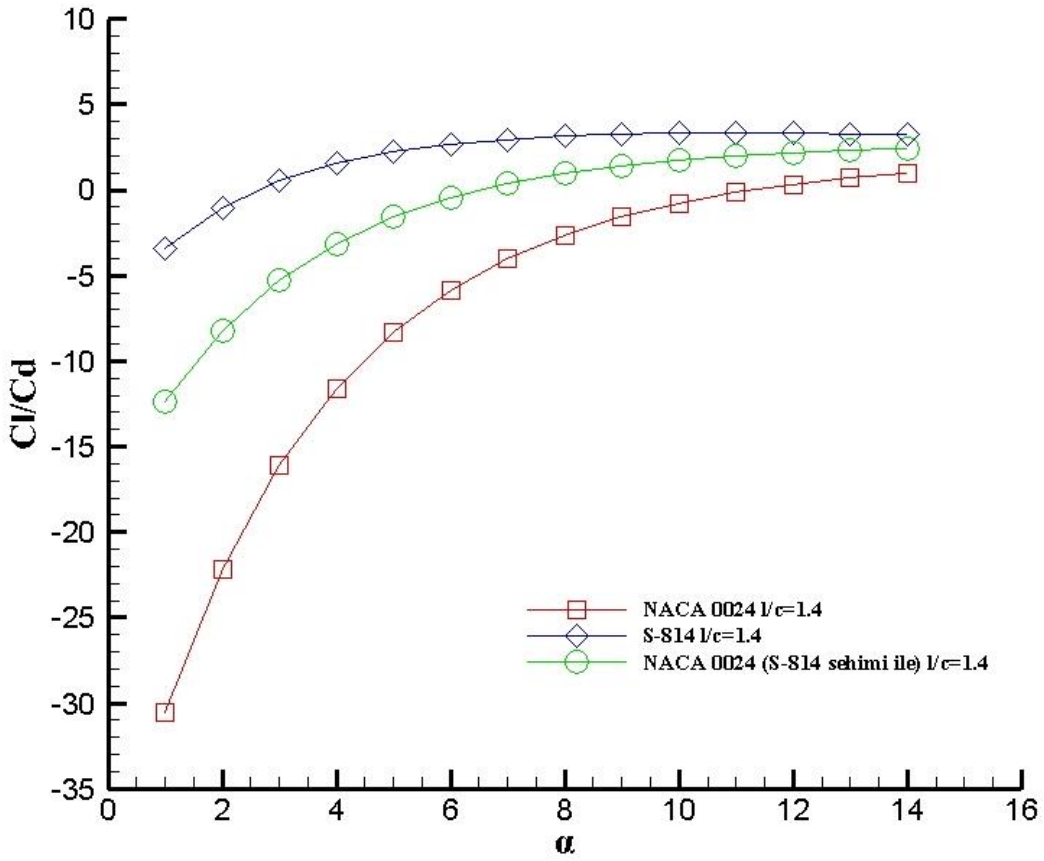
Şekil 5.19'da görüldüğü gibi, hem kaldırma hem direnç kuvveti katsayılarında S-814'ün değerleri diğer iki hidrofoil kesitinden daha yüksektir. NACA 0024 (sehimsiz) ise kaldırma kuvveti katsayısı ve direnç kuvveti katsayısı diğerlerinden daha düşüktür. Bu hidrofoil kesitine S-814'ün sehimi eklenmiş hali ise iki değerin arasında kalmaktadır.

Kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları elde edildikten sonra, bu katsayıların oranı da incelenmiştir. Bu oran hidrodinamik performans açısından çok önemlidir. Her üç hidrofoil kesiti için elde edilmiş değerler Şekil 5.20'de verilmiştir.



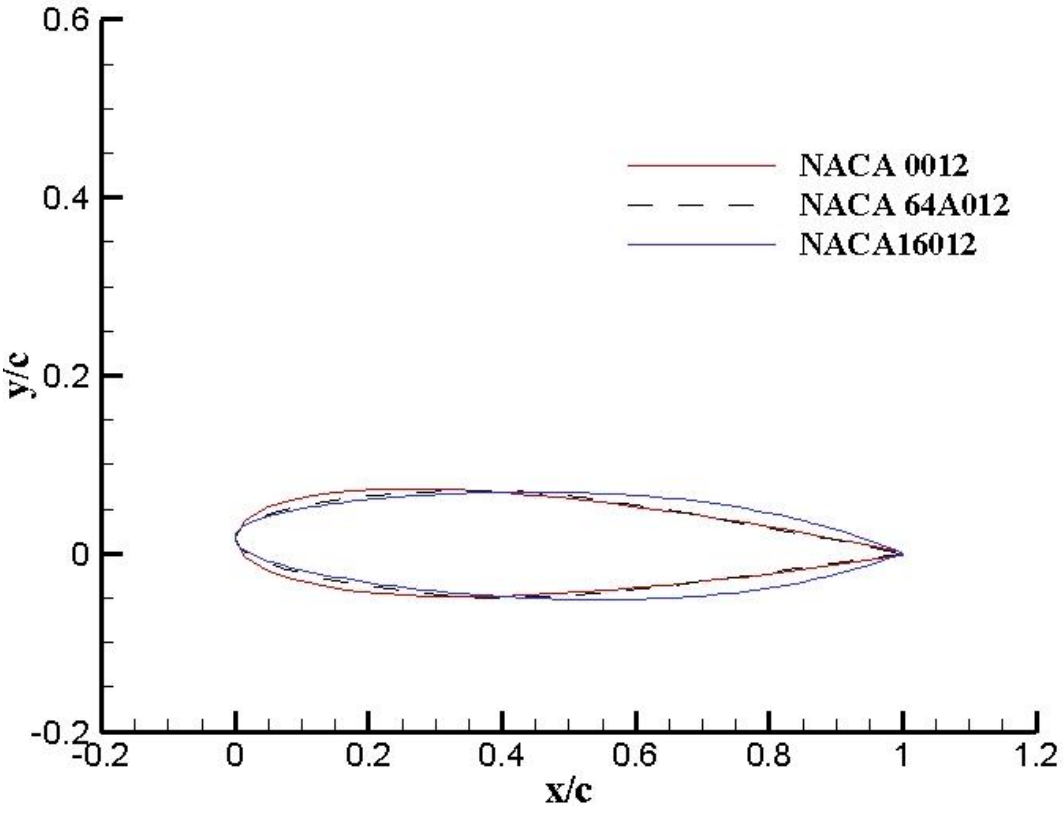

**Şekil 5.19 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kaldırma ve direnç katsayılarının karşılaştırılması.

NACA 0024, S814 sehimli NACA ve S-814 hidrofoil kesitlerinin Cl/Cd oranları Şekil 5.20'de verilmiştir. Bu değerlere bakıldığında, Cl/Cd oranı için, S-814 diğer iki hidrofoil kesitinden daha yüksek değerlere sahiptir. NACA 0024 ise diğer iki hidrofoil kesitinden daha düşük performans göstermiştir. S-814 sehiminin eklenmesi biraz daha kesit performansını arttırmıştır.




**Şekil 5.20 :** NACA0024 ve S-814 hidrofoil kesitlerinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, kaldırma ve direnç katsayıları oranlarının karşılaştırılması.

Kesit geometrisinin etkisini incelemek amacıyla bir diğer karşılaştırma ise maksimum kalınlık yerinin etkisidir. NACA profillerde her seride maksimum kalınlık oranları eşit olsa bile geometrilerde farklılıklar olmaktadır. Bunun için maksimum kalınlık oranları aynı olan 3 farklı NACA serisinden kesitler seçilmiş ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Seçilen kesitler; NACA 0012, 16012 ve 64A012'dir. Üç hidrofoilin karşılaştırmalı profil resmi Şekil 5.21'de verilmiştir.




**Şekil 5.21 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 profil şekli.

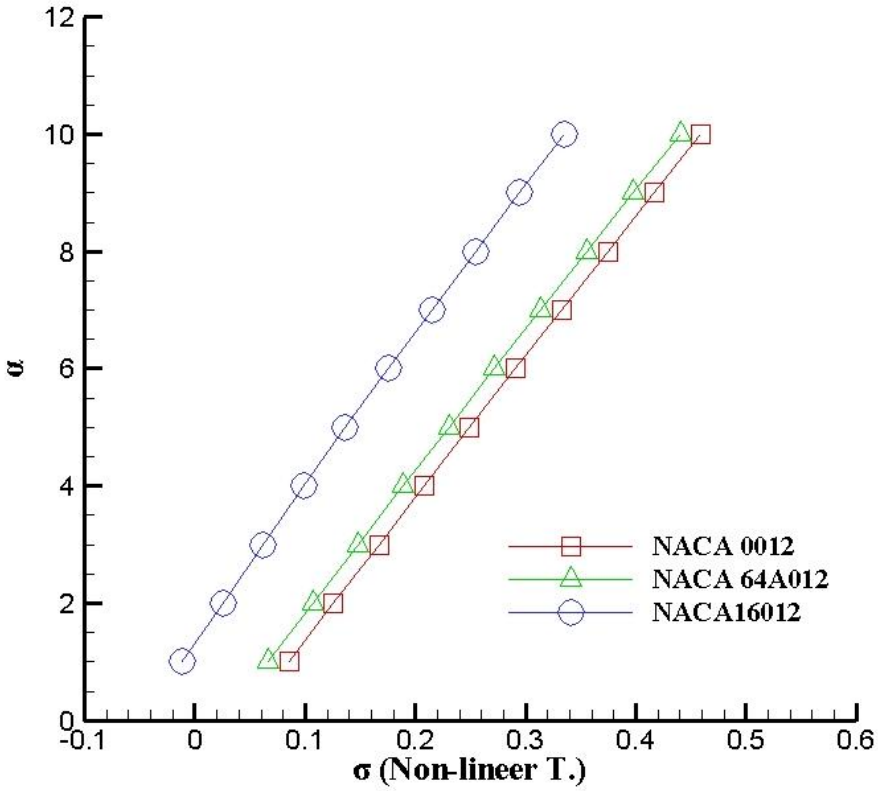
Şekil 5.21'de görüldüğü gibi 3 hidrofoilinde maksimum kalınlık oranları aynı ve %12'dir.

