

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ PERVANE KESİTLERİNE AİT KAVİTASYON
KOVALARININ SAYISAL HESABI**

SERDAR SEBER

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
GEMİ İNŞAATI VE GEMİ MAKİNELERİ MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD.DOÇ.DR.SERKAN EKİNCİ**

İSTANBUL, 2011

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ PERVANE KESİTLERİNE AİT KAVİTASYON
KOVALARININ SAYISAL HESABI

Serdar SEBER tarafından hazırlanan tez çalışması 11.08.2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Serkan EKİNCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Eş Danışman

Prof. Dr. Şakir BAL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Serkan EKİNCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şakir BAL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Abdi KÜKNER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Hüseyin YILMAZ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Can TAKİNACI
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın başlamasına ve ilerlemesine yardımcı olan Prof.Dr.Şakir BAL ve Yrd.Doç.Dr.Serkan EKİNCİ'ye, çalışmanın hazırlanmasına yardımcı olan ve devamlı destek veren İdil OFLAZOĞLU, Fatih YAMAK, Arş.Gör.Ali DOĞRUL, Arş.Gör.Ömer Kemal KINACI'ya ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Ağustos, 2011

Serdar SEBER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ.....	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT.....	xiii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Hipotez	1
BÖLÜM 2	3
KAVİTASYON	3
2.1 Kaviteasyon Çeşitleri.....	3
2.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştığı Konuma Göre Kaviteasyon Çeşitleri.....	4
2.1.1.1 Sırt Kaviteasyonu.....	4
2.1.1.2 Yüz Kaviteasyonu	4
2.1.2 Fiziksel Görünüşlerine Göre Kaviteasyon Çeşitleri	4
2.1.2.1 Uç (Tip) ve Göbek (Hub) Girdap (Vortex) Kaviteasyonu	4
2.1.2.2 Kabarcık (Bubble) Kaviteasyonu.....	5
2.1.2.3 Tabaka (Sheet) Kaviteasyonu	5
2.1.2.4 Bulut (Cloud) Kaviteasyonu.....	6
2.1.2.5 Kök (Root) Kaviteasyonu	6
2.1.2.6 Pervane-Tekne Girdap Kaviteasyonu (PHV).....	7
2.2 Gemi Pervane Kanat Kesitlerinde Kaviteasyon ile İlgili Yapılan Çalışmalar ..	7

BÖLÜM 3	15
SINIR ELEMANLARI YÖNTEMİ (PANEL YÖNTEMİ)	15
3.1 Sınır Elemanları Yöntemine Ait Teori	16
3.2 Sınır Şartları	18
3.2.1 Dirichlet Sınır Şartı	18
3.3 Birleştirilmiş Kaynak ve Dipol Yöntemi	20
3.4 Sınır Elemanları Yöntemine Dayalı Bilgisayar Programı (PC-PAN)	26
3.4.1 Giriş	26
3.4.2 Formülasyon	27
BÖLÜM 4	31
SAYISAL BULGULAR VE YORUMLAR	31
BÖLÜM 5	43
SONUÇ VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGE LİSTESİ

Ψ	Akım fonksiyonu
Φ_{in}	Akış hız potansiyeli
C_p	Basınç katsayısı
n	Birim vektör
P_∞	Çevre basıncı
Φ_i	Dahili pertürbasyon potansiyeli
μ	Dipol
B_j, C_j	Etkime integralleri
c, a	Etkime katsayıları
l_0	Hidrofoilin giriş ucu ile üst kavitasyon ayrılma noktası arasındaki uzaklık
S_T	Geçiş bölgesinin başlangıç değeri
λ	Geçiş bölgesinin boyu
Φ_∞	Gelen akım potansiyeli
Φ_u^*	Hız potansiyeli
α	Hücum açısı
Φ_i^*	İç potansiyel
Δ_j	İki yakın kollokasyon noktası arasındaki mesafe
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
l	Kavitasyon boyu
S_c	Kavitasyon yay uzunluğu
h	Kavitasyon yüksekliği
P_c	Kavitasyon yüzeyindeki basınç
S_L	Kavitasyonun çıkış ucuna tekabül eden S_F değeri
q_L	Kavitasyonun çıkış ucundaki toplam hız
S_F	Kavitasyonun çıkış ucundan itibaren ölçülen kavitasyonun gerisinde hidrofoilin yay uzunluğu
σ	Kaynak, kavitasyon sayısı
r	Kaynak noktası ile alan noktası arasındaki mesafe
Q_t	Kısmi harici teğet hız
Φ_u	Kısmi toplam potansiyel

c	Kiriş boyu
ϕ	Pertürbasyon potansiyeli
V_∞, U_∞	Sabit hız bileşenleri
Q_∞	Serbest akım hızı
q_c	Toplam hız
\vec{q}	Toplam hız akış alanı
L	Toplam kaldırma
M_0	Toplam moment
Φ, Φ^*	Toplam potansiyel
$k - \varepsilon$	Türbülans modeli
U_∞	Uniform akış
ν	Üst indis
S	Yay uzunluğu
S_c	Yeni yay uzunluğu
ρ	Yoğunluk

KISALTMA LİSTESİ

BEM	Boundary Element Method
CDSM	Combined Doublet and Source Method
FORTTRAN	FORMula TRANslating System
ILES	Implicit Large Eddy Simulation
LPT	Lagrangian Particle Tracking
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
PCPAN	Partially Cavitating PANEL Method
PHV	Propeller Hull Vortex
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
RHS	Right Hand Side
SAFL	Saint Anthony Falls Laboratory
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations
SCP	Supercavitating Propeller
TCP	Trans Cavitating Propeller
VOF	Volume of Fluid

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Sırt kavitasyonu	4
Şekil 2. 2 Yüz kavitasyonu	4
Şekil 2. 3 Uç girdap kavitasyonu	5
Şekil 2. 4 Göbek girdap kavitasyonu	5
Şekil 2. 5 Kabarcık kavitasyonu	5
Şekil 2. 6 Tabaka kavitasyonu	6
Şekil 2. 7 Bulut kavitasyonu	6
Şekil 2. 8 Kök kavitasyonu	7
Şekil 2. 9 PHV kavitasyonu	7
Şekil 3. 1 Kapalı bir geometri üzerinde potansiyel akış	16
Şekil 3. 2 Hidrofoil yüzeyinde panel boşluğunun tam kosinüs yöntemi	21
Şekil 3. 3 Katı bir yüzey üzerindeki dipol panelleri	24
Şekil 3. 4 Hidrofoil yüzeyi üzerinde sabit şiddetli dipol panellerinin tipik segmenti	25
Şekil 3. 5 10 ve 90 panel kullanılarak simetrik bir kanat üzerinde giriş hattı boyunca basınç dağılımı	26
Şekil 3. 6 Kısmi kavitasyonlu hidrofoil	27
Şekil 4. 1 NACA0012 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı	32
Şekil 4. 2 NACA4412 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı	33
Şekil 4. 3 Balık kuyruklu kesit	34
Şekil 4. 4 Balık kuyruklu kesite ait kavitasyon kova diyagramı	36
Şekil 4. 5 Kesitlere ait kavitasyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği	38
Şekil 4. 6 NACA0012 ve NACA4412 kesitlerine ait C_L değerleri	38
Şekil 4. 7 NACA63A012 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı	40
Şekil 4. 8 NACA0012, NACA4412 ve NACA63A012 kesitlerinin kaldırma kuvveti katsayısı değerlerinin karşılaştırılması	41
Şekil 4. 9 Kavitasyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği	41
Şekil 4. 10 NACA0002-NACA0020 kesitlerinin kavitasyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği	42

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1 Balık kuyruklu kesite ait boyutsuzlaştırılmış geometrik değerler.....	34
Çizelge 4. 2 NACA0012, NACA4412 ve Balık kuyruklu kesitlere ait C_L değerleri	37
Çizelge 4. 3 NACA0012 için PC-PAN doğrulaması	39
Çizelge 4. 4 NACA4412 için PC-PAN doğrulaması	39

**GEMİ PERVANE KESİTLERİNE AİT KAVİTASYON
KOVALARININ SAYISAL HESABI**

Serdar SEBER

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Serkan EKİNCİ

Eş Danışman: Prof. Dr. Şakir BAL

Bu çalışmada sınır elemanları yöntemi kullanılarak gemi pervane kesitlerine ait kavitasyon kovalarının sayısal hesabı yapılmıştır. Dirichlet tipi potansiyel temelli sınır elemanları yöntemleri (panel yöntemleri) hem kavitasyon kovalarının hesaplanmasında hem de kavitasyon kovalarının doğrulanmasında kullanılmıştır. Önce örnek pervane kesitlerinin verileri elde edilmiştir. Daha sonra bilgisayar programları yardımıyla (PC-Pan, CDSM) kavitasyonu etkileyen parametreler sistematik bir biçimde değiştirilerek sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak diyagramlar ve dizayn bukletleri hazırlanmıştır. Diyagramlarda farklı değişkenler karşılaştırılmıştır. Minimum basınç katsayısı - Hücüm açısı ($C_p-\alpha$), Hücüm açısı - Kavitasyon sayısı ($\alpha-\sigma$), Hücüm açısı - Kaldırma kuvveti katsayısı ($\alpha-C_L$), Kavitasyon sayısı - Minimum basınç katsayısı ($\sigma-C_p$), Kavitasyon sayısı - Kavitasyon boyu ($\sigma-l$) gibi parametreler kullanılarak diyagram ve tablolar oluşturulmuştur. Bütün veriler toplanarak kavitasyon kova diyagramları (bukletleri) oluşturulmuştur. Bu bukletler sayesinde hidrofoil kesitleri üzerinde kavitasyonun olup olmadığı ve söz konusu kesitlerin analiz sonuçlarına göre hangi aralıklarda çalışması gerektiği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kavitasyon, hücüm açısı, kaldırma kuvveti katsayısı, basınç katsayısı, gemi pervanesi, hidrofoil kesitleri, sınır elemanları yöntemi.

**NUMERICAL CALCULATION OF CAVITATION BUCKETS ON
SHIP PROPELLER BLADE SECTIONS**

Serdar SEBER

Department of Naval Architecture And Marine Engineering
MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Serkan EKİNCİ

Co-Advisor: Prof. Dr. Şakir BAL

In this study, the cavitation buckets for the sections of ship propeller are computed by using the boundary element methods. Dirichlet type potential based boundary element methods (panel methods) used in the calculation and verification of cavitation buckets. First, a sample data was obtained from sections of the propeller. Then with the help of computer programs (PC-Pan and CDSM) the hydrodynamic performance of sections was calculated in a systematic manner by changing the parameters affecting the cavitation. Design booklets and diagrams have been created based on these results. The diagrams of different variables are compared with each other. Minimum pressure coefficient - Angle of attack ($C_p-\alpha$), Angle of attack – Cavitation number ($\alpha-\sigma$), Angle of attack - Lift coefficient ($\alpha-C_L$), Cavitation number - Minimum pressure coefficient ($\sigma-C_p$), Cavitation number - Cavitation length ($\sigma-l$) such as using parameters have been presented in tables and diagrams. All data was collected in a booklet. By using this booklet it can be said where cavitation is/isn't effective on hydrofoil sections and which areas should be studied according to analysis solutions.

Key words: Cavitation, angle of attack, lift coefficient, pressure coefficient, ship propeller, hydrofoil sections, boundary element method.

1.1 Literatür Özeti

Kavitasyon ile ilgili bilimsel incelemeler 19. yy ortalarına kadar dayanmaktadır. Başlangıçta küçük ölçeklerde yapılan deneysel çalışmalar, kavitasyon olayının daha iyi bir şekilde açıklanabilmesi için yerini büyük ölçekte deneylerin yapılabileceği büyük boyuttaki kavitasyon tünellerine bırakmıştır. Kavitasyon hesaplamalarında deneysel yöntemlere alternatif olarak, özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak sirkülasyon teorisine dayalı hesaplamalı analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçların, deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçların yerine geçebilecek, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlayacak düzeyde olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir.

1.2 Tezin Amacı

Pervane dizaynında kanat kesitlerinin kavitasyon durumunu belirlemek için kavitasyon kova diyagramları kullanılır. Bu diyagramlar kesitler üzerindeki basınç katsayıları ile kesitin çalıştığı hücum açıları göz önüne alınarak oluşturulur. Bu çalışmada, kesitin hangi bölgesinde hangi koşullar altında hangi tip kavitasyonun başlayacağı bu diyagramlar yardımıyla değerlendirilmeye çalışılmıştır.

1.3 Hipotez

Farklı NACA kesitlerine ait kavitasyon kova değerleri çıkarılıp, farklı değişkenler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen değerler bir araya getirilerek kesitlere ait

kavitasyon kova bukletlerinin oluşturulması sağlanmıştır. Bu bukletler, hangi kesit ile hangi aralıklarda çalışılması gerektiğini belirtmektedir.

BÖLÜM 2

KAVİTASYON

Kavitasyon, gemi pervanelerinde sıkça karşılaşılan bir sorundur. Bernoulli prensibine göre, akışkan içerisinde hız artışı ile birlikte basınç azalması meydana gelir. Başka bir deyişle, basınçtaki azalma suyun kaynama noktasını ortam sıcaklığına kadar düşürebilir. Bunun sonucunda içinde su buharı ve erimiş gazlar bulunan, hava kabarcıkları içeren bir tür soğuk kaynama meydana gelir. Bu olay “kavitasyon” olarak tanımlanır. Kavitasyon, kaynama olayından farklı bir fiziksel olaydır. Kaynama olayındaki buharlaşma, sabit basınçta sıcaklık artımı ile meydana gelirken kavitasyon olayındaki buharlaşma ise sabit sıcaklıkta basınç düşümü ile meydana gelir.

Kavitasyon statik veya hareketli bir sıvının bulunduğu ortamlarda oluşur. Uçak kanadı, pervane kanadı, hidrolik valfler, pompalar, türbinler örnek olarak gösterilebilir.

2.1 Kavitasyon Çeşitleri

Gemi pervanelerinde görülen kavitasyon türleri iki grupta toplanabilir (Güner vd. [1]):

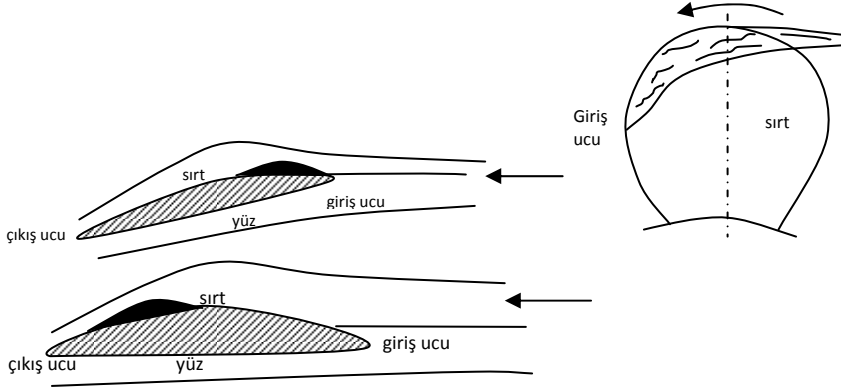
1-) Pervane kanadı üzerinde oluştuğu konuma göre kavitasyon çeşitleri

2-) Fiziksel görünüşlerine göre kavitasyon çeşitleri

2.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştğu Konuma Göre Kaviteasyon Çeşitleri

2.1.1.1 Sırt Kaviteasyonu

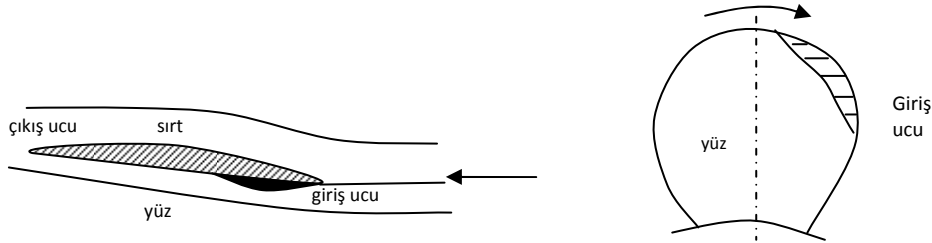
Pervanelerin pozitif hücum açılarında çalışması durumunda giriş ucu civarında, emme kısmında, küçük hatvelerde oluşan kaviteasyon türüdür.



