

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**HİDROFOİLLERİN KAVİTASYON KOVALARININ
SAYISAL-PARAMETRİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet Salih KARAALİOĞLU

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

MAYIS 2015

**HİDROFOİLLERİN KAVİTASYON KOVALARININ
SAYISAL-PARAMETRİK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Mehmet Salih KARAALİOĞLU
(508131021)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şakir BAL

MAYIS 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508131021 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Mehmet Salih KARAALİOĞLU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**HİDROFOİLLERİN KAVİTASYON KOVALARININ SAYISAL-PARAMETRİK İNCELENMESİ**” başlıklı tezini aşağıdaki imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

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

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Uğur Oral ÜNAL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Fahri ÇELİK
Yıldız Teknik Üniversitesi

.....

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2015**
Savunma Tarihi : **27 Mayıs 2015**

Aileme,

ÖNSÖZ

Çalışmam süresince değerli yardım ve önerileri ile yanımda olan hocam Prof. Dr. Şakir BAL'a ve beni hayatım boyunca yalnız bırakmayan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2015

Mehmet Salih KARAALIOĞLU
(Gemi Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Tezin Kapsamı	2
1.3 Literatür Özeti	3
2. KAVİTASYON	5
2.1 Kaviteasyonun Sınıflandırılması	6
2.1.1 Uç girdap (tip vortex) kaviteasyonu	6
2.1.2 Tabaka (sheet) kaviteasyonu.....	7
2.1.3 Kabarcık (bubble) kaviteasyonu.....	8
2.1.4 Bulut (cloud) kaviteasyonu	8
2.1.5 Pervane-Tekne girdap kaviteasyonu (PHV)	9
2.2 Kaviteasyonun Etkileri	9
2.3 Kaviteasyon Kovası.....	10
3. SINIR ELEMANLARI YÖNTEMİ	19
3.1 Panel Yöntemine Ait Formülasyon	19
3.1.1 Sınır koşulları	20
3.1.1.1 Dirichlet sınır koşulu	20
3.2 Kısmi Kaviteasyon Yapan Hidrofoil İçin Panel Yöntemi (PCPAN)	21
3.2.1 Formülasyon	22
4. SAYISAL SONUÇLAR.....	27
4.1 Kaviteasyon Başlangıç Durumu	27
4.1.1 NACA kesitleri	27
4.1.1.1 Kalınlık etkisi.....	27
4.1.1.2 Sehim oranının etkisi	29
4.1.1.3 Maksimum sehim yerinin etkisi.....	30
4.2 Kısmi Kaviteasyon Durumu	31
4.2.1 Kalınlık etkisi	34
4.2.2 Sehim oranının etkisi.....	36

4.2.3 Maksimum sehim yerinin etkisi	37
4.3 Bir Sualtı Türbini Kesidinin İncelenmesi.....	38
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	41
KAYNAKLAR.....	45
EKLER	47
EK A.....	49
EK B	51
EK C	53
ÖZGEÇMİŞ	55

KISALTMALAR

BEM	: Boundary Element Method
PCPAN	: Partially Cavitating PANel Methods
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
MIT	: Massachusetts Institute of Technology
MATLAB	: MATrix LABoratory
PHV	: Propulsor-Hull Vortex

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1: NACA0014 kesidinde seçilen noktanın (A noktası) üzerinde oluşan basınç değeri.....	13
Çizelge 4.1: Hücüm Açısı- σ -kavite hacmi- $C_L - C_D$ ($l = 0.5c$ NACA2412).....	32
Çizelge 4.2: Panel sayısı değişiminin kavitasyon sayısı ve kavite hacmine etkisi $l = 0.5c$ $\alpha = 6^\circ$	32
Çizelge 4.3: İterasyon Sayısı- Kavitasyon S. (σ) NACA2412 $l = 0.5c$ $\alpha = 6^\circ$	33
Çizelge 4.4: NACA2412 için kavitasyon sayısının geçiş uzunluğu ile değişimi $l = 0.5c$ $\alpha = 6^\circ$	34
Çizelge 4.5: S184 kesit geometrisi [3].	40

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 : Suyun faz diyagramı.....	6
Şekil 2.2 : Girdap kavitasyonu [16].	7
Şekil 2.3 : Tabaka kavitasyonu [17].	7
Şekil 2.4 : Kabarcık kavitasyonu [17].	8
Şekil 2.5 : Bulut kavitasyonu [17].	8
Şekil 2.6 : Pervane-Tekne girdap kavitasyonu.	9
Şekil 2.7 : NACA0012 kesidi üzerinde oluşan basınç dağılımı ($\alpha = 5^\circ$ ve $\alpha = 10^\circ$).	10
Şekil 2.8 : Airfoil geometrisine ait terimler.	11
Şekil 2.9 : Farklı hücum açıları için NACA0014 kesit geometrileri.	12
Şekil 2.10 : NACA0014 üzerinde rastgele seçilmiş beş nokta.	13
Şekil 2.11 : NACA0014 kesidinde seçilen noktanın (A noktası) üzerinde oluşan basınç değeri.	14
Şekil 2.12 : NACA0014 üzerindeki beş nokta için basınç eğrileri.	14
Şekil 2.13 : NACA0014 kesidi için kavitasyon kova diyagramı.	15
Şekil 2.14 : NACA0014 kesidi için zarf eğrisi.	15
Şekil 2.15 : NACA4312 için kavitasyon kova grafiği.	16
Şekil 2.16 : Kavitasyon kovaşının temsil ettiği bölgeler.	17
Şekil 3.1 : Kısmi kavitasyonlu NACA012 kesit geometrisi ($\alpha = 6^\circ$).	23
Şekil 3.2 : Kısmi kavitasyonlu NACA012 kesidi için basınç dağılımı ($\alpha = 6^\circ$).	23
Şekil 4.1 : Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olan kesit zarf eğrilerine etkisi.	28
Şekil 4.2 : Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olan kesit zarf eğrilerine etkisi ($-C_p$ değeri 0 ile 4 arasında).	28
Şekil 4.3 : Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olmayan kesit zarf eğrilerine etkisi.	29
Şekil 4.4 : Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olmayan kesit zarf eğrilerine etkisi ($-C_p$ değeri 0 ile 4,5 arasında).	29
Şekil 4.5 : Kavitasyon başlangıç durumu için sehim oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi.	30
Şekil 4.6 : Kavitasyon başlangıç durumu için maksimum sehim yeri oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi.	31
Şekil 4.7 : Farklı hücum açılarında kavitasyon hacmi ve şekli ($l/c=0.5$).	32
Şekil 4.8 : Geçiş bölgesi uzunluğu (NACA2412) değişiminin basınç dağılımına etkisi.	33

Şekil 4.9	: Kısmi kavitasyon durumu için kalınlık oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve $l = 0.7c$ için).	35
Şekil 4.10	: Kalınlık oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve kavitasyon başlangıç durumu).	35
Şekil 4.11	: Kısmi kavitasyon durumu için sehim oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve $l = 0.7c$ için).	36
Şekil 4.12	: Kısmi kavitasyon durumu için sehim oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve kavitasyon başlangıç durumu için).	36
Şekil 4.13	: Kısmi kavitasyon durumu için maksimum sehim yeri oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve $l = 0.7c$ için).	37
Şekil 4.14	: Kısmi kavitasyon durumu için maksimum sehim yeri oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve kavitasyon başlangıç durumu).	37
Şekil 4.15	: Sualtı türbin kesidi (S184).	38
Şekil 4.16	: S184 için farklı panel sayıları için basınç dağılımı.	39
Şekil 4.17	: Sualtı türbin kesidine (S184) ait kavitasyon başlangıç durumu için zarf eğrisi.	39
Şekil A.1	: Sehim oranı değişiminin kesit geometrisine etkisi.	49
Şekil A.2	: Maksimum sehim yeri değişiminin kesit geometrisine etkisi.	49
Şekil A.3	: Kalınlık oranı değişiminin kesit geometrisine etkisi.	49
Şekil C.1	: Sualtı türbin kesidi (S184) basınç dağılımı $\alpha = 0^\circ$	53
Şekil C.2	: Sualtı türbin kesidi (S184) basınç dağılımı $\alpha = 5^\circ$	53
Şekil C.3	: Sualtı türbin kesidi (S184) basınç dağılımı $\alpha = 10^\circ$	53

HİDROFOİLLERİN KAVİTASYON KOVALARININ SAYISAL-PARAMETRİK İNCELENMESİ

ÖZET

Kavitasyon lokal basıncın, ortam sıcaklığındaki buhar basıncının altına düşmesi durumunda meydana gelen fiziksel bir olaydır. Sabit sıcaklıktaki bir akışkanın lokal basıncı (p) doymuş buhar basıncının (p_v) altına düşmesi durumunda akışkan yapısı parçalanmaya başlar. Bu olaya "**kavitasyon**" denir. Kavitasyon pervane, strut, dümen, stabilize için bulunan finler, pompa ve türbin kseitlerinde meydana gelebilir.

Bu çalışmada sınır elemanları yöntemi ile (Boundary Element Method-BEM) iki boyutlu hidrofoiller üzerindeki basınç dağılımları hesaplanıp kavitasyon kova diyagramları (zarf eğrileri, kavitasyon bukleleri) elde edilmiştir. Her bir durum, kavitasyon başlangıç durumu ve kısmi kavitasyon durumu için ayrı ayrı incelenmiş elde edilen sonuçlar birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada iki boyutlu hidrofoil olarak dört basamaklı NACA foil geometrileri ve bir sualtı türbinine ait S184 geometrisi kullanılmıştır. NACA foil geometrisini temsil eden 4 basamaklı sayı dizisindeki her bir rakam geometrik olarak bir değişkeni temsil etmektedirler. Bu çalışmada mevcut parametreler sistemli olarak değiştirilip farklı geometriler elde edilmiştir. Elde edilen her bir geometri için kavitasyon kova diyagramı hesaplanıp bu parametrelerin bu diyagramlara etkisi analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda hidrofoilin hangi durumda kavitasyon yapıp yapmadığı tayin edilmeye çalışılmıştır.

Kısmi kavitasyon durumu incelenirken kısmi kavitasyon yapmaya müsade eden bir panel yöntemi PCPAN kullanılmıştır. PCPAN programında kavitasyon boyu girdi olarak tanımlanır ve kavitasyon sayısı iteratif bir şekilde bulunur. Bu kısımda kavitasyon boyu $l/c = 0.5$ ve $l/c = 0.7$ için incelenmiştir. Kısmi kavitasyon için kavitasyon boyunun kord boyunun $\frac{3}{4}$ 'üne eşit olduğu durum fiziksel olarak özel bir anlam taşır. Kavitasyon sayısı küçüldükçe kavitasyon boyunun arttığı bilinmektedir. Foil için kavitasyon sayısı küçüldükçe kavitasyon boyu artar. Fakat kavitasyon boyunun $\frac{3}{4}$ 'ye yaklaştığında kavitasyon sayısı küçülse dahi kavitasyon boyu artmamaktadır. Bu durum kavitasyon sayısının bir sınırı geçmesine kadar böyle devam eder. Bir değerden sonra yeniden kavitasyon sayısı küçülterek kavitasyon boyu artırılabilir. Fiziksel olarak stabil olmayan bu nokta için kavitasyon kova diyagramı elde edilerek bu özel durum incelenmesi amaçlanmıştır. Fakat PCPAN programı kavitasyon boyu $0.75c$ tanımlandığında doğru çalışmamaktadır. Bu durumda programın doğru çalıştığı $0.75c$ noktasına en yakın değr olan $0.7c$ için hesaplar yapılmıştır.

Son olarak ise bir sualtı türbini kesitine ait olan S184 geometrisi kavitasyon başlangıç durumu için incelenmiştir.

NUMERICAL INVESTIGATION CAVITATION BUCKETS FOR HYDROFOIL PARAMETRICALLY

SUMMARY

Cavitation is defined as the process of formation of the vapor phase of a liquid when it is subjected to reduced pressures at constant ambient temperature.

Cavitation occurs not only at propellers but everywhere where locally high velocities appear, e.g. at rudders, shaft brackets, struts, sonar domes, hydrofoils, stabilizing fins, pump, turbine. Cavitation is a result of the pressure reduction. So cavitation can be prevented or the severity reduced with pressure control. Cavitation occurs in areas where pressure values vary sharply. It is an undesirable phenomenon in many engineering application due to the detrimental effects of cavitation such as erosion (in the case of developed cavitation if the velocity difference between the liquid and the solid wall is high enough), noise, alteration of the performance of the system (reduction in thrust of propeller, increase in drag of foil, etc.) and vibration caused by the growth and collapse of vapour bubbles. Vibration and noise arising from cavitation are serious problem especially types of ships where sonar device.

Cavitation may be classified by location (tip cavitation, root cavitation, leading edge or trailing edge cavitation, suction side (back) cavitation, face cavitation etc.), cavitation form (sheet cavitation, cloud cavitation, bubble cavitation, vortex cavitation), dynamic properties of cavitation (stationary, instationary, migrating).

In the present thesis, cavitation was analysed using bucket diagram. Bucket diagram represent the cavitation behaviour of a blade section in a two dimensional sense. This diagram is plotted as a function of section angle of attack (α) versus section cavitation number (σ). The width of the bucket α_d is a measure of the tolerance of the section to cavitation free operations. Whilst useful for design purposes the bucket diagram is based on *2D* flow characteristics and can be therefore give misleading results in areas of strong *3D* flow; for example near the blade tip and root. Four regions that make up the bucket diagram, can be identified; 1. Cavitation free area inside the bucket. 2. Back sheet outside the upper part of bucket 3. Face cavitation outside the lower part of bucket 4. Bubble cavitation outside the side of bucket.

In the present thesis, pressure distribution is calculated on two dimensional geometry of hydrofoil through BEM (Boundary element method) and cavitation bucket diagram is plotted. Each case is analysed for cavitation inception case and partial cavitation case and obtained results were compared with each other. Constant source-dipole panel method is used to calculate pressure distribution at cavitation inception case.

PCPAN programme is used to calculate pressure distribution at partial cavitation case. PCPAN, is the code prepared by the FORTRAN programming language that sheet cavitation on the hydrofoil solves potential based panel method code. Sheet cavitation

is solved by low-order potential based boundary element method in non-linear theory. PCPAN solves the 2 – D fixed-length partial cavitation problem. In PCPAN, cavity length, angle of attack (λ) hydrofoil geometry, maximum iteration number are defined as programme input. The cavity shape, the foil lift and drag and cavitation number are all output. The exact nonlinear solution is found by the iterative method. Some simplifications have been made to create the numerical model. Numerical model of PCPAN results from the following simplifications:

- Flow is steady and incompressible.
- All types of cavitation is neglected except sheet cavity.
- No mass flux between cavity and flow.
- Cavity height is zero at cavity leading and trailing edges.
- Cavity length is fixed.
- Pressure is constant on the cavity surface

Inside of cavitation bucket is cavitation free area. Partial cavitation condition has been investigated for two different cavitation length ($l = 0,5c$ and $l = 0,7c$). In all cases examined; $l = 0,7c$ cavitation bucket curve wider than $l = 0,5c$ cavitation bucket curve. In the section of partial cavitation, the inner part of curve is safe area for specified length of cavitation. For example; cavity whose length is equal to 0,5 times chord length inside area of $l = 0,5c$ curve. It is not clear whether occurring more short cavity inside $l = 0,5c$ cavitation bucket.

In this study the four-digit NACA foil geometry and a two-dimensional hydrofoil S184 of marine current turbine geometry is used. In the early 1930s, the National Advisory Committee for Aeronautics constructed airfoil series rationally and systematically. The geometry of the NACA airfoil is defined by means of logical numbering system. Each digit described parameter of geometry. Maximum camber as percentage of the chord is described first digit. The distance of maximum camber from the airfoil leading edge in tens of percents of the chord. (For NACA2412 maximum camber 0,02c; location of maximum camber along the chord from the leading edge 0,4c; maximum thickness 0,12c.) Different geometries are obtained by changing this three parameters in a systematic way. The effect of three parameters are analysed by comparing cavitation bucket diagrams for each geometry. As a result of analysis, geometry which whether to occur cavitation or not, is determined.

Underwater currents that have potential for power generation, . The marine current turbines (MCTs) exploit underwater currents for energy generation. Cavitation is usually seen in each of the turbine blades. It is certainly a case to be considered in the MCT's performance analysis. In this study S184's bucket diagram was plotted and analysed.

The analysis obtained as a result can be listed as follows.

- Effect of maximum thickness ratio varies depending on the range of $-C_p$. This result is the same for partial cavitation condition and cavitation inception condition.

- For cavitation inception condition, risk of cavitation reduced as increasing chamber ratio in positive angle of attack. Conclusion is not reached about chamber ratio for partial cavitation condition.
- Partial cavitation condition has been investigated for two different cavitation length ($l/c = 0.5$ and $l/c = 0.7$). The results are the same features for both cases.
- When S184's geometry is observed, maximum chamber is close to trailing edge. Minimum cavitation risk for marine current turbines is provided by being close to trailing edge.

1. GİRİŞ

Kavitasyon lokal basıncın, ortam sıcaklığındaki buhar basıncının altına düşmesi durumunda meydana gelen fiziksel bir olaydır. Sabit sıcaklıktaki bir akışkanın lokal basıncı (p) doymuş buhar basıncının (p_v) altına düşmesi durumunda akışkan yapısı parçalanmaya başlar. Bu olaya "**kavitasyon**" denir. Kavitasyon pervane, strut, dümen, stabilize için bulunan finler, pompa ve türbin kesitlerinde meydana gelebilir.