Şekil 5.22'de üç NACA kesitinin kavitasyon numaralarının 1.4 l/c süperkavitasyon durumunda 1-10 hücum açısı arasındaki değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

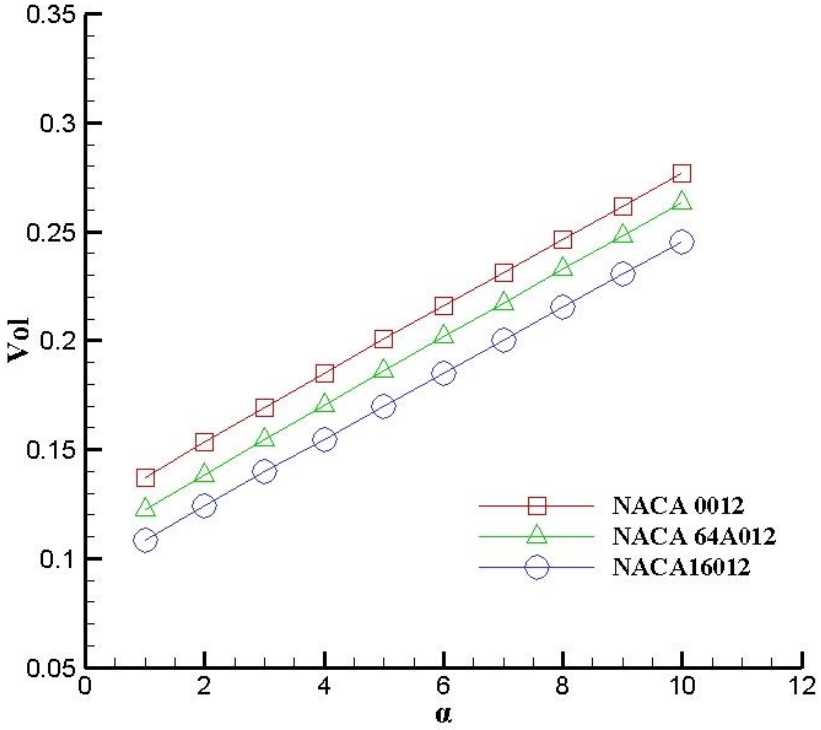
Şekil 5.22'de görüldüğü gibi NACA 0012 ve 64A012 kesitlerinin kavitasyon sayıları birbirine yakın çıkmıştır. NACA16012 kesiti ise diğer ikisinden düşük kavitasyon sayısına sahiptir.

Şekil 5.23'de ise bu üç NACA kesitinin kavitasyon hacimleri yine 1.4 l/c süperkavitasyon durumunda karşılaştırılmıştır.

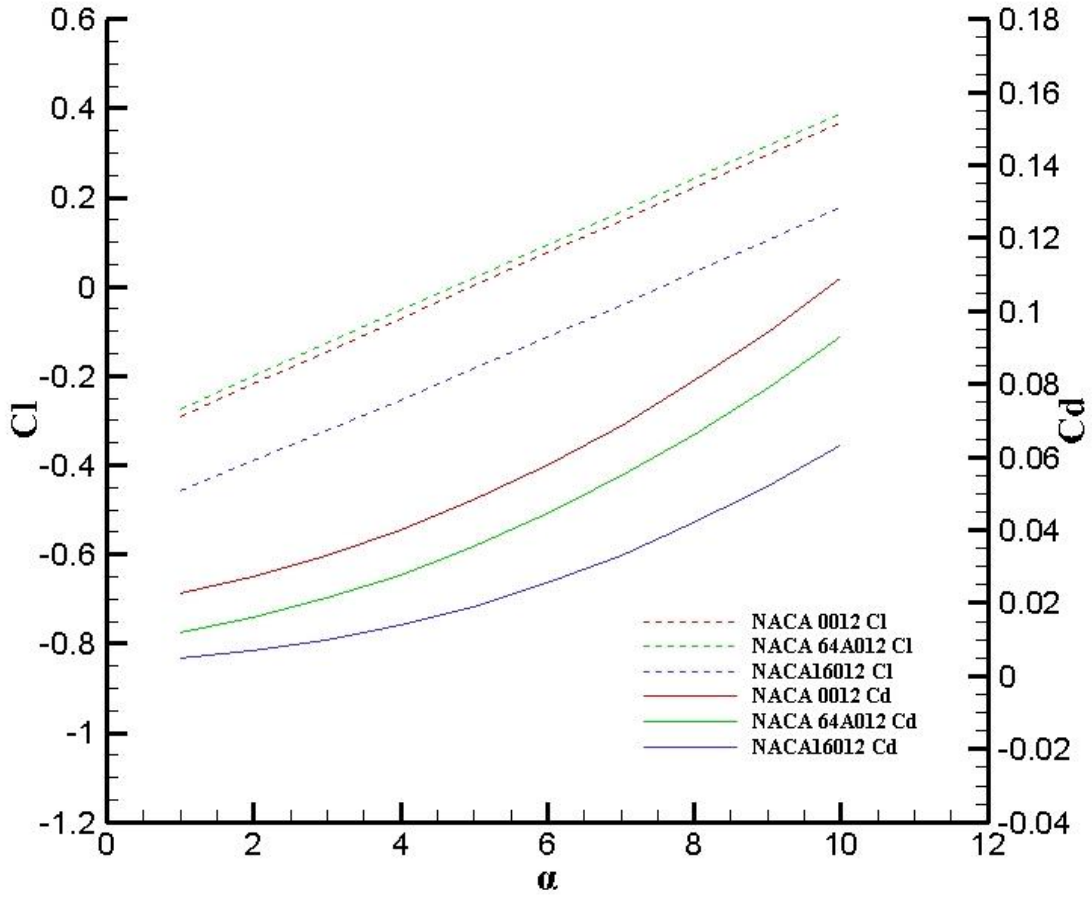
Şekil 5.23'de gösterildiği gibi, NACA 0012'nin süperkavitasyon hacmi diğerlerinden yüksektir. Şekil 5.21 incelendiğinde bunun sebebinin giriş ucunun küt olmasından, yani giriş ucunun çapının büyük olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 5.24'de ise üç NACA kesitinin kaldırma ve direnç katsayılarının karşılaştırılması verilmiştir.




**Şekil 5.22 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin kavitasyon numaralarının karşılaştırılması.




**Şekil 5.23 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin süperkavitasyon hacimlerinin karşılaştırılması.




**Şekil 5.24 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin kaldırma ve direnç katsayılarının karşılaştırılması.

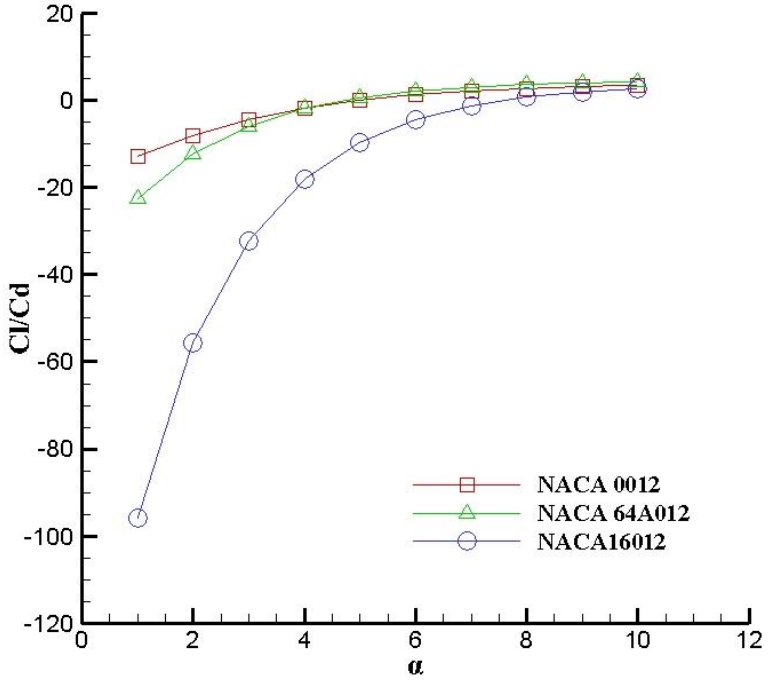
Şekil 5.24'de gösterildiği gibi en düşük kaldırma ve direnç katsayısı NACA 16012'de görülmüştür. En iyi performansı ise NACA 64A012 göstermiştir. Hidrodinamik performansı daha iyi inceleyebilmek için Şekil 5.25'de üç NACA kesitine ait kaldırma ve direnç katsayıları oranları verilmiştir.

Şekil 5.25 incelendiğinde NACA16012'nin en düşük kaldırma-direnç katsayıları oranına sahip olduğu görülmektedir. Diğer iki hidrofoil ise birbirine yakın çıkmıştır.

