

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ PERVANELERİNDE KAVİTASYON
KAYNAKLI GÜRÜLTÜNÜN İNCELENMESİ

ÖZER ATA

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

DANIŞMAN
DOÇ.DR. SERKAN EKİNCİ

İSTANBUL, 2015

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GEMİ PERVANELERİNDE KAVİTASYON
KAYNAKLI GÜRÜLTÜNÜN İNCELENMESİ

Özer ATA tarafından hazırlanan tez çalışması 03.06.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Serkan EKİNCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serkan EKİNCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Seyfettin BAYRAKTAR
Yıldız Teknik Üniversitesi

Y. Doç. Dr. Veysel ALANKAYA
Deniz Harp Okulu

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın başlangıcında ve ilerlemesinde bana yardımcı olan Doç.Dr.Serkan EKİNCİ'ye, çalışmama uzun bir ara verdikten sonra tekrar motive olmamı sağlayan değerli büyüğüm Sinan ÇAKIR'a, manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim ile biricik oğluma ve hep yanımda olan aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Haziran, 2015

Özer ATA

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT.....	xv
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
KAVİTASYON VE KAVİTASYON GÜRÜLTÜSÜ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR	3
BÖLÜM 3	
KAVİTASYON	15
3.1 Kavitasyon Çeşitleri	17
3.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştığı Konuma Göre Kavitasyon Çeşitleri	18
3.1.1.1 Sırt Kavitasyonu	18
3.1.1.2 Yüz Kavitasyonu	19
3.1.2 Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavitasyon Çeşitleri.....	20
3.1.2.1 Kabarcık (Bubble) Kavitasyonu	20
3.1.2.2 Tabaka (Sheet) Kavitasyonu	21
3.1.2.3 Kök (Root) Kavitasyonu	22
3.1.2.4 Bulut (Cloud) Kavitasyonu	24
3.1.2.5 Pervane-Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV)	24

3.1.2.6 Uç (Tip) Girdap (Vortex) Kavıtasyonu	26
3.1.2.7 Göbek (Hub) Girdap (Vortex) Kavıtasyonu	27
3.2 Kavıtasyon Etkileri	29
3.2.1 Performans Kaybı(ıtme Kaybı)	29
3.2.2 Gürültü	29
3.2.3 Titreşim.....	30
3.2.4 Erozyon.....	31
3.3 Kavıtasyon Başlangıcı	32
3.4 Kavıtasyon Kontrol Yöntemleri	34
BÖLÜM 4	
GÜRÜLTÜ	39
4.1 Makine Kaynaklı Gürültü.....	39
4.2 Akış Gürültüsü	41
4.3 Pervane Kaynaklı Gürültü.....	42
4.3.1 Kavıtasjonsuz Gürültü.....	45
4.3.2 Kavıtasyonlu Gürültü	46
BÖLÜM 5	
KAVİTASYONLU PERVANELERDE GÖRÜLEN GÜRÜLTÜNÜN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ İÇİN KULLANILAN KALDIRICI YÜZEY METODU	48
5.1 Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli	48
5.2 Pervane Kanadı Kaldırıcı Yüzey Modeli	51
5.2.1 İndüklenmiş Hızların Hesaplanması	55
5.2.2 Pervane Kanadında Tabaka Kavıtasyonunun Tespiti ve Analizi	57
5.2.3 Kavıtasyon Kaynaklı Gürültü Tahmini	63
BÖLÜM 6	
SAYISAL BULGULAR VE YORUMLAR	69
BÖLÜM 7	
SONUÇ VE ÖNERİLER	85
KAYNAKLAR	87
ÖZGEÇMİş	91

SİMGE LİSTESİ

A_c	Pervane kanadında oluşan tabaka kavitasyonu süpürme (swept) alanı
A_d	Pervane disk alanı
A_p	Pervane kanadı izdüşüm alanı
$\bar{B}_p$	Bağlı girdap elemanı
C	Kontrol noktası
C_D	Kesit direnç katsayısı
C_P	Basınç katsayısı
D	Pervane çapı
f	Frekans
F	Kuvvet
ϕ	Pervane kanadının çalıklık açısı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Kontrol noktasının derinliği
H_{dist}	Ses alıcının model pervaneden uzaklığı
J	İlerleme katsayısı
K_{Tip}	Uç girdap kavitasyonu katsayısı
K_t	Boyutsuz itme katsayısı
K_q	Boyutsuz tork katsayısı
$\vec{L}$	Girdap elemanının uzunluk vektörü
L_s	Gürültü düzeyi
M	Moment
N	Pervane devir sayısı
$\vec{n}$	Yüzeye dik birim vektör
P	Hatve miktarı
P	A noktasındaki (akışkanın) statik/mutlak basınç
P_0	Şaft merkez hattı statik basıncı
P_a	Atmosferik basınç
P_m	B noktasındaki statik/mutlak basınç
P_v	Suyun buharlaşma basıncı
Q_{cv}	Kavitasyonun dinamik davranışını temsil eden tek bir kaynağın yoğunluğu

Q_p	Anahtar kanat üzerindeki bir kaynağın şiddeti
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
R	Pervane yarıçapı
$\overline{R_p}$	Radyal takip eden girdap elemanlar sistemi
$ \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	Yarıçap boyunca pervane kesitlerini gösteren koordinat
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_p	Pervane kanatlarının alanı
S_{ps}	Pervane serbest girdap sisteminin sürekli bölgesinin alanı
S_{pv}	Pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesinin alanı
T	İtme kuvveti
τ_c	İtme gücü katsayısı
T_c	Düzeltilmiş kavitasyon kalınlığı
T_j	j. kanat pozisyonundaki kavitasyon kalınlığı
$\overline{T_p}$	Takip eden girdap elemanı
t	Zaman parametresi
$\vec{t}$	Yüzeye teğet birim vektör
V	A noktasındaki referans akım hızı
$\overline{V}$	Pervaneye gelen akımın 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
V_m	B noktasındaki referans akım hızı
$\vec{V}_Q$	Kaynak elemanı tarafından indüklenen hız
$\vec{V}_\Gamma$	Girdap elemanı tarafından indüklenen hız
V_{Tip}	Uç girdap kavitasyonu başlangıç anındaki kanat ucu hızı
V_{Tip}^i	Uç girdap kavitasyonu başlangıç anındaki devir sayısı
$\overline{W}_p$	Radyal girdap elemanı
w	İz katsayısı
x/c	Boyutsuz kort oranı

Z	Kanat sayısı
$\vec{\gamma}_p$	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_0	Pervane açık su verimi
σ	Kavitasyon sayısı
σ_i	Kavitasyon başlangıç sayısı
θ	Kanat pozisyon açısı
ΔR	Kanadın üzerindeki kavitasyon tabakasının kort yönündeki şeridinin genişliği
ΔX	Q kaynağı yerine geçen V_p kanat hacim elemanının boyu
$\vec{\omega}$	Pervane açısal hızı
φ_c	Kavitasyonun süreksiz davranışını temsil eden hız potansiyeli

BEM	Boundary Element Method
BMT	British Maritime Technologies
BSRA	British Sound Recording Association
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPP	Controllable Pitch Propeller
DTMB	David Taylor Model Basin
ICES	International Council for the Extrapolation of the Sea
IMO	International Maritime Organizations
INSEAN	Instituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale Italian-Ship Model Basin
PEV	Propeller Excited Vibration
PHIVE	Propeller-Hull Interaction Vibration Excitation
PHV	Propeller Hull Vortex
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
SQCM	Simple Surface Panel Method
SPP	Surface Piercing Propeller
TEU	Twenty-foot Equivalent Unit

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3. 1 Akışkan faz diyagramı	16
Şekil 3. 2 Sabit ve hareketli kavitasyonlar[1]	17
Şekil 3. 3 Sırttaki kavitasyon bölgesi[32]	18
Şekil 3. 4 Giriş ucu civarında oluşan sırt kavitasyonu[32]	18
Şekil 3. 5 Çıkış ucu civarında oluşan sırt kavitasyonu[32]	19
Şekil 3. 6 Yüzdeki kavitasyon bölgesi[32]	19
Şekil 3. 7 Yüz kavitasyonu[32]	19
Şekil 3. 8 Kabarcık kavitasyonu[32][1]	20
Şekil 3. 9 Tabaka kavitasyonu[32]	21
Şekil 3. 10 Tabaka ve kanat ucu kavitasyonu[1]	22
Şekil 3. 11 Kök kavitasyonu[32]	23
Şekil 3. 12 Tam yol ve altındaki durumda kök kavitasyonu[1]	23
Şekil 3. 13 Bulut kavitasyonu[32][1]	24
Şekil 3. 14 PHV kavitasyonu[1]	25
Şekil 3. 15 Pervane tekne girdap kavitasyonu[1]	25
Şekil 3. 16 Uç girdap kavitasyonu[1]	26
Şekil 3. 17 Bağlantısız “unattached” uç girdap kavitasyonu[32]	26
Şekil 3. 18 Göbek girdap kavitasyonu[32]	27
Şekil 3. 19 Model test üzerindeki göbek girdap kavitasyonu[1]	28
Şekil 3. 20 Kavitasyonun oluştuğu yerler ve türleri [32]	28
Şekil 3. 21 Artan devir sayısı ile kavitasyon türlerinin oluşumu[32]	29
Şekil 3. 22 Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz durumda oluşan basınç dağılımı	31
Şekil 3. 23 Bir pervanede kavitasyonun neden olduğu erozyon örneği[32]	32
Şekil 3. 24 Erozyon nedeniyle aşınan kanat[30]	32
Şekil 3. 25 Düzenli akım içerisindeki iki boyutlu bir kanat kesiti[32]	33
Şekil 3. 26 Pervanelerin çalışma bölgeleri[1]	35
Şekil 3. 27 Kavitasyon kova diyagramı	36
Şekil 4.1 Suüstü gemileri için gürültü kaynakları etkileri [1]	44
Şekil 4.2 İdeal kavitasyonsuz gürültü spektrumu [1]	45
Şekil 5.1 Pervane kanadı kaldırıcı yüzey modeli	52
Şekil 5.2 Kaldırıcı yüzey modeline ait koordinat sistemi [5]	54
Şekil 5.3 Bir girdap/kaynak elemanının kontrol noktasında indüklediği hız [5]	56

Şekil 5.4 Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli [5]	60
Şekil 5.5 Tabaka kavitasyon modeli	63
Şekil 5.6 Brown formülüne göre tabaka kavitasyonunun süpürme alanı [5]	65
Şekil 5.7 Geliştirilmiş Brown formüne göre gürültünün hesaplanmasına ilişkin algoritma.....	68
Şekil 6.1 Pervaneye ait nominal iz dağılımı.....	71
Şekil 6.2 Rhinoceros programında çizilen pervane	71
Şekil 6.3 Orjinal pervanenin 0°-60° arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen sırt ve yüz taraftaki basınç dağılımları.....	72
Şekil 6.4 Orjinal pervanenin 90°-180° arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen sırt ve yüz taraftaki basınç dağılımları.....	73
Şekil 6.5 Orjinal pervanenin, $\theta=0^\circ$ kanat pozisyonunda görülen tabaka kavitasyon formu	74
Şekil 6.6 Farklı çalıklık açılarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu alanları ($J=0.704$).....	76
Şekil 6.7 Farklı çalıklık açılarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu hacimleri ($J=0.704$)	76
Şekil 6.8 Farklı hatve oranlarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu alanları ($J=0.704$).....	77
Şekil 6.9 Farklı hatve oranlarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu hacimleri ($J=0.704$)	77
Şekil 6.10 Farklı çalıklık açılarında, pervaneye ait performans karakteristikleri ($J=0.704$)	78
Şekil 6.11 Farklı hatve oranlarında, pervaneye ait performans karakteristikleri ($J=0.704$)	79
Şekil 6.12 Farklı çalıklık açılarında, pervaneye ait tabaka kavitasyonu süpürme alanları ($J=0.704$)	80
Şekil 6.13 Farklı hatve oranlarında, pervaneye ait tabaka kavitasyonu süpürme alanları ($J=0.704$)	81
Şekil 6.14 Farklı çalıklık açılarında, kavitasyon kaynaklı oluşan gürültü seviyeleri ($J=0.704$).....	83
Şekil 6.15 Farklı hatve oranlarında, kavitasyon kaynaklı oluşan gürültü seviyeleri ($J=0.704$)	83
Şekil 6.16 Orjinal pervaneye ait gürültü seviyelerinin farklı yaklaşımlara göre karşılaştırması($J=0.704$).....	84

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 3.1 Tatlı suya ait basınca göre kaynama sıcaklığı değerleri.....	16
Çizelge 4.1 1981 IMO koduna göre gemilerde olması istenen maksimum gürültü seviyeleri	43
Çizelge 6.1 Pervaneye ait kanat geometrisi.....	70
Çizelge 6.2 Pervaneye ait karakteristikler.....	70
Çizelge 6.3 Orijinal pervaneden türetilen yeni çalıklık miktarları (m)	75
Çizelge 6.4 Orijinal pervaneden türetilen yeni hatve oranları.....	75

GEMİ PERVANELERİNDE KAVİTASYON KAYNAKLI GÜRÜLTÜNÜN İNCELENMESİ

Özer ATA

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Serkan EKİNCİ

Gemi pervanelerinde oluşan gürültünün azaltılması ve kontrolü, su altındaki akustik sistemlerin performansında, yolcu gemilerindeki mürettebatın ve yolcuların konforlu bir ortamda seyahat etmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bir pervane tarafından meydana gelen gürültü, su altında akustığının kullanılarak gemilerin tespit edilmesi açısından, özellikle askeri amaçlar için geminin hayatta kalabilirliğine kritik olarak etki etmektedir.

Gemi akustiği konusunda yapılan çalışmalar, en önemli gürültü kaynağının pervanelerde meydana gelen gürültü olduğunu göstermektedir. Pervane gürültüsünün en büyük kaynaklarından biri, pervanenin çalışması esnasında meydana gelebilen ve bir akışkanlar mekaniği olgusu olan kavitasyon olayıdır. Gemi pervaneleri üzerinde görülen ve en çok karşılaşılan kavitasyon çeşidinin, tabaka kavitasyonu olduğu bilinmektedir. Gemi pervanelerinin çalıştığı ortamdaki akışın düzgün olmaması, oluşması muhtemel tabaka kavitasyonunun zamana göre düzensiz bir davranış göstermesi, özellikle su altında gürültü ve şaft yolu ile gemi bünyesinde titreşim oluşumuna öncülük etmektedir. Bundan dolayı pervane dizaynı ve analizi yapılırken bu tip istenmeyen olayların imalat öncesi kontrol altına alınması son derece önemlidir.

Gemi pervanelerinde meydana gelen kavitasyona dayalı gürültünün ortadan kaldırılabilmesi için, kavitasyon olayını da kapsayacak şekilde gemi pervanelerine ait

birçok dizayn ve analiz çalışmaları yapılmaktadır. Geçmişte olduğu gibi günümüzde de hem deneysel hem de sayısal olarak gerçekleştirilen bu çalışmalar, bilgisayar teknolojisinin gelişimine ve yüksek hızlı deniz araçlarına olan ihtiyaın artmasına paralel olarak büyük ilerleme göstermiştir. Mevcut çalışmada, gemi pervaneleri için sayısal analiz yöntemlerinden biri olan kaldırıcı yüzey metoduna dayalı bir kavitasyon -gürültü öngörü yöntemi kullanılmıştır. Uygulama için geometrisi ve çalışma koşulları belli olan bir pervane seçilmiştir. Söz konusu pervaneye ait birtakım geometrik karakteristikler (alıklık ve hatve dağılımı) değiştirilerek, pervanenin performansına, kavitasyon karakteristiğine ve gürültü düzeyine olan etkileri sayısal olarak incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Pervane gürültüsü etkisi, kavitasyon, tabaka kavitasyonu.

INVESTIGATION OF CAVITATION-INDUCED NOISE ON SHIP PROPELLER

Özer ATA

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan EKİNCİ

Controlling and downscaling noise caused by ship's propellers plays significant role on the performance of underwater acoustic systems, and the comfort of the crew and passengers of cruise ships while onboard. The noise produced by propellers exploited by underwater acoustics for detection which critically affects ship's survivability for military purposes.

Studies about ships' acoustics present that the most significant source of noise is the noise caused by ships' propellers. One of the most significant sources for propeller noise is cavitation which is a fluid mechanics phenomenon and can be occurred while cruising. It's well known that the sheet type cavitation is the most frequent one that encountered on ship's propellers. The non-uniform fluid flow around propellers and the unsteady behavior of a potential sheet cavitation according to time, lead especially underwater noise and vibration at shaft line and at the ship's hull. For this reason, preventing undesired aforementioned situations at pre-construction phase is very important while analyzing and designing a propeller.

In order to eliminate the noise arisen from ships' propellers due to cavitation, several propeller design and analysis studies have been done including the cavitation phenomenon. Currently and also as previously, aforementioned studies which have been done both quantitatively and experimentally, presented significant progress while the necessity of high speed vessels and the development of the computerized

technology exist. In this study, a cavitation-noise prediction method which is one of the quantitative analysis methods for ship's propellers based on the "Lifting Surface" method has been used. A propeller was selected with the specific geometry and the running conditions for the application. By switching some geometrical characteristics (skew and pitch distribution) of propellers, effects on performance, characteristics of the cavitation, and the level of the noise investigated quantitatively.

Key words: The effect of propeller noise, cavitation, sheet cavitation.

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Gemi pervanelerinin oluşturduğu gürültü, hem şiddeti hem de sudaki yayılımı açısından, savaş gemisi dizayn edenler ve askeri araştırmacılar için her zaman büyük bir öneme sahip olmuştur. Bu yüksek öneme haiz gürültü oluşumu incelendiğinde, en sık karşılaşılan kaynağın kavitasyon olduğu araştırmacılar tarafından kabul görmüştür. Pervane kavitasyonu, pervanenin hidrodinamik performansının azalması, kavitasyon erozyonu ve tekne titreşimine sebep olması dışında kavitasyon gürültüsüne de sebep olmaktadır. Pervanenin sebep olduğu gürültü ve tekne titreşimi, kavitasyon akışı, basınç ve iz durumu ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle akış bölgelerindeki kavitasyon, basınç ve iz durumları ile ilgili daha fazla bilginin elde edilmesi, pervane gürültü ve titreşim olgusunun daha iyi anlaşılabilmesi açısından önemli rol oynamaktadır. Hem gürültü karakteristiklerinin analiz edilmesi hem de gürültünün azaltılması veya kontrol altında tutulabilmesi için belirli bir metot belirlenmelidir.

Kavitasyon konusunda, temel olarak, kavitasyon tüneline gerçekleştirilen deneysel uygulamalar ve sayısal yöntemler ile çalışmalar yapılabilmektedir. Kavitasyon tüneline gerçekleştirilen deneysel yöntemler, kavitasyon olayının canlandırılmasına yardımcı olmakta, ancak maliyet ve zaman kaybı açısından uygun olmamaktadır. Sayısal yöntemlerde, kavitasyonun meydana geldiği akış bölgelerine ilişkin daha fazla parametre kullanılabilmekte ancak çalışma sonucunda kavitasyon modeline ve parametrelerine ilişkin istikrarlı bir sonuca ulaşılamamaktadır. Analizlerin

doğrulanabilmesi için, deneysel olarak elde edilen verilerin, en son pervane dizaynı aşamasında sayısal yöntemler kullanılarak son kontrolleri yapılabilmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, gürültüyü meydana getiren kavitasyon çeşitleri incelenmiş, fiziği ve etkileri açıklanmaya çalışılmıştır. Kavitasyon kaynaklı gürültü konusuna değinilmiş ve sebepleri ve önlenmesi hakkında bilgiler verilmiştir. Hatve değişimi ve çalıklık gibi geometrik parametrelerin değişimlerinin, pervanenin performansına, pervane üzerinde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu büyüklüklerine ve dolayısıyla meydana gelecek gürültüye olan etkileri sayısal olarak öngörölmeye çalışılmıştır.

1.3 Hipotez

Bu çalışmanın, gemi pervanelerinin imalat öncesi tabaka kavitasyonu ve performans kontrollerinin kolay ve hızlı bir şekilde yapılabilmesine rehberlik etmesi hedeflenmiştir. Pervane dizaynı sırasında, tabaka kavitasyonunun pervaneye ve çevreye olan olumsuz etkilerini en aza indirmek büyük önem taşımaktadır. Bu durum, gemi pervane imalatında itme, tork, verim ve tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü gibi hidrodinamik karakteristiklerine olan olumlu etkilerinden dolayı, pervane çalıklık açısı artması ve hatve oranının azalması gerekliliğini desteklemektedir.

KAVİTASYON VE KAVİTASYON GÜRÜLTÜSÜ İLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Kavitasyon, akışkan içerisinde bir takım boşlukların ve kabarcıkların meydana gelmesini ifade eden fiziksel bir olgudur. Su veya herhangi bir sıvı akışkan içerisinde meydana gelen basınç ve hız dalgalanmalarının sebep olduğu genel bir akışkanlar mekaniği olayıdır. Kavitasyon meydana geldiği durumda, sıvı tam akışın olduğu bölgede gaz fazına geçer ve yüksek hızlar nedeniyle çok düşük basınçlar meydana gelir (pervane kanat ucu gibi). Sabit sıcaklıkta meydana gelen bu basınç düşmeleri kaynamaya ve dolayısıyla kabarcık oluşumlarına sebep olur (soğuk kaynama).

Kavitasyon statik veya hareketli bir sıvının bulunduğu ortamlarda oluşur. Ancak mühendislik alanında, sıvının hareketli olduğu hidrodinamik kavitasyon ile daha çok karşılaşilmektedir. Hidrodinamik kavitasyon ise uçak kanatları veya pervane kanatları etrafındaki akışı, hidrolik valfler gibi dar kanaldaki akışları, venturi nozulları içerisindeki akışları içermektedir. Hemen hemen hareketsiz bir sıvı içerisinde meydana gelebilecek kavitasyona uç bir örnek olarak; keskin kenarlara sahip katı bir cismin (bir disk gibi) ani ve hızlı bir şekilde ivmelenmesi verilebilir. Bu durumda, sıvının kendi hızı ihmal edilebilir olduğu halde dahi cismin kenarlarında anında kavitasyon kabarcıkları görülebilir.

Gemi pervanelerinin gürültüsünü ve gemi bünyesinde meydana gelen titreşimleri etkileyen kavitasyon, üzerinde en çok çalışılan, araştırma yapılan, deneysel bulgular elde edilmeye çalışılan hidrodinamik olaydır. Bunun sebebi, sözü edilen makinelerde yüksek verim ve pervane yüklerindeki artışa paralel olarak kavitasyon olayının sıklıkla ortaya çıkması ve kaçınılmaz bir durum haline gelmesidir. Gemi mühendisliğini

ilgilendiren kavitasyon problemleri arasında pervane, dümen ve hidrofoil tekne ayaklarında görülen kavitasyon çeşitleri yer almaktadır.

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[1].

Ancak, gemi mühendisliği ile doğrudan ilgili olan kavitasyon incelemelerine bakıldığında, çalışmaların 19.yy'ın ortalarına rastladığı görülmektedir. 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[1].

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, 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[1].

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[1].

Turbinia, üzerinde iki kanatlı, her birinin çapı 0.75 m olan üç adet pervane bulunan bir shafta 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[1].

Kavitasyon kelimesi İngiliz bilim literatüründe on dokuzuncu yüzyılın sonunda görülmüştür. Dönel makinelerde kullanılan sıvılarda görülen kavitasyon problemi TORICELLI ve daha sonra EULER ve NEWTON tarafından tanımlanmıştır. On dokuzuncu yüzyılın ortasında, DONNY ve BERTHELOT sıvıların kohezyonunu ölçmüştür. Kavitasyon sayısı 1923-1925 yılları arasında THOMA ve LEROUX tarafından ortaya atılmıştır.

Endüstriyel sistemler üzerinde kavitasyon olayının fiziksel görünümleri üzerine çalışmak ve etkilerini incelemek için birçok deney icra edilmiştir. Teorik ve deneysel yaklaşımlar geniş bir şekilde kullanılmıştır[2].

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.

Araştırmalar neticesinde kavitasyon meydana geldiğinde, şiddetine ve büyüklüğüne bağlı olarak pervanede performans düşüklüğü, gürültü, titreşim ve erozyon meydana

geldiği görülmüştür. Ses, işitme duygusunu harekete geçirici nitelikte karaktere sahip bir yayılım gösterdiğinde, mekanik bir rahatsızlık olarak tanımlanmakta (BSRA, 1982) olup, pervanede kavitasyon nedeniyle meydana gelen gürültü ise istenmeyen ses olarak belirtilmiştir.

Ses, iki sıvı arasında veya bir sıvı ile bir yüzey arasında etkileşim ve hareket olduğunda meydana gelmektedir. Hareket olduğunda meydana gelen bu istenmeyen ses yani gürültü, gemi sistemlerinde 2 ana grupta toplanmaktadır.

1. Tekne, personel ve ekipmanlarından kaynaklanan geminin kendi gürültüsü (self noise)
2. Gemi tarafından oluşan ve gemiden belirli bir uzaklıkta yayılan gürültü (radiated noise)

Gemi sistemleri tarafından meydana gelen gürültünün büyük bir bölümünü su altı gürültüsü oluşturmaktadır. Su altı gürültüsünün 3 temel kaynağı bulunmaktadır. Bunlar; makine, pervane ve akış kaynaklı gürültüdür. Bunların arasında en önemlisi pervane kaynaklı gürültü olup, aşağıda belirtilen şekillerde meydana gelmektedir.

1. Pervane kanatlarıyla suyun yer değişimi,
2. Pervane kanadının emme (sırt) ve basınç (yüz) tarafları arasındaki basınç farkı,
3. Girdap (vorteks) ve kavitasyon kabarcığının ani patlayışı,
4. Kavitasyon hacminin periyodik dalgalanmaları[3].

Kavitasyon gürültüsü, kabarcıkların hareketi, tabaka kavitasyonu, uç girdap kavitasyonu veya farklı tipteki kavitasyonlar tarafından oluşabilmektedir. Kavitasyon kabarcığının etrafındaki dış basınç artmaya başladığında, kısa bir zaman sonra, iç ve dış basınç arasındaki basınç büyüklüğü düşmekte ve o an kabarcık patlama seviyesine gelmektedir. Patlama seviyesindeki kavitasyon kabarcığı şok dalgaları oluşturmakta ve bunun sonucunda gürültü meydana gelmektedir. Diğer yandan kavitasyon başlangıç seviyesi, gürültü seviyesine de etki etmektedir [4].

Ross [3] çalışmasında, “eggbeater” adı verilen bir alet ile durgun suda yapmış olduğu gürültüye ilişkin ölçümleri yayınlamıştır. 1 kHz’lik bir filtre kullanılarak 17 ila 60 kHz band genişliği üzerindeki gürültü yayılımını ölçmüştür. Gürültü seviyelerinin, kavitasyon başlangıcı ile birlikte belirgin bir şekilde arttığını, belli bir seviyeden sonra ise kademeli olarak artışlar görüldüğünü tespit etmiştir. Teorik olarak diyagramlar şeklinde vermiş olduğu bu sonuçlarda, gürültünün artış göstermeye başlamasından önce, bazı hız artışları görülememiş olsa dahi, diyagramlarda verilen bu teorik eğriler yardımıyla gürültü değerinin bulunabileceğini ifade etmiştir. Diyagramları meydana getiren eğrileri, pervane devir sayısına bağlı denkleme göre oluşturmuştur.

Carlton [1] çalışmasında, çeşitli kargo ve tanker gemilerinde yapılan ölçümlerde gürültü seviyesindeki değişimin çoğunun 1 ila 3 dB spektrumunda meydana geldiğini söylemiştir. Ross [3]’un çalışmasına göre, orjinal ölçümleri ve modern bilgileri bir araya getirerek tekrar analizler yapmış ve gürültü seviyesinin, pervane kanat uç hızı ile kavitasyon meydana gelen kanat sayısının bir fonksiyonu olarak ifade edilebileceğini göstermiştir. Gürültü seviyesinin tespiti için elde edilen bu denklemler ile 100 metrenin üzerinde gemiler için, 1 metre kaynak seviyesinde gürültü spektrumunun yaklaşık olarak elde edilmesini mümkün kılmıştır.

Ekinci [5] çalışmasında, düzensiz akımda çalışan pervanelerin performans ve tabaka kavitasyonu analizi için kaldırıcı yüzey teorisine dayalı bir metot sunmuştur. 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 imkânı verilmiştir.