Şekil 2. 1 Sırt kaviteasyonu (Ekinci [2])

2.1.1.2 Yüz Kaviteasyonu

Pervanelerin negatif hücum açılarında çalışması durumunda giriş ucu civarında basınç kısmında oluşan kaviteasyon türüdür. (Ekinci [2])

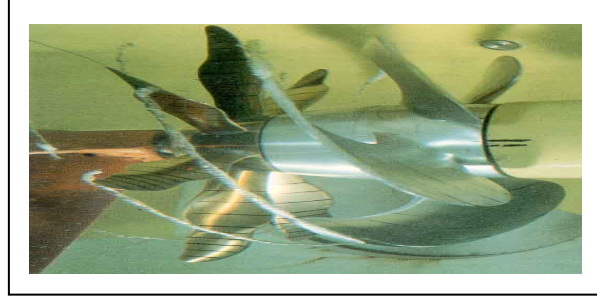


Şekil 2. 2 Yüz kaviteasyonu (Ekinci [2])

2.1.2 Fiziksel Görünümlerine Göre Kaviteasyon Çeşitleri

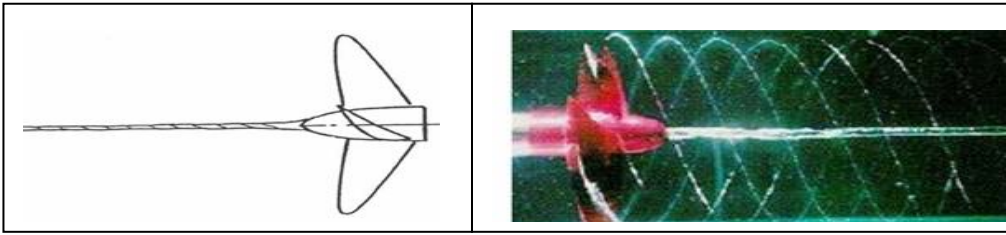
2.1.2.1 Uç (Tip) ve Göbek (Hub) Girdap (Vortex) Kaviteasyonu

Uç girdap kaviteasyonu, pervane kanadının uç kısmında belirli bir uzaklıkta ortaya çıkar. Genellikle ilk meydana gelen kaviteasyon çeşididir.



Şekil 2. 3 Uç girdap kavitasyonu (Ekinci [2])

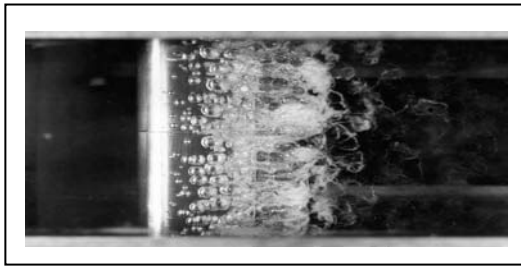
Göbek girdap kavitasyonu, pervane kanadının kök kısmından göbeğe doğru ilerleyen ve akışı bozan kavitasyon çekirdekleri (nuclei) nedeni ile oluşur.



Şekil 2. 4 Göbek girdap kavitasyonu (Ekinci [2])

2.1.2.2 Kabarcık (Bubble) Kavitasyonu

Akışkan içinde bulunan gaz çekirdekleri düşük basınç bölgesine doğru yayılırlar. Gaz çekirdeklerinin akışkan ile birlikte hareket etmelerinden ötürü “seyahat eden-hareketli kavitasyon” olarak da anılmaktadır.

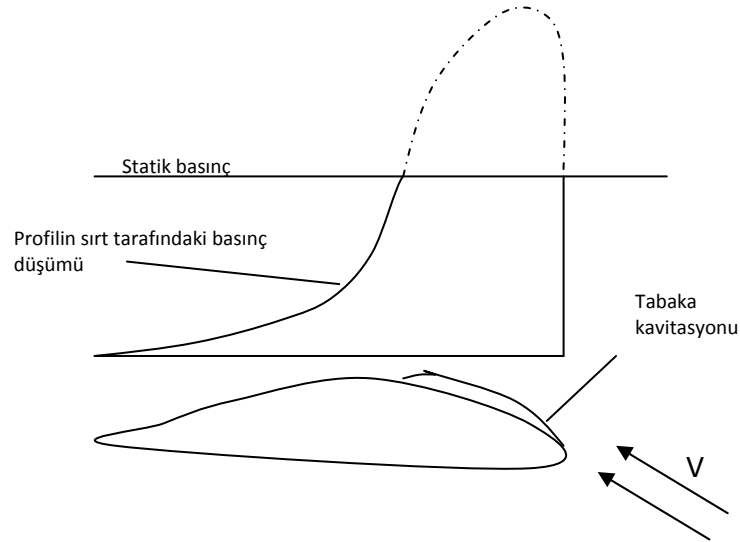


Şekil 2. 5 Kabarcık kavitasyonu (Ekinci [2])

2.1.2.3 Tabaka (Sheet) Kavitasyonu

Büyük hücum açılarında çalışan bir pervane kanat kesitinde basınç dağılımı şiddetli ve ters bir basınç gradyenine sahip olduğunda, akımın kesitten ayrılması ile kesitin emme tarafında basınç dağılımı değişir ve maksimum emme meydana gelir. Minimum basınç,

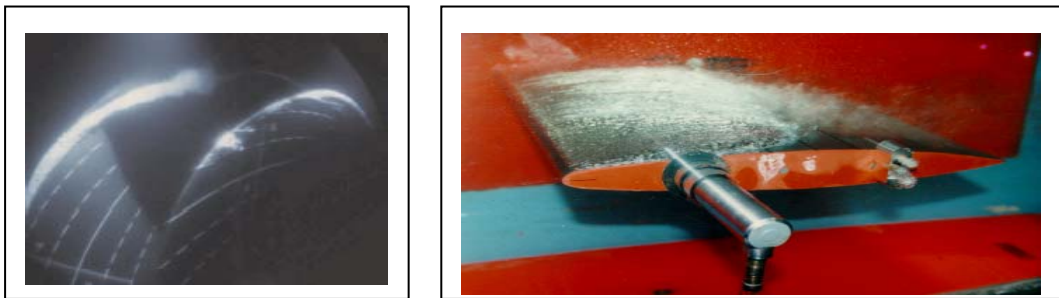
buhar basıncından daha düşük olduğu için tabaka kavitasyonu meydana gelir (Ekinci [2]). Düşük kavitasyon sayılarında hidrofoilin giriş ucuna yakın bölgelerde basıncın yüksek değerlere ulaşması sonucunda oluşan tabaka kavitasyonu “kısmi kavitasyon” olarak anılır. Kavitasyon, giriş ucundan sonra basınç tarafına doğru ilerleyip etkime yaparsa bu tabaka kavitasyonu “süper kavitasyon” olarak anılır. (Brennen [3])



Şekil 2. 6 Tabaka kavitasyonu (Ekinci [2])

2.1.2.4 Bulut (Cloud) Kavitasyonu

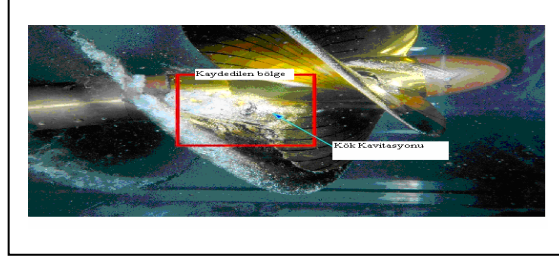
Bulut kavitasyonu, tabaka kavitasyonunu izleyen “sis” veya “bulut” görünümlü küçük kabarcıklar şeklinde, tabakanın çıkış ucunda ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2. 7 Bulut kavitasyonu (Ekinci [2])

2.1.2.5 Kök (Root) Kavitasyonu

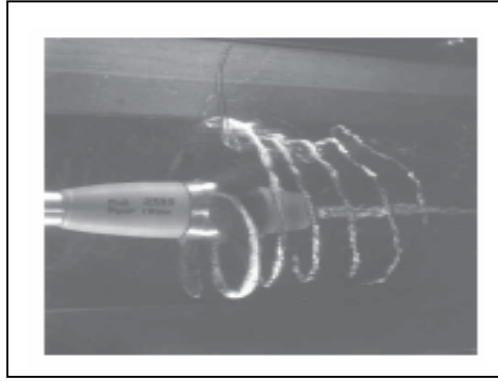
Pervane kanadının kök kısmında meydana gelir ve kama şekline benzemektedir. Kök bölgesinde, kanat kesitine ait maksimum kalınlık noktası civarında sırt kısmında oluşabilir.



Şekil 2. 8 Kök kavitasyonu (Ekinci [2])

2.1.2.6 Pervane-Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV)

Büyük ve şiddetli iz alanı ile pervane etkileşimi sonucunda meydana gelir. Pervane kanadının ucunda meydana gelen girdap, tekneye doğru ilerleyerek tekne ile birleşir. Düzensiz aralıklarla oluşabilir.



Şekil 2. 9 PHV kavitasyonu (Ekinci [2])

2.2 Gemi Pervane Kanat Kesitlerinde Kavitasyon ile İlgili Yapılan Çalışmalar

Kavitasyon ile ilgili bilimsel incelemeler 19. yy ortalarına kadar dayanmaktadır. Başlangıçta küçük ölçeklerde yapılan deneysel çalışmalar, kavitasyon olayının daha iyi bir şekilde açıklanabilmesi için yerini büyük ölçekte deneylerin yapılabileceği büyük boyuttaki kavitasyon tünellerine bırakmıştır. Kavitasyon hesaplamalarında deneysel yöntemlere alternatif olarak, özellikle bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak sirkülasyon teorisine dayalı hesaplamalı analiz yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden elde edilen sonuçların, deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçların yerine geçebilecek, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlayacak düzeyde olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir.

Dang ve Kuiper [4], iki boyutlu hidrofoil kesitler üzerinde kısmi kavitasyonlu akışı tahmin edebilmek için potansiyel temelli bir panel yöntemi geliştirmişlerdir. Kavitasyon yüzeyi üzerinde Dirichlet tipi dinamik sınır koşulu ve kavitasyon gösteren kesit üzerinde Neumann tipi kinematik sınır koşulu uygulanmıştır. Bu çalışmada, yeniden giriş jet kavitasyon sonlandırma modeli tanıtılmıştır. Modifiye edilmiş bir Joukowsky hidrofoilin mevcut hesaplamaları ile kavitasyon tecrübeleri ve bir NACA 66 mod a=0.8 sehim hattına sahip kanat kesiti üzerinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Brewer ve Kinnas [5], hesaplamalı birkaç teorik yöntemin doğruluğunun kanıtlanması için, MIT’de değişken basınçlı su tüneline kısmi kavitasyonlu bir hidrofoil üzerinde deney yapmışlardır. Akış hızları, kavitasyon yüzeyine yakın olmasının yanı sıra, sınır tabaka bölgesi içinde hidrofoil çevresinde dikdörtgen şeklindeki bir kontrol yüzeyi boyunca alınmaktadır. Kavitasyon ayrılma ve yeniden bağlanma noktaları, kavitasyon sayısının birkaç değeri için ölçülmüştür. Ölçülen hızlar ile momentum akı entegrasyonundan elde edilen hızlar değerlendirilmiştir. Ölçümler, lineer olmayan viskozitesiz kavitasyon analiz yöntemi ve sınır tabaka çözümünden elde edilen nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Bal vd. [6], serbest yüzey altında sabit hızla hareket eden iki veya üç boyutlu kavitasyonlu hidrofoil modelleri için bir yöntem tanımlaması yapmışlardır. Akış alanının tüm yüzeylerinde Green teoremi kullanılarak bir integral denklem elde edilmiştir. Bu integral denklem, kavitasyonlu hidrofoil problemi ve serbest yüzey problemi olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Bu iki denklem, birinin diğeri üzerindeki etkileri iteratif bir biçimde hesaplanarak birbirinden ayrı olarak çözülmektedir. Kavitasyonlu hidrofoil ve serbest yüzey, sabit şiddetli dipol ve kaynak paneller ile modellenmiştir. Serbest yüzey üzerindeki kaynak şiddetleri doğrusallaştırılmış serbest yüzey şartları uygulanarak yatay eksene uyarak potansiyelin ikinci türevi açısından ifade edilmiştir. Serbest yüzey üzerindeki kavitasyonlu hidrofoildeki indüklenmiş potansiyel ve serbest yüzey üzerindeki hidrofoil, iteratif bir mantıkla belirlenmiştir. Akıma karşı dalgaları engellemek için hidrofoilin önünden tepesi kesilmiş akım sınırının sonuna kadar olan bölgeden alınan bazı değerler sifıra eşitlenmiştir. Hiçbir ışıma koşulu akım yönündeki sınırda veya enine sınırda zorlanamaz. Bu yöntem, kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış

koşulları için iki ve üç boyutlu hidrofoil geometrilerine uygulanmış ve kavitasyon tahmini ile değişik yöntemler karşılaştırılmıştır.

Krishnaswamy [7], iki boyutlu kısmi kavitasyonlu bir hidrofoil üzerinde kavitasyon sonundaki akışı, yeniden giriş jet modeli ile modelleyerek panel yöntemine dayalı bir analiz çalışması yapmıştır.

Lee ve Kinnas [8], pervane kanatlarında meydana gelen daimi olmayan tabaka kavitasyonu ile gelişmiş uç girdap kavitasyon modeli için sınır eleman yöntemi geliştirmişlerdir. Kavitasyonun büyüklüğü ve boyutları, kavitasyon yüzeyi üzerinde dinamik ve kinematik sınır şartlarını sağlayarak tanımlanmıştır. Yöntemin sayısal davranışı, iki boyutlu uç girdap kavitasyonu, üç boyutlu hidrofoil ve üniform olmayan akış koşulunu sağlayan pervaneler için incelenmiştir. Bu çalışmada, deneysel ölçümler ile sayısal tahminlerin karşılaştırılması verilmiştir.

Kinnas vd. [9], hidrofoiller üzerinde kavitasyonlu akışı BEM'e dayalı potansiyel bir yöntem ile incelemişlerdir. Bu sayısal yöntemde kavitasyon şekli, kavitasyon yüzeyi üzerinde kinematik ve dinamik sınır şartları tam olarak sağlanıncaya kadar iteratif bir şekilde hesaplanmıştır. Kavitasyonlu akış üzerinde viskozitenin etkileri, birleştirilmiş hidrofoil yüzeyinde viskoz ve ideal etkileşimli integral sınır tabaka analizi, birleştirilmiş kavitasyon ve hidrofoil yüzeyi tarafından uygulanmıştır.

Wang ve Yang [10], kaldırıcı yüzey yöntemini kullanarak SCP veya TCP'nin dizaynında kullanılan sayısal bir yöntem ile iki boyutlu süperkavitasyonlu bir hidrofoilin performansını incelemişlerdir. İki boyutlu süper kavitasyonlu hidrofoilin performansı, "doğrusal girdap panel yöntemi" ile elde edilmiştir. Ön dizayn aşamasında Lerbs'in induksiyon faktörleri yöntemi kullanılmıştır. Pervane geometrisi, kesit ana hatları, kesit profilleri, sirkülasyon ve hatve dağılımları tanımlanmıştır. Dizayn gereksinimlerini karşılamak için kaldırıcı yüzey yöntemi kullanılarak hatve dağılımı ve kanat kesitleri kavitasyonlu pervane için elde edilmiştir.