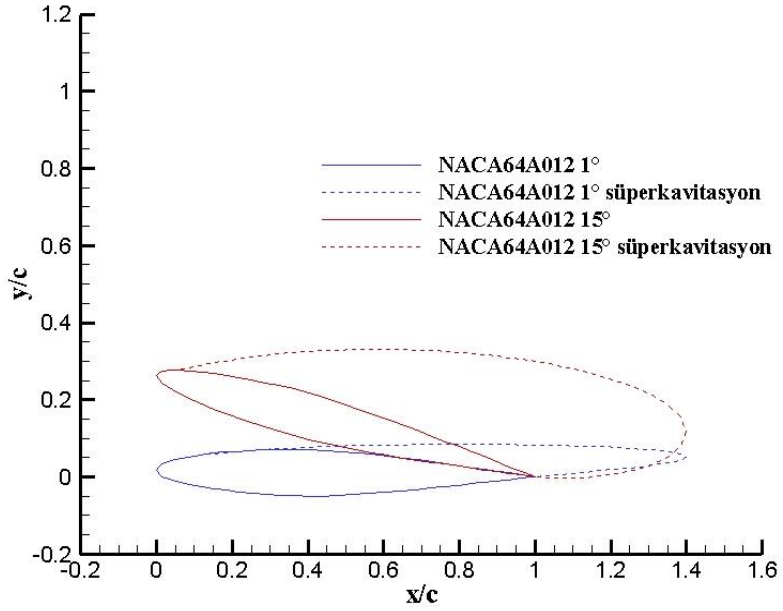
Şekil 5.26'da ise NACA 64A012 kesitine ait profil şekli iki farklı hücum açısında gösterilmiştir.

## 5.5 Sehim Etkisi

Maksimum sehim/kort oranının, süperkavitasyon performansına etkisini incelemek için NACA64A012 hidrofoil kesiti seçilmiştir. hidrofoil kesitinin 1.4 süperkavitasyon boyunda iki farklı açıdaki durumunun örnek kesiti Şekil 5.27'de gösterilmektedir.




**Şekil 5.25 :** NACA 0012, 64A012 ve 16012 kesitlerinin kaldırma ve direnç katsayıları oranlarının karşılaştırılması.

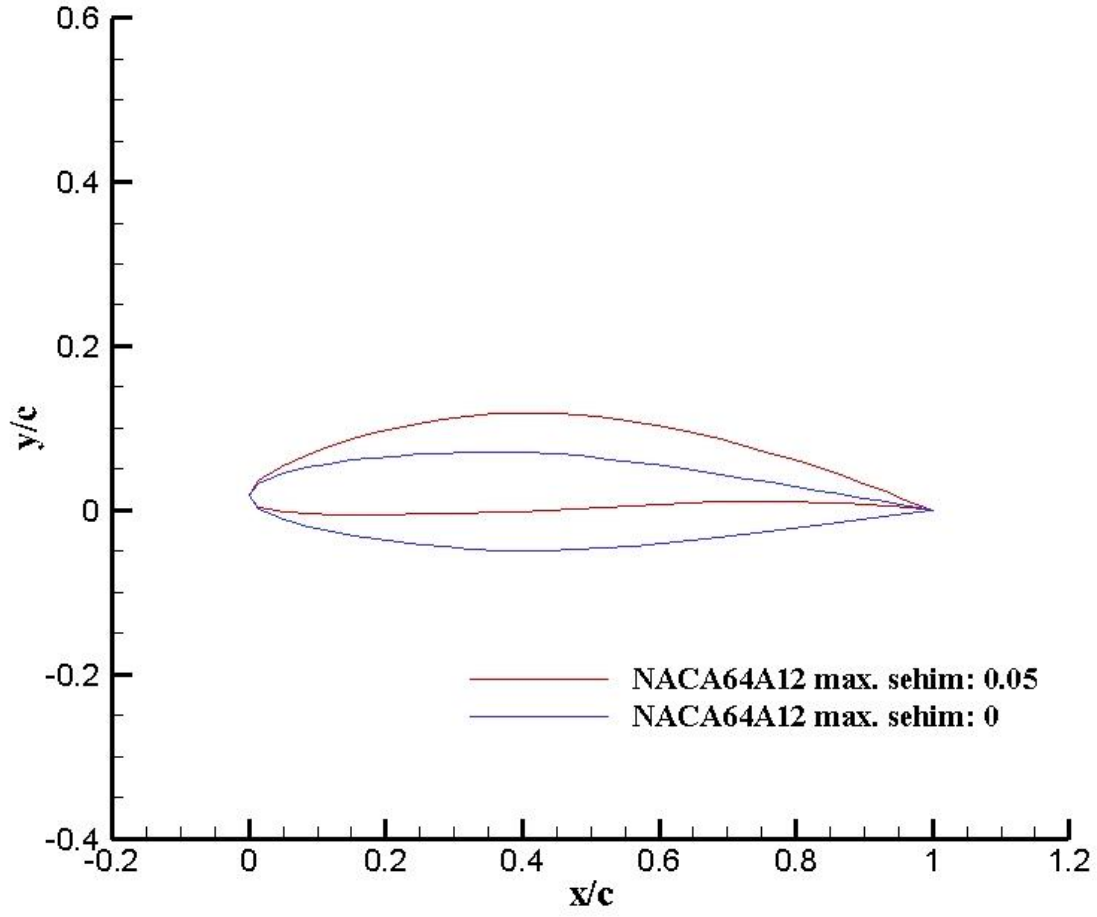



**Şekil 5.26 :** NACA64A012 hidrofoil kesitinin 1.4 l/c süperkavitasyon boyunda profil şekli.

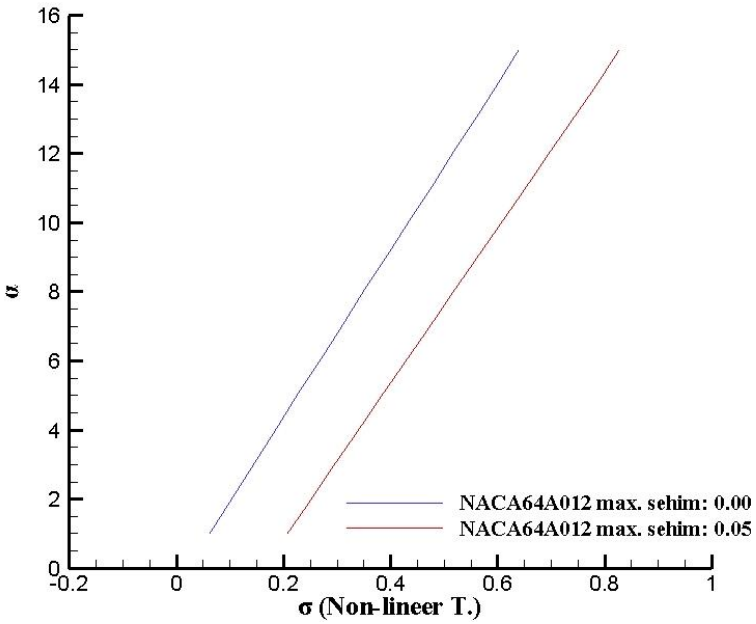
NACA64A012 hidrofoil kesiti sehimsiz bir kesittir. Bu hidrofoil kesitinin önce sehimsiz halde, sonra parabolik sehim verilerek süperkavitasyon performansı incelenmiştir. Maksimum sehim/kort oranı %5 olarak kabul edilmiştir. Hem %5 maksimum sehimli, hem sehimsiz şeklinin karşılaştırması Şekil 4.23'de verilmiştir.

Bu iki hidrofoil kesitinin önce kavitasyon sayıları karşılaştırılmış ve sehimin süperkavitasyonlu durumda kavitasyon sayısına etkisi incelenmiştir. Karşılaştırma alttaki resimde verilmiştir.

Şekil 5.28'de görüldüğü gibi, simetrik olan hidrofoil kesitine sehim verildiğinde süperkavitasyonlu durumda kavitasyon sayısını her açıda arttırmaktadır. Bu durum kısmi kavitasyon içinde geçerlidir [34]. Aynı şartlarda kaldırma ve direnç katsayıları da karşılaştırılmış ve alttaki resimde gösterilmiştir.