Cheolsoo vd. [6] çalışmalarında, ölçülen gürültü analizi ve yerinin belirlenmesine yer vermişlerdir. Kavitasyon tüneli içerisindeki pervane gürültüsünün öngörme metodu üzerine çalışılmıştır. Pervane gürültü ölçüm deneyleri MOERI kavitasyon tüneline yapılmıştır. Kavitasyon koşullarının yaratılması maksadıyla, dalga üreten bir yapı (dummy-body) icat edilmiştir. Ayrıca, beklenmedik akışların, hidrofonlar etrafındaki

gürültü artışını en aza indirmek maksadıyla, 10 adet hidrofon, kanat şekilli muhafazalar içerisinde yerleştirilmiştir. Bu analizler ve deneyimler neticesinde sıg su uygulamalarında kullanılan gürültü kaynağı yerinin belirlenmesi için kullanılan metotların, kavitasyon tüneli tecrübelerine başarılı bir şekilde uydurulabildiği görülmüştür. Bu çalışmada ele alınan model, cismin gürültü seviyesinin artmasına neden olan düzensiz alanlar oluşturmıştır. Kavitasyonun tamamen geliştiği durumlarda, 40 kPa basınç koşulları altındaki tüm frekans bandlarında anlık artış ve tünel basıncının azaldığı durumlarda ise yüksek frekanslı gürültü seviyelerinde aşamalı bir artış görülmüştür. Gürültü bilgisi kullanıldıktan ve zahiri kaynak kullanarak ölçülen alanlardan sonra, yer belirleme sonuçlarını veren nesnel fonksiyonların görsel tespitler ile uyduğu görülmüştür.

Korkut vd. [7] çalışmalarında, 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.

Zhu vd. [8] çalışmalarında, viskoz akış ve çok fazlı-akış teorilerine dayanarak, 3 boyutlu pervane düzensiz akış alanında, N-S denklemleri ile sayısal çözüm için tam kavitasyon modeli, türbülans modeli ve ağ (mesh) yöntemleri uygulanmıştır. Kavitasyon gürültüsünün iki önemli mekanizması olan pervane gerisindeki kavitasyon ve iz alanı araştırılmıştır. Kavitasyon modeli ve türbülans modelinin kullanılması ile elde edilen sayısal veriler, ölçülen değerler ile karşılaştırılmıştır. Pervane uç kısmında basınç genliğinin en yüksek olması, uç girdap kavitasyonunun basınç dalgalanmalarının en önemli kaynağı olduğunu göstermiştir.

Hsiao ve Chahine [9] çalışmalarında, kavitasyon kabarcıklarının küresel bir şekle sahip olduğu varsayımı ile kavitasyon çekirdek (nuclei) 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.

Testa vd. [10] tarafından yapılan çalışmada, gemi pervanelerindeki hidro-elastik alanda sıkıştırılabilirlik etkilerinin önemi ifade edilmiştir. Bu çalışmada, sanal 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 yayılımına etki eden sıkıştırılabilirlik özellikleri tanımlanmıştır.

Lee ve Kinnas [11] çalışmasında, DTMB 4148 pervanesi için, pervanenin ele alınan test koşullarında, kanat üzerinde görülen tabaka kavitasyon bölgelerini, üç farklı kanat pozisyon açısı için karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Ayrıca, bu pervane için tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü düzeyi Brown formülü kullanılarak elde edilmiş, elde edilen sonuçlar formülasyonlara göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Chahine [12] çalışmasında, sayısal tekniklerdeki gelişmeleri tanıtmıştır. Kabarcık çekirdek dinamiğine bağlı ölçek etkileri, kavitasyon başlangıcı ve gürültü üzerine yapılan araştırmalar ile sayısal tekniklerde önemli ilerlemeler gerçekleştirmiştir. Bu yaklaşımlarda kavitasyon, kabarcık çekirdeği ile basınç alanı değişimleri arasındaki etkileşim şeklinde dikkate alınmıştır.

Yoshimura ve Koyanagi [13] ile Okamura ve Asano [14] çalışmalarında, geliştirilen kaldırıcı yüzey modelinde, pervane kanadında görülen tabaka kavitasyonu tarafından indüklenen su altı gürültüsünün öngörüsü için uygulama alanı bulan Brown metodunu kullanılmıştır. Kaldırıcı yüzey metodu tarafından hesaplanan kavitasyon alanları Brown'un denklemi ile verilen formül kullanılarak pervanenin o andaki konumu için oluşan gürültü seviyesi bulunmaktadır.

Tabaka kavitasyonu kaynaklı gürültü üzerine yapılan teorik araştırmalar, panel metoda dayalı hidrodinamik model ile Ffowcs Williams-Hawkins denklemini içine alan panel metoda dayalı hidroakustik modelin birleşiminden oluşan metotlar, Salvatore ve Ianniello [15] çalışmalarında yer almaktadır.

Kanemaru ve Ando [16] çalışmalarında, düzenli ve düzensiz kavitasyonlu pervane problemi için bir hesaplama metodu ortaya koymuşlardır. Bu metot, Kutta koşulu ile tamamen uyuşan, basit yüzey panel metoduna (SQCM) dayanan bir metottur. zelliklerin belirlenebilmesi için sınır koşulları, kavitasyonlu yüzeyde sabit basınç ve pervane ile kavitasyonlu yüzeyde ise sıfır normal hızdır. SQCM'nin, pervanelerde lineer olmayan kavitasyonun hesaplanmasında nasıl kullanıldığı ve düzenli/düzenli olmayan akışlar içerisinde kavitasyon paternleri, kavitasyon şekilleri ve kavitasyon kabarcıklarına ilişkin bazı hesaplamalar yapmışlardır. Yapılan hesaplamaların daha önceki çalışmalar ile uyuştuğu görülmüştür.

Kuiper [17] çalışmasında, gemi pervanelerinin dizaynında, kavitasyonun etkilerini gözden geçirmiştir. Kabarcık kavitasyonu ile ilgili yapılan araştırmaların tarihsel gelişiminin, dizayn ile araştırmaların birlikte kullanılamamasından kaynaklandığına değinmiştir. Tabaka kavitasyonuna ilişkin çalışmalara, bu çalışmanın yapıldığı yıllarda yeni başlandığı ve iki boyutlu kavitasyon gibi basitleştirme metoduna başvurulduğunu belirtmiştir. Ardından pervanelerde yapılan gözlemler sonucunda, tabaka kavitasyonunun incelenmesinde iki boyutlu kavitasyonun kullanılmasının uygun bir yöntem olmadığı tartışılmıştır. Erozyon araştırması ile pervane modelleri üzerindeki erozyon risklerine ilişkin değerlendirme yapılmıştır. Son olarak ise uç girdap kavitasyon başlangıcının temeli ve kavitasyon hızı ile ilgili problemler ortaya konmuştur.

Stutz [18] çalışmasında, tabaka kavitasyonunun iki fazlı akım yapısını tanımlamaya çalışmıştır. Bu amaç için yapılan deneyler, venturi tipi test bölmesine sahip olan bir kavitasyon tüneli içerisinde gerçekleştirilmiştir. Geçiş zaman histogramları ve yerel zaman oran histogramlarının analizlerine dayanan veri işlemleri kullanılmıştır. Kavitasyonu devam ettirmek için gerekli buhar üretim miktarı tespit edilmiştir. Kavitasyon tünelindeki duvar basınç ölçümleri ve görselleştirme teknikleri, momentum dengesini sağlamak için kullanılmıştır. İki fazlı akış üzerinde, pürüzlülük ve kavitasyon altında konumlanmış uzak bir bölgedeki geometrinin etkisi incelenmiştir.

Odabaşı [19] çalışmasında, kavitasyon gürültüsüne dair yayınlanmış literatürlerin, aslında kavitasyon başlangıcı ve kavitasyon geometrisinin belirlenmesi, kısmen tabaka ve uç girdap kavitasyonu, ses perdelerine ait kaynakların tahmini ve bazı lklendirme

kurallarının türevleri ile ilişkili olduğunu belirtmiştir. Bu konuyla ilgili birçok bilgi bulunmasına rağmen, kavitasyon gürültüsünün tahmin edilmesi ve kontrolü için uygun bir yöntem olmadığını belirtmiş ve buna yönelik bir tahmini yöntem ve yol bulmaya çalışmıştır. Öncesinde konuyla ilgili yapılmış çalışmaların bir özetini sunmuş ve konuların kolaylıkla anlaşılabilmesini sağlayacak arka plandaki bilgilerin basit şekilde yorumlanmasını sağlamıştır. Konuların kavitasyon başlangıcı ile ilgili olması nedeniyle, kavitasyon geometrisinin belirlenmesi, hem uyarılmış pervane titreşiminin (PEV) hem de pervane-tekne etkileşim titreşim uyarımı (PHIVE) çalışmalarını kapsayan konularda İngiliz Denizcilik Teknolojileri (BMT) metodu kullanılarak sonuçları yorumlanmıştır.

Fraser [20] çalışmasında, BMT tarafından geliştirilmiş metotları kullanmış ve seçilmiş bir gemi dizaynı için kavitasyonun oluşma ihtimalini hesaplama yöntemini göstermiştir. Kavitasyonun en belirgin nedenleri ve bunlardan korunma yolları vurgulanmıştır. Hesaplamalar, kavitasyonun derecesini azaltmak için ele alınan hesaplamalar ile karşılaştırılmıştır. Geniş band ve dar band pervane spektrumlarının her ikisinden yayılan gürültünün derecelerini tahmin etmek üzere kullanılan yöntemler tanımlanmıştır. Düşük gürültü seviyesi oluşturmak için dizayn edilen hatvesi kontrol edilebilir (CPP) pervanelerin, yayılan gürültü dereceleri üzerindeki etkisini değerlendirmiştir.

Atlar vd. [21] çalışmalarında, balıkçı teknelerinin model pervanelerine ait kavitasyon tüneli sonuçlarının, bu gürültü ölçümleri ile pervaneye ait düşük gürültü performanslarının, tam ölçekli pervaneler ile uyuştuğunu göstermişlerdir. Bu testler, bir iz ekranı kullanılarak, hedef iz simülasyonu ve simüle edilmiş iz ardındaki tespit edilen kavitasyon boyutunun ve yapısının tespit edilmesini kapsamaktadır. Model pervanenin gürültü seviyeleri ölçülmüş ve analizleri yapılmıştır. Model pervanenin net gürültü seviyeleri, 18.ITTC Kavitasyon Komitesi tarafından tavsiye edilen ölçeklendirme kurallarına göre tam ölçeğe uyarlanmıştır. Her ne kadar Japonya'daki tekne ile tam ölçekli ölçümler gerçekleştirilmiş olsa da, bu uyarlanan sonuçlar, ICES tarafından tavsiye edilen kriterler ile karşılaştırılmıştır.

Seol vd. [22], su altında çalışan bir pervanenin kavitasyonsuz ve tabaka kavitasyonunun etkili olduğu durumlardaki gürültü seviyeleri için sayısal bir çalışma yapmışlardır.

Sayısal metodun doğruluğu ve sonuçları önceki yapılan çalışmalar ile karşılaştırılarak gösterilmiştir. Gürültü, zamana bağlı olarak akustik benzetim ile öngörülmüştür. Bu çalışmada geliştirdikleri panel metot, Kutta koşulu ile hız potansiyeli için kullanılan klasik Green'in üçüncü eşitliğinin düzenlenmiş halidir. Akış çözücü, en çok gemi pervanelerinde bulunan, hatve (pitch) değişimleri, eğiklik (rake) ve çalıklığı (skew) içeren, pervane kanatlarının yüzeyleri üzerindeki hiperbolidal panel elemanlarını kullanmaktadır. Düzeltilmiş Kutta koşulunu içeren bu metot, sağlam ve güvenilir bir metot olarak kabul edilebilmektedir.

Takinacı ve Taralp [23] çalışmalarında, pervanelerin geniş band gürültülerine ampirik bir tahmin metodu bulmayı hedeflemişlerdir. Bu metot, iki kısımdan oluşmaktadır. Birincisi, pervane üzerindeki kavitasyon modelini doğru bir şekilde sağlayarak, iyi oluşturulmuş bir kaldırıcı yüzey metodu ile frekansa bağlı geniş band gürültüsünün ampirik tahmini. İkincisi, gürültü geçişinin zamana bağlı tahmini. Model için sırasıyla uygulanan bu iki içerik, ses karakteristiği ve gerçek pervane spektrumu için çıkış verimi sağlamaktadır. Pervane gürültüsüne bu çalışmada, çevre ve makine gürültüsü de eklenerek genişletilmiştir. Çalışmada gürültü tahmini için temel olarak Brown'ın yarı ampirik formülü kullanılmıştır. Ancak Brown'ın formülü ile pervane üzerinde oluşan tabaka kavitasyonu alanına göre meydana gelecek gürültü tahmini yapılabilirken, genişletilmiş ampirik formül içerisine pervane kanat uçlarında meydana gelebilecek uç girdap kavitasyonunun meydana getireceği gürültü etkisi de eklenmiştir.

Vassenden ve Lovik [24] çalışmalarında, kavitasyon gürültü kaynakları ve bunların karakteristik özellikleri üzerinde durmuşlardır. Kavitasyonun yayılan gürültünün, istatistiksel özellikleri ve gemi pervanesi için genel gürültü spektrumu açıklanmıştır. Deniz ortamında yapılan tam ölçekli ölçümler ve kavitasyon tünellerindeki deneysel modellerde kullanılabilecek, pervane gürültü spektrumu ve ölçek seviyesi için bir yöntem test edilmiştir. Gürültü deneyleri için uygun olacak şekilde 1,2 m çapında bir kavitasyon tüneli yapılmış ve bulunan spektrumun prototip ile uyduğu görülmüştür.

Aktaş vd. [25] çalışmalarında, bir katamaran araştırma gemisine ait 214 mm'lik model pervanenin, sistematik kavitasyon tünel testlerini yapmışlardır. Düzgün ve eğimli şaft akışı koşullarındaki pervane verimini, kavitasyonu ve sualtında yayılan gürültü

karakteristiklerini araştırmıştır. Deneyler, Newcastle Üniversitesi'nin Emerson Kavite Tüneli'nde, üniversiteye ait bir araştırma gemisinin iki adet sağ dönüşlü 5 kanatlı pervanelerinden, sancak tarafta olanın üzerinde yapılmıştır. Çalışmada, şaft açısının, pervane verimi, kavite ve yayılan gürültü karakteristiklerine etkisi için uygulanan testlere ve elde edilen sonuçlara ilişkin önemli bulguların detayları yer almaktadır. Bu çalışma, çeşitli kavite tiplerine ait gürültü şekillerinin daha iyi anlaşılmasına da yardımcı olmuştur.

Wittekind ve Schuster [26] çalışmalarında, tam ölçekli gemilerin bir kısmında yapılmış, düşük frekans spektrumu dar band bölgesi ile ilgili gözlemleri açıklamışlardır. Basit bir akustik gemi modeli gösterilmiş ve ayrıca kavite nedeniyle oluşan gürültünün fizikini araştırmak için prosedürler geliştirilmiş, deniz ortamında, arka planda meydana gelen gürültü olayının muhtemel etkileri tahmin edilmeye çalışılmıştır.

Kowalczyk ve Hoffmann [27] çalışmalarında, farklı yükleme koşullarında, pervanelerin hidroakustik karakteristiklerini, kavite ve kavitesiz durumlar da dahil edilerek araştırmışlardır. Kavite tüneli kullanılarak model boyutunda gerçekleştirilen araştırmalar, standart bir pervane ele alınarak yapılmıştır. Hidroakustik bilgileri, deniz tabiatında en az etkiyle, sessiz bir tahrik sistemi dizayn edilmesine olanak sağlamaktadır.

Özden vd. [28] çalışmalarında, gemiler tarafından oluşan sualtı gürültüsünün temel nedeninin pervane olduğu ve sualtı gürültü karakteristiklerini tahmin ederek kontrol altına almanın önemli olması nedeniyle temel olarak yayılan gürültünün sayısal olarak hesaplanmasına çalışmışlardır. Bu maksatla INSEAN (Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale Italian-Ship Model Basin) E1619 denizaltı pervanesinin açık suda ve derin batma koşulları nedeniyle kavitesiz durumlardaki pervane gürültüsü sayısal olarak araştırılmıştır. Pervane etrafındaki akış, RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) kullanılarak, CFD (Computational Fluid Dynamics) yazılımı ile çözülmüştür.

Szantyr [29] çalışmasında, gemi hidrodinamiğinde, bu çalışmadan önceki dört yıl içerisinde olan güncel hesaplama metodlarını tekrar gözden geçirmiştir. Uluslararası araştırmacılar topluluğu, dikkat edilmesi gereken önemli sorunlara işaret etmektedir.

Önemli uluslararası toplantılarda sunulan çalışmaları da temel alarak, hesaplamalı akışkanlar mekaniği metotlarından kaldırıcı yüzey, sınır eleman metodu, RANS ve Large Eddy metotlarını ele almıştır. Bu dört metodun uygulaması olarak, pervane geometrisini ve dizayn prosedürlerini belirleyebilmek için örneklemeler yapmıştır. Girdap izleri oluşturan pervanenin belirlenmesindeki önemli sorunları ve farklı kavitasyon formlarının tahminini ve onların hidrodinamik sonuçlarını ele almıştır. Ayrıca, nozul sevk sistemi ve su jetleri gibi klasik olmayan sevk sistemleri üzerine de bilgiler vermiştir.

KAVİTASYON

Kavitasyon, akışın meydana geldiği mekanizma içerisinde (pompa, türbin, pervane, yatak, kalp, diz kapağı vb.) mevcut sıvıda oluşan basınç ve hız dalgalanmalarının sebep olduğu bir akışkanlar mekaniği olgusudur. Kavitasyon eylemine sebep olan temel fiziksel işlem, genelde çok iyi bilinen bir çaydanlık suyunun dağın en tepe noktasına alındığında, daha düşük sıcaklıkta kaynamasının bir uzantısı olarak düşünülebilir. Kavitasyon oluşumu, aynen pervaneyi çevreleyen deniz suyunda olduğu gibi, çevre sıcaklığı sabit iken basıncın düşük seviyelere gelmesi ile mümkün olur. Bernoulli prensibine göre, pervane etrafında, akış hızının arttığı bölgelerde basınç düşmesi meydana gelecek ve basınçtaki bu azalma suyun kaynama noktasının ortam sıcaklığına kadar düşmesine neden olacaktır. Bunun sonucunda, içinde su buharı ve erimiş gazlar bulunan, hava kabarcıkları içeren bir tür soğuk kaynama meydana gelir. Bu olay “kavitasyon” olarak tanımlanır [30].

Çizelge 3.1’de tatlı suya ait basınca göre kaynama noktalarının değişimleri gösterilmiştir. Buradan görüldüğü üzere, basıncın düşmesi ile birlikte kaynama noktalarında düşüşler gerçekleşmektedir. Kaynama sıcaklıklarının düşmesi neticesinde, bu bölgelerde kavitasyon meydana gelmektedir.

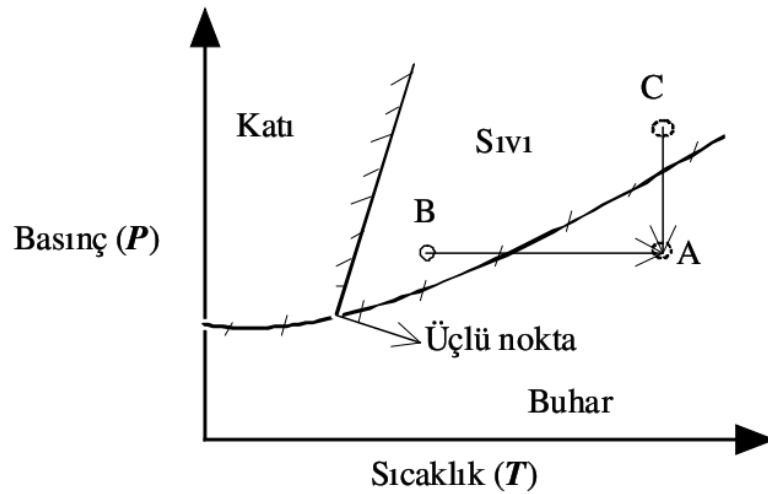
Çizelge 3. 1 Tatlı suya ait basınca göre kaynama sıcaklığı değerleri [1]

Basınç (KPa)	0.689	6.894	13.79	27.58	55.15	101.3	110.3
Kaynama Sıcaklığı (°C)	1.6	38.72	52.58	67.22	83.83	100	102.4

Kavitasyon oluşumlarının ortak karakteristikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Kavitasyon, sıvı akışkanlara özgü bir olaydır. Katılarda ve gazlarda ortaya çıkmaz.
2. Kavitasyon, basınç düşüşüne bağlı olarak oluştuğundan, basınç düşüşünün kontrolü ile önlenabilir.
3. Kavitasyon dinamik bir olaydır.
4. Kavitasyon oluşumunun meydana gelebilmesi için akışkanın bir katı cisim yüzeyi ile temas etmesi veya akışkanın hareketli olması gerekmez.

Herhangi bir sıvı için faz diyagramı Şekil 3.1’de verilmiştir. B noktasındaki bir sıvıda sıcaklık artırılarak, C noktasındaki bir sıvıda da basınç azaltılarak aynı A noktasına gelinebilir. Yani, bir sıvının basıncı düşürülerek veya sıcaklığı artırılarak buhar fazına geçmesi sağlanabilir. C’den A’ya geçişte “kavitasyon”, B’den A’ya geçişte de “kaynama” olayı meydana gelir.

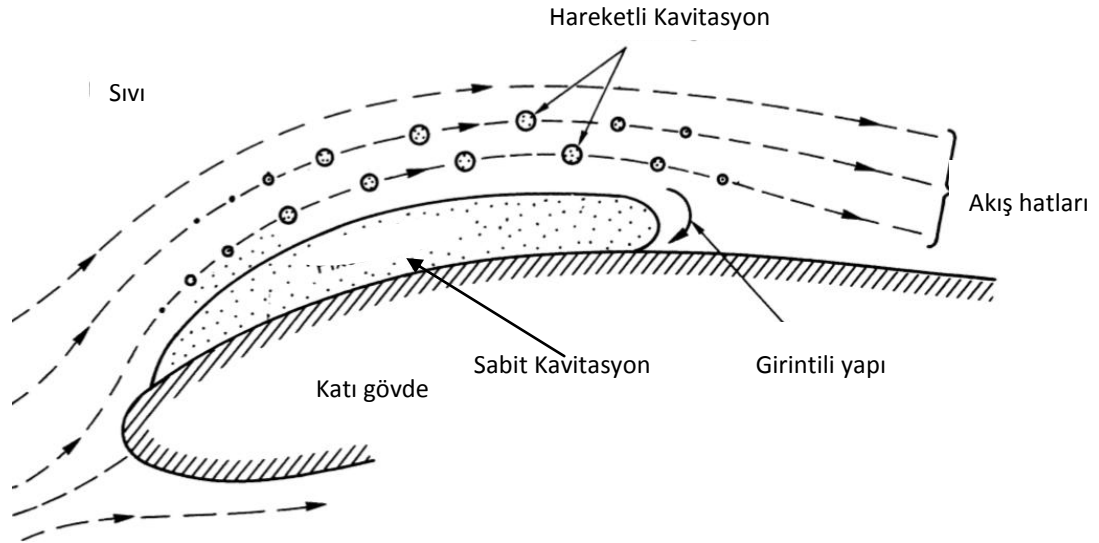


Şekil 3. 1 Akışkan faz diyagramı

3.1 Kavitasyon Çeşitleri

Kavitasyonlu akışlar, çok fazlı akış bölgeleri olarak tanımlanırlar. Bu iki fazın en önemlileri, buhar ve sıvı fazlardır. Aslında her fazın içeriğinde, başlangıç anında kabarcık patlaması ile özel etkilere sahip hava gibi bir miktar gaz mevcuttur. Knapp vd. [31], kavitasyonu sabit, hareketli ve titreşimli formlar olarak sınıflandırmışlardır. Bunların en önemlileri, sabit ve hareketli olan kavitasyonlardır.

Sabit kavitasyon; kavitasyon formu su altındaki bir nesne üzerinde katı gövdeye yapışık durumda bir akış veya nesne üzerinde sabit bağlantılı bir örtü şeklindedir. Bu kavitasyon türü genellikle düzgün camı bir görünüme sahiptir. Hareketli kavitasyonlar, gövdeye temas eden sıvının akışı ile birlikte hareket ederler. Hem sabit kavitasyon yüzeylerinden ayrılarak, oradan akış hattına katılan kavitasyonlar, hem de sıvı içerisindeki kabarcıklardan oluşabilmektedir. Şekil 3.2’de sabit ve hareketli kavitasyona ait farklılıklar gösterilmektedir[1].



Şekil 3. 2 Sabit ve hareketli kavitasyonlar [1]

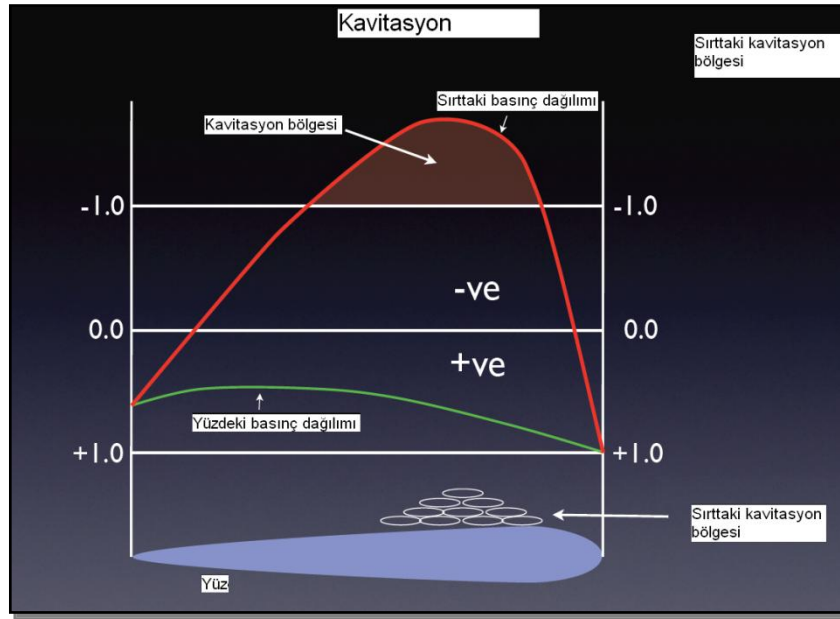
Gemi pervanelerinde görülen kavitasyon türleri iki çeşittir:

1. Pervane kanadı üzerinde oluştuğu konuma göre kavitasyon çeşitleri
2. Fiziksel görünüşlerine göre kavitasyon çeşitleri

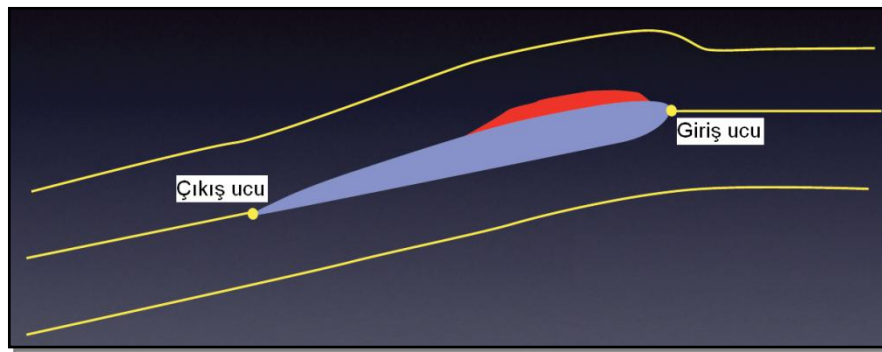
3.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştığı Konuma Göre Kaviteasyon Çeşitleri

3.1.1.1 Sırt Kaviteasyonu

Pervane kanat kesitlerinin pozitif hücum açılarında çalışması durumunda kanat kesitlerinin giriş ucu civarında, emme kısmında ve küçük hatvelerde oluşan kaviteasyon türüdür (Şekil 3. 3 ve Şekil 3. 4).