Kavitasyon, akışkanın basınç ve hız değerlerinin değişim gösterdiği statik sistemlerde görülen fiziksel bir olgudur. Oyuk, boşluk anlamına gelen Latince "cavitas" sözcüğünden türeyen "cavitation" terimi bilim diline 19. yüzyıl sonunda girmiştir [1]. Kavitasyon lokal basıncın, ortam sıcaklığındaki buhar basıncının altına düşmesi durumunda meydana gelir. Sabit sıcaklıktaki bir akışkanın lokal basıncının (p) doymuş buhar basıncı (p_v) altına düşmesi durumunda akışkan gaz fazına geçmeye başlar. Bu olaya "**kavitasyon**" denir. Kavitasyonun meydana gelmesinin nedeni akışkanın kaynama noktası ile ortam basıncı arasındaki ilişkidir. Bernoulli prensibine göre akışkanın hızının artması ile lokal basınç düşer. Eğer lokal basınç buharlaşma basıncı değerinin altına düşerse bir tür soğuk kaynama meydana gelir. Kavitasyon sıvı faz için geçerli olan fiziksel bir hadisedir. Gaz fazında yüzey gerilme değerinin düşük olmasından dolayı kavitasyon meydana gelmez.

1.1 Tezin Amacı

Herhangi bir akışkan içinde çalışan sistemlerde (pervane, pompa, sualtı türbini gibi) oluşması kaçınılmaz olan kavitasyon olgusunun kavitasyon kova diyagramları ile incelenmesi amaçlanmıştır.

Hidrofoil geometrileri oluşturulurken 4 basamaklı NACA serisi kullanılmıştır. Üç parametreden ikisi sabit tutulup diğer parametre değiştirilerek farklı kesit geometrileri elde edilmiştir. Oluşturulan bu geometrilerin zarf eğrileri karşılaştırılarak değiştirilen parametrenin kavitasyona etkisinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu işlem kavitasyon

başlangıç durumu ve kısmi kavitasyon durumu için yapılmıştır. Böylece incelenen değişkenin iki durumda da aynı etkiyi yapıp yapmadığı araştırılmıştır.

1.2 Tezin Kapsamı

Her bir hidrofoil üzerinde oluşan basınç dağılımı olası her bir hücum açısı için bulunup kavitasyon kova diyagramları elde edilmiştir. Bu diyagramlar kullanılarak hangi durumlar için hangi hidrofoil üzerinde kavitasyon oluşup oluşmadığı tayin edilmeye çalışılmıştır. Geometriler için 4-basamaklı airfoil serisi kullanılmıştır. Bu serilerin geometrisini tanımlarken kullanılan sayı dizisindeki her bir rakam geometrik olarak bir parametreyi temsil etmektedir. Bu parametreler kalınlık oranı, sehim oranı ve sehim yeri oranıdır. İncelenen geometrilerde bu parametreler değiştirilerek bu parametrelerin kavitasyona etkisi incelenmiştir.

Bu çalışmada kavitasyon iki ayrı durum için incelenmiştir. Bunlar, kavitasyon başlangıç durumu ve kısmi kavitasyon durumudur. Her iki durumda da zarf eğrilerini elde etmek için kesit üzerinde oluşan basınç dağılımının bulunması gerekmektedir. Her iki durumda basınç dağılımını elde etmek için sınır elemanları yöntemi (boundary element method) temelli programlar kullanılmıştır.

Kavitasyon başlangıç durumu için zarf eğrileri elde edilirken sabit şiddetli kaynak dipol yöntemini kullanan, FORTRAN programlama dili ile hazırlanmış CDSM olarak isimlendirilmiş kod kullanılmıştır. Kavitasyon başlangıç durumunda kesit üzerinde kavite oluşmaz.

Kısmi kavitasyon durumu için zarf eğrileri elde edilirken ise PCPAN (Partially Cavitating Panel Methods) programı kullanılmıştır. PCPAN, pervane veya hidrofoil üzerinde meydana gelen tabaka kavitasyonunu, potansiyel tabanlı panel yöntemi ile çözen FORTRAN programlama dili ile hazırlanmış koddur. PCPAN programında hidrofoil geometrisi, hücum açısı, panel sayısı ve kavite boyu girdi olarak tanımlanır. Kavite geometrisi ve kavitasyon sayısı program çıktısı olarak elde edilir. Kesitler kısmi kavitasyon durumu için kavite boyunun (l) kord boyuna c oranının 0,5 ve 0,7 olduğu iki hal için incelenmiştir. Bu iki durum için kavitasyon zarf eğrileri elde edilmiştir.

Hidrofoillerde kavitasyon sayısı küçüldükçe kavitasyon boyu artar. Bu kavitasyon boyunun $0,75c$ olduğu noktaya kadar devam eder. Bu noktada kavitasyon sayısı küçüldüğünde beklenenin aksine kavitasyon boyu azalır ve kavitasyon boyu için stabil olmayan bir bölge oluşur (Partial cavity instability). Belli bir kavitasyon sayısından sonra yeniden beklenildiği gibi kavitasyon boyu artar. Fiziksel olarak görülen bu olay nümerik modelde de görülmekte kavite boyu $0,75c$ olarak girildiğinde program doğru sonuç vermemektedir. Bu nedenle hesaplamalarda programın doğru olarak çalışabildiği en yakın olan nokta olan $0,7c$ seçilmiştir [2].

4 basamaklı NACA serisinde geometrik olarak üç parametre bulunmaktadır. Bu üç parametrenin ikisi sabit tutulup kalan bir tanesi değiştirilerek farklı hidrofoil geometrileri elde edilmiş ve elde edilen bu her bir geometri için zarf eğrileri elde edilmiştir. Geometrik parametrelerin kavitasyona etkisi, herbir durum için elde edilen zarf eğrilerinin karşılaştırılması ile incelenmiştir.

Bu çalışma kapsamında sualtı türbin kanat kesit geometrisi de kullanılmıştır. Sualtı akıntı türbinleri deniz ve gel-git akıntılarını kullanarak enerji üreten sistemlerdir. Sualtı türbin kanatlarının hepsinde görülmesi kaçınılmaz olan kavitasyon sistem performansını olumsuz yönde etkiler [3]. Bu çalışmada da bir sualtı türbin kesidine ait geometriye ait zarf eğrisi oluşturulmuş ve analiz edilmiştir.

1.3 Literatür Özeti

Kavitasyon ile ilgili bilimsel çalışmalar 18 yy. ortalarına kadar uzanmaktadır. 1754 yılında yayınlanan çalışmada İsveçli matematikçi Euler su çarkında meydana gelen kavitasyondan ve kavitasyonun performansa etkisinden bahsetmiştir [4], [5].

Bu çalışmada kaldırıcı yüzey üzerinde meydana gelen tabaka kavitasyonu sınır elemanları yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada kavite yüzeyi, akım alanının bulunan akım çizgisi olarak kabul edilmiştir. Bu kabul ile Kirchoff ve Helmothz, üzerinde süper kavitasyon oluşan düz bir plakayı incelemiştir [6]. Levi-Civita çalışmalarında Kirchoff ve Helmothz'un çalışmasına ek olarak hidrofoil yüzeyi üzerindeki eğriliklerin kavitasyona etkisi aynı yöntemle incelenmiştir [6]. Kirchoff,

Helmothz ve Levi-Civita'nın çalışmalarında uyguladığı yöntem ile basit geometri dışındaki durumların incelenmesi mümkün değildir.

Tulin [7] pertürbasyon tekniğine dayalı bir lineer metod geliştirmiştir. Bu yöntem daha karmaşık geometrilerin, kavitasyon sayısının sıfırdan farklı olduğu durumlar için incelenbilmesine olanak sağlamıştır. Guerst [8] çalışmasında kısmi kavitasyon yapan foilleri incelemiştir. Bahsedilen çalışmalarda kullanılan lineer teoride genel kabul kavite kalınlığının ve hidrofoil kalınlığının kord boyuna kıyasla çok büyük olmasıdır [9]. İki boyutlu linner problemlerin formülasyonu için Newman'ın Marine Hydrodynamics [10] kitabı incelenebilir. Uhlman [11] yaptığı çalışmada kısmi kavitasyon yapan hidrofoilleri üç boyutlu durumda analiz etmiştir. Uhlman [11] uyguladığı yöntemle kısmi kavitasyon yapan hidrofoili diğer çalışmalardan farklı olarak non-lineer yöntemle incelemiştir.

Dang ve Kuiper [12] tabaka kavitasyonlu üç boyutlu hidrofoil etrafındaki akımı tahmin etmek için panel yöntemi geliştirmiştir. Kavite yüzeyi üzerinde Dirichlet sınır koşulu, kavitasyon olmayan yüzey üzerinde Neumann sınır koşulu tanımlanmıştır. Kavitasyon sonlandırma modeli olarak yeniden giriş jet modeli tanımlanmıştır..

Bal vd. [13] çalışmada serbest yüzey altında sabit hızla hareket eden iki veya üç boyutlu kavitasyon yapan hidrofoil modellerini tanımlamıştır. Akış alanında bulunan tüm yüzeylere Green teoremi uygulanarak bir integral denklem oluşturulmuştur. Bu integral denklem iki kısma ayrılmıştır. i)Kavitasyonlu hidrofoil problemi ii)Serbest yüzey problemi. Bu iki denklem birbirleri üzerindeki etkileri ieratif bir şekilde bulunarak ayrı ayrı çözülmüştür. Kavitasyon yapan hidrofoil yüzeyi ve serbest su yüzeyi sabir şiddetli kaynak- dipol yöntemi ile modellenmiştir.

Lineer teoriye göre yapılan hesaplamalarda kalınlık artıkça kavitasyonun hacmi ve boyutu artması beklenmektedir. Fakat yapılan deneylerde hidrofoilin önder kenar yarıçapı arttıkça kavitasyon hacmi azaldığı görülmektedir. Kinnas [14] yaptığı çalışmada lineer teorinin bu eksikliğini düzeltmiştir.

2. KAVİTASYON

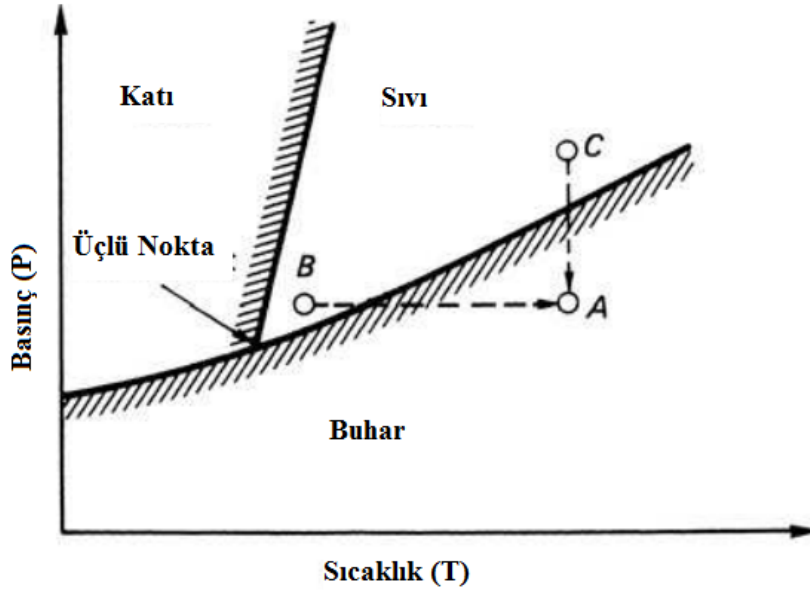
Kavitasyon lokal basıncın, ortam sıcaklığındaki buhar basıncının altına düşmesi durumunda meydana gelen fiziksel bir olaydır. Sabit sıcaklıktaki bir akışkanın lokal basıncı (p) doymuş buhar basıncının (p_v) altına düşmesi durumunda akışkan yapısı parçalanmaya başlar. Bu olaya "**kavitasyon**" denir. Kavitasyon ile ilgili çalışmalar 18. yüzyılın ortalarına kadar uzanmasına rağmen doğrudan deniz bilimleri-gemi inşaatı ile ilgili olarak kavitasyonu inceleyen ilk kişi O. Reynolds'tur [4]. Reynolds çalışmasında kavitasyon ile pervane performansı arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Kavitasyonun meydana gelmesinin nedeni akışkanın kaynama noktası ile ortam basıncı arasındaki ilişkidir. Kavitasyon basınç kontrolü ile engellenebilir veya şiddeti azaltılabilir. Kavitasyon ile kaynama olaylarının meydana geliş şekilleri benzer olmasına rağmen Şekil 2.1'de görüldüğü gibi takip edilen termodinamik yol farklıdır. Kaynama olayı sabit bir basınç değeri altında sıcaklığın değişimi ile olurken kavitasyon sabit bir sıcaklık değeri altında basınç değerinin değişimi ile meydana gelir. Şekil 2.1'de suya ait faz diyagramı görülmektedir. Kaynama olayında (B-A) faz değişimi sabit basınçta sıcaklığın artması ile olurken, kavitasyon (C-A) olayında sabit sıcaklıkta basınç değişimi ile olur.

Kavitasyon iki fazlı, üç bileşenli akım rejimi olarak da tanımlanabilir. Su ve su buharının yanında üçüncü bileşen kavitasyon oluşumunu etkileyen çözünmüş gazlardır.

İncelenen akışta kavitasyon olup olmayacağının tayini için Thoma tarafından boyutsuz bir terim olan kavitasyon sayısı (σ) türetilmiştir [1]. Kavitasyon sayısı, sayısal sonuçlarla deneysel sonuçların karşılaştırılmasını kolaylaştırır.

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_c}{0,5\rho(U_{\infty})^2} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de U_{∞} gelen akım hızını, p_{∞} ortam basıncını, p_c buharlaşma basıncını, ρ akışkanın yoğunluğunu temsil etmektedir.



Şekil 2.1: Suyun faz diyagramı.

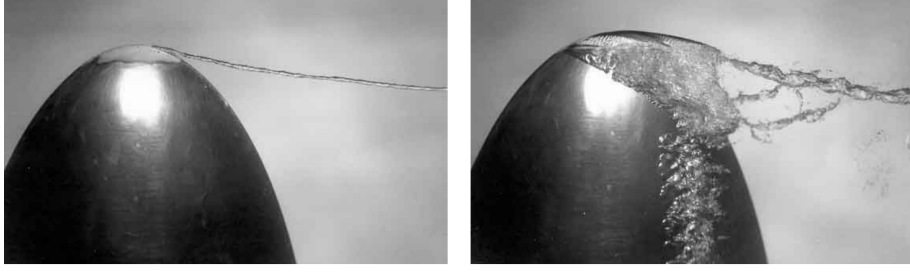
2.1 Kavitasyonun Sınıflandırılması

Kavitasyon; olduğu bölgeye göre (uç kavitasyonu, sırt kavitasyonu, yüz kavitasyonu, kök kavitasyonu) fiziksel görünüşlerine göre (tabaka kavitasyonu, bulut kavitasyonu, kabarcık kavitasyonu, girdap kavitasyonu) dinamik özelliklerine göre (anında yok olan kavitasyon, bağlı kavitasyon, kararlı kavitasyon, karasız kavitasyon) ve geometrik yayılışına göre (noktasal kavitasyon, kısmi kavitasyon, tam kavitasyon, süper kavitasyon) sınıflandırılabilir [15]. Kavitasyon fiziksel görünüşlerine göre sınıflandırılmış ve özellikleri aşağıda açıklamıştır.

2.1.1 Uç girdap (tip vortex) kavitasyonu

Genellikle pervane kanatlarının uç kısmında ve pervane göbeğinde görülür. Pervane kanadının yüz ve sırt kısmında oluşan basınç farkı nedeniyle girdaplar (shed vortex) meydana gelir. Girdapların merkezlerin akışkan hızı yüksek, basınç değeri düşüktür. Girdap kavitasyonunun oluşma nedeni bu girdaplardır. Yüklü pervanelerde, yüksek iz katsayısında veya düşük kavitasyon sayısında çalışan pervanelerde girdapların şiddeti dolayısıyla kavitasyon hacmi artar. Genellikle meydana gelen ilk kavitasyon çeşididir. Kavitasyon ilk görüldüğünde pervaneden bağımsız bir şekildedir. Girdap şiddeti arttıkça (kavitasyon sayısı küçüldükçe) kavitasyon pervane kanadına yaklaşır ve sonunda pervane kanadının devamı gibi davranır. Şekil 2.2’de hidrofoil üzerinde

farklı kavitasyon sayıları için oluşan girdap kavitasyonu görülmektedir [4].

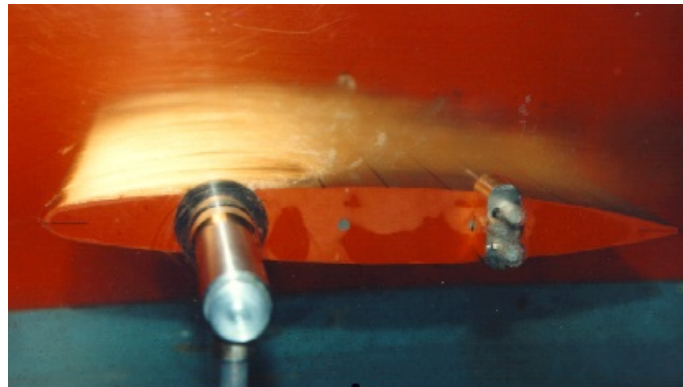


Şekil 2.2: Girdap kavitasyonu [16].

Şekil 2.2’de sol taraftaki fotoğrafta görülen hidrofoilde $\sigma = 1.15$ sağ taraftaki fotoğrafta görülen hidrofoilde ise $\sigma = 0.43$ ’tür. Kavitasyon sayısı küçüldükçe kavitasyon hacminin arttığı görülmektedir.