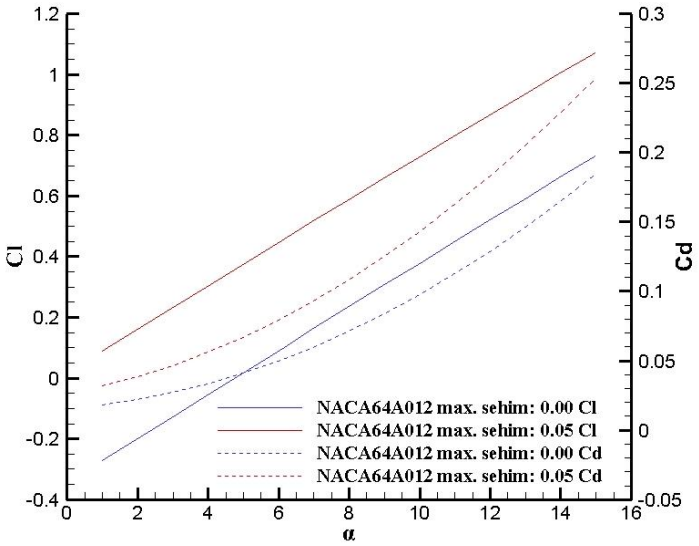



**Şekil 5.27 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c profil şekli.

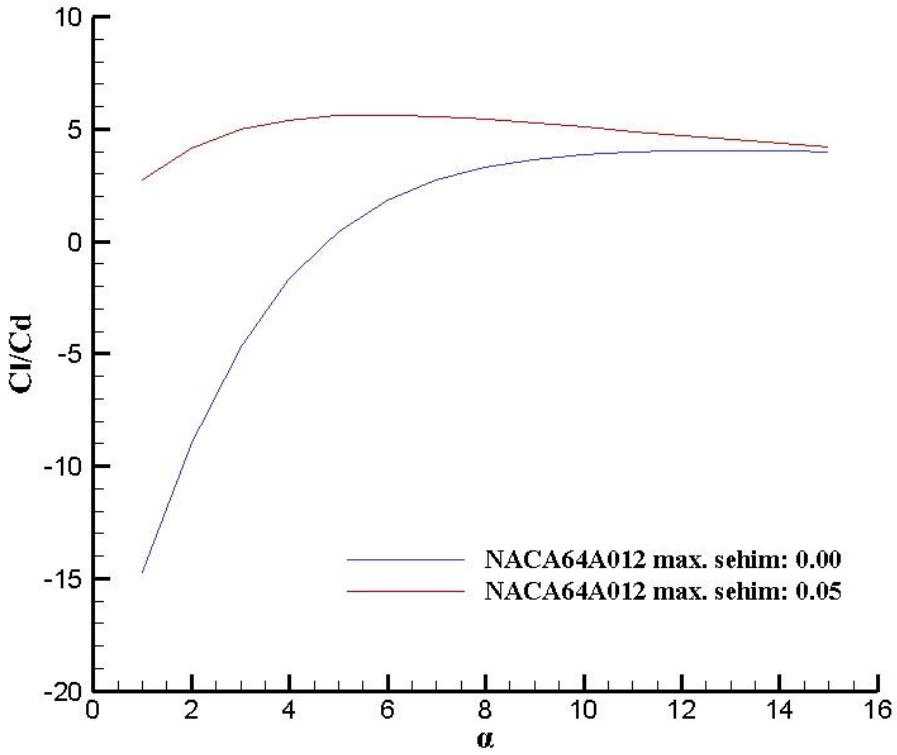



**Şekil 5.28 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c kavitasyon sayıları karşılaştırılması.

Şekil 5.29'da görüldüğü gibi, sehim kaldırma ve direnç katsayılarının da yükselmesine sebep olmuştur. Bu sonuçlardan yola çıkarak, hidrodinamik performansı gösteren Cl/Cd oranı elde edilmiş ve Şekil 5.30'da gösterilmiştir.




**Şekil 5.29 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c kaldırma ve direnç katsayıları karşılaştırılması.




**Şekil 5.30 :** NACA 64A012 hidrofoil kesitinin sehimsiz ve maksimum sehim oranı 0.05 c kaldırma ve direnç katsayıları oranlarının karşılaştırılması.

Beklendiği gibi Şekil 5.30'da sehim Cl/Cd oranını süperkavitasyonlu durumda önemli ölçüde arttırmıştır.

## 5.6 Fiziksel Parametrik Bir Çalışma

Önceki bölümlerde incelenen parametreleri daha iyi anlayabilmek için, pratikte gerçekleşmiş bir çalışma incelenmiştir. Bunun için MCT şirketine ait "Seaflow" isimli sualtı akıntı türbini ele alınmıştır. Şekil 5.31'de resmi verilen türbin 30 Mayıs 2003 tarihinde İngiltere'de denize inşa edilmiş 11m kanat çapında ve 300 kW enerji üretmektedir ve sualtında 15-24m arasında çalışabilmektedir [35]. Çalışma 8° hücum açısı için gerçekleştirilmiştir.

Türbinin verileri ile kanat uçlarındaki teğetsel hızların verilen deniz koşulları için 12-24 m/s arasında olduğu hesaplanmıştır. Türbin devir sayısı ise yaklaşık 0,3-0,7 rps arası kabul edilmiştir ve hesaplamalar türbinin serbest su yüzeyine yakın kısmında gerçekleştirilmiştir. Bu kısmın seçilmesinin nedeni, hidrostatik basınç düşük olacağı için süperkavitasyon riskinin daha yüksek olmasıdır. Çizelge 5.6'da kabul edilen ve alınan değerler tabloda üç farklı durum için gösterilmiştir.

Birinci durumda, türbin minimum derinlikte çalışmaktadır. Serbest su yüzeyine uzaklığı 10m'dir. Bu durumda türbinin serbest su yüzeyine uzaklığı 6m civarı olmaktadır.

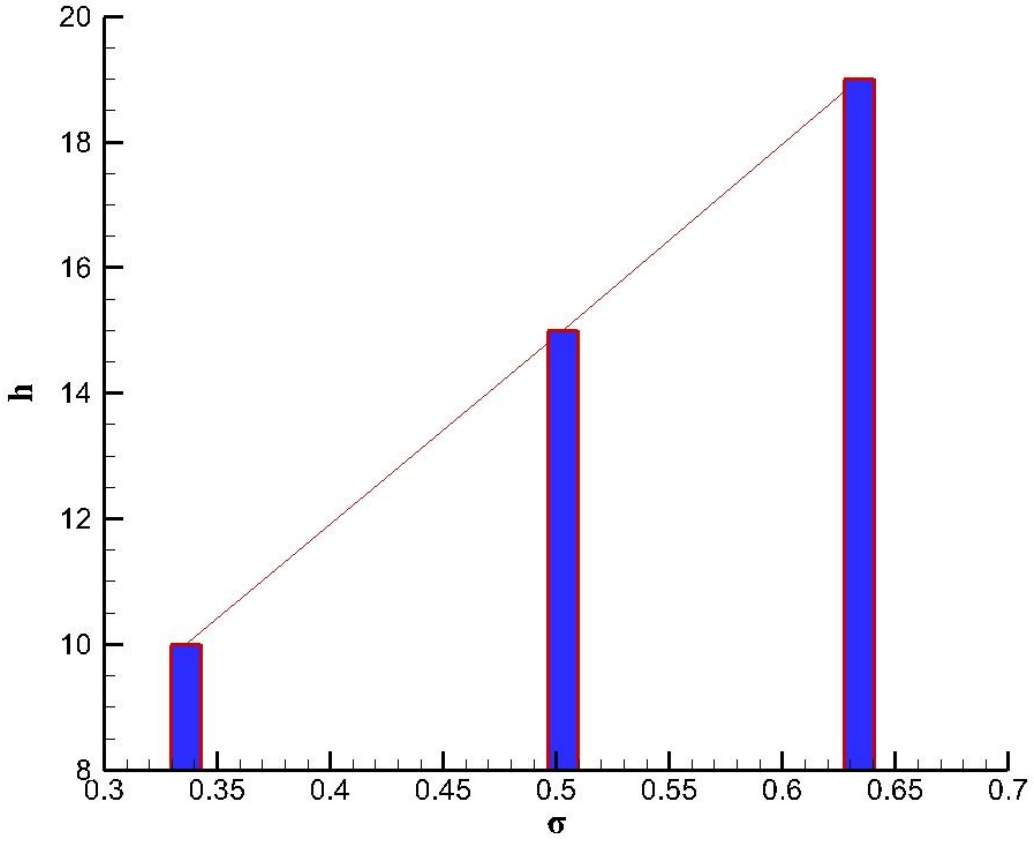
**Çizelge 5.6 :** Seaflow çalışma koşullarına air bazı değerler.

| | |
|---|---|
| $P_{atm}$ | 101 kPa |
| $P_v$ | 3 kPa |
| $\rho$ | 1000 kg/m$^3$ |
| $h_1$,$h_2$,$h_3$ | 10,15,19 m |
| T | 25 °C |



**Şekil 5.31 :** Seaflow [35].

Belirlenen 3 derinlik için hesaplamalar s-814 hidrofoil kesiti kullanılarak yapılmıştır. Devir sabit tutulduğundan uçlardaki maksimum teğetsel hızlar 3 durumda da değişmeyecektir. 0,7 rps için bu hız yaklaşık 24 m/s'dir. Bu durumlar için öncelikle kavitasyon sayıları hesaplanmış ve Şekil 5.32' de gösterilmiştir.