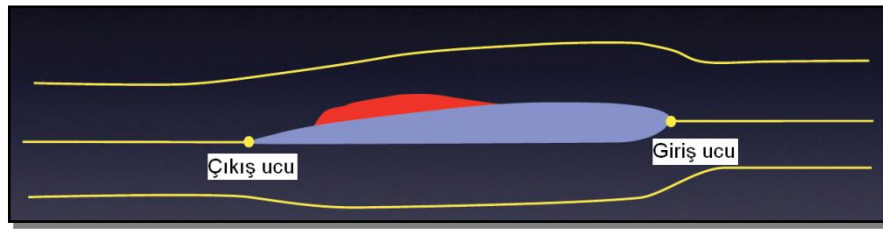


Şekil 3. 3 Sırttaki kaviteasyon bölgesi [32]



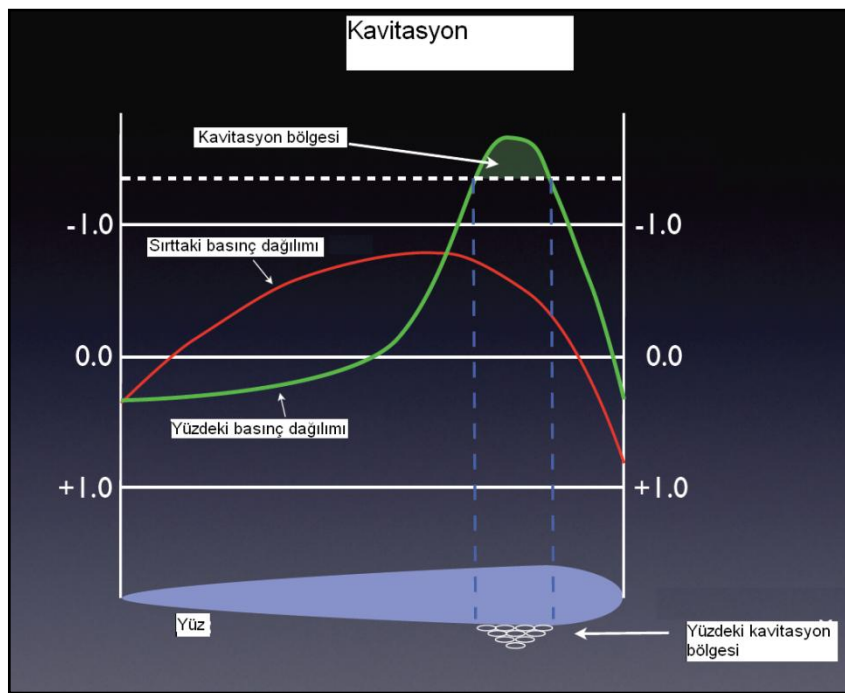
Şekil 3. 4 Giriş ucu civarında oluşan sırt kaviteasyonu [32]

Pervane kanat kesitlerinin sıfır dereceye yakın hücum açılarında çalışması durumunda ise; kesitin çıkış ucu civarında, emme kısmında maksimum kesit kalınlığının arkasında da bu tür kaviteasyon meydana gelebilir (Şekil 3. 5).

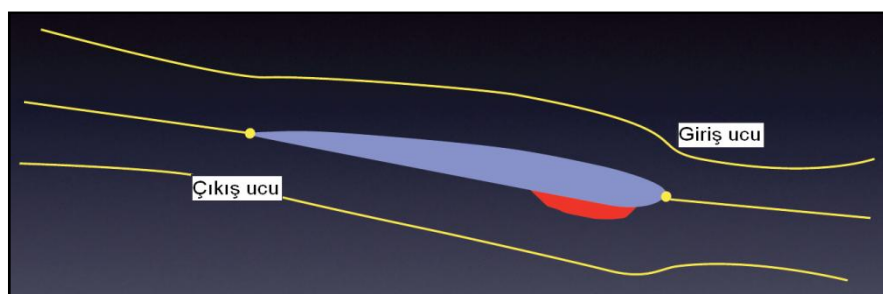


3.1.1.2 Yüz Kavitasyonu

Pervanelerin kanat kesitlerinin negatif hücum açılarında çalışması durumunda kanat kesitlerinin giriş ucu civarında basınç kısmında oluşan kavitasyon türüdür (Şekil 3. 6 ve Şekil 3. 7).



Şekil 3. 6 Yüzdeki kavitasyon bölgesi [32]



Şekil 3. 7 Yüz kavitasyonu [32]

3.1.2 Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavitasyon Çeşitleri

Kavitasyonun fiziksel görünüşünün ana kontrol parametresi basınç büyüklüğüdür. Buna göre, pervane literatüründe, fiziksel görünüşlerine göre yedi adet kavitasyon çeşidi tanımlanmıştır.

3.1.2.1 Kabarcık (Bubble) Kavitasyonu

Kabarcık kavitasyonu, kanat yapısının orta kısımlarında meydana gelmekte ve yüksek emme basınçlarına neden olmaktadır (Şekil 3.8). Sehim hattı ve kesit kalınlığı, kabarcık oluşumunda önemli bir rol oynar. Bu tip kavitasyon, düşük hücum açısına sahip ince kesitlerde görülmektedir. Örneğin, CPP pervanelerinin kanat köküne yakın kesitlerde bu tip kavitasyon ile karşılaşmaktadır [32].



Şekil 3. 8 Kabarcık kavitasyonu [32][1]

Pervanelerin sehimli ve kalın kısımlarının birleşimindeki basınç yayılımları, pervanenin kabarcık kavitasyonuna hassas olduğu yerlerdir. Kabarcık kavitasyonu, normal şartlarda, öncelikli olarak, kanat merkez hattı bölgesinin ortasında meydana gelmesine rağmen, bölünmemiş akışlar içerisinde de oluşum gösterme eğiliminde olan bir kavitasyon türüdür. Bu tip kavitasyon adından da anlaşılacağı üzere, bağımsız kabarcık büyümeleri olarak görünmekte olup, zaman zaman çok büyük yapıdadırlar ve kanat yüzeyi üzerinde hızlıca birleşirler[1].

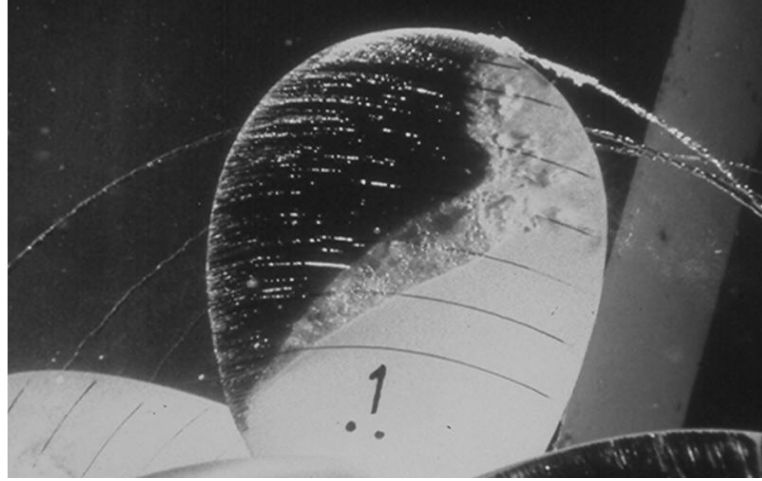
3.1.2.2 Tabaka (Sheet) Kavitasyonu

Büyük hücum açılarında çalışan bir pervane kanat kesitinde basınç dağılımı, şiddetli ve ters bir basınç etkisine sahip olduğunda, akımın kesitten ayrılması sonucu, kesitin emme tarafında basınç dağılımı değişir ve maksimum emme meydana gelir. Burada, minimum basınç, buhar basıncından daha düşük olduğu için tabaka kavitasyonu meydana gelir [5]. Düşük kavitasyon sayılarında, hidrofoilin giriş ucuna yakın bölgelerde, basıncın yüksek değerlere ulaşması sonucunda oluşan tabaka kavitasyonu, “kısmi kavitasyon” olarak anılır(Şekil 3. 9). Kavitasyon giriş ucundan sonra basınç tarafına doğru ilerleyip kanadın yüz tarafına geçer ise bu tabaka kavitasyonu “süper kavitasyon” olarak anılır [32].



Şekil 3. 9 Tabaka kavitasyonu [32]

Tabaka kavitasyonunun 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. 10 Tabaka ve kanat ucu kavitasyonu [1]

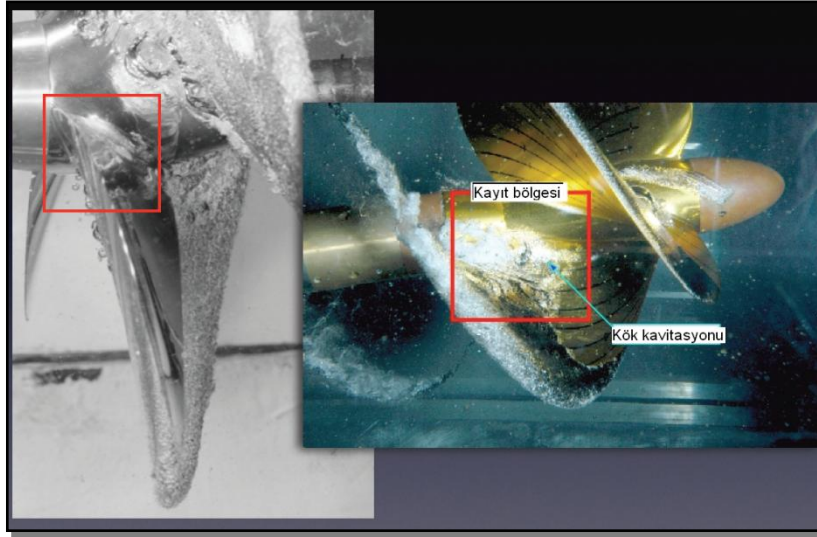
Şekil 3.10, model pervane üzerinde gözlemlenen tabaka ve kanat ucu kavitasyonunu göstermektedir. Tabaka kavitasyonu, genellikle kararlı bir yapıya sahip bir kavitasyon türüdür. Ancak az da olsa rastlanan kararsızlık durumlarının oranı arttıkça, kanat erozyonu ve istenmeyen basınç dalgalanmalarının oluşumuna sebep olacağından, bu tür durumların dizayn öncesi mutlaka çözüme kavuşturulması gerekmektedir [1].

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 teorisinde, 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.

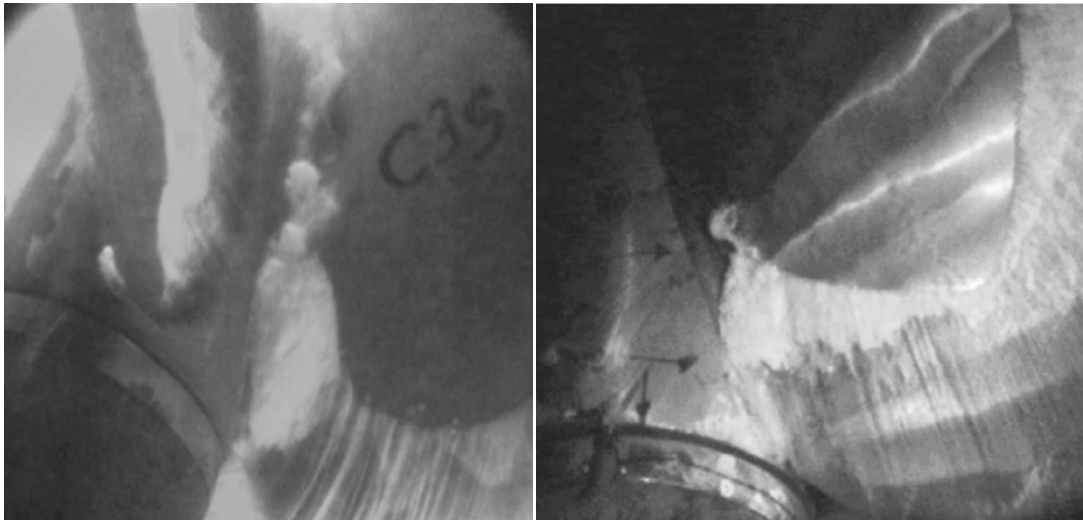
3.1.2.3 Kök (Root) Kavitasyonu

Pervane kanadının kök kısmında meydana gelir ve kama şekline benzemektedir. Kök bölgesinde, kanat kesitine ait maksimum kalınlık noktası civarında ve sırt kısmında oluşabilir (Şekil 3. 11).



Şekil 3. 11 Kök kavitasyonu [32]

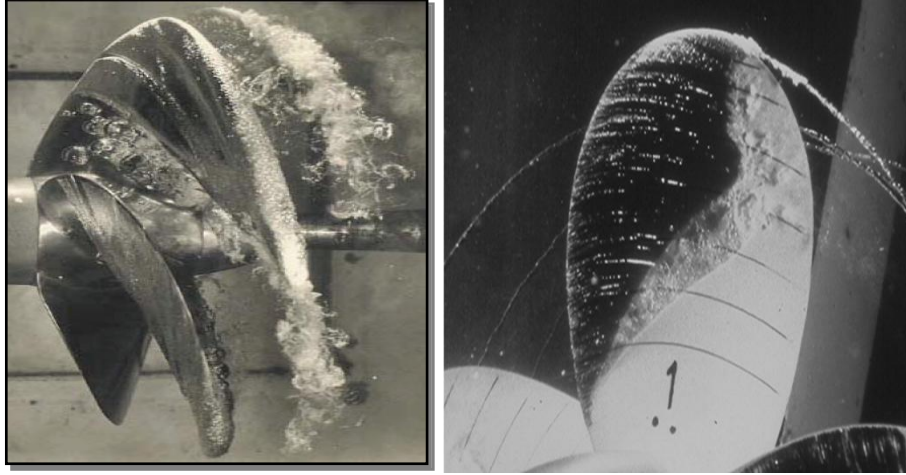
Şekil 3.12’de pervanenin tam yol çalışmasındaki durumu ile altındaki durumu gösterilmektedir. Burada, pervanenin sırt kısmının büyük bir bölümünde görülen fakat zararsız olan tabaka kavitasyonu oluşmakta ve kanat merkez hattının önemli bir bölümüne yayılmaktadır. Bu tabaka kavitasyon yapısı, kanadın kök bölgelerinde yerleşik bir girdap yapısı ile birlikte daha çok bulutumsu, kalın bir yapıya dönüşmektedir. Model ve tam ölçekli çalışmalar, fotoğrafın orta kısımlarında görüldüğü gibi, çember şeklinde yapılar görülmeye başladığı anda yüksek bir erozyon kavitasyonu olacağına işaret etmektedir [1].



Şekil 3. 12 Tam yol ve altındaki durumda kök kavitasyonu [1]

3.1.2.4 Bulut (Cloud) Kavitasyonu

Bulut kavitasyonuna, daha çok tabaka kavitasyonunun ilerlemiş safhalarında rastlanmaktadır (Şekil 3. 13). Bu tip kavitasyon türü, çok küçük kabarcıkların, sis veya bulut şeklinde gözükmesi ile ortaya çıkar ve her zaman ciddiye alınması gereken bir kavitasyondur [1].



Şekil 3. 13 Bulut kavitasyonu [32][1]

3.1.2.5 Pervane-Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV)

Pervane-tekne girdap kavitasyonu ilk olarak Huse (1970) tarafından ortaya atılmıştır. Bu kavitasyon tipi, pervane ucu ve tekne karinası arasında meydana gelen şimşek karakterinde bir girdap kavitasyonudur (Şekil 3. 14). Düz yüzeylere sahip cisimler üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, bu tip kavitasyon türünün kanat ucu ile tekne yüzeyi arasındaki açıklığın düşük olması halinde sık olarak karşılaşıldığını göstermiştir. Aynı zamanda ilerleme katsayısının da, bu tip kavitasyonun oluşumu esnasında büyük etkisinin olduğu gözlenmiştir. Düşük ilerleme katsayılarında, daha yüksek pervane-tekne kavitasyonu meydana gelmiştir. Yüksek pervane devirlerinde, pervane üzerinde tekne yüzeyinin varlığı nedeniyle suyun azalması sonucunda, pervane kanat yüz tarafının üst kısımda kalan açıklık ile tekne arasında meydana gelir. Bu su azalmasının önüne geçilebilmesi için pervane kış taraftan su çekmeye çalışır ve teknedeki pervane kanadına doğru durgun bir akış hattı meydana gelmesine sebep olur. Girdabın, tekne karinasına yakın kısımda türbülans ve akış bozuklukları nedeniyle oluştuğu

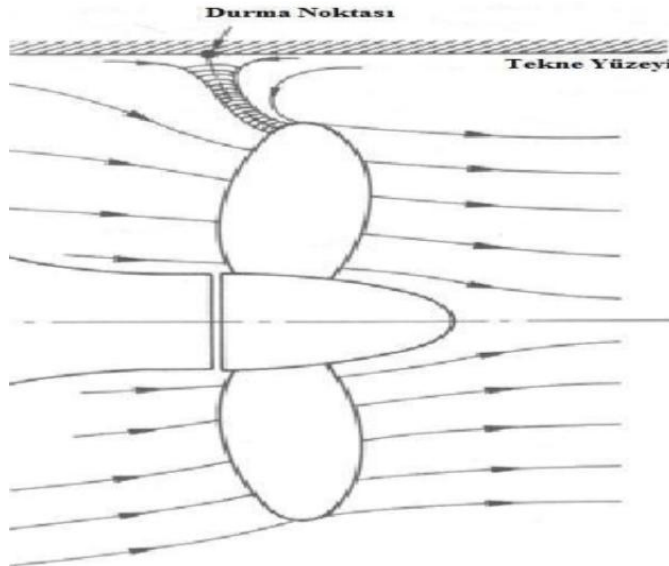
değerlendirilmektedir. Genellikle dolgun kılıklı pervanelerde bu kavitasyon türeü meydana gelebilir [32].



Şekil 3. 14 PHV kavitasyonu [1]

PHV kavitasyonunun oluşmasına öncülük eden faktörler [1]:

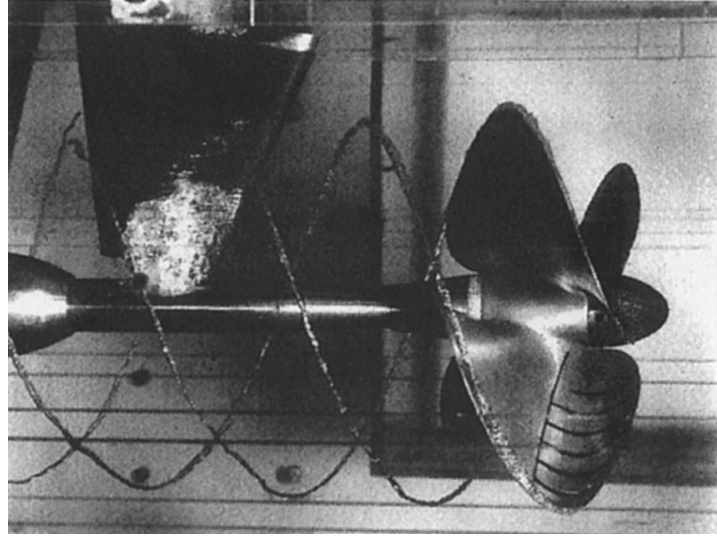
1. Düşük pervane ilerleme katsayısı
2. Tekne ve pervane arasındaki açıklığın düşük olması
3. Pervanenin üzerinde düz yüzeylerin bulunması



Şekil 3. 15 Pervane tekne girdap kavitasyonu [1]

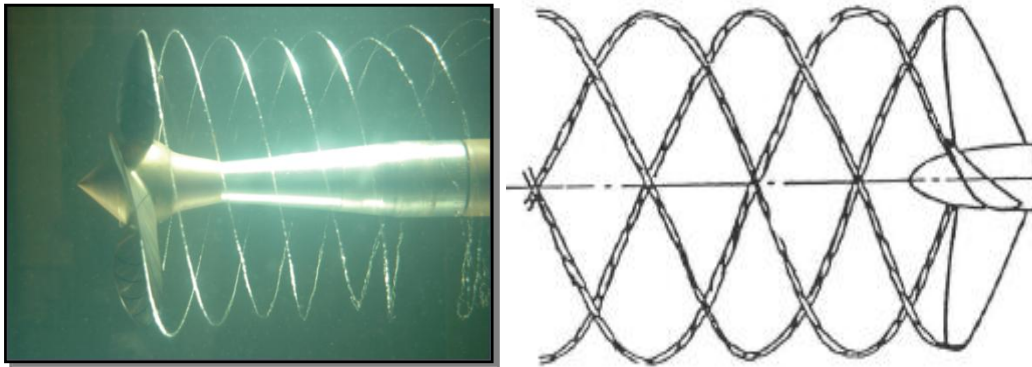
3.1.2.6 Uç (Tip) Girdap (Vortex) Kavitasyonu

Pervane kanatlarının basınç kısmındaki yüksek ve emme tarafındaki düşük basınç, akımın kanat ucundan ayrılmasına neden olmaktadır. Böylece her pervane kanadının ucunda ve pervane göbeğinde girdaplar meydana gelmektedir. Girdap merkezinde su zerreciklerinin dönme hızı çok yüksektir ve dolayısıyla buralardaki basınç suyun buharlaşma basıncının altına düşmekte ve girdap kavitasyonu oluşmaktadır [30]. Model testlerinde görülen uç girdap kavitasyonu Şekil 3.16’da gösterilmiştir.



Şekil 3. 16 Uç girdap kavitasyonu [1]

Uç girdap kavitasyonu (Şekil 3. 17), ilk olarak pervane kanat uçlarının belli bir mesafe uzağında gözlemlenir. Bu durumda, uç girdaba “bağlı olmayan” girdap adı verilir. Fakat yüksek kanat yüklemeleri veya kavitasyon sayısının düşmesi ile birlikte girdap daha fazla şiddetlenir ve kanat uçlarına doğru yaklaşarak “bağlı” hale gelir. Bu kavitasyon türü, genellikle ilk meydana gelen kavitasyon türüdür [1].

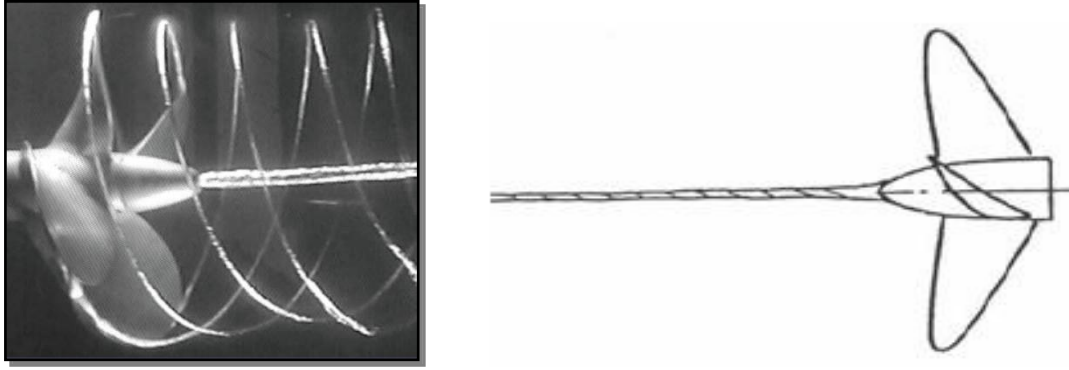


Şekil 3. 17 Bağlı olmayan uç girdap kavitasyonu [32]

Carlton [1], model testlerinde 8500 TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) 'luk bir konteynere ait pervane kanatlarında meydana gelen uç girdap kavitasyonunun baroskop görüntülerini almıştır. Geminin sabit hızı ve sabit rotasında yapılan bu deney yardımıyla, 0.28 saniyelik bir zaman diliminde 8 farklı baroskop görüntüsü ile uç girdap kavitasyonunun oluşumu izlenmiştir.

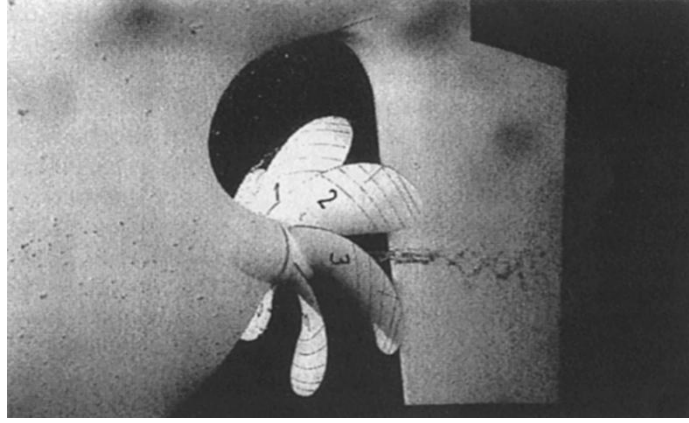
3.1.2.7 Göbek (Hub) Girdap (Vortex) Kavitasyonu

Göbek girdap kavitasyonu, pervane kanadının kök kısmından göbeğe doğru ilerleyen ve akışı bozan kavitasyon çekirdekleri (nuclei) nedeni ile oluşur (Şekil 3.18). Bu kavitasyon türü, pervane arkasındaki dümene de zarar verebilir. Pervane göbek finleri, göbek kavitasyonu kaynaklı problemlerden kaçınmak için kullanılabilir[30].



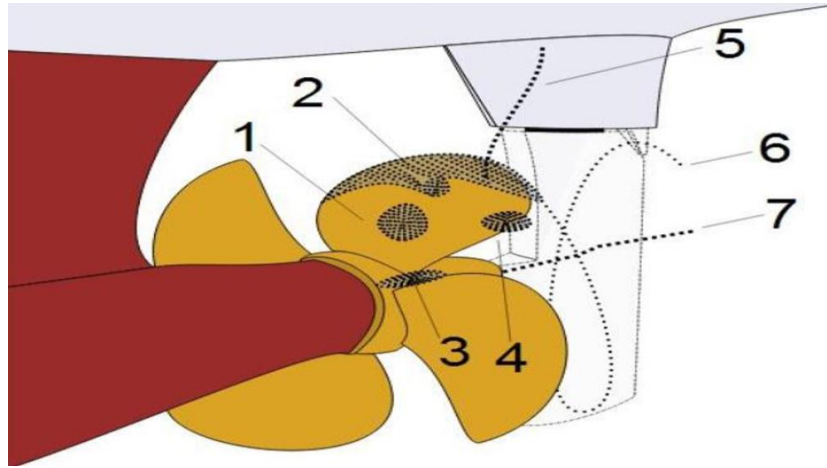
Şekil 3. 18 Göbek girdap kavitasyonu [32]

Göbek girdap kavitasyonu her bir kanadın kök kısmından yayılan girdapların birleşerek bir forma girmesi ile meydana gelir. Her ne kadar bu girdaplar kendi başlarına bir kavitasyona benzemese de, göbek kısmının konikliğinin yakınsama etkisi ile kanat kök girdaplarının tümü, kavitasyon oluşturma ihtimalini arttırmaktadır (Şekil 3. 19). Bu olay meydana geldiğinde, oluşan kavitasyon normalde çok dengelidir ve gözlemci her pervane kavitasyon hatlarını bir hortum gibi algılar [1].



Şekil 3. 19 Model test üzerindeki göbek girdap kavitasyonu [1]

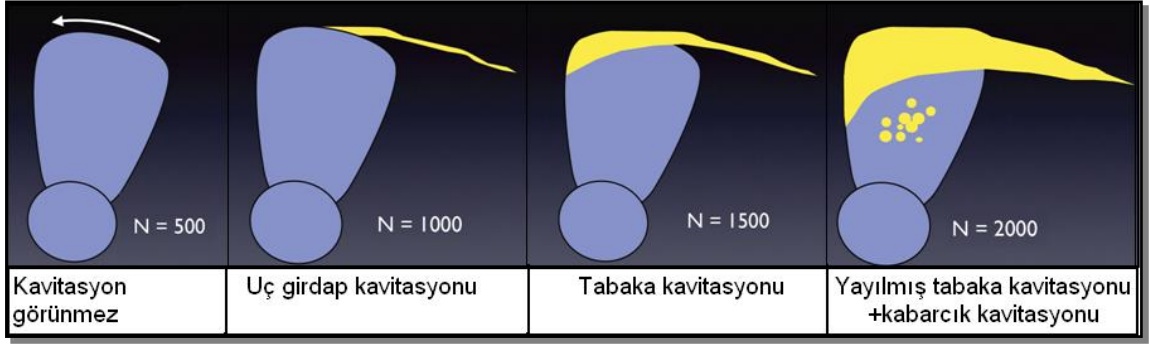
Bölüm 3.1.2.1-3.1.2.7 arasında anlatılan fiziksel görünüşlerine göre tüm bu kavitasyon çeşitleri, bir pervane üzerinde Şekil 3. 20’de başlıklarda anılan sıra numaraları ile şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 20 Kavitasyonun oluştuğu yerler ve türleri [33]

Kavitasyonun temel çeşitlerine ek olarak, zaman zaman model testlerinde görülen “şimşek (streak)” adı verilen bir kavitasyon çeşidi daha bulunmaktadır. Bu tip kavitasyon, adından da anlaşılacağı üzere, kanatlar arasında merkezi olarak, kanadın giriş ucundan ince şimşek şeklinde bağlanarak şekillenir [1].

Şekil 3. 21’de pervane devir sayısı arttırılması ile bir pervane kanadında bazı kavitasyon türlerinin oluşumu şematik olarak gösterilmiştir:



Şekil 3. 21 Artan devir sayısı ile bazı kavitasyon türlerinin oluşumu [32]

3.2 Kavitasyon Etkileri

Kavitasyon; performans kaybına, gürültüye, titreşime ve erozyona sebep olur.

3.2.1 Performans Kaybı (İtme Kaybı)

Kavitasyon olayının, pervaneler üzerinde performans kaybına neden oluşunun en güzel örneği daha önceki bölümde de belirtildiği gibi, 1894 yılında İngiliz destroyeri “Daring”de görülmüştür. Gemi hızı 27 knot olarak hedeflenmiş iken ancak 24 knot hıza ulaşılmıştır.