2.1.2 Tabaka (sheet) kavitasyonu

Pervanenin pozitif geliş açısında çalışması durumunda, kanat sırtındaki giriş ucundan başlayan tabaka şeklindeki kavitasyondur. Eğer pervane negatif geliş açısında çalışıyorsa kanat yüzünde görülebilir. Tabaka kavitasyonunun nedeni, pervanenin giriş ucuna yakın bir noktada maksimum emme meydana gelmesi ve bu basıncın buhar basıncından küçük olmasıdır. Geliş açısının büyümesi veya kavitasyon sayısının küçülmesi durumunda kanat yüzeyindeki tabaka kavitasyonu kord yönde ve radyal yönde büyür. Kesit üzerinde oluşan tabaka kavitasyonun boyu ve şiddeti geometriye ve ortam şartlarına bağlıdır. Şekil 2.3’te üzerinde tabaka kavitasyonu oluşan bir hidrofoil görülmektedir [4].



Şekil 2.3: Tabaka kavitasyonu [17].

2.1.3 Kabarcık (bubble) kavitasyonu

Küçük hava çekirdekçilerin düşük basınç alanına girip hızlı bir şekilde büyümesi ile oluşur. Kanat kesiti üzerinde basıncın düşük olduğu bölgelerde, kanat ortası civarında meydana gelir. Kanat kesidinin sehim ve kanat kalınlığı kanat üzerindeki basınç dağılımı dolayısıyla kabarcık kavitasyonu oluşumu için önemli iki parametredir. İsminden de anlaşılacağı üzere bu kavitasyon formunda bağımsız kabarcıklar oluşur ve bu kabarcıkların boyutları zamanla büyüyerek kanat yüzeyine çarpabilir. Şekil 2.4'te üzerinde kabarcık kavitasyonu oluşan bir hidrofoil görülmektedir [4].



Şekil 2.4: Kabarcık kavitasyonu [17].

2.1.4 Bulut (cloud) kavitasyonu

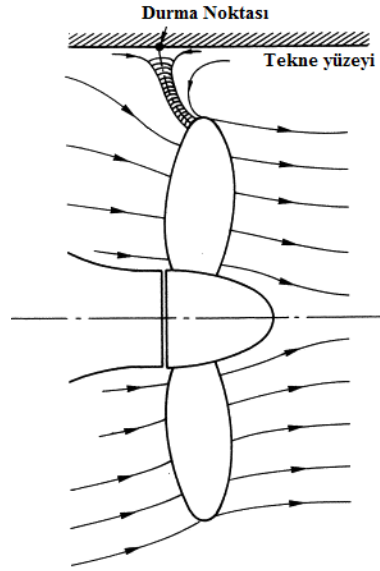
Genellikle stabil tabaka kavitasyonunun gerisinde meydana gelir. Sis veya bulut görünümlü küçük kabarcık şeklindedir. Yüzey yakınında oluştuğunda aşındırıcı etki yapar. Şekil 2.5'te üzerinde bulut kavitasyonu oluşan bir hidrofoil görülmektedir [4].



Şekil 2.5: Bulut kavitasyonu [17].

2.1.5 Pervane-Tekne girdap kavitasyonu (PHV)

Pervanenin ucunda oluşup tekne ile birleşen girdap olarak tanımlanır. Düşük ilerleme katsayılarında çalışma durumu, pervane ile tekne arasındaki mesafenin az olma durumu ve pervaneye yakın tekne yüzeyinde düz alanların olması durumu bu tip kavitasyonun oluşma ihtimalini artırır. Yüklü durumda çalışan pervane artan akım ihtiyacını tekne arkasından karşılamaya çalışır. Bu nedenle pervane ile tekne arasında bir akım hattı oluşur. Bu olay kavitasyonun başlamasını tetikler. Şekil 2.6’da pervane -tekne girdap kavitasyonunun gösterildiği bir grafik verilmiştir [4].



Şekil 2.6: Pervane-Tekne girdap kavitasyonu.

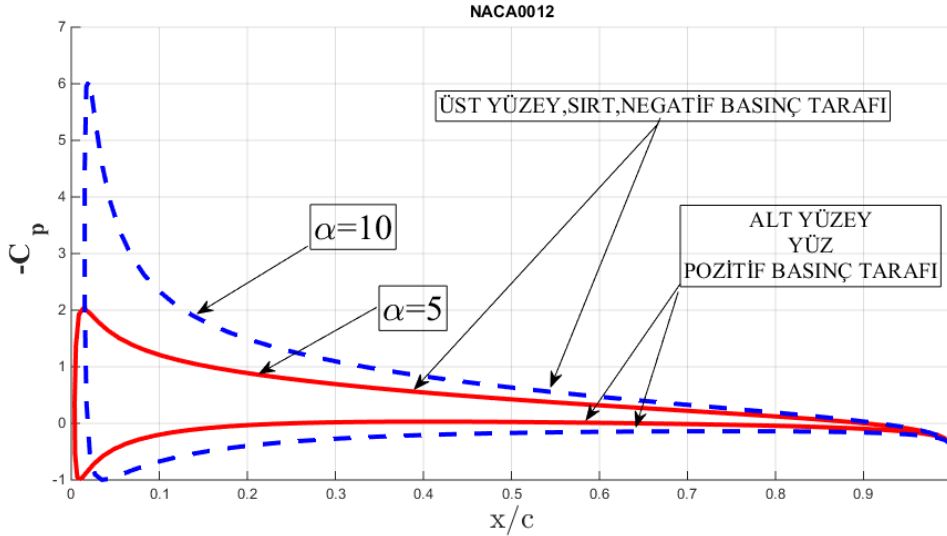
2.2 Kavitasyonun Etkileri

Kavitasyonun meydana geldiği bölgede basınç değeri ani bir şekilde değişir. Bu ani basınç değişimi sebebiyle sistem performansı olumsuz etkilenir. (Kanat kesidinde kaldırma kuvveti düşer, direnç artar. Pervane için itme azalır.) Sisteme ek kuvvetler yüklenir. Gürültü ve titreşim oluşabilir ve bu durum özellikle sonar cihazların kullanıldığı gemi tipleri için çok büyük bir problemdir. Ayrıca akışkan ile katı yüzey arasındaki hız farkı çok yüksek değerlere ulaşması durumunda erozyon (aşınma) meydana gelebilir. Bu nedenle özellikle su altında çalışan sistemlerde kavitasyon göz önüne alınması gereken önemli bir olaydır.

Genellikle kavitasyonun olumsuz etkilerinden bahsedilmesine rağmen belirli bir yüzeye enerjinin uygulanabilmesi ve yüksek basınç bölgeleri elde edilebilmesi nedeniyle (kontrollü bir şekilde oluşması şartıyla) kavitasyon bazı uygulamalarda istenilen bir olay olarak kullanılabilir. Yüzeylerin kavitasyon jetleri kullanılarak temizlenmesi gibi uygulamalar buna örnek gösterilebilir [1] [18].

2.3 Kavitasyon Kovası

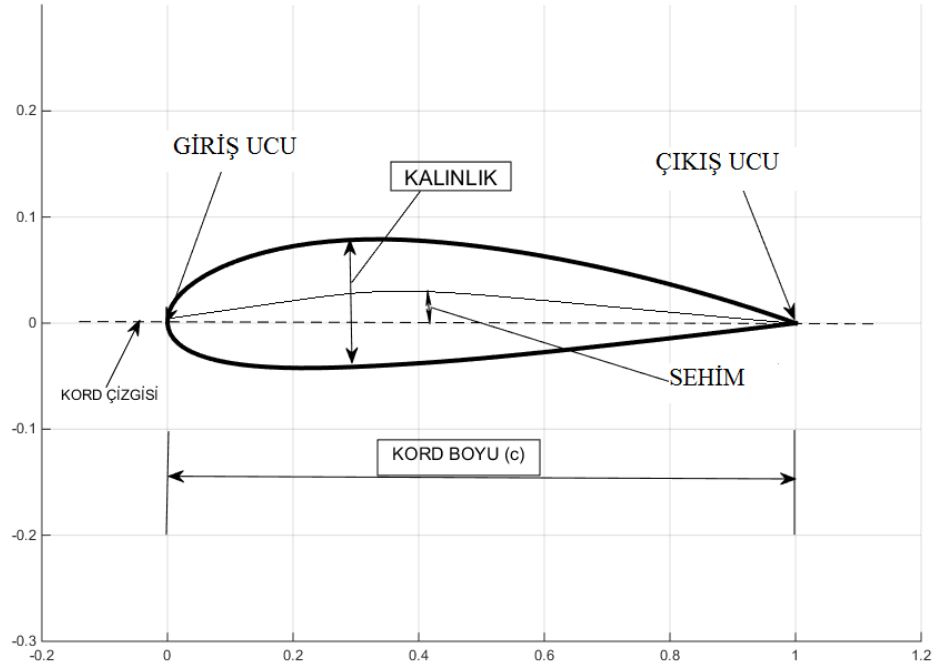
Kavitasyon başlangıcı, kesit üzerinde meydana gelen minimum basınç değeri ile buharlaşma basıncının karşılaştırılması ile tahmin edilir. Kesit etrafındaki basınç değerleri, kesit geometrisi ile birlikte verilebilir. Şekil 2.7’de NACA0012 kesidi için 5 ve 10 derece hücum açılarında basınç dağılımı verilmiştir. Şekil 2.7’den çıkarılabilecek diğer bir sonuç hücum açısı değiştikçe izler kenara yakın noktalardaki basınç değişiminin takip kenara yakın noktalardaki basınç değişimine nazaran daha fazla olduğudur [19].



Şekil 2.7: NACA0012 kesidi üzerinde oluşan basınç dağılımı ($\alpha = 5^\circ$ ve $\alpha = 10^\circ$).

1930’lu yılların başında kesit (foil) geometrisi ile alakalı NACA (National advisory Committee for Aeronautics) bünyesinde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. (NACA daha sonra NASA ismini almıştır.) Bu çalışmalar sonucunda sayı dizileri ile tanımlanabilen airfoil serileri elde edilmiştir [20]. Bu serilerin ilki 4-basamaklı NACA airfoil serisidir. Şekil 2.8’de NACA2412 foili üzerinde airfoil geometri terimleri gösterilmiştir.

Pervane kesidinin üst ve alt yüzeyleri arasındaki dikey mesafenin orta noktalarının



Şekil 2.8: Airfoil geometrisine ait terimler.

birleştirilmesi ile oluşturulan eğriye "**sehım eğrisi (mean camber line)**" denir. Sehım eğrisinin en ucundaki noktalara sırasıyla giriş ucu (önder kenar) ve çıkış ucu (takip kenar) adı verilir. Giriş ucunu ve çıkış ucunu birleştiren düz doğruya ise "**kord çizgisi (chord line)**" adı verilir. Sehım eğrisi ile kord çizgisi arasındaki maksimum mesafeye "**sehım (chamber)**" denir. Giriş ucu genellikle daireseldir ve yarıçapı $0,02c$ olarak seçilmektedir.

NACA geometrileri değişik numaralandırma sistemleri ile tanımlanır. (NACA2412,NACA24012 gibi.) Geliştirilen ilk NACA serisi "4-basamaklı" seridir. Bu çalışmada da bu seri kullanılmıştır. Örnek olarak NACA2412 kesidi tanımlarken kullanılan 2412 sayı dizisinin geometrik olarak ne anlama geldiği açıklanmıştır. İlk rakam maksimum sehım oranını belirtir.(NACA2412 için $0,02c$) İkinci rakam maksimum sehımın nerede olduğunu belirtir.(NACA2412 için giriş ucundan itibaren $0,4c$ mesafede.) Son iki rakam ise maksimum kalınlığı temsil eder. (NACA2412 için $0,12c$) Eğer kesit simetrik ise kord çizgisi ve sehım eğrisi kesişir yani kamburluk görülmez. Böyle kesit "**simetrik kesit**" denir.

NACA0012, NACA2412, NACA4412 ve NACA6412 geometrileri üst üste çizdirilerek sehim oranının değişiminin geometriye etkisinin gösterildiği grafik EK A.2’de verilmiştir.

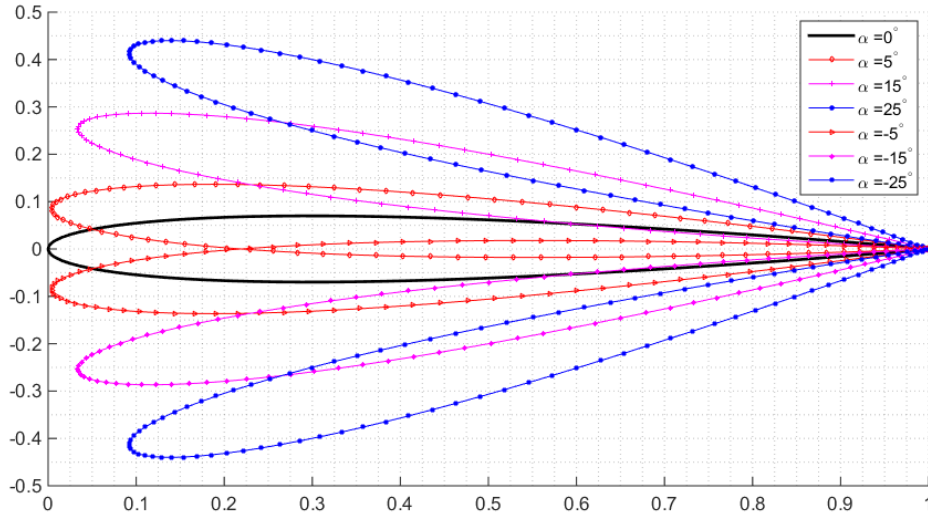
NACA2212 ve NACA2812 kesit geometrileri üst üste çizdirilerek 4-basamaklı seride ikinci rakamın (maksimum sehim yeri) geometriye etkisinin gösterildiği grafik EK A.2’te verilmiştir.

Son olarak NACA0006 ve NACA0012 kesit geometrileri çizdirilmiş ve kalınlık oranı değişiminin geometriye etkisini gösteren grafik EK A.2’de verilmiştir.

Kavitasyon başlangıç tahmini için kesidin çalışabileceği hücum açılarına karşılık minimum basınç katsayılarının bilinmesi yeterlidir. Kesidin belirli hücum açıları için üzerinde meydana gelen minimum basınç değerlerinin verildiği grafiklere "**kavitasyon kova diyagramı (cavitation bucket diagram)**" denir.

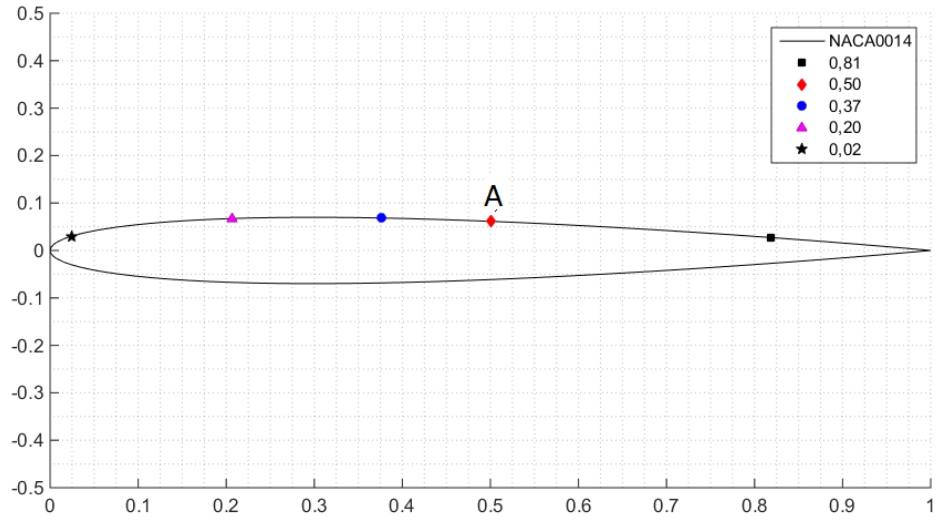
Kavitasyon kova diyagramı elde edilirken yapılan işlemler sırasıyla aşağıda verilmiştir.

1. İncelenen geometri farklı hücum açıları için çizilir. Şekil 2.9’da farklı hücum açıları için NACA0014 kesit geometrileri verilmiştir.



Şekil 2.9: Farklı hücum açıları için NACA0014 kesit geometrileri.

2. Her bir hücum açısı için basınç dağılımı bulunur. Zarf eğrisi kavitasyon başlangıcı durumu için çizdiriliyorsa CDSM programı, kısmi kavitasyon durumu için çizdiriliyorsa PCPAN programı ile elde edilen basınç dağılımı kullanılır.
3. Şekil 2.10’da belirlenen beş nokta ve bu noktaların giriş uca göre yerleri verilmiştir.



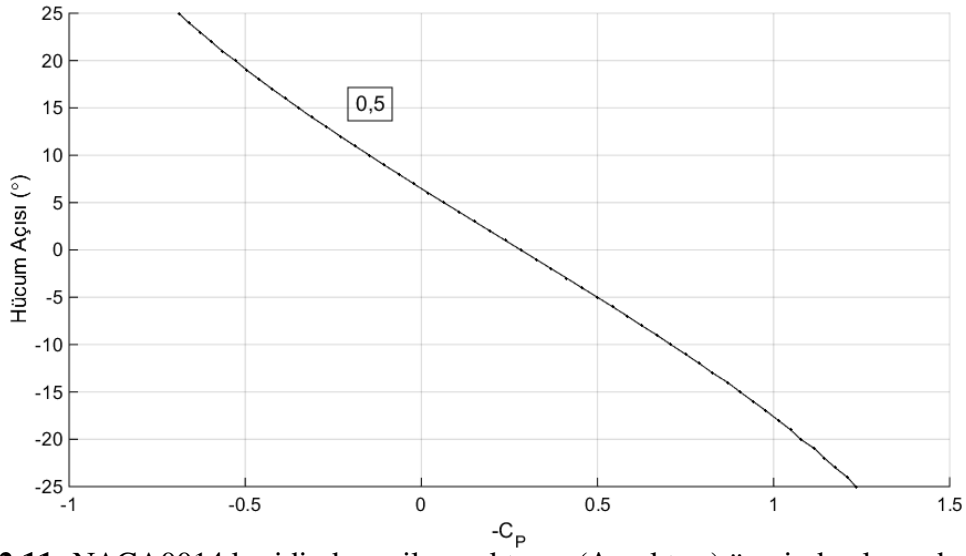
Şekil 2.10: NACA0014 üzerinde rastgele seçilmiş beş nokta.