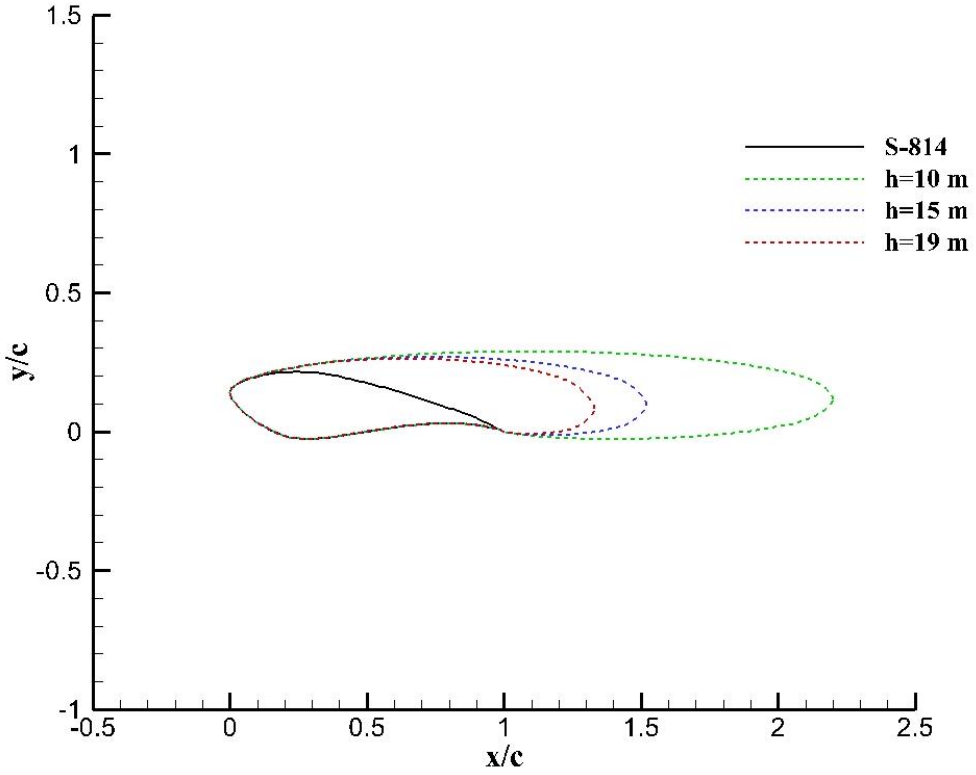

**Şekil 5.32 :** Farklı derinlik durumları için kavitasyon sayıları.

Şekil 5.32'de 3 farklı derinlikteki çalışma koşulları için elde edilen kavitasyon sayıları verilmiştir. Beklendiği gibi derinlik arttıkça hidrostatik basınç arttığından kavitasyon sayısı da artmaktadır.

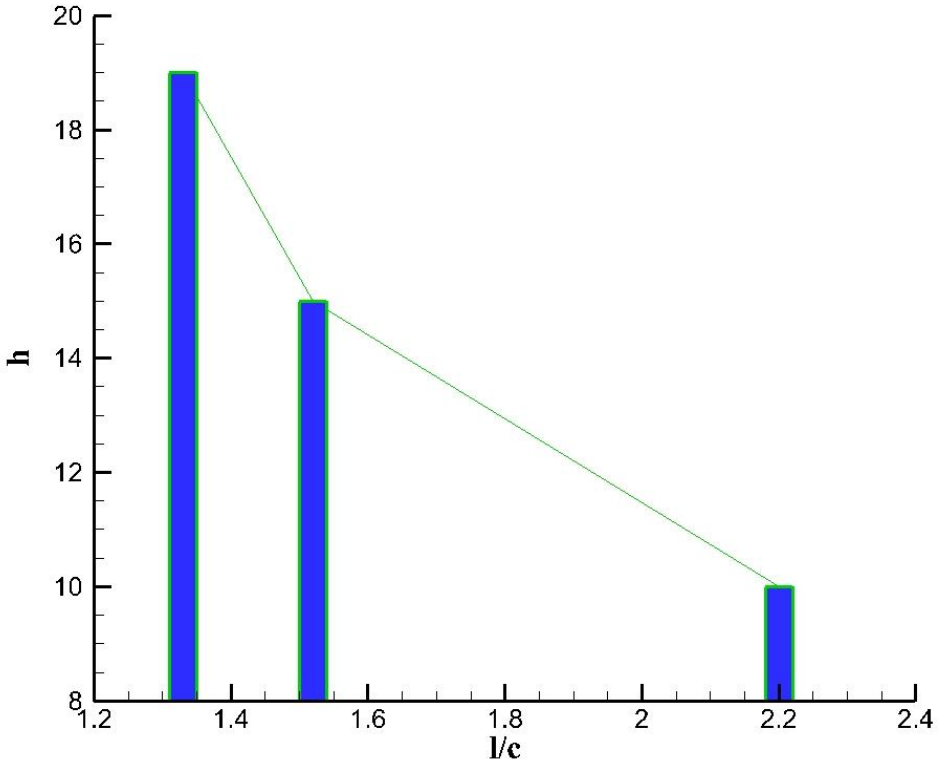
Derinlik dışındaki çalışma koşullarının aynı olduğu 3 durumda süperkavitasyon boyları da bulunmuştur. Şekil 5.33'de profil kesiti ve süperkavitasyon şekli, Şekil 5.34'de ise derinlik ile süperkavitasyon boyları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 5.34'de gösterildiği üzere derinlik arttıkça süperkavitasyon boyu azalmaktadır. Bu beklenen bir durumdur çünkü hidrostatik basınç artmıştır.

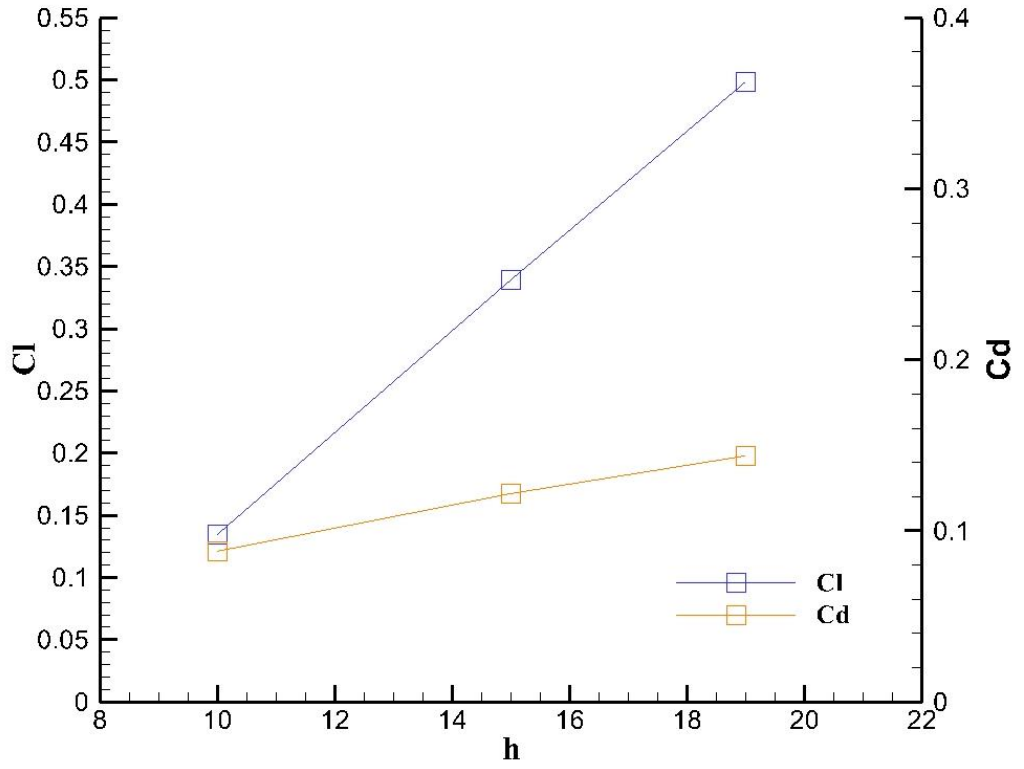
Ayrıca belirtilen durumlar için kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları elde edilmiştir ve Şekil 5.35'de gösterilmiştir. Bu değerlerden elde edilen kaldırma-direnç kuvveti katsayıları oranı ise Şekil 5.36'da gösterilmiştir.