Gemi pervaneleri üzerinde oluşan kavitasyonun, pervanenin farklı boyutsuz yarıçaplarına ait kesitlerin yaklaşık %20-25’lik kısmını kapladığında, pervane itmesi ve torkunu azalttığı yapılan deneysel çalışmalardan bilinmektedir. 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 devir sayısı yeterince düşük olabilmektedir. İtme üzerinde kavitasyonun ölçülebilir etkisi, yüksek yüklü pervanelerde ve özellikle yüksek hızlarda çalışan pervanelerde fark edilebilmektedir. Tam güçteki savaş gemilerinde veya çekme durumundaki romorkörlerde bu olay ile sık sık karşılaşmaktadır. Yine hızlı konteyner ve hızlı ferilere ait pervanelerin performansına da kavitasyon etki edebilmektedir [1].

3.2.2 Gürültü

Kavitasyon kabarcığı etrafındaki dış basınç artmaya başladığında kısa bir süre sonra iç ve dış bölgelerdeki basınç değeri 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.

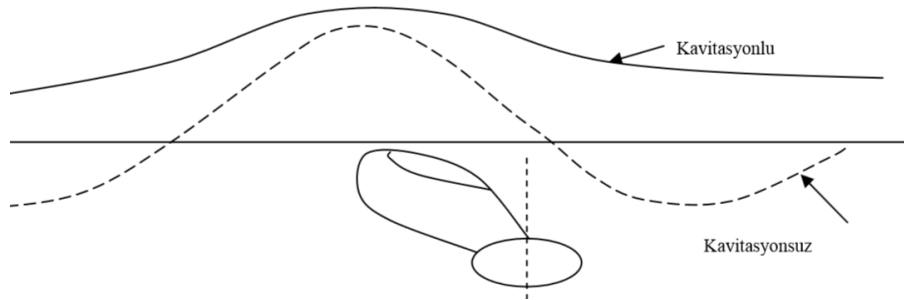
Gemi sistemi tarafından üretilen gürültülerin önemli bir bölümü su altında oluşan pervane kaynaklı gürültüdür. Bir gemi pervanesinin su içerisinde basınç dalgaları üretebilmesi ve bir gürültü artışına neden olması için başlıca dört temel mekanizma vardır. Bunlar: pervane kanat kesitleri tarafından su kütlelerinin 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 [5].

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.

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. 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. Kavitasyonun meydana getirdiği basınç genlikleri, kavitasyonsuz bir pervanede meydana gelen basınç genliklerinden 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 oynarlar [5].



Şekil 3. 22 Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz durumda oluşan basınç dağılımı

Kavitasyon etkisi ile meydana gelen titreşim olayını azaltmak için; pervane kanadının yüzey alanı özellikle kanat uçlarında arttırılabilir, pervane kanatlarının eğriliği arttırılabilir veya hatve uçlara doğru azaltılabilir. Ancak titreşimlerden kaçınmanın en etkili yolu, iz alanını mümkün olduğunca düzgün yapmaktır.

3.2.4 Erozyon

Bir pervane kanadındaki erozyon hasarı, daha çok yüzeyin bozulması veya pürüzlenmesi ile başlar (Şekil 3. 23). Bu başlangıcı, kanat yüzeyinin plastik şekil değiştirmesi izler. Bu nedenle söz konusu oluşum genellikle pervane yüzeyinde çiçek bozuğu (orange peeling) olarak bilinir.



Şekil 3. 23 Bir pervanede kavitasyonun neden olduğu erozyon örneği [32]

Pervane yüzeyinin şeklinin bozulmasına neden olan etkiler; mikrojet ve kavitasyon çekirdeklerinin patlayarak basınç dalgaları oluşturması ve yüzey üzerine rastgele çarpmasıdır. Pervane yüzey deformasyonu büyük-ölçekli yorulmadan kaynaklanan göçme başlayana kadar devam eder ve bunun sonucunda kanat malzemesi aşınmaya başlar (Şekil 3.24). Erozyonun gerçekleşme hızı değişkenlik gösterebilir. Bu hız, birkaç saatten aylar veya yıllar mertebesine kadar değişebilir [1].

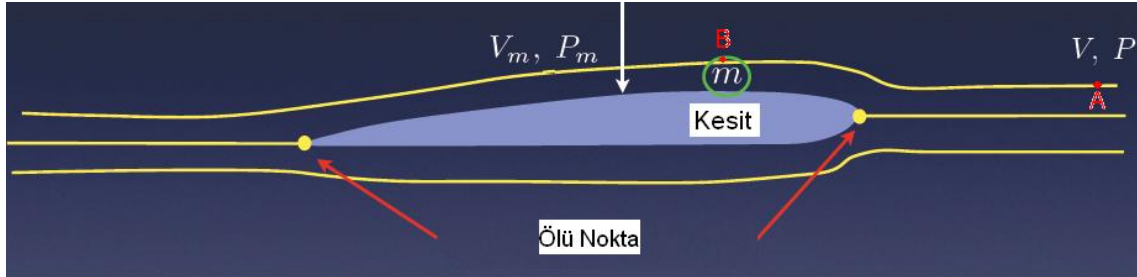


Şekil 3. 24 Erozyon nedeniyle aşınan kanat [30]

3.3 Kavitasyon Başlangıcı

Basınç azaldığında, kavitasyon oluşumunu hızlandıran zayıf noktalar olarak bilinen çekirdek (nuclei) yapıları, kritik bir boyuta ulaşır ve genişleyerek patlar [1]. Pervane kanadı etrafındaki bir noktada kavitasyon olayının başlayıp başlamadığı, o noktadaki

basınç ile sıvının buharlaşma basıncı arasındaki ilişki yardımı ile anlaşılmaktadır. Yani kavitasyonun başlaması için, akışkan içindeki bir noktanın basıncının, akışkanın buharlaşma basıncına eşit veya düşük olması yeterli olmaktadır [30]. Kavitasyon olayını anlayabilmek için Şekil 3. 25'te gösterilen bir kanat kesitini incelersek:



Şekil 3. 25 Düzenli akım içerisindeki iki boyutlu bir kanat kesiti [32]

İki boyutlu ve viskoz olmayan akımda, B kesit yüzeyine yakın bir nokta, A ise aynı akım hattı üzerinde ve kesitten etkilenmeyecek kadar uzaklıkta akımın düzenli olduğu bir nokta olarak seçilmiştir. A ve B noktalarının su yüzeyinden derinlikleri yaklaşık olarak aynıdır. A ve B noktaları arasında Bernoulli denklemi yazılmak suretiyle,

$$P_m + \frac{1}{2} \rho V_m^2 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (3.1)$$

↑

↑

Yerel

Çevre

eşitliği bulunur. Bu denklemde basınçlar sol tarafta, hızlar ise sağ tarafta toplanarak ve her iki taraf da akışkanın dinamik basıncına bölünerek $(\frac{1}{2} \rho V^2)$ elde edilen ifadeye boyutsuz basınç katsayısı denilir ve C_p ile gösterilir:

$$C_p = \frac{P_m - P}{\frac{1}{2} \rho V^2} = 1 - \left(\frac{V_m}{V} \right)^2 \quad (3.2)$$

P_m : B noktasındaki statik/mutlak basınç

P : A noktasındaki (akışkanın) statik/mutlak basınç

ρ : suyun yoğunluğu

V_m : B noktasındaki referans akım hızı

V : A noktasındaki referans akım hızı

P_v : suyun buharlaşma basıncı

Yukarıda ifade edildiği gibi, B noktasında kavitasyon olayı olmaması için, B noktasındaki basıncın suyun buharlaşma basıncından büyük olması gerekir. ($P_m > P_v$)

Bu eşitsizliğin her iki tarafı önce (-1) ile çarpılır ve her iki tarafa (P) eklenir ve daha sonra da her iki taraf akışkanın dinamik basıncı ($P + \frac{1}{2} \rho V^2$) ile bölünür ise aşağıdaki ifade elde edilir:

$$-C_p = \frac{P-P_m}{\frac{1}{2} \rho V^2} < \frac{P-P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} = \sigma \quad (3.3)$$

$$\sigma_v = \frac{P-P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

yerel $\longrightarrow P_m = P_v$ olduğu durumda;

$\sigma > -C_p$ kavitasyon gözlenmez

$\sigma \leq -C_p$ kavitasyon gözlenir

Kavitasyon başlangıcı; pervane kanat kesiti üzerinde sınır tabakasının büyümesi, pervanede görülen kavitasyon çeşitleri, pervane geometrisi ve iz gibi birçok özelliğe bağlıdır. Kavitasyon deneylerinde, oksijen veya toplam hava miktarından ziyade özellikle çekirdek içeriğinin oranı olarak serbest hava içeriği ölçülmelidir [1].

3.4 Kavitasyon Kontrol Yöntemleri

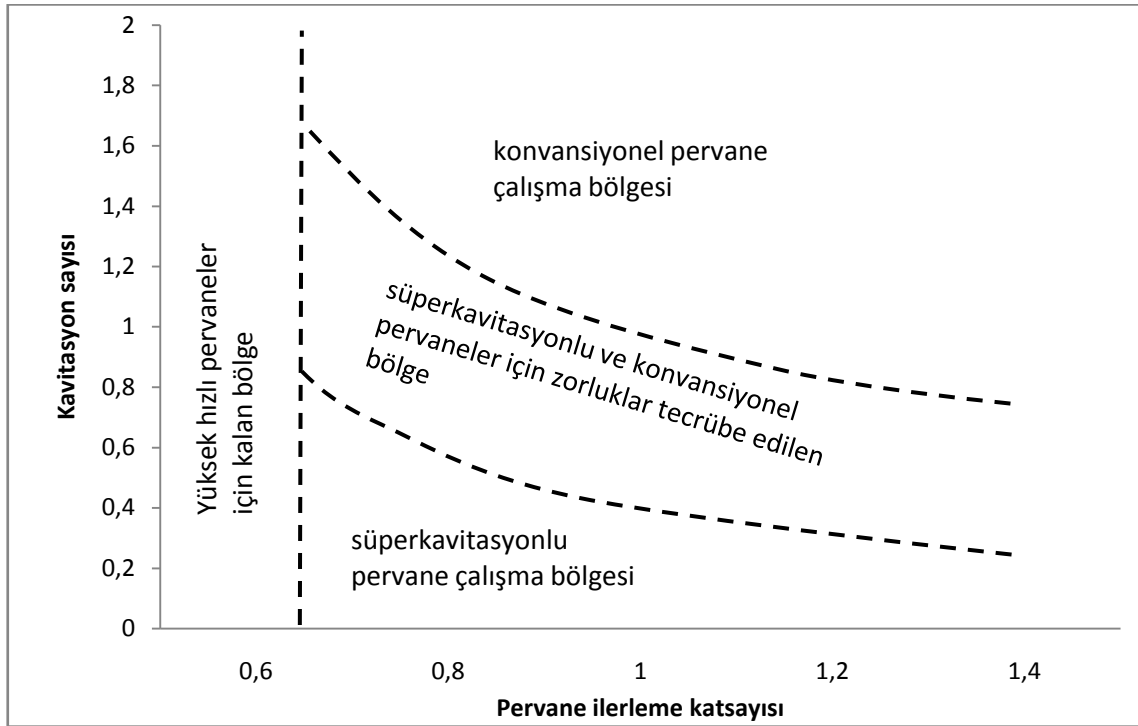
Pervane dizaynında kullanılan temel kavitasyon parametresi kavitasyon sayısıdır. Kavitasyon sayısının en temel hali;

$$kavitasyonsayısı = \frac{statikbas \ m\check{c}}{dinamikbas \ m\check{c}} \quad (3.4)$$

olarak tanımlanır. Pervane teknolojisinde yaygın olarak kullanılan bazı kavitasyon sayısı formülleri bulunmaktadır. Bu formüllerin kullanımlarına istenilen bilgiye göre ve elde mevcut bilgilere göre karar verilmektedir [1].

Pervanenin çalışması esnasında kavitasyonlu bölge, pervane dizaynı hakkında detaylara ve aynı zamanda pervane tipine çok büyük etki etmektedir. Pervane tipine karar verilmesinde en kullanışlı rehber, Şekil 3.26'da gösterilen Tachmindji ve Morgan [34] çalışmalarından alınan diyagramdır. Bu diyagram temel olarak, akış hızlarının etkileri,

pervane geometrisi, statik basınç ve bu değerlerden elde edilen değerler ile bağıntılı olup, ilerleme katsayısı ve kavitasyon sayısı olarak gruplandırılmışlardır [1].



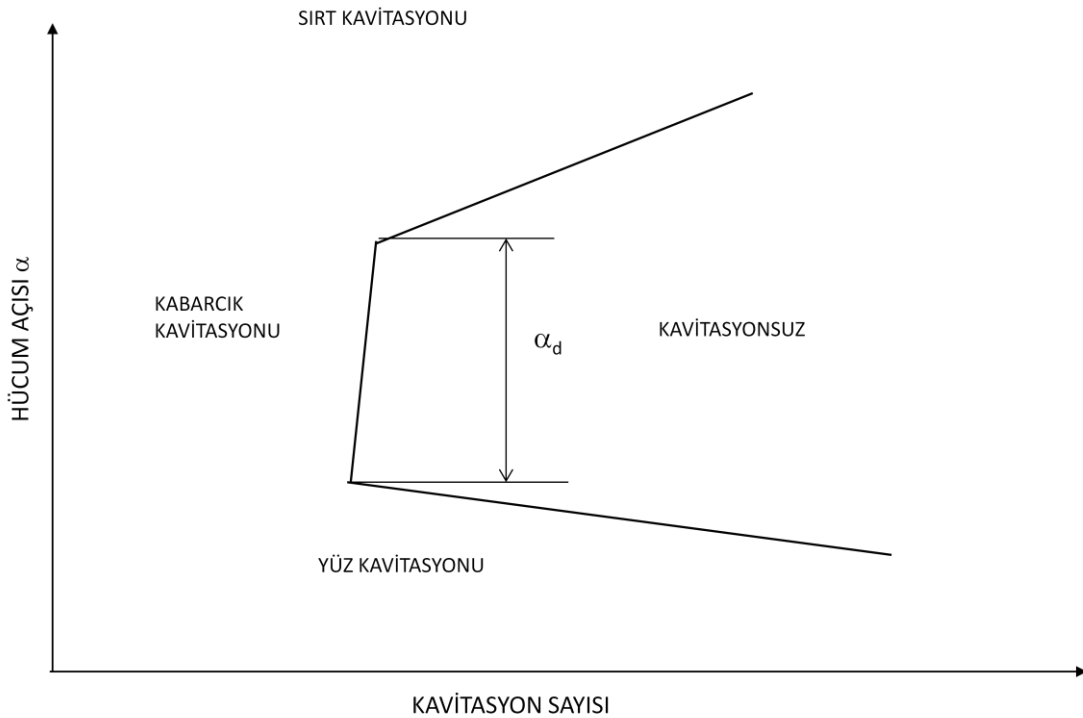
Şekil 3. 26 Pervanelerin çalışma bölgeleri [1]

Bu diyagram, konvansiyonel ve süperkavitasyonlu pervanelere en uygun bölgelerin belirlenmesinde kullanılır. Diyagramın ortasındaki bölge, iz alanındaki değişimlere ve shaft eğim açıları gibi yapısal değişkenlere bağlıdır. Ne konvansiyonel pervaneler ne de süperkavitasyonlu pervaneler, pervane dizayn problemlerine tam bir çözüm getiremezler. Bu nedenle su jeti sevk sistemi ve yüzey yarıcı pervaneler (Surface Piercing Propeller=SPP) gibi sistemlerin araştırılmasına ve pervane alternatiflerinin arttırılmasına ihtiyaç duyulmaktadır [1].

Tam ölçekte ve model testleri üzerinde yapılan çeşitli çalışmalarda, pervane yüzey alanının arttırılması, kanatların sırt ve yüz tarafında oluşan kavitasyonun sebep olduğu itme azalmasını ortadan kaldıracak şekilde doğrulanmıştır. Daha sonra kriter, itme gücü katsayısının sınırlandırılması şeklinde, istenilen kanat yüzey alanına karşılık elde edilen itmeyi verecek kriterler şeklinde geliştirilmiştir. Bunlardan en iyi bilinen ikisi Burrill ve Keller'dir [1].

Crouch ve Burrill'in kavitasyon kontrolü yaklaşımları, pervane açınım alanının pervanenin kavitasyon yapmayacağı şekilde belirlenmesi, pervane kanat yüklenmesinin analizi yoluyla kavitasyon incelenmesi prensibine dayanmaktadır. Küçük boyutlu gemiler için kavitasyon kontrolü genelde bu yöntemlerle yapılmaktadır. Ancak, büyük gemiler, harp gemileri gibi özel gemiler ile özel şartlarda çalışması öngörülen gemiler ve gemi izine ait bilgisi mevcut gemiler için kavitasyon analizi, kanat kesitleri etrafındaki basınç dağılımı bulunarak detaylı bir şekilde yapılır.

Pervane kanat kesitlerinin dizaynında kesitin kavitasyon durumunu belirlemek için kavitasyon kova diyagramları (Şekil 3.27) kullanılır. Bu diyagramlar kesit kavitasyon sayısı karşılığında kesit hücum açısı alınarak çizilmişlerdir. Kesitin hangi bölgesinde hangi koşullar altında kavitasyonun başlayacağı bu diyagramlar yardımıyla analiz edilebilmektedir. Kavitasyon kova diyagramları ile ilgili olarak geniş çaplı bir sayısal yöntem, Seber [35]'in çalışmasında bulunabilir.



Şekil 3. 27 Kavitasyon kova diyagramı

Burrill yönteminde, ortalama kavitasyon sayısı şaft eksenine temel alınarak bulunan statik basınca göre, dinamik basınç ise $0.7R$ pervane kesiti esas alınarak hesaplanır. Bu yöntemde pervane kanatlarına gelen itme yüklemesi τ_c katsayısı ile ifade edilir.

Öncelikli olarak kavitasyon sayısı σ bulunur ve uniform akış için düzenlenmiş Burrill [36] diyagramından, bu kavitasyon sayısına denk gelen τ_c değeri okunur.

$$A_p = \frac{T}{\frac{1}{2}\tau_c \rho [V_A^2 + (0.7\pi n D)^2]} \quad (3.5)$$

T: İtme kuvveti

τ_c : İtme gücü katsayısı

ρ : Suyun yoğunluğu

A_p :Pervane kanadı izdüşüm alanı

V :A noktasındaki referans akım hızı

n :Pervane devir sayısı

D :Pervane çapı

izdüşüm alanı bulunduktan sonra, genişlemiş alanın bulunabilmesi için, Burrill'e ait sadece konvansiyonel pervanelerde kullanılan ve hatveye bağlı bir ampirik formül bulunmaktadır [1].

$$A_E \cong \frac{A_p}{(1.067 - 0.229 P/D)} \quad (3.6)$$

Bu bağıntı ile minimum pervane alanı bulunur ve mevcut pervane alanının yeterli olup olmadığı kontrol edilir.

Keller'in genişlemiş alan oranı ile bağlantılı olan ampirik formülü ile alternatif kanat alanı tahmini yapılabilmektedir [1].

$$\frac{A_E}{A_0} = \frac{(1.3 + 0.3Z)T}{(p_0 - p_v)D^2} + K \quad (3.7)$$

P_0 : Şaft merkez hattı statik basıncı

P_v : Buharlaştırma basıncı

T : İtme

Z : Kanat sayısı

D : Pervane çapı

Denkleimde yer alan K değeri pervane sayısı ve gemi tipine göre değişmektedir. k katsayısı ise 0 ile 0.20 arasında değişen bir sabit olup ayna kılıklı, hızlı gemiler için $k=0$, yüksek güce sahip tek pervaneli gemiler için ise $k=0.2$ değerleri kullanılır. Gemi tipi ve tecrübeye dayanılarak ara değerler kullanılır.

BÖLÜM 4

GÜRÜLTÜ

Ses, esnek bir ortamda, işitme duygusunu harekete geçirici nitelikte bir yayılım gösteriyorsa, mekanik bir rahatsızlık olarak tanımlanır (BSRA, 1982). Ses, iki sıvı arasında veya bir sıvı ile bir yüzey arasında etkileşim ve hareket olduğunda meydana gelmektedir. Hareket olduğunda meydana gelen bu istenmeyen ses yani gürültü, gemi sistemlerinde 2 ana kategoride gruplandırılabilir.

1. Tekne, personel ve ekipmanlarından kaynaklanan geminin kendi gürültüsü (self noise)
2. Gemi tarafından oluşan ve gemiden belirli bir uzaklıkta yayılan gürültü (radiated noise)

Gemi sistemleri tarafından meydana gelen gürültünün büyük bir bölümü su altı gürültüsüdür ve 3 temel su altı gürültü kaynağı bulunmaktadır.

- Makine kaynaklı gürültü,
- Akış gürültüsü,
- Pervane kaynaklı gürültü.

4.1 Makine Kaynaklı Gürültü

Gemideki gürültü seviyesi, her bir makine aksamından yayılan gürültü olarak düşünülebilir.

- Makine aksamına yakın yerlerde gürültü seviyesi, direk yayılan gürültü ile birlikte etkili olmaktadır.
- Makine aksamından belirli bir uzaklıkta oluşan gürültü seviyesi, boşluktaki yansıma zamanına bağlı olarak, hava ile taşınan gürültü ile etkili olmaktadır.
- Boşlukların yanındaki gürültü seviyesi, makine aksamından veya bu boşluklara yerleştirilmiş diğer cihazlardan yayılan yapısal taşınma gürültüsü ile etkili olmaktadır.

Cihaz ve ekipmanlardan kaynaklanan, yapısal ve hava yolu ile taşınan gürültü karakteristiğine ait bilgilere ihtiyaç duyulmasına rağmen, dizayn aşamasında uygun gürültü planı, boyutların azalmasına sebep olmaktadır. Temel olarak, gürültü azaltıcı olarak kullanılan tüm materyaller, çalışma esnasında artan gerilimlere karşı (kimyasal, ısı ve mekanik) dirençli olmalıdır.

Donatım faaliyetlerinde önceden edinilen tecrübeler, gürültü azaltıcı boyutların değerlendirilmesinde yardımcı olmaktadır. Gemi inşa eden tersane tarafından, makine ve ekipmanların üreticilerinden istenen; susturucuların değerlendirilmesi, esnek şok darbe sönümleyicilerin dizaynında dikkat edilmesi gereken noktalar vb. sessiz bir gemiyi oluşturacak tüm tedbirlerin alınması önemlidir.

Doğrudan hava yolu ile taşınan gürültü bilgileri, test cihazları ile elde edilebilir. Elde edilen bu bilgiler birtakım hesaplamalar ile gerçek duruma çevrilir. Genellikle bu yöntem, yapısal taşınma gürültüsünün yayılımı için yapılamaz. Çünkü seyir halinde sabitleme koşulları, test cihazı açısından çok daha farklı olmaktadır. Gemide makine gürültüsü olarak nitelendirebilecek cihaz ve ekipmanlar aşağıda belirtilmiştir:

- Ana tahrik dizelleri
 - ✓ Düşük devirli
 - ✓ Orta devirli
 - ✓ Yüksek devirli
- Yardımcı dizeller
- Yüksek devirli yardımcı dizeller

- Gaz türbini
- Fanlar
- Yağlama yağı tulumbaları
- Yakıt tulumbaları
- Tatlı su tulumbaları
- Hidrolik tulumbalar
- Elektrik motorları.

Bu makine gürültüsü olarak nitelendirilen ekipmanlar arasında yer alan fanlar ve tulumbalar, dar band gürültü spektrumu içerisine girerler.

IMO, makine kontrol odası ile birlikte makine dairelerinde maksimum 110 dB ses düzeyini tavsiye etmektedir. Orta ve yüksek devirli dizel makineler, bu seviyenin üzerinde gürültü seviyelerine sahiptir. Ayrıca tüm sert malzemeden imal edilmiş darbe sönümleyiciler, dizel makinelerin yapısal gürültülerinin gemiye yayılmasına sebep olurlar [37].

4.2 Akış Gürültüsü

Gemi, viskoz bir akışkan içerisinde belli bir hızda harekete eder. Gemiye, viskoziteden kaynaklanan yüzeye teğet sürtünme kuvvetleri ve gemi etrafındaki basınç dağılımının değişmesi sebebiyle oluşan yüzeye dik basınç kuvvetleri etki eder. Her iki kuvvetin gemi hareket yönünün tersine olan bileşenleri geminin direncini oluşturur [30].

Geminin akışkan içerisindeki hareketini sağlamak için gerekli olan enerji, ya ana makine-pervane sevk sisteminin temin ettiği itme kuvveti ile ya da dışarıdan uygulanan çekme veya itme kuvveti ile sağlanır [30].

Gemi bir cisim olarak düşünülecek olursa, hareket halinde iken, geminin veya akışkanın hızı ile birlikte etrafındaki akışın durumuna etki edecek olan Reynolds sayısı artar. Reynolds sayısının küçük olduğu durum daha düzenli olan bir akış olup, laminar akım olarak adlandırılmaktadır. Reynolds sayısının büyümesi ile birlikte akım hatları düzensizleşir ve birbirine karışır. Gemi etrafında sınır tabaka olarak adlandırılan bölge

içinde, akışkanın özelliğine, geminin veya akışkanın hızına, geminin akışkan içerisindeki şekline, boyuna, yüzey durumuna ve akışkan derinliğine bağlı olarak, laminar akım, laminar-türbülanslı karışık akım hali veya tamamen türbülanslı akım hali meydana gelir [30].

Karşılaşılan akımlar içerisinde laminar ve türbülanslı akım halleri olmasına rağmen türbülanslı akım hali daha doğal bir akış durumunu yansıtır. Türbülanslı akım durumunda ise gemi direnci daha fazla olur [30].

Pürüzlülük ve kirlenme, gemi baş bodoslama şekli, deniz dalga şekli, hava/rüzgar ve gemi takıntıları, gemi direncinin artmasına sebep olur. Gemi direncinin artması, hareket halinde iken sınır tabakada sıvı akışının türbülanslı hale gelmesine sebep olur [30].

Gemi etrafında direncin artmasına ve akışın düzgün bir akıştan karmaşık bir akış haline gelmesi, akış gürültüsünün meydana gelmesine neden olmaktadır. Bu nedenle gemi direnci, yapılan model deneylerinde belirlenmesi gereken bir faktördür [30].

4.3 Pervane Kaynaklı Gürültü

Pervane gürültüsü hem ticari hem de askeri gemiler için önemli bir husus olmakla birlikte, bu önemin nedenleri farklı kaynaklardan ve ihtiyaçlardan olabilmektedir. Oşinografi ve araştırma gemileri, askeri gemiler ile benzer gürültü kaynaklarına sahip olmasına rağmen pervane gürültüsü hususunda konunun dışında kalmaktadır. Çünkü bu tip gemilerin askeri gemiler gibi yüksek sürat ihtiyaçları yoktur. Ticari gemilerde uzun süreli yüksek gürültü seviyelerine maruz kalınması nedeniyle oluşan sağlık problemlerine verilen önemin artması ile Uluslararası Denizcilik Örgütü (IMO) tarafından, ticari gemilerin farklı bölmelerinde tavsiye edilen gürültü seviyelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Gürültü seviyeleri ile ilgili 1981 IMO kodu geminin farklı bölümlerinde olması istenen maksimum seviyeleri Çizelge 4.1' de göstermektedir [1].