4. Aşağıda verilen Çizelge 2.1’de her bir hücum açısına karşılık, giriş ucundan $0.5c$ mesafede seçilen nokta (A noktası) üzerindeki basınç değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.1: NACA0014 kesidinde seçilen noktanın (A noktası) üzerinde oluşan basınç değeri.

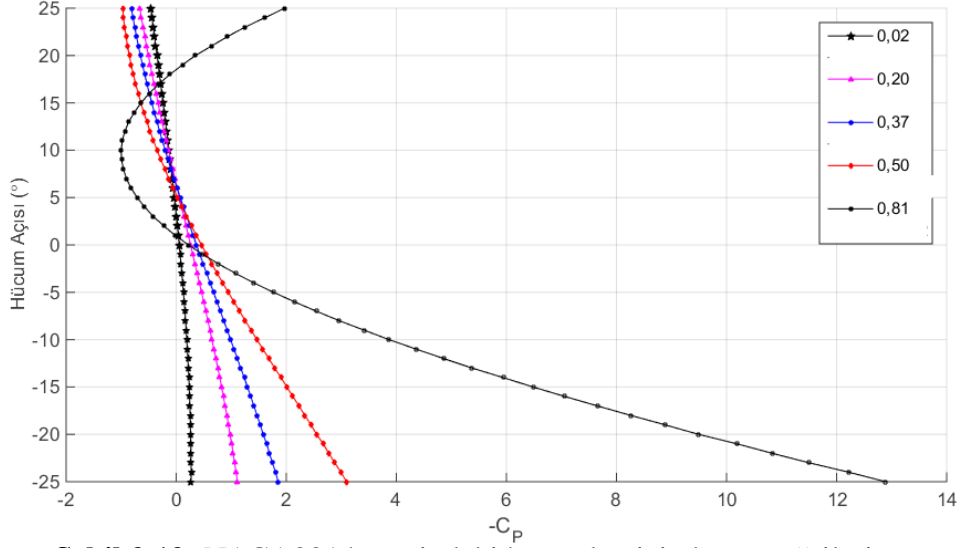
Hücum A.	$-C_p$	H. A.	$-C_p$	H. A.	$-C_p$	H. A.	$-C_p$
0	0.28	13	0.83	-1	0.24	-14	-0.31
1	0.33	14	0.87	-2	0.19	-15	-0.35
2	0.37	15	0.90	-3	0.15	-16	-0.39
3	0.41	16	0.94	-4	0.11	-17	-0.42
4	0.46	17	0.98	-5	0.06	-18	-0.46
5	0.50	18	1.01	-6	0.02	-19	-0.50
6	0.54	19	1.05	-7	-0.02	-20	-0.53
7	0.59	20	1.08	-8	-0.06	-21	-0.57
8	0.63	21	1.12	-9	-0.11	-22	-0.60
9	0.67	22	1.14	-10	-0.15	-23	-0.63
10	0.71	23	1.17	-11	-0.19	-24	-0.66
11	0.75	24	1.21	-12	-0.23	-25	-0.69
12	0.79	25	1.23	-13	-0.27		

5. Çizelge 2.1’deki hücum açlarına denk gelen basınç değerleri çizdirildiğinde Şekil 2.11 elde edilir.



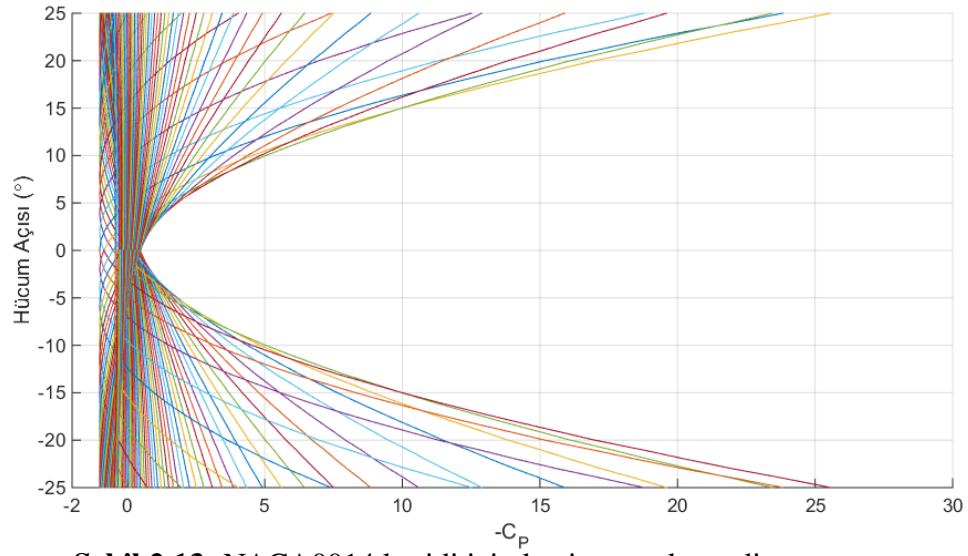
Şekil 2.11: NACA0014 kesidinde seçilen noktanın (A noktası) üzerinde oluşan basınç değeri.

6. Şekil 2.11'deki eğri, kesit üzerinde seçilen bir nokta için elde edilmiştir. Grafik çizilirken Şekil 2.10'da gösterilen beş nokta kullanılırsa nokta sayısı kadar eğri elde edilir.



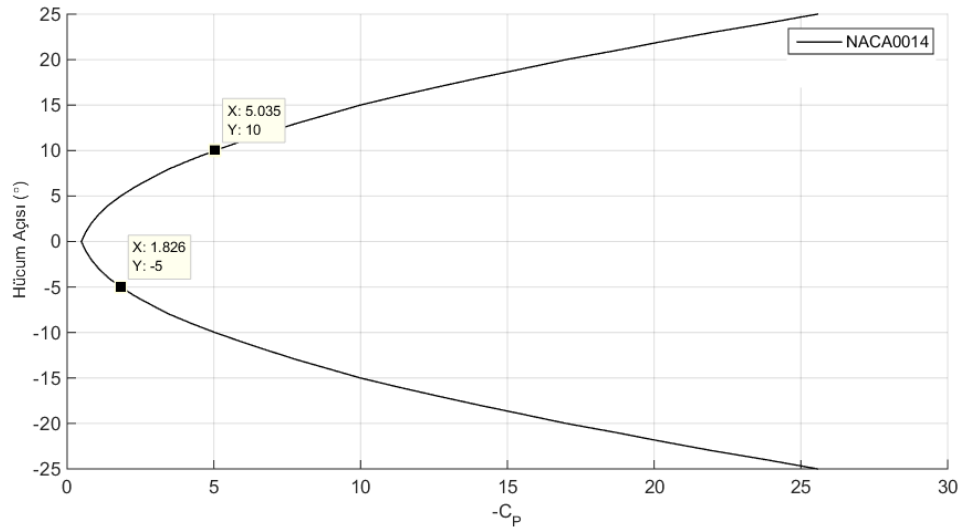
Şekil 2.12: NACA0014 üzerindeki beş nokta için basınç eğrileri.

7. Şekil 2.12 için yapılan işlem kesit üzerindeki 101 nokta için tekrarlanırsa Şekil 2.13'deki örümcek ağı desenine benzeyen grafik elde edilir.



Şekil 2.13: NACA0014 kesidi için kavitasyon kova diyagramı.

8. Şekil 2.13'teki grafikten her bir hücum açısına karşılık gelen minimum basınç değerleri okunup bu değerler birleştirilirse Şekil 2.14'teki zarf eğrisi elde edilir.

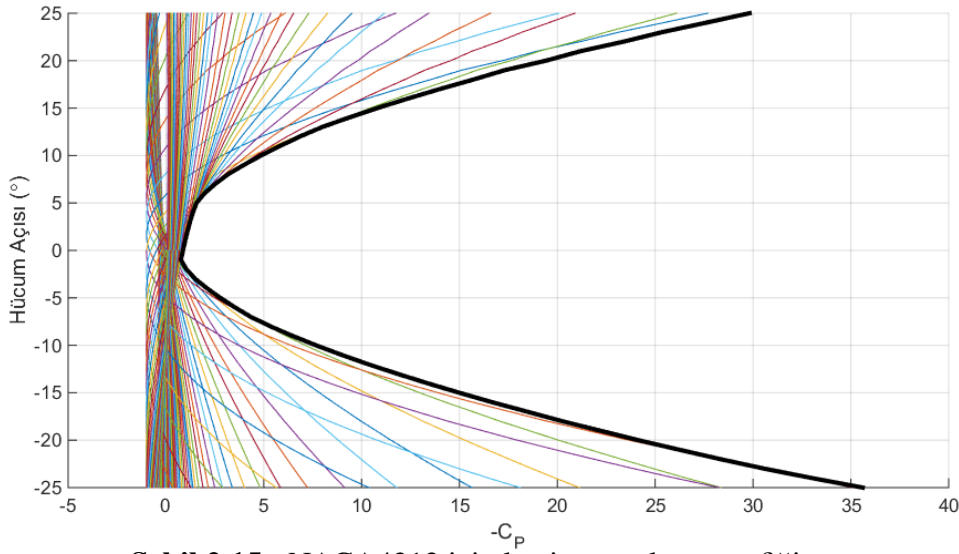


Şekil 2.14: NACA0014 kesidi için zarf eğrisi.

NACA0014 kesidi simetrik bir geometriye sahip olduğundan dolayı grafik de x eksenine göre simetriktir. Elde edilen zarf eğrisi kavitasyon başlangıcı tahmini için ihtiyaç olan tüm bilgileri içermektedir. Zarf eğrisi içinde kalan bölgede çalışan kesit üzerinde kavitasyon meydana gelmez.

Örnek olarak NACA0014 kesidinin $+10^\circ$ hücum açısında çalışması gerektiği varsayalım. Bu durumda grafikte $+10^\circ$ 'ye karşılık gelen basınç katsayısı $-C_p = 5.035$ 'dir. Yani $+10^\circ$ hücum açısında kavitasyon sayısı $\sigma = 5.035$ olduğunda kavitasyon başlar. Ya da kavitasyon sayısı 5.035 olduğu varsayalım, bu durumda da hücum açısı $+10^\circ$ 'den büyük değer aldığında kavitasyon olur denilebilir.

Şekil 2.15'te simetrik olmayan bir kesit için kavitasyon kova grafiğini oluşturulmuştur. Simerik kesit için oluşturulan kova grafiği ile arasındaki farklar incelenmiştir. Şekil 2.15'teki simetrik olmayan kesidin zarf eğrisi x eksenine göre simetrik değildir.



Şekil 2.15: NACA4312 için kavitasyon kova grafiği.

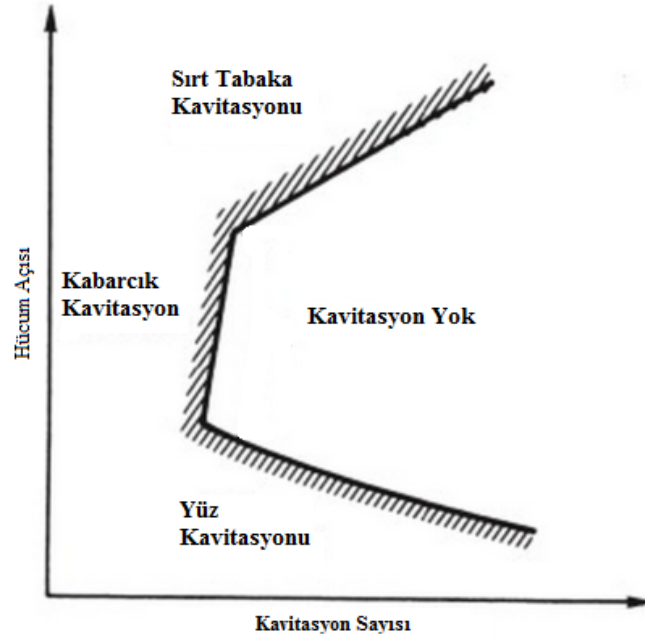
Kavitasyon kova grafiği üç farklı bölgeden oluşmaktadır. Zarf eğrisinin;

- Üst kısmı, kesidin üst yüzeyinde giriş kenara yakın bölgedeki kavitasyon başlangıcını,
- Alt kısmı, alt yüzeydeki kavitasyon başlangıcını; eğrinin sol kısmı ise üst yüzeyde kesidin orta kısmındaki kavitasyon başlangıcını,
- Sol kısmı üst yüzeyde kesidin orta kısmındaki kavitasyon başlangıcını

temsil etmektedir [4].

Şekil 2.16'te kavitasyon kova diyagram bölgelerinin hangi yüzeylerde ki kavitasyonu temsil ettiği gösterilmiştir. Ayrıca Şekil 2.16'da görüldüğü gibi zarf eğrisinin iç

kısmında kavitasyon oluşması beklenmez. Bu bölge incelenen geometriler için güvenli bölge olarak adlandırılır.



Şekil 2.16: Kavitasyon kovanının temsil ettiği bölgeler.

3. SINIR ELEMANLARI YÖNTEMİ

Kavitasyon kova diyagramını elde etmek için kesit üzerindeki basınç dağılımının elde edilmesi gerekmektedir. Çalışmada basınç dağılımları sınır elemanları yöntemi temelli programlar kullanılarak elde edilmiştir. Bu bölümde sınır elemanları yöntemi ile ilgili bilgiler verilmiştir.

3.1 Panel Yöntemine Ait Formülasyon

Sınırları S_B olan bir yapı sıkıştırılmaz ve çevrintisiz kabülü yapıldığı bir akış alanına daldırılmış olsun. Süreklilik denklemi toplam potansiyele göre Φ^* yazılırsa;

$$\nabla^2 \Phi^* = 0 \quad (3.1)$$

elde edilir. Denklem 3.1'in çözümü Denklem 3.2'te gibi kaynak σ ve dipol μ dağılımlarının toplamı olarak yazılabilir.

$$\Phi^*(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{S_B} [\sigma(\frac{1}{r} - \mu n \cdot \nabla(\frac{1}{r}))] dS + \Phi_\infty \quad (3.2)$$

Denklem 3.1'de n vektörü, potansiyel sıçrama (μ) yönünde S_B sınırına dik ve V bölgesinin dışına pozitifdir. Gelen akım potansiyeli (Φ^∞) aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Phi^\infty = U_\infty x + V_\infty y \quad (3.3)$$

Bu formülasyon çok sayıda farklı kaynak ve dipol dağılımı ile sınır şartlarını sağlayacağından çözümü tek olarak ifade edemez. Bu nedenle tekillik elemanı seçerken keyfi bir seçim yapılması gerekmektedir. Bu problemin çözümünü bulmak için ilk olarak akımın yüzeye dik bileşeninin sıfır olmasını tanımlayan sınır koşulunun probleme dayatılması gerekir. İz, ince dipol ve girdap tabakaları ile tanımlandıktan sonra Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 yeniden düzenlenirse aşağıdaki denklem gibi yazılabilir.

$$\Phi^*(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{gvde+iz} \mu n \cdot \Delta(\frac{1}{r}) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{gvde} \sigma(\frac{1}{r}) dS + \Phi_\infty \quad (3.4)$$

3.1.1 Sınır koşulları

Neumann ve Dirichlet olmak üzere iki tür sınır koşulu tanımlanabilir. S_B yüzeyinin normalindeki hız bileşeni sıfıra eşit olması "Neuman Sınır Koşulu" olarak tanımlanır. S_B üzerinde Φ^* değerinin tanımlanması ise "Dirichlet Sınır Koşulu" olarak tanımlanır. Bu iki sınır koşulunu beraber sağlandığı problemlere karma sınır koşulu problemleri denir.

3.1.1.1 Dirichlet sınır koşulu

Pertürbasyon potansiyeli ϕ 'nin S_B üzerinde tüm noktalarda tanımlanması gerekir. Denklem 3.4 bu koşulu sağlamaktadır. Bu yüzeyin üzerine tekillik elemanları dağıtarak iç potansiyel Denklem 3.5'deki gibi elde edilir.

$$\Phi_i^*(x,y,z) = \frac{1}{4\pi} \int_{gvde+iz} \mu \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{gvde} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty \quad (3.5)$$

$r \rightarrow 0$ olduğu zaman bu integraller tekil olmaktadır ve bu (x,y,z) noktası civarında bu integrallere ait temel değerler hesaplanmalıdır. Yüzeye dik akım bileşeninin sıfır olduğu sınır koşulu $\Phi^* = \text{sabit}$ eşitliği ile tanımlanır. Bu yüzden, $\Delta(\Phi + \Phi_\infty).n = 0$ koşulu hız potansiyeli cinsinden yazılmak istenirse;

$$\Phi^* = (\Phi + \Phi_\infty)_i \quad (3.6)$$

veya

$$\Phi_i^*(x,y,z) = \frac{1}{4\pi} \int_{govde+iz} \mu \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{govde} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty = \text{sabit} \quad (3.7)$$

Denklem 3.7 endirekt sınır koşullu problemler için esas teşkil eder. Fakat çözümün bu basamağında dahi iç potansiyel değeri tayini için yöntemler arasında farklılıklar bulunmaktadır. Örneğin $\Phi^* = (\Phi + \Phi_\infty)_i$ alındığında Φ_∞ nedeniyle tekillik dağılımının şiddeti büyük olacaktır.