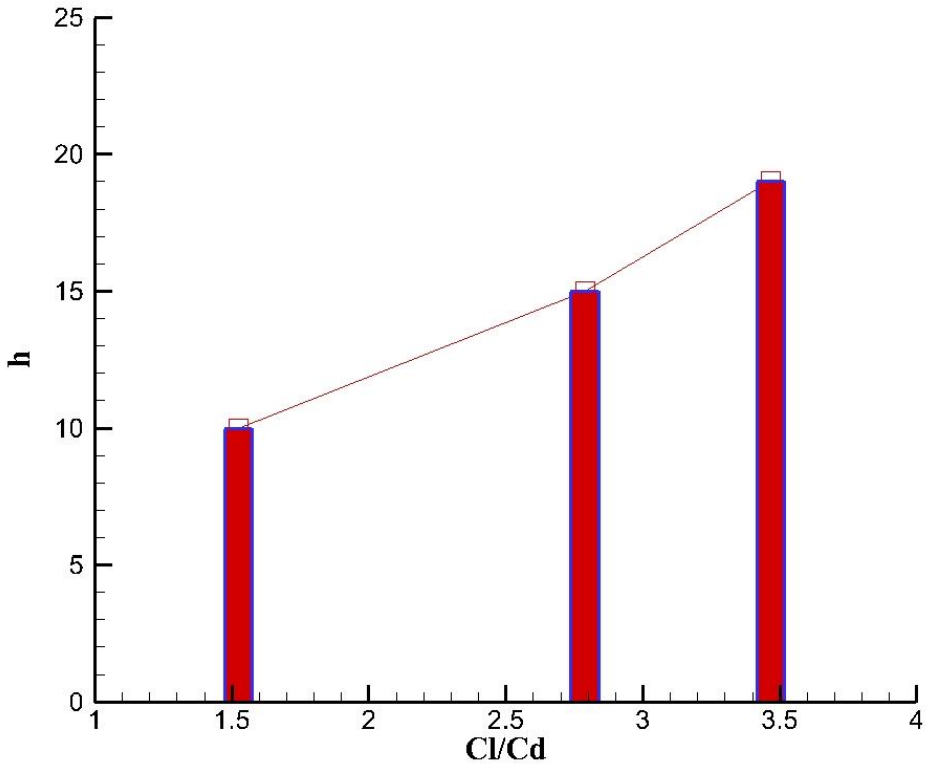

**Şekil 5.33 :** Farklı derinlikler için süperkavitasyon profil şekli.




**Şekil 5.34 :** Süperkavitasyon boyunun derinlik ile değişimi.

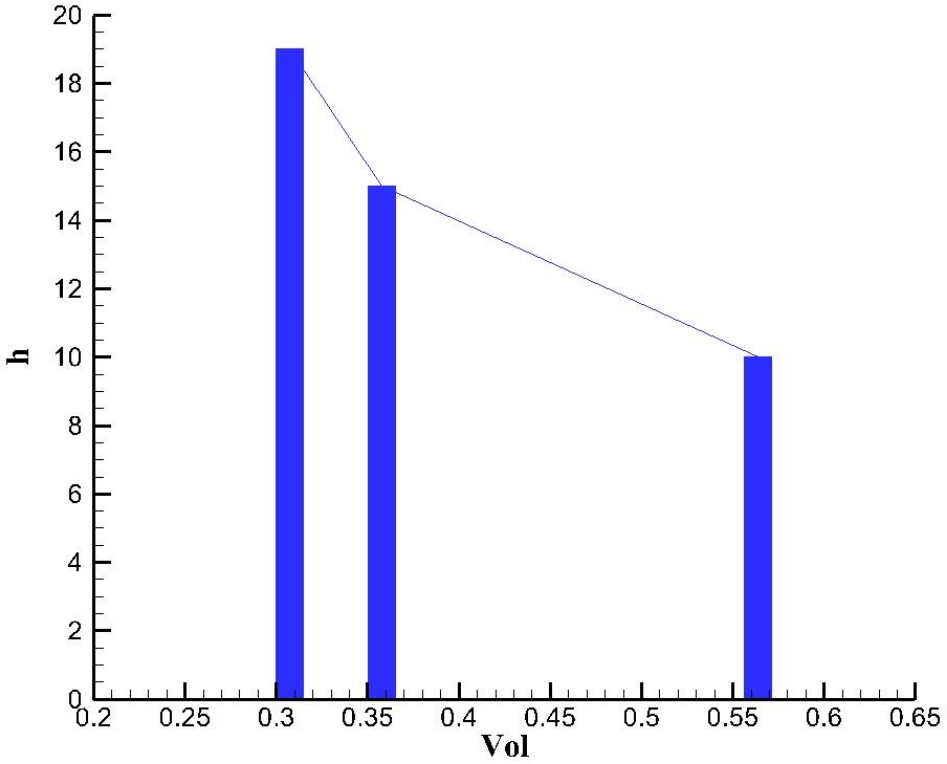



**Şekil 5.35 :** Farklı derinliklerde kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları.




**Şekil 5.36 :** Farklı derinliklerde kaldırma ve direnç kuvveti katsayıları oranı.

Şekil 5.35'de gösterildiği üzere derinliğin artması hem kaldırma hem de direnç kuvveti katsayısını arttırmıştır. Şekil 5.36'da ise kaldırma direnç kuvveti katsayıları oranının da derinlikle arttığı görülmektedir. Şekil 5.37'de derinlikle süperkavitasyon hacminin değişimi gösterilmiştir. Süperkavitasyon boyu azaldığı için ve hidrostatik basınç arttığı için kavitasyon hacmi de azalmaktadır.




**Şekil 5.37 :** Farklı derinliklerde süperkavitasyon hacmi.

# 6. SONUÇ

Bu çalışmada, süperkavitasyon yapan hidrofoilin performansları sayısal olarak sınır elemanları metodu ile analiz edilmiştir. Çalışmada, hidrofoil kesiti kalınlığı, süperkavitasyon boyu, kesit geometrisi, çözüm yöntemi ve maksimum sehim oranı gibi parametrelerin değişimlerin hidrodinamik performansa etkisi incelenmiştir.

Yapılan hesaplamalar sonucunda hidrofoil kesitlerinin süperkavitasyon boyu sabit tutulmuş ve bu değerlere karşılık gelen kavitasyon sayısı, kavitasyon hacmi, kaldırma ve direnç katsayıları ve bunların oranları elde edilmiştir.

Hidrofoil kesitinin maksimum kalınlığının, süperkavitasyon yapan hidrofoilin performansına etkisini incelemek için, tüm hidrodinamik özellikleri maksimum kalınlıkları dışında aynı olan NACA 16006 ve 16012 hidrofoil kesitleri seçilmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda; kalınlığın arttıkça kavitasyon sayısının azaldığı, kaldırma kuvveti katsayısının azaldığı, direnç katsayısının arttığı, kaldırma-direnç oranının azaldığı ve kavitasyon hacminin arttığı görülmüştür.

Süperkavitasyon boyunun etkisini saptamak için ise, 1.1 l/c ve 1.4 l/c süperkavitasyon boyları sabit tutularak hesaplamalar yapılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda; süperkavitasyon boyunun arttıkça kavitasyon sayısının azaldığı, kaldırma katsayısının azaldığı, direnç katsayısının azaldığı, kaldırma-direnç katsayılarının oranının azaldığı görülmüştür.

Hidrofoil kesit geometrisinin karşılaştırılması amacıyla, hemen hemen aynı maksimum kalınlıklara sahip olan NACA0024 hidrofoil kesiti ve sualtı akıntı türbinlerinde kullanılan S-814 hidrofoil kesitleri karşılaştırılmıştır. NACA profilinin kavitasyon sayısının S-814'den daha küçük olduğu görülmüştür. Kavitasyon hacminin ise daha yüksek olduğu gösterilmiştir. Hem kaldırma hem de direnç katsayılarında ise S-814'ün değerlerinin daha yüksek olduğu görülmüştür. Hidrodinamik performansı gösterme açısından önemli bir parametre olan kaldırma-direnç katsayı oranları ise S-814'ün daha yüksektir. Bir ara durum olarak, NACA0024 hidrofoil kesitine S-814'ün sehimi yerleştirilmiş ve aynı hesaplar bu yeni hidrofoil için gerçekleştirilmiştir. Tüm

hesaplamalarda, NACA kesitinin performansı bir miktar yükseltmiştir fakat diğer iki hidrofoilin değerleri arasında kalmıştır. Sonuç olarak, sualtı akıntı türbinlerinin büyük çaplarda olmasından kaynaklanan teğetsel hızların yüksek olması ve serbest su yüzeyine yakın çalışabilmelerinden dolayı hidrostatik basıncın düşük olması süperkavitasyon riskini arttırmaktadır. Bu yüzden bu türbinlerde süperkavitasyon performansı dikkate alınarak hidrofoil kesiti seçilmektedir. Elde edilen sonuçlar ışığında, S-814 sualtı akıntı türbinleri için belirtilen şartlarda daha uygun bir hidrofoil kesiti olduğu değerlendirilmiştir.

Yapılan hesaplamalarda hem lineer hem de lineer olmayan teori çözümünün sonuçları elde edilmiştir. Bu yüzden bu iki sonuçta karşılaştırılmıştır. Lineer teori ile lineer olmayan teori sonuçları çok küçük ve çok yüksek hücum açıları hariç yakın görülmüştür. Ayrıca hidrofoil kesitinin maksimum kalınlığı azaldıkça, iki sonucun birbirine yakınlaştığı görülmüştür.

Son olarak ise maksimum sehim oranının etkisi incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda; maksimum sehim oranı arttıkça kavitasyon sayısının arttığı, kaldırma kuvveti katsayısının arttığı, direnç kuvveti katsayısının ve kaldırma-direnç katsayıları oranlarının da arttığı görülmüştür. Yani maksimum sehim oranının, hidrodinamik performansı olumlu etkilediği açıkça görülmüştür.

Yapılan çalışmalar pratikte gerçekleştirilmiş bir uygulama ile tekrarlanmıştır. Sonuçlar yorumlandığında, İngiltere'de gerçekleştirilen bu uygulamada türbin en fazla 25m derinlikte çalışmaktadır. Bu derinlikte bile kanat uçlarında süperkavitasyonun kaçınılmaz olduğu görülmektedir. Bu da enerjiden kayıp anlamına gelmektedir. Uygulamanın, bu yöntem ile elde edilen sonuçları incelendiğinde negatif kaldırma kuvveti katsayılarının artık olmadığı görülmektedir.

Yapılan çalışma baştaki bölümlerde belirtildiği üzere potansiyel teori tabanlı bir çalışmadır. Aynı çalışma yine sınır elemanlar metodu kullanılarak viskoz bir akışkan içinde gerçekleştirilebilir. 0 hücum açısındaki hidrofoiller için alt ve üst yüzeyde süperkavitasyon oluşması hesaplanarak gerçeğe uygun sonuçlar elde edilebilir. Bu sayede süperkavitasyon yapan bir sualtı aracı (torpido vs.) için hesaplamalar yapılabilir. Belirtildiği gibi 0 hücum açısında süperkavitasyon yapan hidrofoillerin sürtünme kuvveti ciddi oranlarda düşmektedir. Viskoz akışkan ile hesap yapıldığında

bu düşüş net olarak görülebilir ve gerekli güç hesaplanıp, bu tip sualtı araçları için dizayn yapılabilir.

## KAYNAKLAR


[1] **Franc, J.P. & Michel, J.M.** (2004). *Fundamentals of cavitation*, cilt 76, Springer Science & Business Media.

[2] **Url-1** http://defence.pk/threads/work-begun-on-the-last-in-series-submarine-for-vietnam.237485/page-2>, erişim tarihi 10.01.2016.