Dacles-Mariani vd. [11], pervane kanatlarının etkisindeki girdap akışını sıkıştırılmaz ortam kabulü ile Navier-Stokes denklemlerini bir RANS çözücüsü kullanarak incelemişlerdir. Ele alınan sayısal uygulamalarda sayısal hataların ve laminar/türbülans geçiş modellemesinin etkisi göz önüne alınmıştır. Türbülanslı akış analizinde, Baldwin-

Barth türbülans modeli, kullanılmıştır. Ele alınan uygulamada, tam ölçekli bir geometri üzerinde 1.1 milyon grid noktası kullanılmıştır. Sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Bal [12], serbest su yüzeyinin altında, kavitasyon özelliği göz önüne alınmaksızın, sabit bir hızla ilerleyen iki boyutlu hidrofoillerin hidrodinamik analizi için potansiyel temelli bir panel yöntemi sunmuştur. Green teoremi kullanılarak ve dahili (iç) potansiyeli gelen düzgün akımın potansiyeline eşitleyerek, potansiyel akım teorisine bağlı koşullar altında toplam potansiyel için bir integral denklem oluşturulmuştur. Serbest su yüzeyi koşulu lineerleştirilmiş ve hidrofoil üzerinde Neumann tipi sınır koşulu yerine Dirichlet tipi sınır koşulu kullanılmıştır. Hidrofoil, üzerinde sabit şiddete sahip dipol elemanlar ile doğrusal panellere bölünmüştür. Serbest su yüzeyi koşulunu sağlamak için ayna simetriği yöntemi kullanılmış ve temel çözümdeki terimler her bir panel üzerinde integre edilmiştir. NACA4412, Van de Vooren hidrofoilleri ve ince bir hidrofoil için basınç dağılımı, kaldırma kuvveti, dalga direnci ve serbest su yüzeyindeki deformasyonlar hesaplanmıştır. Literatürde var olan değerlerden (basınç dağılımı, kaldırma kuvveti, dalga direnci, serbest su yüzeyi deformasyonlarından) daha büyük değerler elde edilmiştir. Serbest su yüzeyinin hidrofoil üzerindeki etkisi Froude sayısına ve hidrofoil batma derinliğine bağlı olarak incelenmiştir.

Berntsen vd. [13], tabaka ve uç girdap kavitasyonunun sayısal olarak modellenmesinde FLUENT programından faydalanmışlardır. Uygulama olarak iki boyutlu NACA 0015 ve üç boyutlu NACA 662 – 415 hidrofoilleri ele alınmıştır. Çalışma esas olarak iki boyutlu NACA0015 hidrofoil gridini teşkil eder. Bu çalışma, başlangıçtan süper kavitasyona kadar farklı iki hücum açısında kavitasyon sayıları farklı aralıklarda alınarak yapılmıştır. Bütün sayısal sonuçlar SAFL tünelinele elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Kavitasyonlu akışın genel karakteristikleri iyi bir şekilde tahmin edilmiştir. Özellikle kavitasyon boyu yüksek hassasiyette hesaplanmıştır. Aynı zamanda kavitasyon sayısının bir fonksiyonu olan kaldırma kuvveti değerleri de iyi bir şekilde tahmin edilmiştir. Bununla birlikte güncel modelde sistemin dinamiği ile ilgili problemler gözlenmiştir. Diğer inceleme ise üç boyutlu NACA 662–415 eliptik hidrofoil üzerinde yapılmıştır. Bu inceleme, çözücünün üç boyutlu yeteneğini test etmek için yapılmıştır. Sonuçlar, deneysel verilerle doğrulanmıştır. Özel odak noktası, uç girdap

şiddeti ve kavitasyon sayısının bir fonksiyonu olan kaldırma kuvveti değerlerine göre verilmiştir. Elde edilen sonuçların tatminkar olduğu belirtilmiştir.

Chen ve Wu [14] çalışmalarında, uniform ve viskoziteli akış ortamında, serbest yüzeyden sonlu bir derinlikte bulunan iki boyutlu kısmi kavitasyonlu hidrofoilin karakteristiklerini incelemişlerdir. Akış, RANS eşitlikleri ile modellenmiştir. Hesaplamalar için SIMPLE şeması ile sonlu hacim yöntemi ve $k - \varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Buharlaşmanın, yoğuşmayan gazların ve sıkıştırılabilirliğin etkilerini içeren tam kavitasyon modeli, kavitasyonlu akışın hesaplanmasında kullanılmıştır. Kavitasyon şekli ve serbest yüzey, kabul edilebilir düzeyde iteratif bir yakınsama sağlanana kadar devam etmiştir. Serbest yüzey hesabının öngörüsü için VOF yaklaşımı uygulanmıştır.

Pavlova ve Terent'ev [15] çalışmasında, serbest bir sınıra yakın veya bir kanal içindeki hidrofoile gelen akımı ve herhangi bir hidrofoil veya hidrofoil sistemlerine gelen kavitasyonlu akımın sayısal olarak incelenmesini sağlayan bir yöntem sunmuşlardır. Bu yöntem, Green eşitliğini kullanan iteratif bir prosedür olarak geliştirilmiştir. Bu çalışmada esas olarak, eğrisel bir yüzeyden kavitasyon sınırının düzgün olarak ayrılmasını sağlayan sayısal analiz çalışması vurgulanmaktadır. Analitik ve sayısal sonuçların karşılaştırılması, önerilen yöntemin yüksek verime sahip olduğunu göstermiştir.

Pascarella ve Salvatore [16], laminar iki boyutlu Navier Stokes akış çözücüsü ile kavitasyonun simülasyonu üzerine sayısal bir çalışma yapmışlardır. Özellikle, NACA0015 hidrofoilin etrafındaki kavitasyonlu akış için farklı hücum açılarındaki sonuçlar rapor edilmiştir. Sıvı-buhar faz değişimi göz önünde tutularak barotropik ilişki uygulanmıştır. Dinamik akış reaksiyonu ve temel akış özelliklerinin çeşitlilikleri, hücum açılarının farklı değerleri ile hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

Kinnas [17], kavitasyonlu akışın tahmini için son zamanlarda kullanılan sayısal teknikleri, lineer ve lineer olmayan teorilere dayalı olarak iki ve üç boyutlu süper kavitasyonlu hidrofoiller ve pervanelerde uygulamıştır. Lineer olmayan optimizasyon algoritması ile birleştirilmiş bu tekniklerden bazılarının, verimli bir süper kavitasyonlu hidrofoil veya pervane dizaynında kullanılabileceği vurgulanmıştır.

Yamaguchi vd. [18] çalışmalarında, farklı kalınlık oranlarına sahip üç adet hidrofoil kesitini, kavitasyon başlangıcını geciktirmek ve yüksek kaldırma/sürüklenme oranı elde etmek için teorik olarak dizayn etmişlerdir. Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz hidrofoil teorileri yardımı ile hidrofoillere ait kavitasyonlu ve kavitasyonsuz şartlar altındaki performanslar incelenmiştir. Bu işlem yapılırken kavitasyon tünel testlerine de başvurulmuştur. Elde edilen sonuçlar teorik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Pearce ve Brandner [19] çalışmalarında, sıfır kavitasyon sayısında lineerleştirilmiş potansiyel teoriyi temel alarak klasik süper kavitasyonlu hidrofoiller için performans öngörülleri sunmuşlardır. Süper kavitasyonlu hidrofoillerin performansı için daha gerçekçi öngörüller lineer olmayan sınır elemanı formülasyonu kullanılarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar düz yüzeyle, dairesel yay ve NACA 4 dijital sehime hattına sahip kavitasyonlu yüzey profilleri arasında yapılmıştır. Süper kavitasyonlu hidrofoil performansının sınırları, hidrofoilin kavitasyon yüzeyi gösteren yüzeyinden dengesizliği ve minimum kavitasyon açıklığını önlemek için minimum kavitasyon boyu açısından tanımlanmıştır. Hidrofoilin kavitasyon gösteren yüzeyi üzerindeki bu sınırların ilişkisi, etki alanı ve kavitasyon sayısı türetilmiştir.

Gustavsson vd. [20] çalışmalarında, güçlü termodinamik etkiler altında kalan bir hidrofoil üzerindeki kavitasyonu incelemişlerdir. Uygulama olarak NACA0015 hidrofoili ele alınmıştır. Bu hidrofoil değişik hücum açıları ve akım hızlarında test edilmiştir. Statik basınçlar, kort boyunca yedi noktada, hidrofoilin emme tarafının merkez hattı boyunca ve hidrofoilin akıma karşı gelen test kesit duvarının üzerinde ölçülmüştür. Test kesiti statik basıncının frekans analizi, tüneldeki hız arttıkça salınımların genliğinin arttığını göstermiştir. Yüksek hızlı görüntüleme teknikleri sayesinde kavitasyonun, verilen bir kavitasyon sayısı için girişin soğuk sudakinden daha büyük bir kısmını kapladığı görülmüştür. Önemli ölçüde küçük kabarcıklar görülmüştür ve basınç değerlerinin, kavitasyon bölgesinde akıntı yönünde sabit statik basınçtan dolayı arttığı gözlenmiştir. Gözlemler doğrultusunda akışkanlar ile diğer geometriler için literatürde yapılanlar güçlü bir termodinamik etki ortaya koymuştur.

Chau vd. [21] çalışmalarında, potansiyel teori üzerine kurulmuş farklı geleneksel yaklaşımları RANS eşitliklerini kullanarak hidrofoil kesitlerinin kavitasyon başlangıcı

karakteristiklerini incelemiştir. Yüksek Reynolds sayılarında viskoz etkiler, $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerinin elde edilmesinde kullanılmış olup doğrudan potansiyel teoriden elde edilmemiştir. Bu çalışmada, pürüzlülük etkilerini içeren iki yaklaşım tanımlanmıştır. Potansiyel teoriye dayalı kavitasyon kova karakteristiklerinin öngörüsü, önerilen viskoz hesaplamalardan daha tutarlı görülmüştür. Sayısal olarak, farklı sehim oranlarına sahip hidrofoil kesitleri, kesit kalınlıkları ve Reynolds sayıları kullanılmıştır. Reynolds sayısındaki azalmanın, dik bölgenin şeklini değiştirmeden serbest bölgede kavitasyonu arttırma eğiliminde olduğu görülmüştür. Kesit kalınlığındaki artışın, hücum açısında geniş bir artışı doğurduğu ve burada da kavitasyonun beklenmediği görülmüştür. Sehim oranındaki artışın ise, hücum açısının kavitasyonsuz konuma ilerlemesine ve kısmen oranının artmasına sebep olduğu tespit edilmiştir.

Cure vd. [22], geniş bir spektrumda basit potansiyel akım yöntemlerinden faydalanarak kavitasyonu modellemişlerdir. Bu çalışmada sıvı / buhar hacim kırılması için taşınım eşitliği, yüksek çözünürlüklü ve tam zamanlı çözüm stratejisi verilerek ILES eşitliklerine entegre edilmiştir. İki kütle transfer modeli (aynı zamanda kavitasyon modeli olarak anılır), sıvıdan buhara kütle transferindeki kaynak terimleri gibi birleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan kütle transfer modelleri Kunz [23] ve Sauer [24] çalışmalarından esinlenerek yapılmıştır. Bu iki model farklı fiziksel altyapıları temel almaktadır. Ancak sonuçlardaki eşitlikler oldukça benzerdir. Sauer kütle transfer modelinin modifikasyonu bu çalışmada önerilmiştir. Kavitasyon çekirdek dağılımı LPT simülasyonundan elde edilmiştir. İki test durumu Kunz ve Sauer'in kütle transfer modellerinin doğrulanması için kullanılmıştır. Bunun uygulaması olarak iki boyutlu NACA0015 hidrofoili ve üç boyutlu kıvrımlı yüzeye sahip bir hidrofoil ele alınmıştır.

Bal [25] çalışmasında, daha önceden dalmış kavitasyonlu hidrofoiller için geliştirilmiş iteratif sınır eleman yöntemini, dalga modelini, serbest yüzey üzerinde sabit bir hızla ilerleyen yüzey yarıcı hidrofoillerin sürüklenme ve kaldırma değerlerini tahmin etmek için genişletmiş ve modifiye etmiştir. Green teoremine dayalı iteratif sayısal yöntem, yüzey yarıcı kavitasyonlu hidrofoil probleminin ayrılmasına ve serbest yüzey problemine izin vermektedir. Hidrofoilin ıslak yüzeyi ve serbest yüzey, sabit şiddetli dipol ve sabit şiddetli kaynak panelleri ile modellenmiştir. Akıma karşı dalgaları

engellemek için hidrofoilin önünden tepesi kesilmiş akıntı sınırının sonuna kadar olan bölgeden alınan bazı değerler sıfıra eşitlenmiştir. Bu çalışmadaki yöntem, literatürde verilen diğer sayısal yöntemler ile deneysel sonuçların karşılaştırılması için belli bir yalpa açısına sahip dikdörtgen şekilli kavitasyon göstermeyen bir hidrofoile uygulanmıştır. Daha sonra bu yöntem, dalga modelinin üzerinde Froude sayısının etkilerini ve dikey strutun kaldırma ve sürüklenme değerlerinin öngörüsü için kavitasyon gösteren dikdörtgen kesitli dikey struta uygulanmıştır.

SINIR ELEMANLARI YÖNTEMİ (PANEL YÖNTEMİ)

Gemi hidrodinamiğinde, sıkıştırılamaz ve viskozitesiz akış kabulünün yapıldığı potansiyel akışlar Laplace denklemi ile analiz edilmektedir. Bu denklemi çözmek için kullanılan sayısal yöntemlerden biri de sınır elemanları yöntemidir.

Lineer olmayan etkileri içeren kavitasyonlu akışların analizi için, bilgisayar teknolojisinin de gelişimine paralel olarak birtakım sayısal yöntemler ortaya çıkarılmıştır. Bu sayısal yöntemlerin temeli, potansiyel akış teorisi içinde yer alan teoremlere dayanmaktadır. Bu teoremler, akış alanının sınırları üzerine dağılmış olan uygun kaynak, dipol, girdap veya bunların kombinasyonları olarak açıklanabilen, Neumann, Dirichlet veya bunların her ikisinin bulunduğu sınır koşulu problemlerinin çözümünü ifade etmektedir. Bu nedenle kullanılan bu tekniklere “yüzey tekillik yöntemleri (surface singularitiy methods)”, “sınır eleman yöntemleri (boundary element methods=BEMs)” veya en genel olarak “panel yöntemleri (panel methods)” adı verilmektedir. (Ekinci [2])

Bu yöntemlerde, iki boyutlu akış problemlerinde analiz edilecek cismin yüzeylerine genelde düz doğru (straight-line) şeklinde paneller kullanılırken üç boyutlu akış problemlerinde örneğin pervane kanatlarının ve göbeğinin yüzeyleri veya bir hidrofoil yüzeyinde bunların yerine tamamen düz dörtgensel paneller kullanılmaktadır. Takip eden girdap (trailing vortex) tabakası da aynı zamanda benzer dörtgensel paneller ile temsil edilmektedir. Söz konusu yöntemlerin “Panel yöntemi” adı ile anılmasının nedeni yüzeylere dağıtılan bu şekillerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

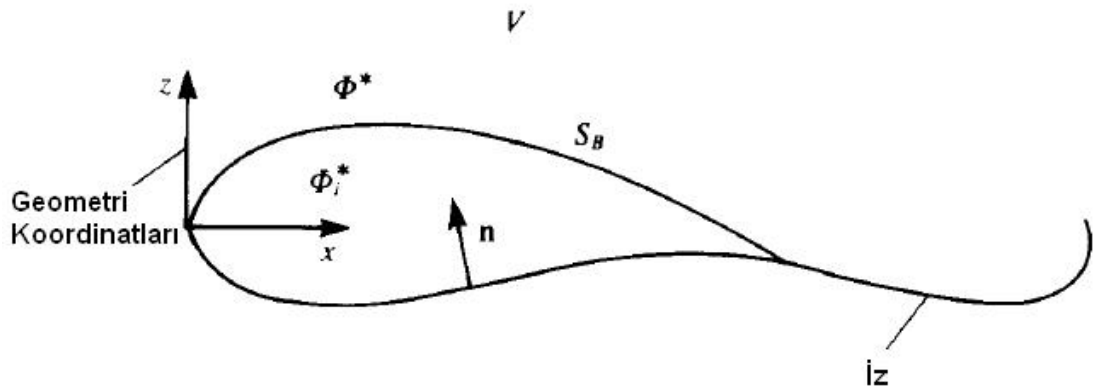
Yöntem ilk olarak uçak endüstrisinde Hess ve Smith [26] tarafından yapılan bir çalışma ile ortaya çıkmıştır. Kullanılan bu yaklaşımda, yüzeylerde düz doğru paneller kullanılmış, her panel üzerinde kaynak şiddetinin sabit ancak her panel için farklı bir

değere sahip olduğu, girdap şiddetlerinin ise sabit ve her panel üzerinde aynı değere sahip olduğu kabul edilmiştir. Hess ve Valarezo [27], Hess ve Smith [26] çalışmasına dayalı olarak pervaneler etrafındaki düzenli akışın hesabı için bir yöntem önermişlerdir. Bu çalışmanın hemen sonrasında ise Hoshino [28], yine aynı amaç için bir yüzey panel yöntemi ortaya çıkarmıştır.