İç potansiyel $\Phi^* = (\Phi + \Phi_\infty)_i = \Phi_\infty$ şeklinde kabul edilirse Denklem 3.7 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{4\pi} \int_{govde+iz} \mu \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{govde} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS = 0 \quad (3.8)$$

Problemi tam olarak tanımlamak için iz dipollerin veya S_B yüzeyi üzerinde bilinmeyen dipollerin bulunması gerekmektedir. (Kutta Şartı) Çözüme ulaşmak için S_B yüzeyi

ayrık elemanlara bölünüp, her bir eleman için Denklem 3.7 çözülür. Sonuç olarak bilinmeyen μ dağılımlarını içeren cebirsel eşitlikler elde edilir.

Geometri üzerine yerleştirilen her bir panel lokal kaynak ve dipol şiddetine sahiptir.

$$\sum_{j=1}^N B_j \sigma_j + \sum_{j=1}^N C_j \mu_j + \Phi_{\infty} = \text{sabit} \quad (3.9)$$

Kaynak ve dipol değerleri belirtilmelidir. İç potansiyel Φ_{∞} olarak seçilmiştir ve bu durumda kaynak şiddeti aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\sigma_j = n_j \cdot Q_{\infty} \quad (3.10)$$

İç pertürbasyon potansiyelinin değerini sıfır yapmak için $((\Phi_i)^* = \Phi_{\infty})$, Denklem 3.9 aşağıdaki forma dönüştürülür:

$$\sum_{j=1}^N B_j \sigma_j + \sum_{j=1}^N C_j \mu_j + \Phi_{\infty} = 0 \quad (3.11)$$

Denklem 3.11 (Sınır şartı), bu nokta için doğrusal cebirsel bir denklemi sağlamak koşuluyla yapı içerisindeki her kollokasyon noktasında belirtilmiştir. Böyle bir sayısal çözüm kurulabilmesi için izlenmesi gereken adımlar [Katz ve Plotkin, 2001]'de ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır.

3.2 Kısmi Kaviteasyon Yapan Hidrofoil İçin Panel Yöntemi (PCPAN)

PCPAN, pervane veya hidrofoil üzerinde meydana gelen tabaka kaviteasyonunu, potansiyel tabanlı panel yöntemi ile çözen FORTRAN programlama dili ile hazırlanmış koddur. Tabaka kaviteasyonu, nonlinear yöntemle düşük mertebeli potansiyel tabanlı sınır elemanları yöntemi ile çözülür. Non-linear teori ile yapılan çözümler lineer teoriye kıyasla fazla işlem yükü getirmesiyle birlikte daha hassas ve doğru sonuçlar vermektedir. Problem çözümünde bazı kabuller yapılmıştır [2].

- Akışkan viskoz-olmayan ve sıkıştırılamazdır. Akım alanı irrotasyoneldir. Yani ideal akışkan kabulü yapılır.
- Kaviteasyon boyunca basınç sabit kabul edilir. Hesaplamalara kabarcık ve bulut kaviteasyonu dahil edilmez.

- Oluşan kavitasyon, kavitasyon çıkış kenarında kesit ile birleşir. Kavitasyonun çıkış kenarında meydana gelen karmaşık olaylar ihmal edilir ve seçilen bir modelle kavitasyon kesit ile yeniden birleşir.

İki boyutlu hidrofoil kavitasyon problemleri, sabit kavitasyon boyu veya sabit kavitasyon sayısı yaklaşımı ile çözülür. Sabit kavitasyon boyu yaklaşımında, kavitasyon boyu bilinir ve kavitasyon sayısı (σ) iteratif yolla bulunur. Diğer yöntemde ise tam tersi olarak kavitasyon sayısı (σ) bilinir, kavitasyon boyu bulunmaya çalışılır. PCPAN’de kavitasyon boyu sabittir, kavitasyon sayısı (σ) hesaplanır. Hidrofoil (veya pervane kesidi) geometrisi ve kavitasyon yüzeyi sabit şiddetli kaynak ve dipol panellerine bölünür. Green teoreminin 3. özelliği her bir panelin merkezinde sağlanır. Böylece fiziksel problem lineer matris sistemin çözümüne indirgenir. Bu matris sisteminin çözümü ile panellere dağıtılmış kaynak ve dipol elemanlarının şiddetleri bulunur. Kavitasyon kalınlığı, şiddetleri bulunmuş kaynak elemanlarının integrasyonu ile bulunur. Yüzeydeki potansiyelin türevi ile bulunan yüzey hızlarından Bernoulli denklemi kullanılarak yüzeydeki basınç dağılımı elde edilir. Kavitasyon hacmi kalınlığın, geometriye gelen kuvvetler ise basınçların integre edilmesi ile bulunur [2], [21].

3.2.1 Formülasyon

Şekil 3.1’de NACA0012 kesidi üzerinde 6° hücum açısı durumunda meydana gelen tabaka kavitasyonu görülmektedir.

Kavitasyon kesidin A noktasında başlamakta L noktasında bitmektedir. Kavitasyon yüzeyi üzerinde basınç (A-T noktaları arasında) sabit ve p_c ’ye eşittir. Şekil 3.1’deki kesit için basınç dağılımı Şekil 3.2’te verilmiştir. Şekil 3.2’de A-T noktaları arasında basıncın eşit olması ve Şekil 3.2’de kavitasyon bölgesinin verilen girdilere uygun olması problemin fiziksel olarak doğru çözüldüğünün bir sağlamasıdır.

Kavitasyonun geçiş bölgesi seçilen bir kapanma modeli ile tanımlanmalıdır. Kavitasyonun başlama noktası ile bitiş noktası arasındaki ölçülen mesafe (kiriş çizgisine paralel) l üst kavitasyonun ayrılma noktası l_0 olarak tanımlanmaktadır. Tüm uzunluklar giriş boyu c ile boyutsuzlaştırılacaktır.

Toplam hız akış alanı, toplam potansiyele Φ ve pertürbasyon potansiyeline ϕ bağlı

Pertürbasyon potansiyeline aşağıda tanımlanacak sınır şartları uygulanır. **1.Kinematik Sınır Koşulu:**

Akış hız vektörlerinin kavitasyon yüzeyi ve kavitasyon göstermeyen yüzeye teğet olması gerekmektedir. $\vec{n}$ kavitasyon yüzeyi veya hidrofoil yüzeyi için dik birim vektörü temsil etmektedir. Bu durumda kinematik sınır koşulu aşağıdaki eşitlik gibi ifade edilebilir.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_{in}}{\partial n} = -\nabla \Phi_{in} \cdot \vec{n} \quad (3.15)$$

2.Dinamik Sınır Koşulu: (A noktasından T noktasına)

Kavitasyon yüzeyi üzerinde basıncın sabit ve p_c 'ye eşit olması gerekmektedir. Kavitasyon sayısı (σ), Denklem 3.16 gibi tanımlanır.

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_c}{\frac{1}{2}\rho(U_{\infty})^2} \quad (3.16)$$

Bernoulli denklemi kullanarak q_c 'e elde edilir.

$$p_{\infty} + \frac{1}{2}\rho(U_{\infty})^2 + \rho gh = p_c + \frac{1}{2}\rho(q_c)^2 + \rho gh \quad (3.17)$$

$$\{p_{\infty} - p_c + \frac{1}{2}\rho(U_{\infty})^2\} = \frac{1}{2}\rho(q_c)^2 \quad (3.18)$$

$$\sqrt{\frac{2}{\rho}\{p_{\infty} - p_c + \frac{1}{2}\rho(U_{\infty})^2\}} = q_c \quad (3.19)$$

$$\sqrt{\left\{\frac{2}{\rho} \frac{\rho(U_{\infty})^2}{2}\right\} \left\{\underbrace{\frac{p_{\infty} - p_c}{\frac{1}{2}\rho(U_{\infty})^2}}_{\sigma} + 1\right\}} = q_c \quad (3.20)$$

$$q_c = (U_{\infty})^2 \sqrt{1 + \sigma} \quad (3.21)$$

Dinamik sınır koşulu pertürbasyon potansiyeli Φ cinsinden Denklem 3.22 gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial s_c} = q_c - \frac{\partial \Phi_{in}}{\partial s_c} \quad (3.22)$$

Denklem 3.22'deki, s_c A noktasından (kavitasyon ayrılma noktası) itibaren ölçülen kavitasyon yay uzunluğudur. Denklem 3.22'nin integrasyonu ile dinamik sınır koşulu için daha kullanışlı bir biçim elde edilebilir.

$$\Phi(s_c) - \phi(0) = q_c s_c - \Phi_{in}(s_c) + \Phi_{in}(0) \quad (\text{A-T noktaları arasında}) \quad (3.23)$$

3.Kutta Şartı:

$$\nabla \Phi = \text{sonlu} \quad (\text{Çıkış ucunda}) \quad (3.24)$$

4. Radyasyon Koşulu

$$\nabla\Phi \rightarrow 0 \quad (\text{Sonsuzda}) \quad (3.25)$$

5. Kaviteasyon Kapanma Modeli

Kapanma modeli, kaviteasyon geçiş bölgesi (λ) için uygulanır. (Şekil 3.2 T-L arasında). Denklem 3.22 dinamik sınır koşulunu kaviteasyon geçiş bölgesini kapsayacak şekilde genişletilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial s_c} = q_c + (q_L - q_c)f(s_f) - \frac{\partial\Phi_{in}}{\partial s_c} \quad (3.26)$$

$$f(s_f) = \begin{cases} 0 & s_f < s_T \\ \left(\frac{s_f - s_T}{s_L - s_T}\right)^\nu & s_T \leq s_f \leq s_L \end{cases} \quad (3.27)$$

s_f : Kaviteasyonun çıkış ucundan itibaren ölçülen yay uzunluğu. (Hidrofoil üzerinde)

s_L : Kaviteasyonun çıkış ucuna denk gelen s_f değerine dayanır.

s_T : Geçiş bölgesinin başlangıç değeri.

q_L : Kaviteasyonun çıkış ucundaki toplam hız.

Yukarıda eşitliklerde; $s_T = (1 - \lambda)s_L$

Hidrofoilin giriş ucunda başlayan kaviteasyon için, (λ) terimi kaviteasyon boyunun çok ufak bir parçasıdır. ν ve λ keyfi seçilmiş terimlerdir. Kaviteasyon üzerindeki pertürbasyon potansiyelini elde etmek için Denklem 3.26 integre edilir.

$$\phi(s_c) - \phi(0) = q_c s_c + (q_L s_c) \int_0^{s_c} f(s_f) dS - \Phi_{in}(s_c) + \Phi_{in}(0) \quad (3.28)$$

Kaviteasyon yüzeyi bilinmediğinden dolayı s_c değeri bir önceki iterasyondan elde edilen yay uzunluğu ile yaklaşılmalıdır. Bu kabulden sonra dinamik sınır koşulu aşağıdaki eşitlik gibi olur.

$$\phi(s) - \phi(0) = q_c s + (q_L s_c) \int_0^s f(s_f) dS - \Phi_{in}(s) + \Phi_{in}(0) \quad (3.29)$$

Ayrıca çıkış ucundaki kaviteasyon yüksekliğinin kaybolduğu varsayılacaktır.

$$h(s_L) = 0 \quad (3.30)$$

4. SAYISAL SONUÇLAR

Bu bölümde 4-basamaklı NACA kesitlerinde maksimum sehim oranının, maksimum sehim yeri oranının ve kalınlık oranının kavitasyonla ilişkisi, her bir durum için zarf eğrilerinin çizdirilmesiyle saptanmaya çalışılmıştır. İlk olarak kavitasyon başlangıç durumu için zarf eğrileri oluşturulmuştur. İkinci olarak aynı parametreler kısmi kavitasyon durumu için incelenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Son olarak bir sualtı türbin kesit geometrisi kavitasyon başlangıç durumu için incelenmiştir.

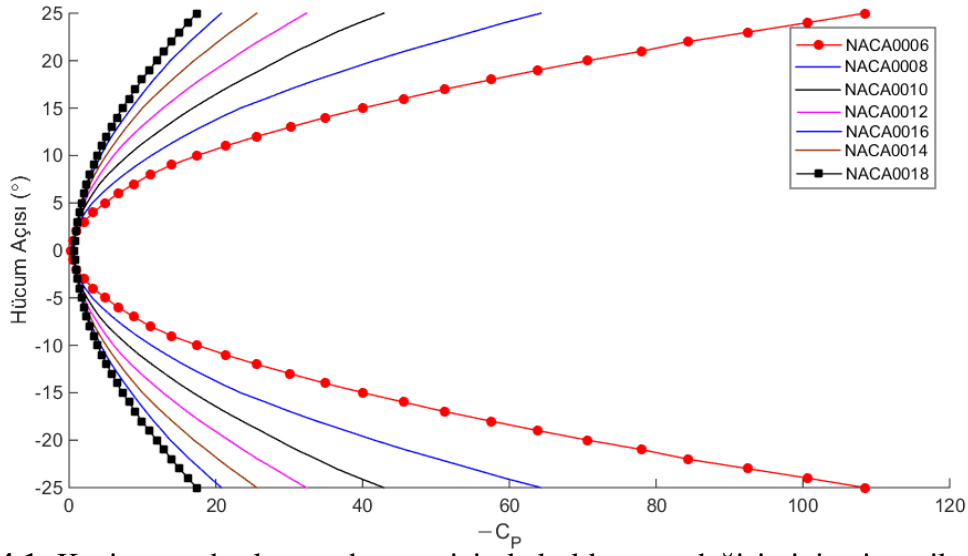
4.1 Kavitasyon Başlangıç Durumu

Kavitasyon başlangıç durumuna ait zarf eğrileri için gerekli olan basınç dağılımı sabit kaynak dipol panel yöntemi ile bulunmuştur.

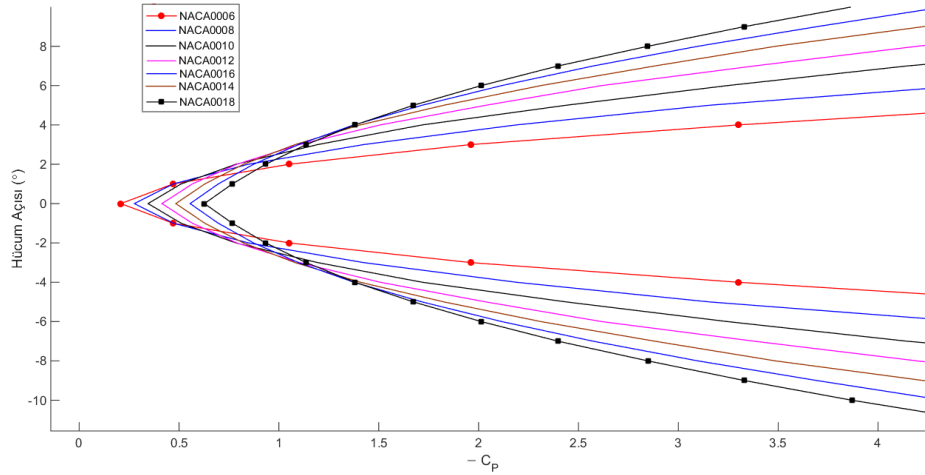
4.1.1 NACA kesitleri

4.1.1.1 Kalınlık etkisi

Bu bölümde NACA0006, NACA0008, NACA0010, NACA0012, NACA0014, NACA0016 ve NACA0018 kesitleri için zarf eğrileri çıkarılmış ve elde edilen zarf eğrileri Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu uygulamanın amacı kalınlık değişiminin kavitasyona etkisini incelemektir. Şekil 4.1’de $-C_p$ değeri 0 ile 4 aralığında olan kısım yeniden çizdirildiğinde Şekil 4.2 elde edilmiştir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’den anlaşılacağı üzere kalınlığın kavitasyona etkisi hidrofoilin çalıştığı $-C_p$ değerine göre değişmektedir. İncelenen durum için $-C_p$ değeri 1’den büyük olduğunda kalınlık artıkça zarf eğrisi genişlemekte, kavitasyon riski azalmaktadır. $-C_p$ ’nin 1 değerinden küçük olduğu durumda ise kalınlık artıkça kavitasyon riski artar. Bundan dolayı düşük kavitasyon sayısında çalışılan durumlarda ince kesitlerin seçilmesi gerekmektedir. Kesidin düşük kavitasyon sayılarında çalışabilmesi fiziksel olarak geometrinin yüksek hızlar için uygun olduğu anlamına gelir.



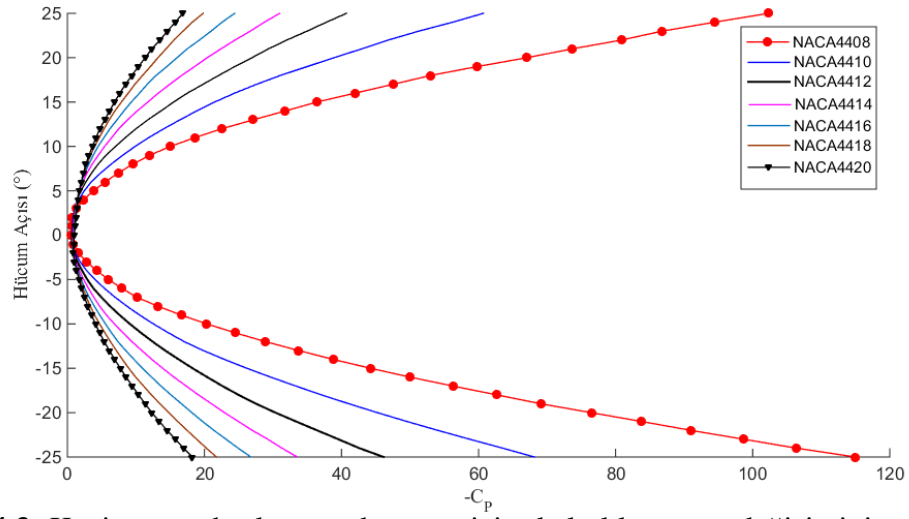
Şekil 4.1: Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olan kesit zarf eğrilerine etkisi.