[3] **Url -2** <http://www.marineturbines.com/Seagen-Technology>, erişim tarihi 14.01.2016.

[4] **Kinnas, S. & Fine, N.** (1993). MIT-PCPAN & MIT-SCPAN user's manual.

[5] **Kinnas, S.A.** (1999). Fundamentals of cavity flows supplement to the notes on the4 principles of hydrodynamics. UT Austin.

[6] **Birkhoff, G. & Zarantolnello, E.H.** (1957). *Jets, wakes and cavities.* Academic Press inc., New York.

[7] **Kutznetsov, A.V. & Terentov, A.C.** (1967). On analysis of partially cavitating flow around flat plate. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Mathematika*. Vol. 66, pp:43-46

[8] **Cox, A. D. & Clayden, W. A.** (1958). Cavitating flow about a wedge at incidence. *Journal of Fluid Mechanics*, 3(06), 615-637.

[9] **Tulin, M. P.** (1953). Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies. David Taylor Model Basin..

[10] **Tulin, M. P., & Burkart, M. P.** (1955). Linearized theory for flows about lifting hidrofoils at zero cavitation number (No. DTMB-C-638). David Taylor Model Basin Washington Dc.

*[11]* **Tulin, M. P.** (1955). Supercavitating flow past hidrofoils and struts. *In Proceedings of the NPL Symposium on Cavitation in Hydrodynamics.*

[12] **Hanaoka, T.** (1964). Linearized theory of cavity flow past a hydrofoil of arbitrary shape. *Journal of the society of naval architects*, Japan, Vol. 115, Pp: 56-74.

[13] **Bal, S.** (1998). A potential based panel method for 2-D hydrofoils. *Ocean Engineering*, 26(4), 343-361.

[14] **Bal, S. & Kinnas, S. A.** (2002). A BEM for the prediction of free surface effects on cavitating hydrofoils. *Computational Mechanics*, 28(3-4), 260-274.

[15] **Celik, F., Ozden, Y. A. & Bal, S.** (2014). Numerical simulation of flow around two-and three-dimensional partially cavitating hydrofoils. *Ocean Engineering*, 78, 22-34.

[16] **Kerwin, J. E.** (1994). The MIT marine hydrodynamics water tunnel-a 53rd anniversary celebration.

[17] **Kinnas, S. A. & Fine, N. E.** (1993). A numerical nonlinear analysis of the flow around two-and three-dimensional partially cavitating hydrofoils. *Journal of Fluid Mechanics*, 254, 151-181.

[18] **Kinnas, S. A. & Mazel, C. H.** (1993). Numerical versus experimental cavitation tunnel (A supercavitating hydrofoil experiment*). Journal of fluids engineering*, 115(4), 760-765.

[19] **Bal, Ş. & Güner, M.** (2011). Sayısal bir yöntem ile podlu pervane analizi. *İtüdergisi/d*, 8(2).

[20] **Bal, Ş.** (2011). A method for optimum cavitating ship propellers. *Turkish journal of engineering and environmental sciences*, 35(3), 319-338.

[21] **Kinnas, S. A.** (2001). Supercavitating 3-D Hydrofoils and Propellers: Prediction of Performance and Design. Texas Univ. at Austin Ocean Engineering Group.

[22] **Brennen, C. E.** (2013). *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press.

[23] **Katz, J. & Plotkin, A.** (2001). *Low-speed aerodynamics*. Cambridge University Press. Vol. 13.

[24] **Url-3** <http://www.dynaflow-inc.com/Services/cavitation.htm>, erişim tarihi 15.01.2016.

[25] **Url-4** <http://www.1.k.utokyo.ac.jp/yama/fluidlab/Research/CavPictures/index_e.html>, erişim tarihi 15.01.2016.

[26] **Url-5** <http://www.defensetech.org/2009/11/17/super-cavitation-and-the-truth/>, erişim tarihi 20.01.2016.

[27] **Url-6** <http://www.theguardian.com/world/2006/apr/03/iran.nuclear>, erişim tarihi 20.01.2016.

[28] **Url-7** <http://www.popsci.com/scitech/article/2004-06/supercavitating-torpedo>, erişim tarihi 22.01.2016.

[29] **Url-8** <https://i.ytimg.com/vi/O1lxEQawju0/maxresdefault.jpg>, erişim tarihi 22.01.2016.

[30] **Url-9** <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e6/Cavitation_Propeller_Damage.JPG>, erişim tarihi 22.01.2016.

[31] **Uşar, D.** (2015). *Sualtı Akıntı Türbinlerinin Hidrodinamik Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, İTÜ.

[32] **Url-10** <http://airfoiltools.com/>, erişim tarihi 24.01.2016.

[33] **Çakır, V. & Bal, Ş.,** (2016). Performance Prediction of Supercavitating Blade Sections for Marine Current Turbine. *1st International Conference on Engineering Technology and Applied Sciences*.

[34] **Karaalioğlu, M. S., ve Bal, Ş.,** (2015). "Hidrofoillerin Kavitasyon Kovalarının Sayısal Parametrik İncelenmesi", *Journal of Maritime and Marine Sciences*, Vol. 1, No. 2, 12/2015, s. 28-40, Ordu University.

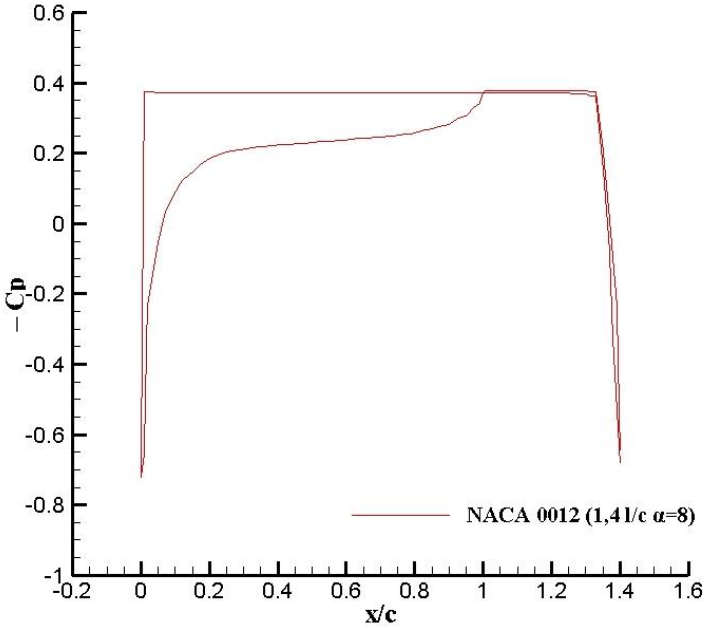
[35] **Url-11** <http://www.marineturbines.com/About-Marine-Current-Turbines>, erişim tarihi 10.03.2016.

## EKLER

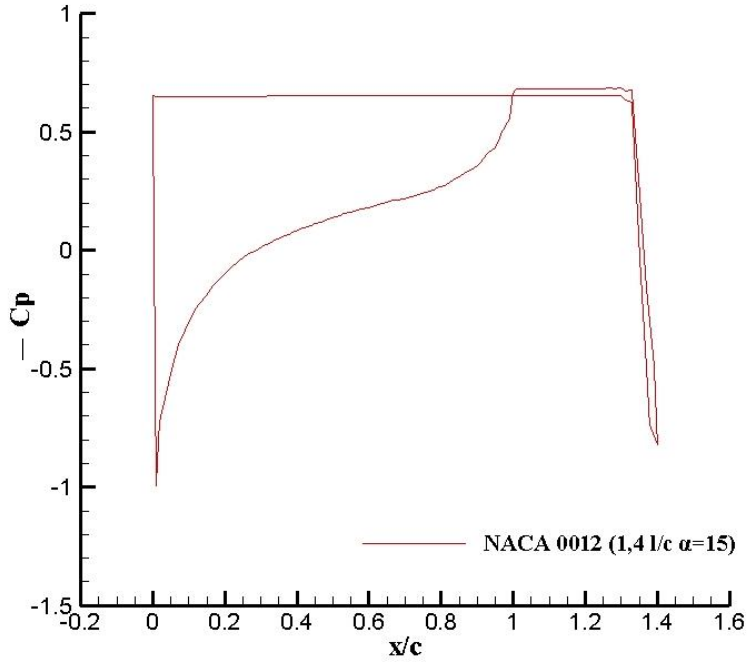
**Ek A** Hidrofoillerin basınç katsayıları

**Ek B** S814 geometri değerler

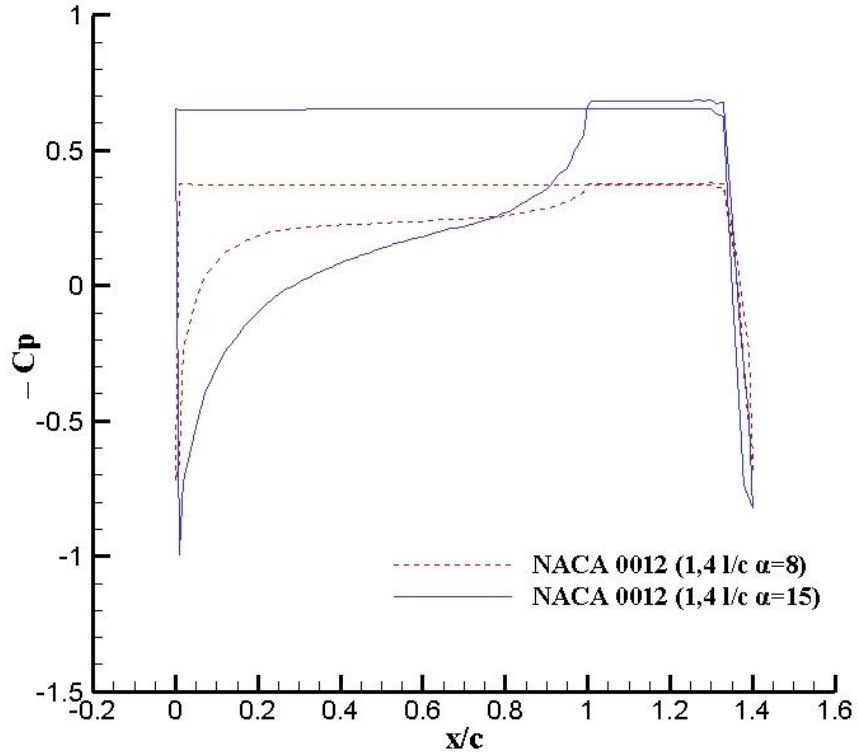
**Ek A** Hidrofoil kesitleri basınç katsayıları



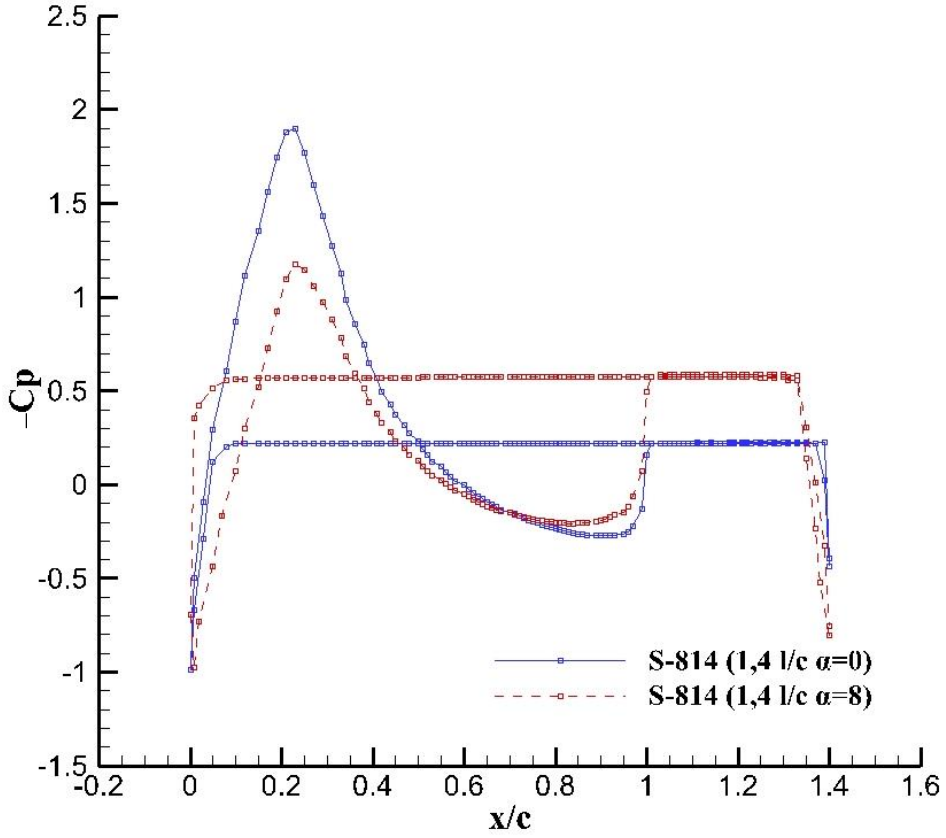

**Şekil A.1 :** NACA 0012 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 8 derece hücum açısında basınç katsayıları.



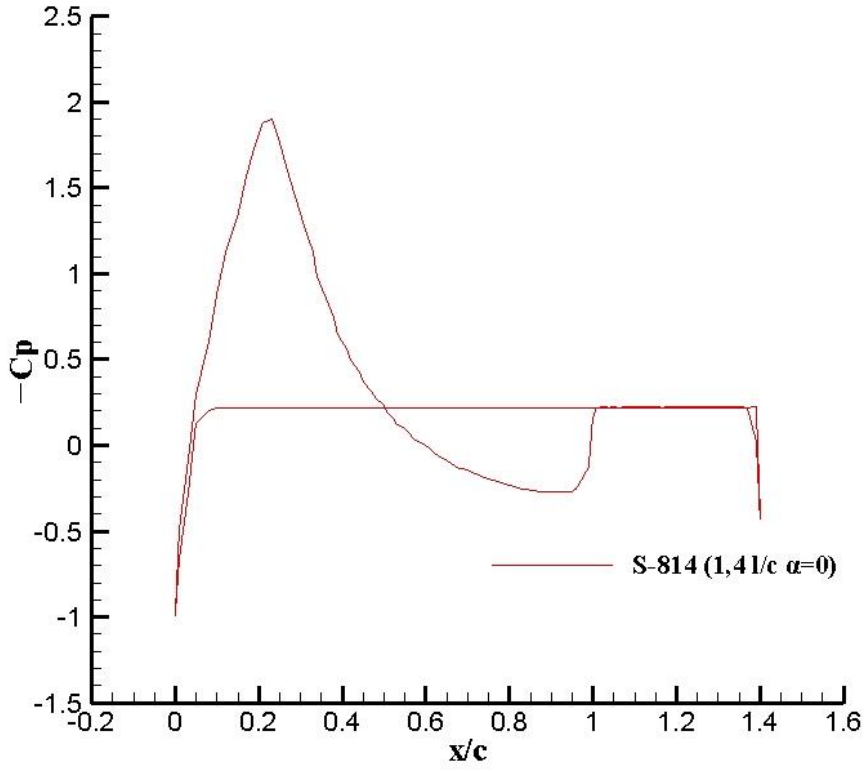

**Şekil A.2 :** NACA 0012 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 15 derece hücum açısında basınç katsayıları.




**Şekil A.3 :** NACA 0012 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 8 ve 15 derece hücum açısında basınç katsayıları.




**Şekil A.4 :** S-814 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 0 ve 8 derece hücum açısında basınç katsayıları.




**Şekil A.5 :** S-814 kesitinin 1,4 l/c süperkavitasyon boyunda, 0 derece hücum açısında basınç katsayıları.

**Ek B** S814 geometri değerler

**Çizelge A.1 :** S-814 kesitinin geometri değerleri.

| **Yarı kalınlıklar** | | **Sehim** | |
|---|---|---|---|
| *X* | *Y* | *X* | *Y* |
| 0,0000 | 0,0000 | 0,00000 | 0,00159 |
| 0,0256 | 0,0379 | 0,00025 | 0,00162 |
| 0,0513 | 0,0571 | 0,00068 | 0,00104 |
| 0,0769 | 0,0722 | 0,00093 | 0,00653 |
| 0,1282 | 0,0951 | 0,00638 | 0,00676 |
| 0,1538 | 0,1037 | 0,01679 | 0,00594 |
| 0,1795 | 0,1106 | 0,03137 | 0,00464 |
| 0,2051 | 0,1159 | 0,04964 | 0,00298 |
| 0,2564 | 0,1209 | 0,07124 | 0,00103 |
| 0,2821 | 0,1209 | 0,09561 | -0,00106 |
| 0,3077 | 0,1198 | 0,12244 | -0,00316 |
| 0,3333 | 0,1174 | 0,15120 | -0,00505 |
| 0,3846 | 0,1101 | 0,18167 | -0,00648 |
| 0,4103 | 0,1057 | 0,21367 | -0,00730 |
| 0,4359 | 0,1008 | 0,24714 | -0,00717 |
| 0,4615 | 0,0958 | 0,28394 | -0,00606 |
| 0,5128 | 0,0851 | 0,32378 | -0,00394 |
| 0,5385 | 0,0797 | 0,36733 | -0,00072 |
| 0,5641 | 0,0742 | 0,41459 | 0,00319 |
| 0,5897 | 0,0688 | 0,46526 | 0,00749 |
| 0,6410 | 0,0581 | 0,51881 | 0,01183 |
| 0,6667 | 0,0528 | 0,57457 | 0,01588 |
| 0,6923 | 0,0477 | 0,63164 | 0,01929 |
| 0,7179 | 0,0428 | 0,68891 | 0,02176 |
| 0,7692 | 0,0333 | 0,74513 | 0,02303 |
| 0,7949 | 0,0288 | 0,79891 | 0,02294 |
| 0,8205 | 0,0245 | 0,84883 | 0,02140 |
| 0,8462 | 0,0204 | 0,89349 | 0,01834 |
| 0,8974 | 0,0127 | 0,93161 | 0,01396 |
| 0,9231 | 0,0089 | 0,96209 | 0,00899 |
| 0,9487 | 0,0050 | 0,98382 | 0,00427 |
| 0,9744 | 0,0016 | 0,99613 | 0,00105 |
| 1,0000 | 0,0000 | 1,00000 | 0,00000 |

## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** **:** Volkan ÇAKIR

**Doğum Tarihi ve Yeri** **:** 18.10.1991 UŞAK

**E-posta** **:** cakirvo@itu.edu.tr

## ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği.
- **Lisans** **:** 2016, Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme.

## MESLEKİ DENEYİMLER:

- 2015'den beri İstanbul Teknik Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak çalışmakta.