Panel yöntemlerinde kullanılan tekilliklerin şiddetleri, her bir panelin orta noktasına yerleştirilen kontrol noktalarında sınır değer problemlerinin çözümü ile belirlenmektedir (Carlton [29]). İki boyutlu hidrofoiller ile karşılaştırıldıklarında üç boyutlu geometrilerde (gemi pervaneleri) panel sayıları çok büyük oranda arttığı için panel yöntemleri hesaplama zamanına bağlı olarak çok zahmetli olmaktadır (Kinnas [30]). Bu yöntemlerin özellikle tabaka kavitasyonu analizinde verimli olduğu iddia edilmektedir (Szantyr [31]).

Bu bölümde, Kinnas ve Fine [32] tarafından kavitasyonlu hidrofoillerin analizi için geliştirilen sınır elemanları yöntemine dayalı bir yaklaşım sunulmaktadır.

3.1 Sınır Elemanları Yöntemine Ait Teori



Şekil 3. 1 Kapalı bir geometri üzerinde potansiyel akış (Katz ve Plotkin [33])

Sınırları S_B ile belirlenen potansiyel akış ortamında çalışan dalmış bir yapı Şekil 3.1'deki gibi ele alınsın. Bu yapının dışında kalan bölgenin V , akışın sıkıştırılmaz ve çevrintisiz olduğu kabulü ile yapının sınırları üzerindeki süreklilik denklemi toplam potansiyel Φ^* 'ye göre aşağıdaki gibi elde edilmektedir;

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

(3.1) eşitliğinin genel çözümü S_B sınırı üzerine yerleştirilen kaynak (σ) ve dipol (μ) dağılımlarının toplamı olarak ifade edilebilir:

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

Burada n vektörü, potansiyel sıçrama (μ) yönünde S_B sınırına dik ve V bölgesinin dışında pozitiftir (Şekil 3.1). Gelen akım potansiyeli (Φ_∞) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

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

Çok sayıdaki kaynak ve dipol dağılımları verilen sınır şartlarını sağlayacağından bu formülasyon, çözümü tam olarak ifade etmez. Bu nedenle, istenilen tekillik elemanlarının dağılımlarını seçmek için keyfi bir seçim yapılmalıdır. Kaynak elemanları, kesit kalınlıklarının temsilinde kullanılırken, dipol (veya girdap) gibi asimetric terimler ise kaldırıcı yüzey problemlerinin temsilinde (örneğin kavitsiyon) kullanılabilir. Bu problemin çözümünü tanımlamak için ilk olarak yüzeye dik sıfır akım sınır koşulları uygulanmalıdır. Sıfır akım sınır koşullarının yüzeyin normali olarak tanımlanması gerekir. Genel olarak üç boyutlu akışlarda sınır koşulları, iki sebepten dolayı hızlı bir şekilde çözümü sağlamayacaktır. Bunlardan birincisi, kaynak ve dipol dağılımlarının “sağ” kombinasyonu açısından keyfi bir karar verilmelidir. İkincisi ise S_B yüzeyi etrafındaki sirkülasyonu sabit tutmak için bazı fiziksel hususların tanımlanmasına gereksinimin olmasıdır. Bu hususlar iz modellemesinin, iz dökülme hatlarının düzeltilmesinin, bunların ilk oryantasyon ve geometrisinin anlaşılmasında kullanılır (Bu durum, iki boyutlu Kutta şartının üç boyutlu eşdeğeridir). Bununla birlikte iz, ince dipol veya girdap tabakaları ile modellenerek (Şekil 3.1), (3.2) eşitliği aşağıdaki gibi yeniden yazılabilir: (Katz ve Plotkin [33])

$$\Phi^*(x, y, z) = -\frac{1}{4\pi} \int_{yap\ i+iz} \mu n \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{yap\ i} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty \quad (3.2a)$$

3.2 Sınır Şartları

(3.1) eşitliği için sınır koşulu, S_B yüzeyi üzerinde sıfır normal hız bileşeni $\partial\Phi^*/\partial n=0$ olarak doğrudan belirtilebilir. Bu “direkt” formülasyon Neumann problemi olarak adlandırılır. Φ^* değerini, sınır üzerinde belirtmek mümkündür. Bu durumda endirekt sıfır normal akış şartı ile karşılaşılır ve bu “endirekt” formülasyon Dirichlet problemi olarak adlandırılır. Sözü edilen bu sınır koşullarının bir arada bulunduğu durumlar da söz konusudur. Bu sınır koşulu, karma sınır koşulu problemi olarak adlandırılır.

Tekillik dağılımı için ilave bir yaklaşım aramak, S_B yüzeyinin geometrisine eşit olan kapalı akım hatlarına ihtiyacı doğurur. Bu yöntem iki boyutlu problemlerde kullanışlıdır. Bu problemlerde akım fonksiyonu Ψ iyi bir şekilde tanımlanmaktadır (Bu nedenle akım hatları sabittir ve kolay bir şekilde türetilebilir).

3.2.1 Dirichlet Sınır Şartı

Bu koşulda, pertürbasyon potansiyeli Φ 'nin S_B yüzeyi üzerinde tanımlanması gerekmektedir. Denklem (3.2a) bunu tam olarak sağlamaktadır. S_B yüzeyi üzerinde tekillik elemanları dağıtılarak bu yüzeyin de içinde alınan herhangi bir (x,y,z) noktasındaki iç potansiyel Φ_i^* aşağıdaki gibi elde edilmektedir: (Katz ve Plotkin [33])

$$\Phi_i^*(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{yap\ i+iz} \mu \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{yap\ i} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty \quad (3.4)$$

Ayrıca, $r \rightarrow 0$ olduğu zaman bu integraller tekil olmaktadır ve bu (x,y,z) noktası civarında bu integrallere ait temel değerler hesaplanmalıdır. Yüzeye dik sıfır akım sınır koşulu olarak belirtilen $\nabla(\Phi+\Phi_\infty) \cdot n=0$ ifadesi burada $\Phi_i^*=sabit$ olarak tanımlanmaktadır. Bu nedenle, $\nabla(\Phi+\Phi_\infty) \cdot n=0$ ifadesi hız potansiyeline bağlı olarak aşağıdaki şekillerde ifade edilmektedir:

$$\Phi_i^* = (\Phi + \Phi_\infty)_i \quad \text{veya;}$$

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

Yukarıda ifade edilen (3.5) eşitliği, endirekt sınır koşullarını kullanan yöntemler için temel oluşturmaktadır. Ancak bu aşamada bile iç potansiyel değeri Φ_i^* için çeşitli çözüm yöntemleri arasında birçok farklılıklar bulunur (Kaynak/dipol kombinasyonlarındaki farklılıklara ilaveten). Örneğin, $\Phi_i^*=(\Phi+\Phi_\infty)_i=0$ alınarak, denklem (3.5) S_B yüzeyi üzerinde çözülebilir. Ancak bu durumda ortaya çıkan tekillik dağılımı Φ_∞ 'yi kapsayacak ve bu tekillik dağılımının şiddeti de büyük olacaktır.

Aynı zamanda, iç potansiyel için diğer değerler de belirtilebilmektedir (tam olarak sabit değil). İç potansiyel $\Phi_i^*=(\Phi+\Phi_\infty)_i= \Phi_\infty$ olacak şekilde alınırsa (Bu denklem, sadece $\Phi_\infty=0$ olduğu sabitlenmiş bir yapının pertürbasyon potansiyeli için denklem (3.5)'e eşittir), denklem (3.5) aşağıda ifade edildiği gibi daha basit bir denkleme indirgenir:

$$\frac{1}{4\pi} \int_{yapı+iz} \mu \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{yapı} \sigma \left(\frac{1}{r} \right) dS = 0 \quad (3.6)$$

Yukarıda sözü edilen ifadeleri doğrulamak için, Neumann sınır şartının ($\nabla(\Phi+\Phi_\infty) \cdot n = 0$) ele alındığı varsayalım. $\partial\Phi^*/\partial n=0$ eşitliği, $\partial\Phi/\partial n=-n \cdot Q_\infty$ eşitliğine denktir. Hız potansiyelinin normal türevi içinde süreksizlik için $\nabla\Phi \cdot n=0$ eşitliğinin değeri aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$-\sigma = \frac{\partial\Phi^*}{\partial n} - \frac{\partial\Phi_i^*}{\partial n} = \frac{\partial\Phi}{\partial n} - \frac{\partial\Phi_i}{\partial n} \quad (3.7)$$

$\Phi_i=0$ olduğu için S_B yüzeyi üzerinde de $\partial\Phi_i/\partial n=0$ olmaktadır. Sonuç olarak, (3.6) eşitliğine bağlı olarak kaynak şiddetinin, aşağıdaki ifade edilen denkleme eşit olması gerekmektedir:

$$\sigma = n \cdot Q_\infty \quad (3.8)$$

Burada n , Şekil 3.1' de gösterilen geometrinin içine doğru olan birim vektördür.

Bu problemi tam olarak tanımlamak için, iz dipol dağılımlarının bilinmesi veya S_B üzerindeki bilinmeyen dipoller ile ilgili dağılımların bilinmesi gerekir (Kutta şartı).

Çözümüne devam etmek için, S_B yüzeyi ayrık elemanlara bölünmekte ve her bir elemanda (3.5) veya (3.6) eşitlikleri hesaplanmaktadır. Hesaplama ile elde edilen sonuçlar bilinmeyen μ dağılımları için birtakım cebirsel eşitlikler şeklindedir.

Bu formülasyonda (3.8) eşitliği kullanıldığı zaman, sıfır normal akım sınır koşulu kaynak terimlerini içermektedir. Çok ince yüzeyler için integral alma işlemi uygun olmayabilir ve sayısal kararsızlıklar ortaya çıkabilir.

3.3 Birleştirilmiş Kaynak ve Dipol Yöntemi

Her bir panel lokal kaynak ve dipol şiddetine sahiptir.

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

Bu durum (3.9) eşitliği için geçerli değildir. Kaynak veya dipol değerleri belirtilmelidir. İç potansiyel Φ_∞ 'a eşit olarak seçilmiştir ve bu durum için kaynak şiddeti aşağıdaki gibi verilmektedir:

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

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

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

(3.11) eşitliği (Sınır şartı), bu nokta için doğrusal cebirsel bir denklemleri sağlamak koşuluyla yapı içerisindeki her kollokasyon noktasında belirtilmiştir. Böyle bir sayısal çözüm kurulabilmesi için izlenmesi gereken adımlar şu şekildedir:

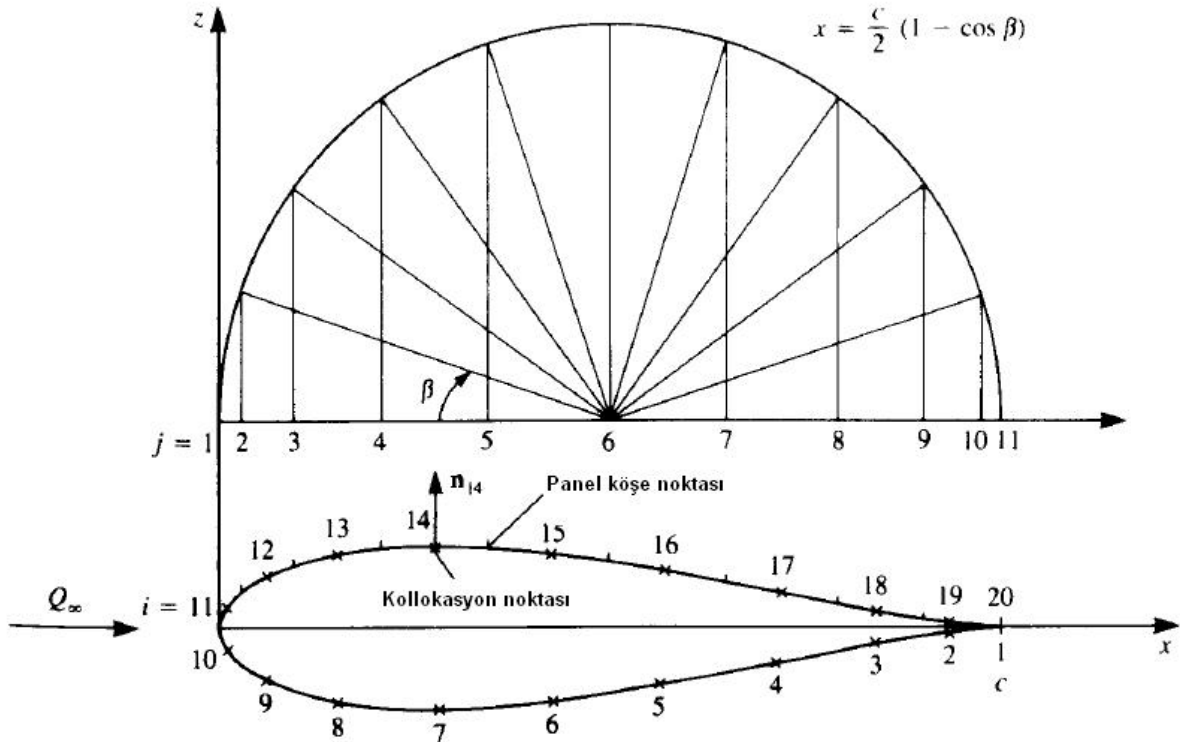
Tekillik elemanının seçimi: Keyfi bir P noktasındaki hız potansiyeli (bu nokta yüzey üzerinde değildir), sabit şiddetli dipol elemanına bağlı olarak elde edilmiş ve aşağıdaki eşitlik verilmiştir:

$$\Phi = \frac{\sigma}{4\pi} \left\{ (x-x_1) \ln[(x-x_1)^2 + z^2] - (x-x_2) \ln[(x-x_2)^2 + z^2] + 2z \left(\tan^{-1} \frac{z}{x-x_2} - \tan^{-1} \frac{z}{x-x_1} \right) \right\} \quad (3.12)$$

ve sabit şiddetli dipol elemanına bağlı olarak eşitlik aşağıda verilmiştir:

$$\Phi = -\frac{\mu}{2\pi} \left[\tan^{-1} \frac{z}{x-x_2} - \tan^{-1} \frac{z}{x-x_1} \right] \quad (\text{panel koordinatları}) \quad (3.13)$$

Geometrinin ayrıklaştırılması: N+1 adet panellere ait köşe noktaları ve N adet kollokasyon noktalarına ait ağ yapısı Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 2 Hidrofoil yüzeyinde panel boşluğunun tam kosinüs yöntemi (Katz ve Plotkin [33])

Bu durum için dahili (iç) Dirichlet sınır şartı kullanılmıştır ve kollokasyon noktaları geometrinin içinde bulunmalıdır.

Etkime katsayıları: i kollokasyon noktasında hız potansiyelindeki artış, j panelinin birim şiddetli sabit dipol elemanına bağlı olarak ifade edilir. Bu hesaplama, hız sınır şartı

durumundan daha basittir. Aynı zamanda dipol panelinin kendi üzerindeki etkimesi aşağıdaki gibidir:

$$c_{ii} = \frac{1}{2} \quad (3.14)$$

Her kollokasyon noktasındaki dipollerin etkimesinin kararlılığı, NxN etkime matrisini N+1 bilinmeyen ile oluşturacaktır (iz dipolü μ_w (N+1). bilinmeyendir). Eklenen eşitlik Kutta şartı kullanılarak oluşturulmuştur.

$$(\mu_1 - \mu_N) + \mu_w = 0 \quad (3.15)$$

Bu eşitlik, etkime matrisi ile birleştirilirse sonuç olarak dipollerin etkimesi için N+1 adet lineer eşitlik olacaktır.

$$\sum_{i=1}^{N+1} \sum_{j=1}^{N+1} C_{ij} \mu_j = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & \dots & c_{1N} & c_{1W} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & \dots & c_{2N} & c_{2W} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{N1} & c_{N2} & \dots & \dots & c_{NN} & c_{NW} \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \dots \\ \mu_N \\ \mu_w \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

μ_w yerine $\mu_N - \mu_1$ yazılırsa, yukarıda yazılan matris N'e düşürülebilir. İlk satır aşağıdaki formu alır;

$$(c_{11} - c_{1W})\mu_1 + c_{12}\mu_2 + \dots + (c_{1N} + c_{1W})\mu_N \quad (3.17)$$

ve $\pm c_{1W}$ terimine bağlı olarak sadece ilk ve N. kolonlar değişecektir.