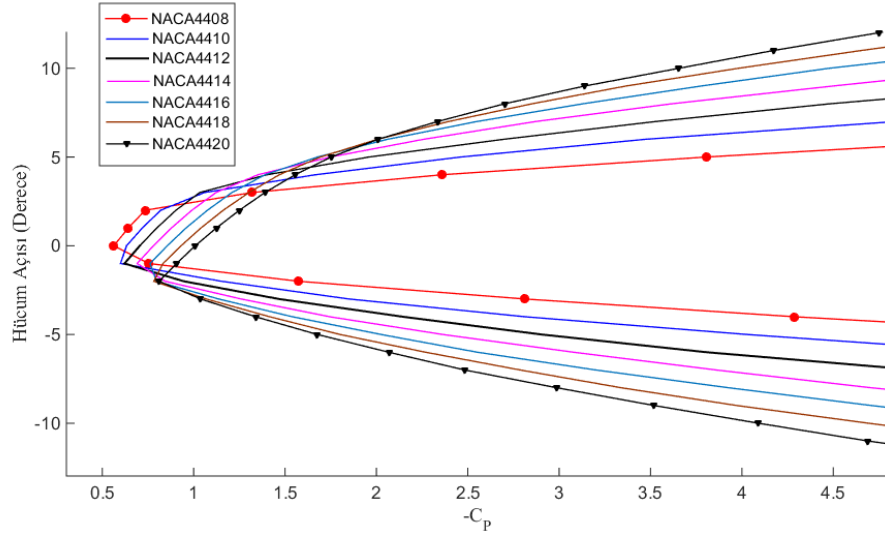
Şekil 4.2: Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olan kesit zarf eğrilerine etkisi ($-C_p$ değeri 0 ile 4 arasında).

$-C_p$ 'nin 1'den küçük olduğu durumda güvenli bölgede çalışılabilecek hücüm açısı aralığı $-C_p$ 'nin 1'den büyük olduğu duruma göre daha dardır.

İkinci olarak aynı sehim oranı ve sehim yeri oranına sahip kesitlerin kalınlık oranı değiştirilerek geometriler elde edilmiştir. Bu kesitlere ait zarf eğrileri bulunmuş ve kalınlığın simetrik olmayan kesitler için etkisi incelenmiştir (Şekil 4.3). Bu uygulamada NACA4406, NACA4408, NACA4410, NACA4412, NACA4414, NACA4416 ve NACA4418 geometrileri kullanılmıştır. Şekil 4.3'de $-C_p$ değeri 0 ile 4,5 aralığında olan kısım yeniden çizdirildiğinde Şekil 4.4 elde edilmiştir.



Şekil 4.3: Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olmayan kesit zarf eğrilerine etkisi.



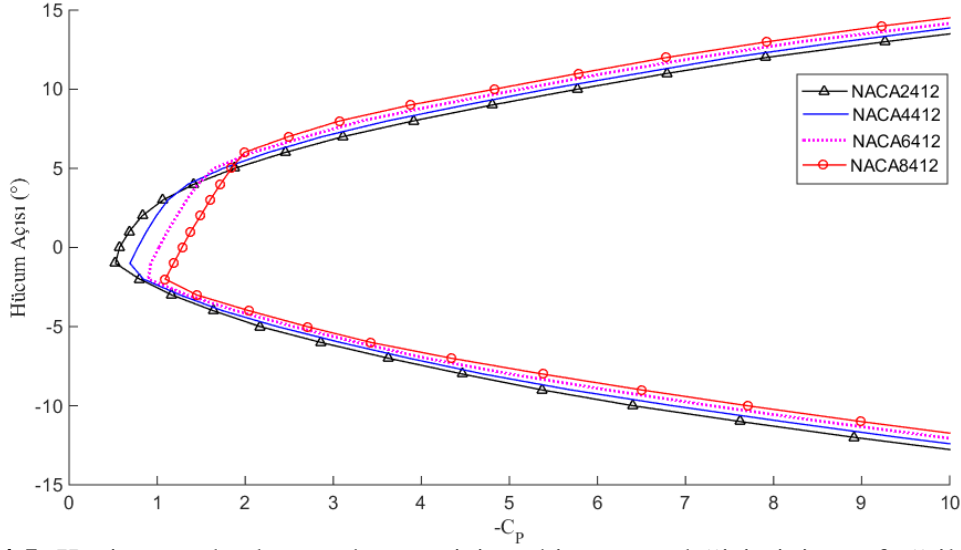
Şekil 4.4: Kavitasyon başlangıç durumu için kalınlık oranı değişiminin simetrik olmayan kesit zarf eğrilerine etkisi ($-C_p$ değeri 0 ile 4,5 arasında).

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'e göre simetrik olmayan kesitler için kalınlık etkisi simetrik olan kesitler ile aynıdır. Kalınlık oranının büyümesi belirli bir $-C_p$ değerinden sonra kavitasyon riskini azaltır.

4.1.1.2 Sehım oranının etkisi

4 basamaklı NACA serilerinde birinci rakam maksimum sehım oranını temsil etmektedir. Diğer iki parametre (sehım yeri oranı ve kalınlık oranı) sabit tutulup sehım oranı değiştirilerek elde edilen geometrilerinin zarf eğrileri karşılaştırılmış,

sehim oranının kavitasyona etkisi incelenmiştir. Bu örnekte NACA2412, NACA4412, NACA6412 ve NACA8412 kesitleri kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.5’te verilmiştir.



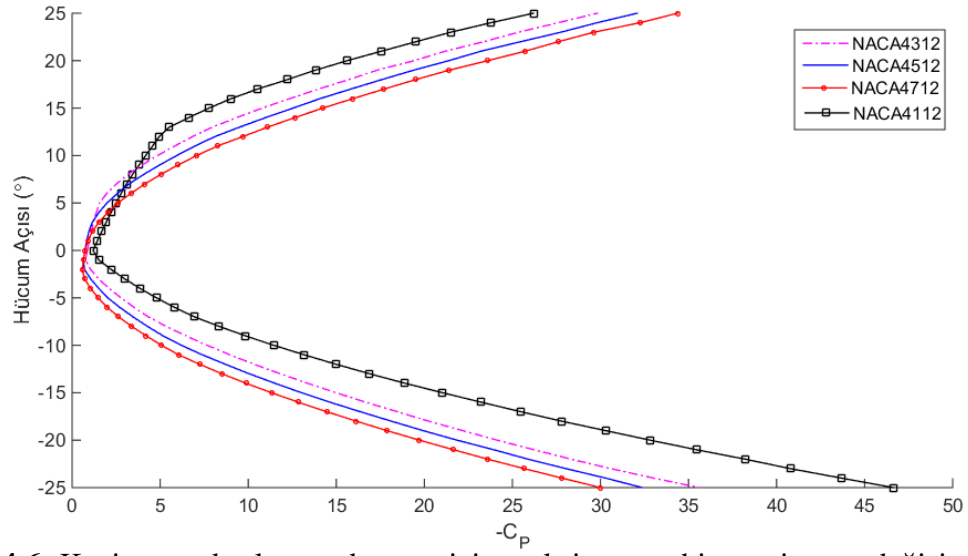
Şekil 4.5: Kaviteasyon başlangıç durumu için sehim oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi.

Pozitif hücüm açılarında zarf eğrisi sırasıyla NACA 2412, NACA4412, NACA6412, NACA8412 olarak genişlemektedir. Pozitif hücüm açıları için, sehim oranı arttıkça zarf eğrisinin genişlediği görülmektedir. Pozitif hücüm açısında çalışan kesitler için sehim oranının artması kaviteasyon açısından istenilen bir durumdur. Fakat negatif hücüm açıları için sehim oranı arttıkça zarf eğrisi daralmaktadır. Negatif hücüm açılarında çalışan kesitler için sehim oranının artması kaviteasyon riskinin artması anlamına gelir.

4.1.1.3 Maksimum sehim yerinin etkisi

Bu bölümde maksimum sehim oranı ve kalınlık oranı sabit tutulup, maksimum sehim olan yerin giriş kenara olan konumu değiştirilmiştir. NACA4112, NACA4312, NACA4512 ve NACA4712 kesitleri kullanılmıştır. Sonuçlar Şekil 4.6’da verilmiştir.

Şekil 4.6’ya göre negatif hücüm açılarında çalışılan durumlarda (su altı türbin gibi.) yada başka bir deyişle akımın pozitif basınç bölgesi (alt yüzey, sırt) ile karşılandığı durumlarda maksimum sehimin çıkış kenara yaklaşması kaviteasyon riskini azaltır. Pozitif hücüm açılarında çalışan kesitler için (pervane gibi) ise maksimum sehimin giriş kenara yakın olması kaviteasyon riskini azaltır.



Şekil 4.6: Kavitasyon başlangıç durumu için maksimum sehîm yeri oranı değışiminin zarf eğrilerine etkisi.

4.2 Kısmi Kavitasyon Durumu

Kısmi kavitasyon durumu için PCPAN programı kullanılmıştır. PCPAN programı için;

- Panel sayısı
- Maksimum iterasyon sayısı
- Kavitenin giriş kenarı l_0
- Kavitenin çıkış kenarı
- Kavitasyonun geçiş bölgesi uzunluğu σ
- Hücum açısı α

değişkenlerinin programda girdi olarak tanımlanması gerekmektedir. Aşağıda yapılan uygulamalar ile bu değişkenlerin sonuçlara nasıl etkilediği açıklanmıştır.

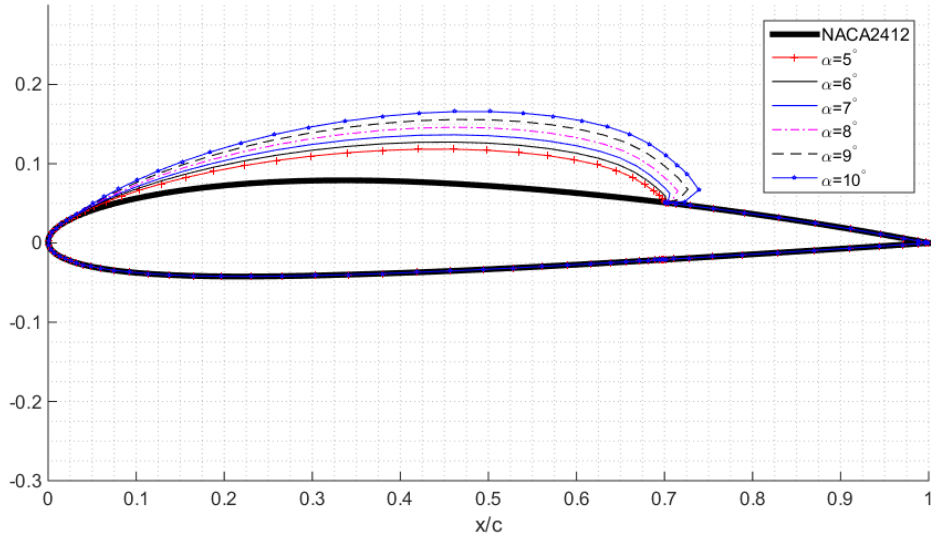
Birinci Uygulama:

NACA2412 geometrisi farklı hücum açıları için PCPAN programı ile çalıştırılıp bulunan kavitasyon sayısı, kavitasyon hacmi, C_L ve C_D değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Hücum açısı artırıldığında kavite şeklinin nasıl değıştiğı Şekil 4.7’de görölmektedir.

Çizelge 4.1: Hücüm Açısı- σ -kavite hacmi- C_L - C_D ($l = 0.5c$ NACA2412).

Hücüm Açısı($^\circ$)	K. Sayısı (σ)	K. Hacmi	C_L	C_D
5	1.19	0.02	0.99	0.04
6	1.36	0.02	1.14	0.06
7	1.52	0.03	1.29	0.07
8	1.62	0.03	1.43	0.09
9	1.85	0.04	1.57	0.11
10	2.02	0.05	1.72	0.13



Şekil 4.7: Farklı hücüm açılarında kavitasyon hacmi ve şekli ($l/c=0.5$).

İkinci Uygulama:

Panel sayısı sırasıyla 50, 100, 150 ve 200 olarak seçildiğinde kavitasyon sayısı (σ) ve kavite hacmi Çizelge 4.2'te verilmiştir.

Çizelge 4.2: Panel sayısı değişiminin kavitasyon sayısı ve kavite hacmine etkisi $l = 0.5c$ $\alpha = 6^\circ$.

Panel Sayısı	Sigma (σ)	Kavite Hacmi
50	1.43	0.01
100	1.46	0.01
150	1.47	0.01
200	1.48	0.01

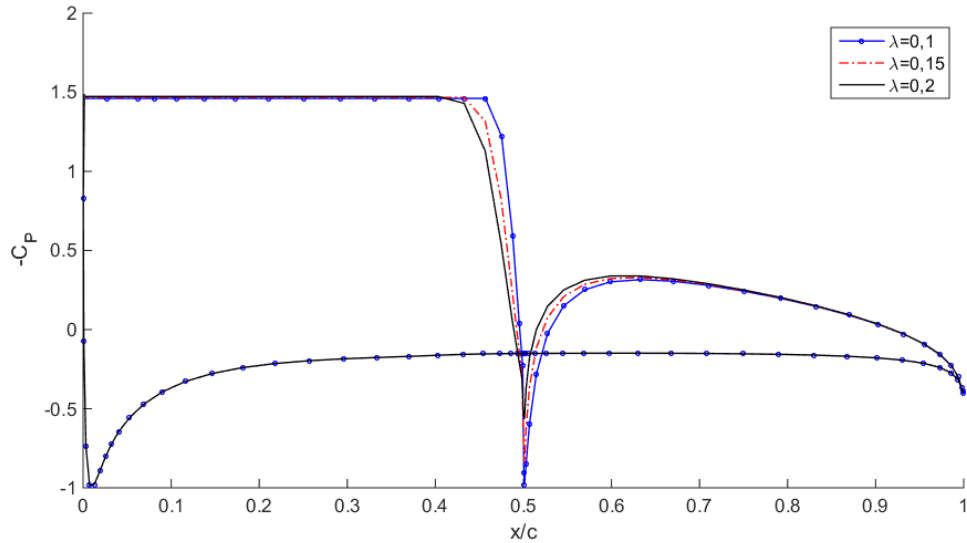
Çizelge 4.2'ye göre panel sayısı ile birlikte kavitasyon sayısı arttığı görülmektedir. Fakat programın hassasiyeti ve basınç dağılımındaki bozulmalardan dolayı tüm hesaplamalarda panel sayısı 100 olarak seçilmiştir.

Program çalıştırıldığında sınır şartları sağlanana kadar kavitasyon sayısı (σ) değeri iteratif bir şekilde değiştirilir. Belli bir iterasyondan sonra kavitasyon sayısı (σ) sabit bir değer alır. İterasyon sayısına karşılık kavitasyon sayısı (σ) değerlerinin verildiği Çizelge 4.3 aşağıda verilmiştir. Yapılan hesaplamalarda kavitasyon sayısı yaklaşık olarak 10. iterasyondan sonra sabit bir değer almış ve bu noktadan sonra sonuç iterasyon sayısından bağımsız olmuştur.

Çizelge 4.3: İterasyon Sayısı- Kavitasyon S. (σ) NACA2412 $l = 0.5c$ $\alpha = 6^\circ$.

İterasyon Sayısı	σ	İ. Sayısı	σ	İ. Sayısı	σ
1	1.49	6	1.46	11	1.46
2	1.47	7	1.46	12	1.46
3	1.46	8	1.46	13	1.46
4	1.16	9	1.46	14	1.46
5	1.46	10	1.46	15	1.46

Kavite kapanırken geçiş bölgesi uzunluğu (λ) tanımlanır. Bu değer değiştirilerek basınç dağılımları elde edilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.8). Geçiş bölgesi değeri büyüdükçe kavite kapanma uzunluğu ve kavitasyon sayısı artmaktadır.(Çizelge 4.4) PCPAN programının el kitabında geçiş bölgesi uzunluğu değerinin (λ) 0.1 alınması gerektiği belirtilmektedir. $\lambda = 0.1$ değeri ile bulunan sonuçlar, deney sonuçları ile uyumludur [2].



Şekil 4.8: Geçiş bölgesi uzunluğu (NACA2412) değişiminin basınç dağılımına etkisi.

Çizelge 4.4: NACA2412 için kavitasyon sayısının geçiş uzunluğu ile değişimi $l = 0.5c$
 $\alpha = 6^\circ$.

