

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GEMİ PERVANE YÜZEYİNDE TABAKA
KAVİTASYONUNUN SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

Gemi İnşaatı Yük. Müh. Serkan EKİNCİ

FBE Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalında Hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 28 Şubat 2007
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mesut GÜNER (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet Dursun ALKAN (YTÜ)
: Doç. Dr. Tamer YILMAZ (YTÜ)
: Prof. Dr. Abdi KÜKNER (İTÜ)
: Doç. Dr. Şakir BAL (İTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ÖNSÖZ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAVİTASYON İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	3
3. KAVİTASYON	29
3.1 KAVİTASYON ÇEŞİTLERİ	30
3.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştığı Konuma Göre Kavite Çeşitleri	30
3.1.1.1 Sırt Kaviteasyonu	30
3.1.1.2 Yüz Kaviteasyonu	31
3.1.2 Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavite Çeşitleri	31
3.1.2.1 Uç (Tip) ve Göbek (Hub) Girdap (Vortex) Kaviteasyonu	31
3.1.2.2 Kabarcık (Bubble) Kaviteasyonu	33
3.1.2.3 Tabaka (Sheet) Kaviteasyonu	34
3.1.2.4 Bulut (Cloud) Kaviteasyonu	35
3.1.2.5 Kök (Root) Kaviteasyonu	36
3.1.2.6 Pervane-Tekne Girdap Kaviteasyonu (PHV)	37
3.2 KAVİTASYON ETKİLERİ	38
3.2.1 Performans Kaybı (İtme Azalması)	38
3.2.2 Gürültü	38
3.2.3 Titreşim	39
3.2.4 Erozyon	40
3.3 KAVİTASYON BAŞLANGICI	41
4. DÜZENSİZ AKIM ALANINDA ÇALIŞAN PERVANELER İÇİN KALDIRICI YÜZEY METODU	43
4.1 Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli	43
4.2 Pervane Kanadı Kaldırıcı Yüzey Modeli	46
4.2.1 İndüklenmiş Hızların Hesaplanması	49
4.2.2 Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi	51

4.2.2.1	Anahtar Kanat Başlangıç Konumunda iken Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi (İlk Yaklaşım)	51
4.2.2.2	Anahtar Kanadın Herhangi Bir Konumunda Pervane Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi	52
4.2.3	Değişken Bölgede Serbest Girdapların Yenilenmesi	53
4.2.4	Basınç Dağılımlarının Hesaplanması	54
4.2.5	Pervane Kanadında Tabaka Kavitasyonunun Tespiti ve Analizi	56
4.2.6	Tabaka Kavitasyonu Kaynaklı Sualtı Gürültü Tahmini	63
4.2.7	Pervane Üzerindeki Kuvvet ve Moment Bileşenlerinin Hesaplanması.....	65
5.	SAYISAL UYGULAMALAR	69
6.	SONUÇLAR.....	91
	KAYNAKLAR.....	93
	ÖZGEÇMİŞ.....	104

SİMGE LİSTESİ

A_c	Pervane kanadında oluşan tabaka kavitasyonunun süpürme (swept) alanı
A_d	Pervane disk alanı
$\overline{B}_p$	Bağlı girdap elemanı
C	Kontrol noktası
C_D	Kesit direnç katsayısı
C_{LI}	İdeal kesit kaldırma katsayısı (viskozitesiz)
C_{LV}	Viskoz kesit kaldırma katsayısı
C_P	Basınç katsayısı
D	Pervane çapı
F	Kuvvet
F_n	Devire bağlı Froude sayısı
f	Frekans
g	Yerçekimi ivmesi
h	Kontrol noktasının derinliği
J	İlerleme katsayısı
J_s	Gemi hızına bağlı ilerleme katsayısı
K_t	Boyutsuz itme katsayısı
$\vec{L}$	Girdap elemanının uzunluk vektörü
K_q	Boyutsuz tork katsayısı
L_s	Gürültü düzeyi
M	Moment
n	Pervane devir sayısı
$\vec{n}$	Yüzeye dik birim vektör
p_a	Atmosferik basınç
p_c	Kritik buhar basıncı
P_D	Pervaneye iletilen güç
P_v	Suyun buharlaşma basıncı
Q_{cv}	Kavitasyonun dinamik davranışını temsil eden tek bir kaynağın yoğunluğu
Q_{pc}	Kanat kalınlığını temsil eden kaynak
q_p	Pervane kanat kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı

q_{pc}	Pervane kanadı üzerindeki tabaka kavitasyonu kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı
$ \vec{R} $	Girdap veya kaynak elemanı ile kontrol noktası arasındaki uzaklık vektörünün büyüklüğü
R_l	Kavitasyon tabakasına ait yüzeyin yerel eğrilik yarıçapı
R_n	Tabaka kavitasyonunu başlatacak kavitasyon çekirdeğinin yarıçapı
r_i	Kaynaktan kontrol noktasına olan uzaklık
r_p	Alan elemanı dS ile hesap yapılacak nokta arasındaki uzaklık
r/R	Boyutsuz yarıçap
S	Suyun yüzey gerilimi
S_{BF}	Katı sınır faktörü
S_p	Pervane kanatlarının alanı
S_{ps}	Pervane serbest girdap sisteminin sürekli bölgesinin alanı
S_{pv}	Pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesinin alanı
T_c	Düzeltilmiş kavitasyon kalınlığı
T_j	j. kanat pozisyonundaki kavitasyon kalınlığı
$\bar{T}_p$	Takip eden girdap elemanı
t	Zaman parametresi
$\vec{t}$	Yüzeye teğet birim vektör
V_A	Pervane ilerleme hızı
V_{DF}	Kavitasyon yüzeyinin deformasyon hızı
V_{IN}	Kaynak elemanına gelen ortalama akım hızı (pervane dönmesi dahil)
V_{kaynak}	Kaynak elemanına gelen akım hızı
$\vec{V}_Q$	Kaynak elemanı tarafından indüklenen hız
$\vec{V}_\Gamma$	Girdap elemanı tarafından indüklenen hız
V_s	Gemi ilerleme hızı (dizayn hızı)
$\bar{W}_p$	Radyal girdap elemanı
w	İz katsayısı
x/c	Boyutsuz kort oranı
Z	Kanat sayısı

α	Hücum açısı
α_o	Sıfır kaldırma kuvveti açısı (viskozitesiz kaldırma kuvveti açısı)
α_{ov}	Viskoz kesit kaldırma açısı
$\vec{\gamma}_p$	Pervane kanatları üzerindeki girdap dağılımı
$\vec{\gamma}_{ps}$	Pervane serbest girdap sisteminin sürekli bölgesine ait girdap dağılımı
$\vec{\gamma}_{pv}$	Pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesine ait girdap dağılımı
Γ	Sirkülasyon şiddeti
μ	Suyun dinamik viskozitesi
ρ	Suyun yoğunluğu
η	Pervane verimi
σ	Kavitasyon sayısı
σ_i	Kavitasyon başlangıç sayısı
σ_n	Devire bağlı kavitasyon sayısı
θ	Kanat pozisyon açısı
ΔC_p	Emme ve basınç tarafları arasındaki basınç katsayısı farkı
ΔP	Gemi gövdesi üzerinde indüklenen basıncın dalgalanan kısmı
ΔR	Kanadın üzerindeki kavitasyon tabakasının kort yönündeki şeridinin genişliği
ΔX	$\mathcal{Q}$ kaynağı yerine geçen V_p kanat hacim elemanının boyu
$\vec{\omega}$	Pervane açısal hızı
φ	Anahtar kanat üzerindeki yük dağılımını temsil eden hız potansiyeli
φ_c	Kavitasyonun süreksiz davranışını temsil eden hız potansiyeli
φ_p	Pervane ile ilgili değişik süreksiz etkileri ifade eden hız potansiyeli
φ_{pa}	Pervane pozisyon açısı

KISALTMA LİSTESİ

BEM	Boundary Element Method
CFD	Computational Fluid Dynamics
CP	Conventional Propeller
CPP	Controllable Pitch Propeller
CPU	Central Processing Unit
DTMB	David Taylor Model Basin
EROCAV	Erosion on Ship Propeller and Rudders - The Influence of Cavitation on Material Damages
FEM	Finite Element Method
FORTTRAN	FORmula TRANslating System
GB	Gigabyte
HD	Hard disk
HSP	Highly Skewed Propeller
IBM	International Business Machines Corporation
ICES	International Council for Exploration of the Sea
INSEAN	Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale Italian-Ship Model Basin
ITTC	International Towing Tank Conference
MARIN	Maritime Research Institute Netherlands
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NMRIJ	National Maritime Research Institute of Japan
NSMB	Netherlands Ship Model Basin
PBCF	Propeller Boss Cap Fins
PHV	Propeller Hull Vortex
PUF	Propeller-Unsteady-Forces
RAM	Random Access Memory
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SCP	Supercavitating Propeller
TBP	Thrust-Balanced Propeller
TCP	Trans Cavitating Propeller
VOF	Volume of Fluid

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Parsons'un ilk kavitasyon tüneli	4
Şekil 2.2	Parsons'un 1910 yılında inşa ettiği daha büyük kavitasyon tüneli.....	4
Şekil 2.3	Pervane kanatları, göbek ve takip eden girdap üzerindeki panel düzeni	7
Şekil 2.4	Bir kaldırıcı yüzey metodunda pervane kanadı ve izi üzerinde sınır koşulları için girdap, kaynak ve kontrol noktalarının yerleşimi	15
Şekil 2.5	Kerwin'in kaldırıcı yüzey hesaplama metoduna ait akış diyagramı.....	20
Şekil 3.1	Daralan bir boru içindeki kavitasyon olayı.....	29
Şekil 3.2	Bir kanat kesiti etrafındaki akım ve kavitasyon oluşumu.....	30
Şekil 3.3	Sırt kavitasyonu	31
Şekil 3.4	Yüz kavitasyonu	31
Şekil 3.5	Uç girdap kavitasyonu	32
Şekil 3.6	Göbek girdap kavitasyonu	33
Şekil 3.7	Kabarcık kavitasyonu	33
Şekil 3.8	Bir pervane kanat kesiti üzerindeki tabaka kavitasyonu oluşumu.....	34
Şekil 3.9	Tabaka kavitasyonu	35
Şekil 3.10	Bulut kavitasyonu	36
Şekil 3.11	Kök kavitasyonu	37
Şekil 3.12	PHV kavitasyonu.....	37
Şekil 3.13	Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz durumda oluşan basınç dağılımı	40
Şekil 3.14	Bir pervane kanadında oluşan kavitasyon erozyonu	41
Şekil 4.1	Pervane kanadı kaldırıcı yüzey modeli.....	46
Şekil 4.2	Kaldırıcı yüzey modeline ait koordinat sistemi	48
Şekil 4.3	Bir girdap/kaynak elemanının kontrol noktasında indüklediği hız.....	50
Şekil 4.5	Değişken serbest girdap bölgelerinin yenilenmesi	53
Şekil 4.6	Viskoz etkiler için düzeltme katsayılarının açıklaması	55
Şekil 4.7	Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli	59
Şekil 4.8	Tabaka kavitasyon modeli	62
Şekil 4.9	Brown formülüne göre tabaka kavitasyonunun süpürme alanı	64
Şekil 4.10	Pervane kanadına etkiyen kuvvet ve moment bileşenleri.....	65
Şekil 4.11	Mevcut kaldırıcı yüzey metoduna ait algoritma	68
Şekil 5.1	DTMB 4119 pervanesi	71
Şekil 5.2	DTMB 4119 pervanesi için açık su karakteristikleri.....	72
Şekil 5.3	DTMB 4119 pervanesinin $r / R = 0.3$ kesitindeki basınç dağılımı.....	73

Şekil 5.4	DTMB 4119 pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitindeki basınç dağılımı.....	73
Şekil 5.5	DTMB 4119 pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitindeki basınç dağılımı.....	73
Şekil 5.6	Seiun-maru HSP pervanesi.....	74
Şekil 5.7	Seiun-maru HSP pervanesine ait nominal iz dağılımı.....	76
Şekil 5.8	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	78
Şekil 5.9	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 90^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	79
Şekil 5.10	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	79
Şekil 5.11	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 270^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	80
Şekil 5.12	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	80
Şekil 5.13	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 90^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	81
Şekil 5.14	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	81
Şekil 5.15	Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 270^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	82
Şekil 5.16	Seiun-maru HSP pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R = 0.7$ ve $x/c = 0.1$).....	82
Şekil 5.17	Seiun-maru HSP pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R = 0.7$ ve $x/c = 0.4$)	83
Şekil 5.18	Seiun-maru HSP pervanesinin değişik kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen basınç dağılımları	85
Şekil 5.19	Seiun-maru HSP pervanesinin kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen tabaka kaviteasyon bölgeleri.....	86
Şekil 5.20	DTMB 4148 pervanesine ait tabaka kaviteasyon bölgeleri.....	88
Şekil 5.21	DTMB4148 pervanesine ait tabaka kaviteasyon alanı değişimi	89
Şekil 5.22	DTMB4148 pervanesine ait tabaka kaviteasyonu hacim değişimi	89
Şekil 5.23	DTMB 4148 pervanesine ait tabaka kaviteasyonu kaynaklı gürültü düzeyinin karşılaştırmalı olarak gösterimi	90

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 5.1	DTMB 4119 pervanesine ait kanat geometrisi	72
Çizelge 5.2	DTMB 4119 pervanesine ait karakteristikler.....	72
Çizelge 5.3	Seiun-maru HSP pervanesine ait kanat geometrisi.....	75
Çizelge 5.4	Seiun-maru HSP pervanesine ait karakteristikler	75
Çizelge 5.5	Seiun-maru HSP pervanesine ait eksenel boyutsuz hız dağılımı.....	76
Çizelge 5.6	Seiun-maru HSP pervanesine ait teğetsel boyutsuz hız dağılımı.....	77
Çizelge 5.7	Seiun-maru HSP pervanesine ait radyal boyutsuz hız dağılımı.....	77
Çizelge 5.8	Seiun-maru HSP pervanesinin test koşulunda elde edilen pervane karakteristiklerinin karşılaştırılması.....	83
Çizelge 5.9	DTMB 4148 pervanesine ait geometri.....	87
Çizelge 5.10	DTMB 4148 pervanesine ait test koşulları ve karakteristikler	87

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sırasında bana her türlü yardımı esirgemeyen değerli hocam Prof.Dr.Mesut GÜNER'e , Yrd.Doç.Dr. Fahri ÇELİK'e ve bu tezin oluşması sırasında bana en büyük manevi desteği veren sevgili eşime ve biricik oğluma teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Gemi pervanelerinde görülen kavitasyon, pervanelerin hidrodinamik performansına ve çalışma ömrüne etki eden, gemi bünyesinde titreşimlere ve su altında gürültüye neden olan bir fiziksel olgudur. Pervane dizaynı sırasında kavitasyonun pervaneye ve çevreye olan olumsuz etkilerini en aza indirmek büyük önem taşımaktadır. Bu olgunun, deneysel olarak incelenmesi hem pahalı hem de zaman gerektirmektedir. Bu nedenle, kavitasyonun ne zaman ortaya çıkabileceğinin pervane imalatı öncesi belirlenmesi gerekmektedir. Bunun yapılabilmesi maliyet ve zaman gerektiren deneysel yöntemlerle mümkün olmasına rağmen, aynı hassasiyet düzeyinde nümerik yöntemlerin tercih edilmesi pervane tasarımcısına birçok avantaj sağlayabilmektedir. Bu dikkate alınarak, pervane ve kavitasyon analizi için bilgisayar teknolojisinin de gelişimine bağlı olarak kaldırıcı yüzey metodu, panel metodu ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği metodu gibi çeşitli sayısal modelleme teknikleri geliştirilmiştir.

Mevcut çalışmada, sözü edilen metotlardan kaldırıcı yüzey metoduna dayalı bir pervane analiz metodu, tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü hesabını da içerecek şekilde geliştirilmiştir. Uygulama olarak, ikisi model pervane biri tam ölçekte olmak üzere üç adet pervane seçilmiştir. Mevcut metot ile elde edilen sonuçlar, deneysel sonuçlar ve diğer sayısal yöntemler ile karşılaştırılmıştır.

Geliştirilen analiz metodu ile kolay, hızlı ve güvenilir bir şekilde pervanenin imalat öncesi kavitasyon ve performans analizi ile kavitasyon kaynaklı gürültü düzeyi hesabı yapabilme imkanı sağlanarak maliyet ve zaman tasarrufu gerçekleştirilebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Kavitasyon, tabaka kavitasyonu, kaldırıcı yüzey metodu, gürültü düzeyi.

ABSTRACT

Cavitation in ship propellers is a fluid physical phenomenon which affects the hydrodynamics performance and life span of propellers and causes underwater noise and vibration on hull. Surface investigation of cavitation by experiment techniques requires high cost and time. Therefore, it is important to reduce the cavitation's effects to environment and propeller during design stage of propeller. Therefore it is necessary to determine the cavitation before manufacture. It is possible to check the cavitation by experiment, but it needs much time and cost, but the preference of numerical methods with high accuracy level can supply many advantages to designer. Within this context, some numerical methods such as lifting surface methods, panel methods and computational fluid dynamics methods are developed as the computer technology increases.

In the present study, a propeller analysis method based on lifting surface method has been developed including noise calculation due to sheet cavitation. For application of the method, three propellers have been selected. Two of them are model propeller, the other one is full scale. The results obtained by the present method have been compared with those of experimental and other numerical methods.

It can be concluded that the present method provides easy, fast and reliable solution for cavitation and noise analysis with low cost and time before propeller design.

Keywords: Cavitation, sheet cavitation, lifting surface method, noise level.

1. GİRİŞ

Gemi arkasında çalışan pervanenin, çalıştığı bölgede akım alanının belirgin bir biçimde düzensiz olması, shaft kuvvetlerinde dalgalanmalara ve pervane tarafından indüklenen basınç alanındaki benzer dalgalanmalara neden olmaktadır. Aynı zamanda, pervane tarafından indüklenen basınç değişimleri, kanatların üzerinde oluşması muhtemel daimi olmayan tabaka kavitasyonu ile ilave olarak büyümektedir. Bu etkenlerden her ikisi de, gemi bünyesinde istenmeyen yüksek seviyede titreşime ve gürültüye neden olmaktadır. Oluşan titreşimler ise etki sırasına göre; gemi gövdesinin yapısına, gemide yer alan önemli elektronik sistemlerin zarar görmesine ve son olarak da mürettebat /yolcuların dayanılmaz şekilde rahatsızlığına neden olmaktadır. Bu nedenle, pervane tasarımcılarının pervane dizayn işleminin başlangıcında kavitasyonu ve kavitasyon kaynaklı olayları kontrol altında tutmak ve analiz etmek için bir metoda sahip olma gereksinimi önemli olmaktadır.

Pervane tarafından indüklenen basınç darbelerinin oluşma nedenleri; pervane kanatlarının değişken hidrodinamik yükü, kanatların kalınlığı ve tabaka kavitasyonunun süresiz davranışdır. Kavitasyonun bu daimi olmayan hareketi çoğu durumlarda baskın bir faktördür ve bu nedenle doğru analiz edilmelidir.

Sözü edilen bu olayların kavitasyon tünellerinde deneysel olarak incelenmesinin yanında analiz için çok sayıda teorik yöntem mevcuttur. Ancak, deneysel yöntemler pahalı ve zaman almakta, ayrıca bu yöntemler ile optimizasyon da yapılamamaktadır. Analiz için, sayısal yöntemlerin uygulanması, yalnız, pervane dizaynının son kontrolü için deneysel yöntemin yerine geçebilmektedir. Uygulanan sayısal yöntemlerde ise ortak bir görev icra edilmelidir: “verilen bir pervane geometrisi, kanatlar üzerindeki zamana bağlı yük dağılımları ve düzensiz hız alanı için; pervane kanadı üzerinde oluşan kuvvetler, oluşması muhtemel daimi olmayan tabaka kavitasyonu ve tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü hesabı gerçekleştirilmelidir.”

Bu çalışmada, yukarıda, anlatılan amaçlar doğrultusunda Bölüm 2’de, gemi pervanelerinde görülen kavitasyon üzerine yapılan birçok deneysel ve teorik çalışmalar hakkında geniş bir bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’de, pervane kanadı üzerinde olduğu konuma ve fiziksel görünüşüne göre kavitasyon çeşitleri, performans kaybı, gürültü, titreşim ve erozyon gibi oluşumlara neden olan kavitasyon etkileri ve kavitasyonun fiziksel anlamı açıklanmaya çalışılmıştır.

Bölüm 4’de ise çalışmanın temelini oluşturan, en genel anlamda sayısal olarak pervane analizine ve tabaka kavitasyonu analizine imkan veren kaldırıcı yüzey metodu ayrıntılı bir

şekilde verilmiştir. Bu metotta, pervaneye ait hidrodinamik yüklerin ve kalınlıkların modellenmeleri ayrı ayrı ele alınarak; pervane üzerindeki hidrodinamik yükler, kesit sehim hatlarının oluşturduğu yüzeylere yayılan girdap dağılımlarıyla, kesit kalınlıkları da aynı yüzeylere yayılan kaynak dağılımlarıyla modellenir. Yüzeylerde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu da kaynak dağılımlarıyla modellenerek, kaldırıcı yüzey geometrisindeki deformasyon şeklinde hesaplara katılır. Gemi arkası düzensiz akım etkileri, sadece hidrodinamik yüklerin hesabına dahil edilir. Girdap yüzeylerinin şiddetlerinin değişken olması pervane kanatları üzerindeki hidrodinamik yük değişimlerini ortaya çıkarır. Kesit kalınlıklarının kaynak dağılımlarıyla modellenmesi ise pervaneye gelen çevresel ortalama akıma göre yapılır. Bu şekilde, kalınlık etkileri, hesaplara zamanla değişmeyen sabit düzeltmeler şeklinde yansıtılır.

Bölüm 5’de, uygulama olarak, bir önceki bölümde teorisi verilen kaldırıcı yüzey metodunu uygulamak için üç adet pervane seçilmiştir. Bunlardan birincisi, düzenli akım ortamında çalışan DTMB 4119 model pervanesi, ikincisi düzensiz akım ortamında işletilen yüksek çalıklik (skew) ve eğikliğe (rake) sahip olan Seiun-maru HSP pervanesi ve üçüncüsü yine model bir pervane olan DTMB 4148 pervanesidir. DTMB 4119 ve Seiun-maru HSP pervanesi için kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen basınç dağılımı sonuçları, Hoshino panel metodu sonuçları, deneysel sonuçlar ve CFD sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. DTMB 4148 pervanesi için ise pervanenin Lee ve Kinnas (2005) çalışmalarında ele alınan test koşullarında kanat üzerinde görülen tabaka kavitasyon bölgeleri üç farklı kanat pozisyon açısında karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca, bu pervane için tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü düzeyi Brown formülü kullanılarak elde edilmiş, elde edilen sonuçlar ICES tarafından önerilen ve Fraser (1986) tarafından ifade edilen formülasyona göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Son olarak Bölüm 6’da, tezin genel bir değerlendirilmesi yapılarak çalışmanın sonuçları ve daha sonra yapılması düşünülen çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

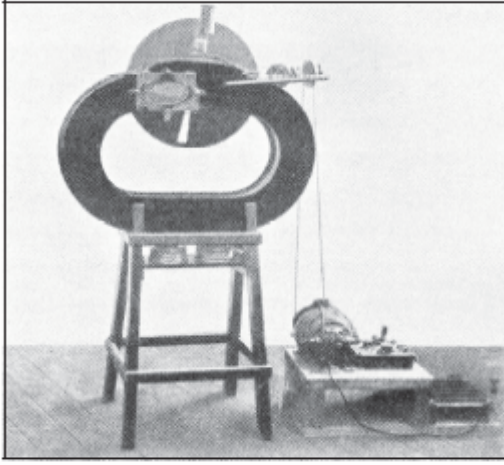
2. KAVİTASYON İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Kavitasyon, hidrodinamik (hidrofoil, airfoil, gemi pervanesi, hidrofoil tekne ayakları vb.) veya hidrolik (pompa, seperatör vb.) makinelerin performansını, çalışma ömrünü ve özellikle gemi pervanelerinin gürültüsünü ve gemi bünyesinde neden olduğu titreşimleri etkileyen akışkan mekaniğine ait fiziksel bir olgudur. Birçok mühendislik uygulamaları içinde kavitasyon üzerine yapılan çalışmaların çok fazla olduğu göze çarpmaktadır. Bunun nedeni, sözü edilen makinelerde yüksek verim ve pervane yüklerindeki artışa paralel olarak kavitasyon olayının sıklıkla ortaya çıkması ve kaçınılmaz bir durum haline gelmesidir. Kavitasyonun geçmişine bakıldığında, izlerinin 18.yy'ın ortalarına kadar uzandığı görülebilmektedir. Ünlü İsviçreli matematikçi Euler, 1754 yılında Berlin Bilim ve Sanat Akademisi'nde sunduğu bir makalede, bu konu ile ilgili açıklamalarda bulunmuş, özellikle o dönemin su çarklarında meydana gelen ve bu çarkların performansına da etki eden kavitasyon kavramını ifade etmiştir (Carlton,1994).

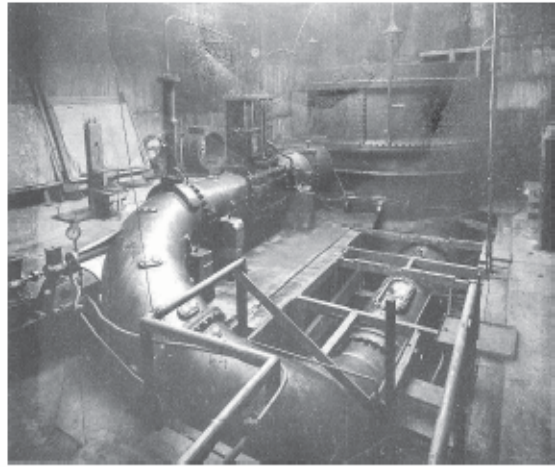
Ancak, deniz endüstrisi ile doğrudan ilgili olan kavitasyon incelemeleri için verilen referanslara bakıldığında, kavitasyon incelemelerine 19.yy'ın ortalarında rastlanmaktadır. 1873 yılında Osborne Reynolds, uskur pervaneli buhar makineleri ile ilgili olarak birtakım seri makaleler yayımlamıştır. Bu makaleler pervanenin performansı üzerinde etki eden ve bugün bizim kavitasyon olarak bildiğimiz olayı ortaya çıkarmıştır. Reynolds, aşırı kavitasyon olayı meydana geldiğinde, shaft dönel hızının beklenen normal güç emme değerinden daha fazla değere ulaştığını belirtmiştir (Carlton,1994).

19.yy sonlarında ise hızlı gemilerin yapılması amaçlanmış, ilk deneme 1894 yılında İngiliz destroyeri "Daring" üzerinde yapılmış fakat istenilen sonuç elde edilememiştir. Çünkü gemi hızı olarak 27 knot hedeflenmiş iken ancak 24 knot'a ulaşılmıştır. Yapılan incelemelerde bu hız kaybının, pervane hızı veya suyun maksimum gerilim dayanımı için verilen sınırların aşılmasından dolayı akışta meydana gelen bozulmalar nedeni ile ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. R.E. Froude'un önerisiyle bu zararlı pervane olayına Latince "Cavus" kelimesinden türeyen "Cavitation (Kavitasyon)" adı verilmiştir. Daha sonra 1895 yılında Charles Parsons, buhar türbinli bir gemi olan "Türbinia"'nın denemeleri esnasında da Daring'de ortaya çıkan kavitasyon olayını görmüştür. Parsons, ilk yaptığı araştırmaların sonucunda kavitasyonun, öncelikle pervanenin giriş kenarının biraz gerisinde kanat ucuna yakın bir yerde başladığını, daha sonra pervanenin devir sayısı yükseldiğinde kanadın belirli bir kısmını sarana kadar her yönden arttığını gözlemlemiştir. Hız artmaya devam ettiğinde kanadın kavitasyon ile kaplandığını ve bu konumda iken kanattaki enerjinin bu anlamsız

boşluğu oluşturmak için harcadığını rapor etmiştir.



Şekil 2.1 Parsons'un ilk kavitasyon tüneli(1895)



Şekil 2.2 Parsons'un 1910 yılında inşa ettiği daha büyük kavitasyon tüneli, (Weitendorf, 2001)

Turbinia, üzerinde iki kanatlı, her birinin çapı 0.75 m olan üç adet pervane bulunan bir şafta sahipti. İlk denemelerde bu gemi sadece 20 knot hıza ulaşmıştı. Parsons, her bir şaft için gerekli olan tam gücü absorbe etmek ve istenen oranlarda pervane kanat yüzey alanını arttırmak için üçlü bir pervane düzeninin uygulanması gerektiğini bulmuştur. Bu nedenle, her birinin çapı 0.46 m ve kanat alan oranı 0.60 olan toplam 9 adet pervane üç adet şaft üzerine dağıtılmıştır. Bu pervane düzeni, sadece uygun şaft hızlarında geminin tam gücü absorbe etmesini değil aynı zamanda 1491 kW güçte oldukça uygun bir tecrübe hızı olan 32.75 knot gibi bir değere ulaşmasını sağlamıştır. İşte elde edilen bu başarıların nedenlerini ve kavitasyon olayını incelemek için Parsons, yine, aynı yıl, bugünün kavitasyon tünellerinin öncüsü olarak belirtilen bir kavitasyon tüneli inşa etmiştir. Bu tünel, 2 inch çapa sahip pervanelerin test edilmesine olanak sağlıyordu. Ancak, bu sınırlama Parsons'u 15 yıl sonra 12 inch çaplı pervane modellerini test edebilecek daha büyük bir tünel inşa etmeye itmiştir. Parsons, inşa ettiği tünellerde su seviyesinin üzerindeki atmosferik basıncı bir vakum pompası yardımıyla azaltmıştır. Bu durumda, çok düşük şaft hızlarında bile kavitasyonu gözlemlemek mümkün olmuştur. Böylece kavitasyonun gözlemlenmesi daha kolay olmuştur (Carlton,1994).

Daha sonra, Avrupa ve Amerika'da 1920 ve 1930'ların başlarında daha büyük kavitasyon tünelleri inşa edilmeye başlanmıştır.

Bu tarihten itibaren, kavitasyon incelemeleri için gerek kavitasyon tünellerinde yapılan

deneyler gerekse sayısal modellemeler yardımıyla birçok çalışmalar yapılmış ve halen de yapılmaya devam etmektedir. 1950’lerden sonra bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle beraber bu konuda, çok önemli ilerlemeler sağlanmıştır.

Kavitasyonlu akışlar, lineer olmayan “Serbest Akımhattı Akışları (Free Streamline Flows)” olarak da bilinmektedirler. Bu ifadeler, başlangıçta konumu bilinmeyen ve çözümün bir parçası olarak bulunması gereken bir “serbest yüzeyi (free surface)” içine alan durumlar için kullanılmaktadır.

En genel anlamda, kaldırıcı yüzeyler (hidrofoil, aerofoil, pervane kanatları vb.) üzerinde görülen kavitasyon olayı ile ilgili olarak yapılan teorik çalışmalar potansiyel akış teorisini temel alan “lineer kavitasyon teorileri” ile “lineer olmayan kavitasyon teorileri”ne dayanmaktadır. Bununla beraber, kavitasyonun fiziksel modeli, kavitasyon başlangıcı, ölçek etkileri, kabarcık dinamiği, kavitasyon kaynaklı gürültü, titreşim ve gemi bünyesinde indüklenen basınç dalgalanmaları ve özellikle uç girdap (tip vortex) kavitasyonu ile tabaka (sheet) kavitasyonu üzerinde çok sayıda teorik ve deneysel çalışmalar mevcuttur. Kavitasyon erozyonu ise deneysel olarak incelenmiş ancak teorik olarak modeli henüz kurulmamıştır.

Lineer kavitasyon teorisi, ilk olarak Tulin (1953) tarafından ortaya atılmıştır. Tulin, bir hidrofoilin kalınlığının artması ile sabit akış koşulları altında kavitasyon boyu ve büyüklüğünün daima arttığını göstermiştir. Daha sonra lineer kavitasyon teorisi, Geurst (1959) tarafından genel bir sehim hattına sahip hidrofoil için kısmi kavitasyona, Geurst ve Verbrugh (1959) tarafından parabolik bir sehim dağılımına sahip hidrofoile uygulanmış ve yine Geurst (1960) tarafından herhangi bir kavitasyon sayısında süperkavitasyonlu bir hidrofoil problemine genişletilmiştir. Bu çalışmalarda, kavitasyon boyu, kavitasyon alanı ve aynı zamanda kaldırma, direnç kuvvetleri ve momentleri; kavitasyon sayısı, hücum açısı ve sehim hattının fonksiyonu olarak hesaplanmıştır. Yapılan deneysel sonuçlarda, kavitasyonun iki boyutlu hidrofoilin artan giriş ucu yarıçapı ile bu bölgede azaldığı veya geciktiği görülmüştür. Deneysel bu çalışmaları destekleyen bir çalışma Tulin ve Hsu (1980) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, lineer olmayan kalınlık etkilerini de hesaba katarak bir kavitasyon teorisi geliştirilmiştir. Bu metot, kısmi kavitasyonlu hidrofoilin kalınlığının artması ile kavitasyon büyüklüğünün sabit akış koşulları altında azaldığını öngörmüştür. Lineer teorisinin bu eksikliği Kinnas (1985) ve Kinnas (1991) tarafından doğrulanmıştır. Kinnas (1991), kavitasyon başlangıcını geciktiren etken olarak bilinen daha büyük giriş ucu yarıçapına sahip daha kalın hidrofoillerde bu teorisinin deneysel sonuçlar ile çeliştiğini ispat etmiştir. Daha önce kavitasyon göstermeyen hidrofoil problemleri üzerine Lightill (1951) tarafından ortaya

konulan giriş ucu düzeltmesini dinamik sınır koşulunu da içerecek şekilde genişleterek kavitasyonlu akış için bir giriş ucu düzeltmesi ortaya çıkarmıştır. Bu giriş ucu düzeltmesi, iki boyutlu hidrofoil problemlerinde olduğu kadar üç boyutlu pervane çözümlerinde de Kerwin (1986) ile Kinnas (1992b) tarafından kullanılmıştır.

Kavitasyonlu veya serbest akım hattı akışları ilk olarak, hodograf tekniği kullanılarak Helmholtz, Kirchhoff ve Levi Civita tarafından lineer olmayan kavitasyon teorisi içinde incelenmiştir (Birkhoff ve Zarantonelo, 1957). Düzenli akış içindeki kavitasyon yüzeyi, sabit basınçta (bu nedenle sabit hız) bir akım hattı gibi alınmıştır. Genel yapılar üzerine yapılan hodograf tekniklerindeki farklılıklardan dolayı, çoğu durumlarda analitik yöntemlere başvurulmuştur. Hodograf tekniği, keyfi olarak seçilmiş geometrilere denenmek için Wu ve Wang (1964) tarafından sayısal olarak genişletilmiş ve daha sonra serbest yüzey etkisi altında olan süperkavitasyonlu hidrofoillerin analizi için Furuya (1975) tarafından uygulanmıştır.

Bu çalışmalardan sonra, kaldırıcı yüzeyler etrafındaki kavitasyonlu akışın modelinde kullanılan formülasyon, kavitasyon sınır modelleri üzerinde birçok farklılığa neden olmuştur. Bu modeller, Riabouchinsky end plate modeli, re-entrant jet modeli, açık iz modeli ve viskoz iz modeli olarak bilinmektedirler Fabula (1962), Tulin (1964), Yamaguchi ve Kato (1983), Rowe ve Blottiaux (1993), Krishnaswamy (2000), Franc and Michel (2004).

Daha sonra, lineer teoremin eksikliğini tamamlamak için, lineer olmayan etkileri problemlerin çözümünde hesaba katma ihtiyacı doğmuştur. Bu ise lineer olmayan kavitasyon teorilerinin gelişimine ışık tutmuştur. Dolayısıyla, bilgisayar teknolojisinin gelişimine paralel olarak sayısal metotlar geliştirilmiştir.

Denizcilik alanında kullanılan kaldırıcı yüzeylerde (hidrofoil/pervane) kavitasyonu sayısal olarak analiz etmek için kullanılan sayısal metotları; kaldırıcı yüzey metotları (lifting surface methods), panel metotları (panel methods) ve hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) metotları olmak üzere üç grupta toplamak mümkündür.

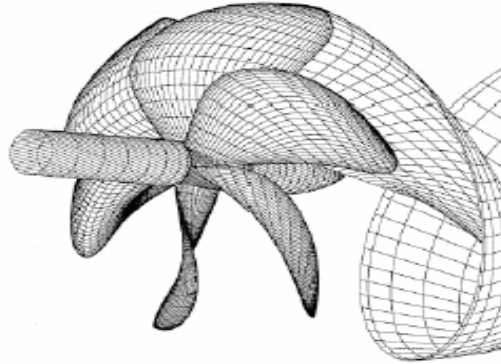
Sayısal metotlar, potansiyel akış teorisi içinde yer alan teoremlere dayanmaktadır. Bu teoremler, akış alanının sınırları üzerine dağıtılan uygun kaynak, dipol, girdap veya bunların kombinasyonları olarak açıklanabilen, Dirichlet, Neumann veya bunların her ikisi ile birlikte oluşan sınır koşulu problemlerinin çözümünü ifade etmektedir. Bu yöntemlerden biri “Yüzey Tekillik Metotları (Surface Singularity Methods)”, “Sınır Eleman Metotları (Boundary Element Methods (BEM))” veya “Panel Metotları” olarak adlandırılan metottur. Panel metotları, sıkıştırılamaz ve viskozitesiz akış kabulünün yapıldığı potansiyel akışların

analizinde kullanılan Laplace denklemini çözmek için gerekli en genel metotlardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu metotlarda, paneller kavitasyon sınırı üzerine yerleştirilmiştir. Kavitasyon şekli ise, hem kinematik (Neumann sınır koşulu) hem de dinamik sınır koşulu (Dirichlet sınır koşulu) sağlanana kadar tekrarlanan bir mantık ile belirlenmektedir.

Sınır eleman metotları kaldırıcı yüzey analizlerinde ortaya çıkan iki problemi aşmak için 1980’li yılların başlarından itibaren geliştirilmiş metotlardır. Bu problemlerden ilki hesaplamada giriş ucu yakınındaki yerel hatalar diğeri ise nispi olarak ince ve yakın aralıkta sıralanmış kanat kesitlerinin bulunduğu pervane göbeği yakınında daha geniş olarak meydana gelen yerel hatalardır. Sınır eleman metotları ayrıca kanat kalınlığı ve kavitasyon yüzeyi kalınlığının daha doğru temsiline imkan verir.

Kavitasyon ile ilgili akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılan panel metotların uygulanma tarzı çeşitlilik göstermektedir. Metottaki bu kullanım değişikliklerinin nedeni olarak farklı panel geometrisi, panel üzerindeki tekilliklerin çeşitliliği ve bunların paneller üzerindeki dağılımlarının (ayırıklaştırma işlemi) farklılığı verilebilmektedir.

Bu metotlarda, 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 foil 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 metotların “Panel metot” adı ile anılmasının nedeni yüzeylere dağıtılan bu elemanların özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Şekil 2.3’de bir pervane, göbek ve takip eden girdap izinin panel metot yardımı ile modellenmesi görülmektedir.



Şekil 2.3 Pervane kanatları, göbek ve takip eden girdap üzerindeki panel düzeni (Kinnas vd., 2003)

CFD yöntemi ile yapılan analizlerde pervane, hidrofoil vb. kaldırıcı yüzeyler etrafındaki akış alanı üç boyutlu hesaplamayı gerektirirken, panel metodu ile yapılan analizlerde ise sadece kaldırıcı yüzeyler üzerindeki hesaplamalar gerekli olmaktadır. Bu da bilgisayar ortamındaki hesaplama zamanını azaltmaktadır.

Panel metotlarında kullanılan tekilliklerin şiddetleri, her bir panelin orta noktasına yerleştirilen kontrol noktalarında sınır değer problemlerinin çözümü ile belirlenmektedir (Carlton,1994). İki boyutlu foiller ile karşılaştırıldıklarında üç boyutlu geometrilerde (gemi pervaneleri) panel sayıları çok büyük oranda arttığı için panel metotları hesaplama zamanına bağlı olarak çok masraflı olmaktadır (Kinnas, 1990). Gemi pervanelerinde tabaka kavitasyonu ve son zamanlarda ise uç girdap kavitasyonu üzerine panel metotları kullanılarak yapılan birçok çalışma mevcuttur (Kinnas vd.(2002, 2003), Lee ve Kinnas (2005)).

Bu metot, ilk olarak, uçak endüstrisinde Hess ve Smith (1966) tarafından yapılan bir çalışma ile ortaya çıkmıştır. Kullanılan bu yaklaşımda, yüzeylerde düz doğru paneller kullanılmış, girdap şiddetinin tüm foil kesiti üzerinde sabit, kaynak şiddetinin ise panelden panele değiştiği kabul edilmiştir. Bu metoda ait formülasyon ve geniş bilgi için Moran (1985)'e bakılabilir. Daha sonra Hess (1973,1975) daimi akışta iki boyutlu kaldırıcı yüzeylerdeki kavitasyonsuz akış problemini bu metoda bağlı olarak incelemiştir. Uhlman (1987,1989) ise iki ve üç boyutlu kısmi ve süperkavitasyonlu hidrofoiller etrafındaki akış analizini gerçekleştirmek için “yüzey girdap metodu”nu kullanarak hıza bağlı bir BEM metodu geliştirmiştir. Uhlman, bu çalışmalarında hidrofoil kalınlığının artması ile kavitasyon büyüklüğünde bir azalmanın olduğunu bulmuştur. Hess ve Valarezo (1985), Hess ve Smith'in çalışmasına dayalı olarak pervaneler etrafındaki düzenli akışın hesabı için bir metot öne sürmüşlerdir. Bu çalışmanın hemen sonrasında ise Hoshino (1989), yine aynı amaç için bir yüzey panel metodu ortaya çıkarmıştır. BEM metodu gibi lineer olmayan kavitasyon teorilerinin kullanıldığı deneysel ve sayısal kavitasyon çalışmaları arasında, gemi pervaneleri için Stern vd.(1983), foil için ise Stern (1989) ve çalışmaları örnek olarak verilebilir.

Kinnas ve Fine (1990), düşük dereceden potansiyele dayalı (low-order potential) bir BEM metodunu iki boyutlu kısmi kavitasyonlu (kavitasyon boyu belli, kavitasyon sayısı belli olmayan durum için) hidrofoillere uygulamışlardır. Ortaya konulan bu yöntemde, elde edilen son kavitasyon şekli Uhlman (1987,1989) tarafından ortaya konulan hıza bağlı BEM metodundaki iterasyon sayısından daha fazla iterasyon sayısı ile yakınsama göstermiştir. Kinnas ve Fine (1992), kavitasyon gösteren bir gemi pervanesi etrafındaki daimi olmayan akışı analiz etmek için, düşük dereceli potansiyele dayalı BEM metodunu birleştirmişlerdir.

Bu metot, açık veya nozullu pervaneler etrafındaki kavitasyonsuz ve daimi olmayan akışın öngörüsü için Kinnas (1990) tarafından kullanılan bir metot üzerine kurulmuştur. Fine ve Kinnas (1993a)'da, Kinnas ve Fine (1990) tarafından geliştirilen metot üç boyutlu kavitasyonlu hidrofoillerin analizi için genişletilmiştir. Yüksek eğrilik, eğiklik ve hatveye sahip pervaneler etrafında daimi olmayan akış ortamında oluşan tabaka kavitasyonu için Fine ve Kinnas (1993b) tarafından bir çalışma yapılmıştır. Pellone ve Rowe (1981) süperkavitasyonlu hidrofoiller etrafındaki akışı, Kinnas ve Fine (1993) ise iki ve üç boyutlu hidrofoiller etrafındaki akışı incelemişlerdir. Onların çalışmasında pervane sırt kavitasyonu tanımlanan bir kavitasyon ayrılma kriterine bağlı olarak öngörülmektedir. Daha sonra metot, Kinnas vd.(1997) ve Mueller ve Kinnas (1999) tarafından, kavitasyon ayrılma noktasını araştırarak yüz ve/veya sırt kavitasyonu öngörecek başka bir panel metoda genişletilmiştir.

Dang ve Kuiper (1998), iki boyutlu hidrofoil kesitler üzerinde kısmi kavitasyonlu akışı önceden tahmin eden panel metota dayalı bir potansiyeli, re-entrant jet sınır modeli kullanarak incelemişlerdir. Burada, kavitasyon şekli ve boyu verilen kavitasyon sayısı için belirlenmektedir. Çalışmada, re-entrant jet yüzeyi, kavitasyon tam olarak gelişmiş olduğu için otomatik olarak şekillenmektedir.

Yasko (1998), potansiyel akış kabulu ile serbest yüzey altındaki bir profilin hareket problemine sınır eleman metodunu uygulamıştır. Bu çalışmada, hareketli akışkanın akım fonksiyonu için iki boyutlu olarak bir problem analiz edilmektedir. Ele alınan sayısal model sınır eleman metodunu kullanmaktadır. Küçük ve büyük Froude sayıları ile lineer olmayan problemlerin çözümü için iki iteratif prosedür sunulmaktadır. Nümerik sonuçlar her iki durum için de verilmektedir.

Kinnas ve Fine (1991b), ideal bir akışkan içerisinde yer alan kısmi veya süperkavitasyonlu bir hidrofoil etrafındaki akışın analiz problemini, panel metoduna dayalı daha basit bir potansiyel yaklaşım ile çözmüşlerdir. Bu yaklaşımda, kavitasyon yüzeyi iteratif bir şekilde çözümün bir parçası olarak belirlenmektedir.

Kinnas vd. (1994), kısmi veya süperkavitasyonlu hidrofoiller etrafındaki viskoz/viskozitesiz akışı, Drela (1989) tarafından geliştirilen bir sınır tabaka çözümü ile BEM'e dayalı viskozite içermeyen çözüm metodundan meydana gelen başka bir metot ile incelemişlerdir. Bu metotta, viskozite içermeyen kavitasyonlu akış modeli, tam olarak lineer olmayan sınır eleman metoduna, viskoz akış modeli ise hidrofoil yüzeyi ile kavitasyon yüzeyinden meydana gelen yüzeye uygulanan sınır tabaka teorisine dayanmaktadır.

Brewer ve Kinnas (1997), hesaplamalı birkaç teorik metodun doğruluğunu kanıtlamak için, MIT’de değişken basınçlı su tüneline kısmi kavitasyonlu bir hidrofoil üzerinde deney yapmışlardır. Panel metoda dayalı bu çalışmada; akış hızları kavitasyon yüzeyine yakın olmasının yanında, sınır tabaka bölgesi içinde hidrofoil çevresinde dikdörtgen şeklindeki bir kontrol yüzeyi boyunca alınmaktadır. Kavitasyon sayısı, bir manometre yardımıyla kavitasyon içerisinde ölçülen basınç ile değerlendirilmektedir. Deneysel ölçümler, lineer olmayan viskozitesiz kavitasyon analizi ve sınır tabaka çözümünden elde edilen nümerik sonuçlar ile karşılaştırılmaktadır. Kuvvetler ise, momentum integrasyonları ile ölçülen hızlardan hesaplanmakta ve sayısal yöntem ile elde edilen öngörü sonuçları ile karşılaştırılmaktadır.

Bal (1999), kavitasyon içermeyen, sabit hızlı, serbest yüzey altında hareket eden, iki boyutlu hidrofoillerin hidrodinamik analizi için sınır eleman metoduna dayanan bir potansiyel tanımlamıştır. Bal vd. (2001)’de ise serbest yüzey altında sabit hızla hareket eden iki veya üç boyutlu kavitasyonlu hidrofoil modelleri için bir metod tanımlanmıştır. Bu metotta akış alanının tüm yüzeylerinde Green teoremi kullanılarak bir integral denklem elde edilmektedir. Bu integral denklem, kavitasyonlu hidrofoil problemi ve serbest yüzey problemi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu iki denklem, birbirinden ayrı olarak çözülmektedir. Kavitasyonlu hidrofoil ve serbest yüzey, sabit şiddetli dipol ve kaynak paneller ile modellenmektedir. Bu metod, kavitasyonlu ve kavitasyonsuz akış koşulları içinde iki ve üç boyutlu hidrofoil geometrilerine uygulanmış ve kavitasyon öngörüsü için değişik metotlar ile karşılaştırılmıştır.

Krishnaswamy (2000), iki boyutlu kısmi kavitasyonlu bir hidrofoil üzerinde kavitasyon sonundaki akışı, gerçeğe daha yakın olan bir kavitasyon sınır modeli (re-entrant jet modeli) ile modelleyerek panel metoda dayalı bir analiz çalışması yapmıştır.

Takinacı ve Atlar (2001), düzenli akış ortamında ağır yüklü gemi pervaneleri için ince sınır tabaka hesabında kullanılmak üzere “Morino Metodu” olarak da bilinen bir yüzey panel metodunu ele almışlardır. Bu metotta pervane etrafındaki akış alanı bilinmeyen bir potansiyel ile temsil edilmektedir. Viskozitenin pervane yüzeyinde ince bir sınır tabaka şeklinde geniş olarak yayıldığı varsayılırken, akış alanının büyük bir kısmı ise potansiyel teori yardımı ile ifade edilmektedir.

Kinnas vd. (2002), kaldırıcı yüzeyler üzerinde tabaka ve gelişmiş uç girdap kavitasyonunun önceden tahmini için kullanılan sınır eleman metotlarını, “lineer olmayan kavitasyon teorisi”

başlığı altında özetlemişlerdir. Bu çalışmada, sınır koşulları olarak, kavitasyon göstermeyen (non cavitating veya wetted) yüzeyler üzerinde Neumann tipi sınır koşulu, kavitasyon yüzeyi üzerinde ise Dirichlet tipi sınır koşulu uygulanmıştır. Uygulama olarak ise yüzey yarıcı pervanelerin yanında daimi olmayan akış ortamında çalışan gemi pervaneleri, iki ve üç boyutlu hidrofoiller göz önünde tutulmuş ve deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmanın sonunda, incelenmesi gereken birtakım konulara dikkat çekilmiştir. Bu konular; gemi kıç tarafında pervane tarafından indüklenen basınçların artışı ve bu artıştan dolayı oluşan titreşimler ile doğrudan ilişkili olan uç girdap kavitasyon dinamiğinin öngörüsü, yüzey yarıcı bir pervane üzerinde hidro-elastik bağlantı, kontra dönüşlü pervaneler, stator/rotor kombinasyonları gibi çok bileşenli sevk ediciler etrafındaki akışın modellenmesidir.

Lee ve Kinnas (2002), pervane kanatları üzerinde meydana gelen daimi olmayan tabaka kavitasyonu (kısmi veya süperkavitasyonlu) ile gelişmiş uç girdap kavitasyon modeli için bir sınır eleman metodu geliştirmişlerdir. Bu çalışmada ele alınan sayısal metot, iki boyutlu uç girdap kavitasyonu, üç boyutlu hidrofoil ve düzensiz akış alanı içerisinde çalışan bir gemi pervanesi için incelenmektedir. Ayrıca çalışmada, deneysel sonuçlar ile nümerik tahmin sonuçlarının karşılaştırılması sunulmaktadır.

Kinnas vd. (2003) çalışmasında, eksene göre simetrik olmayan akış içinde çalışan bir pervane etrafındaki daimi olmayan kavitasyonlu akış problemi panel metot ve kaldırıcı yüzey metodu kullanarak incelenmiş ve zamana bağlı olarak değişen kavitasyon tabakasının kalınlığı ile boyu iteratif bir metot kullanarak belirlenmiştir. Kavitasyon tabakasına ait ayrılma noktasının yerini ise yine iteratif bir yol ile düzgün bir ayrılma kriteri kullanarak hesaplanmıştır. Takip eden iz geometrisi tamamen daimi olmayan bir iz düzenleme prosesi kullanarak belirlenmiştir. Kullanılan her iki yöntemin karşılaştırılması, yapılmış birkaç deneyden elde edilen sonuçlar ile birlikte verilmiştir.

Pereira vd.(2002), kavitasyonlu akış üzerine sayısal ve deneysel bir çalışma sunmuşlardır. Bu çalışmada, düzenli bir akış ortamında tabaka kavitasyonunun kalınlık, hacim ve alanının öngörüsü için bir BEM metodu uygulanmıştır. Öngörülen bir iz modeli ve serbest iz modeli kullanılmıştır. Serbest iz modeli kullanılarak yapılan hesapların öngörülen iz modelinden daha doğru olduğu ve deneysel veriler ile daha iyi uyum gösterdiği görülmüştür.

Young ve Kinnas (2002,2003b), süperkavitasyonlu pervaneler ile yüzey yarıcı pervanelerin performansının öngörüsü için üç boyutlu bir BEM metodu ortaya çıkarmışlardır. Yüzey yarıcı pervanelerde, serbest yüzey etkisinin nedenini açıklamak için bir metot kullanılmıştır. Yapılan

çalışmada, elde edilen kavitasyon şekilleri ile performansların sayısal öngörülerinin deneysel veriler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Salvatore vd. (2003) viskoz sınır tabaka analizini kullanan bir metot ile iz akışı, tabaka kavitasyonu ve hidrodinamik performans için panel metoda dayalı olarak geliştirilen bir viskoz/viskozitesiz yaklaşım metodunu birleştirerek yeni bir yaklaşım metodu ortaya koymuşlardır.

Young ve Kinnas (2003a), pervane kanatlarının titreşim karakteristiklerini öngörebilen üç boyutlu sonlu elemanlar metodu (FEM) ile BEM metodunu birleştirmişlerdir.

Kinnas ve Lee (2003), hidrofoillerin hem sırt hem de yüz kısmındaki iki boyutlu kavitasyon şekillerini öngörmek için, BEM'e dayalı üç boyutlu tünel çözücüsü ile üç boyutlu hidrofoil çözücüsünü birleştirmişlerdir. Tünel içindeki pervanenin performansı, Choi ve Kinnas (1998,1999) tarafından ortaya konulan bir BEM metodu ile bir kaldırıcı yüzey metodu birleştirilerek incelenmiştir. Çalışmada, daimi olmayan akış ortamında kavitasyonlu pervane problemi ile tünel problemi ayrı ayrı çözülmüş ve birbirlerine olan etkileri iteratif bir yöntem ile açıklanmıştır. Tünel duvarları üzerinde pervanenin etkisi potansiyel yol ile ele alınırken pervane üzerinde tünel duvarlarının etkisi hız bileşeni göz önünde tutularak incelenmiştir.

Lee vd. (2003), pervane ve tünel duvarları etkilerini hesaba katarak bir dümen üzerindeki tabaka kavitasyonunu hesaplamışlardır. Bu metot içinde; kaldırıcı yüzey metodu, üç boyutlu bir Euler çözücü ve bir BEM metodu kullanılmıştır. Tünel duvarı ve pervane göbeği katı sınırlar gibi fakat dümen kullanmadan analiz edilmektedir. Dümen etrafındaki kavitasyonlu akış, başka bir iterasyon şeklinde BEM metodu aracılığı ile hesaplanmaktadır. İki iteratif birbirleri ile bağlantılıdır. Çalışma sonucunda, elde edilen kavitasyon şekillerinin deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Young ve Kinnas (2003), eksene göre simetrik olmayan akış içerisinde çalışan süperkavitasyonlu pervanelerin sayısal modeli için, üç boyutlu bir sınır eleman metodunu kullanmışlardır. Bu çalışmada nümerik sonuçların yanı sıra, deneysel ölçümler ile birlikte kavitasyon tahminlerinin karşılaştırılmaları yapılmıştır.

Krasilnikov vd. (2003), dümenler ve podlu pervaneler üzerindeki tabaka kavitasyonunu incelemek için viskoz olmayan bir akış metodu sunmuşlardır. Bu yaklaşım, Achinadze ve Krasilnikov (2003) tarafından önerilen izole edilmiş bir pervane için hıza bağlı BEM metodunu içermektedir. Çalışmada, pervane ve dümen arasındaki etkileşim iteratif bir yaklaşım ile incelenmektedir. Burada bir pervane akış çözümü, dümen için çevresel ortalama

akışı belirlemek için kullanılmaktadır. Daha sonra, dümen akışı çözülmektedir ve bu akışın pervane üzerinde olan etkisi belirlenmektedir. Daha sonra yeni bir pervane akış çözümü değerlendirilmektedir ve işlem tekrarlanmaktadır. İzole edilmiş pervanenin indüklediği hızların sayısal öngörüsü ile mevcut olan ölçümlerin uygunluğu gösterilmiştir. Dümen yüzeyi üzerinde öngörülen tabaka kavitasyon alanının, deneysel ölçümler ile iyi uyum gösterdiği vurgulanmıştır.

Lee ve Kinnas (2004), tabaka ve uç girdap kavitasyonunu incelemek için bir BEM metodunu sunmuşlardır. DTMB 4148 model pervanesi üzerindeki kavitasyon şekillerinin sayısal öngörülerini tünel deneylerinden elde edilen gözlemler ile karşılaştırmışlardır. İlgili kavitasyon şekillerini öngörme kabiliyeti deney ve uygulama yoluyla kanıtlanmıştır. Ancak, uç girdap kavitasyonunun öngörüsü için daha çok değerlendirmeye ihtiyaç duyulmakta olduğu belirtilmiştir.

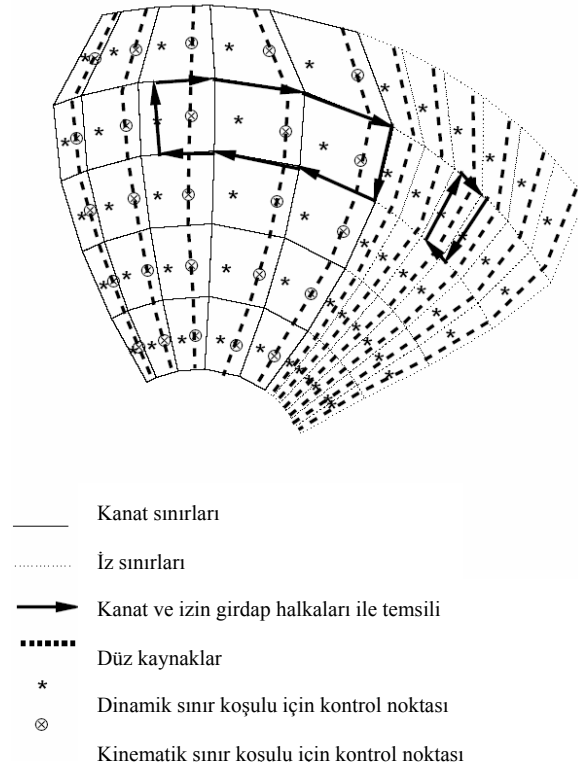
Lee ve Kinnas (2005) tarafından eksene göre simetrik olmayan akış ortamında ve tamamen tünel duvarı etkisi altında çalışan gemi pervanelerinin daimi olmayan kavitasyon performansını öngörmek için panel metoda dayalı bir çalışma yapılmıştır. Ancak, bu çalışmada, tünel ve pervane problemi daha önce Kinnas vd.(2003) tarafından yapılan çalışmadaki gibi ayrı ayrı değil doğrudan çözülmüştür. Uygulamada N3745 model pervanesi kullanılmıştır. Kanat üzerindeki kavitasyon ve iz yüzeyi şekli, kavitasyon tabakası yüzeyinde kinematik ve dinamik sınır şartı sağlanarak çözülmektedir. Yüzey üzerindeki potansiyel, kavitasyon sayısı ve kavitasyon hızı arasındaki ilişki ile dinamik sınır koşulundan elde edilmektedir. Sınır değer problemi, bilinmeyen değerler olan kavitasyon göstermeyen yüzey üzerindeki potansiyel ile kavitasyon yüzeyi üzerindeki potansiyellerin normal yöndeki türevleri için çözülmektedir. Yeni kavitasyon şekli potansiyelin normal türevi kullanılarak uydurulmakta ve üzerindeki potansiyel ise kavitasyon tabakası üzerindeki kinematik sınır şartı kullanılarak belirlenmektedir. Sayısal işlem, kavitasyon şekli yakınsayana ve kavitasyon üzerindeki basınç sabit değere ulaşana kadar tekrarlanmaktadır. Ortaya konulan bu metodu değerlendirmek için kanat kuvvetleri üzerinde tünel duvarlarının boyutları ve kanat panel sayılarının etkisi sunulmuştur. Hesaplama sonucu elde edilen kavitasyon şekilleri deneylerde gözlemlenen şekiller ile karşılaştırılmıştır.

Kavitasyon'un sayısal olarak analizinde kullanılan metotlardan ikincisi "kaldırıcı yüzey metodu" dur. Kaldırıcı yüzey metotlarında genel olarak pervanelerin kanat kesitleri (veya foil kesiti) her bir kanat kesitinin sehim hattı üzerinde sonsuza doğru uzanan ince bağlı girdap tabakası olarak temsil edilmektedir. Kanat üzerinde radyal ve kort yönünde girdap dağılımları

yerleştirilmektedir. Kaldırıcı yüzey metodunun ilk uygulamalarında girdap dağılımları sadece sehim hattı boyunca yerleştirilerek kaldırıcı hat (lifting line) probleminden elde edilen ve radyal olarak değişken olan bağlı sirkülasyon bu şekilde dağıtılarak pervane kanadı temsil edilirken, daha sonra geliştirilen yöntemlerde bu girdapların yerine kavitasyon öngörüsünde yüzey basınçlarını daha doğru bir şekilde hesaplamak amacıyla kanat kortları üzerinde kaynak-kuyu dağılımları yerleştirilmiştir. Böylece hem kanat etrafında meydana gelen bağlı sirkülasyon hem de kanat kalınlıkları temsil edilmiştir.

Kaldırıcı yüzey metotları, pervane hidrodinamiğinde hem dizayn hem de analiz problemlerinin çözümünde özellikle kavitasyon alanında tabaka kavitasyonunun sayısal analizinde kullanılmaktadır. Dizayn problemlerinde kanat geometrisi, radyal olarak kort, eğiklik, çalıklık ve kesit kalınlık dağılımları bilindiği ölçüde kısmen bilinmektedir. Pervane kanatlarına ait hatvenin radyal, sehim hattının ise radyal ve kort yönündeki dağılımlarının tayin edilmesi gerekmektedir. Dizayn problemlerinin çözümünde herhangi bir noktadaki indüklenmiş hızların hesabının mümkün olabilmesi için kanatları ve onların izlerini temsil eden girdap dağılımlarının uygun referans yüzeylerinde yerleştirilmeleri gerekmektedir.

Analiz hesaplarında ise durum dizayn hesaplarındakinden daha farklıdır. Çünkü pervane geometrisi tamamen bilinmektedir. Analiz hesabı daimi ve daimi olmayan akım durumundaki çözümler olmak üzere iki kısımda uygulama alanı bulmaktadır. Daimi akım durumundaki denklemler dizayn problemindeki denklemler ile aynı şekilde kullanılırlar. Dizayn hesaplamalarından bilinen bir sirkülasyon dağılımı tarafından indüklenen hızı veren tek katlı integral bu analiz hesaplamalarında bir integral denklem halini almaktadır. Bu denklem ise, sayısal olarak çözülmektedir (Carlton,1994). Daimi olmayan pervane akışlarında ise çözüm, kanat izinde takip eden girdapların bulunmasından dolayı biraz daha karmaşık bir durum arz etmektedir.



Şekil 2.4 Bir kaldırıcı yüzey metodunda pervane kanadı ve izi üzerinde sınır koşulları için girdap, kaynak ve kontrol noktalarının yerleşimi (Griffin, 1998)

Gemi pervaneleri, kanatları üzerinde meydana gelen hidrodinamik yükü dağıtmak, yerel negatif basınçların oluşumundan ve mümkün olduğu kadar kavitasyon olayından kaçınmak için genelde geniş kanatlara sahip olarak tasarlanmaktadır. Beklenildiği gibi, gemi etkisiyle üretilen, yere ve zamana göre değişen akım şartlarında çalışan pervane kanatları, çeşitli kanat pozisyonlarında değişken kuvvetlere neden olmaktadır. Bu nedenle, pervane kanatlarının değişken basınç dağılımlarına sahip kaldırıcı yüzeyler olarak incelenmesi gereklidir. Panel metotlarda olduğu gibi kaldırıcı yüzey metotlarında da pervane kanatları üzerindeki yük ve kalınlık dağılımlarını bulabilmek için, basınç ve hız arasında bir ilişki kurulmalı ve kanatlar üzerindeki kinematik sınır koşulu gerçekleştirilmelidir.

Bir kanat probleminde, serbest girdaplar düz hatlar şeklinde, bir pervane probleminde ise helisel hatlar şeklindedir. Uçak kanat kesiti için yapılan hesapların sonucunda sadece kanat genişliği yönünde (spanwise) değişen bir hız alanı ele alınırken, pervane için ise radyal yönde farklı kanat kesitleri boyunca indüklenen hızların değişimlerinin elde edilmesi istenmektedir. Bu nedenle, farklı kaldırıcı yüzey teorileri geliştirilmiştir. Bu teoriler birbirinden bağımsız dizayn ve analiz yöntemleri olarak sayılmayabilirler. Kaldırıcı hat metoduna dayalı hesaplar elde edildikten sonra kaldırıcı yüzey metodu kullanarak daha detaylı bir dizayn işlemi gerçekleştirmek için iki farklı yol uygulanabilir. Bunlardan ilki, kaldırıcı yüzey düzeltme

faktörleri dizilerini kullanmak, ikincisi ise birbirinden bağımsız olarak icra edilen hesapları bir araya getiren algoritmalar kullanmaktır. Sözü edilen ilk yaklaşım, bilgisayar teknolojisinin gelişme gösterdiği dönemlerden önce daha ön planda olan bir yaklaşım olarak bilinmektedir. Ancak, son 30 yıl içinde gelişen bilgisayar ve sayısal metotlar sayesinde ikinci yaklaşım daha hızlı bir gelişme göstermiştir. Bu yaklaşım, özellikle, geleneksel olmayan geometrilere sahip pervaneler için elde edilen sonuçların daha yüksek oranda tutarlı olduğunu göstermiştir.

Kaldırıcı yüzey metodu, temelinde bulunan sayısal ifadelerin zorluğu ve bu ifadelerin fazla sayıda olmasından dolayı bilgisayar teknolojisinin gelişimine kadar uygulama alanı bulamamıştır. İlk olarak düzeltme faktörlerini içine alan Ludwig ve Ginzler (1944) tarafından bir kaldırıcı yüzey metodu birtakım kısıtlar çerçevesinde ortaya atılmıştır (Jarzyna vd., 1996). Bu araştırmacılara ait metot, sadece üç kanatlı pervanelere uygulanmıştır. Kanat kesitleri ise, simetrik ana hatlara ve dairesel sehim hatlarına sahiptir. Hidrodinamik hatve açısının doğrudan kaldırıcı hat metodu ile belirlendiği varsayılmaktadır. Pervane tarafından indüklenen hızlar kanat yüzeyi üzerinde hidrodinamik yük dağılımını temsil eden bağlı ve serbest girdaplara Biot-Savart kanunu uygulanarak hesaplanmaktadır. Sınır koşulu olarak bağlı hızın kaldırıcı yüzeye teğet olma şartı kabul edilmiş ve kanat kesitine ilave bir sehim değeri verilerek kesitin orta noktasında bu koşulun uygulandığı varsayılmıştır. Teoride çok fazla basitleştirmeler mevcut olmasına rağmen, Ludwig ve Ginzler (1944)'e ait kaldırıcı yüzey düzeltmeleri 1950'lerde ve 1960'ların başlarında pervane dizaynı için pratik bir araç olarak uygulanmıştır. Son zamanlarda, yapılan analizlerde Ludwig ve Ginzler'e ait düzeltmelerin hidrodinamik olarak daha fazla yüklü pervane tasarımları için doğruluğu kabul edilmektedir (Breslin ve Andersen, 1994).

Kanat kesitlerinin hidrodinamik hatve açısını, sehim hattı üzerinde radyal ve kort yönünde indüklenmiş sirkülasyon dağılımlarını ve kanat şeklinin etkisini göz önünde bulunduran basit bir kaldırıcı yüzey metodu, Guilloton (1955) tarafından geliştirilmiştir. Guilloton'un kullandığı girdap sisteminde bağlı girdap yüzeyi, 20 derece aralıklara bölünmüş 5 adet radyal girdap hattı yerine konulmaktadır. Bu 5 adet radyal girdap hattı, düzenli helisel 6 adet serbest girdap hatları ile desteklenmektedir. Bu girdap sistemleri, kaldırıcı yüzey üzerindeki bağlı sirkülasyon dağılımını temsil etmektedir. Guilloton, kaldırıcı bir hat tarafından indüklenmiş hıza bağlı boyutsuz katsayılar şeklinde olan kaldırıcı yüzey üzerindeki 30 nokta için indüklenmiş hızı Biot-Savart kanunu ile hesaplamıştır. Elde edilen bu değerler, kaldırıcı yüzey düzeltme faktörlerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır.

Daha sonra Pien (1961) tarafından geliştirilen kaldırıcı yüzey algoritması ilk olarak bilgisayar

ortamında uygulanmıştır. Pien'in modelinde kaldırıcı yüzey, pervane kanadına benzer bir şekle sahiptir. Hidrodinamik hatve açısının radyal dağılımı ve bağlı sirkülasyonun radyal dağılımı kaldırıcı hat metodundan elde edilmektedir. Bu yöntemde kanat kesitlerinin kort boyunca olan sirkülasyon dağılımı keyfi olarak dizayn gereksinimlerine göre seçilebilmektedir. İndüklenmiş hızların hesabı Biot-Savart kanunu yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmanın sonucunda kanatların simetrik olması durumunda kanat sehimi için kaldırıcı yüzey düzeltmesinin tam olarak uygun değerler verdiği, kanadın simetrik olmaması durumunda ise kanat hatvesi için ilave bir kaldırıcı yüzey düzeltmesine gereksinimin olduğu vurgulanmıştır. Diğer önemli bir sonuç ise, sehim için yapılan kaldırıcı yüzey düzeltmesinin değerinin kort boyunca değişmesidir. Örneğin, üç boyutlu akış ortamında çalışan bir kanada ait sehim hattı, iki boyutlu akış içinde çalışan bir kanat profilinin sehim hattına geometrik olarak benzer değildir (Jarzyna vd., 1996).

Morgan vd. (1968), kaldırıcı hat metodundan elde ettikleri sonuçları daha kullanışlı bir hale getirmek için kaldırıcı yüzey teorisinin sonuçlarına dayanan bir düzeltme faktörleri dizisi öne sürmüşlerdir. Çalışmada çözülen problem; kanat sayısı, yük dağılımı, alanı, çalıklığı ve kort dağılımı verilen bir pervane için gerekli olan iş, kanat sehim dağılımını ve ideal hücum açısını belirlemektir. Öne sürülen metotta, akışkan viskozitesiz ve sıkıştırılamayan akışkan olarak, serbest akım hızı ise eksene göre simetrik ve pervane ize uyumlu olarak kabul edilmektedir. Pervane kanatları; yük etkileri için bağlı girdaplar, kalınlık etkileri için kaynak/kuyu dağılımları ile temsil edilmektedir. Bağlı girdaplardan saçılan serbest girdaplar, akım yönünde sabit hatve ve çapa sahip helisel hatlar şeklindedir. Ancak serbest girdapların hatvesi radyal yönde değişmektedir. Kanat üzerindeki sınır koşulu lineerleştirilmektedir. Kanadın hatve değeri ve takip eden girdap tabakaları Lerbs'in klasik kaldırıcı hat teorisinden (Lerbs,1952) elde edilmektedir.(Lerbs'in klasik kaldırıcı hat metodu daha sonra Güner (1994) tarafından geliştirilmiş olup, Güner vd.(2001) ile Çelik ve Güner (2006)'çalışmalarında uygulama alanı bulmuştur.). Tüm analiz, NACA a=0.8 mean line'a bağlı kort yönündeki yük dağılımı için icra edilmektedir. Pervane göbeğinin küçük olduğu ve ihmal edildiği varsayılmaktadır. Bu metot, kanadı temsil eden kaldırıcı yüzey üzerindeki noktalarda yer alan hızlar üzerinde rol oynayan sirkülasyonu tanımlamak için gerekli olan integral denklemleri esas alır. Bu hızlar, Biot- Savart kanunu ile hesaplanabilmektedir. Bu metotta ayrıca hızın radyal bileşeni ihmal edilmektedir. Morgan vd.'nin bu yönteminde kaldırıcı yüzey teorisinden türetilen akım hızları ile kaldırıcı hat teorisinden elde edilen indüklenmiş hızlar karşılaştırılır. Bu karşılaştırmanın sonucu olarak iki geometrik düzeltme faktörü meydana gelir. Bu faktörlerden ilki maksimum sehim ordinatı değeri diğeri ise ideal hücum açısıdır. Morgan vd. dizayn için gerekli dataları

elde etmek için, boyutsuz göbek çapı $0.2R$ 'ye sahip hidrodinamik hatveli açık su pervane serilerini kullanmışlardır. Kaldırıcı hat metodundan elde edilen hidrodinamik yük ve hatve dağılımlarına dayanarak kaldırıcı yüzey hesaplamalarını gerçekleştirmişlerdir. Kaldırıcı yüzey düzeltmeleri, açınım alanı oranı 0.35-1.5 arasında değişen dört, beş ve altı kanatlı pervaneler için hesaplanmıştır. Bu pervanelerin hatve oranları 0.4-2.0 arasında değişmektedir. Pervanelerin dizaynı NACA 66 (modifiye edilmiş) kalınlık dağılımı ile birlikte NACA $a=0.8$ sehim değerleri ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Radyal kalınlık dağılımı lineer olarak alınmış ve kanat ana hatları Wageningen B pervane serilerine ait kanat şekillerinden farklı olarak uca doğru hafif genişletilerek seçilmiştir. Yıllar geçtikçe bu düzeltmelerin değeri, tüm dünyada yer alan araştırma ve dizayn merkezlerinde yapılan çalışmaların sonuçları ile desteklenmiştir. Bu teorilerin yaşı 35 yılı aşkın bir süre olmasına rağmen, halen pratikte başarılı bir şekilde uygulama alanı bulmaktadır (Jarzyna vd., 1996).

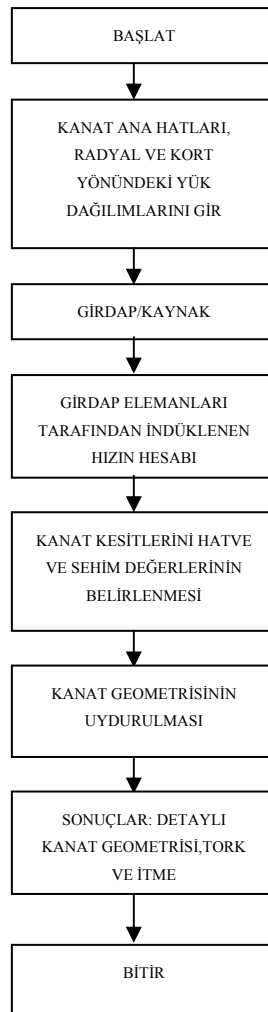
Kaldırıcı yüzey üzerinde kaynak-kuyu dağılımlarının kullanılması ise ilk olarak Sparenberg (1959) tarafından gerçekleştirilmiştir. Sparenberg, orijinali Prandtl tarafından keşfedilen potansiyel hızlanma teorisini kullanmış ve birbirine denk iki ifade geliştirmiştir. Bu ifadelerden biri, kanatların geometrisi ile kaynak-kuyu dağılımlarına bağlı olarak basınç dağılımı arasındaki ilişkinin kurulması, diğeri ise bağlı ve takip eden girdaplara dayanarak bu ilişkinin çözümlenmesidir. Basınca dayalı bu kaynak-kuyu kavramı daha sonra Pietrzak (1971) tarafından geliştirilmiştir. Pietrzak'ın bilgisayar uygulamasına dayanan bu çalışması ile daha önce Pien (1961) tarafından elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır. Ancak, buraya kadar sözü edilen çalışmalar sadece düzenli akım ortamında çalışan, eğriliğe sahip olmayan gemi pervanelerinin dizaynı için uygulanmıştır. Ayrıca, bu metotlarda, indüklenen hız üzerinde kanat kalınlığının etkisi hesaba katılmamaktadır.

Hanaoka (1962,1969a,1969b), değişkene bağlı olarak basınç veya ivmelenme potansiyeli kullanarak, titreşim gösteren ve aynı zamanda iz içinde çalışan bir pervane için lineerleştirilmiş kaldırıcı yüzey teorisini ilk kullananlar arasında görülmektedir. Düzgün akım ortamında çalışan pervaneler için lineerleştirilmiş teori Sparenberg (1959,1960,1984) tarafından basınç dipollerine bağlı girdap modelleri kullanılarak verilmiştir. Daha sonra Sparenberg'in çalışması Verbrugh (1968) tarafından MARIN'de programlanmıştır. Verbrugh çalışmayı, iz dağılımlarında meydana gelen değişken yük dağılımlarının tespiti için genişletmiştir. van Gent (1975), Verbrugh'un çalışmasını detaylı olarak sunarak kendi çalışması olan ve pervane kanatları üzerindeki zamana bağlı basınç dağılımının hesabında kullandığı metodu deneysel ölçümler ile desteklemiştir. Metotta, kanat kalınlığı ve göbek

etkisi ihmal edilmiş, her bir kaldırıcı yüzeyin geometrisi, eğrilige sahip olmayan, sabit hatveli düzgün bir helisel yüzey üzerindeki kanat hattı olarak tanımlanmıştır. Akışın homojen ve pervane eksenine paralel olduğu kabul edilmiştir. Hidrodinamik ilişkilerde lineer koşullara müsaade edilmiş ve kaldırıcı yüzey üzerinde basınç kaynak-kuyu dağılımlarını tanımlayan integral denklemlerin kurulması sağlanmıştır. Kaldırıcı yüzey teorisi kullanılarak ortalama itme ve tork değerlerinin hesabı için öne sürülen çalışmalar arasında Kerwin (1961), Pien (1961) Cox(1961), English (1962) ve Nelson (1964)'ın çalışmaları mevcuttur. Kaviteasyon alanında kaldırıcı yüzey metoduna dayalı olarak yapılan çalışmalardan ilki Widnall (1966) tarafından, basınç kaynağı ve kaynak/kuyu (doublet) tekniğine dayalı olarak lineer teori içinde üç boyutlu süperkaviteasyonlu hidrofoil problemine uygulanmıştır. Daha sonra Kerwin ve Lee (1978), kaldırıcı yüzey metoduna dayalı pervane-daimi olmayan-kuvvetler (PUF) kodu olarak bilinen bir bilgisayar kodu yardımıyla daimi ve daimi olmayan akış ortamında çalışan pervanelerin performans öngörüsü üzerine çalışma yapmışlardır. Ancak, bu çalışmada, kaviteasyonlu akışlar dikkate alınmamıştır. Daha sonra bu çalışma Lee (1979,1986) tarafından daimi olmayan kaviteasyon olayını da içerecek şekilde genişletilmiş ve çok yaygın olarak kullanılmıştır. Szantyr, J.(1979), düzensiz hız alanı içerisinde çalışan bir pervanede oluşan kuvvetler, kaviteasyon büyüklüğünün hesabı ve gemi gövdesi üzerinde indüklenen basınç darbelerinin öngörüsü için kaldırıcı yüzey teorisine dayalı bir analiz metodu sunmuştur. Bu metotta, pervane geometrisi ve pervanenin çalıştığı ortamdaki gerçek iz dağılımı başlangıçta bilinmektedir. Pervanenin, ideal bir akışkan içerisinde çalıştığı varsayılmaktadır. Modelde, girdap ve kaynak/kuyu dağılımları kullanılmıştır. Girdap yüzeylerinin dışında pervane etrafındaki akış için potansiyel akış kabulü yapılmaktadır. Pervane kanatları üzerindeki basınç dağılımı Bernoulli denklemi yardımı ile hesap edilmektedir. Hesaplanan basınç dağılımları, viskoz etkiler de hesaba katılarak düzeltilmekte ve tabaka kaviteasyon analizinde kullanılmaktadır. Düzeltme faktörleri, kanat kesitlerinin Reynolds sayısına bağlı olarak verilmektedir. Kaviteasyonlu pervane tarafından gemi üzerinde indüklenen basınç darbelerinin öngörüsünde ise, kaviteasyon kalınlığı, kaviteasyon hacim değişimleri ve kanat kalınlık etkilerini içeren hız potansiyelinin bulunduğu lineerleştirilmiş Bernoulli denkleminde faydalanılmaktadır. Szantyr'ın bu çalışması, bir bilgisayar programı ile icra edildiği için, hesaplama işlemini kolaylaştıracak düzeltmeler bilgisayar yardımı ile yapılmıştır. Szantyr, bu analiz metodunu 1984 yılında iz alanı bilinen iki adet konteyner ve iki adet tankerin pervaneleri üzerinde uygulamış ve elde ettiği sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır. Uskur pervaneler için kaldırıcı yüzey metoduna dayalı olarak geliştirilen bu çalışma, daha sonra, Szantyr ve Glover (1989) tarafından, daimi olmayan akışta nozullu pervanelerin

kavitasyon analizini ve gemi gövdesi üzerinde oluşturduğu kavitasyon kaynaklı basınç değişimlerinin analizini incelemek için geliştirilmiştir.

Greeley and Kerwin (1982), daimi olmayan akış ortamında çalışan pervanelerin kanat yüzeyi şekli, takip eden girdap iz deformasyonu ve pervane performans analizi için kaldırıcı yüzey metoduna dayalı bir çalışma yapmışlardır. Aynı zamanda, bu çalışmada, kesit giriş ucunda meydana gelen akım ayrılmasına ve kavitasyon başlangıcına etki eden viskoz etkiler yarı ampirik bir metot kullanılarak incelenmiştir. Daha önceki uygulamaları Kerwin ve Leopold (1964), Kerwin (1973) ve Kerwin ve Lee (1978) olan bu kaldırıcı yüzey metoduna ait akış şeması Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.5 Kerwin’in kaldırıcı yüzey hesaplama metoduna ait akış diyagramı

Bu yaklaşım, verilen bir yük dağılımına göre kanat geometrisinin dizaynı ile ilgili olduğu için, pervane kanadının yüzeyi başlangıçta bilinmemektedir. Pervane kanadı üzerindeki herhangi bir noktada toplam akış hızı; pervanenin teğetsel hızı, çevresel hızı ve pervane tarafından indüklenen hızların toplamı şeklinde tanımlanmaktadır. Kanat referans yüzeyinin başlangıç

şekli, kaldırıcı hat teorisinden elde edilen hatve açılara sahip düzgün helisel bir yüzey olarak kabul edilmekte ve yine bu teoriden elde edilen uygun sehim hatları üzerinde oluşturulmaktadır. Kanat eğiklik (rake) ve çalıklığı (skew) sahip olabilir. Kanat gerisinde yer alan serbest girdap yüzeyinin hatve dağılımının kaldırıcı hat teorisinden elde edilen hatve dağılımı ile aynı olması gerekli değildir. Bu nedenle, referans yüzeye kaynak ve girdap dağılımları yerleştirilir ve kinematik sınır koşulu uygulanır. Kinematik sınır koşulu, kanat referans yüzeyi üzerindeki noktalarda toplam akış hızının kanat sehim yüzeyine bir noktada paralel olmasını gerektirir. Kanat sehim yüzeyi, tüm kanat kesitlerinin sehim hatlarından meydana gelen yüzeydir. Girdap dağılımlarının, kaldırıcı hat teorisinden bilindiği varsayılmaktadır. Serbest girdap dağılımları ise bağlı girdap dağılımları bilindiği için sirkülasyonun korunumu gereği bilinmektedir. Kaynak dağılımları ise kaldırıcı hat teorisinden elde edilen hızlar yardımı ile hesaplanmaktadır. Pervaneye ait kesitlerin kalınlık dağılımı bilinmektedir. Girdap elemanları tarafından indüklenen hız Biot-Savart kanunu yardımı ile kaynak elemanları tarafından indüklenen hız ise kaynak potansiyelinin gradyeni alınarak hesaplanmaktadır. Greeley ve Kerwin (1982) tarafından ele alınan bu metotta, daha önce Kerwin ve Lee (1978) tarafından yapılan pervane ve pervane izini modelleyen kaynak/girdap grid sisteminin şeklinde değişiklikler yapılmıştır. Çünkü, Kerwin ve Lee (1978) tarafından yapılan modelde kullanılan eleman sayısı kanat kesitinin kort yönündeki hidrodinamik yük dağılımının temsili için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle, kanat gerisinde indüklenen hızların hesabının doğru bir şekilde yapılması için anahtar kanat üzerinde yoğun, anahtar kanat dışında kalan kanatlarda ise seyrek grid sistemi kullanılmıştır. Kaldırıcı yüzey teorisine dayalı bu metot özellikle geniş eğiklik ve eğrilığe sahip pervaneler için kullanışlı bir araç olarak kullanılmıştır. Metoda ait yaklaşım ve formüllere Greeley ve Kerwin (1982)'den ulaşılabilir. Breslin vd. (1982) ise kavitasyon kaynaklı gemi gövdesi üzerindeki basınç değişimlerini kaldırıcı yüzey teorisine bağlı olarak teorik bir şekilde incelemiş ve deneysel olarak karşılaştırmalarını yapmışlardır. Temel olarak 1986'ya kadar daimi olmayan akış ortamında çalışan pervane teorilerindeki gelişmeleri açıklayan iyi bir çalışma Kerwin (1986)'da sunulmuştur. Yine, Kerwin vd. (1986)'da, daimi olmayan tabaka kavitasyonunun deneysel ve analitik teknikleri üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Daha sonraki ilerlemeler, daimi ve daimi olmayan akış ortamındaki pervane kuvvetleri üzerinde kalınlık dağılımının etkisi ve kuvvet-serbest girdap sisteminin modellenmesi, pervane tarafından indüklenen hızların etkisi ve kavitasyon analizi üzerine olmuştur. Kaldırıcı yüzey teorileri üzerine çalışan araştırmacılar, takip eden girdapların yörüngelerinin kanatlar üzerindeki indüklenmiş kuvvetler ve akış karakteristiği için çok önemi olduğunu kabul etmişlerdir. Girdap akımları üzerine geniş bir

araştırma Sarpkaya (1989) tarafından yapılmıştır (Breslin ve Andersen ,1996). Buna bağlı olarak Ishii (1992), pervane kavitasyonu ve performans analizi için pervane girdap sisteminin sayısal modeline dayalı bir çalışma yapmıştır.

Kerwin vd.(1994) ve Kerwin vd.(1997), eksene göre simetrik bir yapı için bütünleşmiş bir sevk edicinin dizaynı için bir viskoz/potansiyel metot çiftini geliştirmişlerdir. Bu çalışmada, sevk ediciye ait kanat gürültüleri için bir RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) kodu, kanat kuvvetlerinin hesabı için ise bir kaldırıcı yüzey metodu kullanılmıştır. RANS çözümü toplam hız dağılımını hesabını gerçekleştirmekte, sevk ediciye ait akış ise pervanenin indüklediği hızdan çıkarılan toplam hız ile elde edilmiştir. Bunun için ise iteratif bir yöntem kullanılmıştır.

Griffin (1998), verimli pervane kanatları elde etmek için lineer olmayan bir optimizasyon metodu ile birlikte kavitasyonlu pervaneler için kaldırıcı yüzey metodunu kullanarak iki parçadan oluşan bir pervane analiz metodu ortaya çıkarmıştır.

Warren vd. (2000), sevk edici tarafından indüklenen manevra kuvvetlerinin öngörüsü için viskoz/potansiyel akış metodu çiftini geliştirmiştir. Gemi gövdesinin, takıntılarının ve nozulunun (şayet bir tanesi kullanıldığında) akış simülasyonu için bir RANS kodu kullanılmıştır. Hesaplanan zaman-ortalama RANS akış alanı, üç boyutlu bir daimi olmayan kaldırıcı yüzey programı ile elde edilmiştir. Bu program, zamanla değişen basınç ve kuvvetleri hesaplamaktadır. Zamana göre ortalama değeri alınan ancak konuma göre değişen kuvvetler daha sonra RANS çözümüne giriş değeri olarak aktarılmaktadır. Pervane kuvvetleri ve RANS akış alanı yakınsayana kadar problem çifti tekrar edilmektedir. Metot, efektif iz ve pervane-tekne etkileşimlerini dikkate alırken, şaft kuvvetleri ve tekne kuvvetlerinin dahil olduğu manevra kuvvetlerini hesaplayabilmektedir. Benzer şekilde, Black ve Michael (2003)'in çalışmalarında da daimi olmayan kanat kuvvetlerini hesaplamak için daimi olmayan bir kaldırıcı yüzey kodu (PUF-14) ile üç boyutlu bir RANS çözümü çifti kullanılmıştır.

Wang ve Yang (2001), bir kaldırıcı yüzey metodunu kullanarak SCP (Supercavitating Propeller) veya TCP (Trans Cavitating Propeller)'nin dizaynı için kullanılan sayısal bir metot iki boyutlu süperkavitasyonlu bir hidrofoilin performansı ile birleştirilmiştir. Bu araştırmacılar aynı zamanda kavitasyonlu pervaneler için hidrodinamik kuvvetler ve kavitasyon boyunun öngörüsü için bir kaldırıcı yüzey metodu geliştirmişlerdir.

Takinaci ve Atlar (2002), Szantyr'ın kaldırıcı yüzey metodunu düzgün olmayan akış ortamında çalışan pervane kanatlarının oluşturduğu düzensiz kuvvet ve momentlerin etkisini

azaltmak amacı ile Orbeck (1999) tarafından önerilen ve özel bir sevk sistemi olan TBP pervanesine uygulamışlardır. Hidrodinamik analiz için metot, TBP pervanesine adapte edilmiştir.

Choi ve Kinnas (2001,2003), daimi olmayan kaldırıcı yüzey kavitasyonlu bir çözücü ile üç boyutlu bir Euler çözücüsünü birleştirerek efektif iz tahmini geliştirmişlerdir. Kuvvetler Euler çözücüsü içinde pervane etkisini temsil etmek için kullanılmaktadır. Bu yolla metot, zamana ve yere göre efektif izleri hesaplayabilmektedir.

Son zamanlarda bilgisayar işlemci hızındaki artıştan dolayı pervane ve hidrofoiller etrafındaki akışın, tabaka kavitasyonu ve özellikle uç girdap kavitasyonunun analizinde üçüncü bir yöntem olan CFD metotlarının kullanımı, panel metotları ve kaldırıcı yüzey metotlarına alternatif veya karşılaştırma yapabilme imkanı vermektedir.

CFD yöntemlerinin temelini RANS çözücüsü olarak kullanılan sonlu hacim metodu oluşturmaktadır. Bu metotta sonlu hacim, sayısal bir ağ (mesh) üzerinde düğüm noktalarını çevreleyen küçük bir hacim olarak ele alınmaktadır. Sayısal ağlar, kısmi diferansiyel denklemler ile temsil edilmekte ve sayısal olarak çözülmektedir. Sonlu hacim metodunda, kısmi diferansiyel denklemler içinde yer alan hacim integralleri diverjans teoremi yardımı ile yüzey integrallarına dönüştürülmektedir. Sonlu farklar metoduna benzer şekilde hesaplamalar sayısal ağın oluşturulduğu geometri üzerinde yer alan ayrıklaştırılmış noktalarda (kontrol noktalarında) hesaplanmaktadır. Sonlu hacim metodunun avantajlarından biri, karmaşık şekilli sayısal ağlar için problemin kolay bir şekilde formüle edilmesine müsaade etmesidir. Metot, birçok hesaplamalı akışkanlar dinamiğine ait paket programlarda kullanılmaktadır. Bu programlardan biri akışkan uygulamalarında sıklıkla kullanılan FLUENT'tir. Bu program, aracılığı ile üç boyutlu geometrisi bilinen bir pervane üzerinde veya etrafındaki basınç, hız dağılımları ile sistemin tamamına veya bir parçasına etkiyen kuvvet bileşenleri hesaplanabilmektedir.

FLUENT, sınır koşulları verilen bir akışkan hacminin sonlu sayıda küçük ve birbirine komşu kontrol hacimlerinden oluştuğunu kabul eder. Akışkanın herhangi bir noktasındaki basınç, hız, sıcaklık vs. gibi özelliklerinin hesaplanabilmesi için tüm kontrol hacimlerinin her birinin üzerinde yukarıda sözü edilen yönetici kısmi diferansiyel denklemleri uygular. Bu denklemler momentum denklemleri ile kütle ve enerjinin korunumunu ifade eden denklemlerdir. Kontrol hacimlerinde yazılan kısmi diferansiyel denklemlerin oluşturduğu ve genellikle lineer olmayan sistemlerin çözülmesiyle sonuca ulaşılır. FLUENT bu denklem sistemlerini,

kullanıcı tarafından verilen tolerans aralığında yakınsayacak şekilde iterasyonla çözer. Yakınsama genellikle iki iterasyon arasındaki çözüm değerlerinin farkına bağlı uygulanır. Normalde tüm kontrol noktalarında denklemlerin tam olarak sağlanması gerçekleştirilemez ama önemli olan yeterli yakınsamanın sağlanmasıdır.

CFD metotları, pervane akışı ve türbülans modellemesine uygulanmasına rağmen, grid yoğunluğu ve üç boyutlu alanı hesaplama zorluğundan oluşan uzun hesaplama zamanı hala bir problem arz etmekte olup pervanelerin dizayn aşamasında bu metotların uygulamalarından önce uygun bir şekilde sözü edilen problemlerin çözülmesi gerekmektedir.

Nitekim, Dacles-Mariani vd. (1993) tarafından dikdörtgensel kesite sahip NACA0012 kesiti üzerinde yapılan CFD analizinde teorik hesaplamalar ile deneysel sonuçlar arasındaki uyumsuzluğun uç girdaba yakın bölgelerde grid yoğunluğunun verimsiz olmasından dolayı ileri geldiği belirtilmiştir.

Feng vd. (1998), gemi pervanelerinde uç girdabın CFD ile modellenmesini amaçlamışlardır. Bu araştırmacıların kullandığı modelde standart $k-\epsilon$ türbülans modeli ile RANS denklemlerinin çözümüne dayalı sayısal bir yaklaşım sunulmuştur. Deneysel sonuçlar ile sayısal sonuçların karşılaştırılması sonucu, öngörülerini iyileştirmek için kanadın uç bölgesinde yerel grid inceliğine ihtiyacın olduğu görülmüştür.

Berntsen vd.(2001), tabaka ve uç girdap kaviteasyonunu sayısal olarak modellemek için FLUENT programını kullanmışlardır. Uygulama olarak iki boyutlu NACA 0015 ve üç boyutlu NACA 66₂ – 415 hidrofoilini ele almışlardır.

Sanchez-Caja vd. (2001), $k-\epsilon$ türbülans modeli ile RANS denklemlerini çözerek nozullu bir gemi pervanesi etrafındaki sıkıştırılamaz viskoz akışı incelemişlerdir. Uygulamada Ka serisi bir pervane ile NSMB 19A nozulu analiz edilmiştir. Pervane ve nozul üzerindeki kaviteasyon şekilleri bir ilerleme sayısına göre, itme ve tork değerleri ise birkaç ilerleme sayısında verilmiştir. Kuvvet katsayıları ve hız dağılımlarına bağlı olarak elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum gösterdiği vurgulanmıştır.

Watanabe vd.(2003), daha önce Singhal vd. (2002) tarafından kullanılan bir metot ile iki farklı pervane (MP017 ve konvensiyonel Seiun-maru pervanesi) etrafındaki akışı kaviteasyonlu ve kaviteasyonsuz akış koşulları altında CFD metodu yardımı ile analiz etmiştir. Daimi akış için MP017 pervanesinden kaviteasyonlu/kaviteasyonsuz akış koşullarında elde edilen itme ve tork katsayılarının, daimi olmayan akış koşulu için Seiun-maru pervanesinin kanatları üzerindeki basınç dağılımının deneysel ölçümler ile iyi bir uyum gösterdiği, kanat yüzeyinde

ise kavitasyonun çıkış ucu civarında aniden yok olduğu tespit edilmiştir. Rhee vd. (2003) ise aynı araçlar ile bir hidrofil etrafındaki akışı analiz etmiş ve hidrofoil boyunca basınç dağılımının deneysel gözlemler ile uyumlu olduğunu görmüştür. Araştırmacılar, çalışmalarında FLUENT paket programını kullanmışlardır.

Gu ve Kinnas (2003), nozullu pervane ile zıt dönüşlü pervanenin beraber bulunduğu sevk sisteminin analizi için kaldırıcı yüzey ve sonlu hacimler metodlarının beraber kullanıldığı sayısal bir hesap metodunu sunmuşlardır. Benzer bir çalışma, Kinnas vd. (2004)'de gerçekleştirilmiş olup bu çalışmada sadece nozullu pervane etrafındaki akış modellenmiştir. Çalışmada, ayrıca, metottan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla desteklenmiştir.

Abdel-Maksoud (2003), standart bir $k-\varepsilon$ türbülans modeli ve tünel etkilerini kullanan bir akış kodu (CFX-TASCflow) kullanarak sayısal öngörüler sunmuştur. Çalışmada ele alınan kavitasyon modelinde, keyfi sayıda bileşenlerden oluşan çok fazlı akışkan yaklaşımına dayanan bir VOF (Akışkan Hacim metodu=Volume of Fluid) yöntemi kullanılmıştır. Bu yaklaşım, buhar oluşumunu ve kayboluşunu modellemek için kaynak terimleri ile buhar parçacık transport denklemini kapsamaktadır. Çalışmada, düzenli akım içinde çalışan beş kanatlı kavitasyonlu bir pervane için sayısal sonuçlar verilmiştir.

CFD için doğru veri ihtiyacı aynı zamanda kavitasyon tüneline yapılan incelemelerde yüksek hızlı video ve kamera teknolojisinin ilerlemesine de katkıda bulunmaktadır. Görüntü işleme yazılımı ve donanımındaki sürekli gelişmeler, klasik video kameralar ile görüntülenemeyen karmaşık ve yüksek hızlı akışlar olarak nitelendirilen akışları inceleme kabiliyetini arttırmaktadırlar. Sözü edilen akış olayları; kavitasyon başlangıcı, kabarcık gelişimi/patlama ve kavitasyon erozyon gibi yüksek hızlı akışları içermektedir.

Yüksek hızlı kameralar için, yüksek dereceli hızlarda uygun sayıda çözünürlük oluşturabilmek önemlidir. Etoh vd. (2003), 312x260 çözünürlükte 106 fps (frame per second)'ye kadar görüntü hızlarına ulaşan gelişmiş yeni bir yüksek hızlı kamerayı tanıtmıştır. Bu kamera, yeni bir görüntü toplama aracı ile donanmıştır. Daha çok sayıda çözünürlüğü arttırmak için gelişmeler yapılmaktadır. Bu tip bir kamera kullanarak bir kabarcığın patlama aşamalarının görüntülediği bir çalışma Sato (2003) tarafından yapılmıştır.

Yüksek hızlı video teknikleri, EROCAV projesi kapsamında geliştirilmiştir. Bu projenin amacı 4500 fps'ye kadar kayıt yapabilme kabiliyetine sahip hızlı bir dijital video kayıt sistemi yapmaktır (Bark vd.,2004). Teknik, tam ölçekte ve model ölçeğinde uygulanmıştır. Yapılan testlerden, kavitasyonun neden olduğu erozyonu tespit etme amacı ile ilgili olarak dijital video

kayıt sisteminin çok güçlü bir araç olduğu sonucu çıkarılmıştır. Kamera sistemleri ve metotları ile ilgili daha detaylı bilgi Tukker ve Kuiper (2004) tarafından verilmektedir.

Pereira vd. (2002,2004), INSEAN’da geliştirilen yeni bir kavitasyon şekli ölçüm yöntemini tanıtmışlardır. Bu teknik, yüksek çözünürlüklü resimleri dijital olarak işlemeye dayanmaktadır. Bu teknik, düzenli ve düzensiz akış ortamında çalışan model gemi pervaneleri üzerindeki tabaka kavitasyonu ölçümüne uygulanmıştır. Özellikle, yüksek hızlı gözlem tekniği ile büyük ölçekteki buhar yapılarının geri tepmesi ile tabakanın içeri doğru patlamasını gözlemlemek mümkün olmaktadır.

Kavitasyon tarafından gemi bünyesi üzerinde indüklenen basınç hesapları için yapılan çalışmalar ise sınırlı sayıdadır. Çünkü kavitasyon olayının önceden tespiti, kavitasyon kaynaklı gemi gövdesi indüklenen basınç hesaplarının önemli bir kısmını oluşturmaktadır. van Manen (1972), tarafından pervane ve gemi arasındaki etkileşim üzerinde kavitasyon etkileri deneysel olarak incelenmiş, özellikle tabaka kavitasyonu oluşumunun gemi gövdesi üzerinde meydana gelen basınç darbelerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Huse (1972), bu konu üzerinde yaptığı bir çalışmada, yapay kavitasyon hacimleri uyarlanarak pervane kanadı etrafındaki basınç alanının bir kanat üzerindeki tabaka kavitasyonunun gelişmesi ve patlaması ile büyük oranda değişebileceğini göstermiştir. Bu çalışmada kavitasyon, eğrisel bir fonksiyon boyunca şiddeti zaman ile değişen kaynaklar yardımı ile temsil edilmiştir. Ancak Huse’in bu teorisinde kavitasyon geometrisinin bilindiği varsayılmıştır. Noordzij (1974,1976), Huse (1972)’nin çalışmasından farklı olarak kavitasyonlu pervane tarafından indüklenen basınç darbeleri ile ilgili yaptığı çalışmalarda kavitasyon şeklini belirlemek için bir teori geliştirmiştir. Bu teori yardımı ile indüklenen basınç darbeleri üzerinde kavitasyon geometrisinin etkisi hem deneysel hem de teorik olarak analiz edilmiştir. Daha sonra, Noordzij (1978), Vorus (1975,1976) tarafından kavitasyonsuz bir pervane için gemi gövdesi üzerinde indüklenen basınçların hesabı için yaptığı çalışmayı, gemi gövdesini düz bir düzlem gibi kabul ederek kavitasyonlu bir pervane için genişletmiştir.

Son zamanlarda ise Kinns vd.(2002) tarafından kavitasyon kaynaklı indüklenmiş tekne üzerindeki basınçların hesabında viskozitesiz sıkıştırılabilir akış için dalga denklemine dayalı olan ve hidro-akustik alanında da geniş olarak kullanılan yeni bir yaklaşım sunulmuştur. Bu çalışmada araştırmacılar, Helmholtz denklemine dayanan gemi gövdesi üzerindeki kuvvet dağılımı, katı sınır faktörü ve pervane tarafından indüklenmiş dalgalanan basınçlar üzerinde akışkan sıkıştırılabilirliğinin etkisini analiz etmişlerdir. Serbest bir yüzey ile birlikte elipsoid yapılar üzerindeki indüklenen basınçları hesaplamak için bir BEM metodunu kullanmışlardır.

Pervane, dalgalanan kuvvetleri temsil eden bir dipol ve kavitasyon etkisini temsil eden bir kaynak ile temsil edilmiştir. Katı sınır faktörü dağılımı, dalga boyunun tekne boyundan daha geniş oranda olduğu aralıktaki sıklığa bağlıdır. Su üstü gemiler için, bu olay Laplace denklemini kullanarak hesaplanan katı sınır faktörü dağılımının dışına çıkılmasına neden olur. Bu yaklaşım, pervaneyi temsil eden kaynak veya kuyu ve dipollerin etkisini hesaba katmak için Spivaack vd. (2004) tarafından genişletilmiştir. Teknenin hareketi üzerinde etkili olduğu kadar tekne yüzeyi üzerinde indüklenen basınçlar hem batmış hem de yüzen elipsoidal tekneler için hesaplanmıştır.

Son yıllarda, kabarcık çekirdek dinamiğine bağlı ölçek etkileri, kavitasyon başlangıcı ve gürültü üzerine yapılan araştırmalar için sayısal tekniklerde önemli ilerlemeler gerçekleşmiştir. Bu yaklaşımlarda kavitasyon, kabarcık çekirdeği ile basınç alan değişimleri arasındaki etkileşim şeklinde dikkate alınmaktadır. Chahine (2004), bu tip sayısal tekniklerdeki gelişmeleri tanıtan bir çalışma yapmıştır.

Korkut vd. (1999), pervanelerdeki kavitasyon başlangıcı ve gürültü üzerinde viskozite ile ölçek etkilerini sistematik olarak deneysel bir çalışma ile incelemişlerdir. Bu çalışmada, Meridian tip bir pervanede oluşan kanat ucu girdap ve tabaka kavitasyonu ve pervane gürültüsü ölçülmüş ve bunlar üzerindeki serbest akım türbülansının, giriş kenarındaki pürüzlülüğün ve sudaki çözünmüş gaz oranının etkileri araştırılmıştır.

Fukaya vd. (2003), çok fazlı akış kavramına dayanan sayısal bir metodu incelemişlerdir. Bu çalışmada havanın yoğunluk ve momentum değerlerinin ihmal edildiği varsayılmaktadır. Kabarcık dinamiği için Rayleigh-Plesset denklemi kullanılmıştır. Bu metot, eksenel akışlı bir pompaya uygulanmıştır.

Hsiao ve Chahine (2003,2004a), kavitasyon kabarcıklarının küresel bir şekle sahip olduğu varsayımı ile çekirdek dinamiğini ele almışlardır. Bu model, atalet, sıvının sıkıştırılabilirliği, kabarcık bileşeninin sıkıştırılabilirliği, sıcak akışkan ve kabarcık arasındaki kayma hızı ve kabarcık yüzeyi boyunca düzensiz basınç alanı gibi özellikleri kapsamaktadır. Araştırmacılar, kabarcık yüzeyi üzerindeki sıvı basınç dağılımını göz önünde bulundurmak için bir model ileri sürmüşlerdir. Bu model, kabarcık merkezinde basıncı kullanan klasik küresel kabarcık modelinin üzerinde önemli bir gelişme olarak kabul edilmiştir. Bu kabarcık modeli; kavitasyon başlangıcı, ölçek, kabarcık yığılması ve kavitasyon kaynaklı gürültü çalışmaları için verimli bir araç olarak ele alınmıştır.

Kabarcık parçalanma davranışının deneysel incelemeleri Choi ve Chahine (2003b,2004) ve

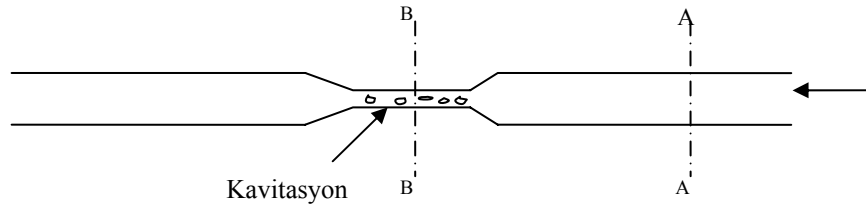
Rebow vd. (2004)'de gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak gözlemlenen bu davranışlar, girdap kavitasyonunun başlangıcındaki gürültü, kabarcıkların parçalanması ve/veya parçalanmadan sonra jet yapıların şekil almasından dolayı meydana gelebilir olduğunu kabul eden bir hipotezi desteklemiştir. Rebow vd. (2004), bir foil gerisinde uzanan uç girdabın akış alanını gösteren ve kabarcıklar üreten bir laser kullanarak deneyler yapmıştır.

Aynı zamanda gemi pervanelerindeki hidro-elastik alanda sıkıştırılabilirlik etkilerinin nemi Testa vd. (2005) tarafından ifade edilmiştir. Çalışmada hayali bir rotor ve gerçek bir gemi pervanesi için sayısal sonuçlar verilmiştir. Farklı pervane akış modellemesinin etkisi ve özellikle gürültü analizi üzerinde etkili olan pervanenin indüklediği takip eden iz dağılımları incelenmiş ve su içinde gürültü yayılmasına etki eden sıkıştırılabilirlik özellikleri tanımlanmıştır.

3. KAVİTASYON

Kavitasyon, su veya herhangi bir akışkan içerisindeki hız artışı veya bu akışkan içerisinde hızlı hareket eden herhangi bir cisim nedeni ile oluşan gözlenebilir faz değişim olayıdır. Bernoulli prensibine göre, akışkan içerisindeki hız artışı basıncın azalmasına neden olur. Daha düşük basınç ise akışkan içerisinde soğuk kaynama riski (kaynama noktası) değişmez anlamına gelir. Başka bir deyişle, basınçtaki azalma suyun kaynama noktasını ortam sıcaklığına kadar düşürebilir. Bu durumda içinde su buharı ve erimiş gazlar bulunan, hava kabarcıkları içeren bir tür soğuk kaynama meydana gelir. Bu olay “kavitasyon” olarak bilinir. Kavitasyon, kaynama olayından farklı bir olaydır. Çünkü kaynama olayındaki buharlaşma sabit basınçta sıcaklık artırımı ile meydana gelirken kavitasyon olayındaki buharlaşma ise hemen hemen sabit sıcaklıkta basınç düşümü ile meydana gelir. Buharlaşmanın meydana gelmesi için bir miktar ısı gerekir, ancak kavitasyonlu akışta bu miktar çok küçüktür.

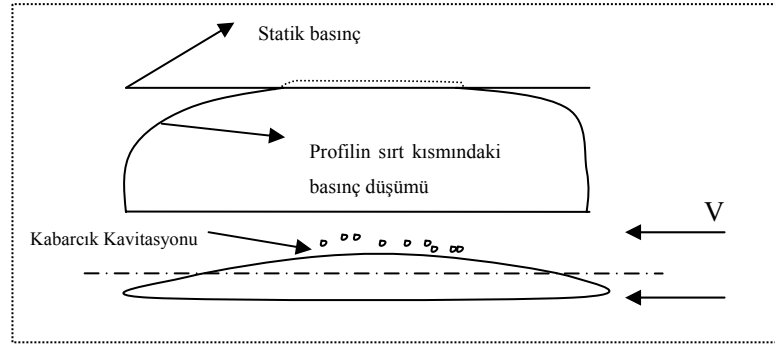
Olayı daha iyi kavrayabilmek için, Şekil 3.1’de gösterildiği gibi içerisinden su geçen bir boru ele alınmaktadır. A-A kesitinden birim zamanda belirli bir miktar su düşük hızda geçmektedir. B-B kesitinde ise boru daralmaktadır. Süreklilik prensibine göre yine aynı miktarda su birim zamanda B-B kesitinden geçmek zorunda olduğundan akışkanın hızı artar ve böylece su hızlanır. Akıştaki bu hızlanmayı oluşturan kuvvet A-A kesiti ile B-B kesiti arasındaki basınç farkıdır. B-B kesitindeki basınç, A-A kesitindeki basınçtan daha azdır. Dolayısıyla B-B kesitinde kaynama riski vardır. Yeterince yüksek hızlarda kaynama noktası su sıcaklığına kadar düşer ve su kaynamaya başlar. Buhar kabarcıkları akımla birlikte taşınır. Boru genişlediğinde suyun hızı azalır, buna bağlı olarak basınç ve kaynama noktası yeniden yükselir. Artan basınç karşısında kabarcıkların aniden patlamasıyla boru çeperinde sert etkiler oluşur. Bu darbeler öylesine kuvvetlidir ki çoğu kez duyulabilir ve meydana getirdiği kavitasyon erozyonu ile malzemeyi aşındırabilir.



Şekil 3.1 Daralan bir boru içindeki kavitasyon olayı

Bir gemi pervanesine ait kanat kesiti üzerinde kavitasyon oluşumu ise Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Pervane kanadına ait kesit borunun çeperi gibi düşünüldüğünde, akım

kesitin giriş ucundan belirli bir hızda geçer. Kanat kesiti, suyun akış yönünde kalınlaşır. Dolayısıyla kanat kesitini geçmek için suyun hızı artmak zorundadır. Yerel basınç ile buna bağlı olarak kaynama noktası düşer ve kavitasyon oluşur. Hava kabarcıkları akım ile kanat kesit yüzeyinde taşınırken kesit kalınlığı da azalır ve basınç artışı ile kabarcıklar patlar. Böylece, kavitasyon olayı meydana gelir. Akış hızındaki artıştan dolayı kanat kesitinin emme tarafında kavitasyon gelişebilir. Burada, kesit kalınlığı maksimumdur. Düşük kalınlık/kord uzunluğu (t/c) oranına sahip ince bir kesit az miktarda basınç düşümüne neden olur. Bu kesitin kavitasyon riski, daha yüksek t/c oranına sahip kalın bir kesite göre azdır. Burada ele alınan durumda akım hatları kesite paraleldir. Fakat bu, gemi arkasındaki pervane için normal bir çalışma hali değildir. Çünkü, bu bölgede düzensiz girdaplar nedeni ile iz alanı düzgün değildir. İz alanı tekne yüzeyi ile su arasındaki sürtünmeden, tekne formundan ve gemi tarafından oluşturulan yüzey dalgalarından etkilenmektedir.



Şekil 3.2 Bir kanat kesiti etrafındaki akım ve kavitasyon oluşumu

3.1 KAVİTASYON ÇEŞİTLERİ

Kavitasyon olayını kontrol eden ana parametre basınç gradyenidir. Ancak, kavitasyon çok farklı şekillerde görülür ve etkileri karmaşıktır. Gemi pervanelerinde görülen kavitasyon türlerini genel olarak aşağıdaki gibi iki grupta toplamak mümkündür.

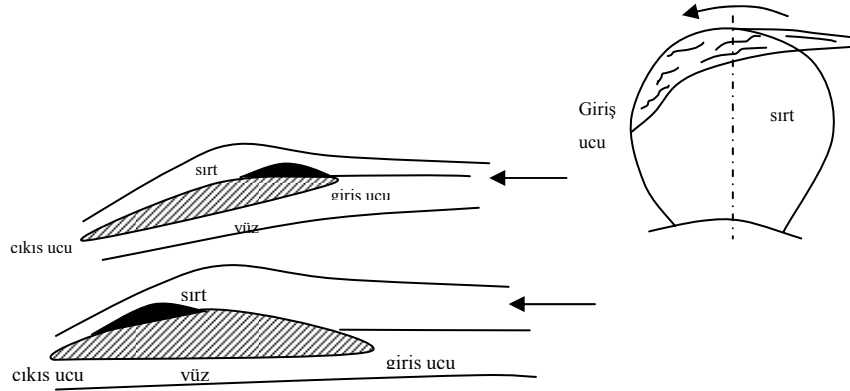
- 1-) Pervane kanadı üzerinde oluştuğu konuma göre kavitasyon çeşitleri
- 2-) Fiziksel görünüşüne göre kavitasyon çeşitleri

3.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştugu Konuma Göre Kavitasyon Çeşitleri

3.1.1.1 Sırt Kavitasyonu

Sırt kavitasyonu genellikle pervane kanat kesitlerinin pozitif hücum açılarında çalışması durumunda kesitin giriş ucu civarında, emme kısmında, küçük hatvelerde, ilerleme hızının

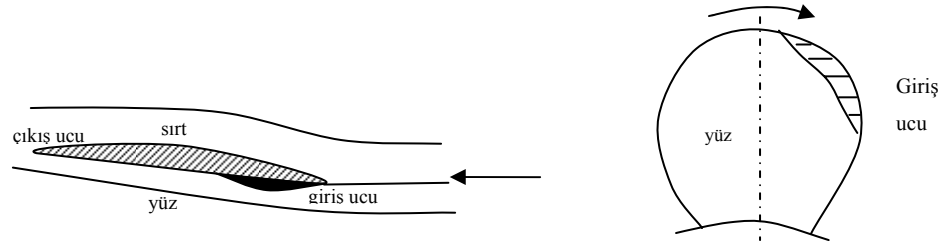
sıfır ya da çok küçük olduğu ağır yükleme şartlarında oluşan kavitasyon türüdür. Kanat kesit profilinin sıfır dereceye yakın hücum açılarında çalışması durumunda kesitin çıkış ucu civarında, emme kısmında maksimum kesit kalınlığının gerisinde de bu tür kavitasyon meydana gelir.



Şekil 3.3 Sırt kavitasyonu

3.1.1.2 Yüz Kavitasyonu

Yüz kavitasyonu genellikle pervane kanat kesitlerinin negatif hücum açılarında çalışması durumunda kanat kesitlerinin giriş ucu civarında basınç kısmında oluşan kavitasyon türüdür. Burada akım kanat kesitinin giriş ucuna yakın yüz kısmında hızlanır ve kavitasyon başlar.



Şekil 3.4 Yüz kavitasyonu

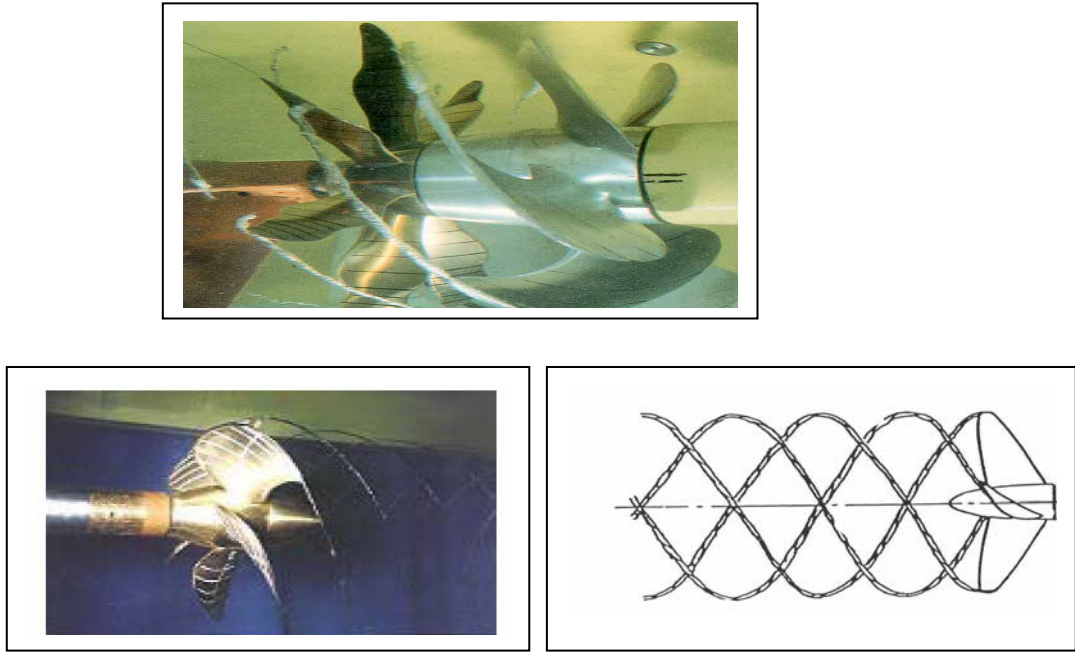
3.1.2 Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavitasyon Çeşitleri

3.1.2.1 Uç (Tip) ve Göbek (Hub) Girdap (Vortex) Kavitasyonu

Pervane kanatlarının basınç kısmındaki yüksek basınç ve emme tarafındaki düşük basınç akımının kanat ucundan ayrılmasına neden olur. Böylece her kanadın ucunda ve pervane göbeğinde girdaplar oluşur. Yüksek devirli pervanelerde ve yüksek iz katsayısı içinde çalışan pervane kanatları üzerinde şiddetli girdaplar meydana gelir. Dönme esnasında, merkezkaç

kuvvetinin etkisi ile girdap merkezindeki basınç akışkanın buharlaşma basıncının altına düşmekte ve kavitasyon oluşmaktadır.

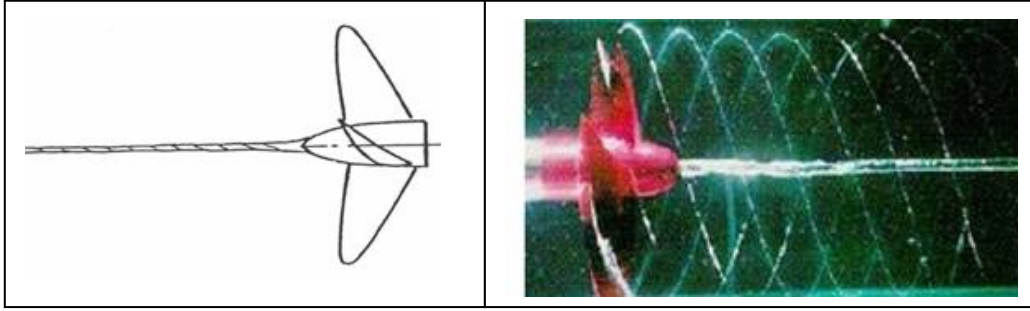
Uç girdap kavitasyonu, ilk olarak pervane kanadının uç kısmında belirli bir uzaklıkta ortaya çıkar. Genellikle ilk meydana gelen kavitasyon çeşididir. Bu özelliğinden dolayı “bağlı olmayan-serbest girdap” olarak da adlandırılır. Serbest girdaplar, ya yüksek kanat yüklenmelerinde ya da düşük kavitasyon sayılarında meydana gelir ve şiddetli etkiye sahiptir. İlk oluştuğu andan itibaren devir sayısının artması ile yavaş yavaş kanat ucuna doğru hareket eder ve sonunda sanki kanat ucunun bir parçası şeklinde bu kısma tutunur, kanat ucu gerisinde kendisini bir helis şeklinde gösterir (Şekil 3.5). Bu kavitasyon çeşidinin başlangıcını tayin etmek kavitasyon incelemeleri içerisinde yer alan en zor problemdir. Çünkü uç girdap kavitasyonu hem çekirdek oluşumuna hem de viskoz ölçek etkilerine hassas bir kavitasyon türüdür. Bu kavitasyon türü özellikle donanma gemilerinde hıza ve ilk harekete geçme anına etki etmektedir.



Şekil 3.5 Uç girdap kavitasyonu ((Kuiper, 1998), [3])

Göbek girdap kavitasyonu ise her bir pervane kanadının kök kısmından göbeğe doğru saçılan ve akış içindeki moleküller arasındaki bağı bozan zayıf bölgeleri oluşturan kavitasyon çekirdekleri (nuclei) nedeni ile oluşur (Şekil 3.6). Bu kavitasyon tipi, aynı zamanda, pervane arkasındaki dümene de zarar verebilir. Bundan korunmak için, pervane kanatlarına veya dümene pervane göbek finleri (PBCF) konulmaktadır. Bu yapılar, akım hızını pervaneye doğru arttırarak akımı düzeltir. Ancak, finlerin dezavantajı her takıntı gibi tekne direncini

arttırmasıdır.



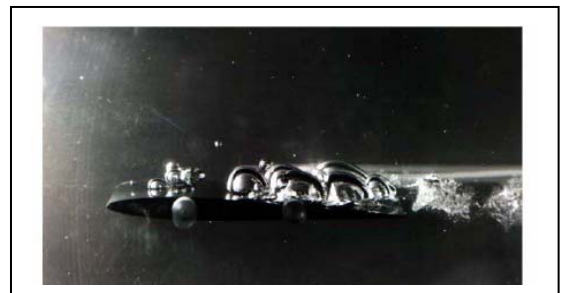
Şekil 3.6 Göbek girdap kavitasyonu ((Kuiper, 1998), [3])

3.1.2.2 Kabarcık (Bubble) Kavitasyonu

Bu tür kavitasyonda, akışkan içinde bulunan küçük gaz çekirdekleri düşük basınç bölgesine doğru yayılmaktadırlar. Bu çekirdekler, akışkan ile birlikte hareket ettiklerinden dolayı kabarcık kavitasyonuna “seyahat eden-hareketli kavitasyon” da denilmektedir. Bu tip kavitasyon üzerine ilk çalışma Knopp ve Hollander tarafından 1948 yılında yapılmıştır (Kuiper,1998). Bu araştırmacılar yüksek hızlı fotoğraf tekniğini kullanarak yarı küresel bir yapı üzerinde kabarcık kavitasyonu oluşumunu gözlemlemişlerdir.

Şekil 3.7’de gösterilen kabarcık kavitasyonu, kanat kesidinin kort uzunluğunun ortasında basıncın düşük olduğu yerde, yüksek emme basıncına neden olan basınç dağılımının etkisi ile oluşur. Bu nedenle, kanat kesit sehim dağılımı ve kalınlığı, kabarcık kavitasyonunun oluşumunda önemli bir rol oynamaktadır. Kanat kesitlerinin kısmen ince ve küçük hücum açılarında çalışması durumunda da kabarcık kavitasyonu meydana gelmektedir. Bu tür kavitasyonda oluşan kabarcıklar büyüyerek kanat yüzeyinde patlamaya başlarlar.

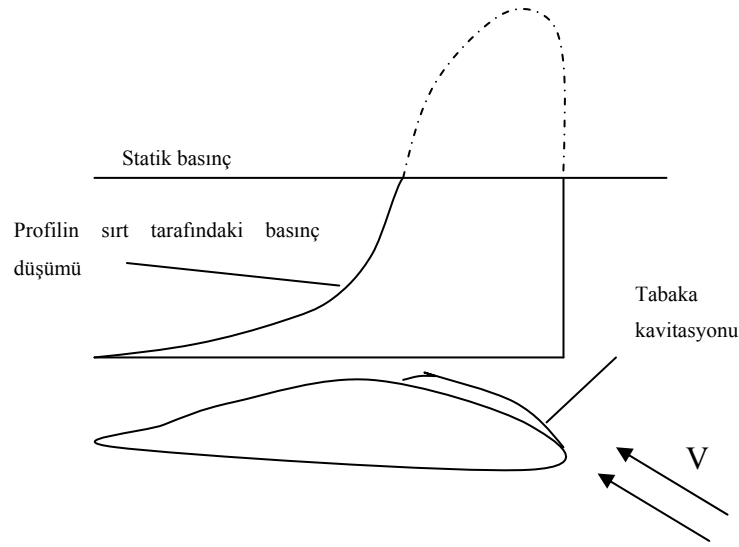
Model ölçeğinde yapılan çalışmalarda, yüksek orandaki kavitasyon çekirdeklerinin etkisi ile bu tip kavitasyonun şiddetli gürültüye sebep olduğu, ancak erozyon yönünden gürültüye göre etkisinin daha az olduğu görülmüştür (Kuiper, 1998) .



Şekil 3.7 Kabarcık kavitasyonu [5]

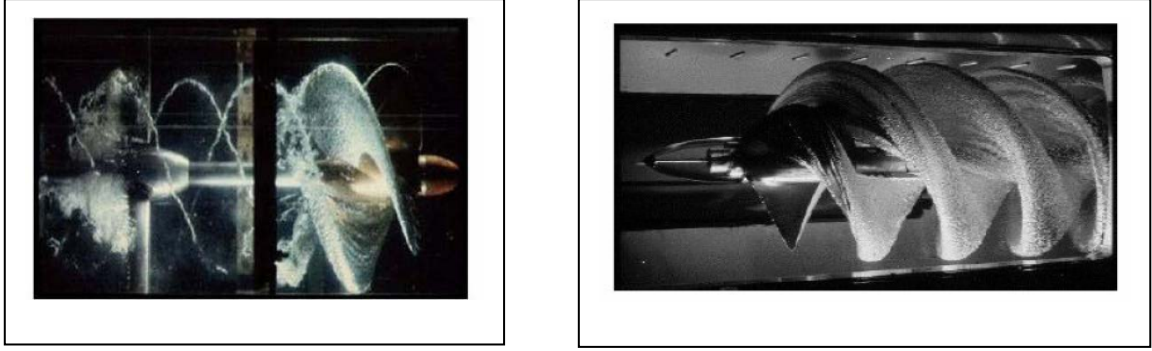
3.1.2.3 Tabaka (Sheet) Kavitasyonu

Şekil 3.8’de gösterildiği gibi, büyük hücum açısında çalışan bir pervane kanat kesiti üzerindeki basınç dağılımı şiddetli ve ters bir basınç gradyenine sahip olduğunda akım kesitten ayrılır. Daha sonra kesitin emme tarafında basınç dağılımı değişir ve giriş ucuna yakın bir yerde düşük basınç yüksek bir değere ulaşır. Yani maksimum bir emme meydana gelir. Burada minimum basınç buhar basıncından daha düşük olduğu için tabaka kavitasyonu meydana gelir. Bu şekilde oluşan tabaka kavitasyonu kanat kesitine tutunur ve akım tabaka etrafında hareket eder. Tabaka kavitasyonunun bu şekli “kısmi kavitasyon” olarak da adlandırılır. Şayet oluşan kavitasyon kesitin giriş ucunu geçerek basınç tarafına doğru uzanırsa oluşan bu tabaka kavitasyonu “süperkavitasyon” olarak tanımlanır.



Şekil 3.8 Bir pervane kanat kesiti üzerindeki tabaka kavitasyonu oluşumu

Şekil 3.9’da iki farklı kavitasyon tüneline oluşumu gösterilen tabaka kavitasyonu, uç girdap kavitasyonunu takiben pervane yüklemesinin artması sonucu oluşan bir kavitasyon çeşidi olup, görülen iki etkisi vardır. Bunlardan ilki, bu kavitasyonun gelişmesi ve daha sonra patlaması ile akışkan içinde basınç dalgalanmalarına neden olması, diğeri ise kesitin çıkış ucunda bulut kavitasyonunun oluşumuna öncülük ederek pervane malzemesi üzerinde erozyona neden olmasıdır. Kavitasyon kaynaklı titreşim problemi bu tip kavitasyon nedeniyle oluşur. Gemi gövdesi, rijit bir yapı olduğundan tabaka kavitasyonunun ürettiği basınç dalgalanmalarını bünyesinde toplar. Böylece, gemi gövdesinde büyük kuvvetlerin dolayısı ile titreşimlerin oluşmasına neden olur. Bu olaya serbest yüzey etkisi de dahil olursa sistem daha karmaşık hale gelir.



Şekil 3.9 Tabaka kavitasyonu [3]

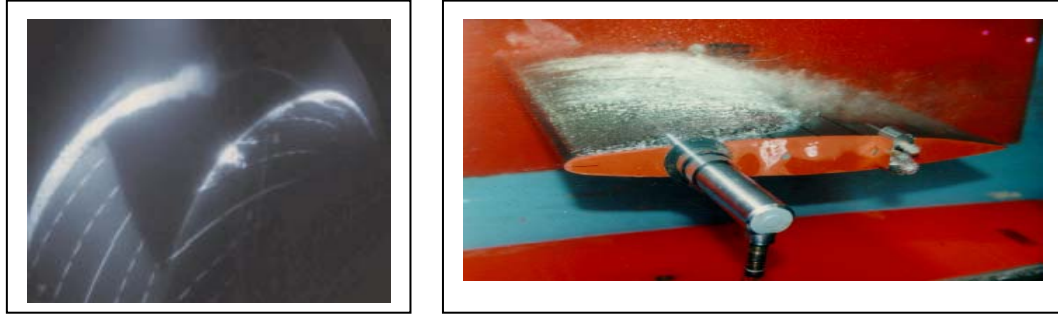
Tabaka kavitasyonu sonucu tekne üzerinde indüklenen basınç dalgalanmalarının analizinde ana problem, kavitasyon alanı veya hacminin belirlenmesidir. Çünkü, basınç dalgalanmaları kavitasyon hacminin zamana göre değişimi ile orantılıdır.

Lineer ve lineer olmayan kavitasyon teorisi içinde düzensiz akış içinde çalışan iki ve üç boyutlu hidrofoiller ile pervanelerde görülen tabaka kavitasyonunun önceden tahmini için daha önce de örnekleri verilen birçok sayısal teknik ve deneysel çalışmalar mevcuttur. Tabaka kavitasyonunun önceden tahmini hidrodinamik dizayn ve değerlendirme aşamasında son derece önemli olduğundan, tabaka kavitasyon koşullarını temsilen model deneyleri MIT (Massachusetts Institute of Technology)'de Kerwin (1994) tarafından gerçekleştirilmiştir. Franc ve Michel (1985), Le vd. (1993a,1993b) Kato (1994), Brewer ve Kinnas (1997) tarafından iki boyutlu hidrofoillerde meydana gelen tabaka kavitasyonu için deneysel çalışmalar yapılmıştır.

3.1.2.4 Bulut (Cloud) Kavitasyonu

Bulut kavitasyonu genelde tabaka kavitasyonunun gelişimini takiben “sis” veya “bulut” görünümlü küçük kabarcıklar şeklinde, çoğunlukla tabakanın çıkış ucunda ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.10). Bu nedenle, bulut kavitasyonu, “daimi olmayan tabaka kavitasyonu (unsteady sheet cavitation)” olarak da adlandırılmaktadır. Bu kavitasyon tipi, pervane kanat kesiti üzerinde ek olarak üretilen bir sehîm meydana getirir veya kanadın iz değerinin maksimum olduğu durumdan ayrıldığında ortaya çıkan sehîm artırımını devam ettirir. Bu durum ise, kanat üzerinde yerel yük artışına neden olup, kavitasyon oluşumuna olan eğilimi artırır. Kararlı bir kavitasyon tabakasının arka ucunda veya tabakanın kararsız davranışının bir sonucu olarak meydana gelen bu kavitasyon çeşidinin gelişim aşamasını kontrol eden bir mekanizma belli değildir, ancak baskın olan bir görüş mevcuttur. Bu da, tabaka kavitasyonunun uç kısmında ve içinde bir “re-entrant jet”in oluşmasıdır. Bazı zamanlarda, bu

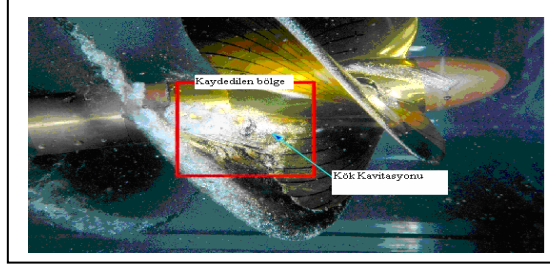
jet akımı, kavitasyon tabakasının yüzeyine çarpar ve tabakanın bir kısmını ayırır. Tabakadan ayrılan bu parça akışkan ile birlikte hareket eder ve daha yüksek basınçların olduğu bir bölgeye geldiğinde ise patlar. Bu olay çok karmaşıktır. Çünkü, ayrılan buhar bölgesinin şekli küresel ve iki boyutlu durumdan oldukça uzaktır. Bu özelliği ile bulut kavitasyonu, pervane kanadı üzerinde en fazla erozyona neden olan kavitasyon çeşididir.



Şekil 3.10 Bulut kavitasyonu ([2], (Weitendorf, 2001))

3.1.2.5 Kök (Root) Kavitasyonu

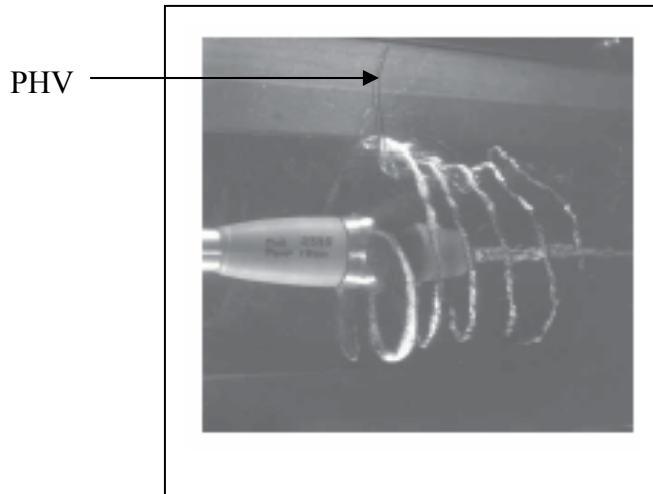
Bu kavitasyon türü, pervane kanadının kök kısmında meydana gelen ve kama şekline benzer bir yapıya sahip olup genelde nadir görülmektedir. Ufak, aşırı yüklü pervanelerde ve CPP pervanelerinde gözlemlenebilir. Kök bölgesinde, kanat kesitine ait maksimum kalınlık noktasının yakınılarında sırt kısmında oluşabilir. Şekil 3.11’de, NMRIJ’da, yüksek hızlı video tekniği ile çekilen kök kavitasyon şekli gösterilmektedir. Kök kavitasyonu, şaft braketleri gibi takıntılardan dolayı oluşan dalga iz etkisi ve eğimli bir şaftın oluşturduğu at nalı şeklindeki girdap akımları nedeni ile meydana gelmektedir. Kök kavitasyonunu önlemenin bir yolu kanat kesitinin basınç tarafından kanat köküne doğru küçük bir delik açılması ve böylece emme tarafının kaldırma etkisini hafifletmektir. Delik, genellikle kökün hemen dışındaki kanat kesitinin kort ortasına yerleştirilmektedir. Bu deliğin çapı, 800-1000 mm arasında değişen çaplara sahip pervanelerde 10 mm civarındadır. Kanatlar arasında deliklerin konumunun dikkatli bir şekilde uyum göstermesi amaçlanmalıdır. Elde edilen tecrübelerle göre, deliğin kanada dik değil, şaft eksenine paralel olacak şekilde açılması ile kök kavitasyonunun önlenileceği belirtilmektedir [4].



Şekil 3.11 Kök kavitasyonu [4]

3.1.2.6 Pervane-Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV)

Girdap kavitasyonunun özel bir şekli olan bu kavitasyon, büyük ve şiddetli bir iz alanı ile pervane etkileşimi sonucunda meydana gelir. Böyle bir durumda, pervane kanadının ucunda meydana gelen girdap tekneye doğru bir şimşek karakterinde sıçrayarak tekne ile birleşir (Şekil 3.12). Kısa bir zaman içinde düzensiz aralıklarla oluşur. Başka bir deyişle, pervanede yüksek oranlarda yük artışı olduğunda pervaneye gelen akım az olur. Bu eksikliği ortadan kaldırmak için pervane dönme esnasında tekne arkasından su çekmeye çalışır. Bu durumda tekneden pervaneye doğru bir akım hattı oluşur. PHV kavitasyonunun tekneye yakın bölgelerde oluşan farklı akım dağılımları ve türbülans nedeni ile oluştuğu varsayılmaktadır. PHV kavitasyonunun oluşmasına öncülük eden faktörler; düşük pervane ilerleme katsayısı, pervane ile tekne arasındaki açıklığın düşük olması ve pervane üzerinde düz yüzeylerin bulunmasıdır. Kavitasyonun bu çeşidi, pervane kanadına ve tekneye zarar verir. Geniş bir şekilde yüksek gürültü seviyesine neden olur. PHV kavitasyonu dolgun kıçlı gemilerde meydana gelebilir.



Şekil 3.12 PHV kavitasyonu (Weitendorf, 2001)

3.2 KAVİTASYON ETKİLERİ

3.2.1 Performans Kaybı (İtme Azalması)

Kavitasyon olayının, pervaneler üzerinde performans kaybına neden oluşunun en güzel örneği Bölüm 2’de de ifade edildiği gibi 1894 yılında İngiliz destroyeri “Daring”de görülmüştür. Gemi hızı 27 knot olarak hedeflenmiş iken ancak 24 knot hıza ulaşılmıştır.

Tek bir kanat profili üzerinde meydana gelen kısmi kavitasyonun uzunluğu kort uzunluğunun büyük bir kısmını kapladığı zaman profilin sehimini arttırabilir ve bu nedenle profilin kaldırma kuvvetini de arttırabilir. Profil üzerindeki ortalama basınç arttığında azalan kavitasyon kaldırma kuvvetinde de azalmaya neden olur. Bu azalma derece derece ve oldukça hızlı olur. Buna bağlı olarak, pervaneler üzerindeki farklı kanat kesitleri, farklı koşullarda kaldırma kuvvetindeki azalmadan etkilenecektir. Bu nedenle kavitasyonun pervane itmesi üzerinde etkisi tek bir profil üzerindeki etkisinden daha yavaş olmaktadır. Şayet oluşan kavitasyon, pervanenin farklı boyutsuz yarıçaplarına ait kesitlerin yaklaşık %20-25’lik kısmını kapladığında, pervanenin itmesi ve torku azalmaktadır. Ancak itmenin, tork’a göre azalması daha hızlı olmaktadır. Bu olay, ticari pervanelerde seyrek olarak meydana gelir. Çünkü bu gemilere ait pervanelerin işletme şartlarında, pervane yüklenmesi ve dönme oranı yeterince düşük olabilmektedir. Yüksek yüklü pervanelerde ve özellikle yüksek hızlarda çalışan pervanelerde itme üzerinde kavitasyonun ölçülebilir etkisi fark edilebilmektedir. Tam güçteki savaş gemilerinde veya çekme durumundaki romorkörlerde bu olay ile sık sık karşılaşılmaktadır. Yine hızlı konteyner ve hızlı ferilere ait pervanelerin performansına da kavitasyon etki edebilmektedir.

3.2.2 Gürültü

Kavitasyon kabarcığı etrafındaki dış basınç artmaya başladığında kısa bir süre sonra iç ve dış bölgelerdeki basınç gradyeni düşer ve kabarcık patlama konumuna gelir. Kavitasyon kabarcıklarının patlaması sonucu yüksek yerel basınçlar oluşur. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan şok dalgaları yüksek seviyede gürültü meydana getirir. Başka bir deyişle, kavitasyon başlangıç koşulu gürültü seviyesine etki etmektedir. Kavitasyon gürültüsü, hareket eden kabarcıklar, tabaka kavitasyonu, uç girdap kavitasyonu gibi birçok kavitasyon çeşidi tarafından oluşur. PHV kavitasyonu çok şiddetli gürültü oluşturan bir kavitasyon çeşididir.

Gemi sistemi tarafından üretilen gürültülerin önemli bir bölümü su altında oluşan pervane kaynaklı gürültüdür. Bir gemi pervanesinin su içerisinde basınç dalgaları üretebilmesi ve bir

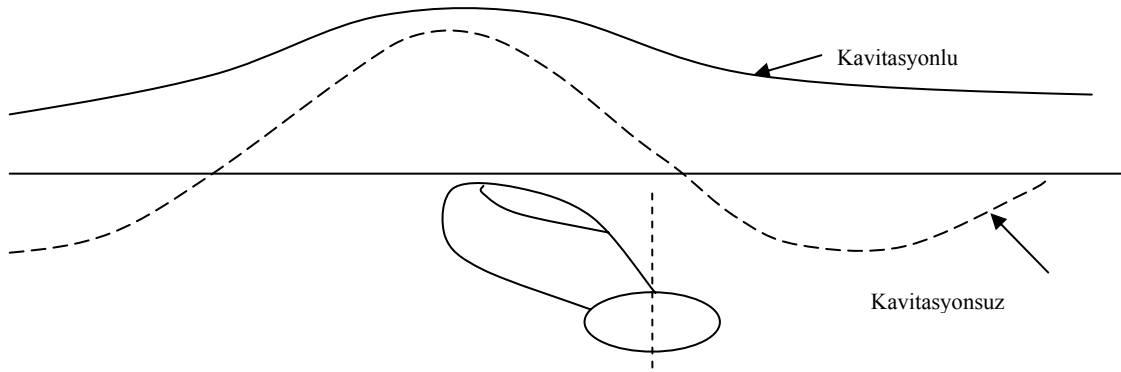
gürültü artışına neden olması için başlıca dört temel mekanizma vardır. Bunlar: pervane kanat kesitleri tarafından su kütlesinin yer değiştirmesi, pervane kanadının dönmesi esnasında emme ve basınç kısımları arasındaki basınç farkı, tekne arkasında pervane kanatlarının değişken iz alanı içinde çalışmasından dolayı oluşan kavitasyon hacminin periyodik olarak değişmesi, bir kavitasyon çekirdeği veya girdabın ani olarak çökmesi, patlamasıdır. İfade edilen oluşumlardan da anlaşılacağı üzere pervane kaynaklı gürültü kavitasyonsuz pervane gürültüsü ve kavitasyonlu pervane gürültüsü olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Pervane ve özellikle kavitasyon kaynaklı pervane gürültüsü savaş gemileri ve yolcu gemileri için oldukça önemli bir yere sahiptir. Çünkü, savaş gemilerinin yerlerinin tespit edilmesine neden olmakta, yolcu gemilerinde ise yolcu ve mürettebatın konforuna olumsuz yönde etki etmektedir.

3.2.3 Titreşim

Gemi pervane kanatlarında oluşan tabaka kavitasyonu hacimce büyük bir yere sahiptir. Bu büyük buhar hacminin dinamik davranışı su içerisinde şiddetli basınç darbeleri üretir. Dinamik kavitasyon tabakası etrafındaki basınç dalgalanmaları, tabakanın tekneye olan mesafesi ile orantılı olarak değişen geniş bir dalga boyuna sahiptir. Bu nedenle, oluşan basınç dalgalanmaları suyun sıkıştırılabilirlik özelliğinden bağımsızdır.

Kavitasyon tarafından indüklenen basınçlar tekne titreşimlerinin oluşmasında etkilidir. Pervane kanadında oluşan kavitasyon olayının meydana getirdiği bu basınç alanı, kavitasyon göstermeyen bir pervane kanadının meydana getirdiği basınç alanından farklıdır. Bu basınç alanları tekne boyunca farklı yerlerde farklı zamanlarda hissedilir. Bu durum, Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Burada, belirli bir zamanda ve konumda olan bir pervane kanadı etrafındaki basınç dağılımı çizilmiştir. Kavitasyon nedeni ile oluşan basınç dağılımı, tekne üzerinde herhangi bir yerde aynı fazda maksimum ve minimum değerine ulaşır. Kavitasyonsuz durumdaki basınç dağılımı ise pervane kanadının akışkan içerisinden geçmesinden dolayı, bir basınç dalgası şeklinde olur. Bu basınç dalgası, tekne yüzeyi üzerinde hareket eder. Kavitasyon tarafından indüklenen basınçların genlikleri $1/r$ (r kavitasyon tabakasına olan uzaklıktır) ile orantılı olarak azalırken, kavitasyonsuz bir pervane kanadının oluşturduğu basınç genliği $1/r^2$ ile orantılı olarak azalmaktadır. Bu nedenle, kavitasyonun meydana getirdiği basınç genlikleri daha hızlıdır. Kavitasyon nedeni ile ek olarak üretilen bu basınçlar tekne bünyesinde toplandığı zaman, kavitasyonsuz pervane tarafından tekne üzerinde oluşan indüklenmiş basınçlardan daha geniş basınçların oluşmasına neden olurlar. Kavitasyonsuz durumda basınç tepeleri ve çukurları birbirinin tersidir. Bu bölgede basınçlar, daha küçük rol

oyunlar.



Şekil 3.13 Kaviteasyonlu ve kaviteasyonsuz durumda oluşan basınç dağılımı

Oluşan basınç dalgalanmalarını bünyesinde toplayan tekne alanı geniş olduğu için şiddetli titreşimlerin oluşması kaçınılmaz bir olaydır. Gürültü problemi gibi yolcu ve savaş gemilerinde de titreşim önemli bir problemdir. Kaviteasyon etkisi ile meydana gelen titreşim olayını aza indirmek için; pervane kanadının yüzey alanı özellikle kanat uçlarında artırılabilir, pervane kanatlarının eğrilmesi artırılabilir veya hatve uçlara doğru azaltılabilir. Ancak titreşimlerden kaçınılmanın en etkili yolu, iz alanını mümkün olduğunca düzgün yapmaktır.

3.2.4 Erozyon

Kaviteasyon gösteren bir akışkan içerisinde bulunan buhar kabarcıkları düşük bir basınç bölgesinde hareket ederler. Bu kabarcıkların içindeki basınç, buhar basıncına çok yakın bir basınca ulaştığında kabarcıklar hızlı bir şekilde genişler. Kabarcıklar içindeki basınç dış basınçtan yüksek olduğunda boyutu azalır. Boyutu azalan kabarcığın yüzey gerilimi büyüktür. Bu durum kabarcığın patlamasını hızlandırır. Böylece kaviteasyon kabarcıkları şiddetli bir şekilde patlar. Bu olay pervane kanadı, yüzeyinde veya yüzeye yakın bir bölgede oluşursa belirli bir zaman sonra (birkaç saatten birkaç aya kadar) kanat malzemesinde yerel olarak yorulmalar meydana gelebilir ve küçük parçacıklar halinde kanat yüzeyinden kopmalar olabilir. İşte bu olay kaviteasyon erozyonu olarak nitelendirilir. Kaviteasyon erozyonu yüksek dinamik koşullarda genellikle tabaka kaviteasyonunda görülmektedir. Korozyon ile erozyon olayını birbirine karıştırmamak gerekir. Korozyon, malzemede meydana gelen kimyasal hasardır. Erozyon ise malzemede oluşan mekanik hasardır. Bir pervane kanadı üzerinde meydana gelen kaviteasyon kaynaklı erozyonun muayenesinde dikkat edilecek birtakım noktalar vardır. Bunlar; erozyonun konumu, kanadın sırt veya yüz tarafında meydana gelme durumu, erozyonun radyal konumu, erozyonun kort yönündeki konumu (kort ortası veya giriş

veya çıkış ucuna olan yakınlığı), erozyona uğrayan alanın büyüklüğü, yüzeyin dokusu ve rengi, ezilme, renkte solma, oyulma veya gözeneklilik durumu, hasarın maksimum derinliği, hasarın tüm kanatlar üzerinde meydana gelip gelmediği, şayet birden fazla kanatta meydana gelmiş ise bu hasarların birbirlerine benzeyip benzemediği, çift pervaneli bir gemi ise hem sancak hem iskele taraftaki pervanede hasarın oluşup oluşmadığı gibi durumlardır.



Şekil 3.14 Bir pervane kanadında oluşan kavitasyon erozyonu (ITTC,2005)

3.3 KAVİTASYON BAŞLANGICI

“ σ ” sembolü ile gösterilen “kavitasyon sayısı” (veya kavitasyon indeksi), akım içinde bulunan bir pervane kanadının yüzeyi üzerinde herhangi bir referans noktada aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\sigma = \frac{P_{st} - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3.1)$$

Burada:

P_{st} :referans noktadaki statik basınç

P_v :suyun buhar basıncı

ρ :suyun yoğunluğu

V :referans hız

Referans nokta bir pervane kanadı üzerinde herhangi bir yerde olabilir, V hızı, eksenel serbest akım hızı (U), rotasyonel hız (N) veya bu hız bileşenlerinin vektörel toplamı olan bileşke hız V_R 'ye dayanabilir. Kavitasyon sayısı, bir kavitasyon tünelinin test bölgesindeki basıncı etkileyen ve test ortamında korunması zorunlu bir boyutsuz parametredir.

Kavitasyon sayısına alternatif olarak, pervane kanadı etrafında veya üzerindeki “yerel basınç

katsayısı” aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$C_p = \frac{P - P_{st}}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3.2)$$

Burada:

P : ele alınan noktadaki yerel basınç

Kavitasyonun tanımından yola çıkarak, kavitasyonun bu yerel basınç P ’nin suyun buhar basıncına eşit olan bir minimum değere (P_{min}) düştüğünde meydana geleceği varsayılmaktadır.

$$P_{min} = P_v \quad (3.3)$$

ve bu nedenle

$$\sigma_i = -C_{pmin} \quad (3.4)$$

eşitliği yazılabilir.

Burada σ_i değerine “kavitasyon başlangıç sayısı” adı verilmektedir.

Minimum basınç değeri, genellikle buhar basıncından farklıdır. Model testine dayalı kavitasyonun başlangıç öngörüsü ölçek faktörlerinden etkilenmektedir.

Kavitasyon başlangıcını öngörme işlemleri içinde temel problemlerin çoğu, model ölçeğinden tam ölçeğe geçiş ile ilişkilidir.

18. ITTC (1987) konferansına göre ölçek etkileri akışkanın viskozitesi, kabarcık dinamiği ve yerçekimi ile ilişkilidir.

Klasik kavitasyon tünellerinde Reynolds sayısı ve Froude sayısı benzerliğini eş zamanlı olarak sağlamak mümkün değildir. Yerçekimi etkisi, genellikle hesaba katılmadığı için Froude sayısı benzerliği ihmal edilir. Bu nedenle, bu görüş kavitasyon başlangıcına etki eden ölçek etkilerini akışkan viskozitesi ve kabarcık dinamiği ile ilişkili olarak sınırlandırmaktadır.

4. DÜZENSİZ AKIM ALANINDA ÇALIŞAN PERVANELER İÇİN KALDIRICI YÜZEY METODU

Gemi pervanelerinin, eksene göre simetrik olmayan başka deyişle güçlü ve düzensiz bir akım ortamına maruz kalması, şaft kuvvetlerinde ve pervane kanatları üzerinde basınç alanının düzensiz olmasına neden olmaktadır. Sözü edilen bu düzensizliklere pervane kanadı yüzeyindeki daimi olmayan tabaka kavitasyonu da eklendiğinde gemi bünyesinde yüksek seviyede titreşimler ve gürültü oluşmaktadır. Bu nedenle, pervane dizaynının ilk aşamalarında sözkonusu oluşumların özellikle kavitasyon olayının kontrol altında bulundurulmaları son derece önemlidir. Bu bölümde sözü edilen amaç doğrultusunda pervaneler için, temeli Szantyr (1994)'ın kaldırıcı yüzey modeline dayalı olarak geliştirilmiş ve tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü öngörüsünü de kapsayan bir analiz metodu ele alınacaktır.

4.1 Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli

Düzensiz akımda çalışan pervanelerin analizi için geliştirilen bu metotta, pervane kanatlarının temsili için şekli değişebilen bir kaldırıcı yüzey modeli kullanılır. Pervanede hidrodinamik yüklerin ve kalınlıkların modellenmeleri ayrı ayrı ele alınarak; pervane üzerindeki hidrodinamik yükler, kesit sehim hatlarının oluşturduğu yüzeylere yayılan girdap dağılımlarıyla, kesit kalınlıkları da aynı yüzeylere yayılan kaynak dağılımlarıyla modellenir. Yüzeylerde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu da kaynak dağılımlarıyla modellenerek, kaldırıcı yüzey geometrisindeki deformasyon şeklinde hesaplara katılır. Gemi arkası düzensiz akım etkileri sadece hidrodinamik yüklerin hesabına dahil edilir. Girdap yüzeylerinin şiddetlerinin değişken olması pervane kanatları üzerindeki hidrodinamik yük değişimlerini ortaya çıkarır. Kesit kalınlıklarının kaynak dağılımlarıyla modellenmesi ise pervaneye gelen çevresel ortalama akıma göre yapılır. Bu şekilde, kalınlık etkileri hesaplara zamanla değişmeyen sabit düzeltmeler şeklinde yansıtılır.

Tüm pervane kanatlarının gerisinde serbest girdap yüzeyleri uzanır. Bu yüzeyler, düzgün helisel şekle sahip serbest girdap hatlarından meydana gelir. Serbest girdap hatlarının hatvesi, ortalama akış açısı ve ortalama kanat hatve açısının lineer değişimi olarak hesaplanmaktadır. Hesapları basitleştirmek için pervane kanatlarından biri *anahtar kanat* olarak seçilir. Anahtar kanadın hemen arkasından itibaren $360^\circ/Z$ 'e kadar olan serbest girdap yüzeyi, *değişken serbest girdap bölgesi* olarak tanımlanır. Bu bölge, anahtar kanat üzerindeki değişken akış koşullarını yansıtır. Değişken bölgede aynı serbest girdap hatlarına ait kesitler farklı şiddetlere sahip olabilir. Bu, sirkülasyonun korunumu prensibinin gereklerini yerine getirmek için,

radyal girdap elemanlarının ortaya çıkmasına neden olur. Bunun dışında, bir grup kontrol noktası kanadın çıkış ucunun ötesine kadar uzanan tabaka kavitasyonunun öngörüsü için değişken bölge içine yerleştirilmektedir. Bu noktalarda kaldırıcı yüzeye dik ($\vec{n}$) ve teğet ($\vec{t}$) olan birim uzunluk vektörleri tanımlanmaktadır. Değişken bölgedeki girdap dağılımları ($\vec{\gamma}_{pv}$) kanadın düzensiz akım ortamında hareket etmesi nedeniyle anahtar kanat üzerinde oluşabilecek değişken hidrodinamik yüklerin belirlenmesinde kullanılır. Bu yüzeylerin her biri helisel girdap hatlarından oluşmaktadır. Değişken bölgede indüklenen hızlar anahtar kanat haricindeki diğer kanatlar tarafından anahtar kanat üzerinde indüklenmiş hızların oluşturduğu indüksiyon faktörleri matrisine ilave edilmektedir.

Anahtar kanat gerisinde serbest girdap yüzeyinin geri kalan kısmı ve diğer kanatların gerisindeki tüm serbest girdap yüzeyleri pervane serbest girdap yüzeylerinin *sürekli* bölgesini oluştururlar. Bu bölge içindeki girdap dağılımı $\vec{\gamma}_{ps}$, pervaneye gelen eksene göre simetrik ortalama akımdan doğan kanatlar üzerindeki ortalama hidrodinamik yük dağılımı ile ilişkilidir.

Kanat ve serbest girdap yüzeylerine yerleştirilen girdap elemanlarının indüklediği hızların bulunmasında Biot-Savart kanunundan yararlanılır. Pervane yükünü modelleyen bağlı girdap elemanlarının değerleri, kaldırıcı yüzeylerde kinematik sınır şartı sağlanacak şekilde oluşturulan lineer denklem sistemlerinin çözülmesiyle bulunur. Bağlı girdap elemanı şiddetlerinin belirlenmesinden sonra, pervane yüzeyine gelen bileşke hızlar, basınç dağılımları ve sisteme etkiyen kuvvetler bulunabilir.

Kinematik Sınır Şartı

Pervane kaldırıcı yüzey modelinde, hidrodinamik yükleri temsil eden bağlı girdap elemanlarının şiddetlerinin belirlenmesinde kinematik sınır şartından yararlanılır. Kinematik sınır şartı, kaldırıcı yüzey denklemi formülasyonun temelini oluşturur. Bu şarta göre, kaldırıcı yüzeye gelen ve indüklenmiş hızları da içeren hız vektörünün kaldırıcı yüzeye teğet olması gerekir. Bir başka deyişle, kaldırıcı yüzeyden hiç akım geçmemeli, pervane sehim hattı yüzeyleri üzerindeki tüm noktalarda toplam normal hız sıfır olmalıdır. Kinematik sınır şartı, bağlı girdap elemanlarının şiddetlerinin hesabı için oluşturulan lineer denklemler sistemini meydana getirir. Her bir denklem, anahtar kanat üzerindeki bir kontrol noktasına karşılık gelir. Pervane kaldırıcı yüzeyi için bu şart denklem (4.1) ile verilmektedir.

$$\begin{aligned}
& \frac{I}{4\pi} \left[\int_{S_p} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_p \cdot \nabla \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS + \int_{S_{pv}} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{pv} \cdot \nabla \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS + \int_{S_{ps}} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{ps} \cdot \nabla \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS + \right. \\
& \left. \int_{S_p} (q_p + q_{pc}) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS \right] \\
& + (\vec{V} + \vec{\omega} \cdot R) \cdot \vec{n} = 0
\end{aligned} \tag{4.1}$$

Burada:

$\vec{n}$: kaldırıcı yüzeye normal yöndeki birim vektör

$\vec{\gamma}_p$: pervane kanatları üzerindeki girdap dağılımı

$\vec{\gamma}_{pv}$: pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesine ait girdap dağılımı

$\vec{\gamma}_{ps}$: pervane serbest girdap sisteminin sürekli bölgesine ait girdap dağılımı

q_p : pervane kanat kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı

q_{pc} : pervane kanadı üzerindeki tabaka kavitasyonu kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı

r_p : alan elemanı dS ile hesap yapılacak nokta arasındaki uzaklık

S_p : pervane kanatlarının alanı

S_{pv} : pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesinin alanı

S_{ps} : pervane serbest girdap sisteminin sürekli bölgesinin alanı

$\vec{V}$: pervaneye gelen akımın hızı

$\vec{\omega}$: pervane açısal hızı

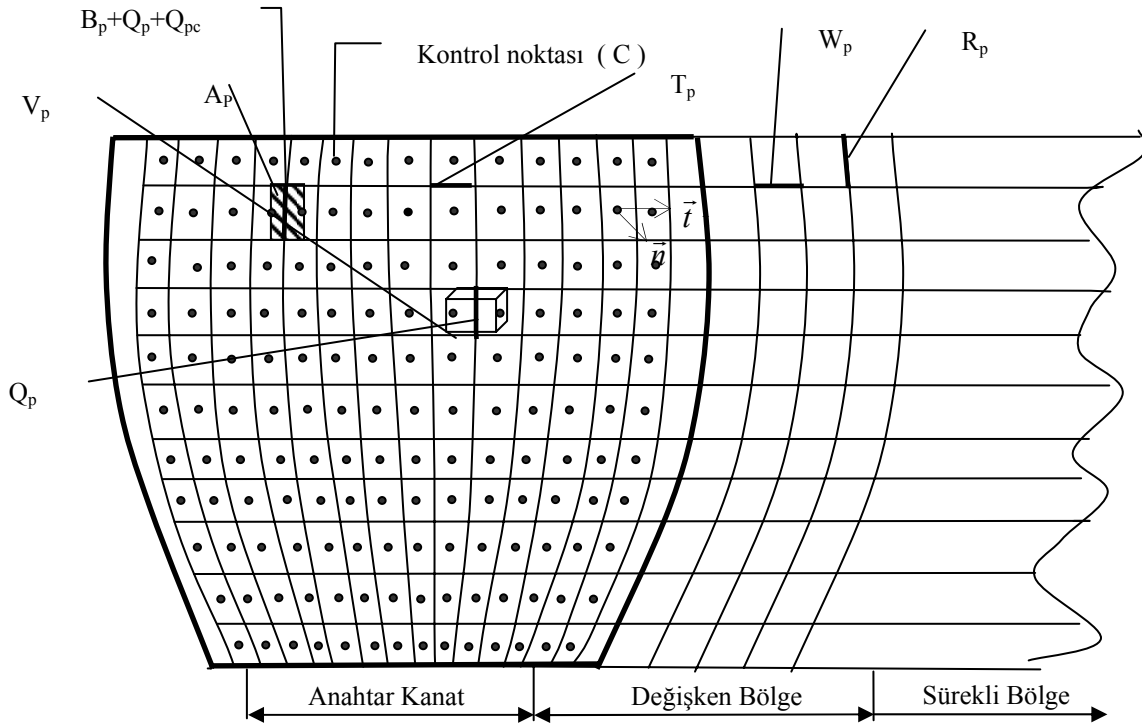
R : hesap edilen noktadaki pervane yarıçapı

Yukarıdaki denklemde q_{pc} yalnızca kavitasyon tespit edildiğinde yer alır. Benzer şekilde, $\vec{\omega} \cdot R$ ifadesi de pervanenin dönmesiyle ilgilidir ve sadece pervane üzerindeki bir noktada hesap yapıldığı zaman yer alır. Pervane kanatları üzerinde, tabaka kavitasyonu görüldüğünde normal vektör $\vec{n}$, orjinal kaldırıcı yüzey geometrisindeki bozulmayı yansıtacak şekilde değişir. Lineer denklem sisteminin sol tarafı olan ana matris, üç kısım şeklinde; anahtar kanat

tarafından anahtar kanat üzerindeki noktalarda, anahtar kanat dışındaki kanatlar tarafından anahtar kanat üzerindeki noktalarda ve değişken bölge tarafından anahtar kanat üzerindeki noktalarda indüklenen hızların normal bileşenlerinin oluşturduğu matristir. Denklem sisteminin sağ tarafını ise pervane kanat kalınlığını temsil eden kaynaklar tarafından indüklenen hız ile pervane dönüşünü içeren çevresel ortalama akış hızının bulunduğu matris sistemi oluşturmaktadır.

4.2 Pervane Kanadı Kaldırıcı Yüzey Modeli

Pervane kanadını modelleyen girdap ve kaynak dağılımlarının belirlenmesi amacı ile oluşturulan denklem (4.1)'in sayısal olarak çözülebilmesi için, kaldırıcı yüzey dürtgensel bölgelere (grid) ayrılarak üzerlerine girdap ve kaynak elemanları yerleştirilir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Pervane kanadı kaldırıcı yüzey modeli

Şekilden de görülebileceği gibi kort yönündeki 11 şerit boyunca 15 adet bağlı girdap elemanı ($\bar{B}_p$) düzgün olarak yayılır. Bağlı girdapların aralığı kanat giriş ucuna yakın alanlarda daha yoğun olup, kanat çıkış ucuna doğru ise giderek azalmaktadır. Bu işlem, pervane kanadının giriş ucu yakınlarda oluşması muhtemel hidrodinamik yük değişimlerini uygun bir şekilde modellemek ve tabaka kavitasyonun gelişimini başlangıç aşamalarında daha kesin bir şekilde ifade edebilmek için yapılmaktadır. Metot için, çeşitli sayılarda grid sayıları denenerek, sonuç

hassasiyeti ve bilgisayar zamanı da göz önüne alınarak 154 adet grid uygun değer olarak bulunmuştur.

Her bir girdap elemanının şiddeti, A_p alanına yayılan sürekli girdap dağılımının şiddetine eşittir. Sirkülasyonun korunumu prensibine dayalı Kelvin teoreminin sağlanması amacı ile $\bar{B}_p$ bağlı girdap elemanları doğrusal $\bar{T}_p$ takip eden (izleyen) girdap elemanlarıyla desteklenir. Kelvin teoremine göre, ideal bir akışkanın yoğunluğu sadece basınca bağlı ve akışkan üzerinde rol alan dış kuvvetler bir potansiyelden türetilabiliyorsa akışkan ile birlikte hareket eden kapalı bir eğri boyunca sirkülasyon zaman ile değişmemektedir. Takip eden girdaplar çıkış kenarından ayrıldıktan sonra genel bir helis şeklinde serbest girdap yüzeylerini oluştururlar. Bu takip eden girdap elemanlarının şiddetleri bağlı girdap elemanlarının şiddetleri cinsinden ifade edilebilir. Çünkü A_p alanının etrafında şiddetleri eşit ama yönleri farklıdır. Böylece pervane kanadı üzerindeki hidrodinamik yükün hesaplanması için gerekli altyapı hazırlanmış olur.

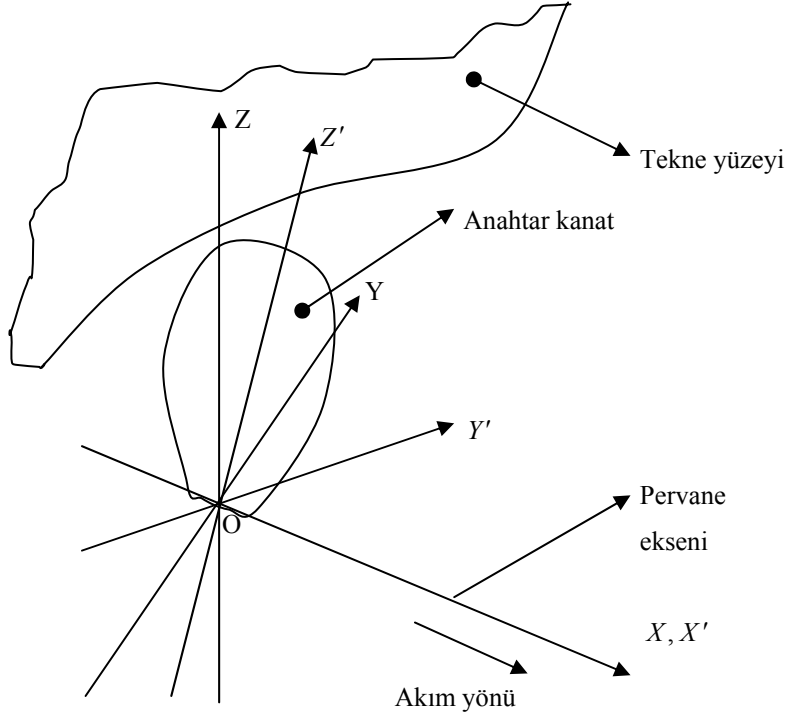
Anahtar kanat üzerinde birbirine komşu olan bağlı ve takip eden girdap elemanlarının arasında kalan dörtgen şekilli bölmelerin tam orta noktalarında kontrol noktaları (C) bulunmaktadır. Kontrol noktaları, kinematik sınır şartının sağlanmasında kullanılır. Ancak anahtar kanat üzerinde 165 tane şiddeti bilinmeyen bağlı girdap elemanı ($\bar{B}_p$) olmasına karşılık toplam 154 tane kontrol noktası (C) vardır. Bu durum, akımın kanat çıkış kenarını düzgün olarak terk ettiğini, yani bağlı girdabın sıfır olduğunu ifade eden Kutta şartından yararlanılmak suretiyle bağlı girdap elemanı sayısı da kontrol noktalarının sayısı olan 154'e indirilerek çözülür.

Pervane çıkış kenarını takiben yerleştirilen değişken serbest girdap bölgesi, düzgün helis şeklindedir. Bu bölgede aynı yarıçap üzerindeki takip eden girdap elemanları ($\bar{W}_p$) farklı sektörlerde farklı şiddete sahip olabilirler. ($\bar{W}_p$)'ler, sirkülasyonun korunumu ile ilgili Kelvin teoreminin sağlanması amacıyla ($\bar{R}_p$) radyal takip eden girdap elemanları sistemiyle desteklenir. Bu bölgeye yerleştirilen girdap dağılımları, indüklediği hızlar vasıtasıyla anahtar kanat üzerindeki mevcut kinematik sınır şartını etkiler. Düzensiz akım alanından kaynaklanan pervane üzerindeki süresiz yük dağılımları için bir kayıt görevini görür.

Değişken girdap bölgesinin gerisinde kalan sürekli bölge ise düzgün helis şeklinde yarı-sonsuz girdap hatlarından oluşur ve şiddetleri ortalama çevresel akıma göre hesaplanır. Bu

bölgenin indüklediği hızlar vasıtasıyla anahtar kanat üzerindeki kinematik sınır şartına etkisi sabittir. Sürekli bölge pervane kanadının geçtiği düzensiz akım durumlarından etkilenmez.

.Kanatların kalınlık etkilerini temsil eden kaynak elemanları (Q_p) ve kanat üzerindeki tabaka kavitasyon etkilerini temsil eden kaynak elemanları (Q_{pc}) bağlı girdap elemanlarıyla üst üste gelecek şekilde yerleştirilirler. Kaynak elemanlarının şiddetleri, kanat veya tabaka kavitasyonu birim hacmine gelen akımı kesecek yani kalınlıkları temsil edecek şekilde belirlenir. İfade edilen sistemin tüm geometrik parametreleri anahtar kanadın Şekil 4.2’de gösterildiği kartezyen koordinat sistemi içinde verilmektedir. O_{XYZ} eksen takımı tekne yüzeyinde, $O_{X'Y'Z'}$ eksen takımı ise dönel pervane üzerinde sabitlenmiştir. Serbest girdap sisteminde yer alan bağlı girdap ve takip eden girdap elemanlarının bileşenleri, kontrol noktalarının koordinatları, kontrol noktalarında dik ($\vec{n}$) ve teğetsel ($\vec{t}$) birim uzunluk vektörlerinin bileşenleri bu koordinat sistemine göre verilmektedir.



Şekil 4.2 Kaldırıcı yüzey modeline ait koordinat sistemi

Kanat kalınlığını modelleyen kaynak şiddetleri ortalama başlangıç akımına göre bulunmakta olup, düzensiz akım durumundaki tüm hesaplarda bu değerler kullanılmaktadır. Anahtar kanat üzerindeki bir kaynağın şiddeti denklem (4.2)’de ifade edildiği gibidir.

$$Q_p = V_{IN} R \Delta X \frac{dt}{dx} \quad (4.2)$$

Burada:

V_{IN} : kaynak elemanına gelen ortalama akım hızı (pervane dönmesi dahil)

ΔR : radyal şerit genişliği

ΔX : Q kaynağı yerine geçen V_p kanat hacim elemanının boyu

$\frac{dt}{dx}$: kanat kalınlığının akım yönündeki değişimi

4.2.1 İndüklenmiş Hızların Hesaplanması

Pervane kaldırıcı yüzey modelinde girdap elemanlarının indükledikleri hızların bulunması indüksiyon katsayı matrisleri oluşturularak yapılır. İndüksiyon katsayıları, bir girdap elemanı şiddeti ile indüklenmiş hızın hesaplanacağı kontrol noktası arasındaki ilişkiyi sağlayan, tamamen pervane girdap modelinin geometrisini yansıtan katsayılardır. Girdap şiddetleri biliniyorsa, indüklenmiş hızların hesaplanmasında ya da bilinmeyen girdap şiddetlerinin belirlenmesinde kullanılabilirler. İşlemlerde esneklik sağlaması açısından pervane girdap modelinin her bir ana bölümünde ayrı indüksiyon katsayı matrisleri oluşturulur. Kontrol noktalarında indüklenen hızın normal ve teğetsel yöndeki bileşenleri için de ayrı matrisler kullanılır.

Bir indüksiyon katsayıları matrisi aynı zamanda, pervane girdap modelinin bir bölgesindeki tüm girdap elemanlarının, her bir kontrol noktasında indüklenmiş hıza katkılarının toplanması şeklinde de değerlendirilebilir. İndüklenmiş hızların hesabında Biot-Savart formülü kullanılır (Şekil 4.3).

$$\vec{V}_\Gamma = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\vec{L}x\vec{R}}{|\vec{R}|^3} \quad (4.3)$$

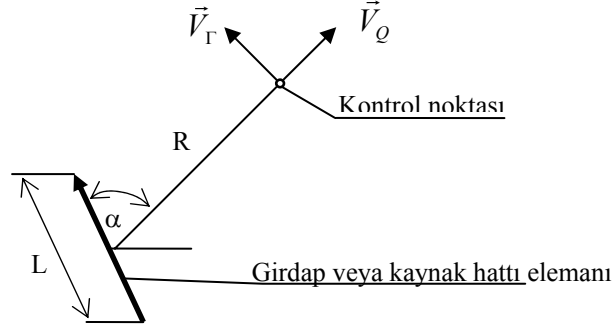
Burada:

$\vec{V}_\Gamma$: Girdap elemanı tarafından indüklenen hız

Γ : Girdap elemanının sirkülasyonunun şiddeti

$\vec{L}$: Girdap elemanının uzunluğu

$|\vec{R}|$: Girdap veya kaynak elemanı ile kontrol noktası arasındaki uzaklık vektörünün büyüklüğü



Şekil 4.3 Bir girdap/kaynak elemanının kontrol noktasında indüklediği hız

Oluşturulan indüksiyon katsayıları matrisi, anahtar kanat tarafından yine, anahtar kanat üzerindeki noktalarda indüklenen hız ile anahtar kanat dışındaki diğer kanatlar tarafından anahtar kanat üzerinde indüklenen hızın normal ve teğetsel bileşenlerinin oluşturduğu matrisleridir. Bu matrisler 154x154 adet elemandan oluşmaktadır. Çünkü kanat üzerinde 154 tane kontrol noktası ve 154 tane şiddeti bilinmeyen bağlı girdap elemanı vardır. Tüm takip eden girdap elemanlarının şiddeti, komşu şeritlerde yer alan bağlı girdap elemanlarının toplamı olacak şekilde ifade edilebilmektedir.

Kesit kalınlıklarını modelleyen kaynak elemanlarının indüklediği hızlar da bir nokta kaynak ile ilişkili olan basit bir bağıntı yardımı ile denklem (4.4)'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{V}_Q = \frac{Q_p \vec{R}}{4\pi |\vec{R}|^3} \quad (4.4)$$

Burada:

$\vec{V}_Q$: kaynak elemanı tarafından indüklenen hız

Gerçekte pervane kaldırıcı yüzey modelinde yer alan kaynakların, girdap elemanları boyunca ayrı olarak lineer dağılımlar şeklinde analiz edilmesi tavsiye edilir. Kaynak şiddetlerinin süreksiz akış alanı tarafından etkilenmediği varsayılmaktadır. Bu nedenle $\vec{V}_Q$ hızı sadece bir

kez hesaplanmakta ve daha sonra kalınlık etkileri için bir çeşit sabit düzeltme şeklinde analiz süresince kullanılmaktadır. Bundan sonra, pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesi tarafından anahtar kanat üzerinde indüklenen hızın bileşenlerinin bulunduğu indüksiyon katsayıları matrisi hesaplanır. Bu hesaplamada, değişken bölge içindeki takip eden girdapların yoğunluğunun sabit olduğu varsayılmaktadır. Bu şiddet, anahtar kanat üzerinde bağlı girdap elemanlarının lineer birleşimi şeklinde ifade edilebilir. Bu nedenle, değişken bölge içindeki tüm radyal girdap elemanlarının şiddetleri sıfıra eşittir.

4.2.2 Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi

4.2.2.1 Anahtar Kanat Başlangıç Konumunda iken Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi (İlk Yaklaşım)

Pervane kaldırıcı yüzey modelinde süreksiz hidrodinamik yükler için ilk yaklaşım hesapları anahtar kanat dik konumda iken (sıfır derece kanat pozisyonunda) yapılır. Aynı zamanda serbest girdap sisteminin sürekli bölgelerindeki girdap elemanlarının şiddetleri ve kesit kalınlıklarını modelleyen kaynak dağılımlarının şiddetleri de bu aşamada belirlenir. Tüm bu ilk yaklaşım hesapları pervaneye gelen ortalama çevresel akıma göre yapılır. Yani, pervanenin bu aşamada düzensiz akım etkilerine maruz olmadığı kabul edilir.

Pervane girdap modelini oluşturan tüm girdap elemanlarının; anahtar kanat üzerindeki her bir kontrol noktasında indükledikleri hızların toplamı (4.1)-(4.4) arası denklemler kullanılarak yazılır. Daha önce de belirtildiği gibi, pervane kaldırıcı yüzey modelinde kinematik sınır şartını ifade eden bu lineer denklem sisteminin sol tarafı pervanenin anahtar kanata etkisini gösteren üç gruba ayrılabilir:

1. Anahtar kanadın anahtar kanada
2. Pervane değişken serbest girdap bölgesinin anahtar kanada
3. Anahtar kanat dışında kalan diğer pervane kanatlarının anahtar kanada ve bu kısma eklenen pervane serbest girdap bölgesinin sürekli kısmı tarafından anahtar kanada olan etkisi

Lineer denklem sisteminin sağ tarafı ise, kanat kalınlıklarını modelleyen kaynak dağılımlarının indükledikleri hızlar, pervaneye gelen akım hızı ve pervane rotasyonel hızından oluşur. Bu şekilde oluşturulan lineer denklem sistemi, 154 bilinmeyen bağlı girdap elemanı ve 154 denklemden oluşur. Serbest girdap bölgeleri ve diğer kanatlardaki bilinmeyen girdap elemanları ise anahtar kanat üzerinde yer alan bağlı girdap elemanlarının şiddetleri cinsinden

ifade edilerek denklemlere katılır.

(154x154) boyutundaki bu lineer denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle pervane üzerindeki tüm bağlı girdap elemanlarının şiddetleri ortalama akıma göre bulunmuş olur. Bilinmeyen girdap elemanları bulunduktan sonra pervane yüzeylerindeki akım hızları denklem (4.3) ve (4.4) kullanılarak bulunabilir. Böylece başlangıç durumunda pervane üzerindeki hidrodinamik yük dağılımı hesapları için altyapı hazırlanmış olur.

Düzensiz akım alanında çalışan pervaneler için geliştirilen bu analiz yönteminde girdap bölgelerinin aşağıdaki kısımlarının hidrodinamik yüklerinin (örneğin bağlı girdapların şiddeti) düzensiz akımdan etkilenecekleri kabul edilir:

1. anahtar kanat
2. pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesi

Pervane girdap modelinin kalan kısımları ise, ortalama çevresel akımda yukarıda anlatıldığı şekilde elde edilen girdap dağılımlarına göre hız indüklerler ve bu hızlar tüm kanat analiz pozisyonlarında kullanılır. İndüklenmiş hızların sürekli kısmını oluşturan bölgeler şunlardır:

1. anahtar kanat dışındaki pervane kanatları 2,3,.....Z
2. pervane serbest girdap sisteminin sürekli kısmı
3. kanat kalınlıklarını modelleyen kaynaklar

4.2.2.2 Anahtar Kanadın Herhangi Bir Konumunda Pervane Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi

Analiz yapılacak ilk kanat pozisyonunda, indüklenmiş hız hesapları için yukarıda anlatıldığı şekilde ortalama çevresel akıma göre bulunmuş girdap dağılımları kullanılır. Daha sonraki tüm ara konumlarda ise, bir önceki analizden elde edilen üniform olmayan akımdaki girdap dağılımları kullanılır.

Pervane serbest girdap bölgelerinin indükledikleri hızlar da Biot-Savart formülü kullanılarak elde edilir.

Lineer denklem sisteminin ana matrisi, pervane anahtar kanadı üzerindeki girdap elemanlarının yine pervane anahtar kanadı üzerindeki kontrol noktalarında indükledikleri hızı ifade eden (154x154) boyutundaki indüksiyon katsayıları matrisidir. Lineer denklem sisteminin sağ tarafını ise aşağıdaki bileşenler oluşturur:

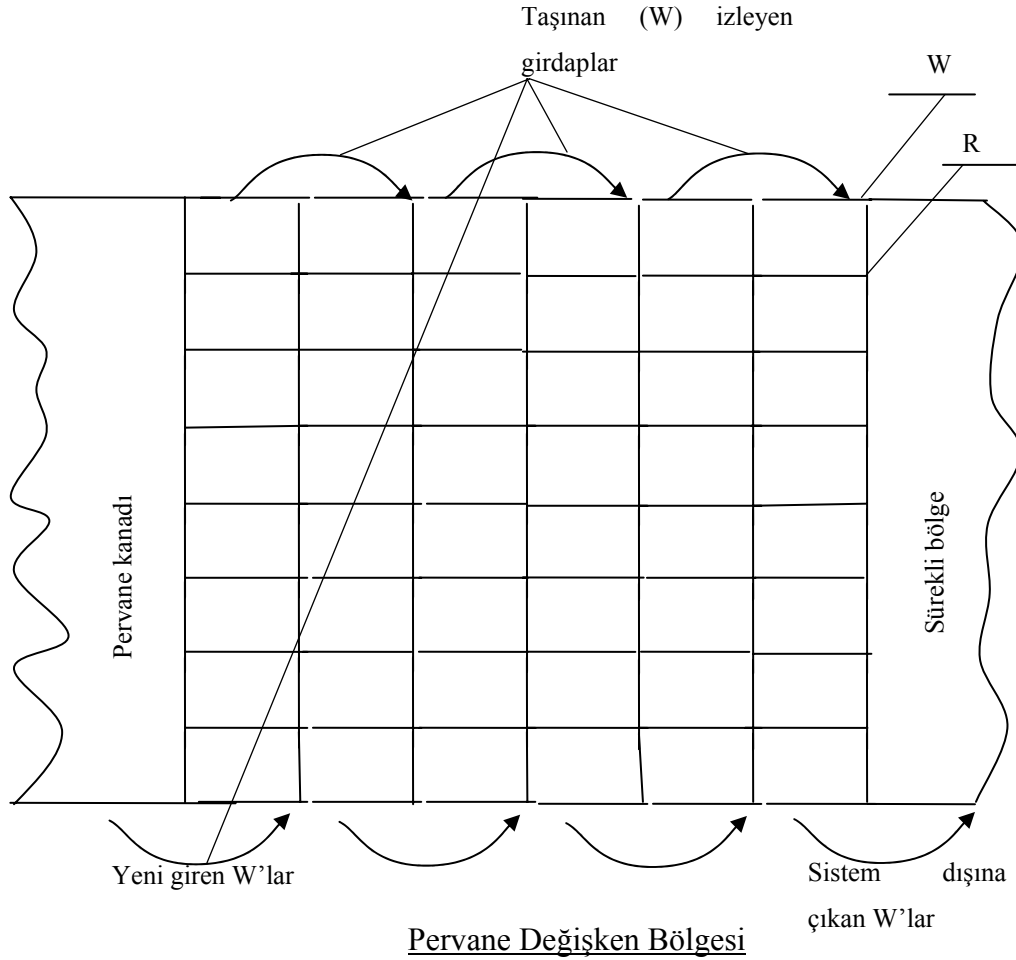
- İndüklenmiş hızların sürekli kısmı
- Kontrol noktalarına gelen akım hızı (pervane dönmesi dahil)

- Pervane değişken girdap bölgesinin indüklediği hızlar

Lineer denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle, analiz edilen kanat pozisyonu için, kanat üzerindeki girdap dağılımları ve akım hız alanları bulunabilir.

4.2.3 Değişken Bölgede Serbest Girdapların Yenilenmesi

Mevcut kanat analiz pozisyonunda anahtar kanat etrafındaki akım hesapları tamamlandıktan sonra, kanat üzerindeki akım değişikliklerinin saklanması amacıyla, anahtar kanadın çıkış kenarını takip eden değişken bölgedeki girdap dağılımları yenilenir. Şöyle ki, izleyen girdap elemanlarının şiddetleri bir basamak geriye taşınır (Şekil 4.5). Değişken bölgedeki her bir yarıçapta, pervane anahtar kanadının son şeridindeki izleyen girdap elemanları sisteme katılırken, değişken bölgenin son şeridindeki, girdap elemanları da sistemden çıkartılır. Böylece, mevcut kanat analiz pozisyonunda anahtar kanadın maruz kaldığı düzensiz akım etkileri, bir sonraki analiz pozisyonunda kanat izinde değişiklik şeklinde hesaplara yansıtılmak üzere hazırlanmış olur.



Şekil 4.5 Değişken serbest girdap bölgelerinin yenilenmesi

4.2.4 Basınç Dağılımlarının Hesaplanması

Biot-Savart formülü kullanılarak şiddetleri bilinmeyen $\bar{B}_p$ elemanlarının oluşturduğu lineer denklem sistemi kurulmaktadır. Bu sistem, denklem (4.1) ile verilen integral denklemin sayısal eşitidir. Bu lineer denklem sistemi çözüldükten sonra indüklenen teğetsel hızların bileşkesi bulunur ve ardından pervane kanadının sırtındaki ve yüzündeki basınç dağılımları Bernoulli denkleminden elde edilen aşağıdaki (4.5) denklemi kullanılarak hesaplanır.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5 \rho V_\infty^2} = 1 - \left(\frac{V_i}{V_\infty} \right)^2 + \frac{2}{V_\infty^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (4.5)$$

C_p : boyutsuz basınç katsayısı

p : söz konusu olan noktadaki basınç (kontrol noktasındaki)

p_∞ : sonsuzdaki basınç

ρ : suyun yoğunluğu

V_∞ : sonsuzdaki akım hızı

V_i : söz konusu olan noktada bileşke akım hızı (kontrol noktasındaki)

φ : anahtar kanat üzerindeki yük dağılımını temsil eden hız potansiyeli

Denklem (4.5)'den elde edilen basınç dağılımı viskozite etkileri için düzeltilmektedir. Bu düzeltme iki değere bağlı olacak şekilde (k_1 ve k_2) denklem (4.6) kullanılarak yapılmaktadır.

$$C_{pdüzeltme} = 2\pi [\alpha(k_1 - 1.0) + \alpha_o(k_1 k_2 - 1.0)] \quad (4.6)$$

Burada:

α : hücum açısı ($\alpha = (C_{LI} / 2\pi) - \alpha_0$)

α_o : sıfır kaldırma kuvveti açısı (viskozitesiz kaldırma kuvveti açısı)

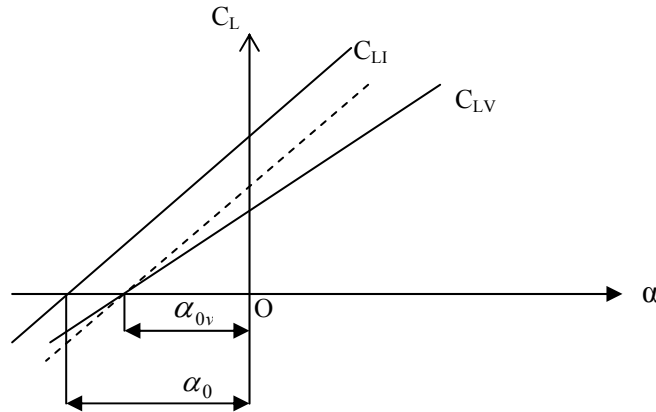
C_{LI} : ideal kesit kaldırma katsayısı (viskozitesiz)

k_1 , k_2 değerleri pervane kanat kesitine etkileyen kaldırma kuvveti için boyutsuz düzeltme katsayıları olup, kanat kalınlığı ve kort uzunluğuna bağlı olarak denklem (4.7) ve (4.8) ile hesaplanmaktadır (Burrill,1944).

$$k_1 = 58.33 \left(\frac{t}{c} - 0.13 \right) \left(\frac{t}{c} - 0.22 \right) - 113.6 \left(\frac{t}{c} - 0.04 \right) \left(\frac{t}{c} - 0.22 \right) + 51.85 \left(\frac{t}{c} - 0.04 \right) \left(\frac{t}{c} - 0.13 \right) \quad (4.7)$$

$$k_2 = 56.17 \left(\frac{t}{c} - 0.13 \right) \left(\frac{t}{c} - 0.22 \right) - 108.6 \left(\frac{t}{c} - 0.04 \right) \left(\frac{t}{c} - 0.22 \right) + 48.76 \left(\frac{t}{c} - 0.04 \right) \left(\frac{t}{c} - 0.13 \right) \quad (4.8)$$

Bu katsayılar arasında uygun bağıntıyı sağlamak, pervane torku ve itmesi için çok önemlidir. Şayet k_2 değeri oldukça yüksek ve/veya k_1 değeri oldukça düşük olursa, itme ve tork değeri düşük ilerleme katsayılarının mevcut olduğu bölge içinde gereğinden fazla değer, yüksek ilerleme katsayılarının mevcut olduğu bölge içinde ise gereğinden az değer alır. Genelde k_1 ve k_2 değerleri bölgesel Reynolds sayısına ve kanat kesit geometrisinin detaylarına bağlıdır. k_1 ve k_2 değerleri, pervane yüzeyindeki basınç değişimlerine, tekne üzerinde indüklenen basınçlara ve kavitasyon büyüklüğüne önemli derecede etki edebilir (Szantyr,1994).



Şekil 4.6 Viskoz etkiler için düzeltme katsayılarının açıklaması

$$C_{LI} = 2\pi(\alpha + \alpha_o)$$

$$C_{LV} = 2\pi k_1(\alpha + \alpha_o k_2)$$

$$\alpha_{ov} = k_2 \alpha_o$$

C_{LV} : viskoz kesit kaldırma katsayısı

α_{ov} : viskoz kesit kaldırma açısı

Düzeltilme faktörleri kullanılarak elde edilen yeni basınç dağılımları daha sonra süreksiz tabaka kavitasyonunun analizi için kullanılmaktadır. Kavitasyon sayılarına göre kavitasyonlu bölgede kullanılabilen kanat alanı üzerindeki basınç dağılımının toplamı, anahtar kanat üzerinde rol alan kuvvet ve moment bileşenlerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

4.2.5 Pervane Kanadında Tabaka Kavitasyonunun Tespiti ve Analizi

Pervane kanatları üzerindeki tabaka kavitasyonunun incelenmesi tüm kanat kesitleri için bağımsız olarak gerçekleştirilir ve denklem (4.9) ile tanımlanan kavitasyon sayısına dayalı olarak yapılır.

$$\sigma = \frac{p_a + \rho g h - p_c}{1/2 \rho V_\infty^2} \quad (4.9)$$

Burada:

p_a :atmosferik basınç

p_c :kritik buhar basıncı

h :kontrol noktasının derinliği

g :yerçekimi ivmesi

Daha önce tanımlanan kontrol noktalarının yerleri ve kaynak elemanları tabaka kavitasyonunun temsili için kullanılmaktadır. Bu kavitasyonun kanat giriş ucundan itibaren başladığı ve kanat boyunca yayıldığı kabul edilmektedir. Tabaka kavitasyonunun tespiti, giriş ucundan itibaren kanat kesitine ait kord uzunluğunun yaklaşık %5'lik bölgesi içinde süreksiz basınç dağılımının davranışına göre gerçekleştirilmektedir. Denklem (4.10)'da belirtilen şarta göre bu bölge içerisindeki basınç, R_n yarıçaplı kavitasyon çekirdeklerini patlatmak için gerekli olan kritik basıncın altına düştüğünde tabaka kavitasyonunun başladığı varsayılmaktadır.

$$C_p + \sigma + \frac{4S}{\rho V_\infty^2 R_n} < 0 \quad (4.10)$$

Burada:

S : suyun yüzey gerilimi

R_n : tabaka kavitasyonunu başlatacak kavitasyon çekirdeğinin yarıçapı

Tabaka kavitasyonunun kort yönündeki boyu analiz edilen kanat kesiti üzerindeki tüm kontrol noktalarını kaplar. Burada $C_p + \sigma < 0$ bağıntısı mevcuttur. Bu durum, bir önceki kanat pozisyonlarında belirlenen tabaka kavitasyonu tarafından C_p dağılımının değişmesine neden olur. Bir tabaka kavitasyonu nedeni ile orijinal kanat geometrisinde meydana gelen şekil değiştirme, giriş ucu bölgesindeki basıncı artırırken kavitasyon tabakasının sonundaki bölgede basıncı azaltır. Bundan dolayı, birkaç analiz adımından sonra tabaka kavitasyonun uzunluğu, kavitasyonsuz durumdaki C_p dağılımına göre oluşabilecek tabaka kavitasyonu uzunluğundan daha fazla büyüklüğe uzanır. Böylece, bir pervane üzerinde hesaplanan tabaka kavitasyonu nihayetinde denge konumuna ulaşır.

Tabaka kavitasyon yüzeyi üzerindeki dinamik sınır koşulu durgun bir kavitasyon tabakası üzerinde kuvvetler dengesini gerektirir. Örneğin, kavitasyon tabakasının iç ve dış kısmı arasındaki basınç farkının yüzey gerilimi ile dengelenmesi istenir. Ancak, bir kavitasyon hiçbir zaman tam olarak dengede değildir. Kavitasyon içindeki basınç yüzey gerilimi ile desteklenen basınç değerinden daha büyük olduğunda kavitasyon genişler. Bu olayın tersi durumunda ise kavitasyon tabakası küçülür.

Tabaka kavitasyonunun yüzeyi üzerinde kuvvet dengesine dayalı dinamik sınır koşulu denklem (4.11) ile verilmektedir. Bu koşulun, tabaka kavitasyonu olan yüzeyde meydana geldiği varsayılmaktadır.

$$-\sigma - C_p - \frac{4S}{\rho V_\infty^2 R_l} - \frac{8\mu V_{DF}}{\rho V_\infty^2 R_l} = \frac{2}{V_\infty^2} \frac{\partial \varphi_c}{\partial t} \quad (4.11)$$

Burada:

σ : kavitasyon sayısı

R_l : kavitasyon tabakasına ait yüzeyin yerel eğrilik yarıçapı

μ : suyun dinamik viskozitesi

φ_c : kavitasyonun süreksiz davranışını (tabakanın genişlemesi/büzülmesi) temsil eden hız potansiyeli

S : suyun yüzey gerilimi

V_{DF} :tabaka kavitasyon yüzeyinin deformasyon hızı

(4.11) denklemi ile verilen dinamik sınır koşulu aşağıdaki varsayımlara dayandırılarak çıkarılmıştır.

- Kavitasyon tabakası içindeki basınç düzenli olup belirli sıcaklıktaki kritik buhar basıncına eşittir.
- Kavitasyon yüzeyinin yerel eğriligi her iki kesitte de eşittir. Başka bir ifadeyle bu yüzey R_l yarıçapına sahip küresel bir yüzeye yakın bir yüzey olarak analiz edilmektedir.

(4.11) denkleminin sol tarafı, analiz edilen anahtar kanadın herhangi bir pozisyonu için bilinen değerlerden oluşmaktadır. Bu kısımda yer alan R_l ve V_{DF} 'nin bir önceki kanat pozisyonu için yapılan analizden belirlendiği ya da bu konumda kavitasyon meydana gelmezse $R_l = 0$ ve $V_{DF} = 0$ değerlerini aldığı kabul edilmektedir. Bu denklem, genel bir hali ifade etmektedir. Burada tabaka kavitasyonu dengede değildir. Denklemin sol tarafının işaretine bağlı olarak tabaka kavitasyonu büyür veya küçülür. Tabaka kavitasyonunun bu dinamik davranışının ilave bir Q_{cv} kaynak dağılımından yararlanılarak modellendiği kabul edilmektedir. Şekil 4.7'de pervane anahtar kanadı üzerinde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu ve onun kaynak dağılımlarıyla modellenmesi görülmektedir. Bu kaynaklar, daha önce tanımlanan (Q_p) ve (Q_{pc}) kaynakları ile üst üste gelmektedir. φ_c hız potansiyelinin kanadın tabaka kavitasyonu ile kaplı kısmı üzerinde yer alan Q_{cv} kaynakları tarafından karakterize edilebildiği varsayılmaktadır. φ_c potansiyeli kavitasyonun büyümesi veya küçülmesine dair düzensiz davranışı ortaya koymaktadır. Bu potansiyelin zamana göre türevi ($\frac{\partial \varphi_c}{\partial t}$), dinamik sınır koşulu denkleminde elde edilmekte ve denklem (4.12) içinde bilinen bir değer olarak kullanılmaktadır.

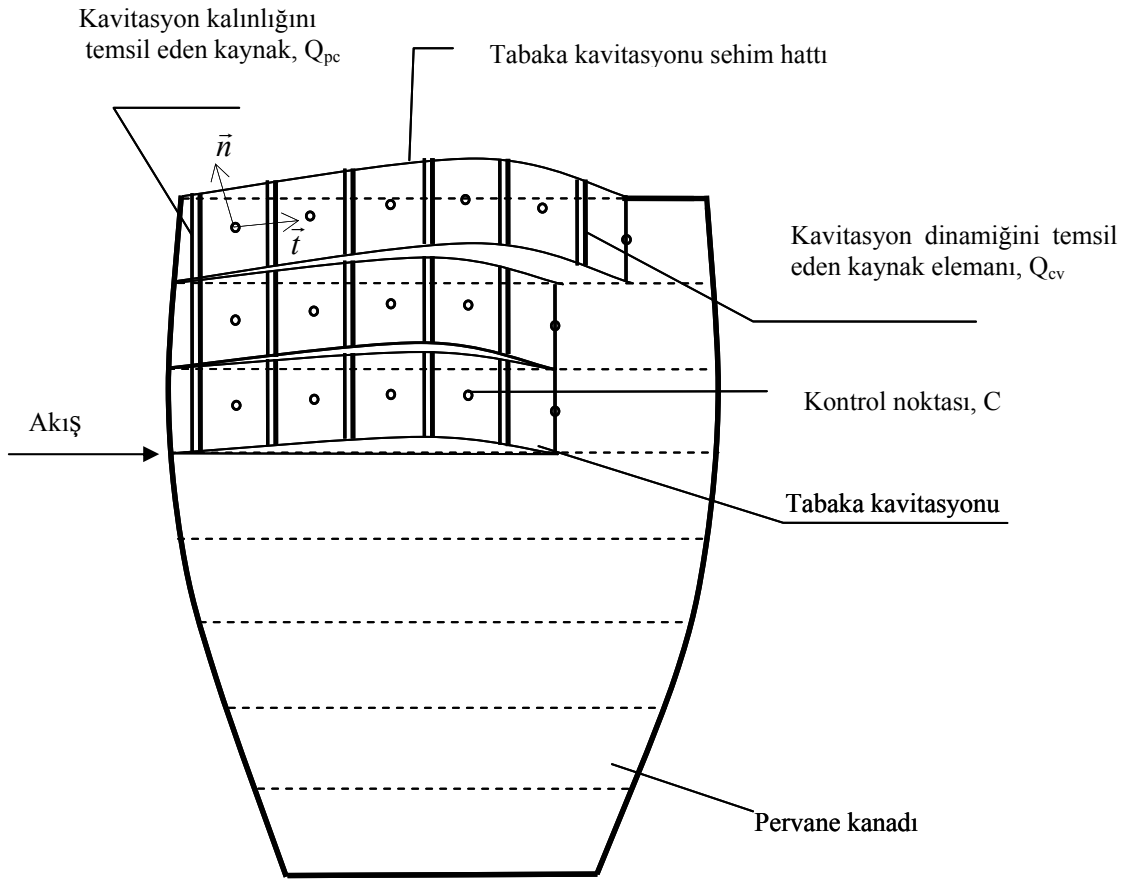
$$\frac{\delta \varphi_c}{\delta t} = -\frac{1}{4\pi} \sum \frac{1}{r_i} \frac{dQ_{cv}}{dt} \quad (4.12)$$

Burada:

r_i :kaynaktan kontrol noktasına olan uzaklık

Q_{cv} :kavitasyonun dinamik davranışını temsil eden tek bir kaynağın yoğunluğu

t : zaman



Şekil 4.7 Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli

Denklem (4.12), herhangi bir kanat pozisyonunda tabaka kavitasyonu ile kaplanmış kanat ve değişken bölge üzerindeki her bir kontrol noktasına uygulanabilmektedir. Böylece, bilinmeyen kaynak şiddetleri $\left(\frac{dQ_{cv}}{dt}\right)$ için lineer denklem sistemi oluşturulmaktadır. Bu kaynak şiddetleri hesaplandığında, kavitasyon yüzeyinin bu yüzeye dik deformasyon hızı denklem (4.13) ile verilen lineerleştirilmiş basit bir formül yardımı ile elde edilebilmektedir.

$$V_{DF} = \frac{1}{\Delta R \cdot V_{\infty}} \frac{dQ_{cv}}{dt} \quad (4.13)$$

Burada:

ΔR :kanadın üzerindeki kavitasyon tabakasının kord yönündeki şeridinin genişliği (Şekil 4.6)

V_{DF} :kavitasyon yüzeyinin deformasyon hızı

Bu deformasyon hız dağılımı kanadın o anki mevcut durumunu temsil eder. Bir sonraki kanat

pozisyonundaki değerinden ayıran Δt zaman periyodu boyunca bu deformasyon hız dağılımının değişmediği varsayılmaktadır. Denklem (4.13)'ten hesaplanan V_{DF} değeri, bir adım sonra analiz edilecek kanat pozisyonu için denklem (4.11) içerisinde yerine konulmaktadır.

Analiz edilen j . ve $(j-1)$. kanat pozisyonlarını ayıran zaman adımının sonunda yerel kavitasyon kalınlığı denklem (4.14)'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir.

$$T_j = T_{j-1} + V_{DFj} \Delta t_j \quad (4.14)$$

Daha sonra bu kalınlık dağılımı kort yönündeki şeritlerin her biri için uygun bir parabolik hat ile yuvarlatılır. Basitleştirmek için kavitasyon tabakasına ait eğrinin sehim hattının, kavitasyon tabakasının kalınlığının yarısı olduğu varsayılmaktadır. Kavitasyon tabakasını temsil eden bu sehim hattı, kanat kesitinin orijinal sehim hattına ilave edilmektedir. Sehim hattı ilavesi ile kaldırıcı yüzeyde oluşacak bu deformasyon, kanat yüzeyi üzerindeki kinematik sınır koşuluna etki eden birim uzunluktaki normal vektörlerin ($\vec{n}$) eğimine etki etmektedir. Bu olay çok önemlidir. Çünkü normal vektörlerin eğimleri hesaplanan basınç dağılımını büyük oranda değiştirebilmekte ve bir sonraki kavitasyon gelişimine etki edebilmektedir. Bir sonraki aşamada kavitasyon tabakasının kalınlığı, kanadın orijinal kalınlığına ilave edilmektedir. Bu olay, kaldırıcı yüzey modelinde kanat kalınlığını temsil eden kaynakların (Q_{pc}) başlangıçtaki şiddetlerini değiştirir. Bu şiddetlerin değerleri denklem (4.15) ile verilmektedir. Kavitasyon tabakasında sapma meydana geldiğinde, herhangi bir kort yönündeki şeritte yer alan kavitasyonun toplam alanı negatif olur ve bu şeritteki kavitasyon sonlandırılır (Şekil 6.8).

$$Q_{pc} = V_{kaynak} \Delta R \frac{dT_c}{dx} \quad (4.15)$$

Burada:

V_{kaynak} : kaynak elemanına gelen akım hızı

ΔR : kort yönündeki şeritin radyal genişliği

T_c : düzeltilmiş kavitasyon kalınlığı

Gemi gövdesi üzerinde kavitasyon gösteren pervane tarafından indüklenen basınç darbelerinin hesabı ise denklem (4.16) ile verilen lineerleştirilmiş Bernoulli denklemine bağlı olarak

yapılmaktadır.

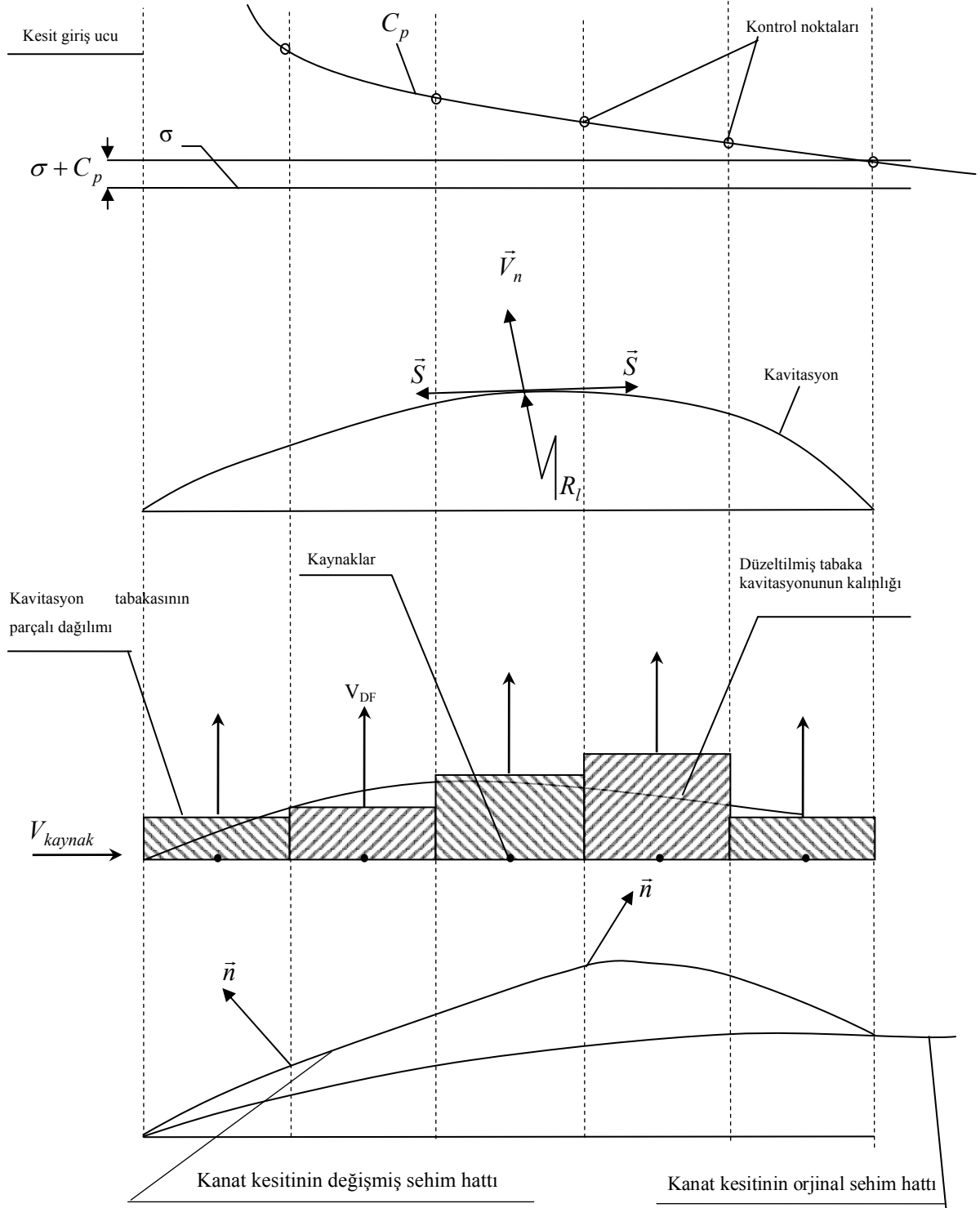
$$\Delta P = -\rho \left(V_{\infty} \frac{\delta \varphi_p}{\delta x} + \frac{\delta \varphi_p}{\delta t} \right) S_{BF} \quad (4.16)$$

Burada:

ΔP : gemi gövdesi üzerinde indüklenen basıncın dalgalanan kısmı

φ_p : pervane yüklenmesi, pervane kanadının kalınlığı, kavitasyon kalınlığı ve kavitasyon hacmindeki değişimin süreksiz etkilerini ifade eden hız potansiyeli

S_{BF} : katı sınır faktörü olup, gemi gövdesi üzerinde sınır koşulunu ifade etmektedir. Bu değer genellikle gemi geometrisi ve seçilen noktaların derinliğine bağlı olarak 1.2-1.8 arasında değişir.



Şekil 4.8 Tabaka kavitasyon modeli

4.2.6 Tabaka Kavitasyonu Kaynaklı Sualtı Gürültü Tahmini

Düzensiz akım alanında çalışan bir gemi pervanesinin kavitasyonlu ve kavitasyonsuz şartlarda oluşturduğu gürültü bir gemideki yolcu ve müretabatın konforuna ve su altında tespit edilme bakımından askeri gemilerin hayatta kalabilirliğine önemli derecede etki etmektedir. Özellikle, kavitasyon olayı pervanenin oluşturduğu su altı gürültüsünün en yaygın kaynağıdır. Bu bağlamda, kavitasyon nedeni ile oluşan gürültünün seviyesini öngörmek güvenilir bir sualtı gürültü emisyon kaynağını kurmak açısından önem taşımaktadır.

Kavitasyon kaynaklı gürültü türleri arasında özellikle pervane kanadında görülen daimi olmayan tabaka kavitasyonunun en yüksek seviyede gürültü ürettiği bilinmektedir (Ross, 1976).

Son zamanlarda, tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü üzerine yapılan teorik araştırmalarda panel metoda dayalı hidrodinamik model ile Ffowcs Williams-Hawkins denklemini içine alan panel metoda dayalı hidroakustik modelin birleşiminden oluşan metotlar kullanılmıştır. Bu metotlar, Salvatore ve Ianniello (2002) ile Seol vd.(2005) çalışmalarında yer almaktadır.

Geliştirilen kaldırıcı yüzey modelinde ise, pervane kanadında görülen tabaka kavitasyonu tarafından indüklenen su altı gürültüsünün öngörüsü için Okamura ve Asano (1988) ile Yoshimura ve Koyanagi (2004) çalışmalarında uygulama alanı bulan Brown metodu kullanılmıştır. Kaldırıcı yüzey metodu tarafından hesaplanan kavitasyon alanları Brown'un (4.17) denklemi ile verilen formülü kullanılarak pervanenin o andaki konumu için oluşan gürültü seviyesi bulunmaktadır. Gürültü hesaplamalarında en yaygın olarak kullanılan band aralığı 1/3 oktav bandıdır. 1/3 oktav bandında frekans üst sınır değeri frekans alt sınır değerinin $2^{1/3}$ katı olup, hesaplamalarda 10-100000 Hz frekans aralığı kullanılmaktadır.

$$L_s = 163 + 10 \log \left[\frac{Z D^4 n^3}{f^2} \right] + 10 \log \left[\frac{A_c}{A_d} \right] \quad (4.17)$$

$$A_c = \int_0^{2\pi} \int_{r_{E1}}^{r_{E2}} r dr d\theta \quad (4.18)$$

Burada:

L_s : gürültü düzeyi (dB re 1 metre $1 \mu Pa$)

A_c : pervane kanadında oluşan tabaka kavitasyonunun süpürme (swept) alanı (Şekil 4.9)

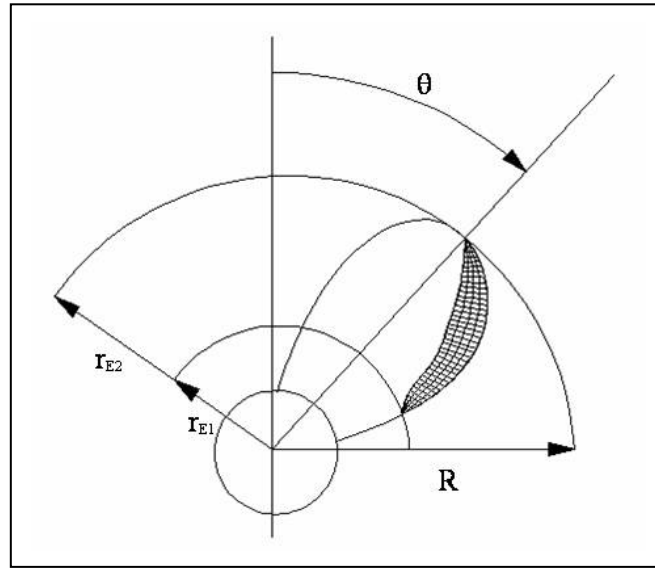
A_d : pervane disk alanı ($A_d = \pi D^2 / 4$)

Z : pervane kanat sayısı

n : pervane devir sayısı ($1/s$)

f : frekans (Hz)

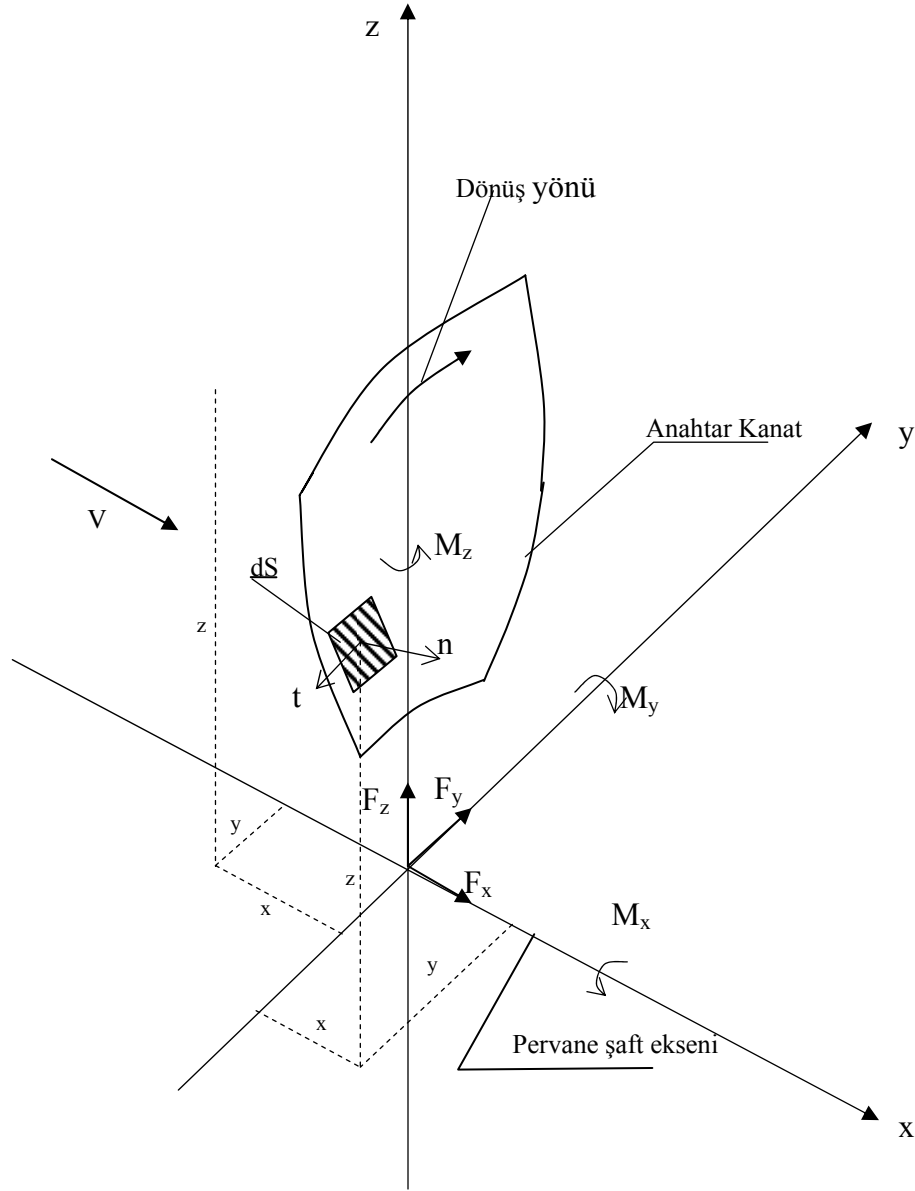
D : pervane çapı (m)



Şekil 4.9 Brown formülüne göre tabaka kavitasyonunun süpürme alanı

4.2.7 Pervane Üzerindeki Kuvvet ve Moment Bileşenlerinin Hesaplanması

Her bir kanat pozisyonunda pervane kanadı üzerindeki kuvvet ve moment bileşenlerinin hesaplanmaları, kanat yüzeyindeki basınç dağılımlarının entegrasyonu ile yapılır (Şekil 4.10). Bunun için daha önce hesaplanan basınç dağılımları kullanılır.



Şekil 4.10 Pervane kanadına etkiyen kuvvet ve moment bileşenleri

Anahtar kanat üzerindeki kuvvet ve moment bileşenleri denklem (4.19)'da verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

x, y ve z kuvvet bileşenleri,

$$F_{sx} = -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot n_x + C_D \cdot t_x] ds$$

$$F_{sy} = -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot n_y + C_D \cdot t_y] ds$$

$$F_{sz} = -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot n_z + C_D \cdot t_z] ds \quad (4.19)$$

x, y ve z moment bileşenleri,

$$M_{sx} = -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot (n_z \cdot y - n_y \cdot z) + C_D \cdot (t_z \cdot y - t_y \cdot z)] ds$$

$$M_{sy} = -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot (n_x \cdot z - n_z \cdot x) + C_D \cdot (t_x \cdot z - t_z \cdot x)] ds$$

$$M_{sz} = -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot (n_y \cdot x - n_x \cdot y) + C_D \cdot (t_y \cdot x - t_x \cdot y)] ds$$

Burada:

ρ : suyun yoğunluğu

n : pervane devir sayısı

ΔC_p : emme ve basınç tarafları arasındaki basınç katsayısı farkı

C_D : kesit direnç katsayısı

n_x, n_y, n_z : normal birim vektörün kartezyen koordinatlardaki bileşenleri

t_x, t_y, t_z : teğetsel birim vektörün kartezyen koordinatlardaki bileşenleri

S : kanat alanı

Kanat kesit direnç katsayıları için denklem (4.20) kullanılmakta veya kanat kesitleri biliniyorsa giriş değeri olarak analiz işlemlerine katılmaktadır.

$$C_D = 2 \left(1 + 2 \frac{t_{\max}}{c} \right) \left(1.89 + 1.62 \log \frac{c}{0.00003} \right)^{-2.5} \quad (4.20)$$

Burada:

$\frac{t_{\max}}{c}$: boyutsuz maksimum kesit kalınlığı

c : kesit kort uzunluğu

Pervane şaftına gelen toplam kuvvet ve moment bileşenleri ise denklem (4.21) ve denklem (4.22)'de verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır.

x, y ve z kuvvet bileşenleri,

$$F_{px} = \sum_{i=1}^Z F_{sx}^i$$

$$F_{py} = \sum_{i=1}^Z (F_{sz}^i \cdot \cos \theta + F_{sy}^i \cdot \sin \theta) \quad (4.21)$$

$$F_{pz} = \sum_{i=1}^Z (F_{sz}^i \cdot \sin \theta - F_{sy}^i \cdot \cos \theta)$$

x, y ve z moment bileşenleri,

$$M_{px} = \sum_{i=1}^Z M_{sx}^i$$

$$M_{py} = \sum_{i=1}^Z (M_{sz}^i \cdot \cos \theta + M_{sy}^i \cdot \sin \theta) \quad (4.22)$$

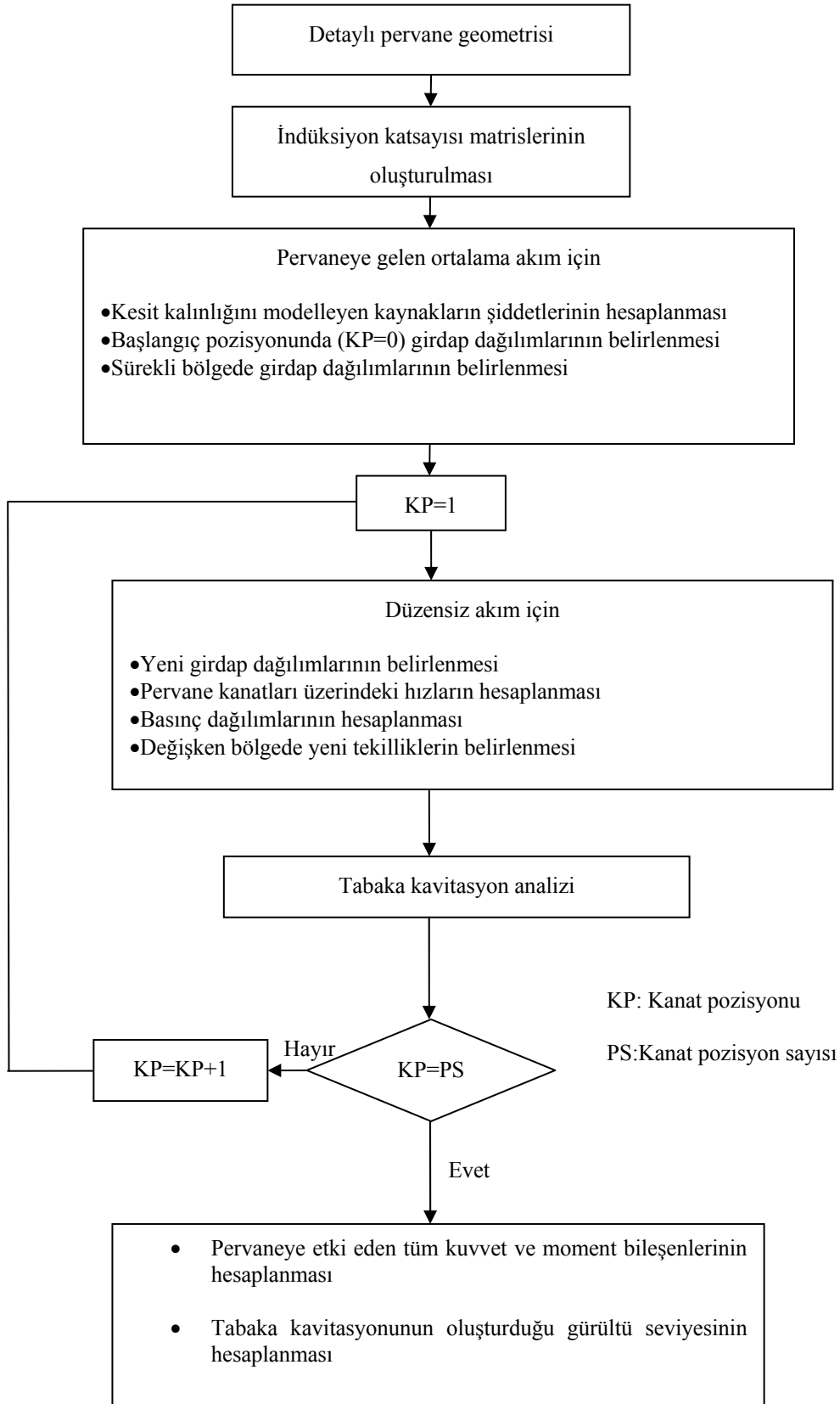
$$M_{pz} = \sum_{i=1}^Z (M_{sz}^i \cdot \sin \theta - M_{sy}^i \cdot \cos \theta)$$

Burada:

Z : pervane kanat sayısı

θ : kanat pozisyon açısı, $\theta = \varphi_{pa} + 360 \cdot (i - 1) / Z$

φ_{pa} : pervane pozisyon açısı



Şekil 4.11 Mevcut kaldırıcı yüzey metoduna ait algoritma

5. SAYISAL UYGULAMALAR

Bu çalışmada, Bölüm 4’de anlatılan ve formülasyonu verilen kaldırıcı yüzey metodu için sayısal bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir. Ana hatları ile pervane ve kavitasyon analizi yapabilme imkanı veren PKAV adlı programın yazılımı FORTRAN programlama kodunda yapılmıştır. Bu bölümde, deney sonuçları bilinen DTMB 4119 ve DTMB 4148 model pervanesi ile Seiun-maru HSP pervanesinin analizi geliştirilen yazılım ile yapılacak, ayrıca diğer sayısal metotlar ile karşılaştırması yapılacaktır.

PKAV Programına Ait Hesap Aşamaları

Bir önceki bölümde açıklanan prensiplere dayanarak gerçekleştirilen hesaplamalar pervanenin bir tam devrini kapsayan birkaç aşama halinde aşağıda belirtildiği gibi düzenlenmiştir.

Çevresel ortalama akıma göre yapılan hesapların ilk aşaması:

- 1-) Ortalama yük dağılımını elde etmek için anahtar kanat üzerindeki kinematik sınır koşulunun hesaplanması.
- 2-) Pervane girdap modelinin sürekli bölgesi tarafından indüklenen hızların hesaplanması. Bu hızlar, anahtar kanat dışındaki tüm kanatlar tarafından ve değişken bölge dışındaki tüm serbest girdap yüzeyleri tarafından indüklenen hızları içerir.

Aşağıda verilen hesap sıraları ise pervanenin bir tam devrini kapsayacak şekilde anahtar kanadın belirtilen tüm pozisyonları için gerçekleştirilir.

- 1-) Anahtar kanat üzerindeki mevcut yerel akım hızı dağılımının enterpolasyonu.
- 2-) Değişken bölgede mevcut girdap dağılımı tarafından indüklenen hızların hesaplanması.
- 3-) Eğer bir önceki kanat pozisyonunda tabaka kavitasyonu meydana gelmiş ise kavitasyona bağlı olarak kanat geometrisinde meydana gelen deformasyonun hesaplara dahil edilmesi.
- 4-) Anahtar kanat üzerindeki kinematik sınır koşulunun çözülmesi.
- 5-) Kanat yükü, kanat kalınlığı ve şayet meydana gelmiş ise tabaka kavitasyonu kalınlığı tarafından tekne yüzeyi üzerinde indüklenen basınçların değerlendirilmesi.
- 6-) Kanat üzerindeki basınç dağılımının ve buna bağlı olarak bileşke kuvvet ve moment bileşenlerinin hesaplanması.

7-) Tabaka kavitasyonunun başlangıç analizinin yapılması ve kanat yüzeyi üzerinde oluşan bu kavitasyonun karakteristiklerinin belirlenmesi.

8-) Değişken bölgedeki girdap dağılımının yenilenmesi işleminin gerçekleştirilmesi.

Eğer analiz yapılan mevcut kanat pozisyonunda kavitasyon tespit edilirse veya bir önceki kanat pozisyonunda kavitasyon var ise aşağıda belirtilen bir sonraki hesap aşamalarına geçilir. Şayet kavitasyon meydana gelmez ise bu hesaplar atlatılır.

1-) Kavitasyon yüzeyindeki dinamik sınır koşulunun çözülmesi.

2-) Kavitasyon tabakasındaki hacim değişimi nedeni ile tekne yüzeyinde indüklenen basınçların hesaplanması.

3-) Kavitasyon tabakasının deformasyon hızının dağılımı ve bunun sonucu oluşan kavitasyon kalınlığının belirlenmesi.

4-) Kavitasyon nedeni ile kanat kesitinin sehim hattında meydana gelen deformasyonun hesaplanması.

5-) Kavitasyonun kapanma işleminin gerçekleştirilmesi.

Öngörülen kanat pozisyonları yukarıda belirlendiği gibi analiz edildikten sonra aşağıdaki son hesaplar gerçekleştirilir.

1-) Şayet tabaka kavitasyonu meydana gelir ise pervane kanadının o anki konumu için oluşan gürültü seviyesinin hesaplanması.

2-) Tüm pervane kanatları tarafından tekne üzerinde indüklenen basınçların ve kuvvet-moment bileşenlerinin hesaplanması.

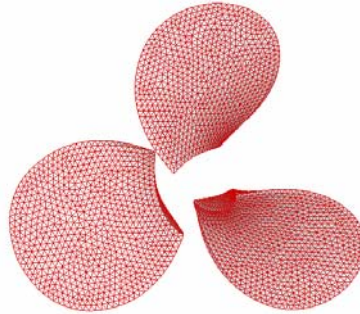
CFD analizi

Sein-maru HSP pervanesi ile DTMB 4119 pervanesinin CFD analizi için ticari bir RANS çözücüsü olan FLUENT 6.2.16 programı kullanılmıştır. Yapılan analizde akışın sıkıştırılamaz ve türbülanslı olduğu varsayılmış, türbülans modeli olarak standart $k-\varepsilon$ türbülans modeli seçilmiştir. FLUENT programında kurucu denklemler ikinci derece ileri farklar yöntemi kullanılarak ayrıklaştırılmakta ve ayrıklaştırılan denklemler SIMPLE algoritması yardımı ile çözülmektedir. Her iki pervaneye ait geometri Rhino CAD programı ile modellenmiş ve FLUENT içindeki ilk işlemci GAMBIT alt programı kullanılarak mesh edilmiştir. Her iki pervane için hesaplama alanı; pervaneyi içine alan iç dönel alan ve sabit dış dönel alan olmak

üzere iki silindirik kısma ayrılmıştır. Pervanelere ait kanat yüzeyleri küçük üçgen elemanlar ile mesh edilmiş, hareketli alana ait diğer yüzeylerde ise daha büyük üçgen elemanlar kullanılmıştır. Daha sonra bu alan dörtgen hücreler ile doldurulmuştur. Dışta kalan sabit blok için basit silindirik mesh tekniği kullanılmıştır. Analiz işleminin hesaplama alanı içinde yaklaşık 1.000.000 adet hücre kullanılmıştır. DTMB 4119 pervanesine ait düzenli iz alanı içindeki daimi akış simülasyonu FLUENT programında yer alan “hareketli referans frame tekniği”, Seiun-maru HSP pervanesine ait düzensiz iz alanı içindeki daimi olmayan akış simülasyonu ise “kayıcı mesh tekniği” yardımı ile yapılmıştır. FLUENT programı ile gerçekleştirilen bu analiz hesapları, 2 GB RAM, Pentium 4, 2.7 GHz CPU ve 40 GB HD özelliklerine sahip IBM bilgisayarda gerçekleştirilmiştir.

Uygulama 1

Geliştirilen metot için ilk uygulama olarak DTMB 4119 pervanesi ele alınmıştır. Daha önce 24 inch’lik DTMB su tüneline, bu pervaneye ait hidrodinamik karakteristikleri elde etmek için düzenli akım ortamında deneyler yapılmıştır (Jessup,1989). DTMB 4119 pervanesi 1960 yılında kaldırıcı yüzey metoduna uygulanmak üzere tasarlanmış 3 kanatlı model bir pervanedir. Pervane klasik bir pervane olup çalıklık (skew) ve eğikliğe (rake) sahip değildir (Şekil 5.1). Çizelge 5.1’de DTMB 4119’a ait kanat geometrisinin özellikleri, Çizelge 5.2’de ise pervaneye ait karakteristik bilgiler verilmektedir. Şekil 5.2’de pervaneye ait açık su karakteristikleri değişik ilerleme katsayılarına bağlı olarak, Şekil 5.3’ de $r/R = 0.3$ kesitine, Şekil 5.4’ de $r/R = 0.7$ kesitine, Şekil 5.5’ de ise $r/R = 0.9$ kesitine ait pervane kanadının sırt ve yüz taraflarındaki basınç dağılımları boyutsuz kort uzunluklarına (x/c) bağlı olarak karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



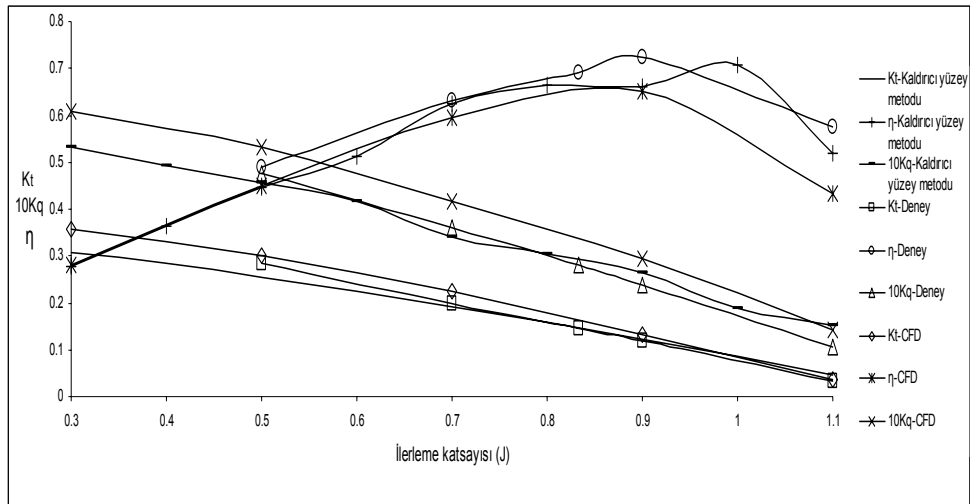
Şekil 5.1 DTMB 4119 pervanesi

Çizelge 5.1 DTMB 4119 pervanesine ait kanat geometrisi

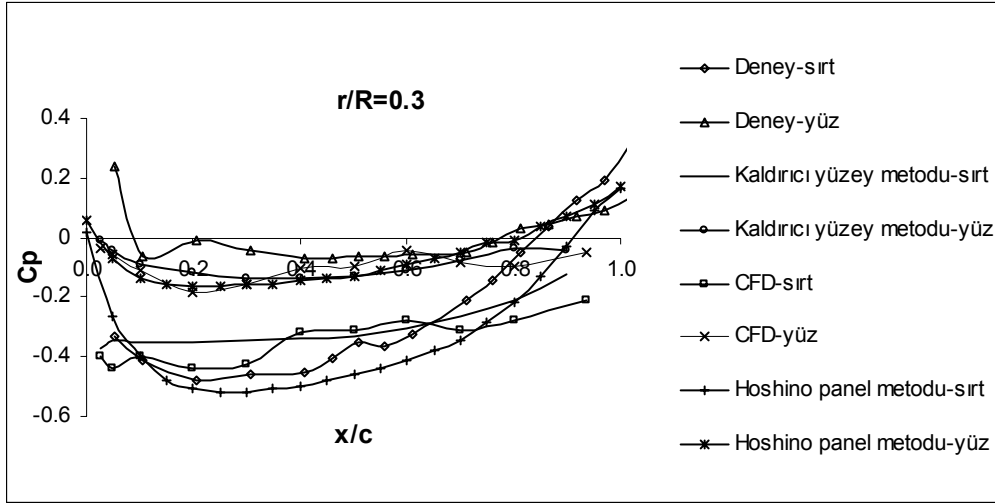
Boyutsuz yarıçap r/R	Kord dağılımı c (m)	Hatve dağılımı P/D	Kalınlık dağılımı t/c	Sehim dağılımı f/c
0.2	0.0975	1.105	0.2055	0.01429
0.3	0.1105	1.102	0.1553	0.02318
0.4	0.1234	1.098	0.1180	0.02303
0.5	0.1339	1.093	0.0916	0.02182
0.6	0.1405	1.088	0.0696	0.02072
0.7	0.1409	1.084	0.05418	0.02003
0.8	0.1325	1.081	0.04206	0.01967
0.9	0.1101	1.079	0.03321	0.01817
0.95	0.0846	1.077	0.03228	0.01631
1	0.0000	1.075	0.0316	0.01175

Çizelge 5.2 DTMB 4119 pervanesine ait karakteristikler

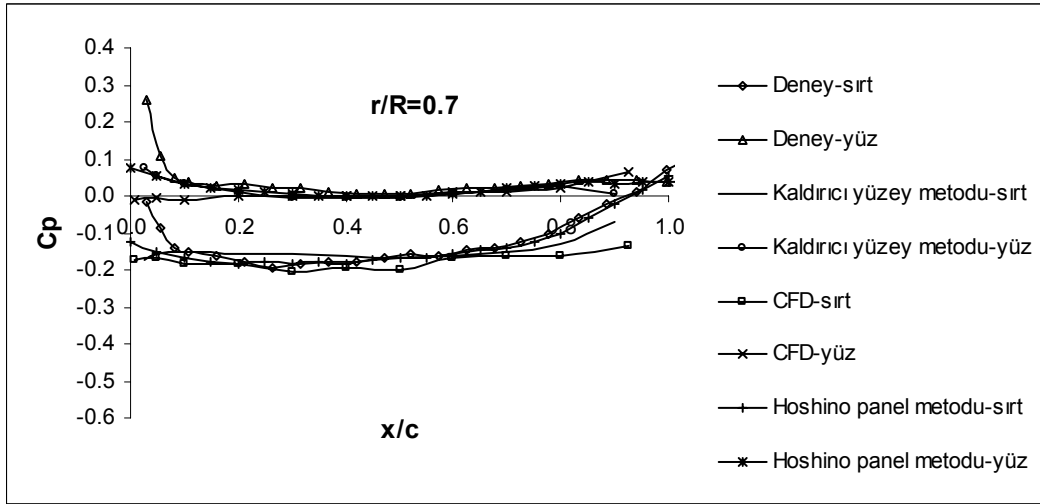
Pervaneye iletilen güç, P_D (kW)	0.474
İlerleme hızı, V_A (m/s)	2.540
Devir sayısı, n (1/s)	10
Pervane çapı, D (m)	0.3048
Kanat sayısı, Z	3
Kanat kesiti	NACA66 a=0.8 (mod.)



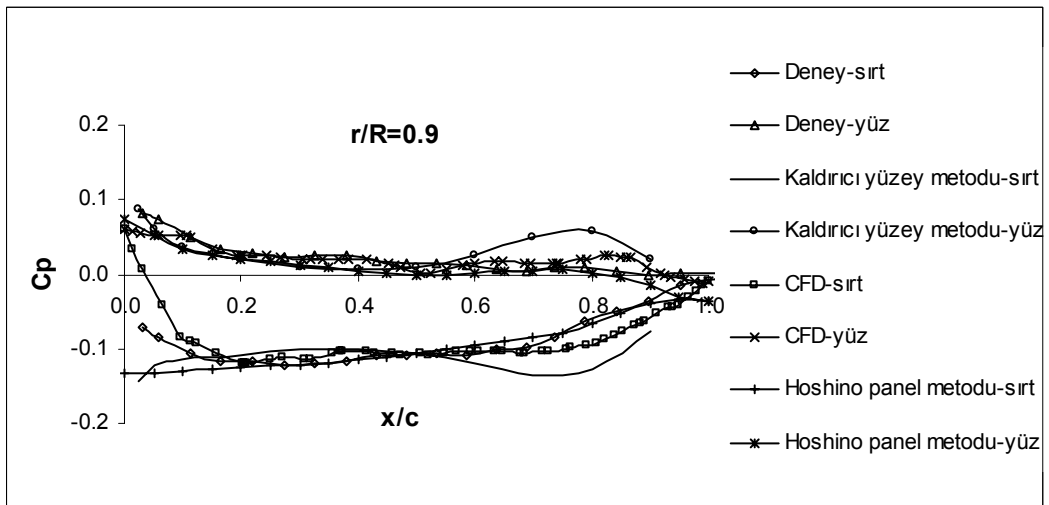
Şekil 5.2 DTMB 4119 pervanesi için açık su karakteristikleri



Şekil 5.3 DTMB 4119 pervanesinin $r/R = 0.3$ kesitindeki basınç dağılımı



Şekil 5.4 DTMB 4119 pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitindeki basınç dağılımı

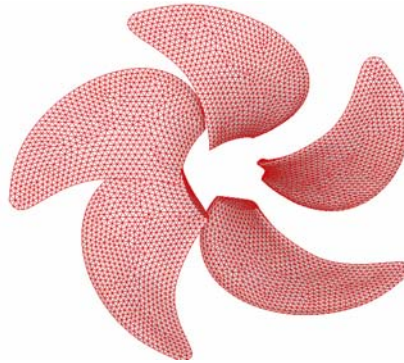


Şekil 5.5 DTMB 4119 pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitindeki basınç dağılımı

Uygulama 2

Uygulama olarak seçilen diğer bir pervane ise “Seiun-maru” adlı bir eğitim gemisi için dizayn edilen pervane örneğidir. Bu gemi için tasarlanan pervanelerden biri klasik pervane (CP) diğeri ise yüksek çalıklıklı klasik olmayan (HSP) pervanedir.

Pervane kanadı üzerine yerleştirilen yüksek tepkili basınç dönüştürücüleri (transducer) kullanarak basınç dağılımının ölçümü zordur. Bu nedenle pervane kanatları üzerinde teorik olarak elde edilen basınç dağılımları ile deneysel olarak ölçülen çok sayıdaki verileri karşılaştırmak daha elverişli bir yöntemdir. Bu amaçla Sein-Maru HSP ve CP üzerine Ukon vd. (1990, 1991) tarafından tam ölçekte elde edilen ölçümler kullanılabilmektedir. Bu yapılan çalışmalarda, her iki pervane için 0.5, 0.7, 0.9 ve 0.95 boyutsuz yarıçap (r/R) değerlerinde kanadın basınç tarafında 9 noktada emme tarafında ise 15 noktada ölçümler yapılmıştır. Bu uygulamada ise Seiun-maru HSP için $r/R = 0.7$ ve $r/R = 0.9$ değerlerinde elde edilen ve ITTC (1998)’de bulunan Hoshino (1998) çalışmasından alınan sonuçlar kullanılmıştır. Sein-marı HSP pervanesi beş kanatlı ve yüksek çalıklıklı bir pervane olup, pervane tarafından tekne üzerinde indüklenen basınç dalgalanmalarını azaltmak için dizayn edilmiştir (Şekil 5.6). Pervaneye ait kanat kesit geometrileri, Çizelge 5.3’de boyutsuz yarıçap değerlerine göre verilmektedir.



Şekil 5.6 Seiun-maru HSP pervanesi

Hoshino (1998)’nün çalışmasında bu pervanenin kanatları üzerindeki daimi olmayan basınç dağılımlarının ölçümleri için, pervane devir sayıları 70, 90, 110 ve 149 d/d olmak üzere dört farklı test koşulunda gerçekleştirilmiştir. Devir sayısının 90 d/d olduğu test koşulunda ölçülen basınç verileri seçilmiştir. Çünkü bu koşulda, pervane kanadı üzerindeki tabaka kavitasyonunun küçük bir alan gösterdiği ve bu devirde ölçülen verilerin daha titiz çalışmalar sonucu elde edildiği belirtilmektedir (Hoshino, 1998). Bu test koşulunda Seiun-maru HSP pervanesi için gerekli karakteristik bilgiler Çizelge 5.4’de verilmektedir. Çizelge 5.5, Çizelge

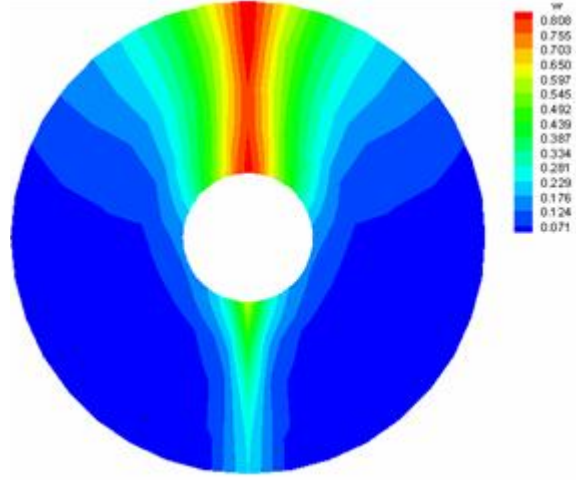
5.6 ve Çizelge 5.7’de ise sırası ile tam ölçekte eksenel, teğetsel ve radyal yöndeki boyutsuz hız dağılımları verilmektedir. Burada belirtilen θ açısı kanat pozisyon açısı olup, sağ dönüşlü bir pervane için saat ibresi yönünde pozitif kabul edilmektedir. w_x, w_y, w_z kartezyen koordinat sisteminde x,y,z yönlerindeki iz katsayılarını, V_x pervane düzlemindeki eksenel hızı, V_t pervane düzlemindeki teğetsel hızı (pervane dönüş yönünde pozitif), V_r pervane düzlemindeki radyal hızı (dışa doğru pozitif), V ise gemi hızını ifade etmektedir. Nominal iz dağılımı ise Şekil 5.7’de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 Seiun-maru HSP pervanesine ait kanat geometrisi

Boyutsuz yarıçap r/R	Kord dağılımı c (m)	Çalıklık dağılımı (m)	Hatve dağılımı P/D	Eğiklik dağılımı (m)	Kalınlık dağılımı t/c	Sehim dağılımı f/c
0.2	0.7430	-0.0024	0.9445	-0.0112	0.1958	0.0506
0.3	0.8975	-0.0536	0.9865	0.0502	0.1430	0.0419
0.4	1.0306	-0.0473	1.0100	0.0651	0.1080	0.0349
0.5	1.1331	-0.0012	1.0150	0.0594	0.0831	0.0294
0.6	1.1919	0.0919	0.9925	0.0395	0.0646	0.0249
0.7	1.1853	0.2657	0.9440	0.0017	0.0505	0.0203
0.8	1.0768	0.5335	0.8709	-0.0429	0.0401	0.0166
0.9	0.8208	0.8932	0.7800	-0.0801	0.0329	0.0136
0.95	0.5876	1.1050	0.7267	-0.0912	0.0325	0.0123
1	0.0000	1.3367	0.6683	-0.0952	0.0000	0.0000

Çizelge 5.4 Seiun-maru HSP pervanesine ait karakteristikler

Pervaneye iletilen güç, P_D (kW)	360
Dizayn hızı, V_S (knot)	9
İlerleme katsayısı (J)	0.851
Devir sayısı, n (d/d)	90
Pervane çapı, D (m)	3.6
Yayılm alanı oranı	0.7
Kanat kalınlık oranı	0.0496
Çalıklık açısı (derece)	45
Eğiklik açısı (derece)	-3.03
Kanat sayısı, Z	5
Kanat kesiti	Mod. SRI-B



Şekil 5.7 Seiun-maru HSP pervanesine ait nominal iz dağılımı [6]

Çizelge 5.5 Seiun-maru HSP pervanesine ait eksenel boyutsuz hız dağılımı $(1 - w_x) = \frac{V_x}{V}$

θ [derece]	Boyutsuz yarıçap (r/R)				
	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
0	0.1580	0.1901	0.1910	0.1395	0.1410
10	0.2345	0.3315	0.4030	0.4299	0.3927
20	0.3543	0.5161	0.6023	0.6144	0.6094
30	0.4753	0.6436	0.7275	0.7468	0.7484
40	0.5696	0.7483	0.8153	0.8136	0.8195
50	0.6615	0.8243	0.8687	0.8593	0.8613
60	0.7336	0.8825	0.9128	0.9045	0.9106
70	0.7902	0.9127	0.9234	0.9193	0.9382
80	0.8247	0.9239	0.9304	0.9426	0.9544
90	0.8488	0.9408	0.9448	0.9602	0.9675
100	0.8591	0.9495	0.9518	0.9672	0.9731
110	0.8648	0.9543	0.9556	0.9712	0.9764
120	0.8629	0.9547	0.9585	0.9737	0.9686
130	0.8503	0.9527	0.9600	0.9722	0.9746
140	0.8262	0.9457	0.9599	0.9679	0.9817
150	0.7845	0.9310	0.9590	0.9604	0.9808
160	0.7116	0.8971	0.9504	0.9482	0.9794
170	0.5815	0.8040	0.9063	0.9228	0.9475
180	0.4065	0.5705	0.6859	0.7527	0.7711

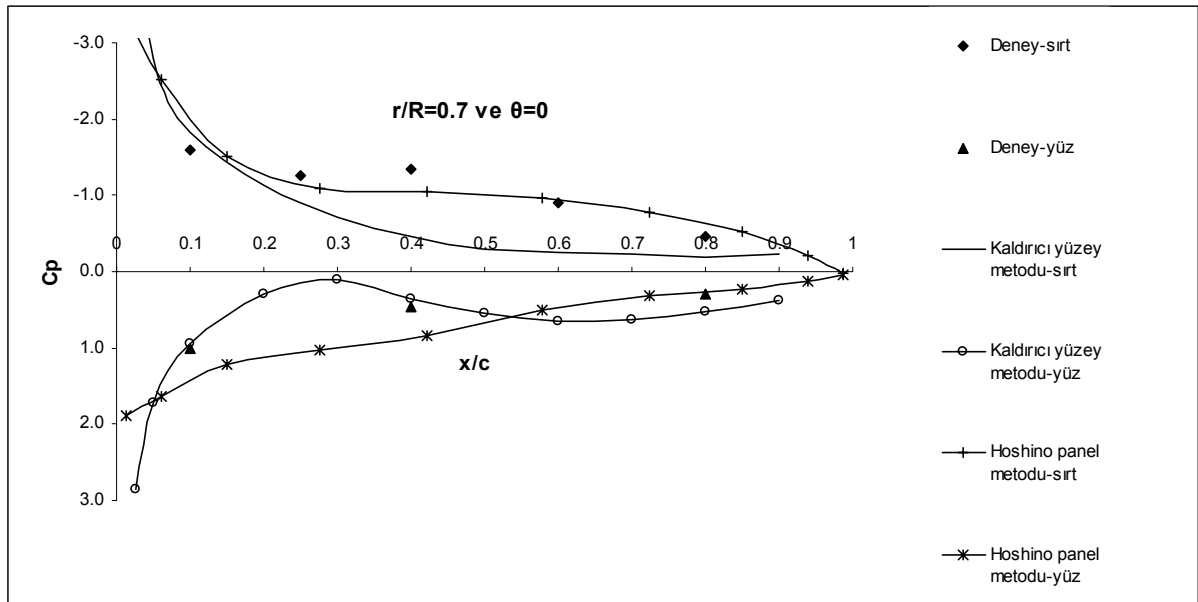
Çizelge 5.6 Seiun-maru HSP pervanesine ait teğetsel boyutsuz hız dağılımı $(1 - w_t) = \frac{V_t}{V}$

θ [derece]	Boyutsuz yarıçap (r/R)				
	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
0	0	0	0	0	0
10	0.039	0.075	0.079	0.103	0.116
20	0.044	0.063	0.075	0.089	0.104
30	0.044	0.063	0.098	0.108	0.125
40	0.048	0.082	0.123	0.129	0.14
50	0.056	0.106	0.139	0.14	0.147
60	0.066	0.129	0.142	0.141	0.146
70	0.07	0.137	0.139	0.137	0.139
80	0.069	0.132	0.132	0.13	0.129
90	0.067	0.124	0.122	0.121	0.116
100	0.066	0.112	0.11	0.108	0.105
110	0.063	0.098	0.096	0.094	0.093
120	0.055	0.079	0.081	0.079	0.079
130	0.039	0.053	0.063	0.066	0.059
140	0.016	0.024	0.044	0.05	0.037
150	-0.0114	0.0005	0.023	0.028	0.021
160	-0.0489	-0.0044	0.003	-0.0015	0.02
170	-0.0534	-0.0726	-0.0637	-0.0993	0.004
180	0	0	0		0

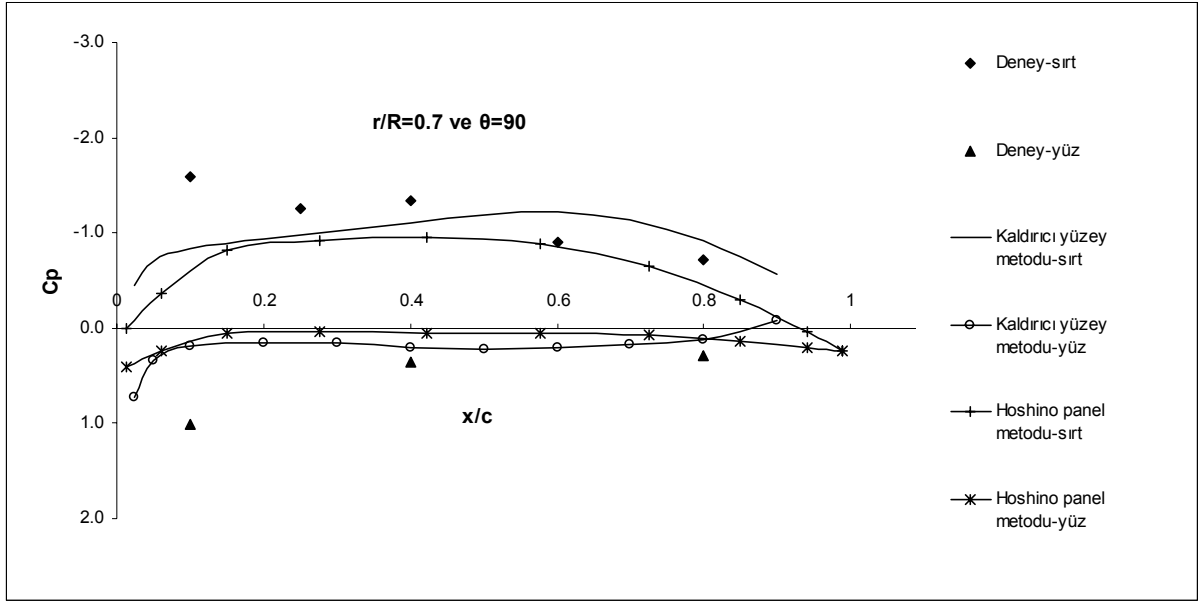
Çizelge 5.7 Seiun-maru HSP pervanesine ait radyal boyutsuz hız dağılımı $(1 - w_r) = \frac{V_r}{V}$

θ [derece]	Boyutsuz yarıçap (r/R)				
	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1
0	0.0000	-0.0720	-0.0560	-0.0270	-0.0220
10	-0.0450	-0.0520	-0.0410	-0.0250	-0.0140
20	-0.0590	0.0025	0.0025	0.0257	0.0054
30	-0.0450	0.0005	0.0163	0.0287	0.0346
40	-0.0380	0.0049	0.0331	0.0375	0.0445
50	-0.0350	0.0079	0.0366	0.0385	0.0390
60	-0.0360	0.0084	0.0247	0.0287	0.0208
70	-0.0460	-0.0020	0.0059	0.0084	-0.0020
80	-0.0640	-0.0210	-0.0180	-0.0190	-0.0260
90	-0.0820	-0.0410	-0.0420	-0.0460	-0.0480
100	-0.0960	-0.0600	-0.0620	-0.0650	-0.0660
110	-0.1080	-0.0790	-0.0790	-0.0790	-0.0800
120	-0.1190	-0.0970	-0.0940	-0.0930	-0.0930
130	-0.1330	-0.1170	-0.1060	-0.1110	-0.1040
140	-0.1440	-0.1340	-0.1150	-0.1280	-0.1130
150	-0.1390	-0.1430	-0.1210	-0.1230	-0.1210
160	-0.1050	-0.1380	-0.1250	-0.0710	-0.1230
170	-0.0720	-0.1360	-0.1340	-0.1250	-0.1570
180	-0.0410	-0.0190	-0.0330	-0.0530	-0.1560

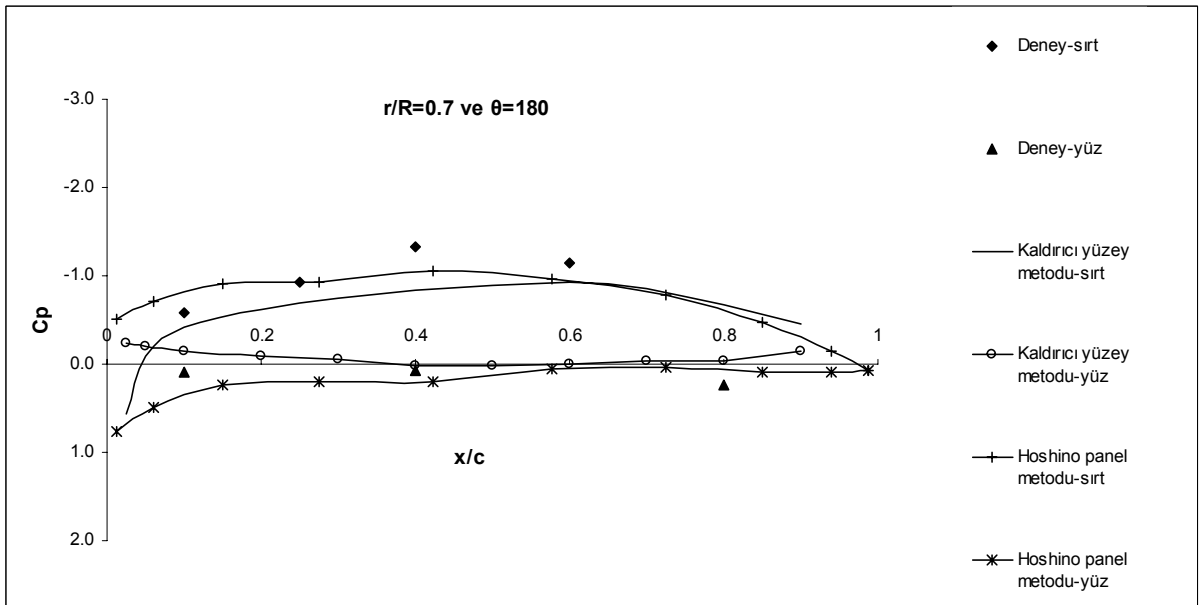
Seiun-maru HSP pervanesi için mevcut kaldırıcı yüzey metodunun sonuçları ile Hoshino (1998) tarafından panel metoda dayanarak elde edilen teorik değerler, deneysel sonuçlar ve CFD metodundan elde edilen bazı sonuçlar karşılaştırılmıştır. Şekil 5.8-5.15 arasında, $r/R = 0.7$ ve $r/R = 0.9$ boyutsuz yarıçaplarda $\theta = 0^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 180^\circ$ ve $\theta = 270^\circ$ kanat pozisyonlarında elde edilen basınç dağılımları boyutsuz kort uzunluğu (x/c)'na göre karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Bu şekillerden Seiun-maru HSP pervanesi için $r/R = 0.7$ boyutsuz yarıçap değerinde sayısal olarak elde edilen değer ile deneysel sonuçların iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Ancak $r/R = 0.9$ boyutsuz yarıçap değerlerinde Hoshino (1998) tarafından da belirtildiği gibi özellikle kanadın sırt tarafında çıkış ucu bölgelerinde birtakım farklılıkların olduğu görülmektedir.



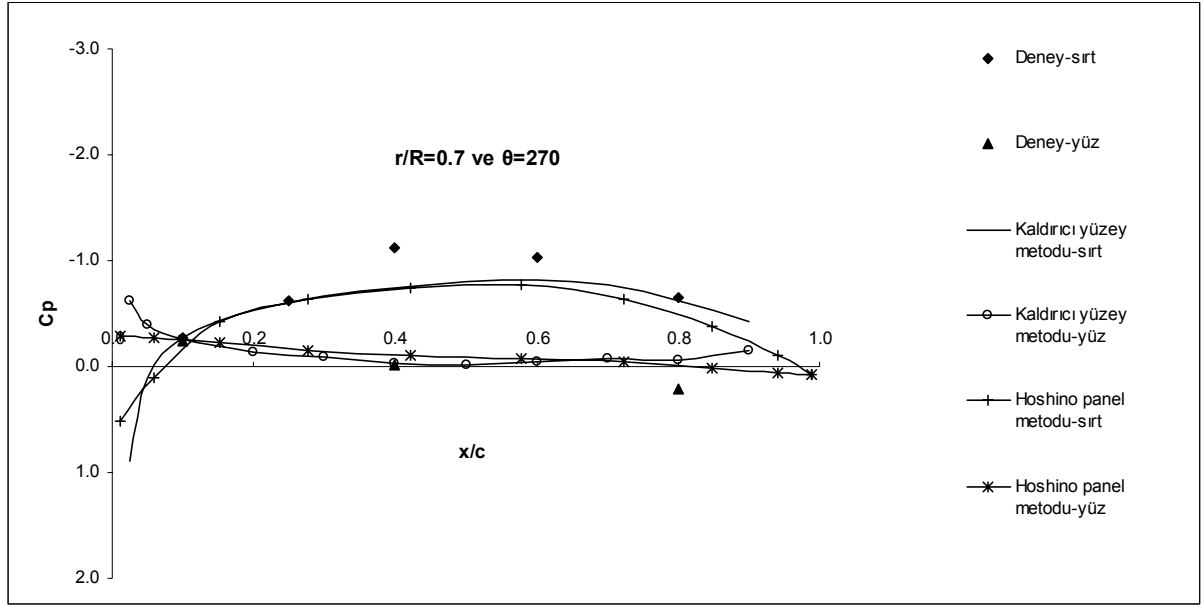
Şekil 5.8 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



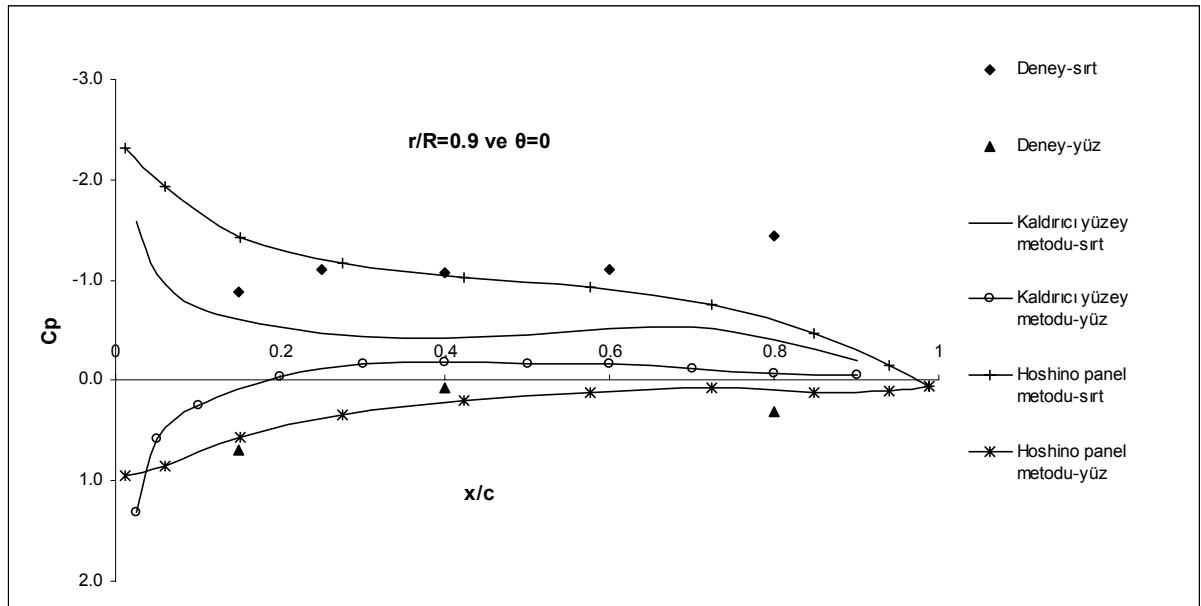
Şekil 5.9 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 90^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



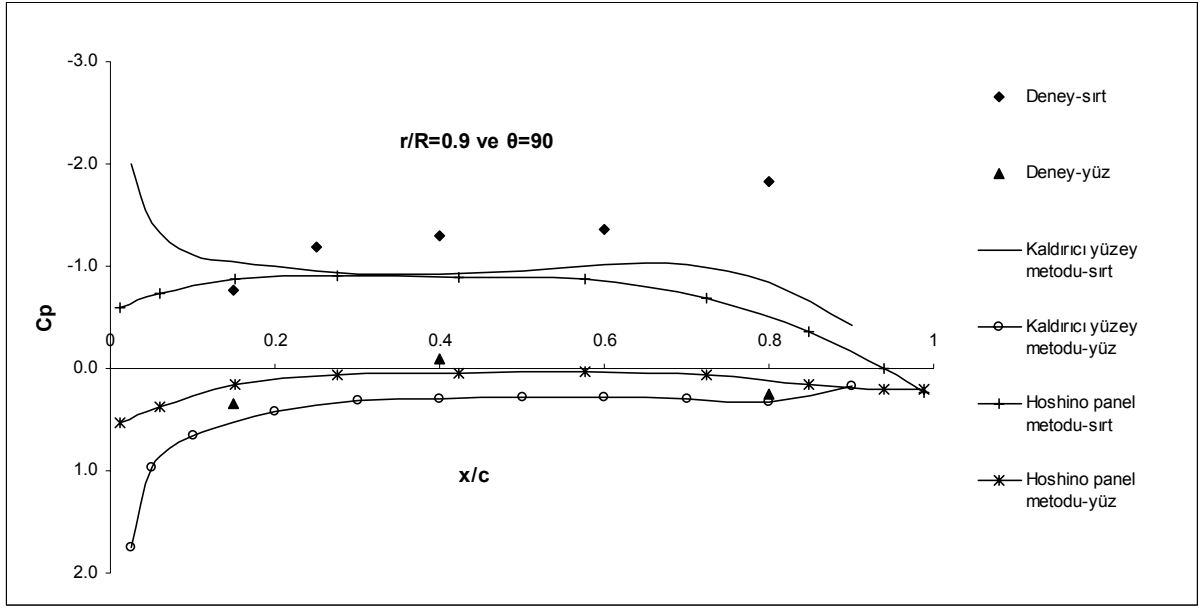
Şekil 5.10 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



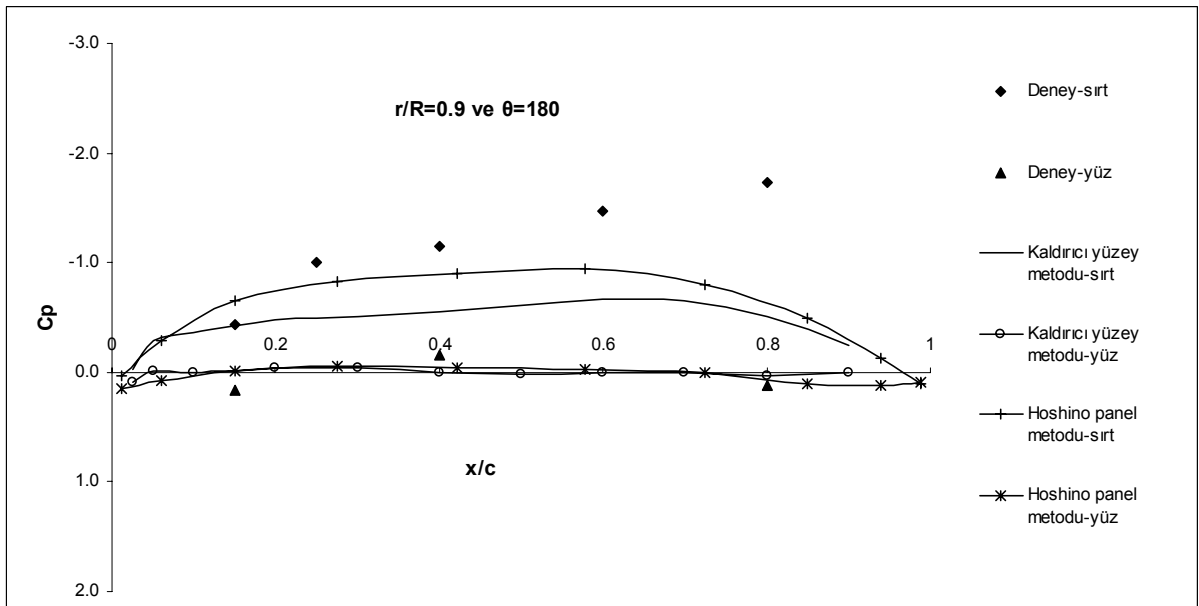
Şekil 5.11 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.7$ kesitinde ve $\theta = 270^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



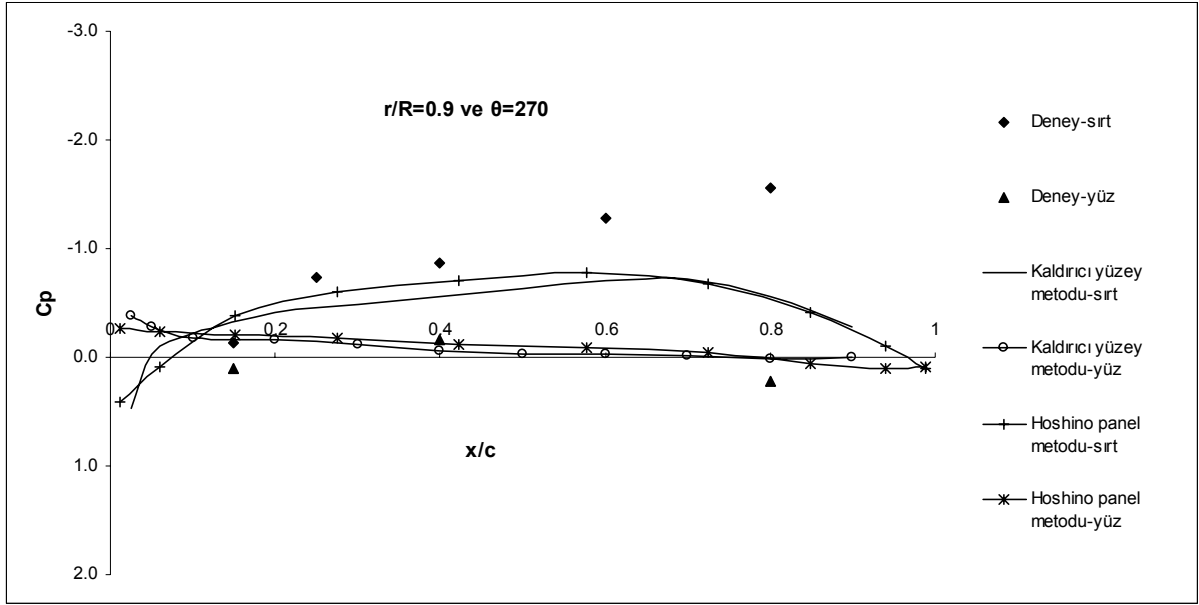
Şekil 5.12 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



Şekil 5.13 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 90^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı

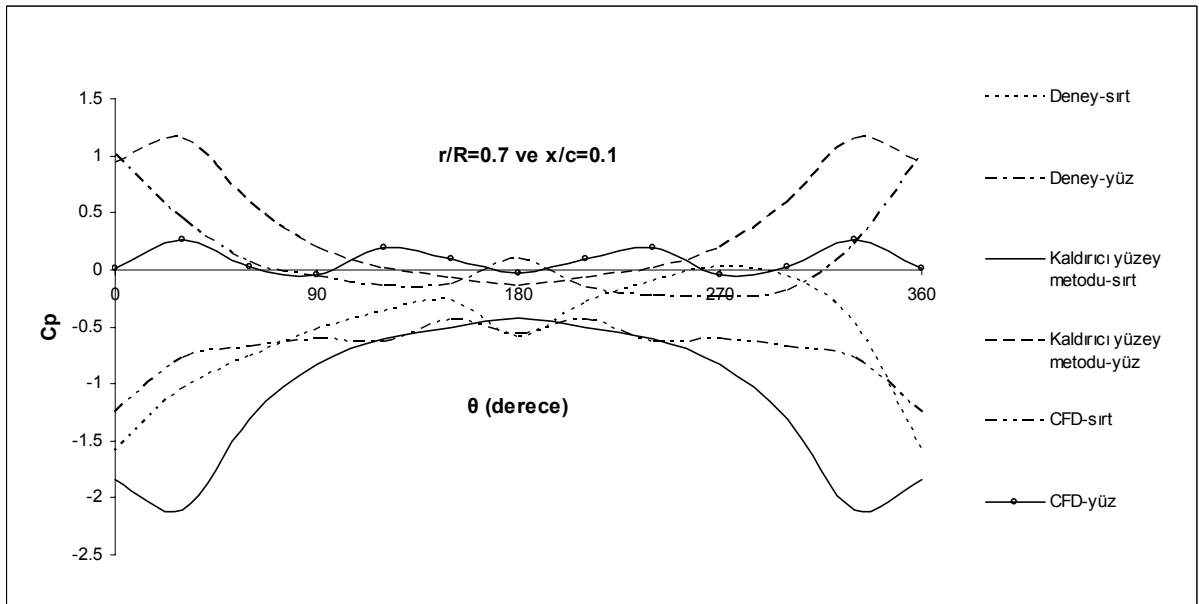


Şekil 5.14 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı

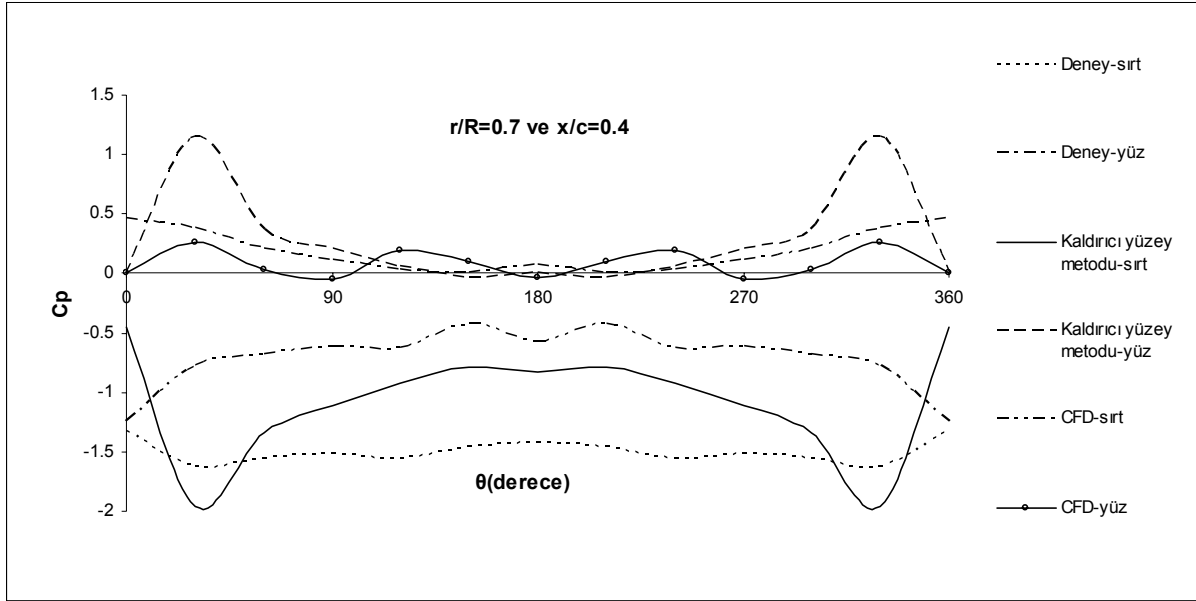


Şekil 5.15 Seiun-maru HSP pervanesinin $r/R = 0.9$ kesitinde ve $\theta = 270^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı

Şekil 5.16 ve 5.17’de, Sein-maru HSP pervanesinin bir tam devrinde elde edilen basınç dağılımlarının kort ortalarında kanadın hem sırt hem de yüz taraflarının deneysel sonuçlar ile iyi bir uyum içinde olduğu görülmektedir. Ancak giriş ucu ve çıkış ucu bölgelerinde Hoshino (1998) tarafından da belirtildiği üzere sayısal olarak elde edilen değerlerin deneysel gözlem değerlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16 Seiun-maru HSP pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R = 0.7$ ve $x/c = 0.1$)

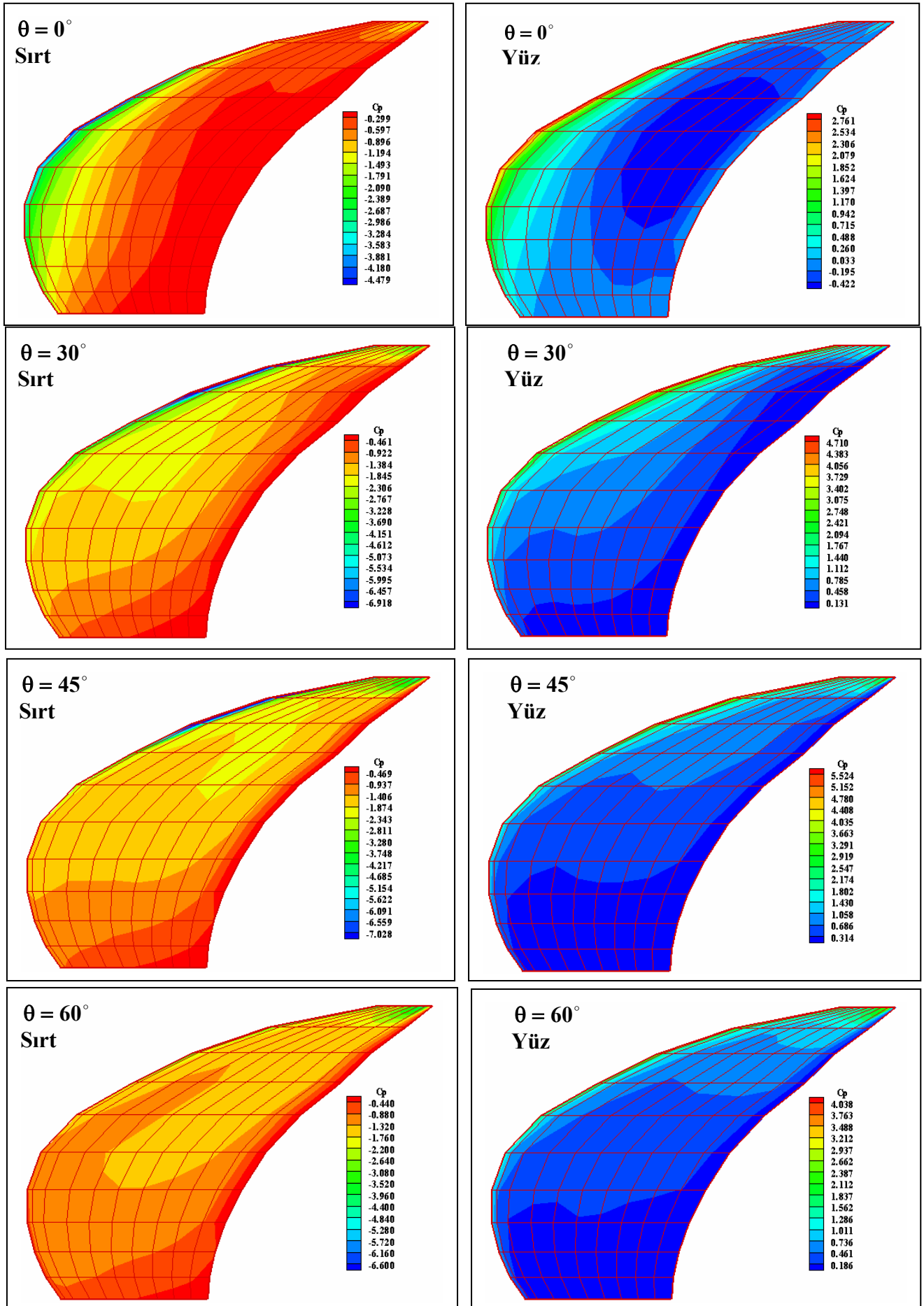


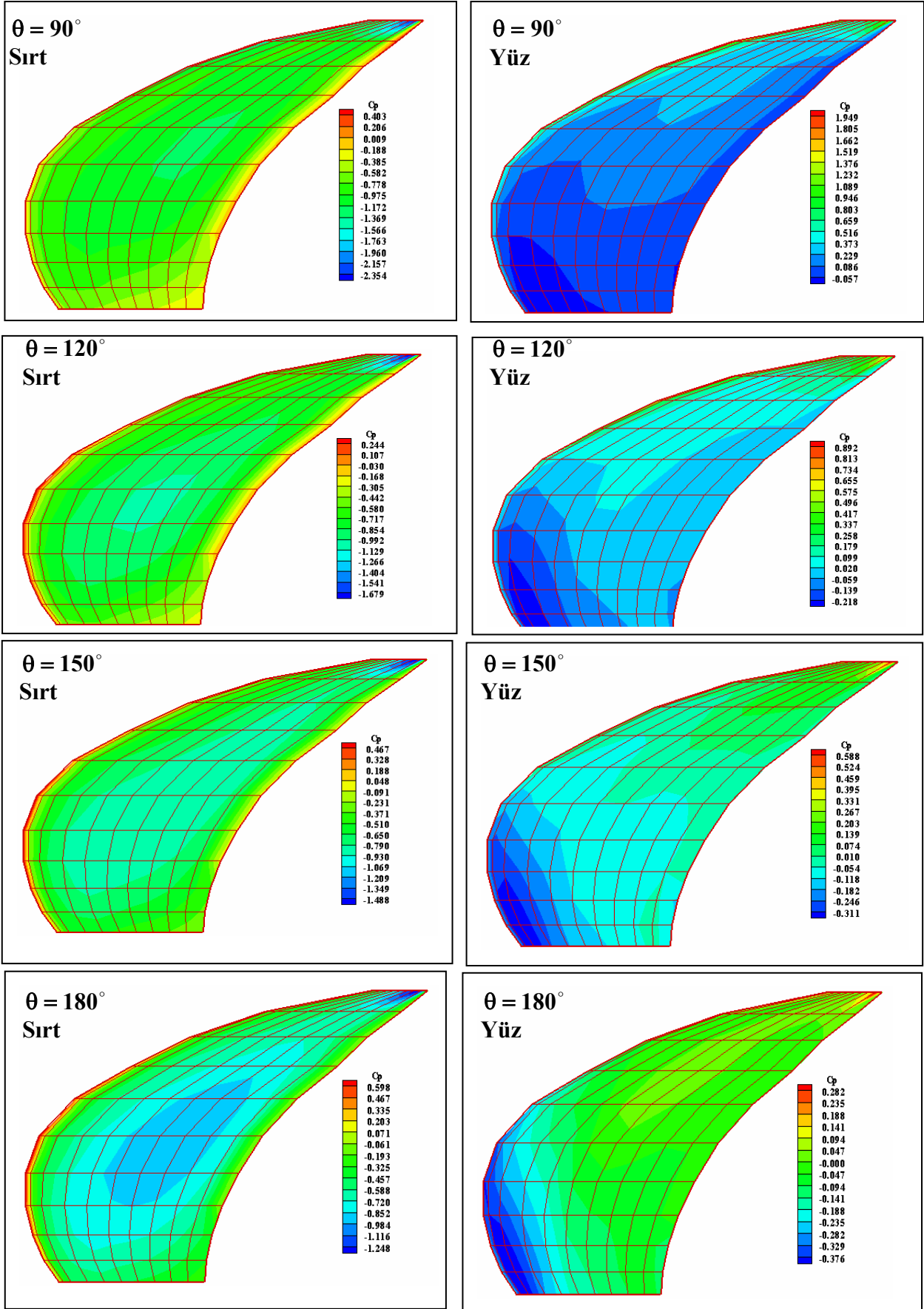
Şekil 5.17 Seiun-maru HSP pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R = 0.7$ ve $x/c = 0.4$)

Seiun-maru HSP pervanesinin test koşulunda ($J = 0.851$) kaldırıcı yüzey metodu, CFD ve deney sonuçlarından elde edilen pervane karakteristikleri karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.8’de verilmektedir. Burada, kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen sonuçların deneysel sonuçlar ile uyumlu olduğu gözlenmektedir. Ancak, CFD sonuçları ile karşılaştırıldığında bir miktar farklılık görülmektedir. Mevcut kaldırıcı yüzey metodunda kullanılan viskoz düzeltme yönteminin iyi çalıştığı, bunun yanında CFD yönteminde kullanılan akış modelinin tam olarak çalışmadığı görülmektedir. Şekil 5.18’de ise Seiun-maru HSP pervanesinin $\theta = 0^\circ$, $\theta = 30^\circ$, $\theta = 45^\circ$, $\theta = 60^\circ$, $\theta = 90^\circ$, $\theta = 120^\circ$, $\theta = 150^\circ$, $\theta = 180^\circ$, $\theta = 270^\circ$ kanat pozisyonlarında, kanadın sırt ve emme tarafındaki basınç dağılımlarının kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen değerleri gösterilmektedir.

Çizelge 5.8 Seiun-maru HSP pervanesinin test koşulunda elde edilen pervane karakteristiklerinin karşılaştırılması

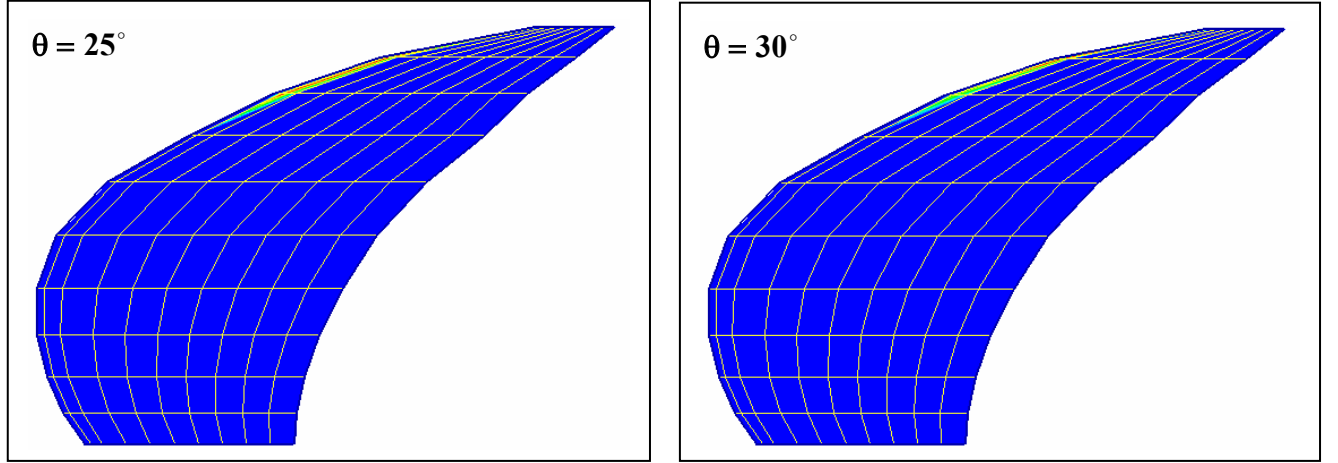
J=0.851	Kaldırıcı yüzey metodu	CFD	Deney
K_t	0.17266	0.18257	0.172
K_q	0.02799	0.03231	0.0268
η	0.65548	0.60055	0.682





Şekil 5.18 Seiun-maru HSP pervanesinin değişik kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen basınç dağılımları

Seiun-maru HSP pervanesinin ele alınan test koşulunda Hoshino (1998) çalışmasında belirtildiği gibi az miktarda tabaka kavitasyonu gösterdiği kaldırıcı yüzey metodu tarafından elde edilen sonuçlarda da görülmüştür. Kaldırıcı yüzey metodu ile yapılan analizde pervanesinin $\theta = 15^\circ - 60^\circ$ kanat pozisyon açılarında tabaka kavitasyonu gösterdiği tespit edilmiş olup $\theta = 25^\circ$ ve $\theta = 30^\circ$ 'deki tabaka kavitasyon bölgeleri Şekil 5.19'da gösterilmektedir.



Şekil 5.19 Seiun-maru HSP pervanesinin kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen tabaka kavitasyon bölgeleri

Uygulama 3

Bu uygulamada, kaldırıcı yüzey metodu esas alınarak yapılan tabaka kavitasyonu analizini göstermek amacı ile Kinnas vd.(2002, 2003) ve Lee ve Kinnas (2002, 2005) çalışmalarında deneysel ve teorik olarak uygulama alanı bulan DTMB 4148 pervanesi ele alınmıştır. Bu pervane de DTMB 4119 pervanesi gibi klasik bir model pervane olup çalıklık ve eğikliğe sahip değildir. DTMB 4148 pervanesine ait geometri Çizelge 5.9’da, test koşulları ve karakteristikler değerler ise Çizelge 5.10’da verilmektedir.

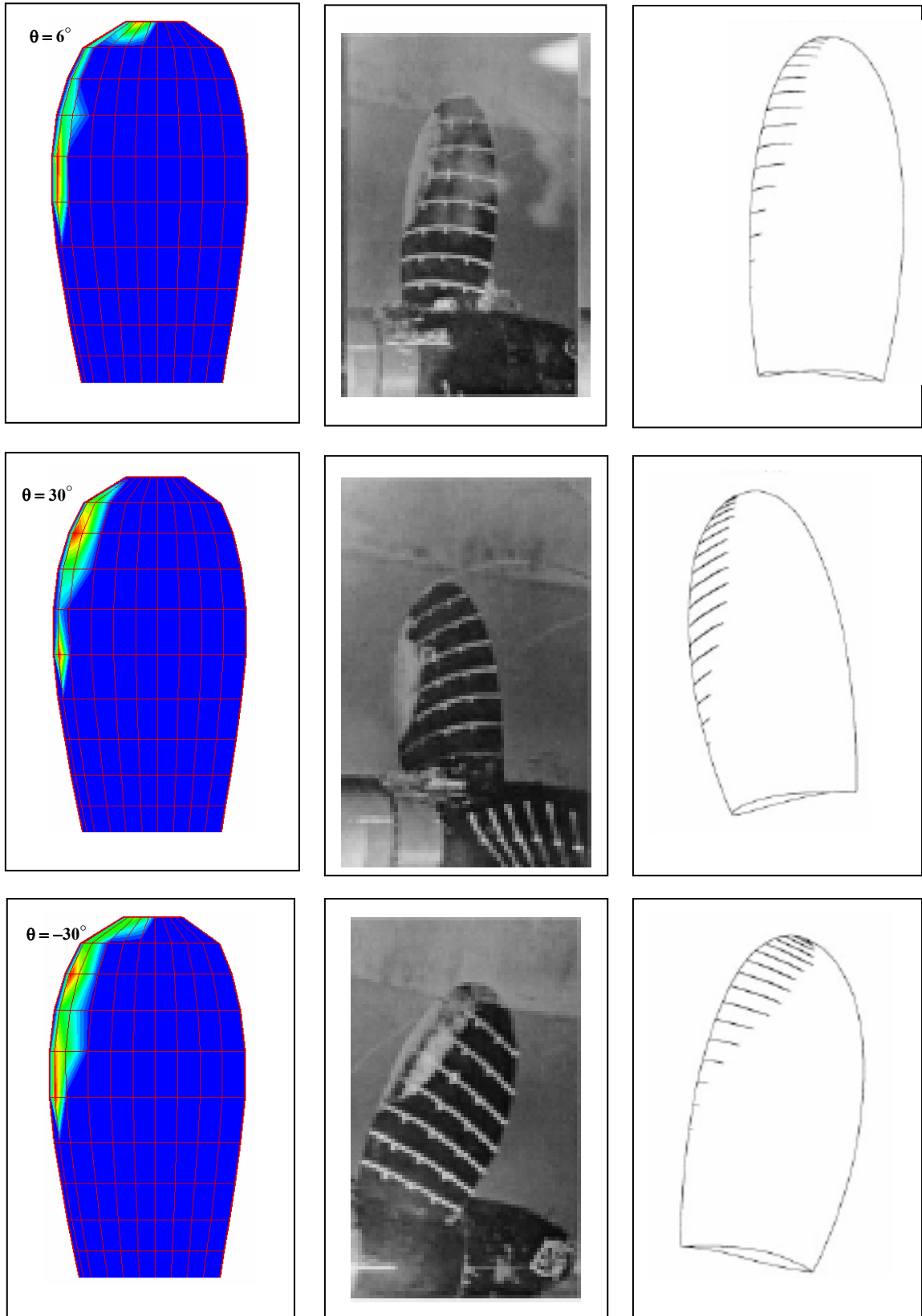
Çizelge 5.9 DTMB 4148 pervanesine ait geometri

Boyutsuz yarıçap r/R	Kord dağılımı c/D	Hatve dağılımı P/D	Kalınlık dağılımı t/D	Sehim dağılımı f/c
0.2	0.16	0.9921	0.0329	0.0174
0.3	0.1818	0.9967	0.0282	0.0195
0.4	0.2024	0.9987	0.0239	0.0192
0.5	0.2196	0.9975	0.0198	0.0175
0.6	0.2305	0.9944	0.0160	0.0158
0.7	0.2311	0.9907	0.0125	0.0143
0.8	0.2173	0.9850	0.0091	0.0133
0.9	0.1806	0.9788	0.0060	0.0125
0.95	0.1387	0.9740	0.0045	0.0115
1	0.0010	0.9680	0	0

Çizelge 5.10 DTMB 4148 pervanesine ait test koşulları ve karakteristikler

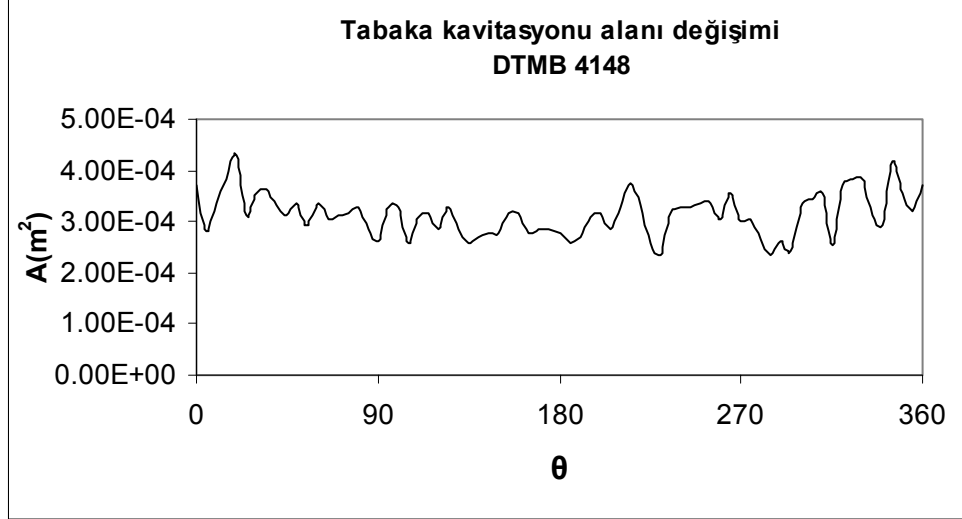
Kanat sayısı, Z	3
İlerlemekatsayısı ($J_s = V_s / nD$)	0.954
Froude sayısı ($F_n = n^2 D / g$)	9.159
Kavitasyon sayısı ($\sigma_n = \frac{P_0 - P_v}{1/2 \rho (nD)^2}$)	2.576
Çalıklık açısı (derece)	0
Eğiklik açısı (derece)	0
Kanat kesiti	NACA66 a=0.8 (mod.)

DTMB 4148 pervanesi için kaldırıcı yüzey metoduna göre yapılan analiz sonucunda $\theta = 6^\circ$, $\theta = 30^\circ$ ve $\theta = -30^\circ$ kanat pozisyonlarında elde edilen tabaka kavitasyon bölgeleri, Kinnas vd.(2002, 2003) çalışmalarından alınan deneysel ve sayısal sonuçlar ile karşılaştırılmalı olarak Şekil 5.20’de gösterilmektedir.

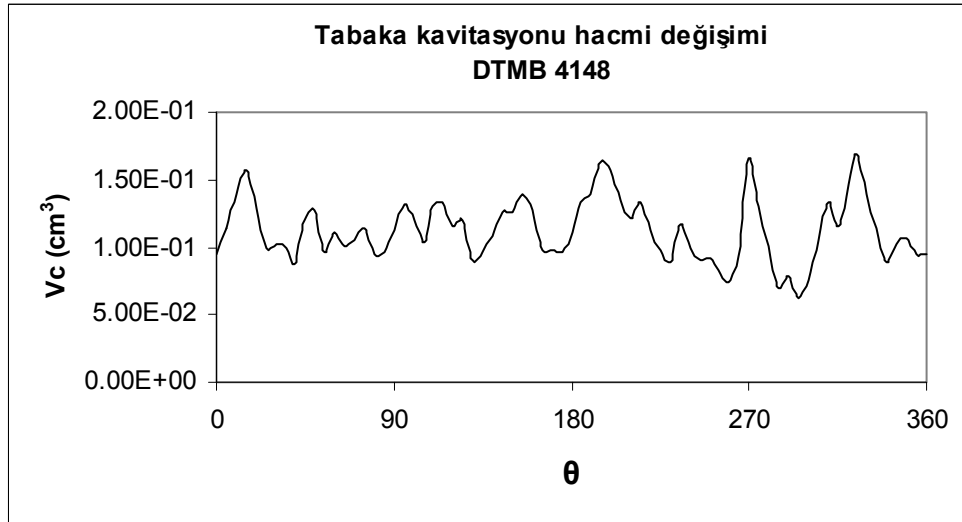


Şekil 5.20 DTMB 4148 pervanesine ait tabaka kavitasyon bölgeleri

DTMB 4148 pervanesinin test koşullarında pervanenin bir tam devri için kaldırıcı yüzey metodu tarafından elde edilen tabaka kavitasyonu yerel alan ve hacim değişimleri ise Şekil 5.21 ve Şekil 5.22’de verilmektedir.



Şekil 5.21 DTMB4148 pervanesine ait tabaka kavitasyon alanı değişimi

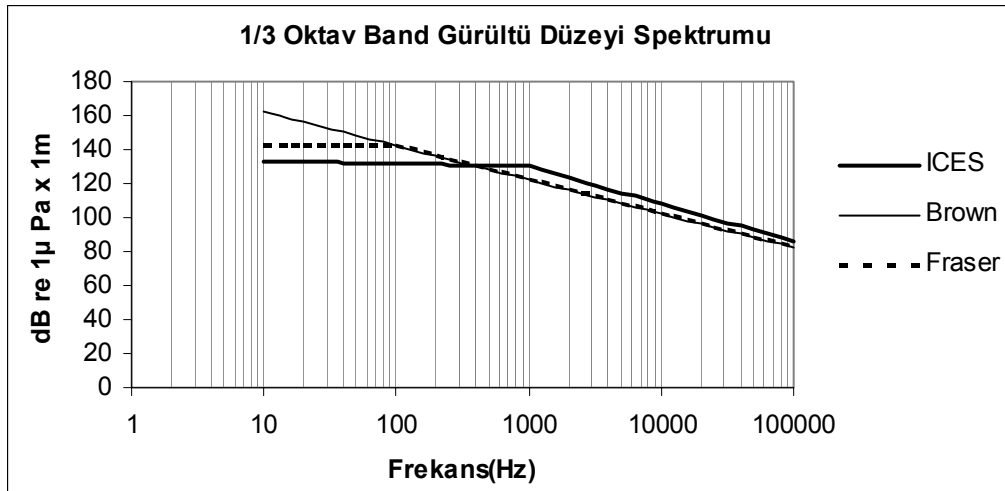


Şekil 5.22 DTMB4148 pervanesine ait tabaka kavitasyonu hacim değişimi

Pervanenin tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü hesabı bir önceki bölümde formülasyonu verilen Brown metoduna göre yapılmış ve elde edilen değerler ICES tarafından denklem (5.1) ile önerilen ve Fraser (1986) tarafından denklem (5.2) ile verilen gürültü düzeyleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise Şekil 5.23’de verilmiştir. Sonuçların birbirleri ile uyum içinde olduğu görülmektedir.

$$L_s = \begin{cases} 135 - 1.66 \log f & 1 \leq f(\text{Hz}) \leq 1000 \\ 130 - 22 \log(f / 1000) & 1000 \leq f(\text{Hz}) \leq 100000 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$L_s = \begin{cases} 10 \log \left[\frac{D^6 (60n)^6 Z}{4} \right] - 6 & f \leq 100 \text{ Hz} \\ 10 \log \left[\frac{D^6 (60n)^6 Z}{4} \right] + 34 - 20 \log f & f \geq 100 \text{ Hz} \end{cases} \quad (5.2)$$



Şekil 5.23 DTMB 4148 pervanesine ait tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü düzeyinin karşılaştırmalı olarak gösterimi

6. SONUÇLAR

Gemi pervanelerinin kanatlarında değişik işletme koşulları altında görülen kavitasyon pervanesinin gürültü ve titreşim oluşturmaya ve sevk performansının kaybına neden olabilmektedir. Kavitasyonun ilk tespiti olan 18.yy'ın ortalarından günümüze kadar bu alanda gerek deneysel gerekse de teorik olarak çok önemli çalışmalar yapılmış olup halen bu çalışmalar devam etmektedir. 1950'li yılların başlarına kadar kavitasyonlu akışlar üzerinde yapılan deneysel sonuçlar ile birlikte bu tarihten sonra bilgisayar teknolojisinin de gelişimine paralel olarak kaldırıcı yüzey metotları ve panel metotların kullanıldığı birtakım modelleme teknikleri geliştirilmiştir. Son zamanlarda da pervane performans analizi ve kavitasyon analizi için Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözüldüğü CFD metotları yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle pervane kanatlarında görülen tabaka kavitasyonu ve uç girdap kavitasyonu üzerine CFD analizlerinin kullanıldığı çalışmalar bir hayli dikkat çekmektedir.

Yapılan bu tezde,

—Gemicilik alanında gerek pervane dizaynı gerekse de analizinde kullanılan yöntemlerden kaldırıcı yüzey metotları ile panel metotlarına ve analiz yöntemlerinde kullanılan CFD metotlarına, bu yöntemlerle yapılan çalışmalar ile birlikte geniş bir şekilde yer verilmiş, kavitasyon çeşitleri, kavitasyonun fiziği ve etkileri açıklanmaya çalışılmıştır.

—Düzensiz akımda çalışan pervanelerin performans ve tabaka kavitasyonu analizi için kaldırıcı yüzey teorisine dayalı bir metot sunulmuştur. Bu metotta, pervane kanat kalınlıkları ve tabaka kavitasyonu kaynak dağılımları ile modellenirken hidrodinamik yükler de uygun girdap dağılımları ile modellenmiştir. Oluşması muhtemel tabaka kavitasyon bölgeleri kanat kesit geometrisindeki değişme şeklinde hesaplara katılmıştır. Metoda, Brown metoduna dayalı gürültü hesabı da eklenerek tabaka kavitasyonu nedeni ile oluşan gürültü düzeyi üzerinde bir öngörü yapabilme imkanı verilmiştir.

—Çalışmanın uygulaması olarak yukarıda bahsedilen kaldırıcı yüzey teorisine dayalı analiz yöntemi için örnek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları, Hoshino panel metodu, deneysel sonuçlar ve CFD metoduna ait bazı sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Yukarıda ifade edilen çalışmalardan gemi pervane analizi ve özellikle tabaka kavitasyonu analizinin kaldırıcı yüzey metodu ile gerçekleştirilmesinin, hesaplama zamanı ve maliyeti yüksek olan deneysel yöntemlerin yerini alabilecek kadar hızlı ve güvenilir olduğu, kavitasyon testlerinden önce dizayn aşamasının başlangıcında faydalı bir araç olarak kendini gösterebileceği görülmektedir. Kaldırıcı yüzey metoduna dayalı mevcut çalışma ticari CFD

yöntemleri ile karşılaştırıldığında kolay ve hızlı çözümler vermekte, ayrıca bu yöntemlerin grid yoğunluğu ve üç boyutlu akış alanını hesaplama zorluğu gibi problemleri aşılmaktadır. Kaldırıcı yüzey metodunun; diğer teorik metotlara giriş bilgileri olarak, örneğin, pervane kanatları üzerinde elde edilen basınç dağılımlarının sonlu elemanlar teknikleri yardımı ile gerilme analizine temel oluşturabileceği, ilk dizayn aşamasında pervanenin kavitasyon, titreşim ve gürültü karakteristiklerinin optimizasyonu için kullanılabileceği, kavitasyon tünellerinde elde edilen deney sonuçlarına ek veya bu sonuçların yerine geçebilecek mertebede sonuçları elde ettiği görülmektedir. Çalışmanın devamı olarak, gemi yönünden önem taşıyan ve son yıllarda da klas kuruluşlarının yeni standartlar getirdiği titreşim ve özellikle gürültü analizi uç girdap kavitasyonunu da kapsayacak şekilde incelenerek mevcut kaldırıcı yüzey metodunun hibrid bir metot hale getirilmesi ve yeni grafik paketleri ile de yazılımın daha görsel ve kullanışlı bir duruma dönüştürülmesi amaçlanmıştır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Maksoud, M., (2003), "Numerical and Experimental Study of Cavitation Behaviour of a Propeller", Proceeding STG Sprechtag Cavitation, Hamburg, Germany.
- Achkinadze, A.S. and Krasilnikov, V.I., (2003), "A New Velocity Based BEM for Analysis of Non-cavitating and Cavitating Propellers and Foils", Oceanic Engineering International, Vol.7, No.1.
- Bal, Ş., (1999), "A Potential-Based Panel Method for 2D Hydrofoils", Ocean Engineering, Vol.26, pp.343-361.
- Bal,Ş., Kinnas, S.A. and Lee, H., (2001), "Numerical Analysis of 2D and 3D Cavitating Hydrofoils Under a Free Surface", Journal of Ship Research, Vol.45, No.1, pp.34-49.
- Bark, G., Friesch, J., Kuiper, G. and Ligtelijn, J.T., (2004), "Cavitation Erosion on Ship Propellers and Rudders", PRADS 2004, Luebeck-Travemuende, Germany.
- Berntsen, G.S., Kjeldsen, M. and Arndt, R.E.A., (2001), "Numerical Modeling of Sheet and Tip Vortex Cavitation with FLUENT 5", CAV2001, Session B5.006.
- Birkhoff, G., and Zarantonello, E., (1957), Jets, Wakes and Cavities, Academic Pres Inc., New York.
- Black, S. and Michael, T. (2003), "Experiences Using a Coupled Viscous/Potential-Flow Unsteady Propeller Analysis Procedure", Proceeding Propeller/Shafnig 2003 Symposium, Virginia, USA.
- Breslin, J.P., van Houten, R., Kerwin, J.E. and Johnson, C.A., (1982), "Theoretical and Experimental Propeller Induced Hull Pressures Arising from Intermittent Blade Cavitation, Loading and Thickness", SNAME, Vol.90, pp.111-151.
- Breslin, J.P. and Andersen, P., (1994), Hydrodynamics of Ship Propeller, Cambridge University Press.
- Brewer, W. and Kinnas, S.A., (1997), "Experiment and Viscous Flow Analysis on a Partially Cavitating Hydrofoil", Journal of Ship Research, Vol.41, pp.161-171, September.
- Brewer, W. and Kinnas, S.A., (1997), "Experimental and Computational Investigation of Sheet Cavitation on a Hydrofoil", American Society of Mechanical Engineers, Cavitation and Multiphase Flow, FED, Vol. 210, pp. 1-15, August.
- Burrill, L.C., (1944), "Calculation of Marine Propeller Performance Characteristics", NECIES Trans. Vol.60, New Castle Upon Tyne.
- Carlton, J.S., (1994), "Marine Propellers & Propulsion", Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, UK.
- Chahine, G.L., (2004), "Nuclei Effects on Cavitation Inception and Noise", Proceeding 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, St.John's, Canada.
- Choi, J.K. and Kinnas, S.A., (1998), "Numerical Water Tunnel in Two and Three Dimensions", Journal of Ship Research, Vol. 42, pp. 86-98.
- Choi, J.K. and Kinnas, S.A., (1999), "Numerical Model of Cavitating Propeller Inside of a Tunnel" Journal of Fluids Engineering, Vol.121, pp. 297-304.

- Choi, J.K. and Kinnas, S.A., (2001), "Prediction of Non-Axisymmetric Effective Wake by a Three-Dimensional Euler Solver", *Journal of Ship Research*, Vol.45, No.1.
- Choi, J.K. and Kinnas, S.A., (2003), "Prediction of Unsteady Effective Wake by a Euler Solver/Vortex-Lattice Coupled Method", *Journal of Ship Research*, Vol.47, No.2.
- Choi, J.K. and Chahine, G.L., (2003b), "Noise due to Extreme Bubble Deformation Near Inception of Tip Vortex Cavitation", FEDSM'03, International Symposium on Cavitation Inception, 4th ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, Honolulu, USA.
- Choi, J.K. and Chahine, G.L., (2004), "Noise due to Extreme Bubble Deformation Near Inception of Tip vortex Cavitation", *Physics of Fluids*, vol.16, No.7.
- Cox, G.G., (1961), "Corrections to the Camber of Constant Pitch Propellers", *Trans.RINA*, Vol.103, pp.227-243, London.
- Çelik, F. and Güner, M. (2006), "An Improved Lifting Line Model to the Design of Marine Propellers", *Marine Technology*, Vol.43, No:2, pp.91-99.
- Dang, J. and Kuiper, G., (1998), "Re-entrant jet Modelling of Partial Cavity Flow on Two Dimensional Hydrofoils", *Proceedings: Third International Symposium on Cavitation*, Grenoble, France, April 7-10.
- Dacles-Mariani, Rogers, S.E., Kwak, D., Zilliac, G. and Chow, J., (1993), "A Computational Study of Wingtip Vortex Flow Field", AIAA paper 93-3010.
- Drela, M., (1989), "An analysis and design system for low Reynolds number airfoils. In *Lecture Notes in Engineering*, Vol.24, Low Reynolds Number Aerodynamics, New York, Springer Verlag.
- English, J.W., (1962), "The Application of a Simplified Lifting Surface Technique to the Design of Marine Propellers." NPL Ship Division Report No.30. (July).
- Etoh, T.G., Poggemann, D., Kreider, G., Mutoh, H., Theuwissen, A.J.P., Ruckelshausen, A., Kondo, Y., Maruno, H., Okinaka, T. and Takano, Y., (2003), "An Image Sensor which Captures 100 Consecutive Frames at 1000000 Frames per Second", *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol.50, No.1, pp.144-1541.
- Fabula, A., (1962), "Thin-Airfoil Theory Applied to Hydrofoils With a Single Finite Cavity and Arbitrary Free Streamline Detachment", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.12, pp.227-240.
- Feng, J., Wang, L., Ahuja, V., Lee, Y.T. and Merkle, C.L., (1998), "CFD Modeling of Tip Vortex for Open Marine Propellers", *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*, Paper No:FEDSM98-4873, Washington, USA.
- Fine, N. and Kinnas, S.A., (1993a), "A Boundary Element Method for the Analysis of the Flow Around 3-D Cavitating Hydrofoils", *Journal of Ship Research*, Vol.37, pp.213-224, September.
- Fine, N. and Kinnas, S.A., (1993b), "The Nonlinear Numerical Prediction of Unsteady Sheet Cavitation for Propellers of Extreme Geometry", *Proceedings: Sixth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics*, August, pp.531-544.
- Franc, J. and Michel, J., (1985), "Attached Cavitation and the Boundary Layer: Experimental Investigation and Numerical Treatment", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.154, pp.63-90.
- Franc, J. and Michel, J., (2004), *Fundamentals of Cavitation*, Kluwer Academic Publishers.

- Fraser, A.J., (1986), "The Prediction and Minimisation of Propeller Induced Waterborne Noise", British Maritime Technology Limited, Hydromechanics Division, Computational Hydromechanics Department.
- Fukaya, M., Okamura, T., Tamura, Y. and Matsumoto, Y., (2003), "Prediction of Cavitation Performance of Axial Flow Pump by Using Numerical Cavitating Flow Simulation with Bubble Flow Model", CAV2003, Osaka, Japan.
- Furuya, O., (1975a), "Nonlinear Calculation of Arbitrarily Shaped Supercavitating Hydrofoils Near a Free Surface", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.68, pp.21-40.
- Geurst, J.A., (1959), "Linearized Theory for Partially Cavitated Hydrofoils", *International Shipbuilding Progress*, Vol.6, No.60.
- Geurst, J.A. and Verbrugh, P.J., (1959), "A Note on Camber Effects of Partially Cavitated Hydrofoil", *International Shipbuilding Progress*, Vol.6, No.61.
- Geurst, J.A., (1960), "Linearized Theory for Fully Cavitated Hydrofoils", *International Shipbuilding Progress*, Vol.7, No.65.
- Greeley, D.S. and Kerwin J.E., (1982), "Numerical Methods for Propeller Design and Analysis in Steady Flow", *Trans.SNAME*, Vol.90, pp.414-453.
- Griffin, P., (1998), "Computational Techniques for the Design and Analysis of Cavitating Propeller Blades", MSc, UT Austin, Department of Civil Engineering, May.
- Gu, H. and Kinnas, S.A., (2003), "Modeling of Contra-Rotating and Ducted Propellers via Coupling of a Vortex-Lattice with a Finite Volume Method", *Propellers/Shafting 2003 Symposium*, SNAME, Virginia Beach, VA, September 17-18, 2003.
- Guilloton, R., (1955), "Calcul des vitesses induites en vue du trace des helices", *Schiffstechnik* 4/57.
- Güner, M., (1994), "A Rational Approach to the Design of Propulsors behind Axisymmetric Bodies", Ph.D. thesis, University of Newcastle Upon Tyne, England.
- Güner, M., Atlar, M. and Söylemez, M., (2001), "SWATH Fishing Platform with Higher Propulsor Efficiency." *Marine Technology SNAME*. Vol.38, No.4.
- Hanaoka, T., (1962), "Hydrodynamics of an Oscillating Screw Propeller", In *Proc.Fourth Symp.on Naval Hydrodynamics*, pp.79-124, Washington.
- Hanaoka, T., (1969a), "A New Method for Calculating the Hydrodynamic Load Distributions on a Lifting Surface", *Report of Ship Research Institute*, Vol.6, No.1. Tokyo:Ship Research Institute.
- Hanaoka, T., (1969b), "Numerical Lifting-Surface Theory of a Screw Propeller in Non-Uniform Flow" Part I:Fundamental Theory). *Report of Ship Research Institute*, Vol.6 No.5. . Tokyo:Ship Research Institute.
- Hess, J.L. and Smith, M.O., (1966), "Calculation of Potential Flow about Arbitrary Bodies", *Progress in Aeronautical Science*, Vol.8, pp.1-138.
- Hess, J.L., (1973), "Higher Order Numerical Solution of the Integral Equation for the Two-Dimensional Neumann Problem", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.2, pp.1-15.

- Hess, J.L., (1975), "The Use of Higher-Order Surface Singularity Distributions to Obtain Improved Potential Flow Solutions for Two-Dimensional Lifting Airfoils", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol.5, pp.13-35.
- Hess, J.L. and Valarezo, W.O., (1985), "Calculation of Steady Flow about Propellers by Means of a Surface Panel Method. AIAA, No.85.
- Hoshino, T., (1989), "Hydrodynamic Analysis of Propellers in Steady Flow Using a Surface Panel Method", *Trans.Soc.Arch of Japan*.
- Hoshino, T., (1998), "Experimental Data for Unsteady Panel Calculations and Comparisons (Seiun-maru HSP)", 22nd ITTC Propulsion Committee Propeller RANS/Panel Method Workshop Proceedings, 5-6 April, France.
- Hsiao, C.T. and Chahine, G.L., (2003), "Effect of Vortex/Vortex Interaction on Bubble Dynamics and Cavitation Noise", CAV2003, Osaka, Japan.
- Hsiao, C.T. and Chahine, G.L., (2004a), "Prediction of Vortex Cavitation Inception Using Coupled Spherical and Non-Spherical Models and Navier-Stokes Computations", *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.8, No.3.
- Huse, E., (1972), "Pressure Fluctuations on the Hull Induced by Cavitating Propellers", *Norwegian Ship Model Experiment Tank Publications*, No.111, March.
- Ishii, N., (1992), "Prediction of Propeller Performance and Cavitation Based on the Numerical Modeling of Propeller Vortex System", In *Proceedings International Symposium on Propeller and Cavitation*, pp.33-41, Hamburg, Germany.
- Jarzyna, H., Koronowicz, T. and Szantyr, J.A. (1996), *Design of Marine Propellers Selected Problems*, ISBN:83-04-04304-1, Poland.
- Jessup, S.D.(1989), "An Experimental Investigation of Viscous Aspects of Propeller Blade Flow", Ph.D.Thesis, School of Engineering and Architecture, The Catholic University of America.
- Kato, H., (1994), "Recent Advances in Cavitating Research", *Proceedings: International Conference on Hydrodynamics*, pp.80-89.
- Kerwin, J.E., (1961), "The Solution of Propeller Lifting Surface Problems by Vortex-Lattice Methods", Technical Report. Cambridge, Mass., MIT, Department of Naval Architecture and Marine Engineering.
- Kerwin, J.E. and Leopold, R., (1964), "A Design Theory for Subcavitating Propellers", *Trans.SNAME*, vol.72.
- Kerwin, J.E., (1973), "Computer Techniques for Propeller Blade Section Design", *Int.Shipbuilding Progress*, Vol.20, No.277.
- Kerwin, J.E. and Lee, C.S., (1978), "Prediction of Steady and Unsteady Marine Propeller Performance by Numerical Lifting-Surface Theory", *SNAME*, Vol.86, pp.218-253.
- Kerwin, J.E., (1986), "Marine Propellers", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.18, pp.387-403.
- Kerwin J., Kinnas, S.A., Wilson, M. and Mchugh, J., (1986), "Experimental and Analytical Techniques for the Study of Unsteady Propeller Sheet Cavitation" *Proceedings: Proceedings of the Sixteenth Symposium on Naval Hydrodynamics*, July.

- Kerwin, J., (1994), "The MIT Marine Hydrodynamics Water Tunnel", *Marine Technology*, pp.183-194, July.
- Kerwin, J.E., Keenan, D.P., Black, S.D. and Diggs, J.G., (1994), "A Coupled Viscous/Potential Flow Design Method for Wake-Adapted Multi-Stage Ducted Propulsors", *SNAME Transaction*, Vol.102.
- Kerwin, J.E., Taylor, T.E., Black, S.D. and McHugh, G.P., (1997), "A Coupled Lifting Surface Analysis Technique for Marine Propulsors in Steady Flow", *Proceeding Propeller/Shafting 1997 Symposium*, Virginia, USA.
- Kinnas, S.A., (1991), "Leading-Edge Corrections to the Linear Theory of Partially Cavitating Hydrofoils", *Journal of Ship Research*, Vol.35, pp.15-27, March.
- Kinnas, S.A., (1985), "Non-Linear Corrections to the Linear Theory for The Prediction of the Cavitating Flow around Hydrofoils", *Doctoral Dissertation*, Department of Ocean Engineering, MIT, May.
- 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.
- Kinnas, S.A. and 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, Italy, October 15-19.
- Kinnas, S.A. and Fine, N., (1991b), "Non-Linear Analysis of the Flow Around Partially or Super-Cavitating Hydrofoils by a Potential Based Panel Method", *Proceedings: Boundary Integral Methods-Theory and Applications*, *Proceedings of the IABEM-90 Symposium*, Rome, Italy, October 15-19, 1990. Springer-Verlag, Heidelberg, 289-300.
- Kinnas, S.A. and Fine, N., (1992), "A Nonlinear Boundary Element Method for the Analysis of Unsteady Propeller Sheet Cavitation", *Proceedings 19th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Seoul, South Korea, August 24-28.
- Kinnas, S.A., (1992b), "Leading Edge Correction to the Linear Theory of Cavitating Hydrofoils and Propellers" *Proceedings: Second International Symposium on Propeller and Cavitation*, September.
- Kinnas, S.A. and Fine, N., (1993), "A Numerical Nonlinear Analysis of the Flow Around Two-and Three-Dimensional Partially Cavitating Hydrofoils", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.254, pp.151-181, September.
- Kinnas, S.A., Mishima, S. and Brewer, W., (1994), "Nonlinear Analysis of Viscous Flow Around Cavitating Hydrofoils", *Proceedings: Twentieth Symposium on Naval Hydrodynamics*, pp.446-465, August.
- Kinnas, S.A., Lee, H. and Young Y.L., (2002), "Boundary Element Techniques for the Prediction of Sheet and Developed Tip Vortex Cavitation", *Electronic Journal Boundary Elements*, Vol.BETEQ2001, No.2, pp.151-178.
- Kinnas, S.A., Lee, H., and Young Y.L., (2003), "Modeling of Unsteady Sheet Cavitation on Marine Propellers," *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 9, No. 4, pp. 263-277, July/August .
- Kinnas, S.A. and Lee, H.S., (2003), "Numerical Analysis of Flow Around the Cavitating

CAV2003 Hydrofoil”, pp.1-4, Osaka, Japan, 1-4 November.

Kinnas, S.A., Lee, H., Gu, H. and Gupta, A., (2004), “Prediction of Performance of Ducted and Podded Propellers”, 25th Symposium on Naval Hydrodynamics St. John’s, 8-13 August 2004, Newfoundland and Labrador, Canada.

Kinns, R., Peake, N., and Spivack, O., (2002), “Hull Vibration excitation by Propeller sources: A Link Between Hydrodynamics and Marine Acoustics”, Proceeding 24th Symposium on Naval Hydrodynamics Fukuoka.

Korkut, E., Atlar, M. ve Odabasi, A.Y., (1999), “Serbest Akım Türbülansının Pervanelerdeki Kavitasyon Başlangıcının ve Gürültü Üzerindeki Ölçek Etkisi“, Gemi İnsaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi, İstanbul, Türkiye.

Krasilnikov, V., Berg, A. and Oye, I.J., (2003), “Numerical Prediction of Sheet Cavitation on Rudder and Podded Propellers Using Potential and Viscous Flow Solutions”, CAV2003, Osaka, Japan.

Krishnaswamy, P., (2000), “Flow Modelling for Partially Cavitating Hydrofoils”, PhD Thesis, Technical University of Denmark, Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, October.

Kuiper, G., (1998), “Cavitation Research and Ship Propeller Design”, Applied Scientific Research, vol.58, pp.33-50.

Le, Q., Franc, J. and Michel, J., (1993a), “ Partial Cavities: Global Behavior and Mean Pressure Distribution”, Journal of Fluids Engineering, Vol.115, pp.243-248, June.

Le, Q., Franc, J. and Michel, J., (1993b), “Partial Cavities: Pressure Pulse Distribution Around Cavity Closure”, Journal of Fluids Engineering, Vol.115, pp.249-254, June.

Lee, C.S., (1979), “Prediction of Steady and Unsteady Performance of Marine Propellers with or without Cavitation by Numerical Lifting Surface Theory”, Ph.D. Thesis, Cambridge, Department of Ocean Engineering, MIT.

Lee, C.S., (1980), “Prediction of the Transient Cavitation on Marine Propellers by Numerical Lifting-Surface Theory”, In Proceedings Thirteenth Symposium on Naval Hydrodynamics, pp.41-64, The Shipbuilding Research Association of Japan.

Lee, H. and 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, Austin, TX, May 28-30.

Lee, H., Kinnas, S.A., Gu, H. and Natarajan, S., (2003), “Numerical Modeling of Rudder Sheet Cavitation Including Propeller/Rudder Interaction and the Effects of a Tunnel”, CAV2003, Osaka, Japan.

Lee, H. and Kinnas, S.A., (2004), “Application of a Boundary Element Method in the Prediction of Unsteady Blade Sheet and Developed Tip-Vortex Cavitation on Marine Propellers”, Journal of Ship Research, Vol.48, No.1, pp.15-30, March.

Lee, H., and Kinnas, S.A., (2005), “A BEM for the Modeling of Unsteady Propeller Sheet Cavitation Inside a Cavitation Tunnel,”, Journal of Computational Mechanics, Vol. 37, No. 1, pp. 41-51, December.

Lerbs, H., (1952), “Moderately Loaded Propellers with a Finite Number of Blades and an

Arbitrary Distribution of Circulation”, Trans.SNAME, Vol.60, pp.73-123.

Lighthill, M.J., (1951), “A New Approach to Thin Aerofoil Theory”, The Aeronautical Quarterly, Vol.3, pp.193-210.

Ludwig, H. and Ginzler, L., (1944), “ Zur Theorie der Breitblattschraube”, Bericht 44/A/08 der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen.

Moran, J., (1985), An Introduction to Theoretical and Computational Aerodynamics, John Wiley and Sons, New York.

Morgan, W., Silovic, V. and Denny, S.B., (1968), “Propeller Lifting Surface Corrections”, Trans.SNAME, Vol.76.

Mueller, A. and Kinnas, S.A., (1999), “Propeller Sheet Cavitation Predictions Using a Panel Method”, Journal of Fluids Engineering, Vol.121, pp.282-288, June.

Nelson, D.M. (1964), “A Lifting Surface Propeller Design Method for High-Speed Computers”, Technical Report No.8442, China, Lake, Cal: U.S. Naval Weapons Center.

Noordzij, L., (1974), “A Method to Calculate the Pressure Field Induced by a Cavitating Propeller”, Proceeding of Symposium on High Powered Propulsion of Large Ships, Wageningen, NSMB Publ.No.490.

Noordzij, L., (1976), “Pressure Field Induced by a Cavitating Propeller”, International Shipbuilding Progress, Vol.23, No.260, NSMB Publ.No.512.

Noordzij, L., (1978), “ The Cavitating Propeller and Its Pressure Field; Application of Free Streamline Theory”, Symposium on Applied Mathematics Dedicated to the Late Prof.Dr.R.Timmerman, pp.140-156, 11-13 January.

Okamura, N. and Asano, T., (1988), “ Prediction of Propeller Cavitation Noise and Its Comparison with Full-Scale Measurements”, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.164, pp.19-33, December.

Orbeck, F. (1999), Thrust Balanced Propeller, UK Patent Application No.9901068.8, Orian Technology Ltd.Sunderland, England.

Pellone, C. and Rowe, A., (1981), “Supercavitating Hydrofoils in Non-Linear Theory”, Proceedings: Third International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, France, June.

Pereira, F., Salvatore, F., Di Felice, F. and Elefante, M., (2002), “Experimental and Numerical Investigation of the Cavitation Pattern on a Marine Propeller” Proceeding 24th Symposium on Naval Hydrodynamics, Fukuoka, Japan.

Pereira, F., Salvatore, F., Di Felice, F., and Soave, M., (2004), “Experimental Investigation of a Cavitating Propeller in a Non-Uniform Inflow”, Proceeding 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, St.John's, Canada.

Pien, P.C., (1961), “The Calculation of Marine Propellers Based on Lifting-Surface Theory”, Journal of Ship Research, No:2.

Pietrzak, A., (1971), “Theory of the Helicoidal Lifting Surface as a New Device for Marine Screw Propellers Designing”, Reports of the Technical University of Gdansk, Ser.XX Shipbuilding, No.168.

- Propeller RANS/Panel Method Workshop (1998), 22nd ITTC Propulsion Committee, Proceedings, Grenoble, France.
- Rebow, M., Choi, J.K., Chahine, G.L. and Ceccio, S.L., (2004), "Experimental Validation of BEM Code Analysis of Bubble Splitting in a Tip Vortex Flow", Proceeding 11th International Symposium on Flow Visualization, U.Notre Dame, USA.
- Rhee, S.H., Kawamura, T. and Li, H., (2003), "A Study of Propeller Cavitation Using a RANS CFD Method", Proceeding 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, Busan, Korea.
- Ross, D., (1976), *Mechanics of Underwater Noise*, Pergamon Press, Oxford.
- Rowe, A. and Blottiaux, O., (1993), "Aspects of Modeling Partially Cavitating Hydrofoils", *Journal of Ship Research*, Vol.37, No.1, pp.34-48.
- Salvatore, F. and Ianniello, S., (2002), "Preliminary Results on Acoustic Modelling of Cavitating Propellers", *International Association for Boundary Element Methods, IABEM 2002*, UT Austin, TX, May 28-30.
- Salvatore, F., Testa, C. and Greco, L., (2003), "A Viscous/Inviscid Coupling Methodology for Unsteady Sheet Cavitation Modelling of Marine Propellers", *CAV2003*, Osaka, Japan.
- Sanchez-Caja, A., Rautahaimo, P. and Siikonen, T., (2001), "Simulation of Incompressible Viscous Flow Around a Ducted Propeller Using a RANS Equation Solver", *Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics*.
- Sarpkaya, T., (1989), "Computational Methods with Vortices", *Journal of Fluids Engineering (Trans.ASME)*, Vol.111, No.1, pp.5-52.
- Sato, K., Shimojo, S. and Watanabe, J., (2003), "Observations of Chain Reaction Behaviour at Bubble Collapse Using Ultra High Speed Video Camera", *Proceeding Cavitation and Multi-Phase Flow Forum, ASME FEDSM*, USA.
- Seol, H., Suh, J.C. and Lee, S., (2005), "Development of Hybrid Method for the Prediction of Underwater Propeller Noise", *Journal of Sound and Vibration*, Vol.288, pp.345-360.
- Singhal, A.K., Athavale, M.M., Li, H.Y. and Jiang, Y., (2002), "Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model", *ASME Journal of Fluids Engineering*, Vol.124.No.3.
- Sparenberg, J.A., (1959), "Application of Lifting Surface Theory to Ship Screws." In *Proc.Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Series B*, Vol.62, No.5, pp.286-298.
- Sparenberg, J.A., (1960), "Application of Lifting Surface Theory to Ship Screws", *Int.Shipbuilding Progress*, Vol.7, No.67, pp.99-106.
- Sparenberg, J.A., (1984), *Elements of Hydrodynamic Propulsion*, The Hague, Martinus Nijhoff Publishers.
- Spivack, O.R., Kinns, R. and Peake, N., (2004), "Hull excitation by Fluctuating and Rotating Acoustic Sources at the Propeller", *Proceeding 25th Symposium on Naval Hydrodynamics*, Canada.
- Stern, F. and Vorus, W.S., (1983), "A Nonlinear Method for Predicting Unsteady Sheet Cavitation on Marine Propellers", *Journal of Ship Research*, Vol.27, No.2, pp.56-74.

- Stern, F. (1989), "Comparison of computational and Experimental Unsteady Cavitation on an Oscillating Foil", ASME J.Fluids Eng. Vol.111, No.3, pp.290-299.
- Szantyr, J.A., (1979), "A Computer Program for the Calculation of Cavitation Extent and Excitation Forces for a Propeller Operating in Non-Uniform Velocity Field", International Shipbuilding Progress, Vol.26, No.296, pp.67-66.
- Szantyr, J.A., (1984), "A New Method for the Analysis of Unsteady Propeller Cavitation and Hull Surface Pressures", RINA, Vol.127.
- Szantyr, J.A., and Glover, E.J., (1989), "The Analysis of Unsteady Propeller Cavitation and Hull Surface Pressure for Ducted Propellers", RINA, Vol.132.
- Szantyr, J.A.,(1994), "A Method for Analysis of Cavitating Marine Propellers in Non-Uniform Flow", International Shipbuilding Progress, Vol.41, No.427, pp.223-242.
- Takinacı, A.C. and Atlar, M., (2001) "On the Importance of Boundary Layer Calculations Instead of Viscous Correction in Heavily Loaded Marine Propellers while Using A Surface Panel Method", Ocean Engineering, Vol.29, pp.129-149.
- Takinacı, A.C. and Atlar, M., (2002) "Performance Assessment of A Concept Propulsor-The Thrust Balanced Propeller", Ocean Engineering, Vol.29, pp.129-149.
- Testa, C., Salvatore, F., Ianniello, S. and Gennaretti, M., (2005), "Theoretical and Numerical Issues for Hydroacoustic Applications of the FfowcsWilliams-Hawkins Equation", Proceeding 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Monterey, USA.
- Tukker, J. and Kuiper, G., (2004), "High Speed Video Observations and Erosive Cavitation" PRADS 2004, Luebeck-Travemuende, Germany.
- Tulin, M., (1953), "Steady Two-Dimensional Cavity Flows About Slender Bodies", Technical Report 834, DTMB (David Taylor Model Basin), May, Washington.
- Tulin, M. and Hsu, C., (1980), "New Applications of Cavity Flow Theory", Proceedings:13th Symposium on Naval Hydrodynamics.
- Tulin, M., (1964), "Supercavitating Flows-Small Perturbation Theory", Journal of Ship Research, Vol.7, No.3, pp.16-37.
- Uhlman, J., (1987), "The Surface Singularity Method Applied to Partially Cavitating Hydrofoils", Journal of Ship Research, Vol.31, No.2, pp.107-124, June.
- Uhlman, J., (1989), "The Surface Singularity or Boundary Integral Method Applied to Supercavitating Hydrofoils", Journal of Ship Research, Vol.33, No.1, pp.16-20, March.
- Ukon, Y. et al. (1990), "Measurement of Pressure Distribution on a Full Scale Propeller-Measurement on a Conventional Propeller", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.168, pp.65-75, December.
- Ukon, Y. et al. (1991), "Measurement of Pressure Distribution on a Full Scale Propeller-Measurement on a Highly Skewed Propeller", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.170, pp.111-123, December.
- van Gent, W., (1975), "Unsteady Lifting Surface Theory for Ship Screw", Journal of Ship Research, vol.19, No.4.
- van Manen, J.D., (1972), "The Effect of Cavitation on the Interaction Between Propeller and

Ship's Hull", International Shipbuilding Progress, Vol.19, No.109, NSMB Publ.No.397.

Verbrugh, P.J., (1968), "Unsteady Lifting Surface Theory for Ship Screws". Report No:68-036-AH, Wageningen: Netherlands Ship Model Basin.

Vorus, W.S., (1975), "A Method for Analyzing the Propeller Induced Vibratory Forces Acting on the Surface of a Ship's Stern", Transactions SNAME, Vol.83.

Vorus, W.S., (1976), "Propeller-Induced Vibratory Hull Forces, Force Distributions and Pressures:Free Surface Effects", Journal of Ship Research, Vol.20, No.2.

Wang, G.Q. and Yang, C.J., (2001), " Design of Cavitating Propellers by Lifting Surface Theory", PRADS 2001, Shanghai, China.

Warren, C.L., Taylor, T.E., and Kerwin, J.E., (2000), "Coupled Viscous/Potential-Flow Method for the Prediction of Propulsor-Induced Maneuvering Forces", Proceeding Propeller/Shafting 2000 Symposium, Virginia, USA.

Watanabe, T., Kawamura, T., Takekoshi, Y., Maeda, M. and Rhee, S.H., (2003), " Simulation of Steady and Unsteady Cavitation on Marine Propeller Using a RANS CFD Code", CAV2003, Osaka, Japan.

Weitendorf, E.A., (2001), "On the History of Propeller Cavitation Tunnels", Hamburg Ship Model Basin, Hamburg, Germany.

Widnall, S., (1966), "Unsteady Loads on Supercavitating Hydrofoils", Journal of Ship Research, Vol.9, pp.107-118.

Wu, T. and Wang, D., (1964), " A Wake Model for Free-Streamline Flow Theory. Part 2. Cavity Flows Past Obstacles of Arbitrary Profile", Journal of Fluid Mechanics, Vol.18, pp.65-93.

Yamaguchi, H. and Kato, H., (1983), "On Application of Nonlinear Cavity flow Theory to Thick Foil Sections", Proceedings: Second International Conference on Cavitation, IMechE, pp.167-174.

Yasko, M., (1998), "Boundary Element Method for a Hydrofoil Near the Free Surface", Engineering Analysis with Boundary Elements, Vol.21, No.2, pp.191-194.

Yoshimura, Y. and Koyanagi, Y., (2004), "Design of a Small Fisheries Research Vessel with Low Level of Underwater-Radiated Noise", Journal of the Marine Acoustic Society of Japan, Vol.31, No.3, pp.1-9, July.

Young, Y.L. and Kinnas, S.A., (2002), "Application of BEM in the Modeling of Supercavitating and Surface-Piercing Propeller Flows", IABEM2002 Symposium of the International Association for Boundary Element Methods, Austin, TX, May 28-30.

Young, Y.L. and Kinnas, S.A., (2003), "Numerical Modeling of Supercavitating Propeller Flows", Journal of Ship Research, Vol.47, pp.48-62, March.

Young, Y.L. and Kinnas, S.A., (2003a), " Fluid and Structural Modeling of Cavitating Propeller Flows" , CAV2003, Osaka, Japan.

Young, Y.L. and Kinnas, S.A., (2003b), "Numerical Analysis of Surface-Piercing Propellers", Propellers/Shafting 2003 Symposium , Society of Naval Architects and Marine Engineers, Virginia Beach, VA, September 17-18.

ITTC, (2005), “Erosion on Propellers and Appendages on High Powered/High Speed Ships”, Proceedings of the 24th ITTC, Final Report, Vol.II, pp.509.

INTERNET KAYNAKLARI

[1] <http://www.shef.ac.uk/savas/software/fluent/flv41c.htm>

[2] <http://cavity.ce.utexas.edu/kinnas/cavphotos.html>

[3] <http://www2.hcmut.edu.vn/~dmthien/course/lythuyettau2/cavitation.pdf>

[4] <http://www.nmri.go.jp/fluids/topics/highspeedcamera/english/exphighspeedcamera.html>

[5] <http://www.fluidlab.naoe.t.u-tokyo.ac.jp/Research/CavPictures/large/Bubble.mono.jpg>

[6] <http://www.nmri.go.jp/trans/Staff/kudo/database/SEIUN-pressure/wake.xls>

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 12.01.1977

Doğum yeri İstanbul

Lise 1990-1993 Yedikule Lisesi

Lisans 1994-1998 Yıldız Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi
Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 1998-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora 2002- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

1999-Devam ediyor YTÜ Makine Fakültesi Gemi İnşaatı ve Gemi
Makineleri Müh. Bölümü
Araştırma Görevlisi