Çizelge 4. 1 1981 IMO koduna göre gemilerde olması istenen maksimum gürültü seviyeleri

Mevki	Ses Seviyesi (dBA)
Makine Dairesi	110
Atölyeler	85
Makine Kontrol	75
Köprüüstü	65
Yemek Salonu	65
Dinlenme Salonları	65
Kamaralar ve revir	60

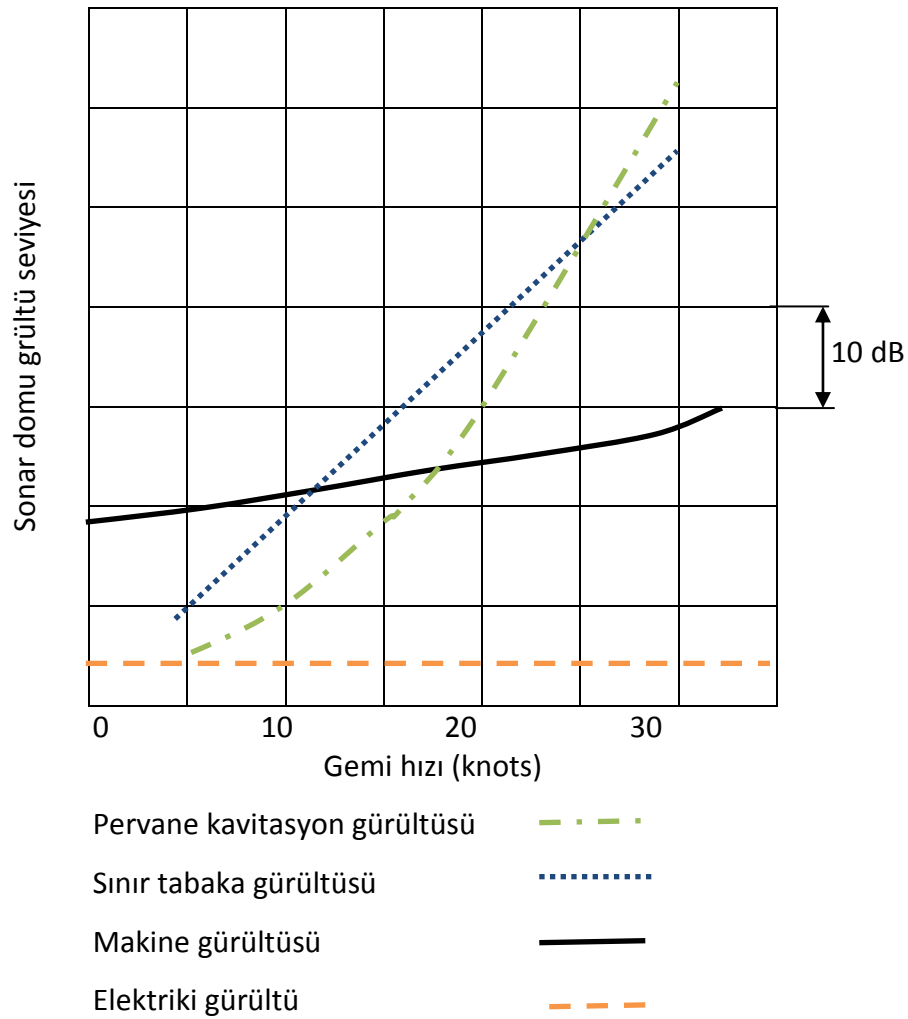
Pervane tarafından oluşturulan basınç dalgalanmaları ve bu nedenle meydana gelen gürültü artışının 4 temel unsuru bulunmaktadır. Bunlar;

1. Pervane kanatlarıyla suyun yer değişimi,
2. Pervane kanadının sırt ve yüz tarafları arasındaki basınç farkı,
3. Girdap ve kavitasyon kabarcığının ani olarak patlaması
4. Kavitasyon hacminin periyodik dalgalanmaları[3]

Bu mekanizmalar incelendiğinde ilk iki mekanizma, pervanenin kavitasyon göstermeyen durumu ile ilgili, son iki mekanizma ise pervanenin kavitasyon gösterdiği durumu ile ilgilidir.

Pervane gürültüsü, temel olarak iki şekilde meydana gelir. Kavitasyonlu ve kavitasyonsuz gürültü. Teknenin gürültü karakteristiğine göre, kavitasyon başlangıcından önce gürültünün artmasında, makine, tekne ve pervanenin yapısal özellikleri önemlidir. Kavitasyon başlangıcı üzerinde tekne ve makine kaynakları göz önünde tutulması gerekirken, pervane gürültüsü genellikle baskın bir faktör olarak göze çarpmaktadır. Şekil 4.1, bir savaş gemisinin sonar dom'unda görülen kendi gürültüsünün ayrıntılarını göstermektedir. Bu grafikte tekne, makine, elektrik ve pervane kaynaklı gürültü seviyelerinin karşılaştırmaları yer almaktadır. Dikkatli olarak incelendiğinde, sonar dom'u pervaneye en uzak nokta olmasına rağmen, pervane

gürültüsünün en çok etki ettiği ve gemi hızının 25 knot üzerine çıkması durumunda en baskın konuma geldiği görülmektedir.

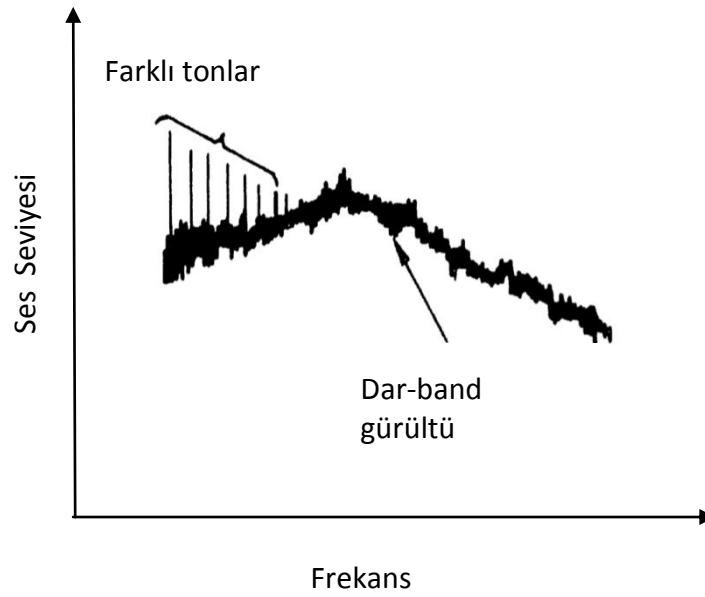


Şekil 4. 1 Suüstü gemileri için gürültü kaynakları etkileri [1]

Gürültü oluşumu ele alındığında, kavitasyonlu ve kavitasyonsuz gürültünün ayrı ayrı düşünülmesi faydalı olmaktadır. Genelde ticari gemiler için uygulanabilir olmamasına rağmen, araştırma gemileri ve denizaltı savunma harbi (DSH) maksatlı kullanılan askeri gemiler için gürültü göz önünde bulundurulmaktadır. Çünkü bu gemilerde potansiyel tehlikelerin tespit edilebilmesi için sessiz çalışma çok önemlidir. Bu etkenler nedeniyle gemi dizayn edenler, geminin işletimi esnasında kavitasyonsuz çalışma bölgesinin genişliğini arttırabilmek için mümkün olduğu kadar büyük çaba harcamaktadırlar.

4.3.1 Kavitasyonsuz Gürültü

Kavitasyonsuz durumdaki pervanelerin durumu, turbo makinelerde karşılaşılan durumlara benzerdir. Kavitasyonsuz durumda genellikle Şekil 4.2’ de gösterilen bir gürültü tarzı meydana gelmektedir. Burada, kanat frekansları ile birlikte yüksek frekanslarda dar band gürültüleri ile uyuşan farklı tonların bulunduğu görülmektedir. Pervanedeki dar band gürültü özellikleri, akış türbülanslarından ve çıkış ucu gürültüsü ile girdap saçılması gibi çeşitli kenar etkilerinden meydana gelmektedir [1].



Şekil 4. 2 İdeal kavitasyonsuz gürültü spektrumu [1]

Gürültü konusu üzerine gerçekleştirilen araştırmalar, gürültü kaynağı olarak, gemi ile pervane(ler)i ve helikopter rotoru ile kanatları arasındaki farklılığı ortaya koymak için gerçekleştirilmektedir. Bir gemi pervanesi yoğun bir gürültü kaynağı olarak düşünülerek, gürültü tahmini için kullanılabilmektedir. Boyutsuz yarıçapın (r/R), 1’den, çok daha küçük olduğu kesitlerde, frekansın ses hızına bölünmesi ile dalga sayısı elde edilir.

Kanat hızı gürültüsü bakımından, sualtı aracında veya su üstü teknesinin arkasında normal olarak çalışan bir pervanenin iz alanı, çevresel olarak değişmektedir. Bu durum, kanat kesitlerinde oluşan etkinin, dalgalanan açılar şeklinde olmasına sebep

olmaktadır. Bu etkinin pervane kanadına yakın olduğu düşünülürse, ani kuvvetli bir rüzgarın (gust) etkisi gibi bir etki yaratabileceği söylenebilir.

Dar band gürültü bileşenlerinin analizi ise farklıdır. Kanat hızı probleminde, akıştaki türbülans seviyesinin bulunmasına gerek duyulmasına rağmen, iz alanındaki çevresel değişimler düzensizliğe sebep olmaktadır. Bu durum, iz harmoniklerinin bu özelliğinin, zamanın bir fonksiyonu olduğu ve pervane diskinin konum analizine gerek olmadığına işaret etmektedir.

Kanat kesitinin çıkış ucu gürültüsü, belki de, dar band gürültü mekanizmalarının en zor anlaşılan gürültü türüdür. Çünkü bu olay, kanadın çıkış kenarı etrafındaki akışın ayrıntılı bilgisini gerektirmektedir. Sınır tabakasında yer alan viskozitenin, meydana gelen yayılmış gürültünün tahmin edilmesindeki rolü çok büyük olup, birçok araştırmancının da konusu olmuştur. Blake (1984), bu konudaki detaylı çalışmasında, çıkış kenarında ve türbülans bölgesindeki gürültü seviyelerinin değerlendirmelerine yer vermiştir [1].

Teorik olarak, kavitasyon altı koşullardaki gürültü analizi için gemi pervanelerinin optimize edilmesinde karşılaşılan problem, aslında gürültünün başlangıç anıdır. Çünkü tam çözüm, hem pervane kanatları üzerindeki detaylı viskoz akış hesaplamasını hem de normal iz alanı verilerine giriş türbülans gürültü spektrumlarının dahil edilmesini gerektirir. Jenkins [38], bu durumu kavitasyon göstermeyen bir gemi pervanesi için ele almıştır.

4.3.2 Kavitasyonlu Gürültü

Kavitasyon kabarcıklarının patlaması sonucu çok dalgaları ve dolayısıyla gürültü ortaya çıkar. Aslında bu durum, 1 MHz frekans bandı üzerini kapsayan bir “beyaz gürültü” dür. Kavitasyon kaynaklı gürültü yayılımı problemi için Fitzpatrick [39], çeşitli basınç alanlarındaki kabarcık dinamiklerini göz önünde bulundurarak, tek bir kavitasyon kabarcığının davranışını dikkate alınmıştır. Bu koşullar altında kabarcık, hacim dalgalanmalarına maruz kalacak ve sonuç olarak akustik bir enerji oluşacaktır. Bu yaklaşım kullanılarak, kabarcık kümesinin spektral güç yoğunluğu, birim zamandaki kabarcık sayısı üretimi olacak ve spektral enerji yoğunluğu bir tek kabarcığın büyümesi ve patlaması nedeniyle olacaktır. Bu modellerde her şeye rağmen pervane

kanatlarındaki kavitasyonun gerçek davranışını kısmen tahmin edilebilecek ve çok yüksek kabarcık yoğunluklarında tahmin kapasitesi başarısızlık eğiliminde olacaktır. Kooij [40], model testlerinde, düzgün ve pürüzlü kanat yüzeylerinde kabarcık kavitasyonu nedeniyle meydana gelen gürültünün, kabarcık sayısının artması ile anlık olarak arttığı ve büyük miktarda kabarcığın oluşumu ile gözle görülür derecede düştüğünü göstermiştir [1].

Kavitasyon gürültüsünün teorik olarak tahmini, kavitasyonsuz pervaneye nazaran çok daha zordur. Bununla ilgili gerçekleştirilen öngörüler, kavitasyon tünellerinde çalıştırılan pervane modelleri kullanılarak yapılmaktadır. Geniş hesaplama imkânlarına olan ihtiyaca rağmen, detaylı sınır tabaka ve kavitasyon dinamiğinin hesaplanmasındaki teorik metotların yetersizliği, değerlerin sınırlanmasına sebep olmaktadır.

Matusiak [41], çoğunlukla tabaka kavitasyonunun neden olduğu gürültünün hesaplanması için teorik bir prosedür geliştirmiştir. Choi vd. [42], girdap kavitasyonunu meydana getiren kabarcıklardan dolayı oluşan gürültü yayılımını incelemiştir.

Sunnersjö [43], ise kavitasyon gösteren pervanenin gürültü yayılımının, farklı çalışma durumlarındaki kavitasyon tiplerine bağlı olduğunu göstermiştir. Pervanenin 4 farklı yükleme koşullarındaki gürültü spektrumunu ele alarak, sırt, yüz, göbek ve uç girdap kavitasyonlarının farklı gürültü tiplerine sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Kavitasyonlu gürültü ölçümleri için yapılan sayısal çalışmalar dışında, kavitasyon tünelleri kullanılarak farklı yükleme koşullarında, gürültü spektrumu tahmini yapılabilmektedir. Ancak kavitasyon tünelineki gürültü çalışmalarında kavitasyon tüneli duvarlarının varlığı sonuçları etkilemektedir. Bu nedenle kavitasyon tünelineki gürültü tahminleri yapılırken, bir takım düzeltme faktörleri mutlaka yapılmalıdır.

KAVİTASYONLU PERVANELERDE GÖRÜLEN GÜRÜLTÜNÜN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ İÇİN KULLANILAN KALDIRICI YÜZEY METODU

Gemi pervanelerinin gemi eksenine göre simetrik olmayan başka bir deyişle güçlü ve düzensiz bir akım ortamında çalışması, shaft kuvvetlerinde ve pervane kanatları üzerinde basınç alanının düzensiz olmasına neden olmaktadır. Bahsedilen bu düzensizliklere pervane kanadı yüzeyindeki daimi olmayan tabaka kavitasyonu oluşumu da eklendiğinde, su altında gürültü ve gemi bünyesinde yüksek seviyede titreşimler oluşmakta, pervane veriminde de bir azalma görülebilmektedir. Bu nedenle, pervane tasarımının ilk aşamalarında kavitasyon kaynaklı söz konusu bu oluşumların kontrol altında bulundurulmaları son derece önemlidir. Bu bölümde sözü edilen amaç doğrultusunda, gemi pervaneleri için temeli Szantyr [44]'nın kaldırıcı yüzey modeline dayalı olarak geliştirilmiş, pervane performansını, tabaka kavitasyonu büyüklüğünü ve buna bağlı olarak oluşan gürültü öngörüsünü sağlayabilecek bir analiz metodu ele alınmıştır [5].

5.1 Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli

Düzensiz akımda çalışan pervanelerin analizi için geliştirilen bu metotta, pervane kanatlarının temsili için şekli değişebilen bir kaldırıcı yüzey modeli kullanılmaktadır. 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.

Tüm pervane kanatlarının gerisinde serbest girdap yüzeyleri uzanır. Bu yüzeyler, düzgün helisel şekle sahip serbest girdap hatlarından meydana gelir. Pervane kanatlarından biri *anahtar kanat* olarak seçilir. Anahtar kanadın hemen arkasından itibaren 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 [5].

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 [5].

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 [5].

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 formülasyonunun 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 (5. 1) ile verilmektedir [5].

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4\pi} \left[\int_{S_p} \int \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_p \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS + \int_{S_{pv}} \int \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{pv} \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS + \int_{S_{ps}} \int \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{ps} \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS + \right. \\ & \left. \int_{S_p} \int (q_p + q_{pc}) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS \right] \\ & + (\vec{V} + \vec{\omega} \cdot \vec{R}) \cdot \vec{n} = 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

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

5.2 Pervane Kanadı Kaldırıcı Yüzey Modeli

Pervane kanadını modelleyen girdap ve kaynak dağılımlarının belirlenmesi amacı ile oluşturulan denklem (5.1)'in sayısal olarak çözülebilmesi için, kaldırıcı yüzey dörtgensel bölgelere (grid) ayrılarak üzerlerine girdap ve kaynak elemanları yerleştirilir (Şekil 5.1).

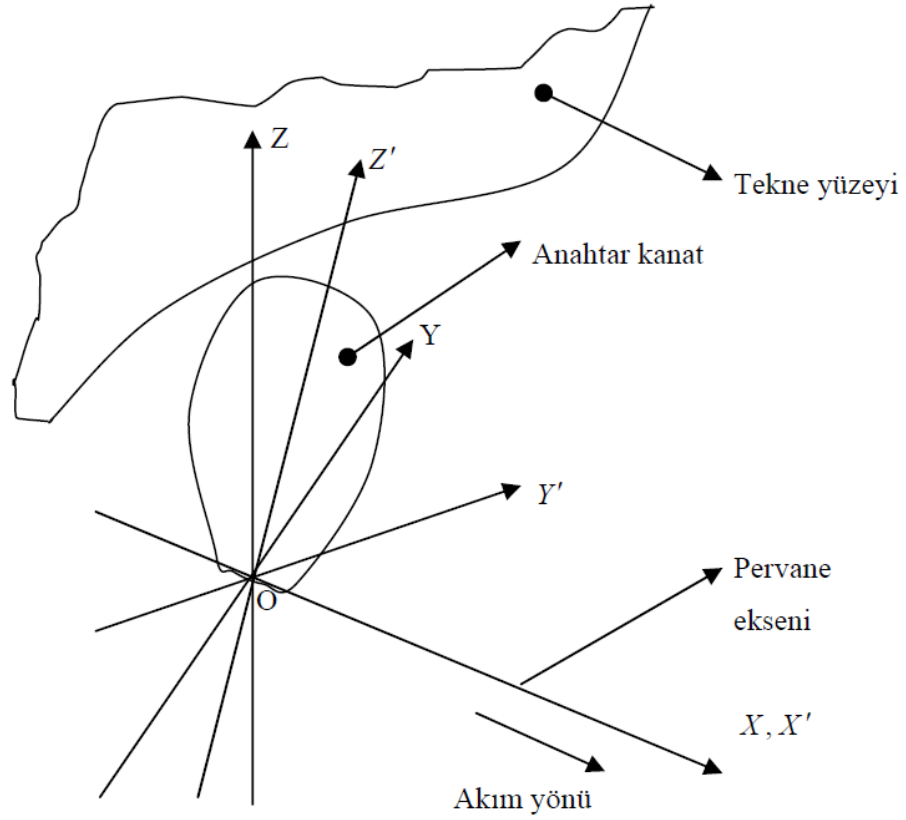
Şekil 5. 1'den de görülebileceği gibi kort yönündeki 11 şerit boyunca 15 adet bağlı girdap elemanı ($\bar{B}_p$) düzgün olarak yayılır. Bağlı girdapların aralığı kanat giriş ucuna yakın alanlarda daha yoğun olup, kanat çıkış ucuna doğru ise giderek azalmaktadır. Bu işlem, pervane kanadının giriş ucu yakınlarında 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 [5].

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 [5].

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 süreksiz yük dağılımları için bir kayıt görevini görür [5].

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 [5].

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 5.2'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 [5].



Şekil 5. 2 Kaldırıcı yüzey modeline ait koordinat sistemi [5]

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 (5.2)'de ifade edildiği gibidir [5].

$$Q_p = V_{IN} R \Delta X \frac{dt}{dx} \quad (5.2)$$

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

5.2.1 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 [5].

Bir indüksiyon katsayıları matrisi aynı zamanda, pervane girdap modelinin bir bölgesindeki tüm girdap elemanlarının, her bir kontrol noktasında indüklenmiş hız katkılarının toplanması şeklinde de değerlendirilebilir. İndüklenmiş hızların hesabında Biot-Savart formülü kullanılır (Şekil 5.3) [5].

$$\vec{V}_\Gamma = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{\vec{L} \times \vec{R}}{|\vec{R}|^3} \quad (5.3)$$

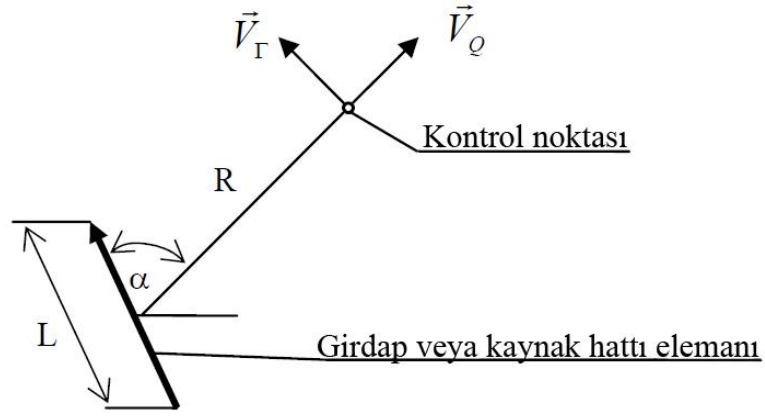
Burada:

$\vec{V}_\Gamma$: 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 5. 3 Bir girdap/kaynak elemanın kontrol noktasında indüklediği hız [5]

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 [5].

Kesit kalınlıklarını modelleyen kaynak elemanlarının indüklediği hızlar da bir nokta kaynak ile ilişkili olan basit bir bağıntı yardımı ile denklem (5.4)'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir [5].

$$\vec{V}_Q = \frac{Q_p \vec{R}}{4\pi |\vec{R}|^3} \quad (5.4)$$

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 [5]. Kaldırıcı yüzey metoduna ilişkin anahtar kanat başlangıç konumunda iken kaynak/girdap dağılımlarının belirlenmesi, anahtar kanadın herhangi bir konumunda pervane girdap dağılımlarının belirlenmesi, değişken bölgede serbest girdapların yenilenmesi ve basınç dağılımlarının hesaplanması ile ilgili konular hakkında detaylı bilgiler Ekinci [5]'nin çalışmasından elde edilebilir.

5.2.2 Pervane Kanadında Tabaka Kavitasyonunun Tespiti ve Analizi

Pervane kanatları üzerindeki tabaka kavitasyonunun incelenmesi tüm kanat kesitleri için bağımsız olarak gerçekleştirilir ve denklem (5. 5) ile tanımlanan kavitasyon sayısına dayalı olarak yapılır [5].

$$\sigma = \frac{p_a + \rho g h - p_v}{1/2 \rho V_\infty^2} \quad (5. 5)$$

Burada:

p_a :atmosferik basınç

p_v :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 süresiz basınç dağılımının davranışına göre gerçekleştirilmektedir. Denklem (5. 6)'de belirtilen şarta göre bu bölge içerisindeki basınç, R_n yarıçaplı kavitasyon çekirdeklerini patlatmak için gerekli olan kritik basıncın altına düştüğünde tabaka kavitasyonunun başladığı varsayılmaktadır [5].

$$C_p + \sigma + \frac{4S}{\rho V_\infty^2 R_n} < 0 \quad (5.6)$$

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 orjinal 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 [5].

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 [5].

Tabaka kavitasyonunun yüzeyi üzerinde kuvvet dengesine dayalı dinamik sınır koşulu denklem (5. 7) ile verilmektedir. Bu koşulun, tabaka kavitasyonu olan yüzeyde meydana geldiği varsayılmaktadır [5].

$$-\sigma - C_p - \frac{4S}{\rho V_\infty^2 R_l} - \frac{8\mu V_{DF}}{\rho V_\infty^2 R_l} = \frac{2}{V_\infty^2} \frac{\partial \varphi_c}{\partial t} \quad (5.7)$$

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

(5. 7) denkleminin sol tarafı ile verilen dinamik sınır koşulu aşağıdaki varsayımlara dayandırılarak çıkarılmıştır.

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

(5. 7) 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 5. 5'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 ($\frac{\partial \phi_c}{\partial t}$), dinamik sınır koşulu denkleminde elde edilmekte ve denklem (5. 8) içinde bilinen bir değer olarak kullanılmaktadır [5].

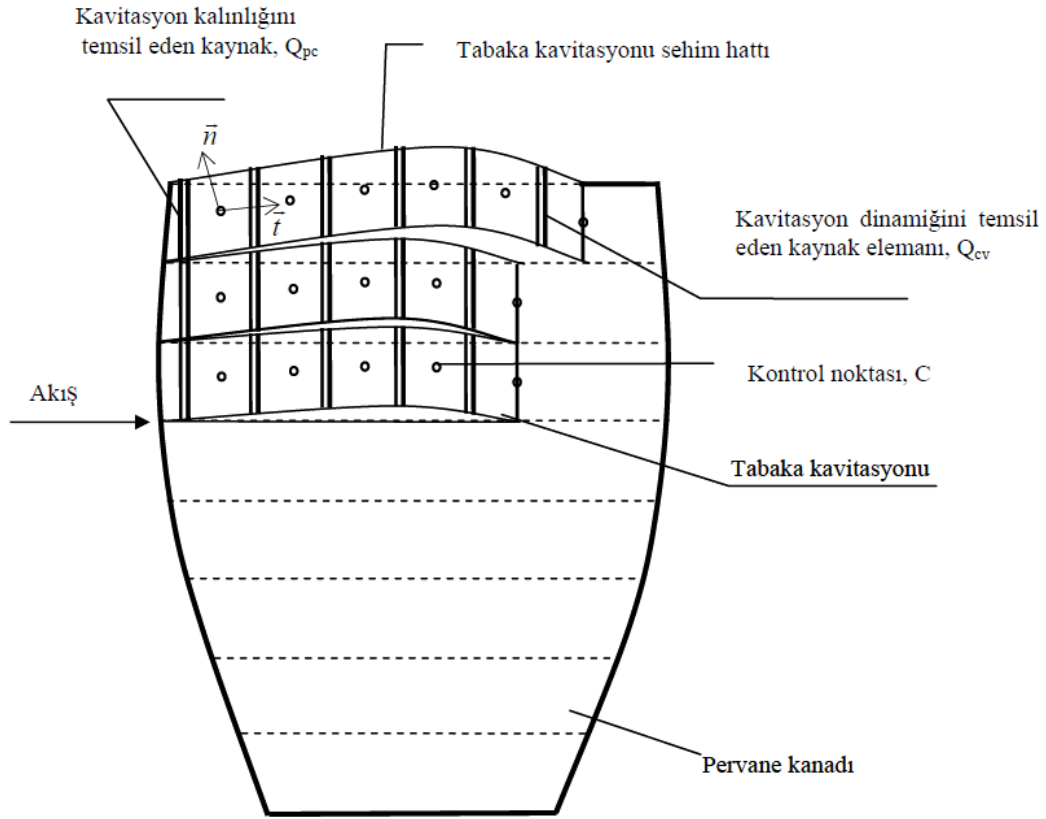
$$\frac{\delta \phi_c}{\delta t} = -\frac{1}{4\pi} \sum \frac{1}{r_i} \frac{dQ_{cv}}{dt} \quad (5. 8)$$

Burada:

r_i :kaynaktan kontrol noktasına olan uzaklık

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

t :zaman



Şekil 5. 4 Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli [5]

Denklem (5. 8), 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 (5.9) ile verilen lineerleştirilmiş basit bir formül yardımı ile elde edilebilmektedir [5].

$$V_{DF} = \frac{1}{\Delta R \cdot V_{\infty}} \frac{dQ_{cv}}{dt} \quad (5.9)$$

Burada:

ΔR :kanadın üzerindeki kavitasyon tabakasının kord yönündeki şeridinin genişliği
(Şekil 5. 5)

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 (5.9)'dan hesaplanan V_{DF} değeri, bir adım sonra analiz edilecek kanat pozisyonu için denklem (5. 7) içerisinde yerine konulmaktadır [5].

Analiz edilen j . ve $(j - 1)$. kanat pozisyonlarını ayıran zaman adımının sonunda yerel kavitasyon kalınlığı denklem (5.10)'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir [5].

$$T_j = T_{j-1} + V_{DFj} \Delta t_j \quad (5.10)$$

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 orjinal 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 orjinal kalınlığına ilave edilmektedir. Bu olay, kaldırıcı yüzey modelinde kanat kalınlığını temsil eden kaynakların (Q_{pc}) başlangıçtaki

şiddetlerini değiştirir. Bu şiddetlerin değerleri denklem (5.11) ile verilmektedir. Kaviteasyon tabakasında sapma meydana geldiğinde, herhangi bir kort yönündeki şeritte yer alan kaviteasyonun toplam alanı negatif olur ve bu şeritteki kaviteasyon sonlandırılır (Şekil 5. 5) [5].

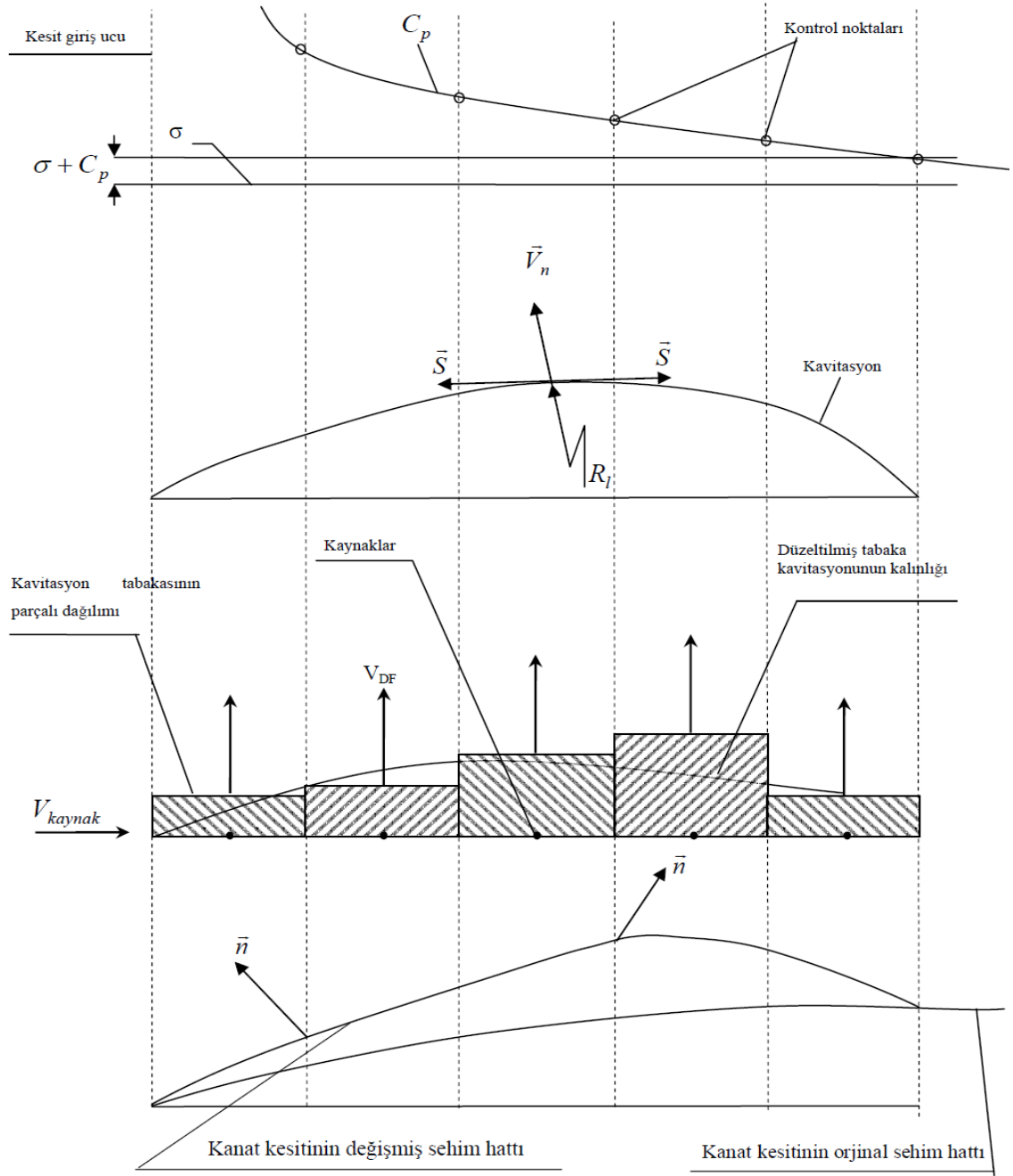
$$Q_{pc} = V_{kaynak} \Delta R \frac{dT_c}{dx} \quad (5.11)$$

Burada:

V_{kaynak} : kaynak elemanına gelen akım hızı

ΔR : kort yönündeki şeridin radyal genişliği

T_c : düzeltilmiş kaviteasyon kalınlığı



Şekil 5. 5 Tabaka kavitasyon modeli [5]

5.2.3 Kavitasyon Kaynaklı Gürültü Tahmini

Düzensiz akım alanında çalışan bir gemi pervanesinin kavitasyonlu ve kavitasyonsuz şartlarda oluşturduğu gürültü bir gemideki yolcu ve mürettebatın konforuna ve su altında tespit edilme bakımından askeri gemilerin hayatta kalabilirliğine önemli derecede etki etmektedir. Özellikle, kavitasyon olayı pervanesinin 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 [5].

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

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 [15] ile Seol vd. [22] çalışmalarında yer almaktadır.

Gemi pervane kanatlarında görülen tabaka kavitasyonu nedeniyle oluşan dar band gürültü seviyesinin sayısal öngörüsü ile ilgili olarak, Okamura ve Asano [14], Yoshimura ve Koyanagi [13], Lee ve Kinnas [11] çalışmalarında, uygulama alanı bulan Brown'un yarı ampirik metoduna yer verildiği görülmüştür. Bu yöntemde, kavitasyon yapan bir gemi pervanesinin oluşturduğu gürültü seviyesi (5.12) denklemi ile hesaplanmaktadır. Brown formülünde yer alan kavitasyon süpürme alanı, denklemin en önemli parametresidir. Bu parametrenin sayısal olarak belirlenmesi için, (5.13) denklemi, söz konusu kaldırıcı yüzey metoduna dayalı bilgisayar kodu içerisinde kullanılmıştır. Bu tip 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.

$$L_s = 163 + 10\log \left[\frac{Z D^4 N^3}{f^2} \right] + 10\log \left(\frac{A_c}{A_d} \right) \quad (5.12)$$

$$A_c = \int_0^{2\pi} \int_{r_{E1}}^{r_{E2}} r \, dr \, d\theta \quad (5.13)$$

Burada;

L_s : gürültü düzeyi (dB re 1 metre 1µPa)

A_c : pervane kanadında oluşan tabaka kavitasyonu süpürme (swept) alanı (Şekil 5.6)

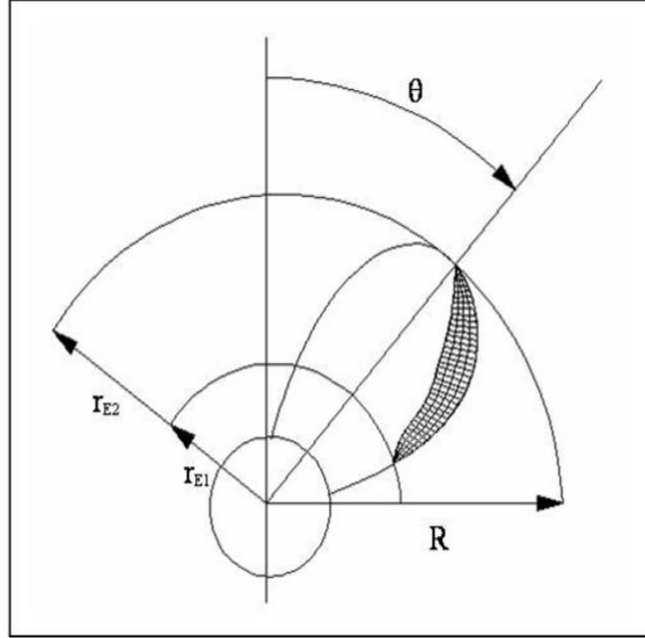
A_d : pervane disk alanı ($A_d = \pi d^2 / 4$)

Z : pervane kanat sayısı

N : pervane devir sayısı (1/s)

f : frekans (Hz)

D : pervane çapı (m)



Şekil 5. 6 Brown formülüne göre tabaka kavitasyonunun süpürme alanı [5]

Geliştirilen kaldırıcı yüzey yönteminde ise orjinal Brown formülü temel alınarak, Takinacı ve Taralp [23] tarafından geliştirilmiş ampirik metot kullanılmıştır.

Takinacı ve Taralp [23] çalışmalarında, kavitasyon kaynaklı gürültü tahmini için temel olarak Brown formülünü kullanılmışlardır. Ancak Brown formülü yardımıyla, pervane üzerinde oluşan tabaka kavitasyonu süpürme alanına göre hesaplanacak gürültü öngörüsü yapılmasına rağmen, geliştirilmiş Brown formülünde, pervane kanat uçlarında meydana gelebilecek uç girdap kavitasyonunun oluşturacağı gürültü etkisi de (5.12) denkleminde dâhil edilmiştir. Söz konusu bu geliştirilmiş formül, denklem (5.14)'te verilmiştir.

$$L_s = 163 + 10 \log \left[\frac{Z D^4 N^3}{f^2} \right] + 10 \log 40 \left(\frac{A_c}{A_d} \right) + K_{Tip} \log \frac{V_{Tip}}{V_{Tip}^i} + 10 \log H_{dist} \quad (5.14)$$

Burada;

K_{Tip} : uç girdap kavitasyonu katsayısı (suüstü gemileri için 60, denizaltılar için 80)

V_{Tip} : uç girdap kavitasyonu başlangıç anındaki kanat ucu hızı (m/s)

V_{Tip}^i : uç girdap kavitasyonu başlangıç anındaki devir sayısı (rpm)

H_{dist} : ses alıcının pervaneden uzaklığı (m)

Dar band gürültü düzeyinin en üst frekans seviyesi f_p olup, $f_p < 10$ kHz olduğu durumlarda denklem (5.14) geçerli olmaktadır. Daha önce bahsedilen çalışmalarda f_p frekans değeri, pompa kavitasyonu ile ilişkili olan aşağıdaki formüller kullanılarak bulunmuştur.

$$f_p = \frac{4400}{D} \left(\frac{\sigma_n^i}{\sigma_n} \right)^{-3.2/2} \left(\frac{P_s}{22} \right)^{1/3} \Rightarrow \left(\frac{\sigma_n^i}{\sigma_n} \right)^{1/2} < 1.7 \quad (5.15)$$

$$f_p = \frac{1100}{D} \left(\frac{\sigma_n^i}{\sigma_n} \right)^{-2.0/6} \left(\frac{P_s}{22} \right)^{1/3} \Rightarrow \left(\frac{\sigma_n^i}{\sigma_n} \right)^{1/2} \geq 1.7$$

Burada;

P_s : statik basınç (lbs/in²)

σ_n : kavitasyon sayısı

Kavitasyon sayısı ise şu şekilde tanımlanmaktadır.

$$\sigma_n = \frac{P_s - P_v}{\frac{1}{2} \rho n_p^2 D^2} \quad (5.16)$$

Burada;

P_v : suyun buharlaşma basıncı (1700-2400 Pa)

σ_n^i : kavitasyon başlangıç sayısı

Kavitasyon başlangıç sayısı, aşağıdaki formülden elde edilmektedir.

$$\frac{A_C}{A_D} = \left[\left(\frac{\sigma_n^i}{\sigma_n} \right)^{1/2} - 1 \right]^2 \left(\frac{\sigma_n^i}{\sigma_n} \right)^{-1} \quad (5.17)$$

Denklem (5.14) $f=f_p$ iken, en üst frekanstaki gürültü seviyesini vermektedir. Diğer frekans değerleri için gürültü seviyesi ise aşağıdaki formüller yardımıyla verilmektedir.

$$L_s = A f^{0.007} \Rightarrow f < f_p \quad (5.18)$$

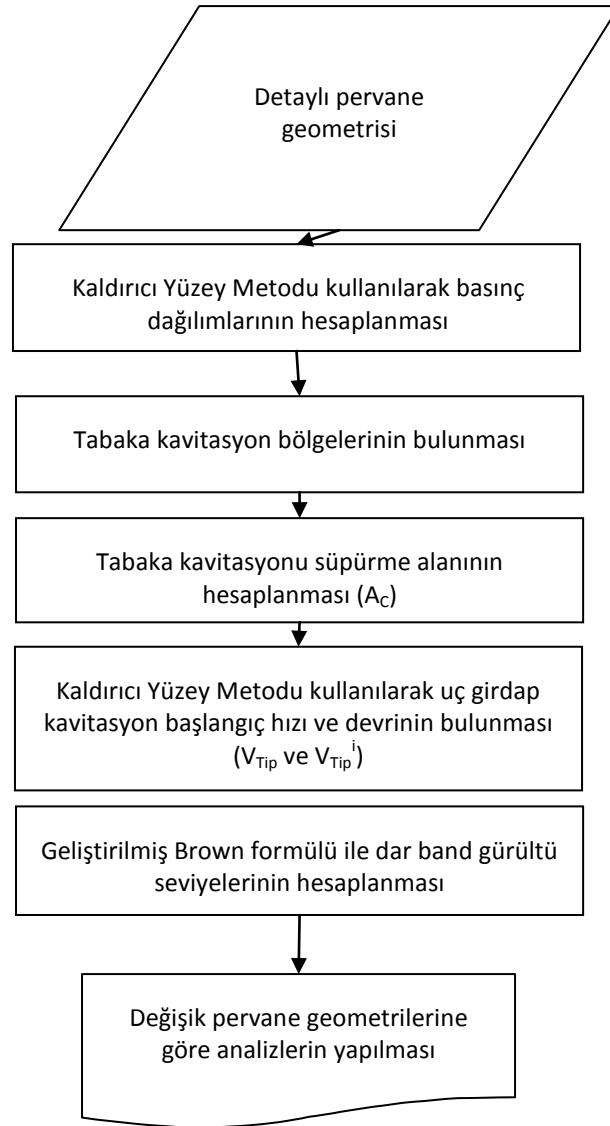
$$L_s = B f^{-0.2} \Rightarrow f > f_p$$

Denklem (5.18)'da yer alan A ve B sabitleri, gürültü spektrumunun devamlı karakteristiklerinden elde edilmiştir.

$$A = \left(\frac{L_{sp}}{f_p} \right)^{0.007} ; B = \left(\frac{L_{sp}}{f_p} \right)^{-0.2} \quad (5.19)$$

Denklem (5.20)'de belirtilen gürültü seviyesi L_{sp} , f_p üst nokta frekansının kullanılması ile elde edilen gürültü seviyesidir. Denklem (5.19), (5.14) ile birlikte, frekansın bölgesine göre, dar band gürültü spektrumlarının elde edilmesine olanak sağlamaktadır.

Farklı tip pervane geometrilerindeki kavitasyon hacimleri ile alanlarının, pervane performansının ve gürültünün hesaplanması için izlenen algoritma Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5. 7 Geliştirilmiş Brown formülüne göre gürültünün hesaplanmasına ilişkin algoritma

SAYISAL BULGULAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, Bölüm 5’de ayrıntıları verilen ve üniform olmayan akım ortamında çalışan gemi pervanelerinin performansını, tabaka kavitasyon analizini ve kavitasyon kaynaklı gürültü öngörüsünü gerçekleştirebilen, temeli Szantyr’ın kaldırıcı yüzey metoduna dayanan ve geliştirilmekte olan bir metot kullanılmıştır [29]. Metodun uygulanması için, üniform olmayan iz alanı içerisinde çalışan ve geometrisi belli olan bir gemi pervanesi ele alınmıştır. Sayısal hesaplamaların gerçekleştirilmesi için, kullanılan metoda dayalı ve FORTRAN programlama dili ile yazılmış olan bir bilgisayar kodundan (PKAV) yararlanılmıştır. Pervanenin performans, kavitasyon ve buna bağlı olarak gürültü öngörüsünü gerçekleştirebilmek için parametrik sayısal çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla söz konusu pervanenin geometrik karakteristiklerinden olan çalıklık ve hatve dağılımları, belirli miktarlarda ve oranlarda değiştirilmiştir. Böylece farklı geometriye sahip olan pervaneler elde edilmiştir. Orjinal pervane ile birlikte elde edilen yeni geometriye sahip pervaneler sayısal olarak analiz edilerek, elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Uygulama

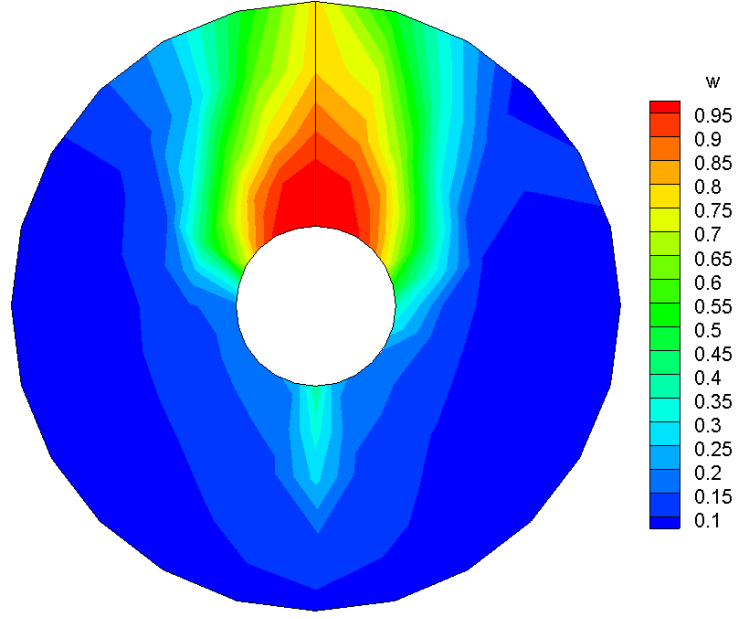
Pervaneye ait geometri Çizelge 6. 1’de, pervaneye ait karakteristikler ise Çizelge 6. 2’de verilmektedir. Pervaneye ait nominal iz dağılımı Şekil 6.1’de gösterilmektedir. Pervanenin, Rhinoceros programı yardımıyla çizilen resmi Şekil 6.2’de gösterilmektedir.

Çizelge 6. 1 Pervaneye ait kanat geometrisi

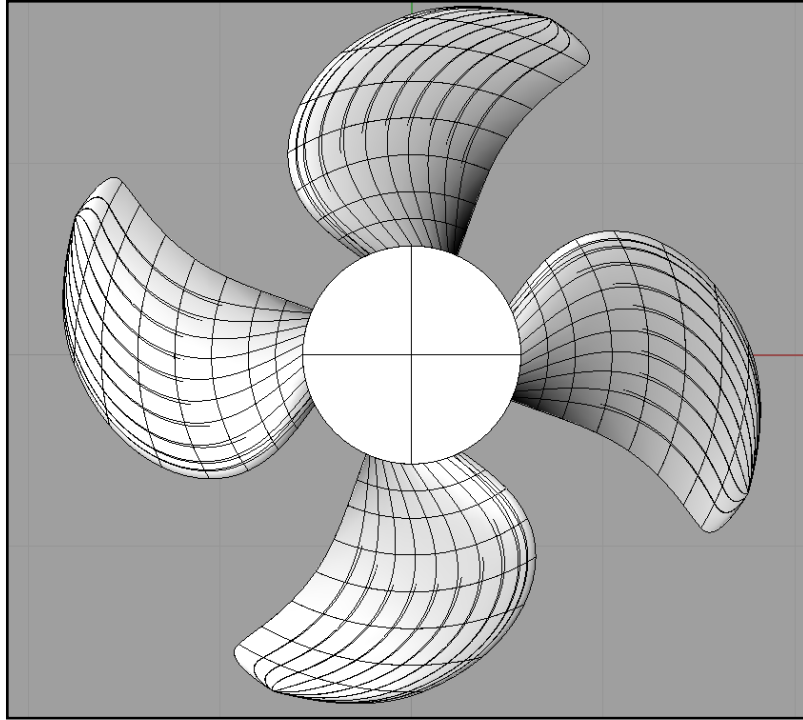
Boyutsuz yarıçap r/R	Kord Dağılımı c/D	Çalıklık Dağılımı (m)	Hatve Dağılımı P/D	Eğiklik Dağılımı (m)	Kalınlık Dağılımı T/c	Sehim Dağılımı F/c
0.3	0.171	-0.017	0.722	0.000	0.247	0.025
0.35	0.205	-0.052	0.757	0.000	0.189	0.033
0.4	0.236	-0.082	0.787	0.000	0.149	0.033
0.5	0.289	-0.122	0.833	0.000	0.099	0.029
0.6	0.329	-0.118	0.861	0.000	0.069	0.025
0.7	0.350	-0.046	0.870	0.000	0.049	0.020
0.8	0.346	0.110	0.858	0.000	0.036	0.017
0.9	0.299	0.372	0.807	0.000	0.028	0.015
0.95	0.240	0.549	0.763	0.000	0.027	0.015
1	0.000	0.760	0.705	0.000	-	-

Çizelge 6. 2 Pervaneye ait karakteristikler

Gemi hızı, V (m/s)	6.688
Pervane devir sayısı, N(rps)	2.5
$J=V/ND$	0.704
Pervane Çapı, D (m)	3.8
Kanat sayısı, Z	4
Göbek çapı/Pervane çapı	0.276
Dönüş yönü	sağ
Skew (çalıklık)	21.8°
Rake (eğiklik)	0°
Pervane Tipi	Sabit kanatlı

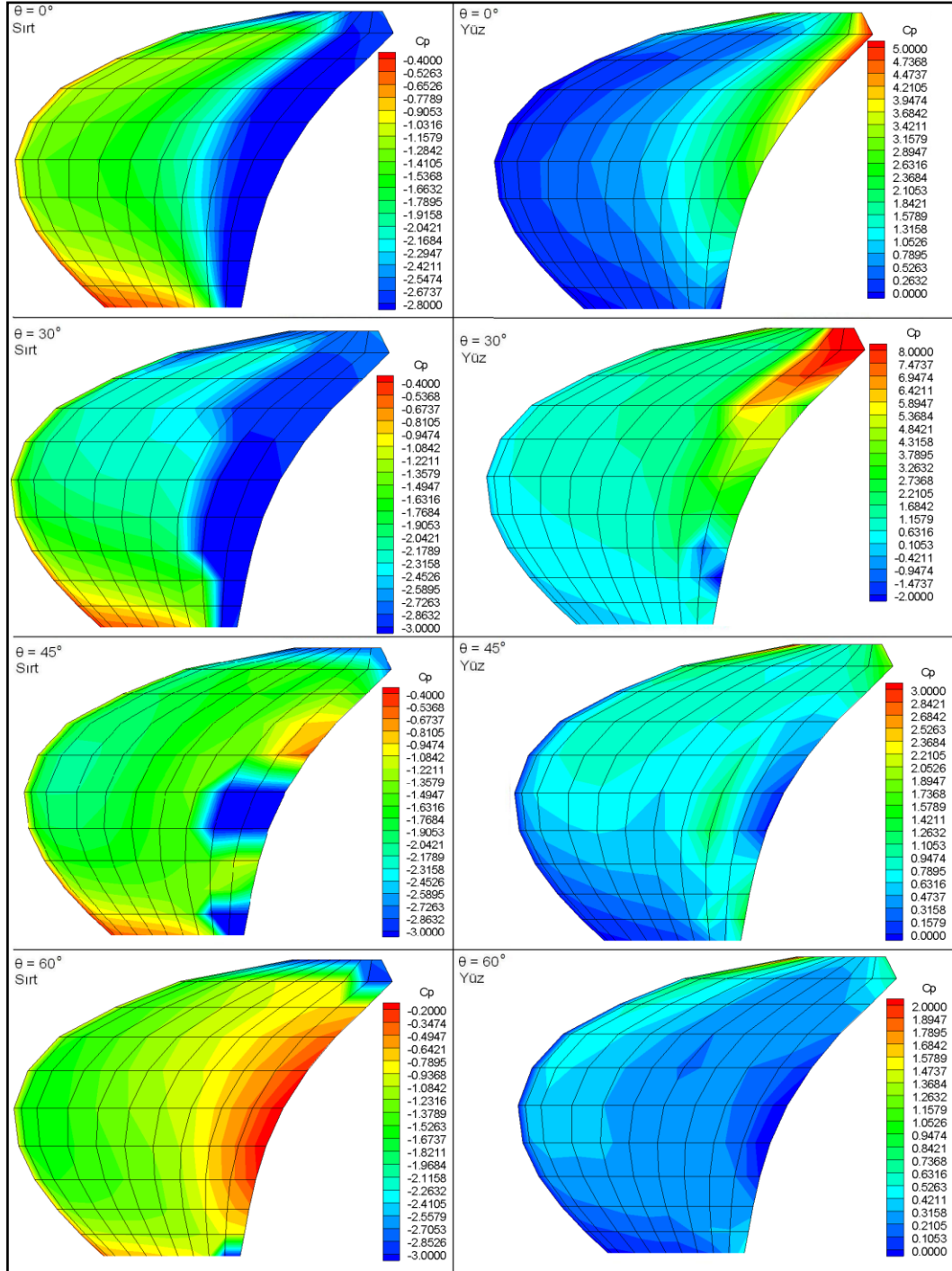


Şekil 6. 1 Pervaneye ait nominal iz dağılımı

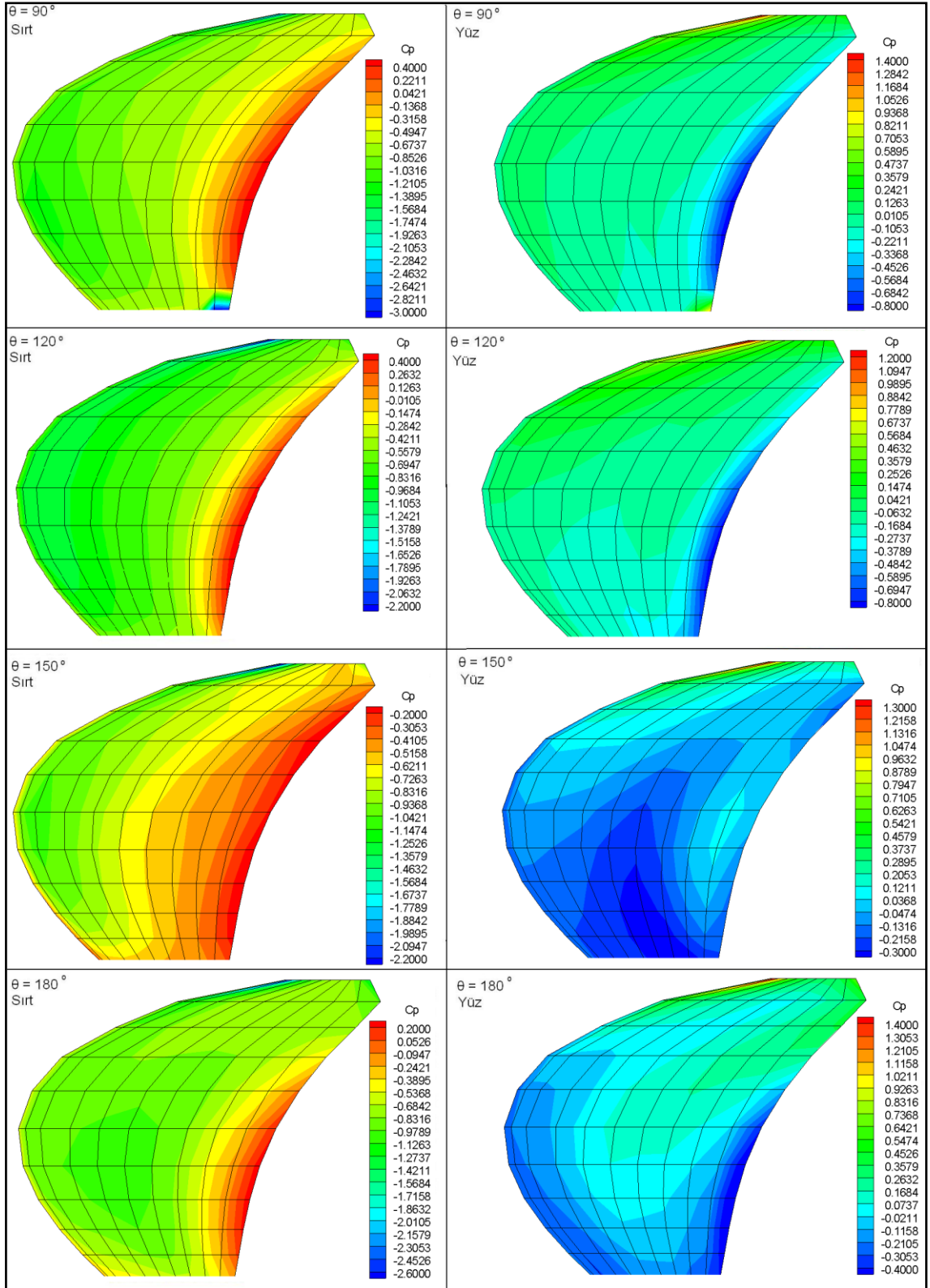


Şekil 6. 2 Rhinoceros programında çizilen pervane

Şekil 6. 3 ve Şekil 6. 4'te, orjinal pervanenin $\theta=0^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=120^\circ$, $\theta=150^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonlarında, kanadın sırt ve yüz tarafındaki basınç dağılımlarının kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen değerleri gösterilmektedir. Burada belirtilen θ açısı, kanat pozisyon açısı olup, sağ dönüşlü bir pervane için saat ibresi yönünde pozitif kabul edilmektedir.

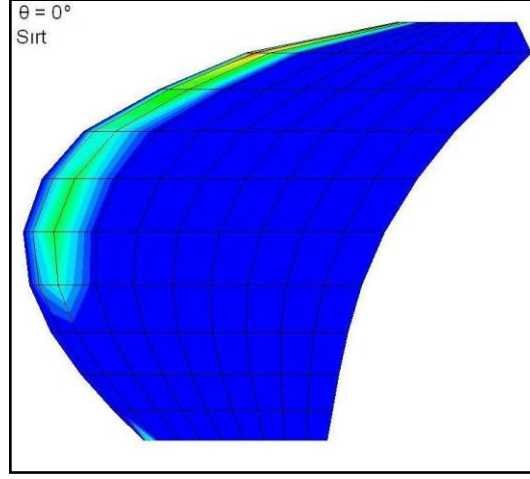


Şekil 6. 3 Orjinal pervanenin 0° - 60° arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen sırt ve yüz taraftaki basınç dağılımları



Şekil 6. 4 Orjinal pervanenin 90° - 180° arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metodundan elde edilen sırt ve yüz taraftaki basınç dağılımları

Pervanenin ele alınan çalışma koşullarında yapılan analizi sonucunda, kanat pozisyonunun dik olduğu ($\theta=0^\circ$) durumda görülen tabaka kavitasyon formu Şekil 6. 5'te gösterilmiştir.



Şekil 6. 5 Orjinal pervanenin, $\theta=0^\circ$ kanat pozisyonunda görülen tabaka kavitasyon formu

Pervane geometrisinin, tabaka kavitasyonu üzerinde olan etkisini incelemek için birtakım parametrik çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak, çalıklık etkisi ele alınmıştır. Pervanelerde çalıklık, pervane kanadının simetrik olmaması, arkaya ve yana doğru bir eğriliği bulunmasıdır [45]. Bunun için, orjinal çalıklık açısı $\phi=21,8^\circ$ olan pervanenin; çalıklık açıları $\phi=11,3^\circ$, $\phi=18,78^\circ$, $\phi=28,65^\circ$ ve $\phi=50,19^\circ$ olacak şekilde değiştirilerek farklı pervane geometrileri elde edilmiştir. Orjinal pervaneden türetilmiş yeni pervanelere ait çalıklık miktarları boyutsuz yarıçap değerlerine göre metre cinsinden Çizelge 6. 3'te verilmiştir.

İkinci olarak, hatve oranı (P/D)'nın etkisi ele alınmıştır. Pervanelerde hatve; pervanenin tam bir dönüşü sırasında ilerlediği mesafeye denir [45]. Bunun için, orjinal pervanenin boyutsuz yarıçaplara göre olan hatve oranları, %5, %10 ve %15 azaltılıp arttırılarak farklı pervane geometrileri elde edilmiştir. Orjinal pervaneden türetilmiş yeni pervanelere ait hatve oranları boyutsuz yarıçap değerlerine göre Çizelge 6.4'te verilmiştir.

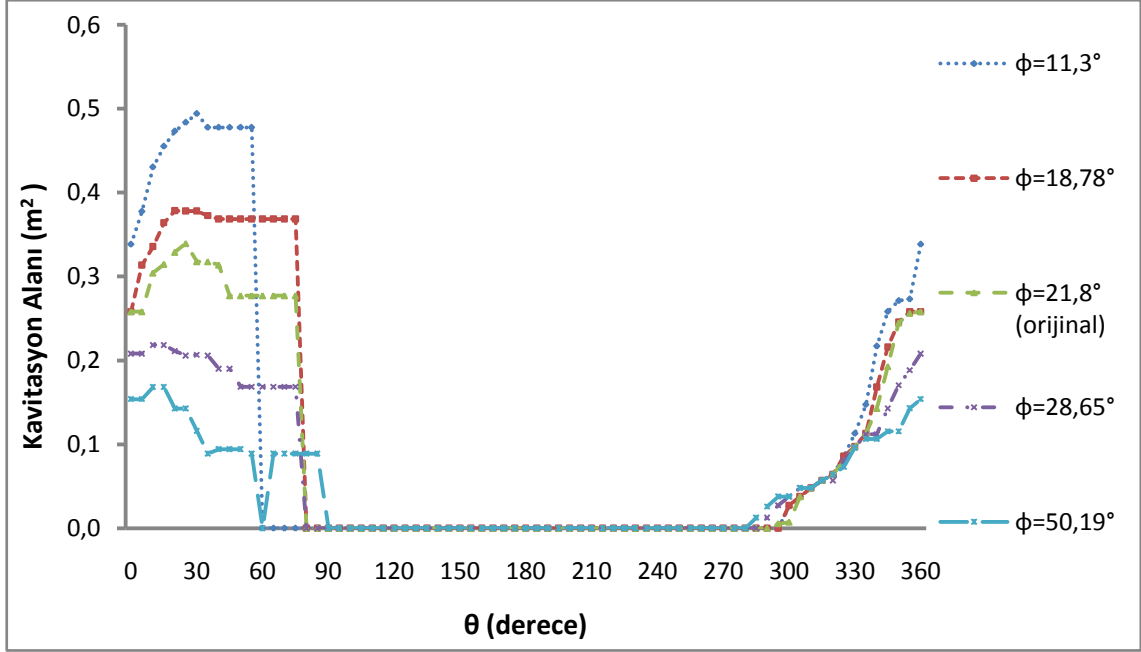
Çizelge 6. 3 Orijinal pervaneden türetilen yeni çalıklık miktarları (m)

r/R	$\phi=21.8^\circ$ (orjinal)	$\phi=11,3^\circ$	$\phi=18,78^\circ$	$\phi=28,65^\circ$	$\phi=50,19^\circ$
0.3	-0,0165	-0,0083	-0,0140	-0,0330	-0,0495
0.35	-0,0515	-0,0258	-0,0438	-0,1030	-0,1545
0.4	-0,0820	-0,0410	-0,0697	-0,1640	-0,2460
0.5	-0,1220	-0,0610	-0,1037	-0,2440	-0,3660
0.6	-0,1175	-0,0588	-0,0999	-0,2350	-0,3525
0.7	-0,0460	-0,0230	-0,0391	-0,0920	-0,1380
0.8	-0,1100	0,0550	0,0935	0,2200	0,3300
0.9	0,3720	0,1860	0,3162	0,7440	1,1160
0.95	0,5485	0,2743	0,4662	1,0970	1,6455
1.0	0,7600	0,3800	0,6460	1,5200	2,2800

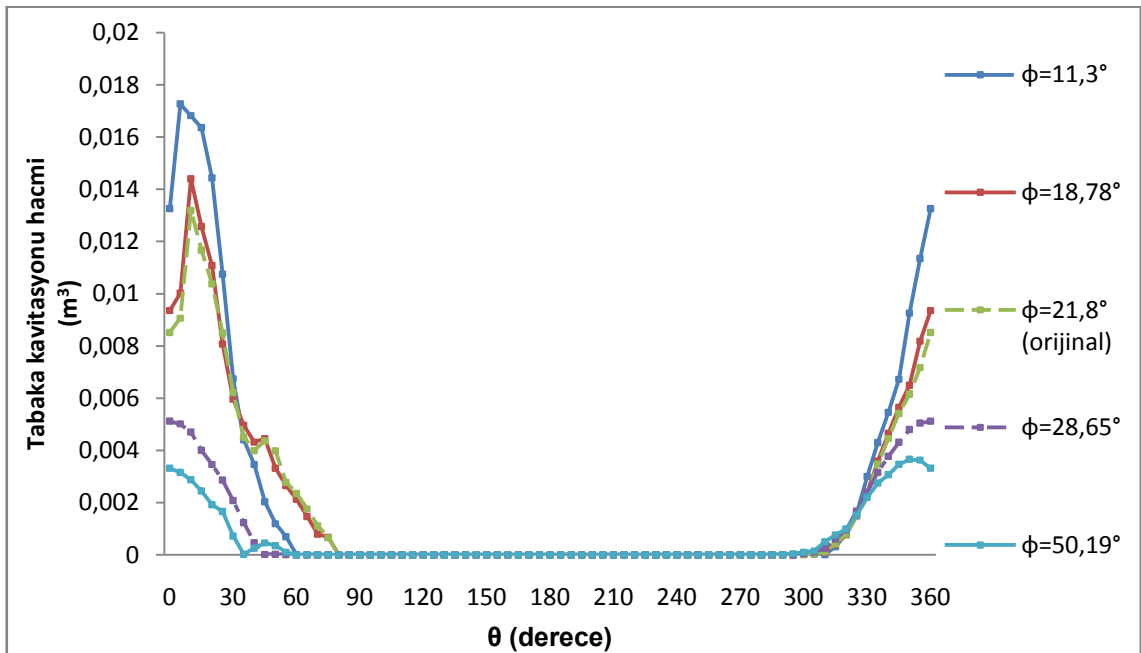
Çizelge 6. 4 Orijinal pervaneden türetilen yeni hatve oranları

r/R	P/D %15 (-)	P/D %10 (-)	P/D %5 (-)	P/D (Orjinal)	P/D %5 (+)	P/D %10 (+)	P/D %15 (+)
0.3	0,6138	0,6499	0,6860	0,7221	0,7582	0,7943	0,8304
0.35	0,6433	0,6811	0,7190	0,7568	0,7946	0,8325	0,8703
0.4	0,6688	0,7081	0,7475	0,7868	0,8261	0,8655	0,9048
0.5	0,7080	0,7496	0,7913	0,8329	0,8746	0,9162	0,9578
0.6	0,7314	0,7745	0,8175	0,8605	0,9035	0,9466	0,9896
0.7	0,7393	0,7827	0,8262	0,8697	0,9132	0,9567	1,0002
0.8	0,7295	0,7724	0,8153	0,8582	0,9011	0,9440	0,9869
0.9	0,6863	0,7267	0,7670	0,8074	0,8478	0,8881	0,9285
0.95	0,6487	0,6869	0,7250	0,7632	0,8014	0,8395	0,8777
1.0	0,5988	0,6341	0,6693	0,7045	0,7397	0,7750	0,8102

Yapılan analizde, pervane çalıklığının, pervanenin bir tam dönüşü esnasında kanat üzerinde oluşan tabaka kavitasyonu alanı ve hacmine olan etkisi, kanat pozisyonu açılarına göre Şekil 6. 6 ve Şekil 6.7’de gösterilmiştir. Elde edilen değerler, pervanenin dizayn ilerleme sayısı olan $J=0.704$ için bulunmuştur. Buradan görüleceği üzere, çalıklık açısı arttıkça pervanenin tabaka kavitasyon alanları ve hacimleri azalmaktadır.

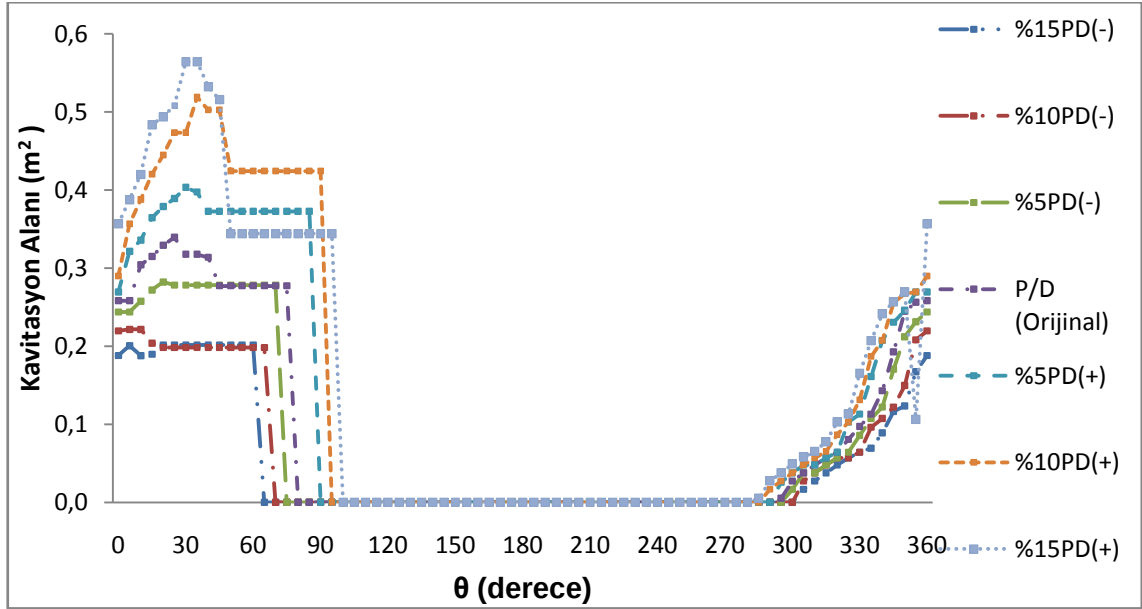


Şekil 6. 6 Farklı çalıklık açılarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu alanları ($J=0.704$)

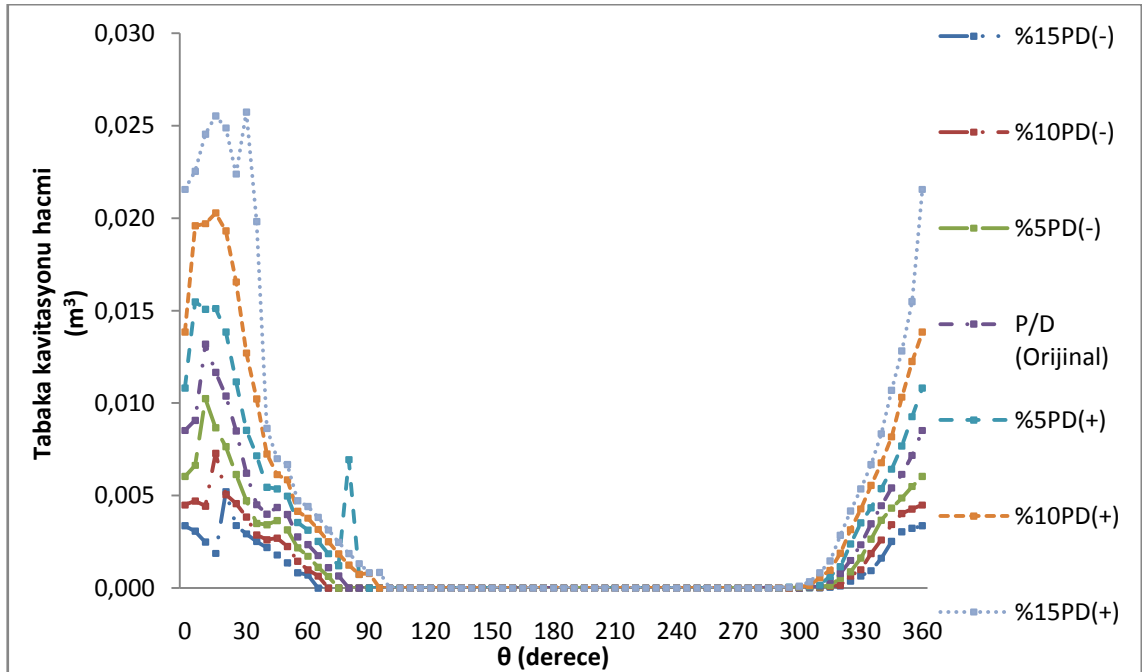


Şekil 6. 7 Farklı çalıklık açılarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu hacimleri ($J=0.704$)

Benzer şekilde, pervane hatve oranının, pervanenin bir tam dönüşü esnasında kanat üzerinde oluşan tabaka kavitasyonu alanı ve hacmine olan etkisi, kanat pozisyonu açılarına göre Şekil 6. 8 ve Şekil 6.9’da gösterilmiştir. Elde edilen değerler, pervanenin dizayn ilerleme sayısı olan $J=0.704$ için bulunmuştur. Buradan görüleceği üzere, hatve oranı (P/D) arttıkça, pervanenin tabaka kavitasyon alanları ve hacimleri artmaktadır.



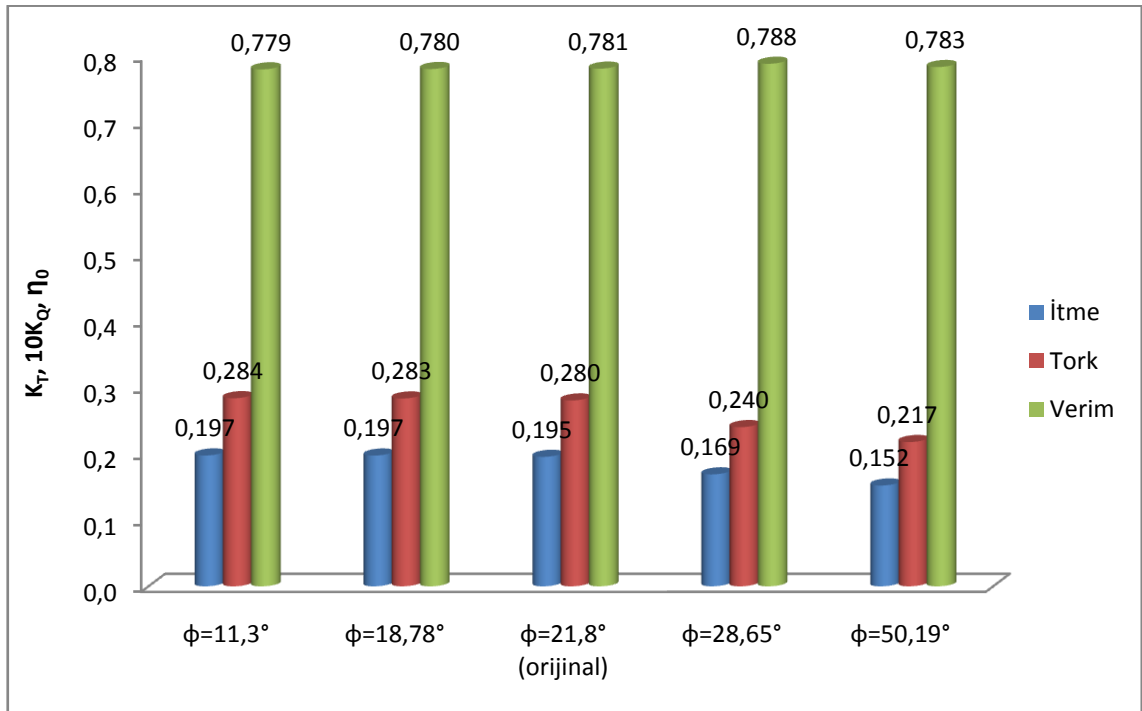
Şekil 6. 8 Farklı hatve oranlarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu alanları ($J=0.704$)



Şekil 6. 9 Farklı hatve oranlarında, kanat pozisyon açısına göre tabaka kavitasyonu hacimleri ($J=0.704$)

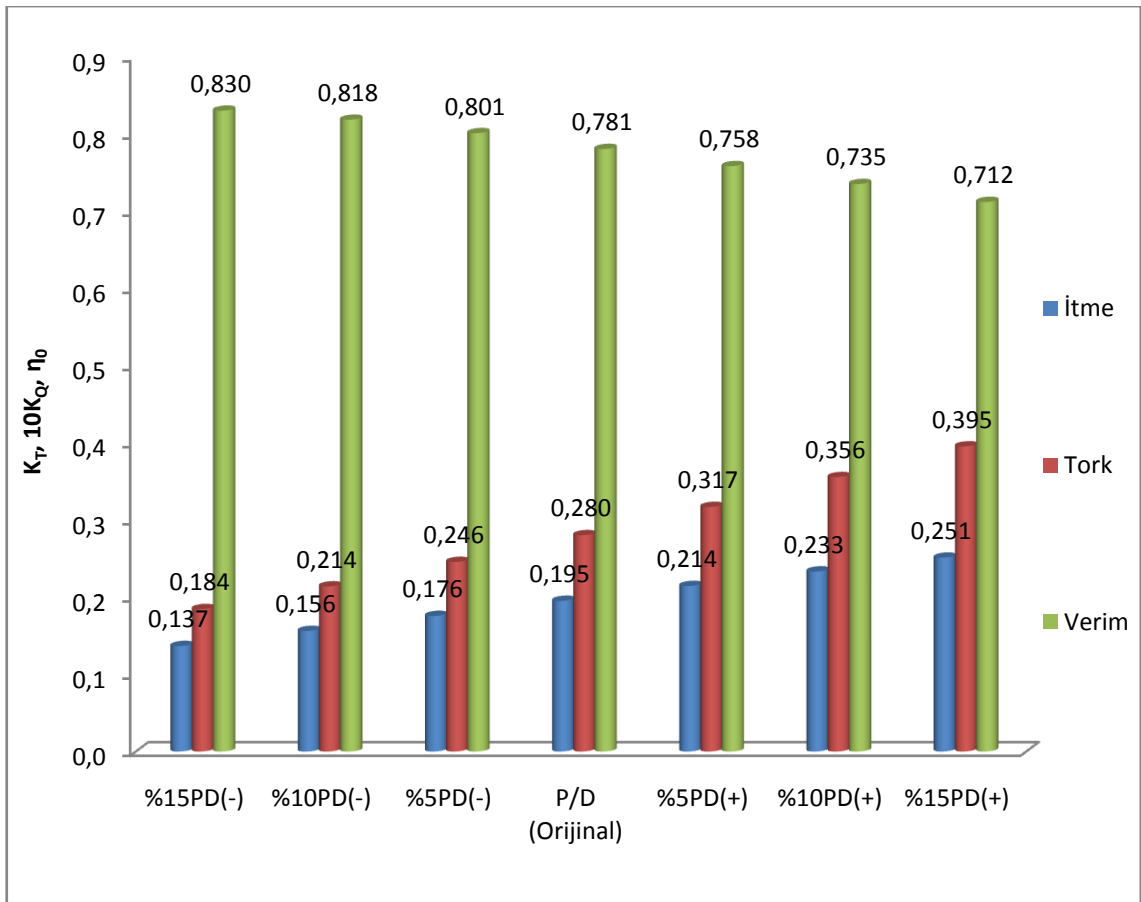
Yukarıdaki analizlere ilave olarak, söz konusu geometrik değişikliklerin pervanenin performans karakteristiklerine olan etkileri de ayrıca incelenmiştir. Analiz hesaplamaları, ilerleme sayısı $J=0.704$ için gerçekleştirilmiştir. Dört farklı çalıklık açısı ve altı farklı hatve oranına göre toplam 10 adet analiz gerçekleştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 6. 10'da çalıklık değişiminin, Şekil 6. 11'de ise hatve oranı değişiminin pervanenin performans karakteristiklerine (itme katsayısı, tork katsayısı ve verim) olan etkileri gösterilmiştir.

Şekil 6. 10'da görüleceği üzere, çalıklık açıları arttıkça pervane veriminde artma, itme ve tork katsayılarında ise azalma meydana gelmektedir. Ancak çalıklık açısının $\phi=50,19^\circ$ olduğu durumdaki pervane veriminde, çalıklık açısının $\phi=28,65^\circ$ olduğu durumdaki verim değerine göre bir azalma olduğu görülmektedir (orjinal pervane ($\phi=21,8^\circ$)) verimine göre % 0.3'lük bir artış meydana gelmiştir). Bu durum, çalıklık açısının çok yüksek oranlarda arttırılmasının pervane açık su verimine olumsuz etki edebileceğini göstermektedir. En yüksek verim, çalıklık açısı $\phi=28,65^\circ$ iken, $\eta_o = 0.788$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek verim artışı ise orjinal pervaneye göre % 0.95 olarak elde edilmiştir. En düşük verim, çalıklık açısı $\phi=11,3^\circ$ iken, $\eta_o = 0.779$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek verim azalması ise orjinal pervaneye göre % 0.13 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. 10 Farklı çalıklık açılarında, pervaneye ait performans karakteristikleri ($J=0.704$)

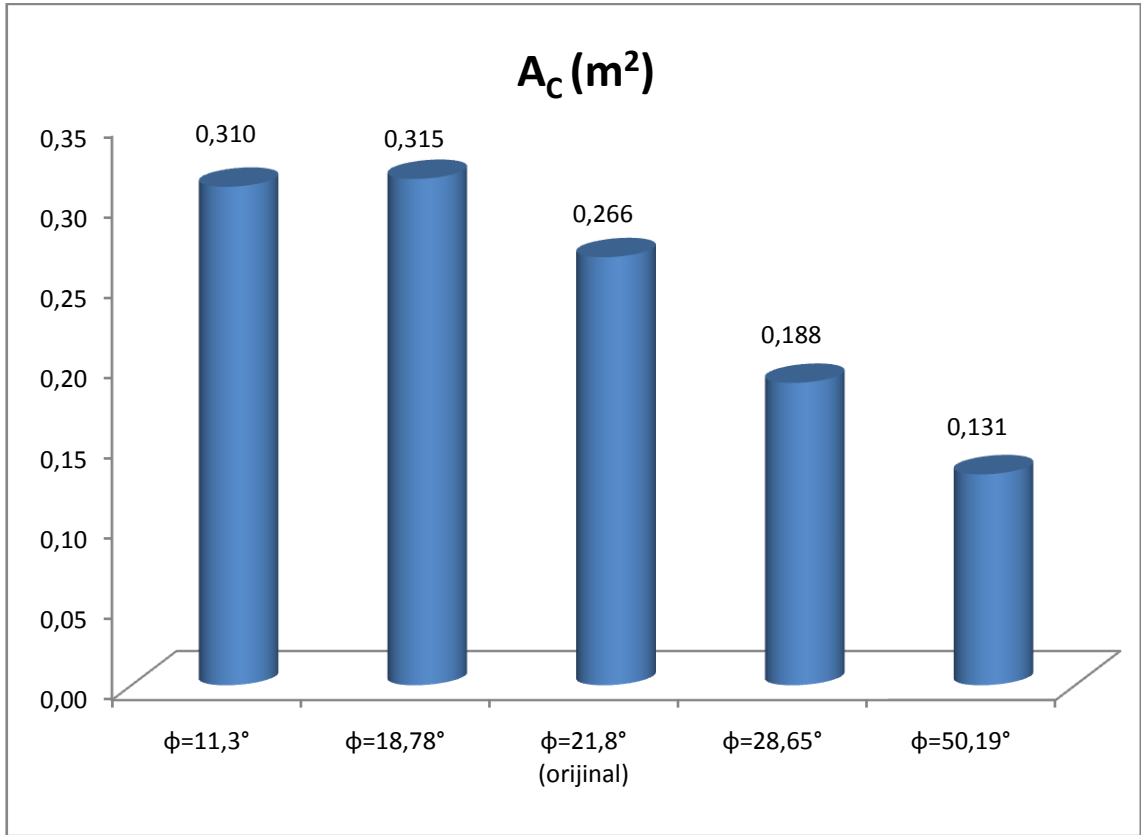
Şekil 6. 11’den görüleceği üzere, hatve oranı arttıkça itme ve tork katsayılarında artma, pervane veriminde ise azalma görülmektedir. Hatve oranı azaldıkça; itme ve tork katsayılarında azalma, pervane veriminde ise artma görülmektedir. En yüksek verim, hatve oranının % 15 azaltılmış olduğu durumda iken, $\eta_o = 0.830$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek verim artışı ise, orjinal pervaneye göre % 6,4 olarak elde edilmiştir. En düşük verim, hatve oranının % 15 artmış olduğu durumda iken, $\eta_o = 0.712$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek verim azalması, orjinal pervaneye göre % 8,8 olarak elde edilmiştir.



Şekil 6. 11 Farklı hatve oranlarında, pervaneye ait performans karakteristikleri ($J=0.704$)

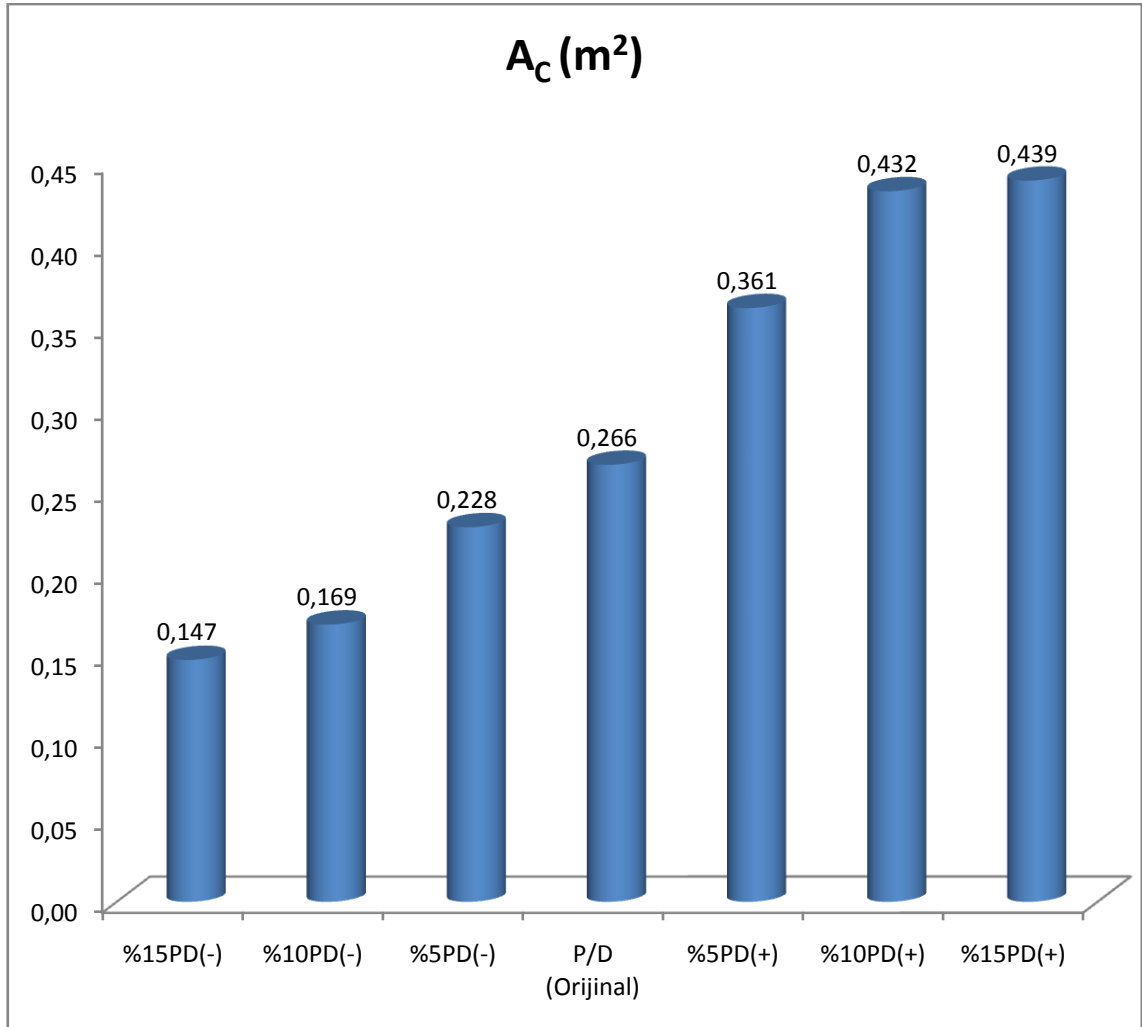
Analiz kapsamında incelenecek kavitasyon kaynaklı gürültü öngörüsü için, daha önce Bölüm 5’te verilen geliştirilmiş Brown formülündeki kavitasyon süpürme alanının (A_c) hesaplanması için denklem (5.13) kullanılmıştır.

Farklı çalıklik açlarına göre yapılan analizler sonucunda elde edilen kavitasyon süpürme alanları Şekil 6.12’ de verilmiştir ($J=0.704$). Bu grafikten, çalıklik açısının artması ile kavitasyon süpürme alanının azaldığı belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 6. 12 Farklı çalıklik açılarında, pervaneye ait tabaka kavitasyonu süpürme alanları ($J=0.704$)

Farklı hatve oranlarına göre yapılan analizler sonucunda elde edilen kavitasyon süpürme alanları ise Şekil 6.13' de verilmiştir ($J=0.704$). Bu grafikten, hatve oranının artması ile kavitasyon süpürme alanının arttığı belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 6. 13 Farklı hatve oranlarında, pervaneye ait tabaka kavitasyonu süpürme alanları ($J=0.704$)

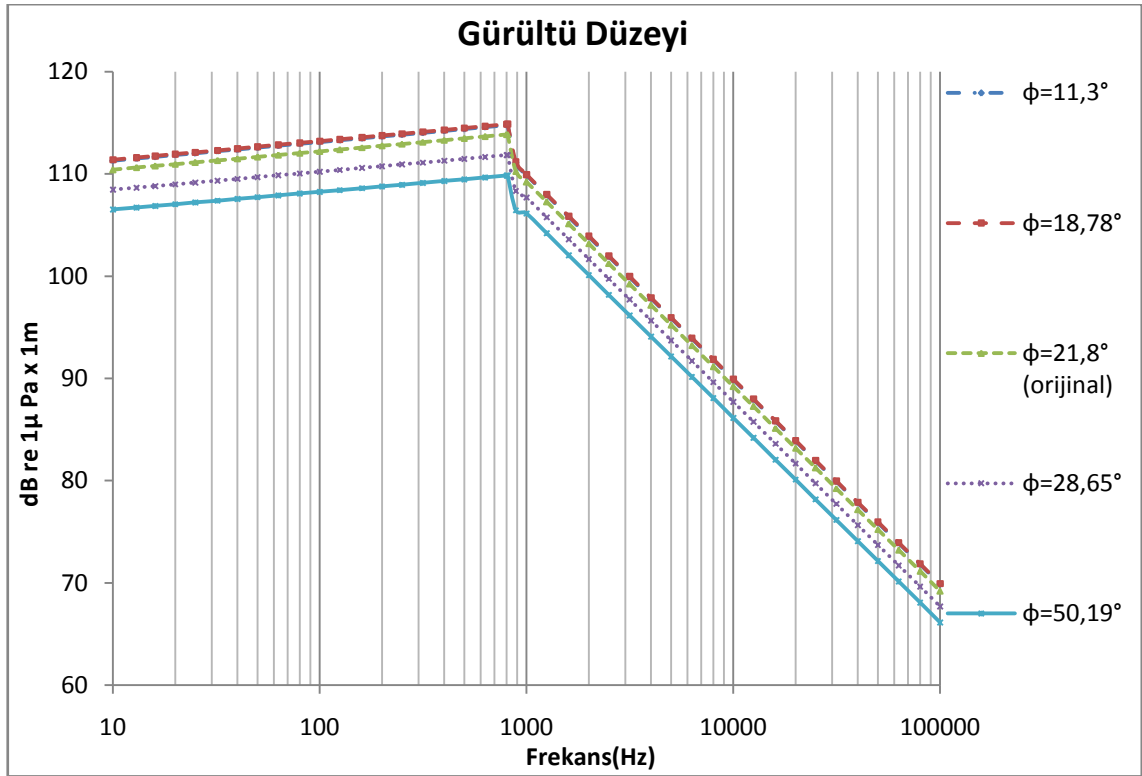
Pervanenin kavitasyon kaynaklı gürültü öngörüsü için, daha önce Bölüm 5'te verilen geliştirilmiş Brown formülü kullanılmıştır. Bu formül içerisinde yer alan uç girdap kavitasyonun etkisini hesaba katmak için, uç girdap kavitasyonu başlangıç anındaki kanat ucu hızı (V_{Tip}) ile devir sayısı (V_{Tip}^i) bilgileri, kaldırıcı yüzey metodu programını kullanarak yapılan analizden elde edilmiştir.

Uç girdap kavitasyonu başlangıç devir sayısı ve kanat ucu hızı bulunurken iteratif bir yöntem uygulanmıştır. Orjinal pervane için, sırasıyla devir sayısı 4,40, 2,20, 2,35 ve 2,30 devir/s alınarak yapılan analizlerde, 4,40 ve 2,35 devir/s devir sayılarında tüm kanat pozisyon açılarındaki uç girdap kavitasyonu var olduğu görülmüştür. 2,20 devir/s devir sayısında, sadece 80° ile 305° kanat pozisyon açılarındaki, 2,30 devir/s devir sayısında ise 240° ile 280° kanat pozisyon açılarındaki uç girdap kavitasyonu meydana gelmediği görülmüştür. Son olarak 2,32 devir sayısında analiz yapılmış ve tüm kanat pozisyon açılarındaki uç girdap kavitasyonu gözlenmiş ve uç girdap kavitasyon başlangıç devir sayısı olarak kabul edilmiştir. Yapılan analizlerden de anlaşılacağı gibi, 2,20 devir/s devir sayısından itibaren devir arttıkça uç girdap kavitasyonunun görüldüğü kanat pozisyon açılarının oranı artmakta ve 2,32 devir/s devir sayısında tüm kanat açılarındaki görülmektedir. Bu devrin üzerinde ise her zaman tüm kanat açılarındaki uç girdap kavitasyonu görülmektedir.

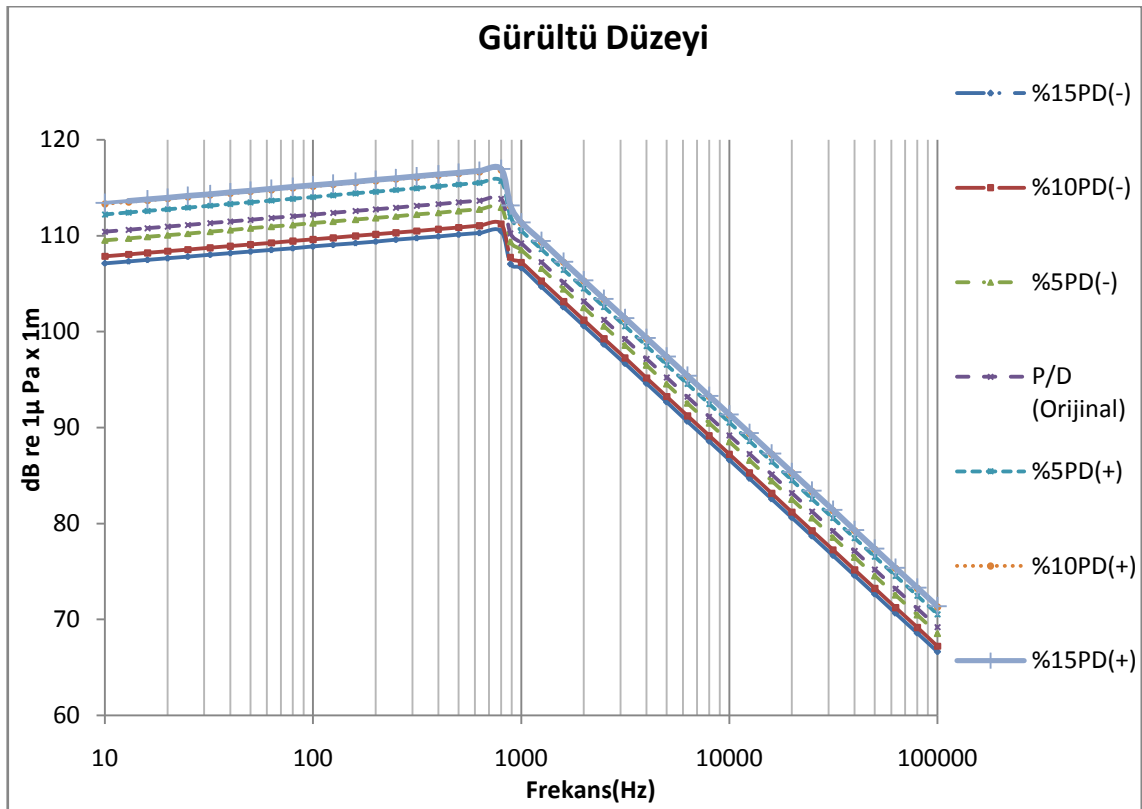
Yukarıda orjinal pervanenin uç girdap kavitasyon başlangıç devir sayısı ve kanat ucu hızının bulunması için ele alınan prosedür, farklı çalıklık açıları ve farklı hatve oranlarına sahip pervane geometrileri içinde yapılarak gerekli olan uç girdap kavitasyonu bilgileri elde edilmiştir.

Denklem (5.14)'te yer alan, ses alıcısının model pervaneden uzaklığı (H_{dist}) değeri; yapılan analiz uygulamalarında 5,51 m olarak alınmıştır.

Gürültü öngörüsü için yapılan analizler, daha önce belirtilen dört farklı çalıklık değerleri ve altı farklı hatve oranlarına göre yapılmıştır ($J=0.704$). Elde edilen sonuçlar Şekil 6.14 ve Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Şekil 6.14'ten görüleceği üzere, çalıklık açısı arttıkça kavitasyon etkisi nedeni ile oluşan gürültünün seviyesi azalmaktadır. Şekil 6.15'te ise hatve oranı arttıkça kavitasyon etkisi nedeni ile oluşan gürültü seviyesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 6. 14 Farklı çalıklık açılarında, kavitasyon kaynaklı oluşan gürültü seviyeleri(J=0.704)

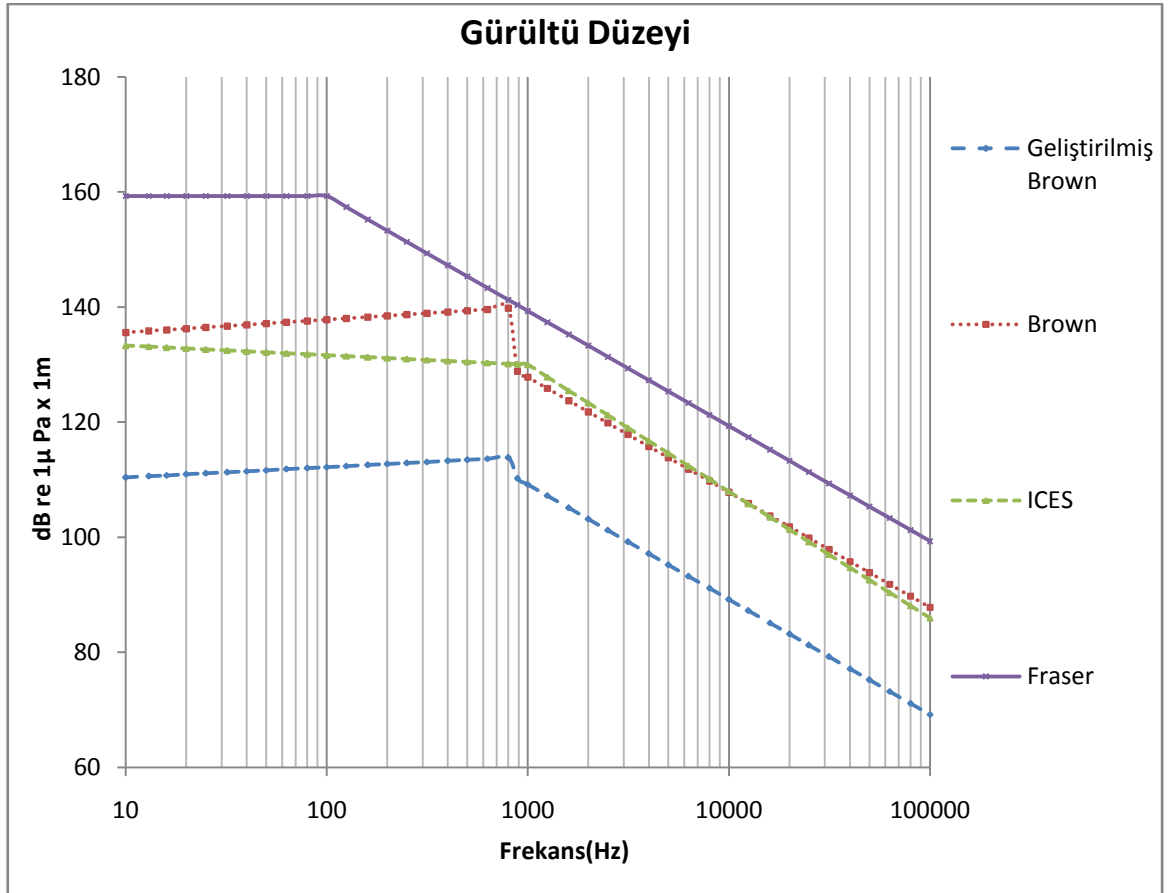


Şekil 6. 15 Farklı hatve oranlarında, kavitasyon kaynaklı oluşan gürültü seviyeleri (J=0.704)

Son olarak, kavitasyon olayına dayalı gürültü öngörülleri açısından karşılaştırma yapabilmek için, literatürde yer alan farklı gürültü tahmini yaklaşımları ele alınmıştır. Bu yaklaşımlarda, orjinal Brown yarı ampirik formülü (denklem (5.12)), ICES tarafından önerilen formül (denklem (6.1)) ve Fraser [20] tarafından verilen formül (denklem (6.2)) kullanılmıştır. Bu karşılaştırma sadece orjinal pervane geometrisi kullanılarak yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar ise Şekil 6.16’da verilmiştir. Grafikte yer alan eğrilerin karakteristiklerinin birbiriyle uyum içinde olduğu görülmektedir. Elde edilen gürültü seviyelerindeki sayısal farklılıkların, önerilen formüllerin ampirik formüller olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

$$L_s = \begin{cases} 135 - 1.66 \log f & 1 \leq f(\text{Hz}) \leq 1000 \\ 130 - 22 \log \left(\frac{f}{1000} \right) & 1000 \leq f(\text{Hz}) \leq 10000 \end{cases} \quad (6.1)$$

$$L_s = \begin{cases} 10 \log \left[\frac{D^6 (60n)^6 Z}{4} \right] - 6 & f \leq 100 \text{ Hz} \\ 10 \log \left[\frac{D^6 (60n)^6 Z}{4} \right] + 34 - 20 \log f & f \geq 100 \text{ Hz} \end{cases} \quad (6.2)$$



Şekil 6. 16 Orjinal pervaneye ait gürültü seviyelerinin farklı yaklaşımlara göre karşılaştırması (J=0.704)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kavitasyon çeşitleri, kavitasyonun fiziği ve etkileri açıklanmaya çalışılmış, gürültü kavramı ve özellikle pervane kaynaklı gürültü konusu ele alınmıştır. Kavitasyon kaynaklı gürültü üzerine literatürde yer alan çalışmalar incelenmiştir. Kavitasyon kaynaklı pervane gürültü öngörüsü için yapılan yaklaşımda Szantyr'ın kaldırıcı yüzey metoduna dayanan ve geliştirilmekte olan bir metot kullanılmıştır. Pervane performansının yanında kavitasyon analizine de imkan veren bu metoda, kavitasyon kaynaklı gürültü öngörüsü için geliştirilmiş Brown metodu dâhil edilmiştir.

Çalışmanın uygulaması olarak, üniform akım alanında çalışan bir gemi pervanesi ele alınmıştır. Farklı çalıklık açıları ve farklı hatve oranlarına göre yeni pervane geometrileri türetilmiştir. Türetilen bu yeni pervanelerin kavitasyon büyüklükleri ve kavitasyona bağlı olarak oluşacak gürültü seviyesi öngörülerini sayısal olarak incelenmiştir. Bu incelemeye ilave olarak performans karşılaştırmaları da yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir:

Çalıklık açısındaki artış ile kanatlarda oluşan kavitasyon alanı ve hacimlerinde genel olarak bir azalmanın olduğu görülmüştür. Ancak yüksek çalıklığın, kavitasyon alan ve hacmini arttırdığı da görülmüştür. Bu nedenle pervane dizaynı sırasında çalıklık parametresinin hem performans hem de kavitasyon yönünden analiz edilerek, çalıklık düzeyinin optimum tutulması gerektiği görülmüştür. Pervane hatve oranındaki artış ile birlikte kavitasyon alan ve hacimlerinde artış görülmüştür. Performans açısından bakıldığında, çalıklık açısındaki artış itme ve tork değerlerinde azalmaya, verimde ise

düşük oranda artışa neden olduğu görülmüştür. Pervane hatve oranındaki artış ile birlikte itme ve tork değerlerinde artış, verimde ise azalma olduğu görülmüştür.

Gürültü açısından bakıldığında, çalıklık açısındaki artış ve hatve oranındaki azalmanın tabaka kavitasyonu alanında azalmaya sebebiyet vermesi ve dolayısı ile gürültü seviyesini de düşürdüğü yapılan analizler sonucu anlaşılmıştır. Kavite kaynağı gürültü düzeylerinin karşılaştırılmasının yapılması amacıyla, literatürde yer alan farklı gürültü tahmini yaklaşımları kullanılmıştır. Buradan elde edilen sonuçların genel itibarı ile birbirleri ile uyum gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Tüm bu elde edilen sonuçlar ışığında, bir gemi pervanesinin dizaynından önce, mutlaka performans verileri, kavite gösterme durumları ve meydana gelecek gürültü hususlarında analizler yapılması ve buna göre pervane üretiminin gerçekleştirilmesi gerektiği söylenebilir. Bu analizlerin yapılabilmesi için, çalışmada kullanılan benzer sayısal yöntemlere dayalı bilgisayar kodlarının veya hesaplamalı akışkanlar dinamiğine dayalı paket programların kullanılması, zaman ve maliyet açısından pervane tasarımcılarına kolaylık sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Carlton, J. S., (1994). Marine propellers and propulsion, Second edition, Butterworth-Heinemann Ltd., Oxford, UK.
 - [2] Franc, J. P. ve Michel, J. M., (2004). Fundamentals of Cavitation, Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, USA.
 - [3] Ross, D., (1976). Mechanics of Underwater Noise, Pergamon Press, Oxford.
 - [4] Korkut, E., ShipHydrodynamics, Lecture Notes of Propulsion Part, [http://160.75.46.2/staff/emin/Lectures/Ship_Hydro/SHIP%20HYDRODYNAMIC_S LECTURE NOTES PART 6 CAVITATION.pdf](http://160.75.46.2/staff/emin/Lectures/Ship_Hydro/SHIP%20HYDRODYNAMIC_S_Lecture_Notes_Part_6_Cavitation.pdf), 16 Mart 2015.
 - [5] Ekinci, S., (2007). Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kaviteasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
 - [6] Cheolsoo P., Hanshin S., Kwangsoo K. ve Woojae S., (2009). "A Study on Propeller Noise Source Localization in a Cavitation Tunnel", Ocean Engineering, 36 (9-10): 754-762.
 - [7] Korkut, E., Atlar, M. ve Odabasi, A.Y., (1999). "Serbest Akım Türbülansının Pervanelerdeki Kaviteasyon Başlangıcının ve Gürültü Üzerindeki Ölçek Etkisi", Gemi İnşaatı ve Deniz Teknolojisi Teknik Kongresi, İstanbul, Türkiye.
 - [8] Zhu Z., Fang S. ve Wang X.,Y.,(2009). "Characteristic Analysis of Unsteady Viscous Flow Around a Cavitating Propeller" Science China Technological Sciences, 53 (7): 1983-1992.
 - [9] Hsiao, C.T. ve Chahine, G.L., (2003). "Effect of Vortex/Vortex Interaction on Bubble Dynamics and Cavitation Noise", CAV2003, Osaka, Japan.
 - [10] Testa, C., Salvatore, F., Ianniello, S. ve Gennaretti, M., (2005). "Theoretical and Numerical Issues for Hydroacoustic Applications of the FfowcsWilliams-Hawkings Equation", Proceeding 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, Monterey, USA.
 - [11] Lee, H., ve Kinnas, S.A., (2005). "A BEM for the Modeling of Propeller Sheet Cavitation Inside a Cavitation Tunnel," Journal of Computational Mechanics, 37 (1): 41-51, December.
 - [12] Chahine, G.L., (2004). "Nuclei Effects on Cavitation Inception and Noise", Proceeding 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, St.John's, Canada.

- [13] Yoshimura, Y. ve 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, 31 (3): 1-9, July.
- [14] Okamura, N. ve Asano, T., (1988). " Prediction of Propeller Cavitation Noise and Its Comparison with Full-Scale Measurements", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, 164: 19-33, December.
- [15] Salvatore, F. ve 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.
- [16] Kanemaru, T. ve Ando, J., (2009). "Numerical Analysis of Steady and Unsteady Sheet Cavitation on Marine Propeller Using a Simple Surface Panel Method (SQCM)", First International Symposium on Marine Propulsors, smp '09 Trondheim, Norway.
- [17] Kuiper, G., (1998). "Cavitation Research and Ship Propeller Design", Applied Scientific Research 58: 33-50.
- [18] Stutz, B., (2003). "Influence of Roughness on the Two-Phase Flow Structure of Sheet Cavitation", Journal of Fluids Engineering, 125 (4): 652, July, France.
- [19] Odabaşı, A., Y., (1986). "State of the Art in Underwater Noise, Part 2: Cavitation Noise", British Maritime Technology Limited, Hydromechanics Division, Computational Hydromechanics Dept., January.
- [20] Fraser, A., J., (1986). "State of the Art in Underwater Noise, Part 3: The Prediction and Minimisation of Propeller Induced Waterborne Noise", British Maritime Technology Limited, Hydromechanics Division, Computational Hydromechanics Dept., February.
- [21] Atlar, M., Takinaci, A., C. ve Korkut, E., (2001). "Cavitation Tunnel Tests for Propeller Noise of a FRV and Comparisons With Full-Scale Measurements".
- [22] Seol, H., Suh ve J.-C ve Lee, S., (2005). "Development of Hybrid Method for The Prediction of Underwater Propeller Noise", Journal of Sound and Vibration, January, Republic of Korea.
- [23] Takinaci, A., C. ve Taralp, T., (2012). "Prediction and Simulation of Broadband Propeller Noise", Journal of Marine Science and Technology, 21 (5): 538-544, August, Turkey.
- [24] Vassenden, J. ve Lovik, A., (1978). "Basic and Applied Aspects of Scaling Cavitation Noise", The Ship Research Institute of Norway, December, Trondheim, Norway.
- [25] Aktaş, B., Türkmen, S., Korkut, E., Fitzsimmons, P. ve Atlar, M., (2014). "Systematic Cavitation Tunnel Tests of a Propeller in Uniform and Inclined Flow Conditions as Part of a Round Robin Test Campaign", A. Yücel Odabaşı Colloquium Series 1st International Meeting - Propeller Noise & Vibration 6th – 7th November 2014, İstanbul, Türkiye.

- [26] Wittekind, D. ve Schuster, M., (2014). "Propeller Cavitation Noise and Background Noise in the Sea", A. Yücel Odabaşı Colloquium Series 1st International Meeting - Propeller Noise & Vibration 6th – 7th November 2014, İstanbul, Türkiye.
- [27] Kowalczyk, S. ve Hoffmann, P., (2014). "Propeller Noise Investigations by Means of Middle Size Cavitation Tunnel Measurements", A. Yücel Odabaşı Colloquium Series 1st International Meeting - Propeller Noise & Vibration 6th – 7th November 2014, İstanbul, Türkiye.
- [28] Özden, M., C., Gürkan, A., Y., Özden, Y., A., Canyurt, T. G. ve Korkut, E., (2014). "Underwater Radiated Noise Prediction for a Submarine Propeller in Different Flow Conditions", A. Yücel Odabaşı Colloquium Series 1st International Meeting - Propeller Noise & Vibration 6th – 7th November 2014, İstanbul, Türkiye.
- [29] Szantyr J.A., (2008). "The Crucial Contemporary Problems of The Computational Methods for Ship Propulsor Hydrodynamics", Gdańsk University of Technology, Archives Of Civil and Mechanical Engineering", VIII (1), Gdańsk University of Technology, Poland.
- [30] Çelik, F., Kavitasyon, Kavitasyonun Etkileri, Kavitasyonun Başlangıcı, Kavitasyon Kontrolü, <http://www.yildiz.edu.tr/fcelik/dersler/gemidirenci/PDF/9.%20Kavitasyon.pdf>, 16 Mart 2015.
- [31] Knapp, R.T., Daily, J.W. ve Hammitt, F.G., (1970). Cavitation, McGraw-Hill, NewYork.
- [32] Sampson, R., Resistance&Propulsion(I) MAR 2010 Cavitation, <http://research.ncl.ac.uk/cavitation/archive/MAR2010%20-%20Cavitation.pdf>, 16 Ekim 2011.
- [33] T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, (2013), Gemi Yapımı, Gemi Pervane Donanımı, Ankara.
- [34] Tachmindji, A., J. ve Morgan, W., B., (1957). The Design And Performance of Supercavitating Propellers, David Taylor Model Basin Washington D.C.
- [35] Seber, S., (2011)., Gemi Pervane Kesitlerine Ait Kavitasyon Kovalarının Sayısal Hesabı, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [36] Burrill, L.C., Emerson, A., Propeller cavitation: further tests on 16in. propeller models in the King's College Cavitation Tunnel. Trans. NECIES, 195, 1978.
- [37] Norwegian Council for Technical and Scientific Research (NTNF), "Noise Control on Ships", Blindern, Oslo 3., Norway, 15 April 1975.
- [38] Jenkins, C.J., (1988). Optimising propellers for noise. Advances in Underwater Technology, Ocean ScienceandOffshoreEngineering, 15,Tech. Common to Aero and Marine Engineering.
- [39] Fitzpatrick, H.M. ve Strasberg, M., (1956). Hydrodynamic sources of sound. Proc. 1st Symp. on Naval Hydrodyn., Washington, DC, September.

- [40] Kooij, J. van der., (1986). Sound generation by bubble cavitation on ship model propellers; the effects of leading edge roughness, Proc. 2nd Int. Symp. on Cavitation and Multiphase Flow Noise, ASME, December.
- [41] Matusiak, J., (1992). Pressure and noise induced by a cavitating marine screw propeller, Ph.D. Thesis, VTT, Espoo.
- [42] Choi, J., Chang, N., Yakushiji, R., Dowling, D.R. ve Ceccio, S.L., (2006). "Dynamics and noise emission of vortex cavitation bubbles in single and multiple vortex flow", 6th Int. Symp. on Cavitation (CAV2006), Wageningen, September.
- [43] Sunnersjö, S., (1986). Propeller noise prediction, SSPA Highlights, 2.
- [44] Szantyr J.A. ve Glover E.J.,(2005)., Emerson Cavitation Tunnel Report, 3 (90): 23-24.
- [45] Güner, M., Kükner, A. ve Baykal, M.A.,(1999). Gemi Pervaneleri ve Sevk Sistemleri, 1610 ve Birinci Baskı, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Ofset Baskı Atölyesi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Özer ATA
Doğum Tarihi ve Yeri : 17.07.1983 / İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : ozer.ata@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Makine Müh.	Deniz Harp Okulu	2004
Lise	Askeri Lise	Deniz Lisesi	2000

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2004-2015	Deniz Kuvvetleri Komutanlığı	Muhtelif Gemi Görevleri (2nci Çarkçı vb.)