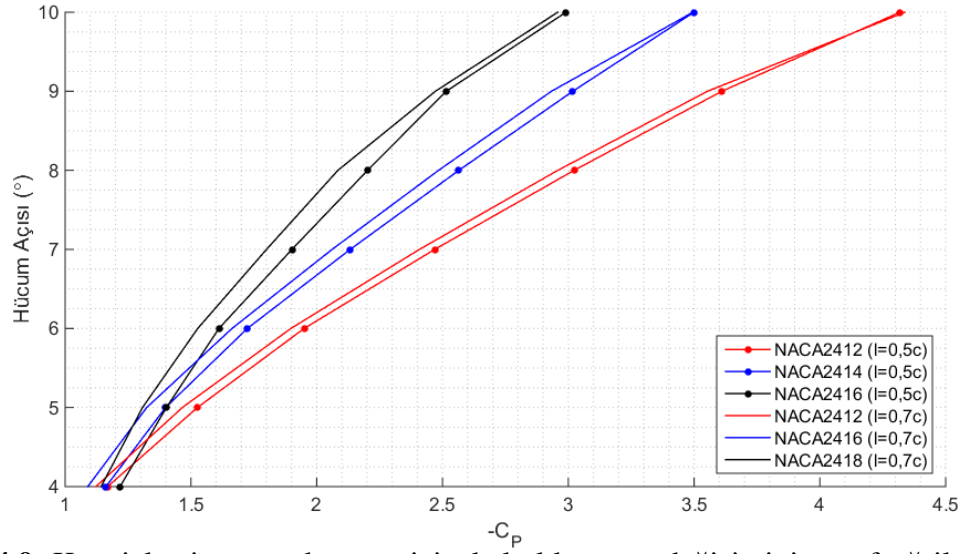
Geçiş Boyu U. (λ)	K. Sayısı (σ)
0.1	1.46
0.15	1.47
0.2	1.47
0.3	1.49

4.2.1 Kalınlık etkisi

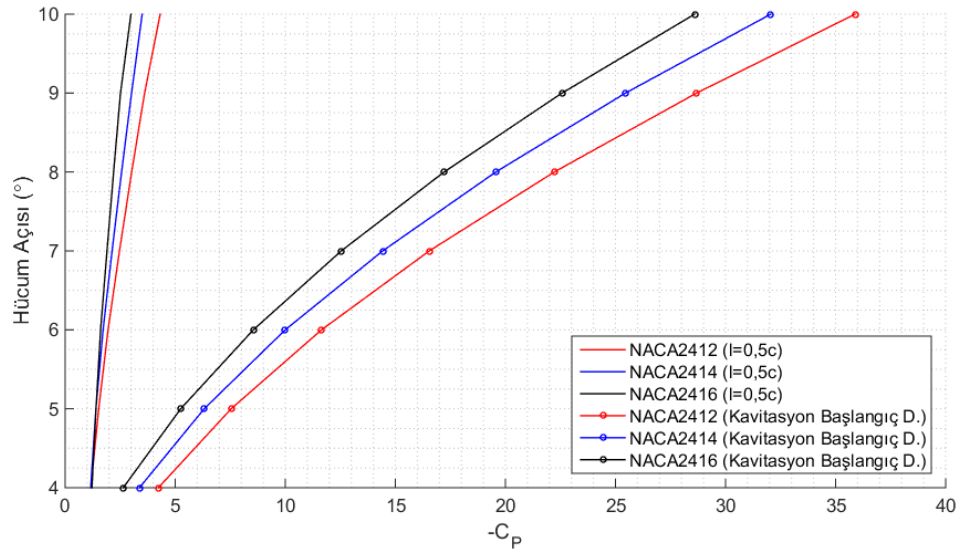
Önceki bölümde kavitasyon başlangıç durumu için yapılan işlemler kısmi kavitasyon durumu için tekrar edilmiştir. Kısmi kavitasyon durumu için PCPAN programı ile basınç dağılımları bulunmuş ve bu değerlerle zarf eğrileri hazırlanmıştır. İncelenen tüm geometriler kavitasyon boyunun kord boyunun 0.5 ve 0.7 katı olduğu iki durum için hesaplanmış ve birbirleri ile karşılaştırılmıştır.

Kalınlık oranının kavitasyona etkisini analiz etmek için PCPAN programı ile NACA2412, NACA2414 ve NACA2416 geometrileri kavitasyon boyu $0.5c$ ve $0.7c$ durumu için elde edilmiş ve kavitasyon zarf eğrileri Şekil 4.9'da verilmiştir. Kısmi kavitasyon durumu için kalınlık oranı etkisi incelendiğinde kavitasyon başlangıç durumu ile aynı sonuç elde edilmiştir. Kalınlık arttıkça kavitasyon oluşma riski azalmaktadır. Şekil 4.10'da kavitasyon başlangıç durumu ile kısmi kavitasyon durumu $l = 0.5c$ için hazırlanan eğriler karşılaştırılmıştır.

Kısmi kavitasyon durumunun incelendiği bölümde çıkarılan eğrilerin iç kısmı belirtilen kavitasyon boyu için güvenli bölgedir. Örneğin $0.5c$ için çıkarılan eğrinin iç kısmında boyu $0.5c$ olan kavite oluşmayacağı söylenebilir. Diğer bir deyişle zarf eğrisinin iç kısmı $l = 0.5c$ durumu için güvenli bölgedir. Fakat daha kısa boylu kavite oluşup oluşmayacağı hakkında kesin bir şey söylenemez. Bunun için kavite boyu arttıkça eğrilerin genişlemesi beklenir. Tüm durumlar için $l = 0.7c$ eğrileri $l = 0.5c$ eğrilerinden daha geniş olacağı söylenebilir.



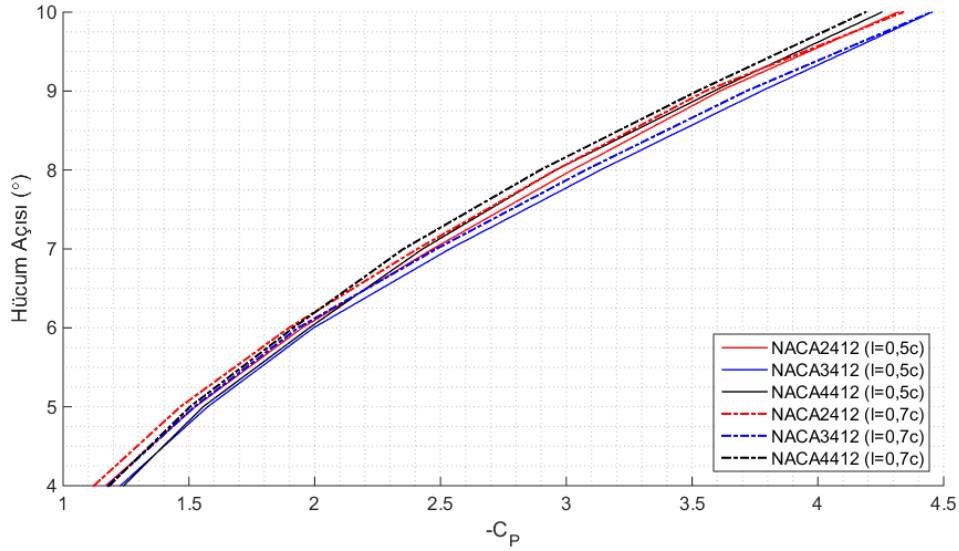
Şekil 4.9: Kısmi kaviteasyon durumu için kalınlık oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve $l = 0.7c$ için).



Şekil 4.10: Kalınlık oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve kaviteasyon başlangıç durumu).

4.2.2 Sehım oranının etkisi

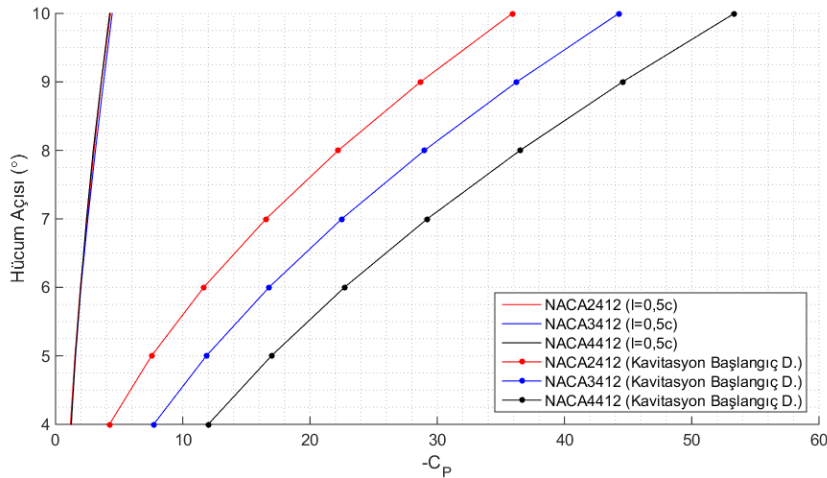
NACA2412, NACA3412 ve NACA4412 geometrileri kavıtasyon boyu $0.5c$ ve $0.7c$ durumu için incelenmiş ve kavıtasyon zarf eğrileri şekil 4.11’de verilmiştir.



şekil 4.11: Kısmi kavıtasyon durumu için sehım oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve $l = 0.7c$ için).

şekil 4.12’te kavıtasyon başlangıç durumu ile kısmi kavıtasyon durumu için hazırlanan eğriler karşılaştırılmıştır.

Kısmi kavıtasyon durumu için elde edilen eğriler ile sehım oranının kısmi kavıtyona etkisi hakkında kesin bir şey söylenemez.

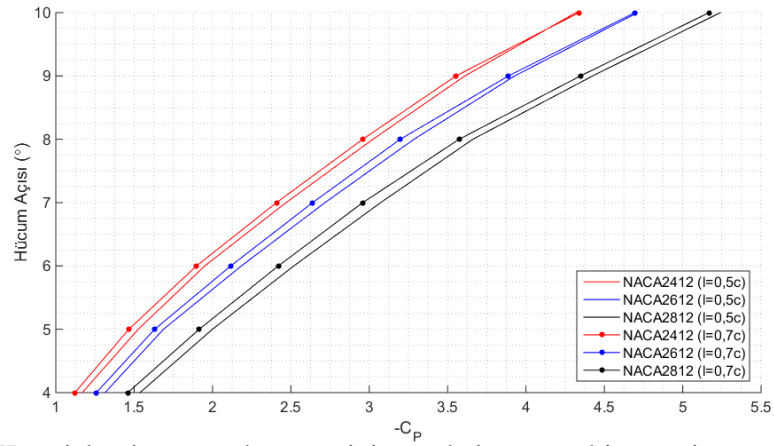


şekil 4.12: Kısmi kavıtasyon durumu için sehım oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve kavıtasyon başlangıç durumu için).

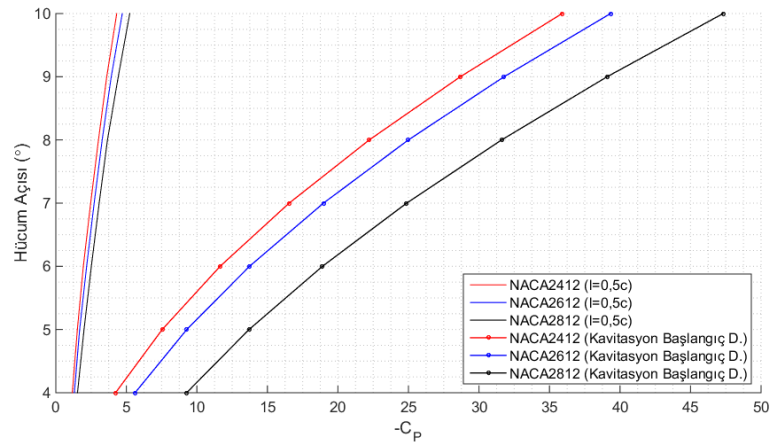
4.2.3 Maksimum seh m yerinin etkisi

NACA2412, NACA2612 ve NACA2812 geometrileri kavitasyon boyu $0.5c$ ve $0.7c$ durumu için incelenmiş ve kavitasyon zarf eğrileri  ekil 4.13'de verilmiştir.

Zarf eğrileri sırasıyla NACA2812, NACA2612, ve NACA2412 için genişlemektedir. Pozitif hücum açılarında maksimum seh min çıkış kenara yaklaşması kavitasyon riskini azaltır.



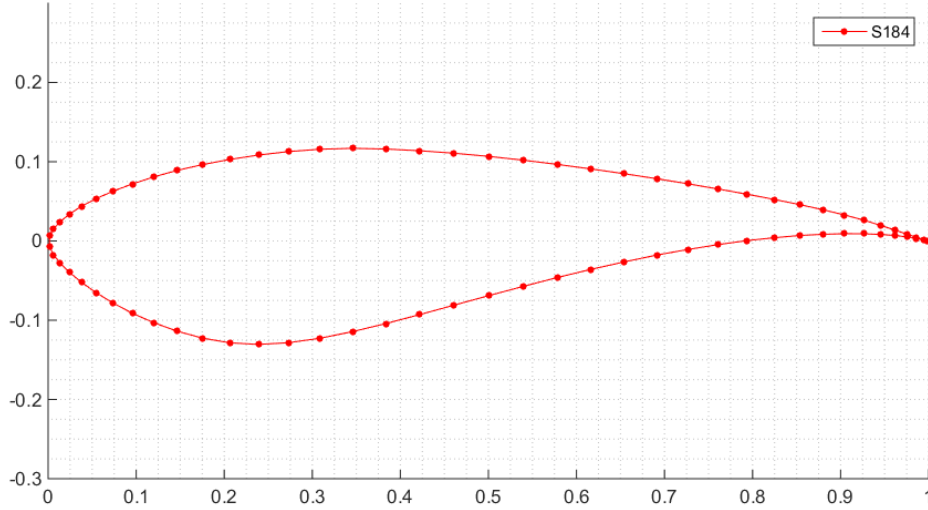
Şekil 4.13: Kısmi kavitasyon durumu için maksimum seh m yeri oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve $l = 0.7c$ için).



Şekil 4.14: Kısmi kavitasyon durumu için maksimum seh m yeri oranı değişiminin zarf eğrilerine etkisi ($l = 0.5c$ ve kavitasyon başlangıç durumu).

4.3 Bir Sualtı Türbini Kesidinin İncelenmesi

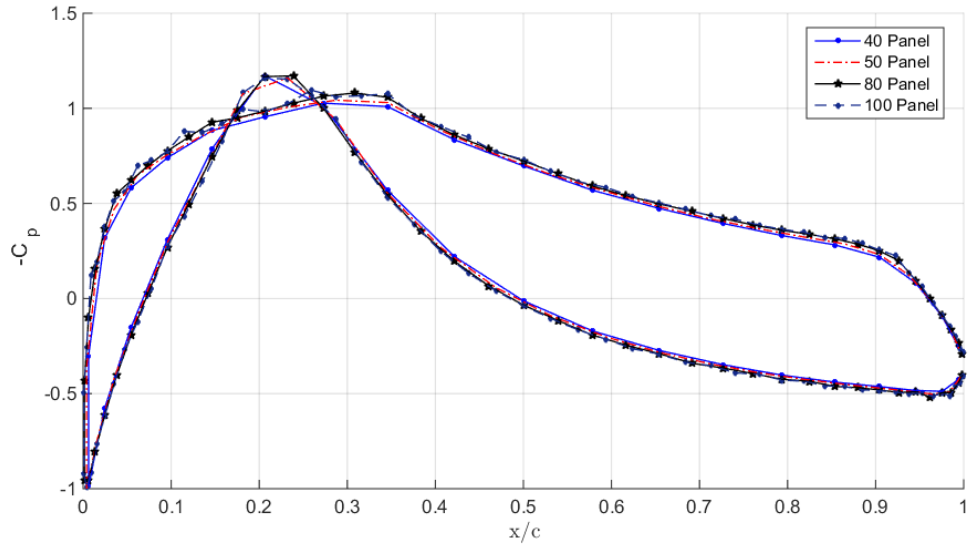
Su altı türbinine ait olan S184 kesidi kavitasyon başlangıç durumu için incelenmiştir. S184 kesidine ait geometri Çizelge 4.5’de [3] verilmiştir. Çizelge 4.5’de verilen geometri 20 nokta içindir. Sonucun daha hızlı yakınsaması için giriş kenar ve çıkış kenara yakın bölgelere daha yoğun panel atılması gerekmektedir. Bu panel yerleşimi kosinüs dağılımı ile sağlanmıştır. Nokta sayısı interpolasyon ile artırılıp kosinüs dağılımı ile yeni noktaların koordinatları hesaplanmıştır. Hesaplanan yeni noktalar ve bu işlem için yazılan MATLAB kodu Ek B’de verilmiştir. S184 geometrisi 80 nokta (kosinüs dağılımı) için Şekil 4.15’te verilmiştir.



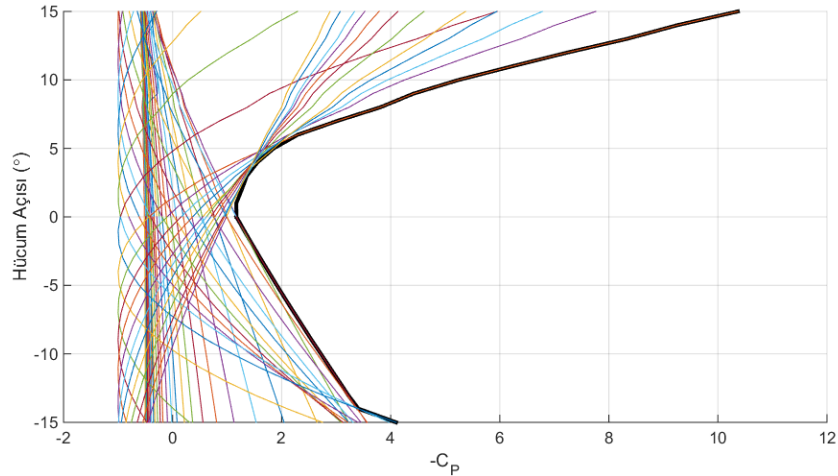
Şekil 4.15: Sualtı türbin kesidi (S184).

S184 kesidi üzerinde oluşan basınç dağılımı sabit kaynak dipol yöntemi ile farklı panel sayıları için bulunup karşılaştırılmıştır.(Şekil 4.16) 80 panel için yapılan çözüm yeterli olduğundan bundan sonra S184 kesidi için yapılacak tüm hesaplamalarda panel sayısı 80 olacaktır.