Dipol katsayılarının tanımı ile b_{ij} kaynak etkimesinin katsayıları her kollokasyon noktasında $1 \rightarrow N$ belirtilmiştir, matris eşitliği aşağıdaki formu alır:

$$\begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ a_{N1}, a_{N2}, \dots, a_{NN} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \dots \\ \mu_N \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1N} \\ b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{N1}, b_{N2}, \dots, b_{NN} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \dots \\ \sigma_N \end{bmatrix} = 0 \quad (3.18)$$

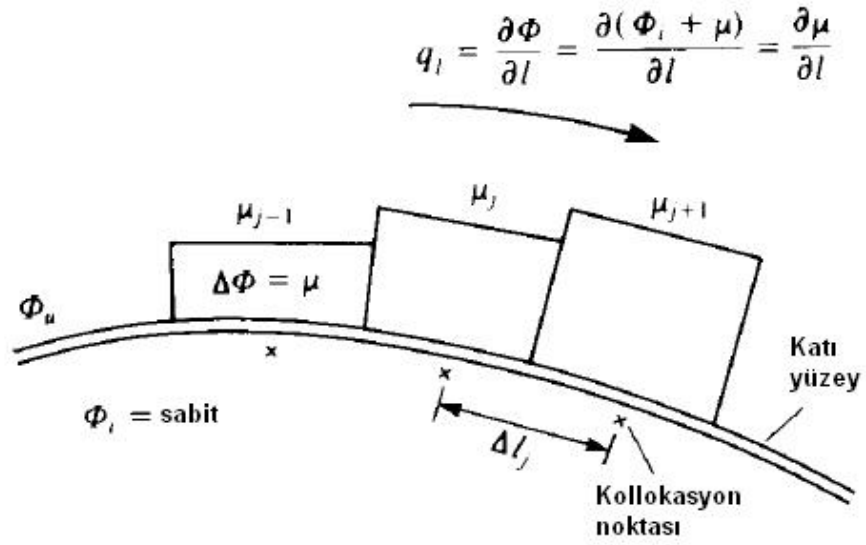
RHS vektörünün oluşturulması: Kollokasyon noktasındaki kaynak şiddetini belirterek, (3.10) eşitliğine göre, ikinci matris çarpma işlemi uygulanabilir. Bundan sonra bilinen kısım eşitliğin sağ tarafına geçer ve RHS vektörü aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{pmatrix} RHS_1 \\ RHS_2 \\ \dots \\ \dots \\ RHS_N \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1N} \\ b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2N} \\ \dots \\ \dots \\ b_{N1}, b_{N2}, \dots, b_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \dots \\ \dots \\ \sigma_N \end{pmatrix} \quad (3.19)$$

Eşitliklerin çözümü: Bu aşamada N eşitlikleri, bilinmeyen μ_k değerlerinin tam matris eşitliklerinin çözülmesiyle hesaplanarak aşağıdaki formu alır:

$$\begin{pmatrix} a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1N} \\ a_{21}, a_{22}, \dots, a_{2N} \\ \dots \\ \dots \\ a_{N1}, a_{N2}, \dots, a_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \\ \dots \\ \dots \\ \mu_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RHS_1 \\ RHS_2 \\ \dots \\ \dots \\ RHS_N \end{pmatrix} \quad (3.20)$$

Basınçların ve yüklerin hesaplanması: Dipollerin şiddeti μ_j bilinmektedir. Yüzeyin dışındaki potansiyel hesaplanabilir. Bu durum şematik olarak Şekil 3.3'te gösterilmektedir. Dahili pertürbasyon potansiyeli Φ_i sabittir (ve sifıra eşittir) ve harici potansiyel Φ_u katı yüzey üzerinde kısmi toplam potansiyel sıçrama μ' 'ye eşittir.



Şekil 3. 3 Kati bir yüzey üzerindeki dipol panelleri (Katz ve Plotkin [33])

$$\Phi_u = \Phi_i + \mu \quad (3.21)$$

Her kollokasyon noktasındaki kısmi harici teğet hız, teğet yönü boyunca farklılaşan hız potansiyeli ile hesaplanabilir:

$$Q_i = \frac{\partial \Phi_u^*}{\partial l} \quad (3.22)$$

l , yüzey boyunca bir çizgidir. Bu formülün en basit sayısal yorumlaması aşağıdaki gibidir.

$$Q_{i,j} = \frac{\mu_{j+1} - \mu_j}{\Delta l_j} + Q_{i\infty} \quad (3.23)$$

Δl_j , Şekil 3.3'te görüleceği üzere iki yakın kollokasyon noktası arasındaki mesafedir. Bu formül, ikinci köşe noktasında j . panelde kesindir ve bu noktada hız da hesaplanabilir.

Basınç katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$C_{p,j} = 1 - \frac{Q_{i,j}^2}{Q_\infty^2} \quad (3.24)$$

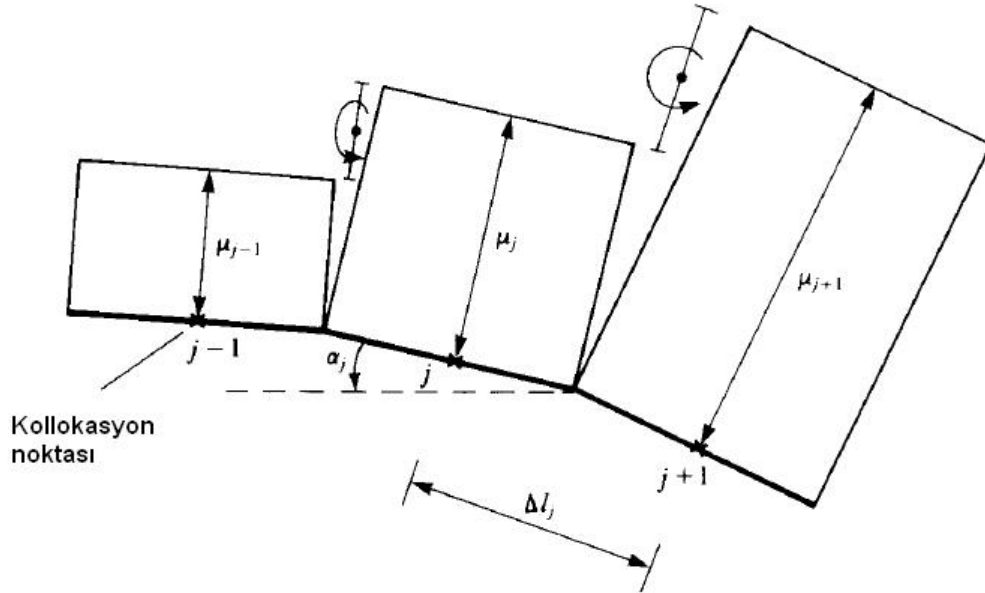
Kaldırma kuvveti katsayısına katılım aşağıdaki gibidir:

$$\Delta C_{l_j} = -C_{p_j} \Delta l_j \cos \alpha_j \quad (3.25)$$

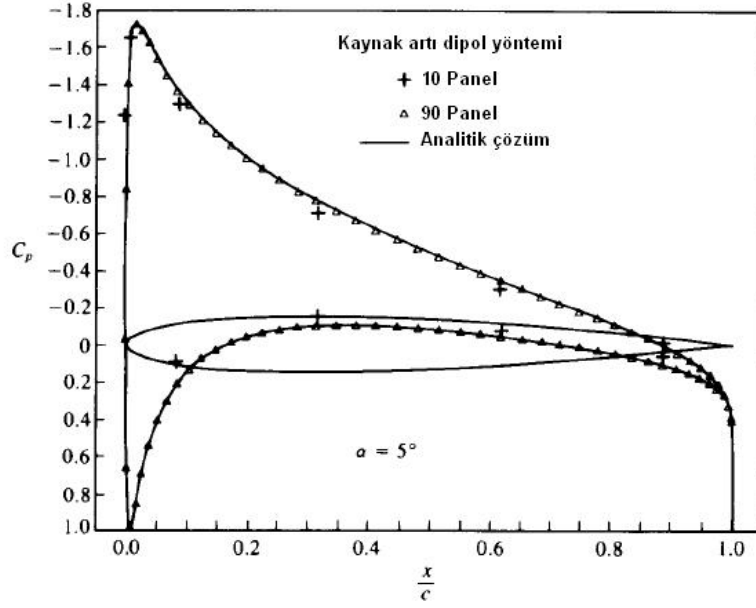
Δl_j , ve α_j Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Toplam kaldırma ve moment aşağıdaki eşitlikler yardımı ile elde edilir:

$$L = \sum_{j=1}^N \Delta L_j \quad (3.26)$$

$$M_0 = \sum_{j=1}^N \Delta L_j (x_j \cos \alpha) \quad (3.27)$$



Şekil 3. 4 Hidrofoil yüzeyi üzerinde sabit şiddetli dipol panellerinin tipik segmenti (Katz ve Plotkin [33])



Şekil 3. 5 10 ve 90 panel kullanılarak simetrik bir kanat üzerinde kiriş hattı boyunca basınç dağılımı (Katz ve Plotkin [33])

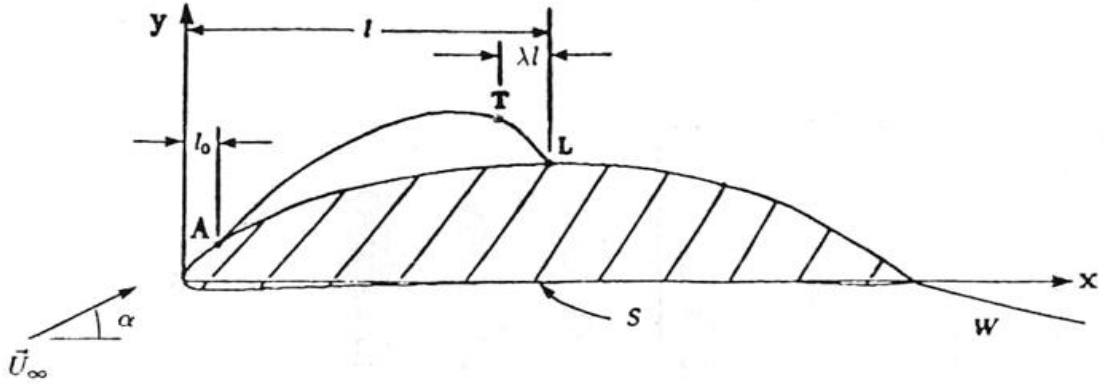
3.4 Sınır Elemanları Yöntemine Dayalı Bilgisayar Programı (PC-PAN)

3.4.1 Giriş

Kavitasyon olayı çok sıklıkla karşılaşılan bir fiziksel olay olup gemi pervaneleri, su pompaları veya yüksek hızlarda çalışan hidrofoillerin hidrodinamik performanslarını önemli derecede etkilemektedir.

Lineer kavitasyon teorisinin temel eksikliklerinden biri, hidrofoil kalınlıkları içindeki değişiklikler ile kavitasyon şeklinin davranışını doğru bir biçimde tahmin etmedeki yetersizliğidir. Bu, özellikle daire burunlu hidrofoillerin kısmi kavitasyon hallerinde doğru olup, ilk olarak Tulin ve Hsu [34] ve daha sonra Uhlman [35] tarafından keşfedilmiştir. Bu araştırmalar ilk olarak, tamamen kavitasyonlu lineer olmayan çözüm üzerinde doğrusal kısa bir kavitasyon şeklinin belirlenmesi için iteratif bir plan ile lineer olmayan sınır eleman yöntemi ile uygulanmıştır. Hesaplama için bir yöntem lineer kavitasyon teorisine girmeden, lineer olmayan giriş ucu etkileri için Kinnsas [36] tarafından geliştirilmiştir.

3.4.2 Formülasyon



Şekil 3. 6 Kısmi kaviteyonlu hidrofoil (Kinnas ve Fine [32])

Şekil 3.6'da P_c çevre basıncı ile U_∞ uniform akış hızına tabi olan kısmi kaviteyonlu bir hidrofoil dikkate alınmaktadır. Hidrofoilin emme tarafında, A noktasında kaviteyon oluşmakta ve L noktasında son bulmaktadır. Kaviteyon yüzeyinde basınç, A ve T noktaları arasında sabit ve P_c basıncına eşittir. T ve L noktaları arasındaki geçiş bölgesinde bir kaviteyon sınır modeli düzenlenmelidir. Şekil 3.6'da gösterildiği gibi kaviteyon boyu l , giriş boyunca paralel ölçülmüş kaviteyonun çıkış ucu L ve hidrofoilin giriş ucu arasındaki uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Üst kaviteyon ayrılma noktasının yeri l_0 , yine aynı şekilde A noktası ile hidrofoilin giriş ucundan ölçülen yatay uzaklık olarak tanımlanmaktadır. Aksi belirtilmedikçe tüm boy ölçekleri giriş boyu c ile boyutsuzlaştırılmaktadır.

Akışın sıkıştırılmaz, viskozitesiz ve çevrintisiz olduğu varsayalım. Toplam hız akış alanı \vec{q} , toplam potansiyele Φ veya pertürbasyon potansiyel ϕ 'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi açıklanabilir.

$$\vec{q} = \nabla\Phi = \vec{U}_\infty + \nabla\phi \quad (3.28)$$

Toplam potansiyel (Φ) ve pertürbasyon potansiyel (ϕ) arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı mevcuttur.

$$\phi(x, y) = \Phi(x, y) - \Phi_{in}(x, y) \quad (3.29)$$

Burada, akış hız potansiyeli Φ_{in} , bir α hücum açısında U_∞ büyüklüğünde üniform bir akışa tekabül eder.

$$\Phi_{in}(x, y) = U_\infty (x \cos \alpha + y \sin \alpha) \quad (3.30)$$

Pertürbasyon potansiyel ϕ , hidrofoil ve kavitasyon dışındaki bir alanda Laplace denklemini sağlayacaktır.

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3.31)$$

Buna ilaveten, pertürbasyon potansiyel (ϕ)'e aşağıdaki sınır koşulları uygulanır:

1.Kinematik Sınır Koşulu: Akışın, kavitasyon yüzeyi yanında kavitasyon göstermeyen yüzeye de teğet olması gerekmektedir. Şayet, akış alanı içinde kavitasyon yüzeyine veya hidrofoile dik birim vektör \vec{n} ise, kinematik sınır koşulu aşağıda verildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = -\frac{\partial \Phi_{in}}{\partial n} = -\nabla \Phi_{in} \cdot \vec{n} \quad (\text{kavitasyon göstermeyen hidrofoil ve kavitasyon yüzeyinde}) \quad (3.32)$$

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

Basıncın, kavitasyon yüzeyinde A noktasından T noktasına kadar sabit ve P_C basıncına eşit olması gerekmektedir. Kavitasyon sayısı σ aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\sigma = \frac{P_\infty - P_C}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (3.33)$$

Bernoulli denklemleri uygulanarak kavitasyon üzerinde sabit toplam hızın büyüklüğü q_C aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$q_C = U_\infty \sqrt{1 + \sigma} \quad (3.34)$$

olmalıdır.

Dinamik sınır koşulu (3.29) denklemleri kullanılarak, pertürbasyon potansiyele bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial S_c} = q_C - \frac{\partial \Phi_{in}}{\partial S_c} \quad (3.35)$$

Burada S_c kavitasyon ayrılma noktası A'dan itibaren ölçülen kavitasyon yay uzunluğudur. Dinamik sınır koşulunun daha kullanışlı bir biçimi, (3.35) denkleminin integrasyonu ile elde edilir:

$$\phi(S_c) - \phi(0) = q_c S_c - \Phi_{in}(S_c) + \Phi_{in}(0); \quad (\text{kavitasyon yüzeyi üzerinde}) \quad (3.36)$$

3. Kutta Koşulu:

$$\nabla \phi = \text{sonlu}; \quad (\text{Çıkış ucunda}) \quad (3.37)$$

4. Radyasyon Koşulu:

$$\nabla \phi \rightarrow 0 \quad (\text{Sonsuzda}) \quad (3.38)$$

5. Kavitasyon Sınır Modeli ve Kapanma Koşulu:

Bir kavitasyon sınır modeli, mevcut bir geçiş bölgesi için uygulanır (Şekil 3.6'da T ve L arasında). Burada kavitasyon hızı, kavitasyon üzerinde olan sabit değerinden, kavitasyonun akım yönündeki kavitasyon göstermeyen durumdaki hızına denk bir değere ulaşana kadar sürekli olarak değişir. Dinamik sınır koşulu (3.35), geçiş bölgesini de içine alacak şekilde uzatılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{\partial \phi}{\partial S_c} = q_c + (q_L - q_c) f(S_f) - \frac{\partial \Phi_{in}}{\partial S_c} \quad (3.39)$$

$$f(S_f) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \quad S_f < S_T \\ \left[\frac{S_f - S_T}{S_L - S_T} \right]^v \quad S_T \leq S_f \leq S_L \end{array} \right\} \quad (3.40)$$

Burada,

q_L : Kavitasyonun çıkış ucundaki toplam hız.

S_f : Kavitasyonun çıkış ucundan itibaren ölçülen kavitasyonun gerisinde hidrofoilin yay uzunluğu.

S_L : Kavitasyonun çıkış ucuna tekabül eden S_f değerine dayanır.

S_T : Geçiş bölgesinin başlangıç değeri.

Burada,

$$S_T = (1 - \lambda)S_L \quad (3.41)$$

hidrofoilin giriş ucunda başlayan kavitasyon için λ değeri bölgesinden oluşan kavitasyon boyu l değerinin küçük bir parçasıdır. ν ve λ değerleri keyfi olarak seçilir. Denklem (3.39), kavitasyon yüzeyi üzerinde pertürbasyon potansiyeli elde etmek için integre edilebilir:

$$\phi(S_c) - \phi(0) = q_c S_c + (q_L - q_c) \int_0^{S_c} f(S_f) dS_c - \Phi_{in}(S_c) + \Phi_{in}(0) \quad (3.42)$$

Kavitasyon yüzeyi bilinmez ise yeni yay uzunluğu S_c değerine, bir önceki iterasyondan elde edilen yay uzunluğu S ile yaklaşılmalıdır. Öyleyse, dinamik sınır koşulu aşağıdaki gibi olur.

$$\phi(S) - \phi(0) = q_c S + (q_L - q_c) \int_0^S f(S_f) dS - \Phi_{in}(S) + \Phi_{in}(0) \quad (3.43)$$

Bunlara ilaveten, çıkış ucunda kavitasyon yüksekliğinin kaybolduğu varsayılacaktır.

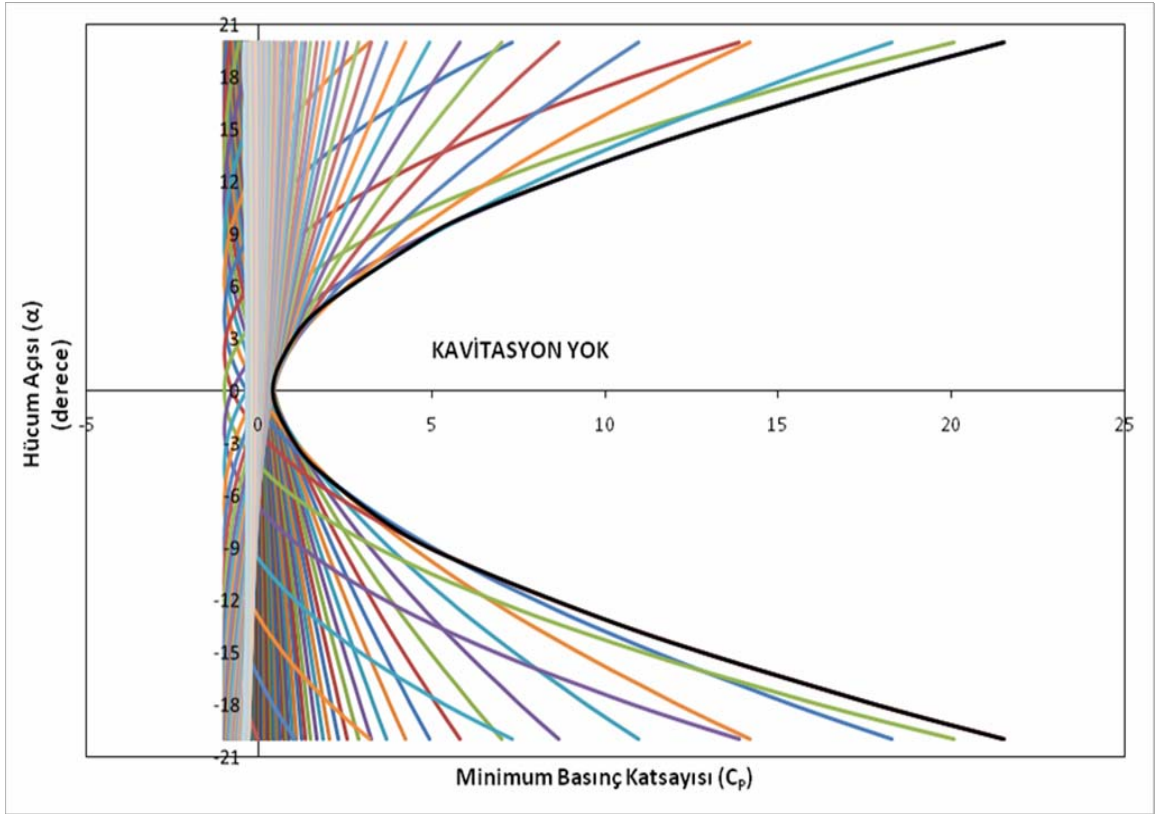
$$h(S_L) = 0 \quad (3.44)$$

SAYISAL BULGULAR VE YORUMLAR

Bu bölümde, farklı NACA kesitleri, bölüm 3’de teorisi anlatılan sınır elemanları yöntemine dayalı bilgisayar programları yardımı ile sayısal olarak analiz edilmiştir. Uygulama için dört değişik hidrofoil durumu göz önüne alınmış ve kavitasyon kovaları oluşturulmuştur.

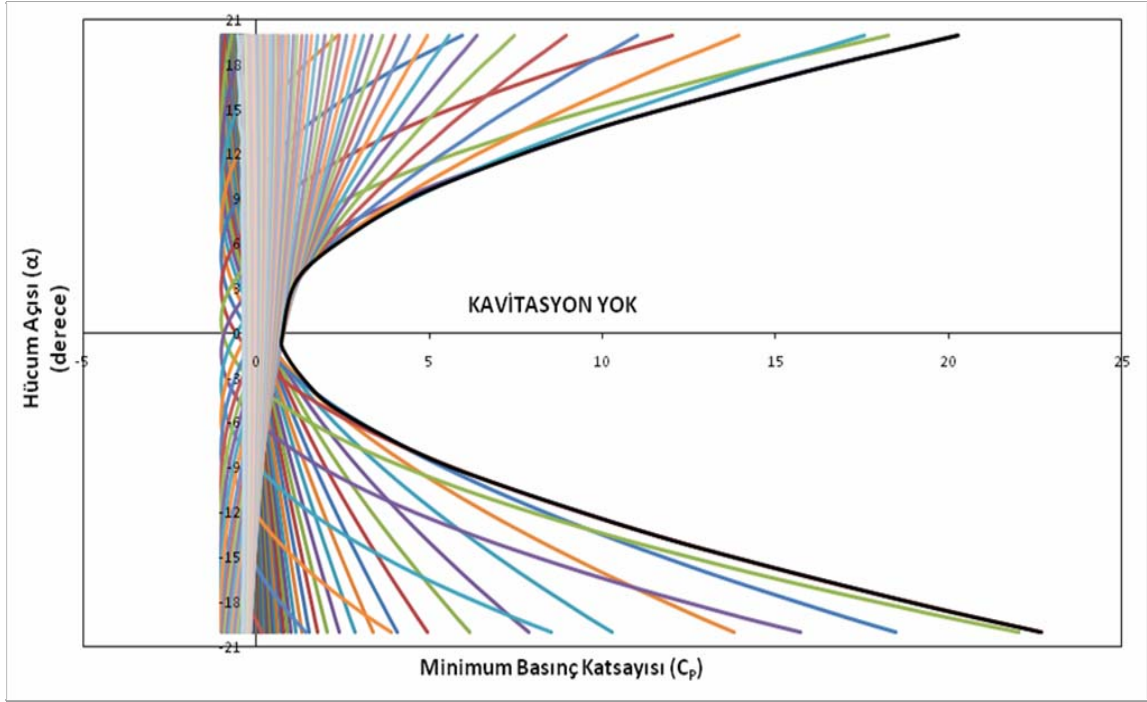
Uygulama 1

Bu uygulamada NACA0012 ve NACA4412 kesitleri ele alınmıştır. Öncelikle NACA0012 ve NACA4412 kesitlerinin dataları elde edilmiştir. Daha sonra bu kesitler FORTRAN’da yazılmış CDSM programı ile -20 ile +20 derece arasında döndürülmüştür. Döndürülen bu kesitler için C_p değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu basınç değerleri ile hücum açıları (C_p - α) bir grafikte karşılaştırılmıştır ve bu grafiklerden elde edilen eğriler ile hidrofoillere ait “kavitasyon kova diyagramları” oluşturulmuştur.



Şekil 4. 1 NACA0012 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı

Şekil 4.1’de NACA0012 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı verilmiştir. Burada, farklı hücum açılarında kesite ait C_p değerleri karşılaştırmalı olarak çizdirilmiştir. Elde edilen grafikte iç bölgede “kova”yı andıran bir şekil ortaya çıkmıştır. İç bölgede oluşturulan bu eğri kesitin kavitasyon davranışı ile ilgili bilgi vermektedir. NACA0012, simetrik kesite sahip olduğundan kova eğrisinin hatları yumuşak görülmektedir. Kavitasyon kovalarının genel özelliği olarak, kesitlerin çalıştığı hücum açılarında eğer basınç katsayısı kovanın içinde kalır ise kesitin kavitasyon göstermediği, dışında kalır ise kesitin kavitasyon gösterdiği bilinmektedir.

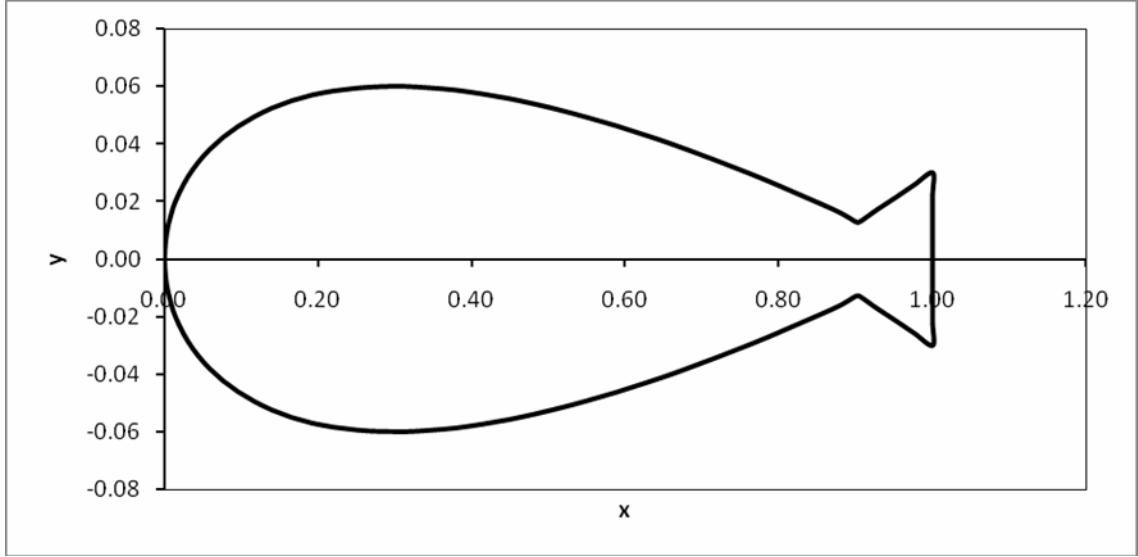


Şekil 4. 2 NACA4412 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı

Şekil 4.2'de ise NACA4412 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere sıfır hücüm açısına doğru eğride keskin hatlar meydana gelmektedir. Bunun nedeni olarak NACA4412 kesitinin simetrik bir kesite sahip olmadığı gösterilebilir.

Uygulama 2

İkinci uygulama olarak NACA0012 kesitinin modifiye edilmesi ile oluşturulan "Balık kuyruklu kesit" ele alınmıştır. Bu kesit, NACA0012 kesitinin çıkış ucundan itibaren giriş boyunun yaklaşık %10'luk kısmında geometride değişiklik yapılarak oluşturulmuştur. Bu kesite ait geometri Şekil 4.3'te, koordinatları ise Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4. 3 Balık kuyruklu kesit

Çizelge 4. 1 Balık kuyruklu kesite ait boyutsuzlaştırılmış geometrik değerler

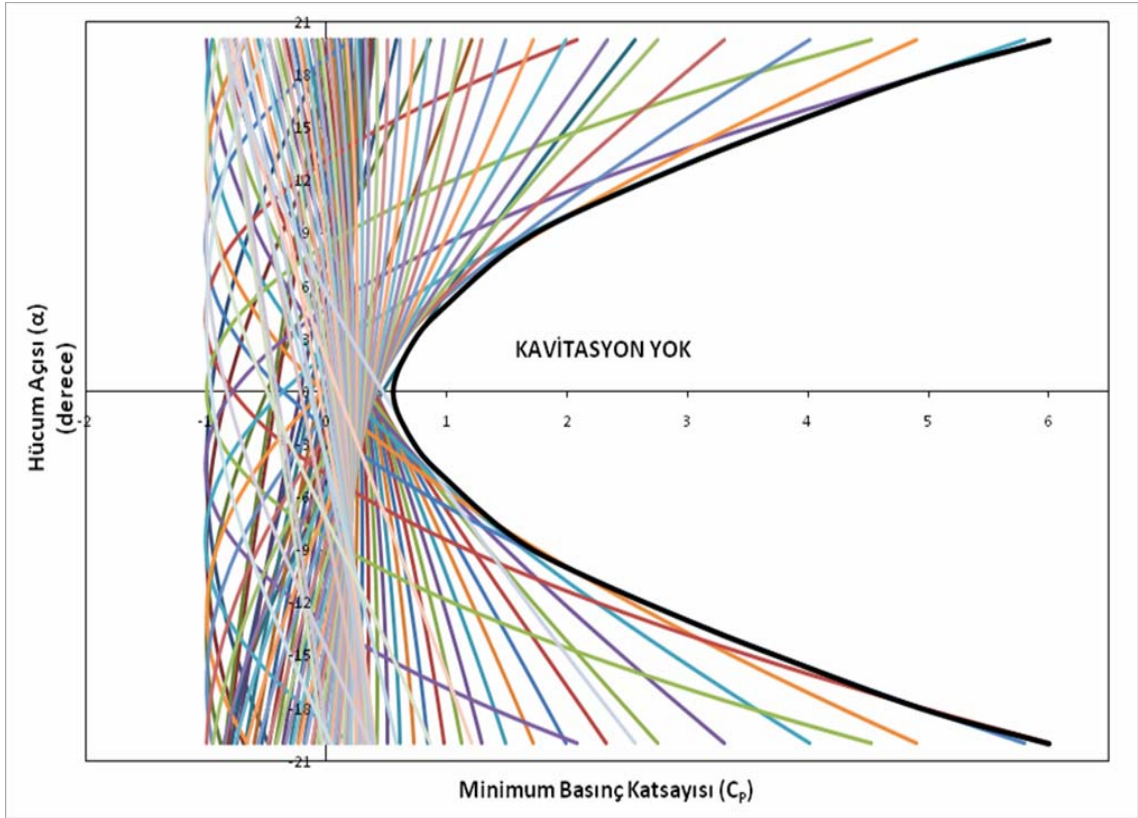
x	y
1.00	0.00
1.00	0.01
1.00	0.02
1.00	0.02
1.00	0.03
0.98	0.03
0.95	0.02
0.93	0.02
0.91	0.01
0.90	0.01
0.88	0.02
0.86	0.02
0.84	0.02
0.81	0.02
0.78	0.03
0.75	0.03
0.72	0.03
0.69	0.04
0.66	0.04
0.62	0.04
0.59	0.05
0.55	0.05
0.52	0.05

x	y
0.00	-0.01
0.00	-0.01
0.01	-0.02
0.02	-0.02
0.03	-0.03
0.04	-0.03
0.06	-0.04
0.08	-0.04
0.10	-0.05
0.12	-0.05
0.14	-0.05
0.17	-0.05
0.19	-0.06
0.22	-0.06
0.25	-0.06
0.28	-0.06
0.31	-0.06
0.35	-0.06
0.38	-0.06
0.41	-0.06
0.45	-0.06
0.48	-0.05
0.52	-0.05

0.48	0.05
0.45	0.06
0.41	0.06
0.38	0.06
0.35	0.06
0.31	0.06
0.28	0.06
0.25	0.06
0.22	0.06
0.19	0.06
0.17	0.05
0.14	0.05
0.12	0.05
0.10	0.05
0.08	0.04
0.06	0.04
0.04	0.03
0.03	0.03
0.02	0.02
0.01	0.02
0.00	0.01
0.00	0.01
0.00	0.00

0.55	-0.05
0.59	-0.05
0.62	-0.04
0.66	-0.04
0.69	-0.04
0.72	-0.03
0.75	-0.03
0.78	-0.03
0.81	-0.02
0.84	-0.02
0.86	-0.02
0.88	-0.02
0.90	-0.01
0.91	-0.01
0.93	-0.02
0.95	-0.02
0.98	-0.03
1.00	-0.03
1.00	-0.02
1.00	-0.02
1.00	-0.01
1.00	0.00

Balık kuyruklu kesite ait C_p değerlerinin elde edilmesinde, birinci uygulamadaki kesitlerin C_p değerlerinin elde edilmesinde kullanılan yol izlenmiştir. Bu kesite ait kavitasyon kova diyagramı Şekil 4.4'te verilmiştir. Balık kuyruklu kesite ait kavitasyon kova diyagramına bakıldığında, diğer kovalara oranla bir genişleme görülmektedir. Kovadaki genişleme kavitasyonun azaldığının bir göstergesidir.

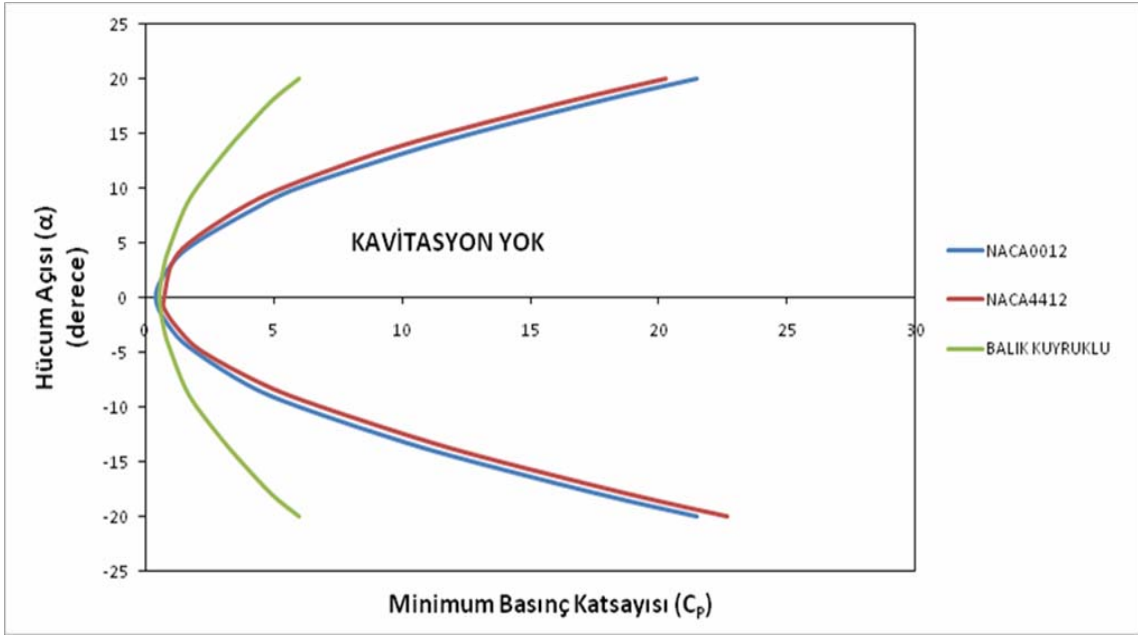


Şekil 4. 4 Balık kuyruklu kesite ait kavitasyon kova diyagramı

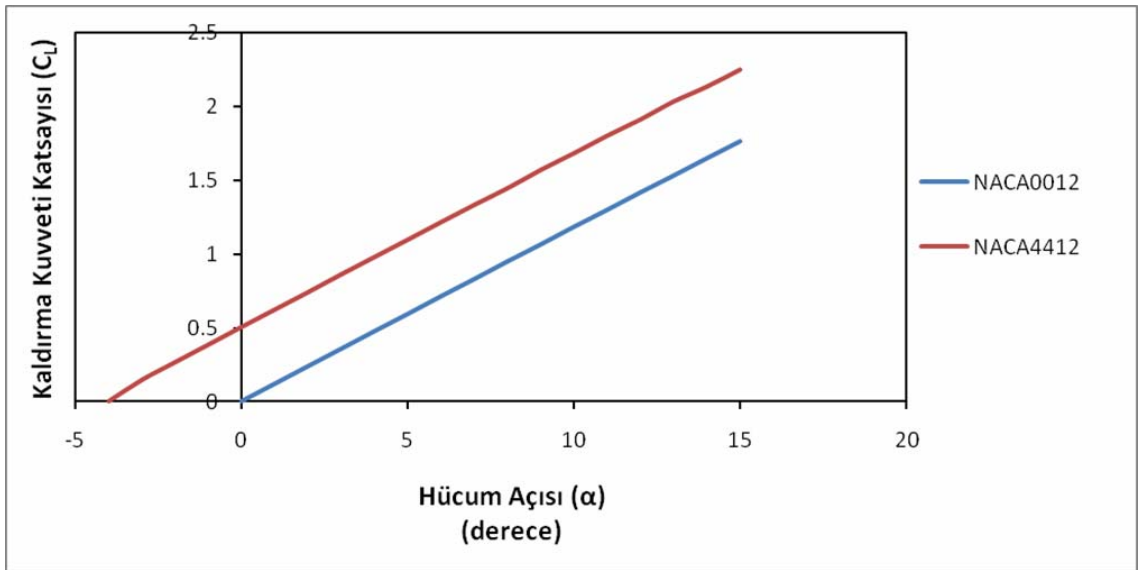
Uygulama 1 ve uygulama 2’de ele alınan üç kesite (NACA0012, NACA4412 ve Balık kuyruklu) ait elde edilen kaldırma katsayıları değerleri Çizelge 4.2’de sunulmaktadır. Söz konusu kesitlere ait kavitasyon kova diyagramları ise Şekil 4.5’te karşılaştırmalı olarak verilmiştir. En yüksek kaldırma kuvveti katsayı değerleri simetrik olmayan NACA4412 kesitinde -4° ile $+15^{\circ}$ hücum açısı aralığında elde edilmiştir. Balık kuyruklu kesitin kavitasyon kovası iyi olmasına rağmen, C_L değerleri diğer iki kesite göre daha düşük elde edilmiştir. Bu nedenle, Şekil 4.6’da sadece NACA0012 ve NACA4412 kesitlerine ait C_L değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Çizelge 4. 2 NACA0012, NACA4412 ve Balık kuyruklu kesitlere ait C_L değerleri

NACA0012		NACA4412		BALIK KUYRUKLU	
α (derece)	C_L	α (derece)	C_L	α (derece)	C_L
0	0	-4	0	0	0
1	0.119	-3	0.145	1	0.0003
2	0.238	-2	0.265	2	0.0006
3	0.357	-1	0.384	3	0.001
4	0.476	0	0.504	4	0.001
5	0.593	1	0.622	5	0.001
6	0.713	2	0.74	6	0.002
7	0.83	3	0.861	7	0.0023
8	0.95	4	0.979	8	0.0027
9	1.065	5	1.096	9	0.003
10	1.185	6	1.215	10	0.0033
11	1.3	7	1.332	11	0.0037
12	1.419	8	1.445	12	0.004
13	1.533	9	1.569	13	0.0043
14	1.651	10	1.682	14	0.0046
15	1.766	11	1.801	15	0.0049
		12	1.911		
		13	2.033		
		14	2.134		
		15	2.249		



Şekil 4. 5 Kesitlere ait kavitasyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği



Şekil 4. 6 NACA0012 ve NACA4412 kesitlerine ait C_L değerleri

Elde edilen bu değerlerin doğrulanması için temeli sınır elemanları yöntemine dayalı PC-PAN programına başvurulmuştur. Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4'te karşılaştırma değerleri olarak kavitasyon boyu, kavitasyon sayısı ve kavitasyon kova eğrilerinden elde edilen C_p sınır değerleri kullanılmıştır.

Çizelge 4. 3 NACA0012 için PC-PAN doğrulaması

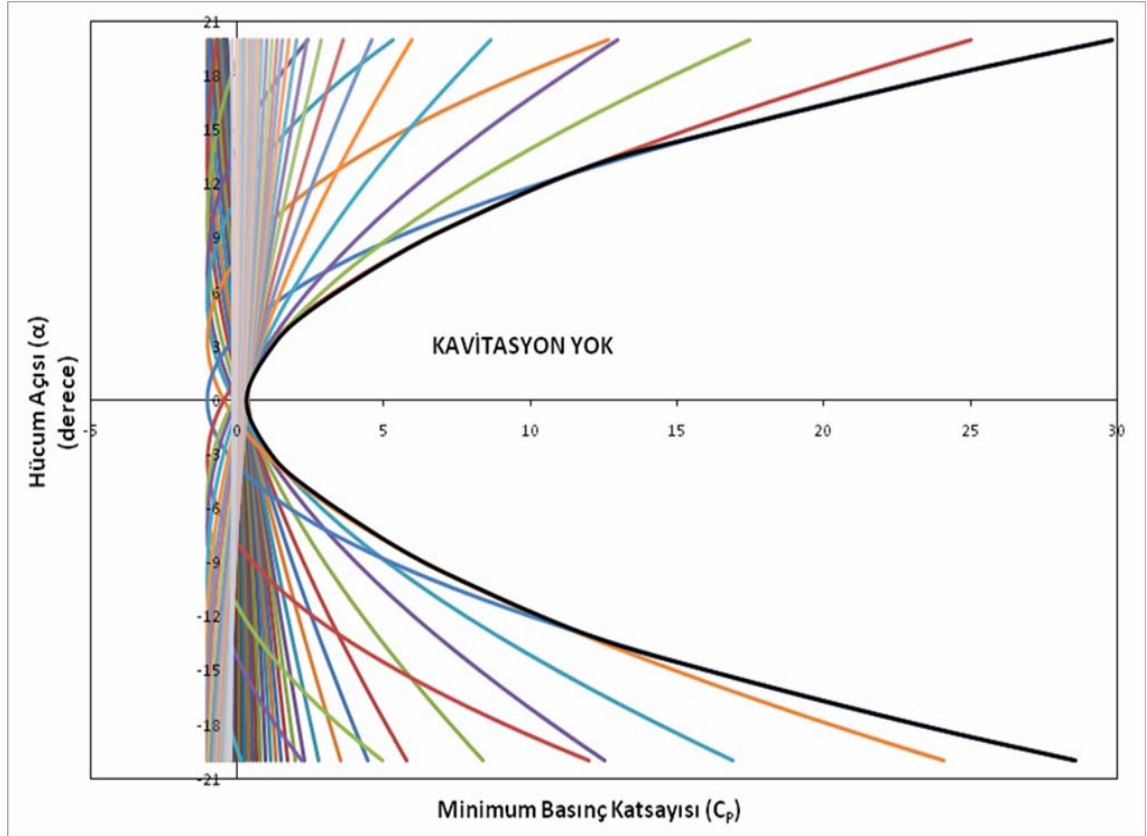
NACA0012			
HÜCUM AÇISI (α)	KAVİTASYON BOYU (l)	KAVİTASYON SAYISI (σ)	C_p (SINIR)
5	0.07	1.30454	1.87
	0.25	1.33882	
	0.3	1.28936	
	0.4	1.20463	
	0.5	1.13599	
10	0.07	3.63417	5.94
	0.25	2.93621	
	0.3	2.7332	
	0.4	2.43777	
	0.5	2.25144	
15	0.07	6.71184	12.76
	0.25	4.41434	
	0.3	4.17628	
	0.4	3.62349	
20	0.25	6.02724	21.54
	0.3	5.38651	
	0.4	4.71246	

Çizelge 4. 4 NACA4412 için PC-PAN doğrulaması

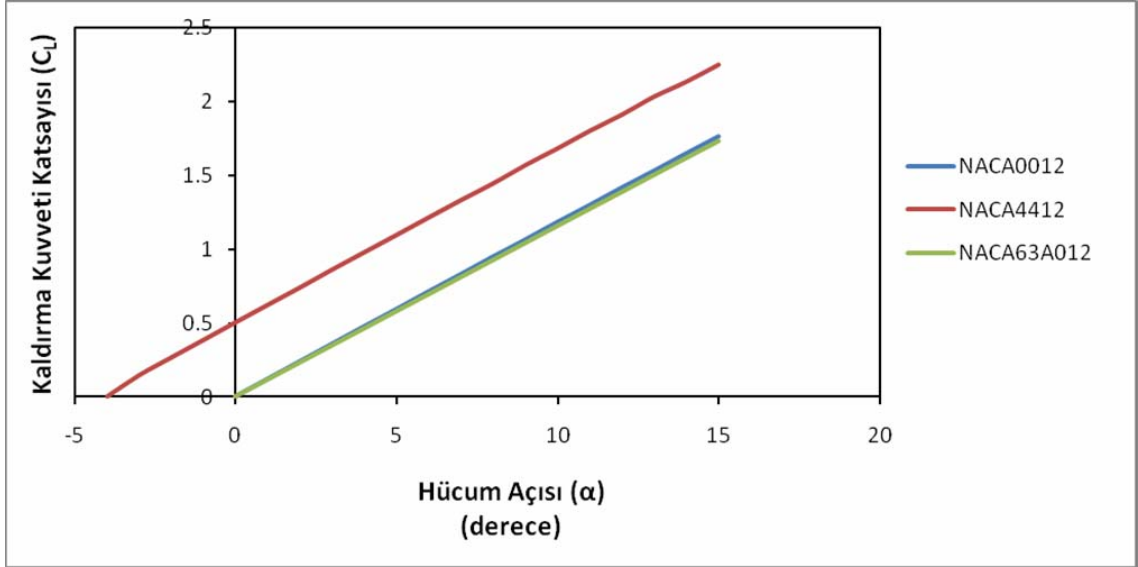
NACA4412			
HÜCUM AÇISI (α)	KAVİTASYON BOYU (l)	KAVİTASYON SAYISI (σ)	C_p (SINIR)
5	0.07	1.05296	1.62
	0.25	1.48655	
	0.3	1.47607	
	0.4	1.44206	
	0.5	1.39887	
10	0.07	-0.54395	5.35
	0.25	3.17017	
	0.3	3.02353	
	0.4	2.77982	
	0.5	2.59386	
15	0.07	-0.96316	11.66
	0.25	4.83209	
	0.3	4.55296	
	0.4	4.1021	
20	0.25	6.43356	20.28
	0.3	5.98045	
	0.4	1.63906	

Uygulama 3

Bu uygulamada NACA63A012 kesiti üzerinde analizler yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir. Bu kesite ait kavitasyon kova diyagramı Şekil 4.7’de verilmiştir. NACA63A012 kesitine ait C_L değerleri, NACA0012 ve NACA4412 kesitlerine ait değerler ile karşılaştırmalı olarak Şekil 4.8’de sunulmuştur. Buradan görüleceği üzere NACA63A012 ve NACA0012 kesitlerinin kaldırma kuvveti katsayısı değerleri birbirine çok yakındır.

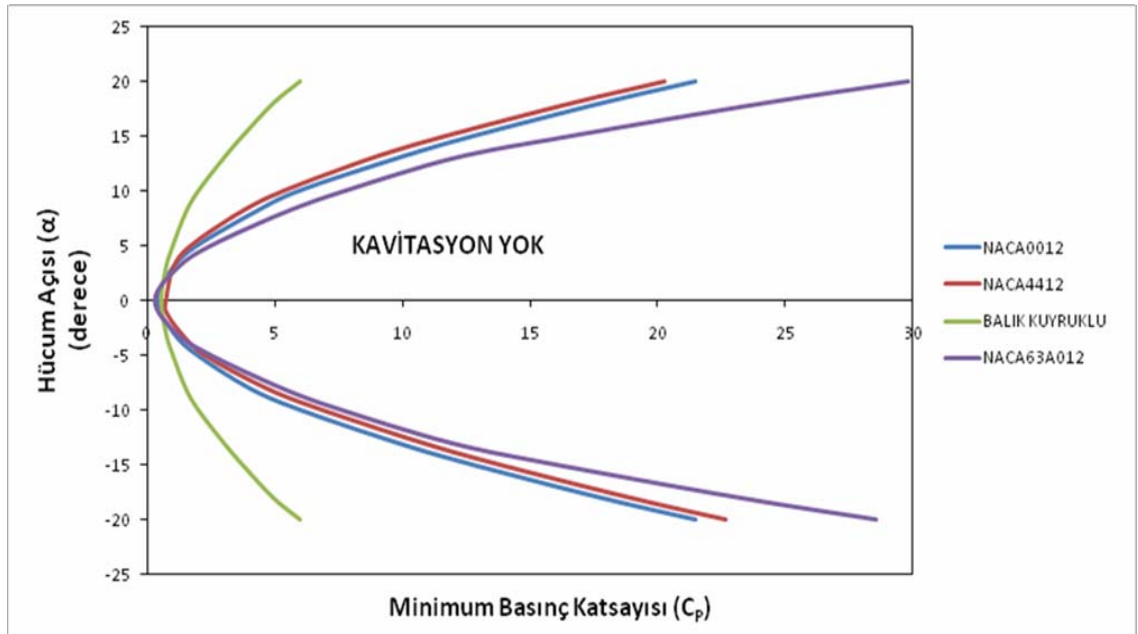


Şekil 4. 7 NACA63A012 kesitine ait kavitasyon kova diyagramı



Şekil 4. 8 NACA0012, NACA4412 ve NACA63A012 kesitlerinin kaldırma kuvveti katsayısı değerlerinin karşılaştırılması

Uygulama 1, uygulama 2 ve uygulama 3'te analizleri yapılan tüm kesitlere ait (NACA0012, NACA4412, Balık kuyruklu, NACA63A012) kavitasyon kova diyagramları Şekil 4.9'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



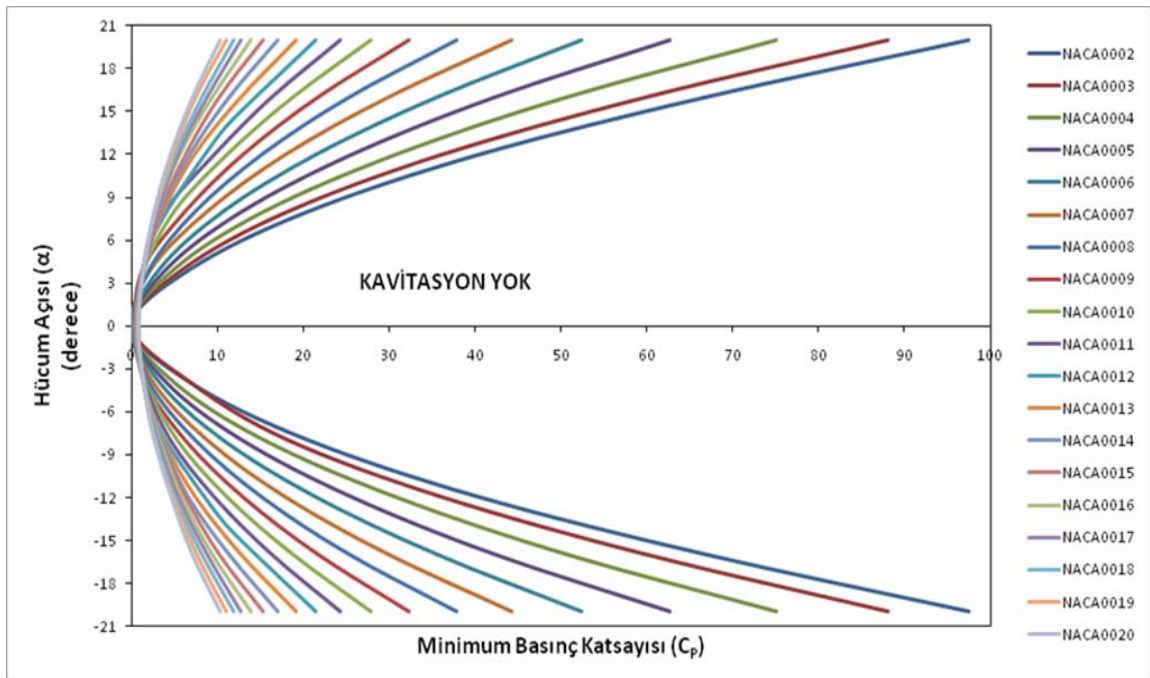
Şekil 4. 9 Kavitasyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği

Buradan görüleceği üzere NACA0012, NACA63A012'ye göre daha kalın bir kesit olduğundan kısmi yerlerde kovada iyileşme meydana gelmektedir. NACA4412 kesiti

simetrik olmayan bir kesit olup, kova eğrisine bakıldığında NACA0012 kesitine ait kova eğrisine göre bazı yerlerde değişimler göstermektedir. Balık kuyruklu kesit ise kova değerleri en iyi olan kesittir. Diğer üç kesitin kavitasyon gösterdiği bölgelerde balık kuyruklu kesitte kavitasyon oluşmamaktadır. NACA0012 kesitinin kış bölgesinde yapılan küçük bir değişim ile elde edilen bu kesit ile kavitasyon kova değerlerinde oldukça iyileşmeler görülmüştür.

Uygulama 4

Bu uygulamada, NACA0002 ile NACA0020 kesitleri arasındaki tüm NACA kesitleri incelenmiş ve bir hidrofoil kesit ailesi oluşturulmuştur. Analiz sonuçlarından elde edilen değerler göz önünde bulundurularak, bu kesitlere ait kavitasyon kova diyagramı Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4. 10 NACA0002-NACA0020 kesitlerinin kavitasyon kovalarının karşılaştırmalı grafiği

Bu şekilden görüleceği gibi, kesit kalınlığı arttıkça kavitasyon kovaları daha da genişlemektedir. Bu durum, kalınlık arttıkça kavitasyonun azalacağını öngörebilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, NACA kesitlerinin kavitasyon kovaları ve kaldırma kuvveti katsayıları sayısal olarak elde edilerek, pervane kesitlerine ait fiziksel özellikler hakkında öngörü yapabilme imkanı sunulmuştur. Elde edilen değerler bir araya getirilerek kesitlere ait kavitasyon bukletlerinin oluşturulması sağlanmıştır. Bu bukletler, hangi kesit ile hangi aralıklarda çalışılması gerektiğini belirtmektedir. NACA0012 kesitinin kavitasyon kovası dar bir eğridir. Kısmi olarak NACA4412'den daha iyidir. Birbirlerine karşı iyi oldukları bölgeler bulunmaktadır. NACA63A012 kesiti ise bu iki kesite göre daha ince olduğundan kova eğrisi en dar kesittir. Balık kuyruklu kesit ise en iyi kova eğrisine sahip kesittir. Çok az bir bölgede kavitasyon göstermektedir. Kuyruk bölgesi üzerinde çalışılarak daha iyi bir performans elde edilebilir. Kaldırma kuvveti katsayısı değerleri ele alındığında en iyi sonucu NACA4412 vermektedir. Çünkü, kesit simetrik değildir ve her zaman için simetrik olmayan kesitlerde daha iyi kaldırma elde edilir. NACA0012 ve NACA63A012 kesitlerinin kaldırma kuvveti katsayısı değerleri birbirlerine çok yakındır. Balık kuyruklu kesitte ise kaldırma kuvveti katsayısı değerleri daha düşüktür. Aynı zamanda hidrofoil kalınlığı arttıkça kavitasyonun azaldığı görülmüştür. Bu durumun, Chau vd. [21], Kinnas [30] ve Kinnas [36] çalışmaları ile uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın devamı olarak, NACA kesitleri üzerinde yapılabilecek geometrik değişimler ile daha verimli ve kavitasyon göstermeyen kesitlerin elde edilebilmesi, bunun yanı sıra kavitasyon kova diyagramlarının yerini alabilecek ampirik formüllerin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Güner, M., Kükner, A. ve Baykal, M.A., (1999). Gemi Pervaneleri Ve Sevk Sistemleri, İTÜ Kütüphanesi, Sayı: 1610.
- [2] Ekinci, S., (2007). Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kaviteasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [3] Brennen, E.C., (1995). Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, New York.
- [4] Dang, J. ve Kuiper, G., (1998). "Re-entrant jet Modelling of Partial Cavity Flow on Two Dimensional Hydrofoils", Proceedings: Third International Symposium on Cavitation, April 7-10, Grenoble, France.
- [5] Brewer, W. ve Kinnas, S.A., (1997). "Experiment and Viscous Flow Analysis on a Partially Cavitating Hydrofoil", Journal of Ship Research, September, 41: 161-171.
- [6] Bal,Ş., Kinnas, S.A. ve Lee, H., (2001). "Numerical Analysis of 2D and 3D Cavitating Hydrofoils Under a Free Surface", Journal of Ship Research, 45 (1): 34-49.
- [7] Krishnaswamy, P., (2000). Flow Modelling for Partially Cavitating Hydrofoils, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, October.
- [8] Lee, H. ve Kinnas, S.A., (2002). "Application of BEM in Unsteady Blade Sheet and Developed Tip Vortex Cavitation Prediction on Marine Propellers", IABEM2002 Symposium of the International Association for Boundary Element Methods, May 28-30, Austin, TX.
- [9] Kinnas, S.A., Sun, H. ve Lee, H., (2003). "Numerical Analysis of Flow Around the Cavitating CAV2003 Hydrofoil", 1-4 November, Osaka, Japan, 1-4.
- [10] Wang, G.Q. ve Yang, C.J., (2001). "Design of Cavitating Propellers by Lifting Surface Theory", PRADS 2001, Shanghai, China.
- [11] Dacles-Mariani, Rogers, S.E., Kwak, D., Zilliac, G. ve Chow, J., (1993). "A Computational Study of Wingtip Vortex Flow Field", AIAA 93-3010.

- [12] Bal, Ş., (1999). "A Panel Method for the Potential Flow Around 2-D Hydrofoils", Tr. J. Of Engineering and Environmental Science, TÜBİTAK, 23: 349-361.
- [13] Berntsen, G.S., Kjeldsen, M. ve Arndt, R.E.A., (2001). "Numerical Modeling of Sheet and Tip Vortex Cavitation with FLUENT 5", CAV2001, Session B5.006.
- [14] Chen, J.H. ve Wu, P.C., (2009). "A Computational Study Of Two-Dimensional Viscous Cavitating Hydrofoil Flow Near A Free", Flucome 2009, 10th International Conference on Fluid Control, Measurements, and Visualization, August 17-21, Moscow, Russia.
- [15] Pavlova, N.A. ve Terent'ev, A.G., (2010). "Computer Simulation of Flow past Arbitrary Hydrofoils with Partial Cavitation", Fluid Dynamics, 45 (3): 369-377.
- [16] Pascarella, C. ve Salvatore, V., (2001). "Numerical Study Of Unsteady Cavitation On A Hydrofoil Section Using Barotropic Model", CAV2001, Session B2.005.
- [17] Kinnas, S.A., (2001). "Supercavitating 2-D Hydrofoils: Prediction Of Performance And Design", Supercavitating Flows-RTO AVT Lecture Series, 12-16 February, Brussels, Belgium.
- [18] Yamaguchi, H., Kato, H., Maeda, M. ve Toyoda, M., (1999). "High Performance Foil Sections With Delayed Cavitation Inception", 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, July 18-22, San Francisco, California.
- [19] Pearce, B.W. ve Brandner, P.A., (2007). "Limitations on 2D Super-cavitating Hydrofoil Performance", 16th Australasian Fluid Mechanics Conference Crown Plaza, 2-7 December, Gold Coast, Australia.
- [20] Gustavsson, J.P.R., Denning, K.C. ve Segal, C., (2008). "Hydrofoil Cavitation Under Strong Thermodynamic Effect", Journal of Fluids Engineering, September, 130: 091303-1.
- [21] Chau, S.W., Hsu, K.L., Kouh, J.S. ve Chen, Y.J., (2004). "Investigation of cavitation inception characteristics of hydrofoil sections via a viscous approach", Journal of Marine Science and Technology, SNAJ 2004.
- [22] Cure, A., Huuva, T., Bark, G. ve Nilsson, H., (2007). "Computations Of Unsteady Cavitating Flow On Wing Profiles Using A Volume Fraction Method And Mass Transfer Models", 2nd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October 24-26, Timisoara, Romania.
- [23] Kunz, R., Boger, F., Stinebring, D.R., Chyczewski, T.S., Lindau, J.W., Gibeling, H.J., Venkateswaran, S. ve Govindan, T.R., (2000). "A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction", Computers and Fluids 29(8), 849-875.
- [24] Sauer, J. (2000). "Instationar kaviterende Strömung – Ein neues Modell, basierend auf Front Capturing (VoF) und Blasendynamik.", Fakultät für Maschinenbau Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Doktors der Ingenieurwissenschaften.

- [25] Bal, Ş., (2007). "A numerical method for the prediction of wave pattern of surface piercing cavitating hydrofoils", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 221.
- [26] Hess, J.L. ve Smith, M.O., (1966). "Calculation of Potential Flow about Arbitrary Bodies", Progress in Aeronautical Science, 8: 1-138.
- [27] Hess, J.L. ve Valarezo, W.O., (1985). "Calculation of Steady Flow about Propellers by Means of a Surface Panel Method. AIAA, No.85.
- [28] Hoshino, T., (1989). "Hydrodynamic Analysis of Propellers in Steady Flow Using a Surface Panel Method", Trans.Soc.Arch of Japan.
- [29] Carlton, J.S., (1994). Marine Propellers & Propulsion, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, UK.
- [30] Kinnas, S.A., (1990). "Fundamentals of Cavity Flows", Supplement to the Notes on the Theory of Hydrofoils and Propellers, Department of Ocean Engineering, Massachusetts Institute of Technology, MIT Course 13.04, USA.
- [31] Szantyr, J.A.,(1994). "A Method for Analysis of Cavitating Marine Propellers in Non-Uniform Flow", International Shipbuilding Progress, 41 (427): 223-242.
- [32] Kinnas, S.A. ve Fine, N., (1990). " Non-Linear Analysis of Flow Around Partially or Super-Cavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel Method", Proceeding the IABEM-90 Symposium, University of Rome, October 15-19, Italy.
- [33] Katz, J. ve Plotkin, A., (1991). Low-Speed Aerodynamics (From Wing Theory to Panel Methods), McGraw-Hill, Singapore.
- [34] Tulin, M.P. ve Hsu, C.C., (1980). "New Applications of Cavity Flow Theory", In 13th Symposium on Naval Hydrodynamics, Tokyo, Japan.
- [35] Uhlman, J., (1987). "The Surface Singularity Method Applied to Partially Cavitating Hydrofoils", Journal of Ship Research, June, 31 (2): 107-124.
- [36] Kinnas, S.A., (1991). "Leading Edge Corrections To The Linear Theory of Partially Cavitating Hydrofoils", Journal of Ship Research.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Serdar SEBER
Doğum Tarihi ve Yeri : 11.08.1986 / Fatih
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : serdarseber@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Gemi İnşaat	Y.T.Ü	2009
Lise	Gemi İnşaat	P.A.D.M.L	2004

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2006-	Endaze Mühendislik	Donatım Mühendisi