S184 geometrisi için +15 ve -15 hücum açısı aralığında basınç dağılımı bulunup zarf eğrisi elde edilmiştir.(Şekil 4.17)



Şekil 4.16: S184 için farklı panel sayıları için basınç dağılımı.



Şekil 4.17: Sualtı türbin kesidine (S184) ait kavitasyon başlangıç durumu için zarf eğrisi.

Su altı türbinlerinin çalışma prensibi pervanelerden farklıdır. Pervanelerde akım kesidin negatif basınç tarafı ile karşılaşılırken su altı türbinlerinde pozitif basınç tarafı ile karşılaşılır. Bu nedenle negatif hücum açılarındaki kavitasyon sayısı değerleri daha önemlidir. Şekil 4.17'deki grafikte negatif hücum açıları için kavitasyon kova alanı daha büyüktür. Ayrıca S184 geometrisine bakıldığında maksimum sehim oranı yeri izler kenara daha yakındır ve Şekil 4.6'te bulduğumuz sonuçla (Negatif hücum açılarda çalışan kesitler için maksimum sehimin izler kenara yakın olması durumu.) uyumludur.

Çizelge 4.5: S184 kesit geometrisi [3].

ÜST	YÜZEY	ALT	YÜZEY
x Koordinatları	y Koordinatları	x Koordinatları	y Koordinatları
0	0	0	0
0.0012	0.007	0.0005	-0.0047
0.0083	0.0189	0.0061	-0.0175
0.0206	0.0313	0.0164	-0.0316
0.0377	0.0438	0.031	-0.0465
0.0592	0.0561	0.0492	-0.0616
0.0848	0.0679	0.0708	-0.0766
0.1141	0.079	0.0952	-0.091
0.1469	0.0892	0.1219	-0.1041
0.1827	0.0982	0.1507	-0.1155
0.2211	0.1058	0.1812	-0.1243
0.2618	0.1118	0.2132	-0.1297
0.3042	0.1156	0.2471	-0.1308
0.3483	0.117	0.2839	-0.1274
0.3944	0.1157	0.3239	-0.1199
0.4424	0.1125	0.3675	-0.1089
0.4917	0.1078	0.4148	-0.0951
0.5418	0.1017	0.4655	-0.0796
0.592	0.0947	0.5191	-0.0633
0.6417	0.087	0.5749	-0.047
0.6904	0.0787	0.6319	-0.0317
0.7372	0.0702	0.6891	-0.0182
0.7817	0.0615	0.7453	-0.007
0.8231	0.0528	0.799	0.0013
0.861	0.0442	0.8489	0.0067
0.8946	0.0357	0.8935	0.0092
0.9238	0.0271	0.9315	0.0091
0.9488	0.0185	0.962	0.007
0.9696	0.0107	0.9836	0.0038
0.9858	0.0047	0.9961	0.001
0.9963	0.0011	1	0
1	0		

5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Hidrofoil dizaynında, pompa ve türbin kanatları tasarımında kavitasyon riskini belirlemek için kavitasyon kova diyagramları kullanılabilir. Pervane kesitine ait kavitasyon sayısı her bir hücum açısı için eşleştirilerek elde edilen bu diyagramlar sayesinde hangi koşullar altında hangi bölgede kavitasyonun başlayacağı tahmin edilebilir. Bu çalışmada pervane dizaynında sıklıkla kullanılan NACA foil geometrilerine ait geometrik parametreler sistematik olarak değiştirilerek bu parametrelerin kavitasyona olan etkileri incelenmiştir. İncelenen her durum kavitasyon başlangıç durumu ve kısmi kavitasyon durumu için ayrı ayrı hesaplanmış ve bu iki durum karşılaştırılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular sırasıyla aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Kavitasyon başlangıcı durumu için simetrik ve simetrik olmayan foillerin kalınlık oranları değiştirilerek zarf eğrileri çıkarılmıştır. Hidrofoil maksimum kalınlık oranının kavitasyona etkisi çalışılan $-C_p$ değerine değişmektedir. İncelenen durum için $-C_p$ değeri 1'den büyük olduğu durumda kalınlık artıkça zarf eğrisi genişlemekte yani kavitasyon riski azalmaktadır. $-C_p$ 'nin 1 değerinden küçük olduğu durumda ise kalınlık artıkça kavitasyon riski artar (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2).
- İnce foiller düşük kavitasyon sayılarında çalışabilmektedir. Düşük kavitasyon sayılarında çalışabilmek fiziksel olarak foilin yüksek hızlarda çalışabileceği anlamına gelir. Ayrıca zarf eğrisi genişledikçe foilin kavitasyon riski olmadan çalışabileceği hücum açısı aralığı daralır (Şekil 4.2).
- Kısmi kavitasyon durumu için kalınlık oranı etkisi incelendiğinde kavitasyon başlangıç durumu ile aynı sonuç elde edilmiştir. Kalınlık artıkça kavitasyon oluşma riski azalmaktadır. Kısmi kavitasyon durumunun incelendiği bölümde çıkarılan eğrilerin iç kısmı belirtilen kavitasyon boyu için güvenli bölgedir. Örneğin 0,5c için çıkarılan eğrinin iç kısmında boyu 0,5c olan kavite oluşmayacağı

söylenbilir. Fakat daha kısa boylu kavite oluşup oluşmayacağı hakkında kesin bir şey söylenemez (Şekil 4.9).

- Kavitasyon başlangıç durumunda, pozitif hücum açısı bölgesinde, sehim oranı artıkça zarf eğrisi genişler. Fakat negatif hücum açıları için sehim oranı artıkça zarf eğrisi daralır. Pozitif açılarda çalışacak (akımı negatif basınç tarafı ile karşılayacak) kesitler için sehim oranının artması kavitasyon riskini azaltır. Fakat negatif hücum açılarında çalışacak kesitler için sehim oranının artması kavitasyon açısından istenmeyen bir durumdur (Şekil 4.5).
- Kısmi kavitasyon durumu için elde edilen eğriler ile sehim oranının kavitasyona etkisi hakkında kesin bir şey söylenemez (Şekil 4.11).
- Kavitasyon başlangıç durumu için, pozitif açılarda çalışan veya akımın negatif basınç bölgesi (üst yüzey) ile karşılandığı durumlarda maksimum sehimin giriş kenara yaklaşması kavitasyon direncini artıran bir durumdur. Negatif hücum açılarda çalışan foiller için ise maksimum sehimin çıkış kenara yakın olması istenmektedir (Şekil 4.6).
- Kısmi kavitasyon durumu için ise pozitif hücum açılarında maksimum sehimin giriş uca yaklaşması kavitasyon riskini azaltır.
- Kısmi kavitasyon durumu iki farklı kavitasyon boyu için incelenmiştir. ($l/c=0,5$ ve $l/c=0,7$) Bulunan sonuçlar iki durum için aynı özellikleri taşır. İncelenen tüm durumlarda $l/c = 0,7$ eğrisi $l/c = 0,5$ eğrisinden daha geniştir. Kavitasyon boyu artıkça oluşturulan eğri genişlemektedir.
- Kısmi kavitasyon durumunda elde edilen grafiklerin y eksenini $+4^\circ$ 'den başlar. Bunu nedeni $+4^\circ$ den küçük değerler için verilen özellikte kavite oluşmamasıdır.
- Su altı türbini geometrisi incelendiğinde maksimum sehim oranı yerinin çıkış ucuna yakın olduğu görülmektedir. Negatif hücum açılarında çalışan su altı türbini için minimum kavitasyon riskinin maksimum sehim oranı yerinin çıkış ucuna yakın olması ile sağlandığı sonucuna ulaşılabilir (Şekil 4.15 ve Şekil 4.17).

Mevcut alışma süper kavitasyon durumuna kolaylıkla genişletilebilir. Bir regresyon analizi uygulanarak zarf eğrileri için ampirik bir formül geliştirilebilir. Yapılan bu çalışma yukarıda bahsedilen çalışmalar için bir temel oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

- [1] **Franc, J.P. ve Michel, J.M.** (2006). *Fundamentals of cavitation*, cilt 76, Springer Science & Business Media.
- [2] **Kinnas, S. ve Fine, N.**, (1993), MIT-PCPAN and MIT-SPAN (Partially cavitating and super cavitating 2-D panel methods) User's Manual.
- [3] **Uşar, D.** (2015). Sualtı Akıntı Türbinlerinin Hidrodinamik Olarak İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İTÜ.
- [4] **Carlton, J.** (2007). *Marine propellers and propulsion*, Butterworth-Heinemann.
- [5] **Euler, L.** (1756). Théorie plus complete des machines qui sont mises en mouvement par la réaction de l'eau, *Mémoires de l'académie des sciences de Berlin*, **10**(1756), 227–295.
- [6] **Birkhoff, G. ve Zarantonello, E.** (1957). Jets, wakes and cavities.
- [7] **Tulin, M.** (1953). Steady two-dimensional cavity flows about slender bodies Report 834, David Taylor Model Basin.
- [8] **Geurst, J.** (1959). Linearized theory for partially cavitated hydrofoils, *Int. Shipbuilding Progress*, **6**(60).
- [9] **Villeneuve, R.A.**, (1993), Effects of viscosity on hydrofoil cavitation (Master thesis).
- [10] **Newman, J.N.** (1977). *Marine hydrodynamics*, The MIT Press.
- [11] **Uhlman Jr, J.S.** (1987). The surface singularity method applied to partially cavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, **31**(2).
- [12] **Dang, J. ve Kuiper, G.** (1999). Re-entrant jet modeling of partial cavity flow on three-dimensional hydrofoils, *Journal of fluids engineering*, **121**(4), 781–787.
- [13] **Bal, S., Kinnas, S.A. ve Lee, H.** (2001). Numerical analysis of 2-D and 3-D cavitating hydrofoils under a free surface, *Journal of Ship Research*, **45**(1), 34–49.
- [14] **Kinnas, S.A.** (1991). Leading-edge corrections to the linear theory of partially cavitating hydrofoils, *Journal of Ship Research*, **35**(1), 15–27.
- [15] **Güner, M., Kükner, A. ve Baykal, M.A.** (1999). *Gemi pervaneleri ve sevk sistemleri*, İTÜ.

- [16] **Brennen, C.E.** (1995). *Cavitation and bubble dynamics*, Oxford University Press, New York.
- [17] **Url-1**, <http://cavity.ce.utexas.edu/kinnas/cavphotos.html>, alındığı tarih: 15.04.2015.
- [18] **Vaz, G.N.V.B.** (2005). Modelling of sheet cavitation on hydrofoils and marine propellers using boundary element methods, *Doktora Tezi*.
- [19] **Kerwin, J.**, (2001), Lecture notes Hydrofoils and propellers.
- [20] **Anderson Jr, J.D.** (1985). *Fundamentals of aerodynamics*, Tata McGraw-Hill Education.
- [21] **Katz, J. ve Plotkin, A.** (1991). *Low-speed aerodynamics (From Wing Theory to Panel Methods)*, McGraw-Hill, Singapore.
- [22] **Uşar, D. ve Bal, Ş.** (2015). Cavitation simulation on horizontal axis marine current turbines, *Renewable Energy*, **80**, 15–25.
- [23] **Celik, F., Ozden, Y.A. ve Bal, S.** (2014). Numerical simulation of the flow around two-dimensional partially cavitating hydrofoils, *Ocean Engineering*, **78**(3), 22–34.
- [24] **Bal, S.**, (2014), Lecture notes in Boundary Element Methods in Ship Hydrodynamics.
- [25] **Bal, S.**, (2013), Lecture notes in Ship Propeller Hydrodynamics.
- [26] **Knapp, R., Daily, J. ve Hammitt, F.** (1970). *Cavitation, 1970*, McGraw-Hill, New York.
- [27] **Celik, F., Ozden, Y.A. ve Bal, S.** (2014). Numerical simulation of the flow around two-dimensional partially cavitating hydrofoils, *Journal of Marine Science and Application*, **13**(3), 245–254.
- [28] **Bal, Ş.** (2011). A method for optimum cavitating ship propellers, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, **35**(3), 319–338.
- [29] **Bal, S.** (2011). A practical technique for improvement of open water propeller performance, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, **225**(4), 375–386.
- [30] **Seber, S. ve Bal, .** (2011). Numerical Calculation of Cavitation Buckets for 2-D Hydrofoils, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences, YTU*, **30**(3), 266–280.
- [31] **Url-1**, <http://www.yildiz.edu.tr/~fcelik/>, alındığı tarih: 15.04.2015.
- [32] **Molland, A.F. ve Turnock, S.R.** (2011). *Marine rudders and control surfaces: principles, data, design and applications*, Butterworth-Heinemann.

EKLER

EK A : 4 Basamaklı NACA serisi

EK A1 : Sehim oranının Etkisi

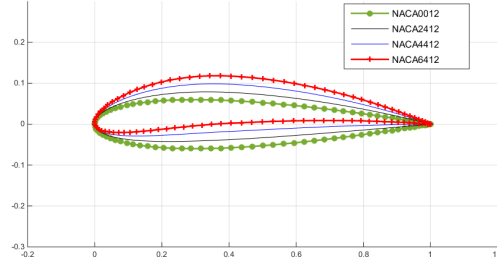
EK A2 : Maksimum sehim yeri oranının etkisi

EK A3 : Kalınlık oranının etkisi

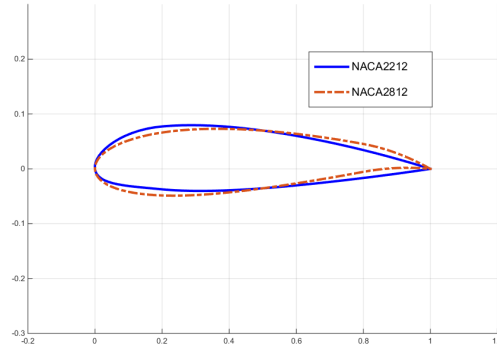
EK B : Tam kosinüs dağılımı (MATLAB)

EK C : Sualtı türbin kesidi basınç dağılımı

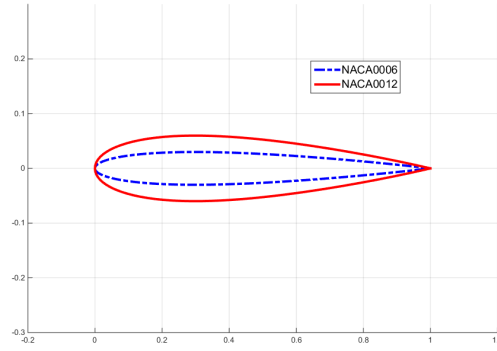
EK A



Şekil A.1: Sehım oranı değişiminin kesit geometrisine etkisi.



Şekil A.2: Maksimum sehım yeri değişiminin kesit geometrisine etkisi.

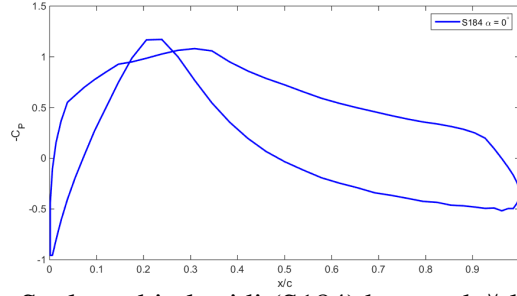


Şekil A.3: Kalınlık oranı değişiminin kesit geometrisine etkisi.

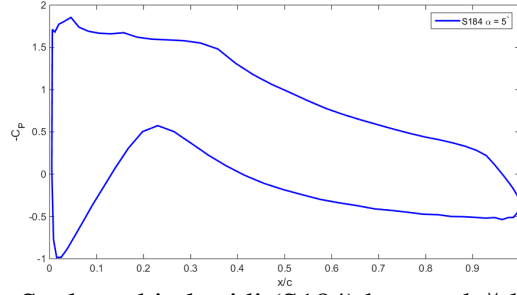
EK B

```
clear all
clc
close all
data=xlsread('s814.xlsx')
hold on
grid minor
c=1;
n=40;
beta=pi/n
x=[];
for i=1:1:n
x(i,1)=(c/2)*(1-cos(beta*i))
end
x_new=eye(n,1)
x_new(1,1)=x(n,1)
x_new(n,1)=x(1,1)
for i=1:n-1
x_new(n-i*1,1)=x(i+1,1)
end
y_upper = interp1(data(:,1),data(:,2),x_new)
y_lower = interp1(data(1:31,3),data(1:31,4),x)
a=[x_new,y_upper]
aa=[x,y_lower]
s_184=[a;aa];
scatter(x_new,y_upper,'d')
scatter(x,y_lower,'d')
save s_184.dat s_184 -ascii
```

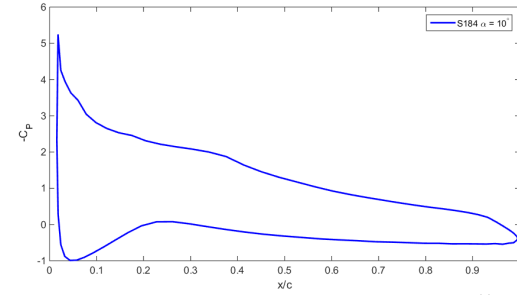

EK C



Şekil C.1: Sualtı türbin kesidi (S184) basınç dağılımı $\alpha = 0^\circ$.

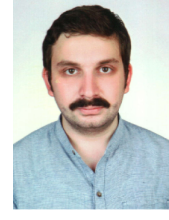


Şekil C.2: Sualtı türbin kesidi (S184) basınç dağılımı $\alpha = 5^\circ$.



Şekil C.3: Sualtı türbin kesidi (S184) basınç dağılımı $\alpha = 10^\circ$.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Mehmet Salih KARAALIOĞLU

Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul 1988

Adres: İTÜ Ayazağa Kampüsü, Gemi İnşaatı ve Den. Bil. Fakültesi

E-Posta: karaalioglum@itu.edu.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi