

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UNİFORM OLMAYAN AKIMDA ÇALIŞAN GEMİ PERVANELERİNDE TABAKA
KAVİTASYONUNUN İNCELENMESİ**

ELİS PEHLİVANOĞLU

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

DANIŞMAN
YRD. DOÇ.DR. SERKAN EKİNCİ

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UNİFORM OLMAYAN AKIMDA ÇALIŞAN GEMİ PERVANELERİNDE TABAKA
KAVİTASYONUNUN İNCELENMESİ**

Elis PEHLİVANOĞLU tarafından hazırlanan tez çalışması 08.02.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Serkan EKİNCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Serkan EKİNCİ
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Muhsin AYDIN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Sevilay CAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın başlamasına ve ilerlemesine yardımcı olan Yrd. Doç. Dr. Serkan EKİNCİ'ye, çalışmada devamlı destek veren Sercan EŞİN'e ve manevi desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Şubat, 2012

Elis PEHLİVANOĞLU

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	vi
KISALTMA LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ.....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ	xiii
ÖZET.....	xiv
ABSTRACT	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	11
1.3 Hipotez	11
BÖLÜM 2	
KAVİTASYON	12
2.1 Kavitasyon Çeşitleri.....	13
2.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştığı Konuma Göre Kavitasyon Çeşitleri.....	13
2.1.1.1 Sırt Kavitasyonu.....	13
2.1.1.2 Yüz Kavitasyonu	14
2.1.2 Fiziksel Görünümlerine Göre Kavitasyon Çeşitleri	15
2.1.2.1 Uç (Tip) ve Göbek (Hub) Girdap (Vortex) Kavitasyonu	15
2.1.2.2 Kabarcık (Bubble) Kavitasyonu.....	16
2.1.2.3 Tabaka (Sheet) Kavitasyonu	17
2.1.2.4 Bulut (Cloud) Kavitasyonu.....	18
2.1.2.5 Kök (Root) Kavitasyonu	18
2.1.2.6 Pervane-Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV).....	19
2.2 Kavitasyon Etkileri	20

2.2.1	Perfomans Kaybı (İtme Kaybı)	20
2.2.2	Gürültü.....	21
2.2.3	Titreşim.....	21
2.2.4	Erozyon	21
2.3	Kavitasyon Başlangıcı	22
BÖLÜM 3		
DÜZENSİZ AKIM ALANINDA ÇALIŞAN PERVANELER İÇİN KALDIRICI YÜZEY METOTU.....		24
3.1	Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli.....	24
3.1.1	Kinematik Sınır Şartı	26
3.2	Pervane Kanadı Kaldırıcı Yüzey Modeli.....	27
3.2.1	İndüklenmiş Hızların Hesaplanması.....	31
3.2.2	Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi.....	33
3.2.2.1	Anahtar Kanat Başlangıç Konumunda iken Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi (İlk Yaklaşım).....	33
3.2.2.2	Anahtar Kanadın Herhangi Bir Konumunda Pervane Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi	34
3.2.3	Değişken Bölgede Serbest Girdapların Yenilenmesi.....	35
3.2.4	Basınç Dağılımlarının Hesaplanması.....	36
3.2.5	Pervane Kanadında Tabaka Kavitasyonunun Tesbiti ve Analizi	37
3.2.6	Pervane Üzerindeki Kuvvet ve Moment Bileşenlerinin Hesaplanması	43
BÖLÜM 4		
SAYISAL BULGULAR VE YORUMLAR		46
BÖLÜM 5		
SONUÇ VE ÖNERİLER		74
KAYNAKLAR.....		76
EK-A		
P2 PERVANESİNE AİT PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ ANALİZ SONUÇLARI.....		79
EK-B		
P2 PERVANESİNE AİT KAVİTASYON ANALİZ SONUÇLARI		83
ÖZGEÇMİŞ.....		90

SİMGE LİSTESİ

$\bar{B}_p$	Bağlı girdap elemanı
C	Kontrol noktası
C_D	Kesit direnç katsayısı
C_P	Basınç katsayısı
D	Pervane çapı
F	Kuvvet
ϕ	Pervane kanadının çalıklık açısı
g	Yerçekimi ivmesi
h	Kontrol noktasının derinliği
J	İlerleme katsayısı
J_s	Gemi hızına bağlı ilerleme katsayısı
K_t	Boyutsuz itme katsayısı
$\bar{L}$	Girdap elemanının uzunluk vektörü
K_q	Boyutsuz tork katsayısı
M	Moment
n	Pervane devir sayısı
$\vec{n}$	Yüzeye dik birim vektör
p_a	Atmosferik basınç
p_c	Kritik buhar basıncı
P	Hatve miktarı

P_v	Suyun buharlaşma basıncı
p_∞	Sonsuzdaki basınç
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
$ \overline{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_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

$\vec{V}$	Pervaneye gelen akımın hızı
V_A	Pervane ilerleme hızı
V_{DF}	Kavitasyon yüzeyinin deformasyon hızı
V_{IN}	Kaynak elemanına gelen ortalama akım hızı (pervane dönmesi dahil)
V_{kaynak}	Kaynak elemanına gelen akım hızı
$\vec{V}_Q$	Kaynak elemanı tarafından indüklenen hız
V_∞	Sonsuzdaki akım hızı
V_i	Söz konusu olan noktada bileşke akım hızı (kontrol noktasındaki)
$\vec{V}_\Gamma$	Girdap elemanı tarafından indüklenen hız
V_S	Gemi ilerleme hızı (dizayn hızı)
$\overline{W}_p$	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	Anahtar kanat üzerindeki yük dağılımını temsil eden hız potansiyeli
φ_c	Kavitasyonun süreksiz davranışını temsil eden hız potansiyeli

KISALTMA LİSTESİ

BEM	Boundary Element Method
CFD	Computational Fluid Dynamics
CPP	Controllable Pitch Propeller
DTMB	David Taylor Model Basin
INSEAN	Instituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale Italian-Ship Model Basin
MARIN	Maritime Research Institute Netherlands
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PHV	Propeller Hull Vortex
PIV	Particle Image Velocimetry
RANS	Reynolds Averaged Navier-Stokes
TVD	Total Variation Diminishing
ENSTA	École Nationale Supérieure de Techniques Avancées

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1 Kaynama ve kavitasyon(soğuk kaynama)	12
Şekil 2. 2 Sırttaki kavitasyon bölgesi	13
Şekil 2. 3 Giriş ucu civarında oluşan sırt kavitasyonu	14
Şekil 2. 4 Çıkış ucu civarında oluşan sırt kavitasyonu	14
Şekil 2. 5 Yüzdeki kavitasyon bölgesi	15
Şekil 2. 6 Yüz kavitasyonu	15
Şekil 2. 7 Uç girdap kavitasyonu	16
Şekil 2. 8 Göbek girdap kavitasyonu	16
Şekil 2. 9 Kabarcık kavitasyonu	16
Şekil 2. 10 Sabit ve hareketli kavitasyon(kavite)	17
Şekil 2. 11 Tabaka kavitasyonu	18
Şekil 2. 12 Bulut kavitasyonu	18
Şekil 2. 13 Kök kavitasyonu	19
Şekil 2. 14 PHV kavitasyonu	19
Şekil 2. 15 Fiziksel görünüşlerine göre formlarının oluşumu	20
Şekil 2. 16 Artan devir sayısı ile kavitasyon türlerinin oluşumu.....	20
Şekil 2. 17 Bir pervanede kavitasyonun neden olduğu erozyon örneği.....	22
Şekil 2. 18 Düzenli akış içerisindeki iki boyutlu bir kanat kesiti	19
Şekil 3. 1 Pervane kanadı kaldırıcı yüzey modeli	28
Şekil 3. 2 Kaldırıcı yüzey modeline ait koordinat sistemi	30
Şekil 3. 3 Bir girdap/kaynak elemanının kontrol noktasında indüklediği hız	32
Şekil 3. 4 Değişken serbest girdap bölgelerinin yenilenmesi	36
Şekil 3. 5 Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli.....	40
Şekil 3. 6 Tabaka kavitasyon modeli.....	42
Şekil 3. 7 Pervane kanadına etkiyen kuvvet ve moment bileşenleri.....	43
Şekil 4. 1 P1 pervanesine ait nominal iz dağılımı	48
Şekil 4. 2 Rhinoceros programında çizilen P1 pervanesi	49
Şekil 4. 3 P1 pervanesinin $r/R=0.724$ kesitinde ve $\theta=0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	51
Şekil 4. 4 P1 pervanesinin $r/R=0.724$ kesitinde ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	51
Şekil 4. 5 P1 pervanesinin $r/R=0.928$ kesitinde ve $\theta=0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı.....	52

Şekil 4. 6	P1 pervanesinin $r/R=0.928$ kesitinde ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı	52
Şekil 4. 7	P1 pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R=0.724$ ve $x/c=0.1$)	53
Şekil 4. 8	P1 pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R=0.724$ ve $x/c=0.4$)	53
Şekil 4. 9	P1 pervanesinin $0^\circ-60^\circ$ arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metotundan elde edilen sırtta ve yüzde basınç dağılımları	54
Şekil 4. 10	P1 pervanesinin $90^\circ-180^\circ$ arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metotundan elde edilen sırtta ve yüzde basınç dağılımları ..	55
Şekil 4. 11	P1 pervanesinin değişik kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metotundan elde edilen sırtta tabaka kavitasyon formları	56
Şekil 4. 12	P2 pervanesine ait nominal iz dağılımı	60
Şekil 4. 13	Rhinoceros programında çizilen çeşitli çalıklık açılarına sahip P2 pervaneleri	61
Şekil 4. 14	Farklı çalıklık açılarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu formları	63
Şekil 4. 15	Farklı hatve oranlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu formları.....	64
Şekil 4. 16	Farklı sehim miktarlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu formları ..	65
Şekil 4. 17	Farklı çalıklıkta P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu hacimleri	66
Şekil 4. 18	Farklı hatve oranlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu hacimleri....	66
Şekil 4. 19	Farklı sehim miktarlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu hacimleri	67
Şekil 4. 20	Farklı çalıklık açılarında P2 pervanesinin performans karakteristikleri	68
Şekil 4. 21	Farklı hatve oranlarında P2 pervanesinin performans karakteristikleri.....	69
Şekil 4. 22	Farklı sehim miktarlarında P2 pervanesinin performans karakteristikleri ..	70
Şekil 4. 23	P2 pervanesinin çalıklık açısı değişiminin itme katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$).....	70
Şekil 4. 24	P2 pervanesinin çalıklık açısı değişiminin tork katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$).....	71
Şekil 4. 25	P2 pervanesinin hatve oranının değişiminin itme katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$).....	71
Şekil 4. 26	P2 pervanesinin hatve oranının değişiminin tork katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$).....	72
Şekil 4. 27	P2 pervanesinin sehim miktarının değişiminin itme katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$)	72
Şekil 4. 28	P2 pervanesinin sehim miktarının değişiminin tork katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$)	73

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 4. 1 P1 pervanesine ait kanat geometrisi	47
Çizelge 4. 2 P1 pervanesine ait karakteristikler	48
Çizelge 4. 3 P1 pervanesine ait eksenel boyutsuz hız dağılımı $(1-w_x)=V_x/V$	50
Çizelge 4. 4 P2 pervanesine ait kanat geometrisi	57
Çizelge 4. 5 P2 pervanesine ait karakteristikler	58
Çizelge 4. 6 P2 pervanesine ait eksenel boyutsuz hız dağılımı $(1-w_x)= V_x/V$	59
Çizelge 4. 7 Orjinal P2 pervanesinin yeni çalıklık miktarları.....	61
Çizelge 4. 8 Orjinal P2 pervanesinin yeni hatve oranları	62
Çizelge 4. 9 Orjinal P2 pervanesinin yeni sehim miktarları.....	62

**UNİFORM OLMAYAN AKIMDA ÇALIŞAN GEMİ PERVANELERİNDE TABAKA
KAVİTASYONUNUN İNCELENMESİ**

Elis PEHLİVANOĞLU

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Serkan EKİNCİ

Gemi pervanelerinde görülen kavitasyon, pervanelerin hidrodinamik performansına ve çalışma ömrüne etki eden, gemi bünyesinde titreşimlere ve su altında gürültüye neden olan bir akışkanlar mekaniği olayıdır.

Bu nedenle pervane dizaynı sırasında, kavitasyonun pervaneye ve çevreye olan olumsuz etkilerini azaltmak büyük önem taşımaktadır. Bu ise, kavitasyonun ne zaman ortaya çıkabileceğini önceden tahmin etmek için hassas bir yöntemin gerekli olduğunu göstermektedir. Kavitasyon analizlerinin deneysel ortamlarda yapılması zaman ve maliyet gerektirmektedir. Bu nedenle özellikle son zamanlarda bilgisayar teknolojisinin gelişimine bağlı olarak deneysel yöntemlere alternatif olan değişik sayısal modelleme teknikleri geliştirilmiştir.

Gemilerde görülen kavitasyon türleri arasında özellikle tabaka kavitasyonu, kavitasyon hacimlerinin zamana bağlı olarak değişmesi nedeni ile çoğunlukla şaft aracılığı ile gemi bünyesinde titreşimlere ve pervane kanatları üzerinde erozyona neden olmaktadır. Bu nedenle mevcut çalışmada bu kavitasyon türü, söz konusu modelleme tekniklerinden biri olan “Kaldırıcı Yüzey Metodu”na dayalı olarak incelenecektir.

Bu çalışma ile gemi pervanelerinin imalat öncesi tabaka kavitasyonu ve performansının kontrolünün kolay ve hızlı bir şekilde yapılması amaçlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kavitasyon, tabaka kavitasyonu, kaldırıcı yüzey metodu, gemi pervanesi.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF SHEET CAVITATION ON SHIP PROPELLER OPERATING IN NON-UNIFORM FLOW

Elis PEHLIVANOĞLU

Department of Naval Architecture and Marine Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assist. Prof. Dr. Serkan EKİNCİ

Cavitation in ship propellers is a fluid physical phenomenon which affects the hydrodynamics performance and life span of ship propellers and causes underwater noise and vibration on hull. Therefore, it is important to reduce the cavitation's effects to environment and propeller during design stage of ship propeller. It is showed that a precision method is necessary to determine when the cavitation can occur. Making cavitation analysis requires time and cost in an experimental environment. Thereof, different numerical modelling methods which is an alternative to experimental methods, are developed as the development of computer technology correspondingly.

Due to time-depent changes of cavitation volumes, sheet cavitation mostly causes vibration on hull and an erosion on propeller blades. For this reason in this study, sheet cavitation will be investigated based on lifting surface method which is one of the mentioned modelling methods.

With this study, an easy and fast control of the sheet cavitation and propeller performance before ship propellers production is aimed.

Key words: Cavitation, sheet cavitation, lifting surface method, ship propeller

BÖLÜM 1

GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

En genel anlamda kavitasyon, çok düşük basınçlar altında bir sıvı ortamın bozulması olarak tanımlanabilir. Bu özelliği ile kavitasyon, sıvının mevcut olduğu tüm mekanik alanlar ile ilişkili olup, statik veya hareketli bir sıvının bulunduğu ortamlarda meydana gelir. Statik ortamda kavitasyon olayına örnek olarak içi sıvı ile dolu bir depo verilebilir. Bu sıvının serbest yüzeyine dalgalı bir basınç alanı uygulandığında, şayet dalgalanma genliği yeterince büyük ise sıvı hacmi içerisinde birtakım kabarcıklar görülebilir. Kavitasyonun bu tipi akustik kavitasyon olarak bilinmektedir.

Ancak mühendislik alanında, sıvının hareketli olduğu hidrodinamik kavitasyon ile daha fazla karşılaşılmaktadır. Hidrodinamik kavitasyon, pervane kanatları etrafındaki akışı, hidrolik valfler gibi dar kanaldaki akışları, venturi nozulleri içerisindeki akış, motorlarda yakıt püskürtmesi için kullanılan volumetrik pompalardaki akış vb. örnekleri içerir. Hemen hemen hareketsiz bir sıvı içerisinde meydana gelebilecek kavitasyona uç bir örnek olarak; sakin su içinde keskin kenarlara sahip katı bir cismin (bir disk gibi) ani ve hızlı bir şekilde hareketlenmesi verilebilir. Bu durumda, sıvının kendi hızı ihmal edilebilir olduğu halde bile cismin kenarlarında ani olarak kavitasyon kabarcıkları görülebilir.

Gemi mühendisliğini ilgilendiren kavitasyon problemleri arasında pervane, dümen ve hidrofoil tekne ayaklarında görülen kavitasyon çeşitleri yer almaktadır. Bu bağlamda, üzerinde en çok çalışılan hidrodinamik olay, gemi pervaneleri üzerinde görülen kavitasyon olayıdır. Bu yönü ile kavitasyon, gemi pervanelerinin gürültüsünü ve gemi

bünyesinde neden olduğu titreşimleri etkileyen akışkanlar mekaniğine ait fiziksel bir olgu olarak dikkat çekmektedir.

Kavitasyon olgusunun tarihine bakıldığında izlerinin 18 yy. ortalarına kadar uzandığı görülmektedir. İlk olarak İsviçreli matematikçi Euler, 1754 yılında yayınlamış olduğu bir makalede, o dönemin su çarklarında meydana gelen ve bu çarkların performansına da etki eden kavitasyon kavramını ifade etmiştir.

Gemi mühendisliği ile ilgili kavitasyon tarihine bakıldığında ise 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.

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, akımda meydana gelen bozulmalar nedeni ile ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. R.E. Froude’un önerisiyle bu zararlı pervane olayına Latince “Cavus” kelimesinden türeyen “Cavitation (Kavitasyon)” adı verilmiştir.

Daha sonra 1895 yılında Charles Parsons, buhar türbinli bir gemi olan “Türbinia”nın denemeleri esnasında da Daring’de ortaya çıkan kavitasyon olayını görmüştür. Bu gemi ile ilgili olarak değişik testler yapmış ve ilk kavitasyon tüneline icat etmiştir. Bu tünel, 2 inç çapa sahip pervanelerin test edilmesine olanak sağlıyordu. Ancak, bu sınırlama Parsons’u 15 yıl sonra 12 inç 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 shaft hızlarında bile kavitasyonu gözlemlemek mümkün olmuştur.

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.

Denizcilik alanında kullanılan kaldırıcı yüzeylerde (hidrofoil/pervane) kavitasyonu sayısal olarak analiz etmek için kullanılan sayısal metotları; kaldırıcı yüzey metotları (lifting surface methods), panel metotları (panel methods) ve hesaplamalı akışkan dinamiği (CFD) metotları olmak üzere üç grupta toplamak mümkündür. Bu metotlar ile ilgili ayrıntılı bilgilere ve literatüre [1] numaralı kaynaktan ulaşılabilir.

Kavitasyon'un sayısal olarak analizinde kullanılan bu metotlar arasında bulunan Kaldırıcı yüzey metotlarında genel olarak pervanelerin kanat kesitleri (veya foil kesiti) her bir kanat kesitinin sehim hattı üzerinde sonsuza doğru uzanan ince bağlı girdap tabakası olarak temsil edilmektedir. Kanat üzerinde radyal ve kort yönünde girdap dağılımları yerleştirilmektedir. Kaldırıcı yüzey metotunun ilk uygulamalarında girdap dağılımları sadece sehim hattı boyunca yerleştirilerek kaldırıcı hat (lifting line) probleminden elde edilen ve radyal olarak değişken olan bağlı sirkülasyon bu şekilde dağıtılarak pervane kanadı temsil edilirken, daha sonra geliştirilen yöntemlerde bu girdapların yerine kavitasyon öngörüsünde yüzey basınçlarını daha doğru bir şekilde hesaplamak amacıyla kanat kortları üzerinde kaynak-kuyu dağılımları yerleştirilmiştir. Böylece hem kanat etrafında meydana gelen bağlı sirkülasyon hem de kanat kalınlıkları temsil edilmiştir.

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

Analiz hesaplarında ise durum dizayn hesaplarındakinden daha farklıdır. Çünkü pervane geometrisi tamamen bilinmektedir. Analiz hesabı daimi ve daimi olmayan akım durumundaki çözümler olmak üzere iki kısımda uygulama alanı bulmaktadır. Daimi akım durumundaki denklemler dizayn problemindeki denklemler ile aynı şekilde

kullanılırlar. Dizayn hesaplamalarından bilinen bir sirkülasyon dağılımı tarafından indüklenen hızı veren tek katlı integral bu analiz hesaplamalarında bir integral denklem halini almaktadır. Bu denklem ise, sayısal olarak çözülmektedir (Carlton,1994). Daimi olmayan pervane akışlarında ise çözüm, kanat izinde takip eden girdapların bulunmasından dolayı biraz daha karmaşık bir durum arz etmektedir[1].

Söz konusu analiz yöntemlerinden elde edilen sonuçların, deneysel yöntemlerden elde edilen sonuçların yerine geçebilecek, zaman ve maliyet açısından tasarruf sağlayacak düzeyde olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir.

Mueller ve Kinnas [2] çalışmalarında, eksenel simetrik akım ortamında çalışan bir pervane üzerinde zamana bağlı olarak gelişen kavitasyon analizini sonlu elemanlar yöntemini kullanarak incelemişlerdir. Yöntem, kanat kesitinde kavitasyonun ayrılma noktasını tahmin edebilecek düzeyde bir algoritma şeklinde verilmiştir. Teorik olarak elde edilen sonuçların MIT’de deneysel ortamda elde edilen sonuçlar ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Yuka Iga vd. [3] çalışmalarında, iki boyutlu daimi olmayan kavitasyon akışını kat kat sıralanmış hidrofoiller üzerinde sayısal olarak hesaplamışlardır. Kavitasyonun geçiş bölgesi içindeki koşulda, tabaka kavitasyonunda meydana gelen kararsızlık durumu üzerinde odaklanmış ve kavitasyonun ayrılma noktasının mekaniğini incelemişlerdir. Kavitasyon akımını analiz edebilmek için TVD-MacCormack şemasını(sıkıştırılabilir iki fazlı gaz-sıvı ortamın homojen bir modelini kullanan) uygulamışlardır. Bu yöntem daimi olmayan, kavitasyon gösteren/göstermeyen tüm akım alanlarını analiz etmeye imkân sağlamaktadır. Elde edilen sayısal sonuçlardan tabaka kavitasyonunun ayrılma olayında en az iki mekanizmanın mevcut olduğu görülmüştür. Bu mekanizmalardan ilki olan re-entrant jetin kavitasyonun ayrılma olayında, diğeri kavitasyon içinde yayılan basınç dalgalarının ise kavitasyon yüzey dalgalarıyla birlikte ayrılma olayınının başka bir çeşidinin ortaya çıkmasında rol oynadığı görülmüştür.

Kinnas vd. [4] çalışmasında, gemi pervane kanatları üzerinde daimi olmayan tabaka kavitasyonunun çok yaygın olarak meydana geldiğini tespit etmiştir. Bu çalışmada, eksenel simetrik ortamda çalışan bir pervane etrafındaki daimi olmayan kavitasyonlu akımı çözmek için kaldırıcı yüzey ve panel metodu kullanılmıştır. Zamana bağlı olarak

değişen kavitasyon tabakasının boyu ve kalınlığı iteratif bir metot kullanarak belirlenmiştir. Kavitasyon tabakasına ait ayrılma noktasının yeri ise, yine iteratif bir yöntem ile düzgün bir ayrılma kriteri kullanarak belirlenmiştir. Belirli bir çapa sahip olan gelişmiş bir girdap kavitasyon modeli, pervane kanadının uç kısmında kullanılmış ve iz geometrisi, tamamen daimi olmayan bir iz düzenleme prosesi kullanarak belirlenmiştir. İki metottan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

B. Stutz [5] 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 ve kavitasyonu devam ettirmek için gerekli buhar üretim miktarı tespit edilmiştir. Kavitasyon tüneline duvar basınç ölçümleri ve görselleştirme teknikleri momentum dengesini sağlamak için kullanılmıştır. İki fazlı içakış üzerinde, pürüzlülük ve kavitasyon altında konumlanmış uzak bir bölgedeki geometrinin etkisi incelenmiştir.

Young ve Kinnas [6] çalışmasında, eksenel simetrik akım ortamında çalışan süperkavitasyonlu pervanelerin sayısal modeli için üç boyutlu bir sınır eleman metotunu kullanmışlardır. Bu yöntem daha önce, klasik pervaneler üzerinde meydana gelen daimi olmayan tabaka kavitasyonunun öngörüsü için geliştirilmiştir. Bu çalışmada, süperkavitasyonlu pervanelerin kavitasyon üzerindeki davranışını hesaba katmak için, belirli bir kalınlığa sahip, çıkış uçlarının gerisinde oluşan ayrılmış akımı modellemek için genişletilmiş ve metotun yakınsaması incelenmiştir. Sayısal olarak elde edilen sonuçlar, deneysel ölçümlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Lee ve Kinnas [7] çalışmasında, daha hızlı ve daha büyük gemilere talebin artmasından dolayı, gemi pervanelerinin kanatlarında tabaka ve uç girdap kavitasyonunun daha sık olarak oluştuğu belirtilmiştir. Bu iki tip kavitasyonun pervane performansına ve gemi bünyesinde meydana getirdiği basınç dalgalanmalarına neden olduğu vurgulanmıştır. Bundan dolayı çalışmada, daimi olmayan tabaka kavitasyonunu (kısmi ya da süperkavitasyonlu) ve gelişmiş uç girdap kavitasyonunu modelleyebilmek için bir sınır eleman metodu kullanılmıştır. Kavitasyon tabakasının boyu ve kalınlığı, kavitasyon yüzeyindeki dinamik ve kinematik sınır koşullar sağlanarak belirlenmiştir. Metotun

sayısal davranışı; iki boyutlu uç girdap kavitasyonu, üç boyutlu hidrofoil ve eksenel simetrik akıma maruz kalmış bir pervane için araştırılmıştır. Çalışmanın sonunda, sayısal öngörüler ile deneysel ölçümlerden elde edilen karşılaştırmalar sunulmuştur.

Vaz G. vd. [8] çalışmasında, kavitasyon gösteren gemi pervanelerinin analizi için geliştirilmekte olan üç boyutlu sınır elemanı metotundan elde edilen sonuçları sunmuşlardır. Tabaka kavitasyonun matematiksel model teorisini vermişlerdir. Hem daimi kavitasyon göstermeyen, hem de daimi olmayan kavitasyonlu akım doğrulanması ve ispat edilmesi için sonuçlar vermişlerdir. Kavitasyon göstermeyen akım için metotun doğruluğu, elipsoit bir yapı üzerindeki analitik çözümden elde edilen sonuçlar kullanılarak yapılmıştır. Yine aynı akım koşulu için basınç dağılımlarının doğrulanması ise DTMB P4119 pervanesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Kavitasyonlu akım için ise; sayısal modeldeki grid miktarı arttırılarak sayısal sonuçlar elde edilmiştir. Açık su koşullarındaki deneysel veriler ile sayısal sonuçları karşılaştırmak için iki adet pervane kullanılmıştır(MARIN S pervanesi ve INSEAN E779A pervanesi). Çalışmanın sonunda, değişik ilerleme katsayıları ve kavitasyon sayılarında her iki pervanenin deneysel sonuçları ile hesaplanan kavitasyon formlarının uyumlu olduğu gösterilmiştir.

Coutier-Delgosha vd. [9] çalışmalarında, kavitasyon akımının daimi olmayan yapısını deneysel ve sayısal yöntemler ile araştırmışlardır. ENSTA Paris Tech kavitasyon tüneline yapılan deneylerde, iki boyutlu foil kesitinin sırt tarafındaki tabaka kavitasyonun dinamiğini incelemişlerdir. Çeşitli akım koşullarını; basınç, akım hızı ve foil kesitinin hücum açısını değiştirerek incelemişlerdir. Buhar fazının hacimsel oranda yüksek frekanslı yerel ölçümlerini, bir X-ışını emme yöntemi ile sıvı/buhar karışımı içinde yapmışlardır. Sayısal yaklaşım, iki fazlı akım için denge denklemlerinin bir makroskobik formülüne dayanmaktadır. Araştırmacılar bu formülasyon için gerekli varsayımları detaylandırmışlar ve kavitasyon akımlarını simüle etmek için kullanılan hemen hemen tüm modeller için bu formülasyonun ortak olduğunu göstermişlerdir. Sayısal sonuçlar ile deneysel sonuçları karşılaştırmışlardır.

I. Castellani [10] çalışmasında, iki boyutlu tabaka kavitasyonu oluşumundaki re-entrant jetin rolünü anlayabilmek için hidrodinamik kavitasyonun bazı özelliklerini araştırmıştır. Hız profilleri, kavitasyon frekans bileşenleri, basınç katsayıları ve basınç darbeleri

spektrumu(pressure pulses spectrum) sabit sıcaklık koşulunda deneysel ortamda ölçülmüştür. Basınç artışından dolayı fiziksel niceliklerin büyük oranda etkilendiğini bulmuştur. Akım ayrılmasını(flow separation), kararsızlığı(surge instability), geri tepmeleri(rebounds), şoku ve re entrant jeti gözlemlemiştir. Kavite sayısı ve boyu arasında bir ilişki bulunmuştur.

E. J. Foeth vd. [11] çalışmalarında, tamamen gelişmiş tabaka kaviteyi bulabilmek için; zaman-çözümlü(time-resolved) PIV tekniğini hücum açısını span yönünde değiştirerek bir hidrofoil üzerinde uygulamışlardır. Titreşim, gürültü ve erozyon oluşumu gibi istenmeyen etkilerden dolayı üç boyutlu kaviteyi şekillerini incelemişlerdir. PIV ölçümleri yapabilmek için, kavite sırasında oluşan lazer ışık tabakalarının yansıtılmasını ortadan kaldıran optik filtreli floresan izleyici parçacıklar kullanmışlardır. Sıvı ve buhar fazları arasındaki ara yüzeyi bulabilmek için, adaptif bir kalıp geliştirmişlerdir. Kavite arayüzündeki hızın, öngörülen basit akım hattı modeli hızına çok yakın olduğunu bulmuşlardır. Zaman çözümü kayıtlar yardımıyla, bağlı kaviteyi ve bulut saçılmasının gelişimini ortaya çıkarmışlardır. Çalışmalarının sonucunda, gelişmiş tabaka kaviteyi için yaptıkları PIV ölçümlerinin doğru olduklarını kanıtlamışlardır.

Zvi Rusak vd. [12] çalışmalarında, yüksek Reynolds sayılı akımlarda çalışan iki boyutlu düzgün ince hidrofoiller üzerindeki giriş ucu tabaka kaviteyi başlangıcını bir asimptotik yaklaşım ve sayısal simülasyonlar yardımıyla incelemişlerdir.

Eduard Amromin [13] çalışmasında, tabaka kaviteyi ideal akım teorisi ile kaviteyi sayısına bağlı olarak analiz etmiştir. Kaviteyi karakteristiklerinin, kaviteyi ayrılma noktasının yerine büyük oranda bağlı olduğu ilkesine göre hareket etmiştir. Bilinen datalara göre bu ayrılma noktasının yeri serbest akım hızı ve gövde/hidrofil büyüklüğünden etkilenmektedir. Tabaka kaviteyi ayrılma noktasının yerini, Reynolds sayısı ve Weber sayısının etkisi neticesinde oluştuğunu incelemişlerdir. Amromin' in çalışmada tabaka kaviteyi, kendisinin oluşturduğu viskoz ayrılmanın özel bir türü olarak ele alınmıştır.

Vizkoz-vizkoz olmayan etkileşim kavramı, gelen akımı analiz etmek için oluşturulmuştur. Hidrofiller ve dönel yapılar ile önerilen bu yaklaşımın doğrulaması

sağlanmıştır. Akım hızının etkilerini, akım gövdesinin boyutunu ve yüzeyin kavitasyon gösterebilirliğini; bilgisayarla hesaplanan kavitasyon uzunluk/şekil ve bilinen deneysel veri karşılaştırması ile görselleştirmiştir. Laminar ve türbülanslı akımda sınır tabakalar içindeki kavitasyon ayrılmaları arasında fark tartışılmıştır.

Kinnas vd. [14] çalışmasında, iki sayısal metot sunmuştur. Bunlardan biri, sonlu hacim metodu(GBFLOW 3D) ile birleştirilmiş girdap ağ metodu(MPUF-3A) diğeri ise; sınır elemanlar metodu (PROPCAV)dur. Bu sayısal metotlar, gemi pervaneleri tarafından etkilenen dümenler üzerindeki tabaka kavitasyonunu öngörebilmek için uygulanmıştır. MPUF-3A ve GBFLOW 3D akışkan alan içerisindeki pervaneden dolayı oluşan hız alanını belirler. MPUF-3A, kanat sehim yüzeylerine dağıtılan düz girdaplar ve kaynaklar yardımıyla pervane etrafındaki potansiyel akışı çözer ve kanat yüzeyi üzerindeki basınç dağılımını belirler. GBFLOW 3D, kanat yüzeyindeki basınç dağılımından değiştirilen(converted from) gövde kuvveti(body force) şartlarına uyan Euler denklemini çözmektedir ve akım etki alanı içerisindeki toplam hız alanını belirlemektedir. Hata(slip) sınır şartları kullanılarak, tünel duvarları katı sınırlar gibi işlem görmüştür ve pervane kanatları gövde kuvvetleri kullanılarak modellenmiştir. İki metodu, kanat üzerindeki güçler yakınsayana kadar tekrar tekrar çözmüşlerdir. Dümen üzerindeki kavitasyon tahminini, MPUF-3A ve GBFLOW 3D ile belirlenen üç boyutlu akım alanının varlığında sırt ve yüz giriş ucu ve orta kord kavitasyonu ile ele alınan PROPCAV ile gerçekleştirmişlerdir. Mevcut metot, başka metotlar tarafından sayısal olarak hesaplanan ve deneysel olarak ölçülen ve gözlemlenen kavitasyon şekillerinin karşılaştırılması ile doğrulanmıştır.

J. Bosschers, G vd. [15] çalışmalarında, tabaka kavitasyonunu ve tekne basınç dalgalanmalarını içeren pervane- tekne etkileşimini pratik şekilde analiz edebilmek için geliştirilmekte olan hesaplamalı bir analiz metodu geliştirmişlerdir. Bu metot üç farklı kısımdan oluşmaktadır: İlk kısım, RANS metodu kullanılarak tekne etrafındaki viskoz akımı ve pervane akım bölgesindeki hız alanlarının analiz edildiği kısımdır. İkinci kısım, tabaka kavitasyonu boyu ve hacmini içeren sınır eleman metotuna(BEM) dayalı kısımdır. Üçüncü kısım ise, pervanenin indüklediği basınç dalgalanmalarını hesaplamak için akustik dalga denklemini çözen bir sınır eleman metotudur.

YE Jin-ming [16] çalışmasında, daimi olmayan akış ortamında çalışan podlu bir pervane üzerindeki tabaka kavitasyonunu bir yüzey panel yöntemi kullanarak analiz etmiştir. Pervane ile pod arasındaki etkileşimi, indüklenen hız potansiyelinin iteratif hesabı ile analiz etmiştir. YE Jin-ming, klasik tek pervaneli iz metotuna dayalı olan podlu pervane için yeni bir iz modeli geliştirmiştir. Hesaplama zamanını kısaltmak için analizleri sadece anahtar kanat üzerinde gerçekleştirmiştir. Bu metotun daimi ve daimi olmayan akış ortamında çalışan bir pervanenin hidrodinamik performansını ve kavitasyonunu hesaplamak için kullanılabilir olduğunu kavitasyon tüneline alınan sonuçlar ile göstermiştir.

Arjen Koop [17] çalışmasında, daimi ve düzenli bir akımın içine yerleştirilen sabit bir hidrofilde oluşan daimi olmayan üç boyutlu tabaka kavitasyonun yapısını ve dinamiklerini öngörebilmek için Euler denklemlerine dayanan bir hesaplama metodu geliştirmiştir.

J. A. SZANTYR [18] çalışmasında, gemi hidrodinamiğinde son dört yıl içerisinde güncel hesaplama metotlarını 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 metotun 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.

S. Gaggero ve S. Brizzolara [19] çalışmalarında, düzgün ve daimi olmayan akım ortamında çalışan pervanelerin kanat kesitlerinin yüz ve sırt bölgelerinde meydana gelebilen tabaka kavitasyonunu potansiyele dayalı bir panel metoduyla analiz etmişlerdir. Metot ilk olarak, üç boyutlu wing kanatlar üzerinde yüz ve sırt kavitasyonunun ayrılma noktasını öngörebilmek için kullanılmış ve daha sonra geliştirilen metotun performansını incelemek için genel bir pervane üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir.

Bosschers, J. [20] çalışmasında; iki boyutlu, daimi olmayan, sıkıştırılamayan ve viskoz akımda aksenal simetrik kavitasyon gösteren girdabı açıklayabilmek için, biri analitik diğeri sayısal olan iki model geliştirmiştir. Viskozitenin; akım yapısı ve kavitasyon boyu üzerindeki etkilerini araştırmak için bu modelleri kullanmıştır. Analitik formölde, Lamb-Ossen girdap modelini kullanmıştır.

R. Arazgaldi vd. [21] çalışmalarında, gemi pervaneleri etrafındaki kavitasyonlu akışı deneysel ve sayısal olarak incelemişlerdir. Bu alışma için; iki farklı tip klasik model pervane kullanmıştır. Birincisi, model A olarak adlandırılan dört kanatlı model pervane, diğeri ise model B olan üç kanatlı model pervanedir. Dört kanatlı pervane, bir K 23 kavitasyon tüneline farklı kavitasyon rejimleri içinde test edilmiştir. Sonuçları, karakteristik eğriler ve ilgili resimlerle sunulmuştur. Model B pervanesi ise, mevcut deneysel sonuçlara dayanarak incelenmiştir. Kavitasyon olgusu ise, A ve B pervane modellerinde olduğı gibi iki boyutlu NACA0015 hidrofoili üzerinde sayısal olarak öngörölmüştür. Bu öngörö, hem daimi hem de daimi olmayan akım koşullarında yapılmıştır. Elde edilen hesaplamalar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, kavitasyon gösteren ve göstermeyen her iki koşulda deneysel sonuçlar ile uyum göstermektedir.

Brenden Epps vd. [22] çalışmalarında, optimize edilmiş pervanelerin ve türbinlerin dizaynı ve analizi için girdap ağ ve kaldırıcı hat metotlarına dayalı MATLAB kodunda yazılımı gerçekleştirilmiş bir metodu kullanmışlardır. Kavitasyon analizinde, kavitasyon kova diyagramlarını üretmek için bir modöl sunmuşlardır. Akademide ve sanayide yaygın olarak kullanılan MATLAB M-kodunun içine yazmışlardır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada, kavitasyonun çeşitleri, fiziği ve etkileri açıklanmaya çalışılmış ve pervane dizayn ve analizinde kullanılan kaldırıcı yüzey metotuna geniş bir yer verilmiştir. Uygulama olarak, tam ölçekte P1 ve P2 pervanesi sayısal olarak incelenmek üzere seçilmiştir. P1 pervanesinin bir tam devrinde($\theta=0^\circ$ - 360° arasında) anahtar kanadının sırtında ve yüzünde oluşan basınç dağılımları ve sırtında oluşan tabaka kavitasyon formları incelenmiştir. P2 pervanesi için ise, üç farklı çalıklık açısında, üç farklı hatve oranında ve üç farklı sehim miktarında yeni pervane geometrileri elde edilmiş ve bu yeni pervanelerin hidrodinamik karakteristikler ve tabaka kavitasyon formları yönünden değişimleri sayısal olarak analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

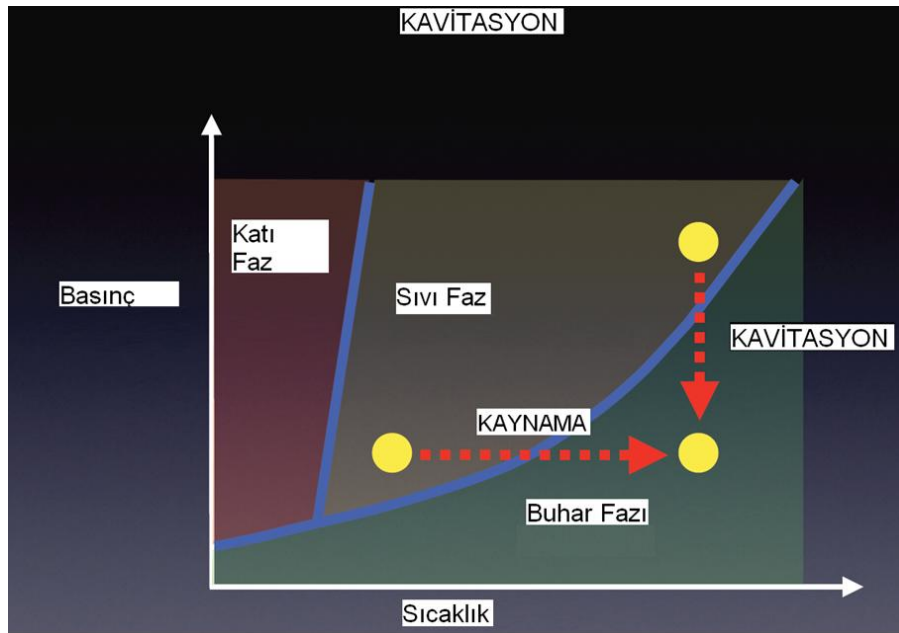
1.3 Hipotez

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 gibi hidrodinamik karakteristiklerine olan olumlu etkilerinden dolayı, pervane çalıklık açısı ve sehim miktarı artması ve hatve oranının azalması gerekliliğini desteklemektedir.

BÖLÜM 2

KAVİTASYON

Bernoulli prensibine göre akışkan içerisinde hız artışı, basıncın azalmasına neden olur. Basıncıdaki bu azalma suyun kaynama noktasını ortam sıcaklığına kadar düşürebilir. Bunun sonucunda içinde su buharı ve erimiş gazlar bulunan, hava kabarcıkları içeren bir tür soğuk kaynama meydana gelir. Bu olay “kavitasyon” olarak tanımlanır[25]. Kavitasyon, kaynama olayından farklı bir fiziksel olaydır. Şekil 2. 1’de gösterildiği gibi, kaynama olayındaki buharlaşma, sabit basınçta sıcaklık artımı ile meydana gelirken kavitasyon(soğuk kaynama) olayındaki buharlaşma ise sabit sıcaklıkta basınç düşümü ile meydana gelir.



Şekil 2. 1 Kaynama ve kavitasyon(soğuk kaynama)[23]

Kavitasyon, statik veya hareketli bir sıvının bulunduğu ortamlarda oluşur. Katılarda veya gazlarda ortaya çıkmaz. Pervane kanadı, hidrolik valfler, pompalar, türbinler örnek olarak gösterilebilir.

2.1 Kavitasyon Çeşitleri

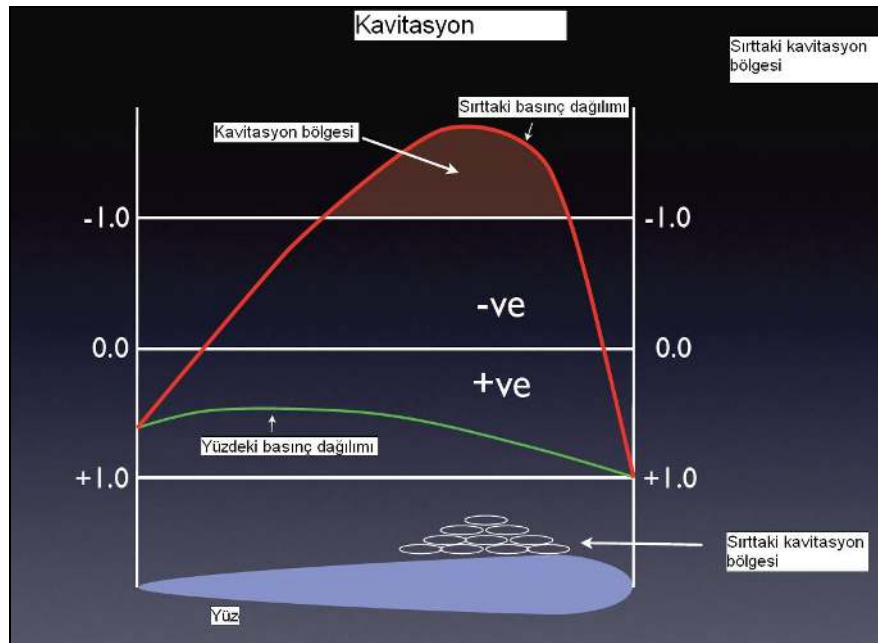
Gemi pervanelerinde görülen kavitasyon türleri iki çeşittir:

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

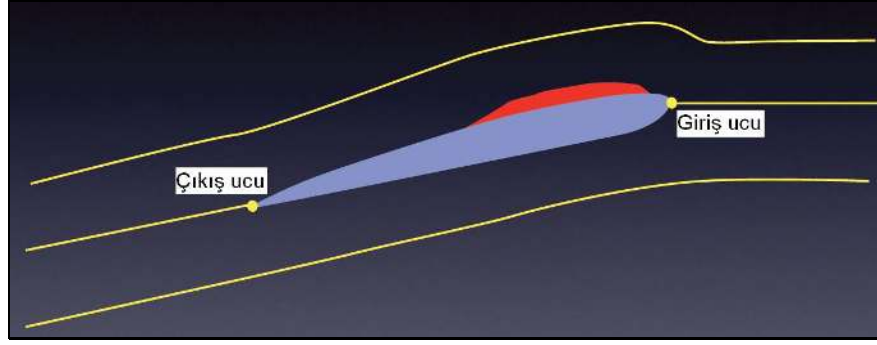
2.1.1 Pervane Kanadı Üzerinde Oluştugu Konuma Göre Kavitasyon Çeşitleri

2.1.1.1 Sırt Kavitasyonu

Pervane kanat kesitlerinin pozitif hücum açılarında çalışması durumunda kanat kesitlerinin giriş ucu civarında, emme kısmında ve küçük hatvelerde oluşan kavitasyon türüdür(Şekil 2. 2 ve Şekil 2. 3).

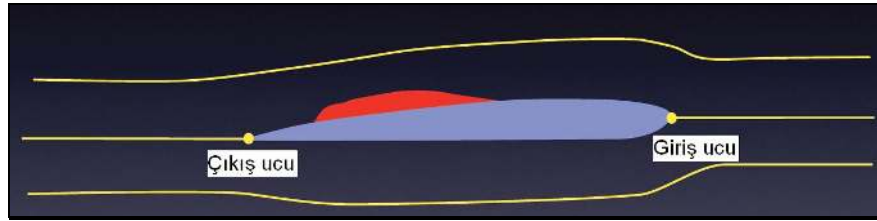


Şekil 2. 2 Sırttaki kavitasyon bölgesi[23]



Şekil 2. 3 Giriş ucu civarında oluşan sırt kavitasyonu[23]

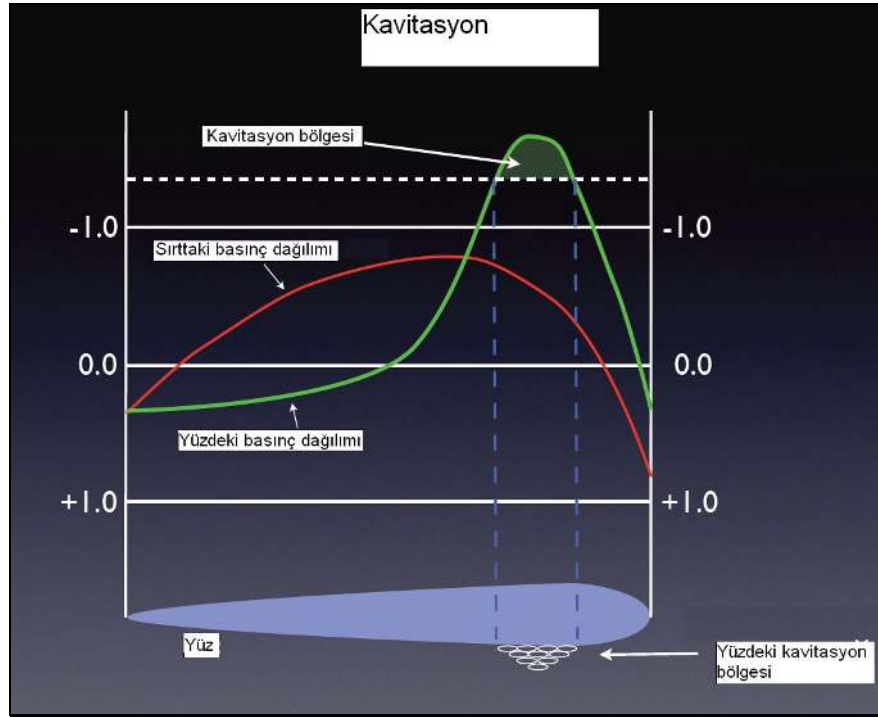
Pervane kanat kesitlerinin sıfır dereceye yakın hücum açılarında çalışması durumunda ise; kesitin çıkış ucu civarında, emme kısmında maksimum kesit kalınlığının arkasında da bu tür kavitasyon meydana gelebilir(Şekil 2. 4).



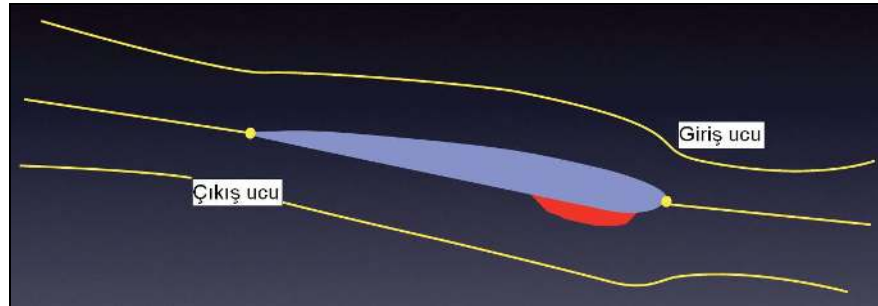
Şekil 2. 4 Çıkış ucu civarında oluşan sırt kavitasyonu[23]

2.1.1.2 Yüz Kavitasyonu

Pervanelerin kanat kesitlerinin negatif hücum açılarında çalışması durumunda kanat kesitlerinin giriş ucu civarında basınç kısmında oluşan kavitasyon türüdür(Şekil 2. 5 ve Şekil 2. 6).



Şekil 2. 5 Yüzdeki kavitasyon bölgesi[23]



Şekil 2. 6 Yüz kavitasyonu[23]

2.1.2 Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavitasyon Çeşitleri

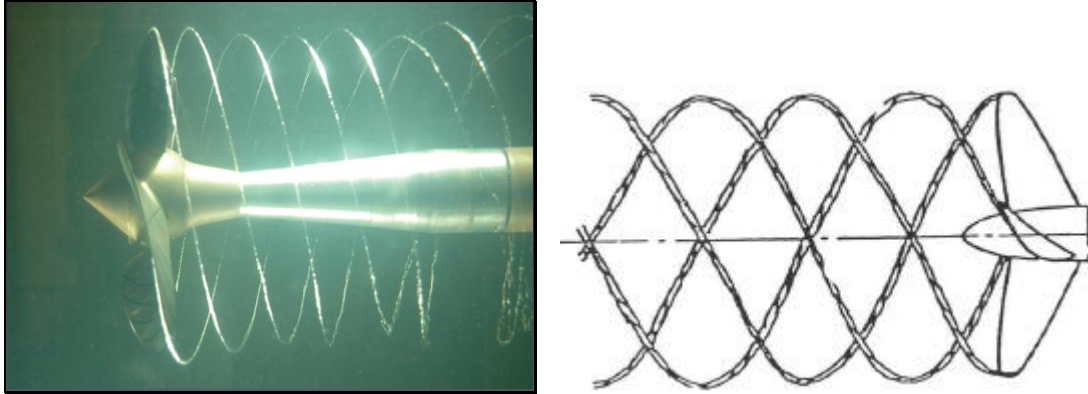
Kavitasyonun fiziksel görünüşünün ana kontrol parametresi basınç gradyenidir. Altı kavitasyon çeşidi tanımlanmıştır. Bunlar;

2.1.2.1 Uç (Tip) ve Göbek (Hub) 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

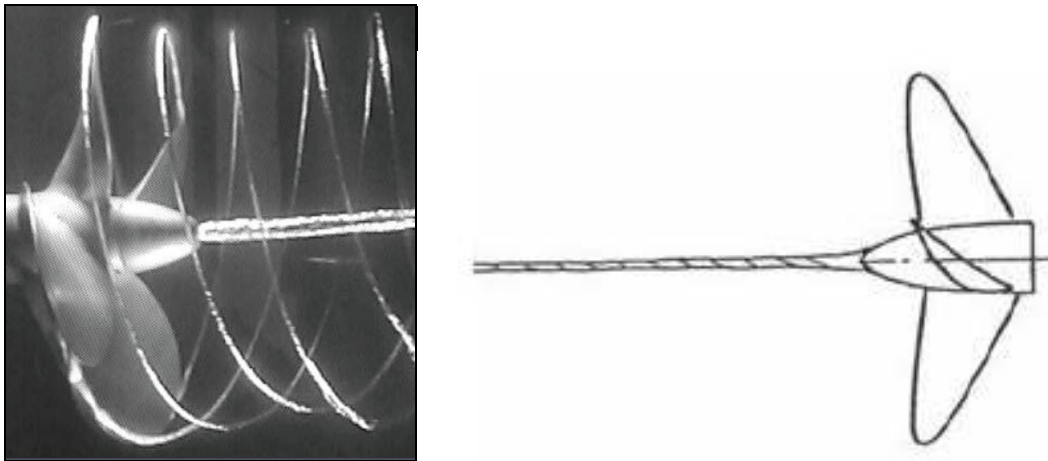
zerrelerinin dönme hızı çok yüksektir ve dolayısıyla buralardaki basınç suyun buharlaşma basıncı altına düşmekte ve girdap kavitasyonu oluşmaktadır[25].

Uç girdap kavitasyonu(Şekil 2. 7), pervane kanadının uç kısmından belirli bir uzaklıkta ortaya çıkmaktadır. Bu noktada uç girdabın serbest olduğu düşünülür ama girdap güçlendikçe, kanat ucuna doğru hareket eder ve uca sabitlenir. Genellikle ilk meydana gelen kavitasyon çeşididir[23].



Şekil 2. 7 Uç girdap kavitasyonu[23]

Göbek girdap kavitasyonu, pervane kanadının kök kısmından göbeğe doğru ilerleyen ve akışı bozan kavitasyon çekirdekleri (nuclei) nedeni ile oluşur(Şekil 2. 8). Pervane arkasındaki dümene de zarar verebilir. Pervane göbek finleri, göbek kavitasyonu kaynaklı problemlerden kaçınmak için kullanılabilir[25].



Şekil 2. 8 Göbek girdap kavitasyonu[23]

2.1.2.2 Kabarcık (Bubble) Kavitasyonu

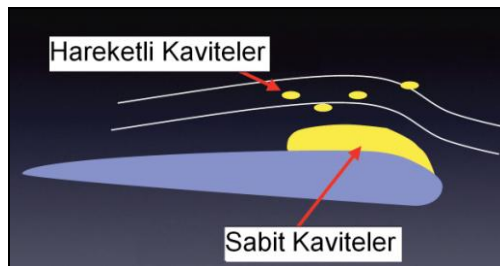
Kabarcık kavitasyonu, pervane kanat kesiti üzerinde basıncın en düşük olduğu bölgelerde, kanat ortası civarında oluşur(Şekil 2. 9). Sehîm hattı ve kesit kalınlığı

kabarcık oluşumunda önemli bir rol oynar. Düşük hücum açısına sahip ince kesitlerde görülmektedir, örn; CPP kökünde[23].



Şekil 2. 9 Kabarcık kavitasyonu[23]

Akışkan içinde bulunan gaz çekirdekleri düşük basınç bölgesine doğru yayılırlar. Şekil 2. 10'dan görüleceği üzere, gaz çekirdeklerinin akışkan ile birlikte hareket etmelerinden ötürü kabarcık kavitasyonu “seyahat eden-hareketli kavitasyon (hareketli kavite)” olarak da anılmaktadır[23].



Şekil 2. 10 Sabit ve hareketli kavitasyon(kavite)[23]

2.1.2.3 Tabaka (Sheet) Kavitasyonu

Büyük hücum açılarında çalışan bir pervane kanat kesitinde basınç dağılımı şiddetli ve ters bir basınç gradyenine sahip olduğunda, akımın kesitten ayrılması ile kesitin emme tarafında basınç dağılımı değişir ve maksimum emme meydana gelir. Minimum basınç, buhar basıncından daha düşük olduğu için tabaka kavitasyonu meydana gelir [1]. Düşük kavitasyon sayılarında hidrofoilin giriş ucuna yakın bölgelerde basıncın yüksek değerlere ulaşması sonucunda oluşan tabaka kavitasyonu “kısmi kavitasyon” olarak anılır (Şekil 2. 11). Kavitasyon giriş ucundan sonra basınç tarafına doğru ilerleyip etkiye yaparsa bu tabaka kavitasyonu “süper kavitasyon” olarak anılır. Tabaka kavitasyonu

genellikle zararsızdır ve kanattan genellikle uç girdap kavitasyonu formunda uzaklaşır[23].



Şekil 2. 11 Tabaka kavitasyonu[23]

2.1.2.4 Bulut (Cloud) Kavitasyonu

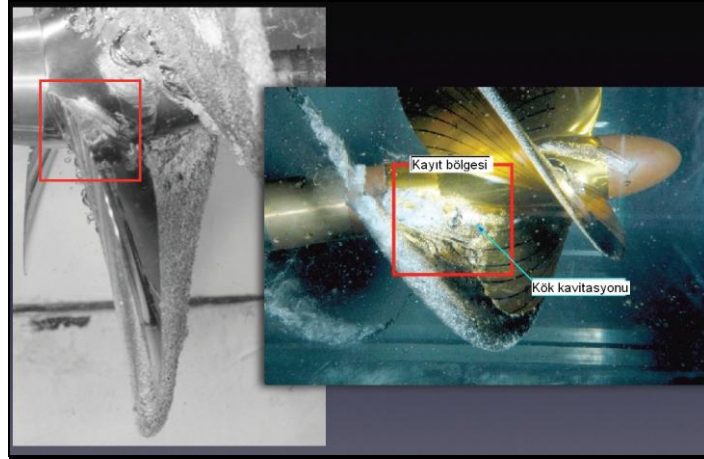
Bulut kavitasyonu, daimi olmayan tabaka kavitasyonunu izleyen “sis” veya “bulut” görünümlü küçük kabarcıklar şeklinde, tabakanın çoğunlukla çıkış ucunda ortaya çıkmaktadır(Şekil 2. 12). Bu nedenle bulut kavitasyonu, daimi olmayan tabaka kavitasyonu olarak da adlandırılmaktadır. Bulut kavitasyonun varlığı daima ciddiye alınmalıdır[23].



Şekil 2. 12 Bulut kavitasyonu[23]

2.1.2.5 Kök (Root) Kavitasyonu

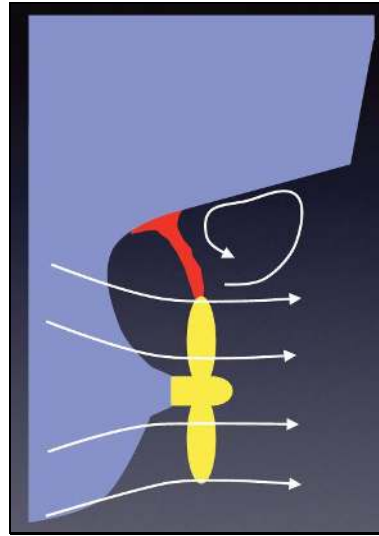
Pervane kanadının kök kısmında meydana gelir ve kama şekline benzemektedir. Kök bölgesinde, kanat kesitine ait maksimum kalınlık noktası civarında ve sırt kısmında oluşabilir(Şekil 2. 13).



Şekil 2. 13 Kök kavitasyonu[23]

2.1.2.6 Pervane-Tekne Girdap Kavitasyonu (PHV)

Büyük ve şiddetli iz alanı ile pervane etkileşimi sonucunda meydana gelir. Pervane kanadının ucunda meydana gelen girdap, tekneye doğru bir şimşek gibi sıçrayarak tekne ile birleşir(Şekil 2. 14). Kısa bir zaman içinde düzensiz aralıklarla oluşabilir. Genellikle dolgun kılı pervanelerde meydana gelebilir[23].

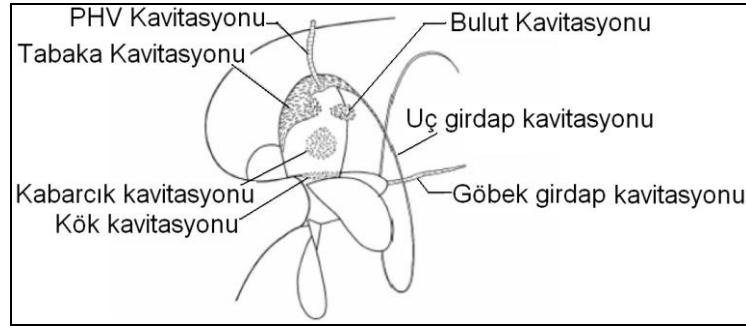


Şekil 2. 14 PHV kavitasyonu[23]

PHV kavitasyonunun oluşmasına öncülük eden faktörler[23]:

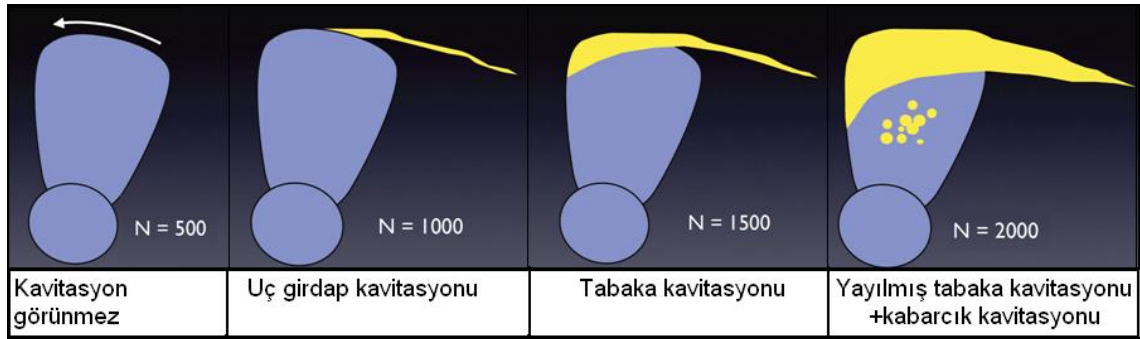
1. Düşük pervane ilerleme katsayısı
2. Tekne ve pervane arasındaki açıklığın düşük olması
3. Pervanenin üzerinde düz yüzeylerin bulunması

Bölüm 2.1.2.1-2.1.2.6 arasında anlatılan fiziksel görünüşlerine göre tüm bu kavitasyon çeşitleri, bir pervane üzerinde Şekil 2. 15'te şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. 15 Fiziksel görünüşlerine göre kavitasyon çeşitleri[25]

Şekil 2. 16'da pervane devir sayısı artırılması ile bir pervane kanadında kavitasyon türlerinin oluşumu şematik olarak gösterilmiştir:



Şekil 2. 16 Artan devir sayısı ile kavitasyon türlerinin oluşumu[23]

2.2 Kavitasyon Etkileri

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

2.2.1 Performans Kaybı (İtme Kaybı)

Tek bir kanat profili üzerinde meydana gelen kısmi kavitasyonun uzunluğu, kort uzunluğunun büyük bir kısmını kapladığı zaman profilin sehimini arttırabilir ve bu nedenle profilin kaldırma kuvvetini de arttırabilir. Profil üzerindeki ortalama basınç arttığında, kavitasyon azalır ve kaldırma kuvvetinde de azalmaya neden olur. Bu azalma derece derece ve oldukça hızlı olur. Buna bağlı olarak, pervaneler üzerindeki farklı kanat kesitleri, farklı koşullarda kaldırma kuvvetindeki azalmadan etkilenecektir. Bu nedenle kavitasyonun pervane itmesi üzerinde etkisi tek bir profil üzerindeki etkisinden daha yavaş olmaktadır. Şayet oluşan kavitasyon, pervanenin farklı boyutsuz

yarıçaplarına ait kesitlerin yaklaşık %20-25'lik kısmını kapladığında, pervanenin itmesi ve torku azalmaktadır. Ancak itmenin torka göre azalması daha hızlı olmaktadır[1].

2.2.2 Gürültü

Kavitasyon kabarcığı etrafındaki dış basınç artmaya başladığında kısa bir süre sonra iç ve dış bölgelerdeki basınç gradyeni düşer ve kabarcık patlama konumuna gelir. Kavitasyon kabarcıklarının patlaması sonucu yüksek yerel basınçlar oluşur. Bunun sonucu olarak ortaya çıkan şok dalgaları yüksek seviyede gürültü meydana getirir[1].

2.2.3 Titreşim

Gemi pervane kanatlarında oluşan tabaka kavitasyonu hacimce büyük bir yere sahiptir. Bu büyük buhar hacminin dinamik davranışı su içerisinde şiddetli basınç darbeleri üretir. Kavitasyon tarafından indüklenen basınçlar tekne titreşimlerinin oluşumunda etkilidir[1].

2.2.4 Erozyon

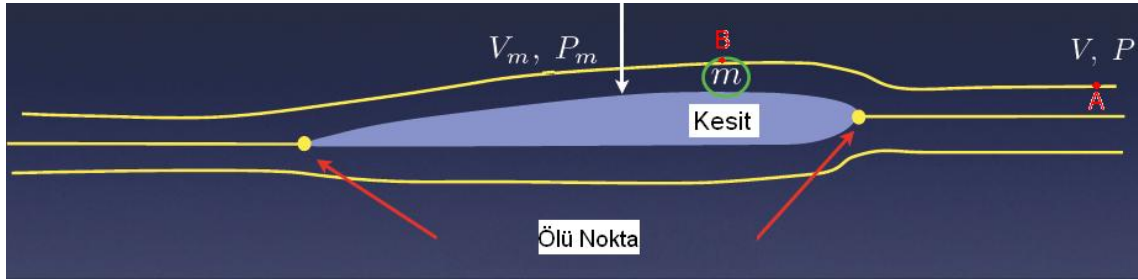
Bir pervane kanadındaki erozyon hasarı, daha çok yüzeyin bozulması veya pürüzlenmesi ile başlar. Bu başlangıcı kanat yüzeyinin plastik şekil değiştirmesi izler. Bu nedenle söz konusu oluşum genellikle pervane yüzeyinde çiçek bozuğu (orange peeling) olarak bilinir. Pervane yüzeyinin şekil bozulmasına 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 2. 17). Erozyonun gerçekleşme hızı değişkenlik gösterebilir. Bu hız, birkaç saatten aylar veya yıllar mertebesine kadar değişebilir[24].



Şekil 2. 17 Bir pervanede kavitasyonun neden olduğu erozyon örneği[23]

2.3 Kavitasyon Başlangıcı

Kavitasyon başlangıcı, basınç azaldığında çekirdek(nuclei) kritik bir boyuta ulaşır ve genişleyerek patlar[24]. Kavitasyon olayını anlayabilmek için Şekil 2. 18’te gösterilen bir kanat kesitini incelersek:



Şekil 2. 18 Düzenli akım içerisindeki iki boyutlu bir kanat kesiti[23]

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 seçildi. A ve B noktalarının su yüzeyinden derinlikleri yaklaşık olarak aynıdır. A ve B noktaları arasında Bernoulli denklemi yazılmak suretiyle,

$$P_m + \frac{1}{2} * \rho * V_m^2 = P + \frac{1}{2} * \rho * V^2 \quad (3. 1)$$

$\uparrow$
Yerel

$\uparrow$
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 $\rightarrow P_m = P_v$ 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[24].

DÜZENSİZ AKIM ALANINDA ÇALIŞAN PERVANELER İÇİN KALDIRICI YÜZEY METOTU

Gemilerde pervanelerin, 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 da eklendiğinde gemi bünyesinde yüksek seviyede titreşimler ve gürültü oluşmakta, pervane veriminde de kayda değer bir azalma görülmektedir. Bu nedenle, pervane tasarımının ilk aşamalarında sözkonusu oluşumların özellikle kavitasyon olayının kontrol altında bulundurulmaları son derece önemlidir. Bu bölümde sözü edilen amaç doğrultusunda pervaneler için, temeli Szantyr (1994)'ın kaldırıcı yüzey modeline dayalı olarak geliştirilmiş bir analiz metodu ele alınacaktır [1].

3.1 Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli

Düzensiz akımda çalışan pervanelerin analizi için geliştirilen bu metotta, pervane kanatlarının temsili için şekli değişebilen bir kaldırıcı yüzey modeli kullanılır. Pervanede hidrodinamik yüklerin ve kalınlıkların modellenmeleri ayrı ayrı ele alınarak; pervane üzerindeki hidrodinamik yükler, kesit sehim hatlarının oluşturduğu yüzeylere yayılan girdap dağılımlarıyla, kesit kalınlıkları da aynı yüzeylere yayılan kaynak dağılımlarıyla modellenir. Yüzeylerde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu da kaynak dağılımlarıyla modellenerek, kaldırıcı yüzey geometrisindeki deformasyon şeklinde hesaplara katılır. Gemi arkası düzensiz akım etkileri sadece hidrodinamik yüklerin hesabına dahil edilir. Girdap yüzeylerinin şiddetlerinin değişken olması pervane

kanatları üzerindeki hidrodinamik yük değişimlerini ortaya çıkarır. Kesit kalınlıklarının kaynak dağılımlarıyla modellenmesi ise pervaneye gelen çevresel ortalama akıma göre yapılır. Bu şekilde, kalınlık etkileri hesaplara zamanla değişmeyen sabit düzeltmeler şeklinde yansıtılır [1].

Tüm pervane kanatlarının gerisinde serbest girdap yüzeyleri uzanır. Bu yüzeyler, düzgün helisel şekle sahip serbest girdap hatlarından meydana gelir. Serbest girdap hatlarının hatvesi, ortalama akış açısı ve ortalama kanat hatve açısının lineer değişimi olarak hesaplanmaktadır. Hesapları basitleştirmek için pervane kanatlarından biri *anahtar kanat* olarak seçilir. Anahtar kanadın hemen arkasından itibaren $360^\circ/Z'e$ kadar olan serbest girdap yüzeyi, *değişken serbest girdap bölgesi* olarak tanımlanır. Bu bölge, anahtar kanat üzerindeki değişken akış koşullarını yansıtır. Değişken bölgede aynı serbest girdap hatlarına ait kesitler farklı şiddetlere sahip olabilir. Bu, sirkülasyonun korunumu prensibinin gereklerini yerine getirmek için, radyal girdap elemanlarının ortaya çıkmasına neden olur. Bunun dışında, bir grup kontrol noktası kanadın çıkış ucunun ötesine kadar uzanan tabaka kavitasyonunun öngörüsü için değişken bölge içine yerleştirilmektedir. Bu noktalarda kaldırıcı yüzeye dik ($\vec{n}$) ve teğet ($\vec{t}$) olan birim uzunluk vektörleri tanımlanmaktadır. Değişken bölgedeki girdap dağılımları ($\vec{\gamma}_{pv}$) kanadın düzensiz akım ortamında hareket etmesi nedeniyle anahtar kanat üzerinde oluşabilecek değişken hidrodinamik yüklerin belirlenmesinde kullanılır. Bu yüzeylerin her biri helisel girdap hatlarından oluşmaktadır. Değişken bölgede indüklenen hızlar anahtar kanat haricindeki diğer kanatlar tarafından anahtar kanat üzerinde indüklenmiş hızların oluşturduğu indüksiyon faktörleri matrisine ilave edilmektedir [1].

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 [1].

Kanat ve serbest girdap yüzeylerine yerleştirilen girdap elemanlarının indüklediği hızların bulunmasında Biot-Savart kanunundan yararlanılır. Pervane yükünü

modelleyen bağılı girdap elemanlarının değerleri, kaldırıcı yüzeylerde kinematik sınır şartı sağlanacak şekilde oluşturulan lineer denklem sistemlerinin çözülmesiyle bulunur. Bağılı girdap elemanı şiddetlerinin belirlenmesinden sonra, pervane yüzeyine gelen bileşke hızlar, basınç dağılımları ve sisteme etkiyen kuvvetler bulunabilir [1].

3.1.1 Kinematik Sınır Şartı

Pervane kaldırıcı yüzey modelinde, hidrodinamik yükleri temsil eden bağılı 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, bağılı 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 (3. 1) ile verilmektedir [1].

$$\begin{aligned} & \frac{I}{4\pi} \left[\int_{S_p} \int \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_p \cdot \nabla \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS + \int_{S_{pv}} \int \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{pv} \cdot \nabla \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS + \int_{S_{ps}} \int \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{ps} \cdot \nabla \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS + \right. \\ & \left. \int_{S_p} \int (q_p + q_{pc}) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{I}{r_p} \right) dS \right] \\ & + (\vec{V} + \vec{\omega} \cdot \vec{R}) \cdot \vec{n} = 0 \end{aligned} \quad (3. 1)$$

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

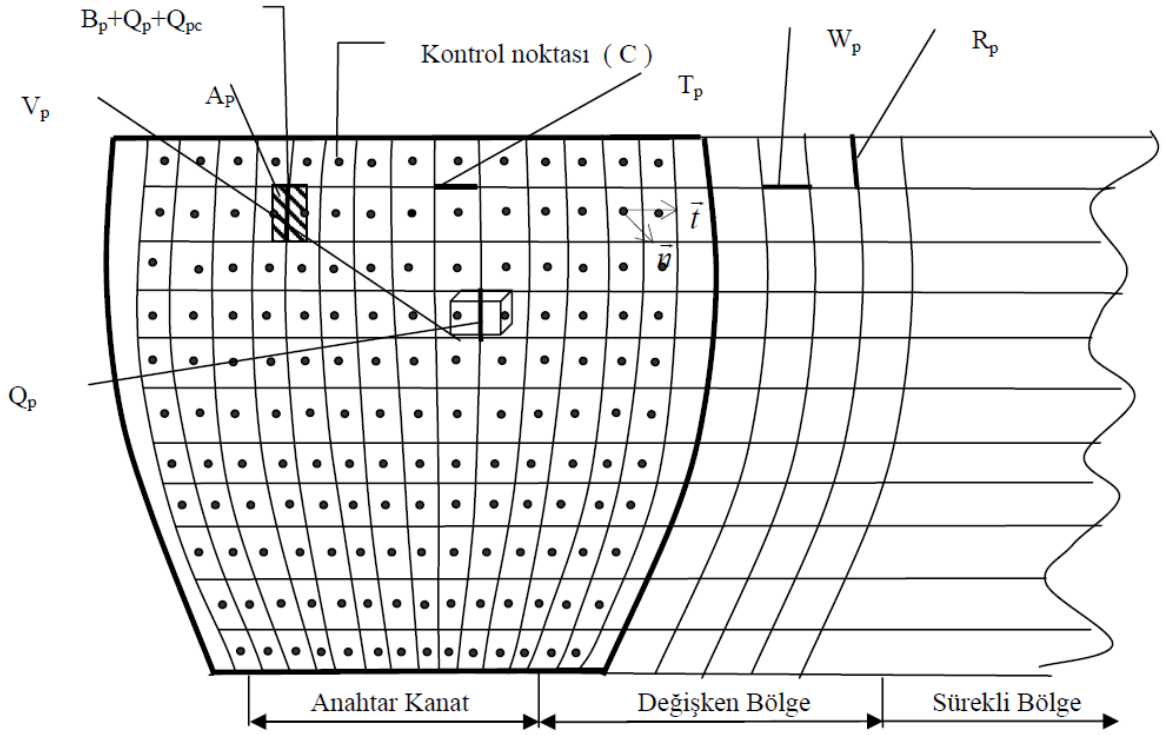
$\vec{\omega}$: pervane açısal hızı

R : hesap edilen noktadaki pervane yarıçapı

3.2 Pervane Kanadı Kaldırıcı Yüzey Modeli

Pervane kanadını modelleyen girdap ve kaynak dağılımlarının belirlenmesi amacı ile oluşturulan denklem (3. 1)'in sayısal olarak çözülebilmesi için, kaldırıcı yüzey dörtgensel bölgelere (grid) ayrılarak üzerlerine girdap ve kaynak elemanları yerleştirilir (Şekil 3. 1).

Şekil 3. 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 [1].



Şekil 3. 1 Pervane kanadı kaldırıcı yüzey modeli

Her bir girdap elemanının şiddeti, A_p alanına yayılan sürekli girdap dağılımının şiddetine eşittir. Sirkülasyonun korunumu prensibine dayalı Kelvin teoreminin sağlanması amacı ile $\bar{B}_p$ bağlı girdap elemanları doğrusal $\bar{T}_p$ takip eden (izleyen) girdap elemanlarıyla desteklenir. Kelvin teoremine göre, ideal bir akışkanın yoğunluğu sadece basınca bağlı ve akışkan üzerinde rol alan dış kuvvetler bir potansiyelden türetilabiliyorsa akışkan ile birlikte hareket eden kapalı bir eğri boyunca sirkülasyon zaman ile değişmemektedir. Takip eden girdaplar çıkış kenarından ayrıldıktan sonra genel bir helis şeklinde serbest girdap yüzeylerini oluştururlar. Bu takip eden girdap elemanlarının şiddetleri bağlı girdap elemanlarının şiddetleri cinsinden ifade edilebilir. Çünkü A_p alanının etrafında şiddetleri eşit ama yönleri farklıdır. Böylece pervane kanadı üzerindeki hidrodinamik yükün hesaplanması için gerekli altyapı hazırlanmış olur [1].

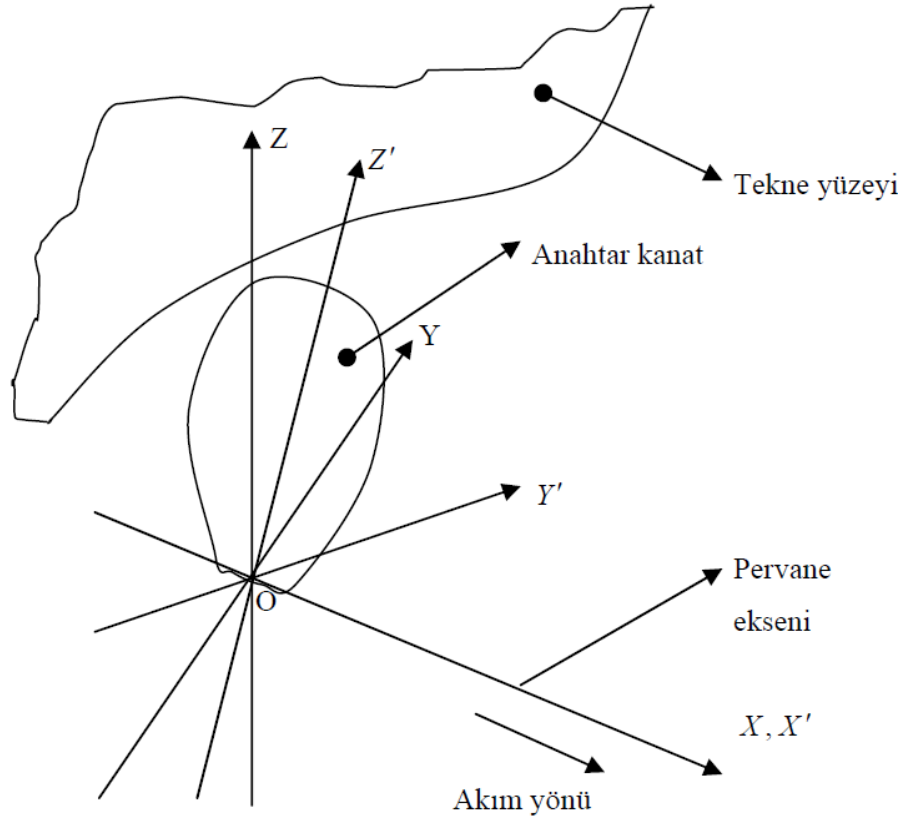
Anahtar kanat üzerinde birbirine komşu olan bağlı ve takip eden girdap elemanlarının arasında kalan dörtgen şekilli bölmelerin tam orta noktalarında kontrol noktaları (C) bulunmaktadır. Kontrol noktaları, kinematik sınır şartının sağlanmasında kullanılır.

Ancak anahtar kanat üzerinde 165 tane şiddeti bilinmeyen bağlı girdap elemanı ($\overline{B}_p$) 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 [1].

Pervane çıkış kenarını takiben yerleştirilen değişken serbest girdap bölgesi, düzgün helis şeklindedir. Bu bölgede aynı yarıçap üzerindeki takip eden girdap elemanları ($\overline{W}_p$) farklı sektörlerde farklı şiddete sahip olabilirler. ($\overline{W}_p$)'ler, sirkülasyonun korunumu ile ilgili Kelvin teoreminin sağlanması amacıyla ($\overline{R}_p$) 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 [1].

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 [1].

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 3. 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 [1].



Şekil 3. 2 Kaldırıcı yüzey modeline ait koordinat sistemi [1]

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 (3. 2)'de ifade edildiği gibidir [1].

$$Q_p = V_{IN} R \Delta X \frac{dt}{dx} \quad (3. 2)$$

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

3.2.1 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 [1].

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 3. 3) [1].

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

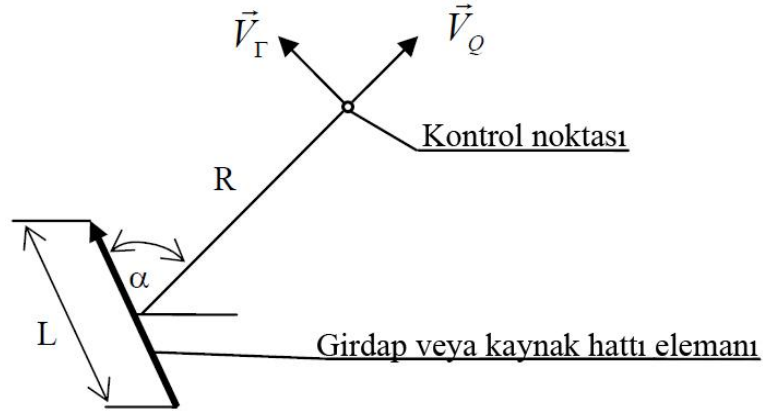
Burada:

$\vec{V}_\Gamma$: 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 3. 3 Bir girdap/kaynak elemanın kontrol noktasında indüklediği hız [1]

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 [1].

Kesit kalınlıklarını modelleyen kaynak elemanlarının indüklediği hızlar da bir nokta kaynak ile ilişkili olan basit bir bağıntı yardımı ile denklem (3. 4)'de gösterildiği gibi ifade edilmektedir [1].

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

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 [1].

3.2.2 Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi

3.1.1.2 Anahtar Kanat Bağlangıç Konumunda iken Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi (İlk Yaklaşım)

Pervane kaldırıcı yüzey modelinde süreksiz hidrodinamik yükler için ilk yaklaşım hesapları anahtar kanat dik konumda iken (sıfır derece kanat pozisyonunda) yapılır. Aynı zamanda serbest girdap sisteminin sürekli bölgelerindeki girdap elemanlarının şiddetleri ve kesit kalınlıklarını modelleyen kaynak dağılımlarının şiddetleri de bu aşamada belirlenir. Tüm bu ilk yaklaşım hesapları pervaneye gelen ortalama çevresel akıma göre yapılır. Yani, pervanenin bu aşamada düzensiz akım etkilerine maruz olmadığı kabul edilir [1].

Pervane girdap modelini oluşturan tüm girdap elemanlarının; anahtar kanat üzerindeki her bir kontrol noktasında indükledikleri hızların toplamı (3. 1)-(3. 4) arası denklemler kullanılarak yazılır. Daha önce de belirtildiği gibi, pervane kaldırıcı yüzey modelinde kinematik sınır şartını ifade eden bu lineer denklem sisteminin sol tarafı pervanenin anahtar kanata etkisini gösteren üç gruba ayrılabilir:

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

Lineer denklem sisteminin sağ tarafı ise, kanat kalınlıklarını modelleyen kaynak dağılımlarının indükledikleri hızlar, pervaneye gelen akım hızı ve pervane rotasyonel hızından oluşur. Bu şekilde oluşturulan lineer denklem sistemi, 154 bilinmeyen bağlı

girdap elemanı ve 154 denklemden oluşur. Serbest girdap bölgeleri ve diğer kanatlardaki bilinmeyen girdap elemanları ise anahtar kanat üzerinde yer alan bağlı girdap elemanlarının şiddetleri cinsinden ifade edilerek denklemlere katılır[1].

(154x154) boyutundaki bu lineer denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle pervane üzerindeki tüm bağlı girdap elemanlarının şiddetleri ortalama akıma göre bulunmuş olur. Bilinmeyen girdap elemanları bulunduktan sonra pervane yüzeylerindeki akım hızları denklem (3. 3) ve (3. 4) kullanılarak bulunabilir. Böylece başlangıç durumunda pervane üzerindeki hidrodinamik yük dağılımı hesapları için altyapı hazırlanmış olur [1].

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

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

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

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

3.2.2.2 Anahtar Kanadın Herhangi Bir Konumunda Pervane Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi

Analiz yapılacak ilk kanat pozisyonunda, indüklenmiş hız hesapları için yukarıda anlatıldığı şekilde ortalama çevresel akıma göre bulunmuş girdap dağılımları kullanılır. Daha sonraki tüm ara konumlarda ise, bir önceki analizden elde edilen üniform olmayan akımdaki girdap dağılımları kullanılır [1].

Pervane serbest girdap bölgelerinin indükledikleri hızlar da Biot-Savart formülü kullanılarak elde edilir [1].

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

İndüklenmiş hızların sürekli kısmı

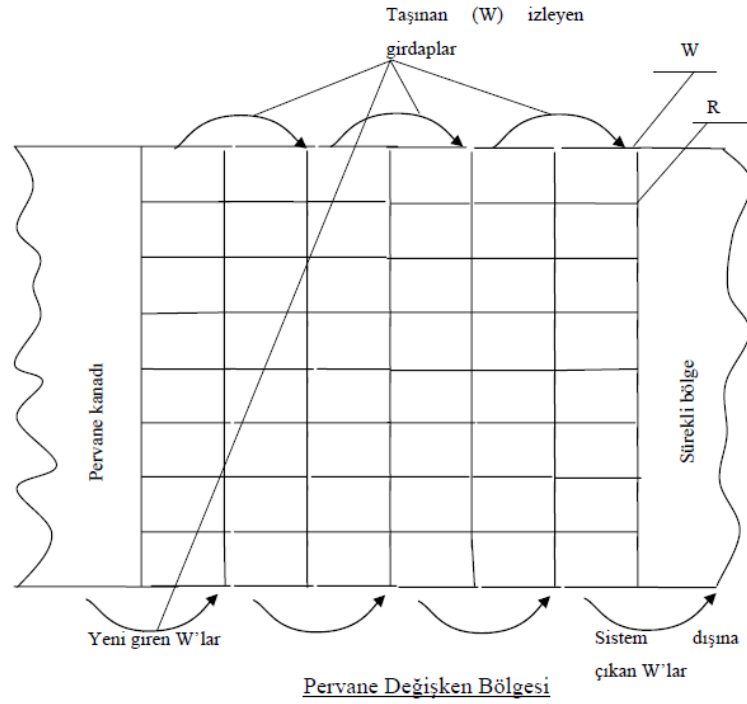
Kontrol noktalarına gelen akım hızı (pervane dönmesi dahil)

Pervane değişken girdap bölgesinin indüklediği hızlar

Lineer denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle, analiz edilen kanat pozisyonu için, kanat üzerindeki girdap dağılımları ve akım hız alanları bulunabilir [1].

3.2.3 Değişken Bölgede Serbest Girdapların Yenilenmesi

Mevcut kanat analiz pozisyonunda anahtar kanat etrafındaki akım hesapları tamamlandıktan sonra, kanat üzerindeki akım değişikliklerinin saklanması amacıyla, anahtar kanadın çıkış kenarını takip eden değişken bölgedeki girdap dağılımları yenilenir. Şöyle ki, izleyen girdap elemanlarının şiddetleri bir basamak geriye taşınır (Şekil 3. 4). Değişken bölgedeki her bir yarıçapta, pervane anahtar kanadının son şeridindeki izleyen girdap elemanları sisteme katılırken, değişken bölgenin son şeridindeki, girdap elemanları da sistemden çıkartılır. Böylece, mevcut kanat analiz pozisyonunda anahtar kanadın maruz kaldığı düzensiz akım etkileri, bir sonraki analiz pozisyonunda kanat izinde değişiklik şeklinde hesaplara yansıtılmak üzere hazırlanmış olur [1].



Şekil 3. 4 Değişken serbest girdap bölgelerinin yenilenmesi [1]

3.2.4 Basınç Dağılımlarının Hesaplanması

Biot-Savart formülü kullanılarak şiddetleri bilinmeyen $\overline{B}_p$ elemanlarının oluşturduğu lineer denklem sistemi kurulmaktadır. Bu sistem, denklem (3. 1) ile verilen integral denklemin sayısal eşitidir. Bu lineer denklem sistemi çözüldükten sonra indüklenen teğetsel hızların bileşkesi bulunur ve ardından pervane kanadının sırtındaki ve yüzündeki basınç dağılımları Bernoulli denkleminde elde edilen aşağıdaki (3. 5) denklemi kullanılarak hesaplanır [1].

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{0.5\rho V_\infty^2} = 1 - \left(\frac{V_i}{V_\infty} \right)^2 + \frac{2}{V_\infty^2} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (3. 5)$$

C_p : boyutsuz basınç katsayısı

p : söz konusu olan noktadaki basınç (kontrol noktasındaki)

p_∞ : sonsuzdaki basınç

ρ : suyun yoğunluğu

V_{∞} : sonsuzdaki akım hızı

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

φ : anahtar kanat üzerindeki yük dağılımını temsil eden hız potansiyeli

3.2.5 Pervane Kanadında Tabaka Kavitasyonunun Tesbiti ve Analizi

Pervane kanatları üzerindeki tabaka kavitasyonunun incelenmesi tüm kanat kesitleri için bağımsız olarak gerçekleştirilir ve denklem (3. 6) ile tanımlanan kavitasyon sayısına dayalı olarak yapılır [1].

$$\sigma = \frac{p_a + \rho gh - p_c}{1/2 \rho V_{\infty}^2} \quad (3. 6)$$

Burada:

p_a :atmosferik basınç

p_c :kritik buhar basıncı

h :kontrol noktasının derinliği

g :yerçekimi ivmesi

Daha önce tanımlanan kontrol noktalarının yerleri ve kaynak elemanları tabaka kavitasyonunun temsili için kullanılmaktadır. Bu kavitasyonun kanat giriş ucundan itibaren başladığı ve kanat boyunca yayıldığı kabul edilmektedir. Tabaka kavitasyonunun tespiti, giriş ucundan itibaren kanat kesitine ait kord uzunluğunun yaklaşık %5'lik bölgesi içinde süreksiz basınç dağılımının davranışına göre gerçekleştirilmektedir. Denklem (3. 7)'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 [1].

$$C_p + \sigma + \frac{4S}{\rho V_{\infty}^2 R_n} < 0 \quad (3. 7)$$

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 arttırırken 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 [1].

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 [1].

Tabaka kavitasyonunun yüzeyi üzerinde kuvvet dengesine dayalı dinamik sınır koşulu denklem (3. 8) ile verilmektedir. Bu koşulun, tabaka kavitasyonu olan yüzeyde meydana geldiği varsayılmaktadır [1].

$$-\sigma - C_p - \frac{4S}{\rho V_\infty^2 R_l} - \frac{8\mu V_{DF}}{\rho V_\infty^2 R_l} = \frac{2}{V_\infty^2} \frac{\partial \varphi_c}{\partial t} \quad (3. 8)$$

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

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

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

(3. 8) 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 3. 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 ($\frac{\partial \varphi_c}{\partial t}$), dinamik sınır koşulu denkleminde elde edilmekte ve denklem (3. 9) içinde bilinen bir değer olarak kullanılmaktadır [1].

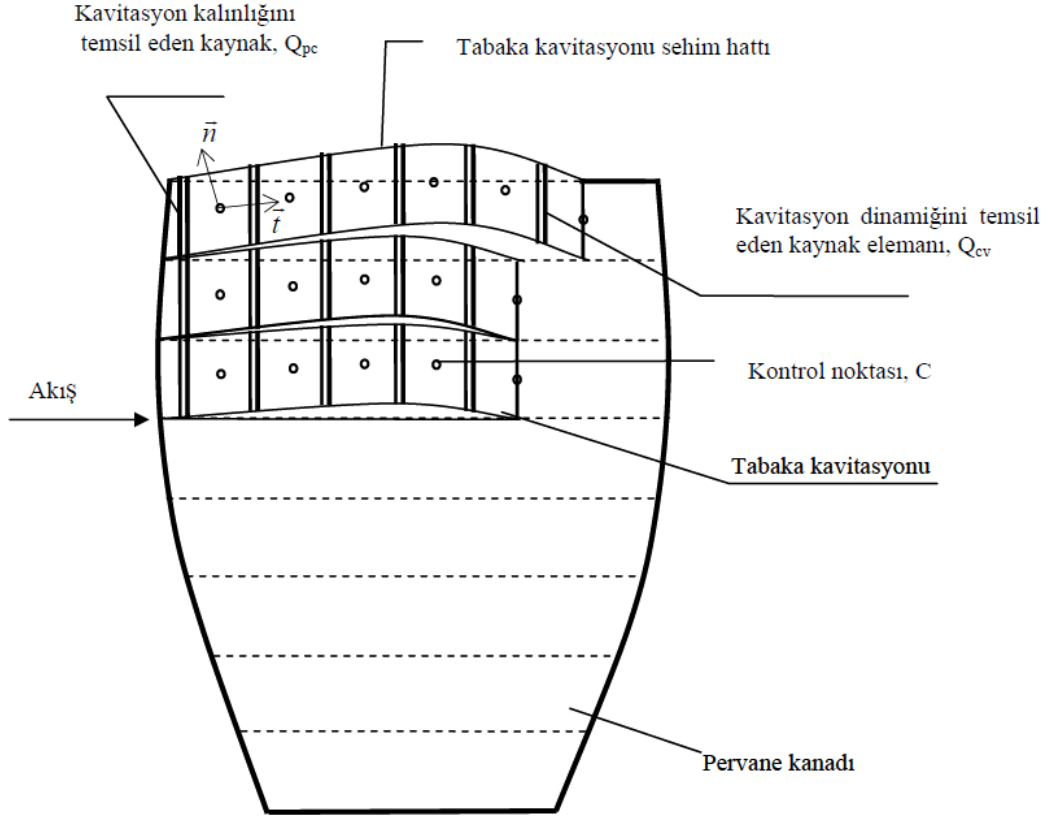
$$\frac{\delta \varphi_c}{\delta t} = -\frac{1}{4\pi} \sum \frac{1}{r_i} \frac{dQ_{cv}}{dt} \quad (3. 9)$$

Burada:

r_i :kaynaktan kontrol noktasına olan uzaklık

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

t :zaman



Şekil 3. 5 Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli [1]

Denklem (3. 9), 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 (3. 10) ile verilen lineerleştirilmiş basit bir formül yardımı ile elde edilebilmektedir [1].

$$V_{DF} = \frac{1}{\Delta R \cdot V_{\infty}} \frac{dQ_{cv}}{dt} \quad (3. 10)$$

Burada:

ΔR :kanadın üzerindeki kavitasyon tabakasının kord yönündeki şeridinin genişliği
(Şekil 3. 6)

V_{DF} :kavitasyon yüzeyinin deformasyon hızı

Bu deformasyon hız dağılımı kanadın o anki mevcut durumunu temsil eder. Bir sonraki kanat pozisyonundaki değerinden ayıran Δt zaman periyodu boyunca bu deformasyon hız dağılımının değişmediği varsayılmaktadır. Denklem (3. 10)'dan hesaplanan V_{DF} değeri, bir adım sonra analiz edilecek kanat pozisyonu için denklem (3. 8) içerisinde yerine konulmaktadır [1].

Analiz edilen j . ve $(j-1)$. kanat pozisyonlarını ayıran zaman adımının sonunda yerel kavitasyon kalınlığı denklem (3. 11)'de gösterildiği gibi hesaplanabilmektedir [1].

$$T_j = T_{j-1} + V_{DFj} \Delta t_j \quad (3. 11)$$

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 (3. 12) ile verilmektedir. Kavitasyon tabakasında sapma meydana geldiğinde, herhangi bir kort yönündeki şeritte yer alan kavitasyonun toplam alanı negatif olur ve bu şeritteki kavitasyon sonlandırılır (Şekil 3. 6) [1].

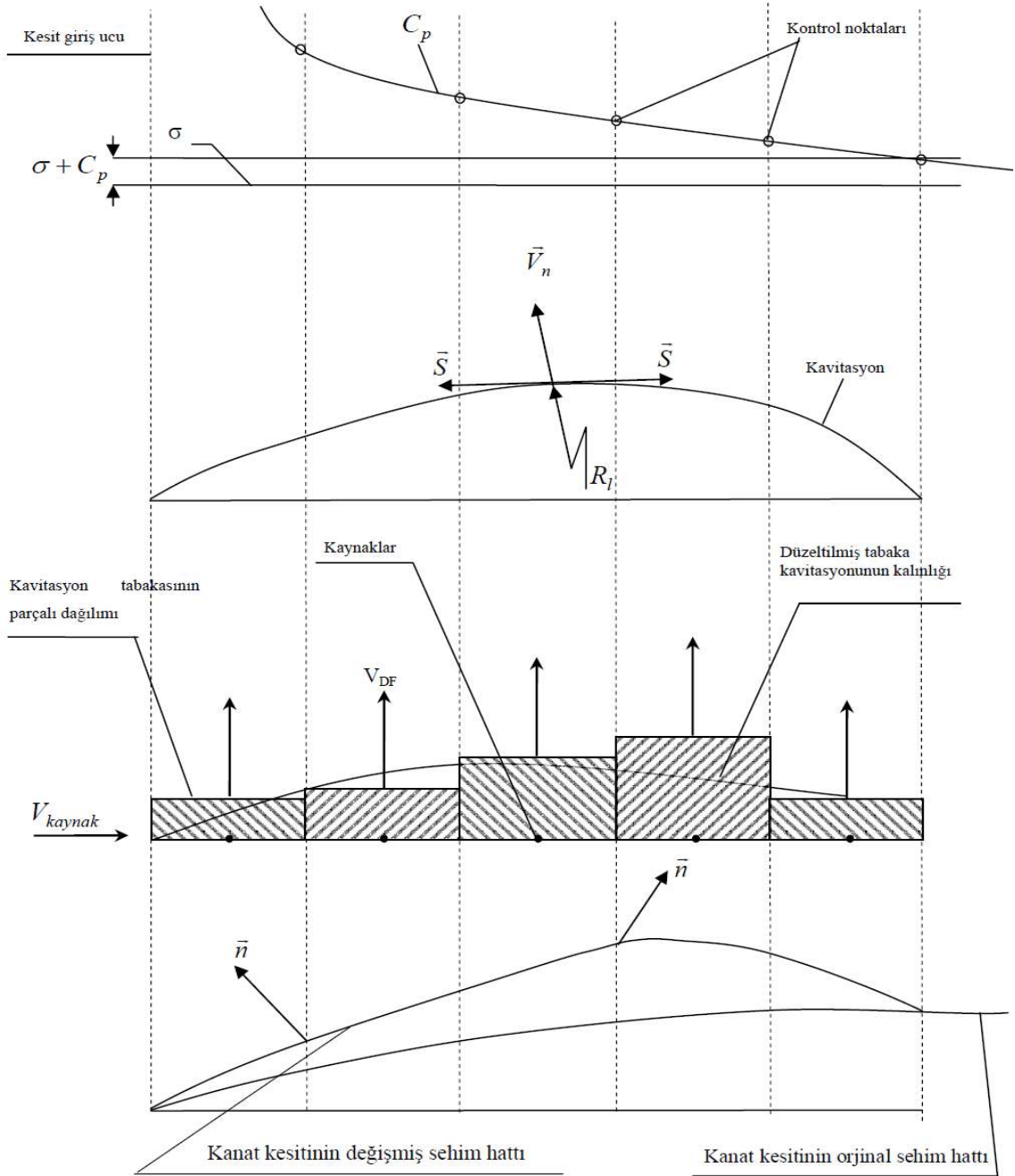
$$Q_{pc} = V_{kaynak} \Delta R \frac{dT_c}{dx} \quad (3. 12)$$

Burada:

V_{kaynak} : kaynak elemanına gelen akım hızı

ΔR : kort yönündeki şeritin radyal genişliği

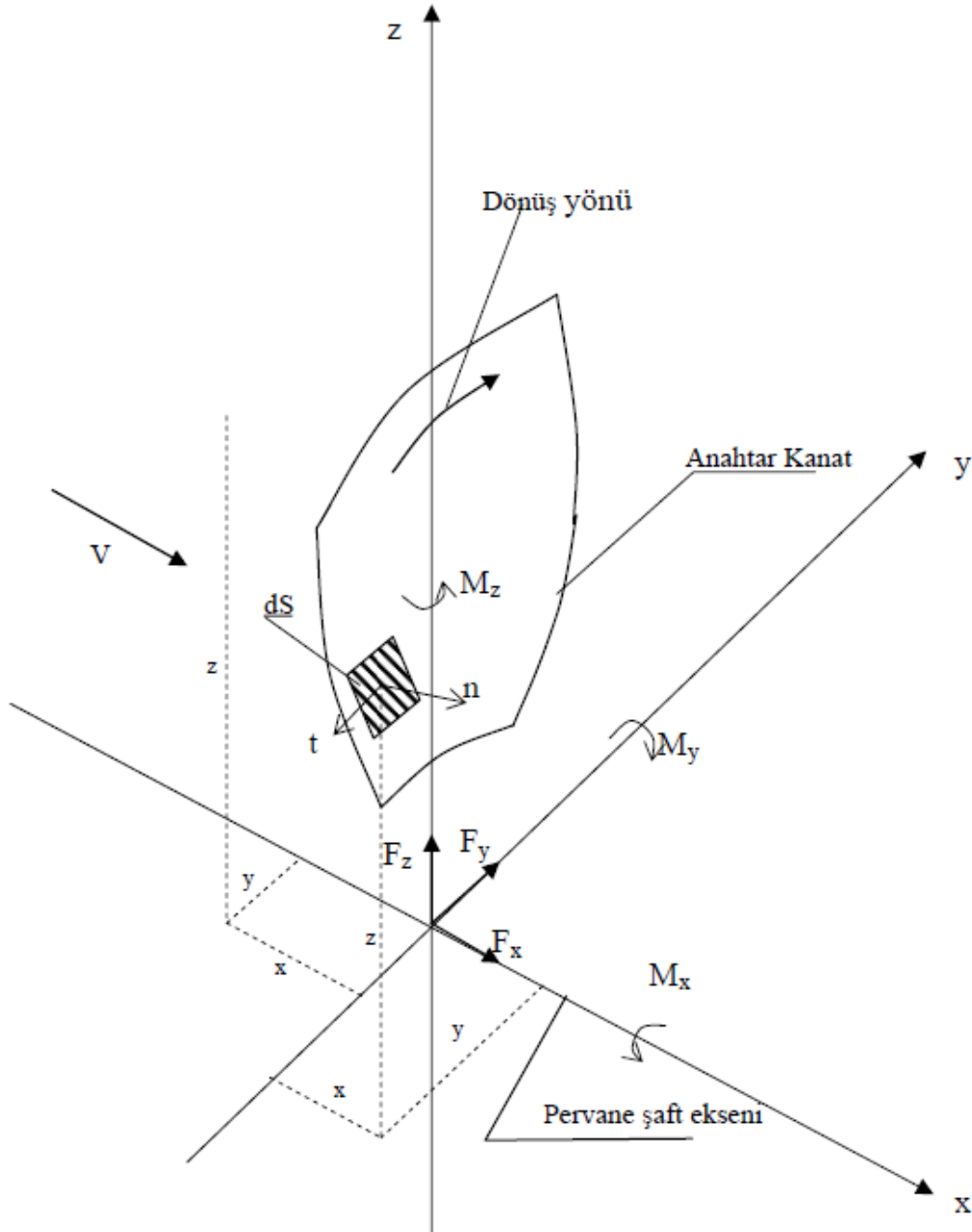
T_c : düzeltilmiş kavitasyon kalınlığı



Şekil 3. 6 Tabaka kavitasyon modeli [1]

3.2.6 Pervane Üzerindeki Kuvvet ve Moment Bileşenlerinin Hesaplanması

Her bir kanat pozisyonunda pervane kanadı üzerindeki kuvvet ve moment bileşenlerinin hesaplanmaları, kanat yüzeyindeki basınç dağılımlarının entegrasyonu ile yapılır (Şekil 3. 7). Bunun için daha önce hesaplanan basınç dağılımları kullanılır [1].



Şekil 3. 7 Pervane kanadına etkiyen kuvvet ve moment bileşenleri [1]

Anahtar kanat üzerindeki kuvvet ve moment bileşenleri denklem (3. 13)'de verilen eşitlikler ile hesaplanmaktadır [1].

x, y ve z kuvvet bileşenleri,

$$\begin{aligned}
 F_{sx} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [C_p \cdot n_x + C_D \cdot t_x] ds \\
 F_{sy} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [C_p \cdot n_y + C_D \cdot t_y] ds \\
 F_{sz} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [C_p \cdot n_z + C_D \cdot t_z] ds
 \end{aligned} \tag{3. 13}$$

x, y ve z moment bileşenleri,

$$\begin{aligned}
 M_{sx} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [C_p \cdot (n_z \cdot y - n_y \cdot z) + C_D \cdot (t_z \cdot y - t_y \cdot z)] ds \\
 M_{sy} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [C_p \cdot (n_x \cdot z - n_z \cdot x) + C_D \cdot (t_x \cdot z - t_z \cdot x)] ds \\
 M_{sz} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [C_p \cdot (n_y \cdot x - n_x \cdot y) + C_D \cdot (t_y \cdot x - t_x \cdot y)] ds
 \end{aligned}$$

Burada:

ρ : suyun yoğunluğu

n : pervane devir sayısı

ΔC_p : emme ve basınç tarafları arasındaki basınç katsayısı farkı

C_D : kesit direnç katsayısı

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

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

S : kanat alanı

Kanat kesit direnç katsayıları için denklem (3. 14) kullanılmakta veya kanat kesitleri biliniyorsa giriş değeri olarak analiz işlemlerine katılmaktadır [1].

$$C_D = 2 \left(1 + 2 \frac{t_{\max}}{c} \right) \left(1.89 + 1.62 \log \frac{c}{0.00003} \right)^{-2.5} \tag{3. 14}$$

Burada:

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

c : kesit kort uzunluğu

BÖLÜM 4

SAYISAL BULGULAR VE YORUMLAR

Bu çalışmada, Bölüm 3’de ayrıntılı olarak anlatılan ve formülasyonu verilen uniform olmayan akım ortamında çalışan pervanelerin performans ve tabaka kavitasyonu analizi için temeli Szantyr’ın kaldırıcı yüzey metotuna dayanan ve geliştirilmekte olan bir metot kullanılmıştır [18]. Tam ölçekte iki adet pervanenin (P1 ve P2) değişik tabaka kavitasyon karakteristiklerine olan etkisi sayısal olarak incelenmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Uygulama 1

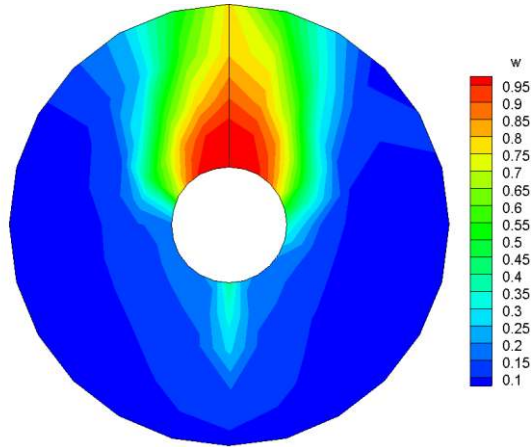
İlk uygulama olarak P1 pervanesi ele alınmıştır [26]. Pervaneye ait geometri Çizelge 4. 1’de, çalışma koşulları ise Çizelge 4. 2’de verilmektedir. Çizelge 4. 3’de ise eksenel boyutsuz hız dağılımları verilmektedir. Burada belirtilen θ açısı kanat pozisyon açısı olup, sağ dönüşlü bir pervane için saat ibresi yönünde pozitif kabul edilmektedir. Pervanenin çalıştığı ortamdaki nominal iz dağılımı Şekil 4. 1’de ve P1 pervanesinin Rhinoceros programı yardımıyla çizilen geometrisi Şekil 4. 2’de gösterilmektedir. Şekil 4. 3 - Şekil 4. 6 arasında, $r/R=0.724$ ve $r/R=0.928$ boyutsuz yarıçaplarda $\theta=0^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonlarında elde edilen basınç dağılımları boyutsuz kort uzunluğuna(x/c) göre karşılaştırılmalı olarak verilmektedir. Şekil 4. 7 ve Şekil 4. 8’de P1 pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımları gösterilmektedir.

Çizelge 4. 1 P1 pervanesine ait kanat geometrisi

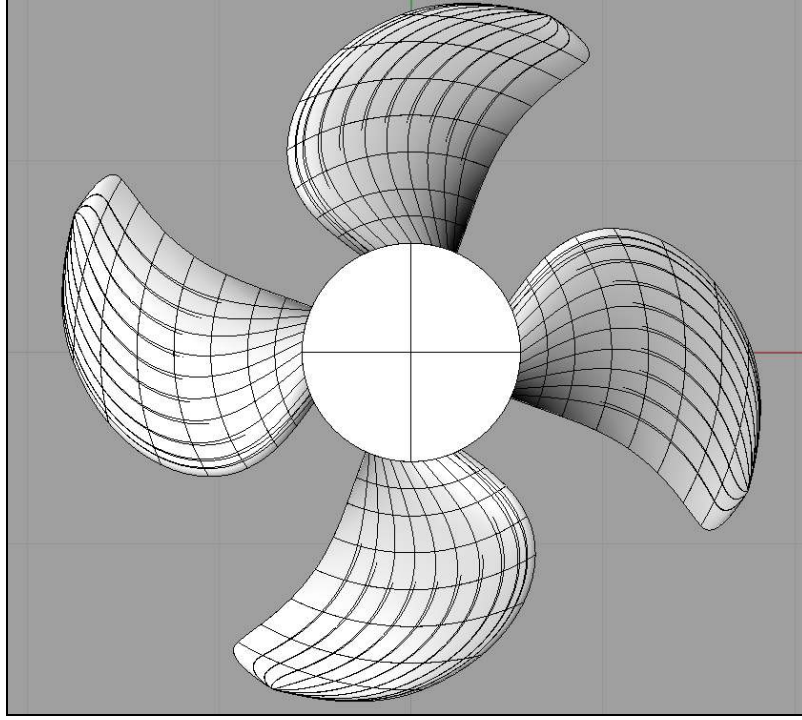
Boyutsuz yarıçap r/R	Kord Dağılımı c/D	Çalıklık Dağılımı (m)	Hatve Dağılımı P/D	Eğiklik Dağılımı (m)	Kalınlık Dağılımı T/c	Sehim Dağılımı F/c
0.3	0.171	-0.017	0.722	0.000	0.247	0.025
0.35	0.205	-0.052	0.757	0.000	0.189	0.033
0.4	0.236	-0.082	0.787	0.000	0.149	0.033
0.5	0.289	-0.122	0.833	0.000	0.099	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 4. 2 P1 pervanesine 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°
Rake (eğiklik)	0°
Pervane Tipi	Sabit kanatlı
Pervane Açıksu Verimi	0.7836
İtme katsayısı	0.199616
Tork katsayısı	0.028543



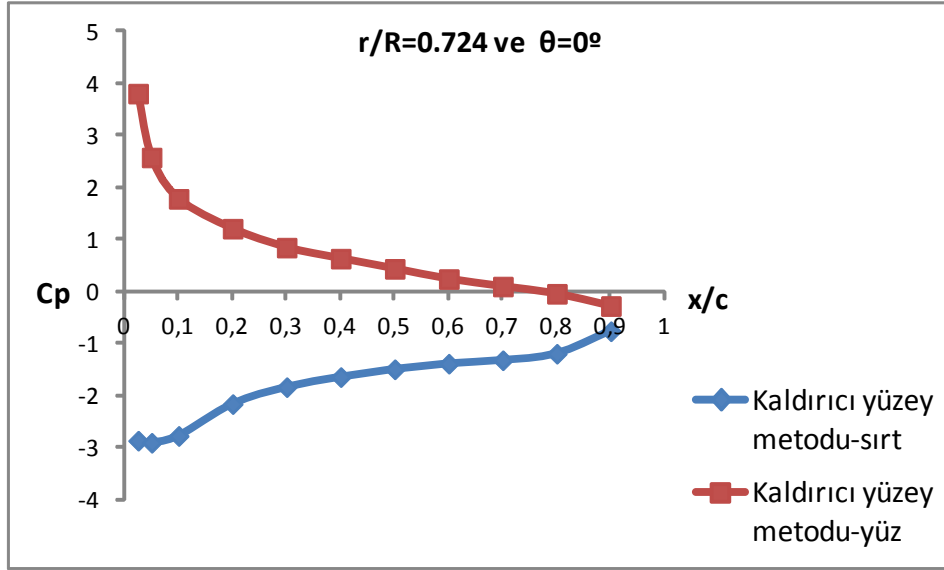
Şekil 4. 1 P1 pervanesine ait nominal iz dağılımı



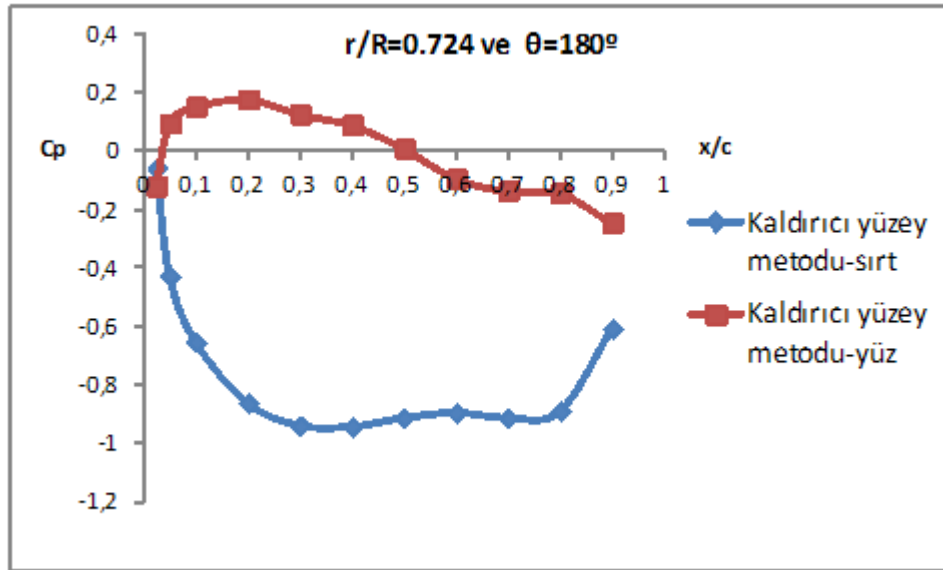
Şekil 4. 2 Rhinoceros programında çizilen P1 pervanesi

Çizelge 4. 3 P1 pervanesine ait eksenel boyutsuz hız dağılımı $(1-w_x)=\frac{V_x}{V}$

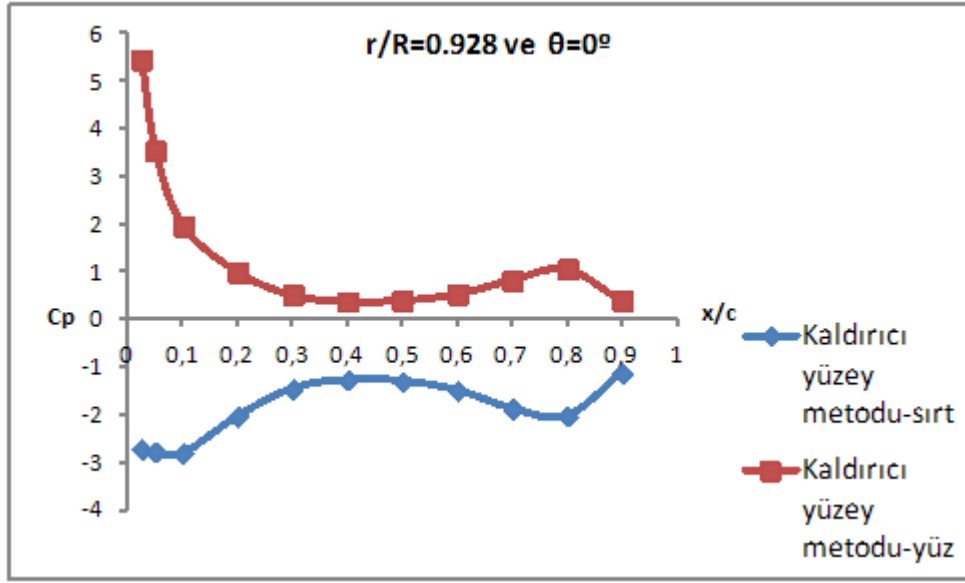
1-w_x=V_x/V					
θ [derece]	Boyutsuz yarıçap (r/R)				
	0.31	0.49	0.67	0.926	1.178
0	0.0060	0.0120	0.0970	0.2110	0.2290
15	0.0100	0.0450	0.1620	0.2900	0.4910
30	0.0360	0.1420	0.3600	0.6280	0.7690
45	0.1150	0.3480	0.6880	0.8480	0.9550
60	0.2560	0.5610	0.8540	0.8990	0.8950
75	0.4870	0.7190	0.9040	0.9130	0.9020
90	0.6430	0.8520	0.9180	0.9200	0.9110
105	0.7120	0.8780	0.9160	0.9230	0.9230
120	0.7940	0.8800	0.9110	0.9230	0.9310
135	0.8232	0.8650	0.9030	0.9180	0.9330
150	0.8090	0.8490	0.8900	0.9090	0.9300
165	0.7880	0.8270	0.8690	0.8900	0.9220
180	0.6020	0.6760	0.7370	0.8750	0.9120
195	0.7910	0.8290	0.8620	0.8870	0.9190
210	0.8040	0.8480	0.8800	0.9060	0.9330
225	0.8180	0.8600	0.8930	0.9160	0.9340
240	0.8240	0.8680	0.8970	0.9200	0.9290
255	0.8310	0.8690	0.8980	0.9200	0.9220
270	0.8270	0.8550	0.8990	0.9170	0.9200
285	0.6630	0.7720	0.8930	0.9100	0.9130
300	0.3110	0.5420	0.8620	0.9160	0.9140
315	0.1280	0.3600	0.6960	0.8650	0.8610
330	0.0340	0.1600	0.4110	0.7400	0.7780
345	0.0140	0.0480	0.2160	0.3970	0.5220
360	0.0060	0.0120	0.0970	0.2110	0.2290



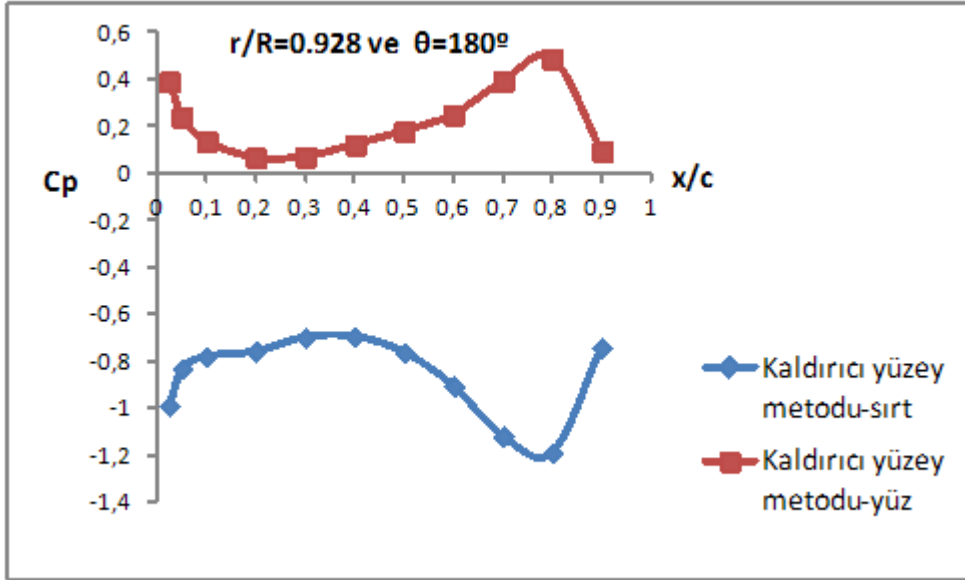
Şekil 4. 3 P1 pervanesinin $r/R=0.724$ kesitinde ve $\theta=0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



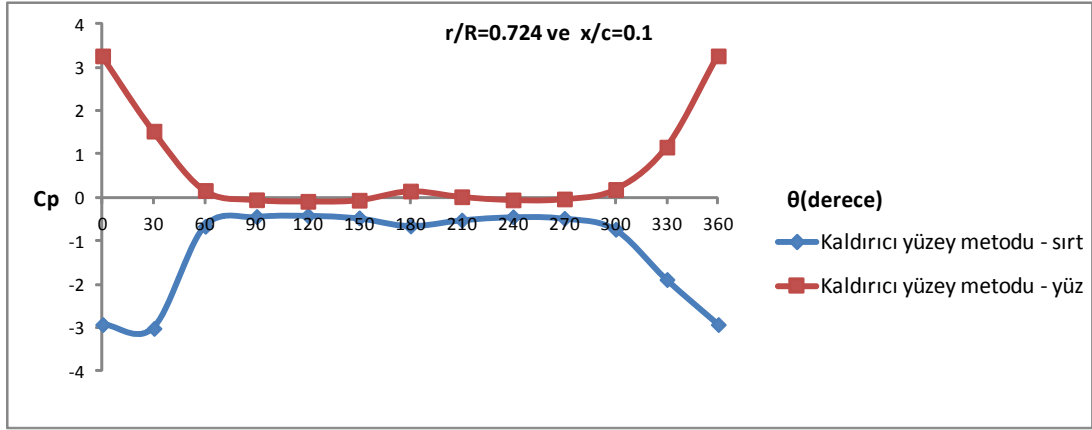
Şekil 4. 4 P1 pervanesinin $r/R=0.724$ kesitinde ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



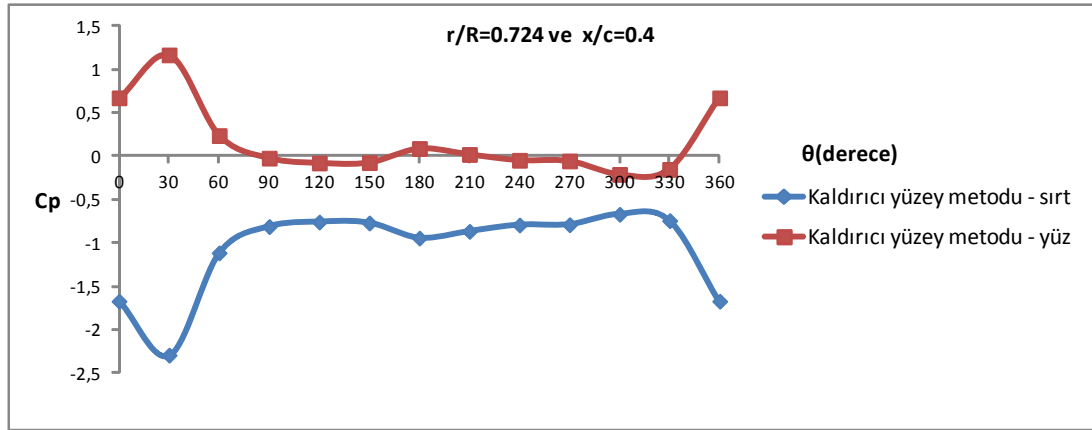
Şekil 4. 5 P1 pervanesinin $r/R=0.928$ kesitinde ve $\theta=0^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı



Şekil 4. 6 P1 pervanesinin $r/R=0.928$ kesitinde ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonundaki basınç dağılımı

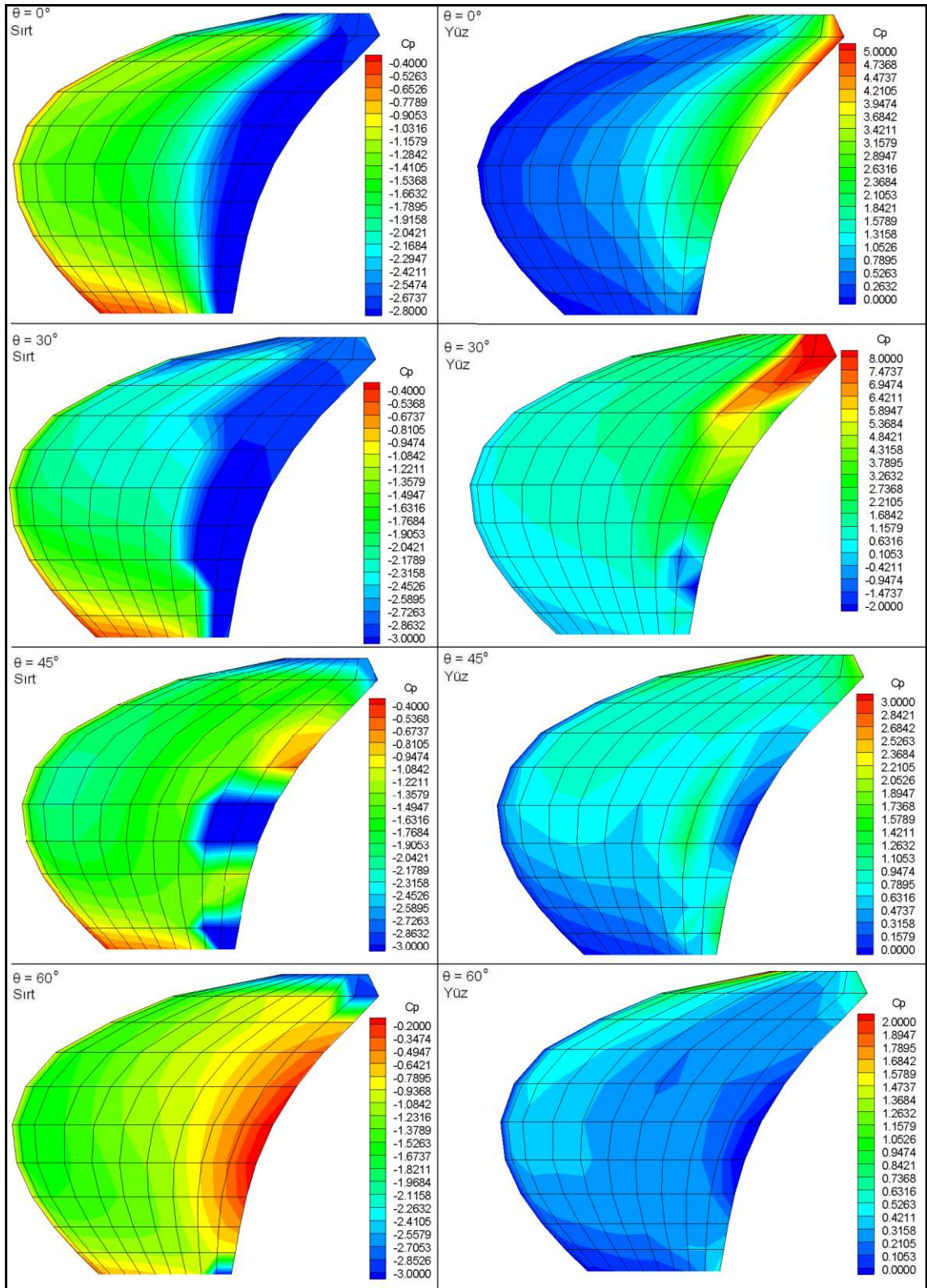


Şekil 4. 7 P1 pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R=0.724$ ve $x/c=0.1$)

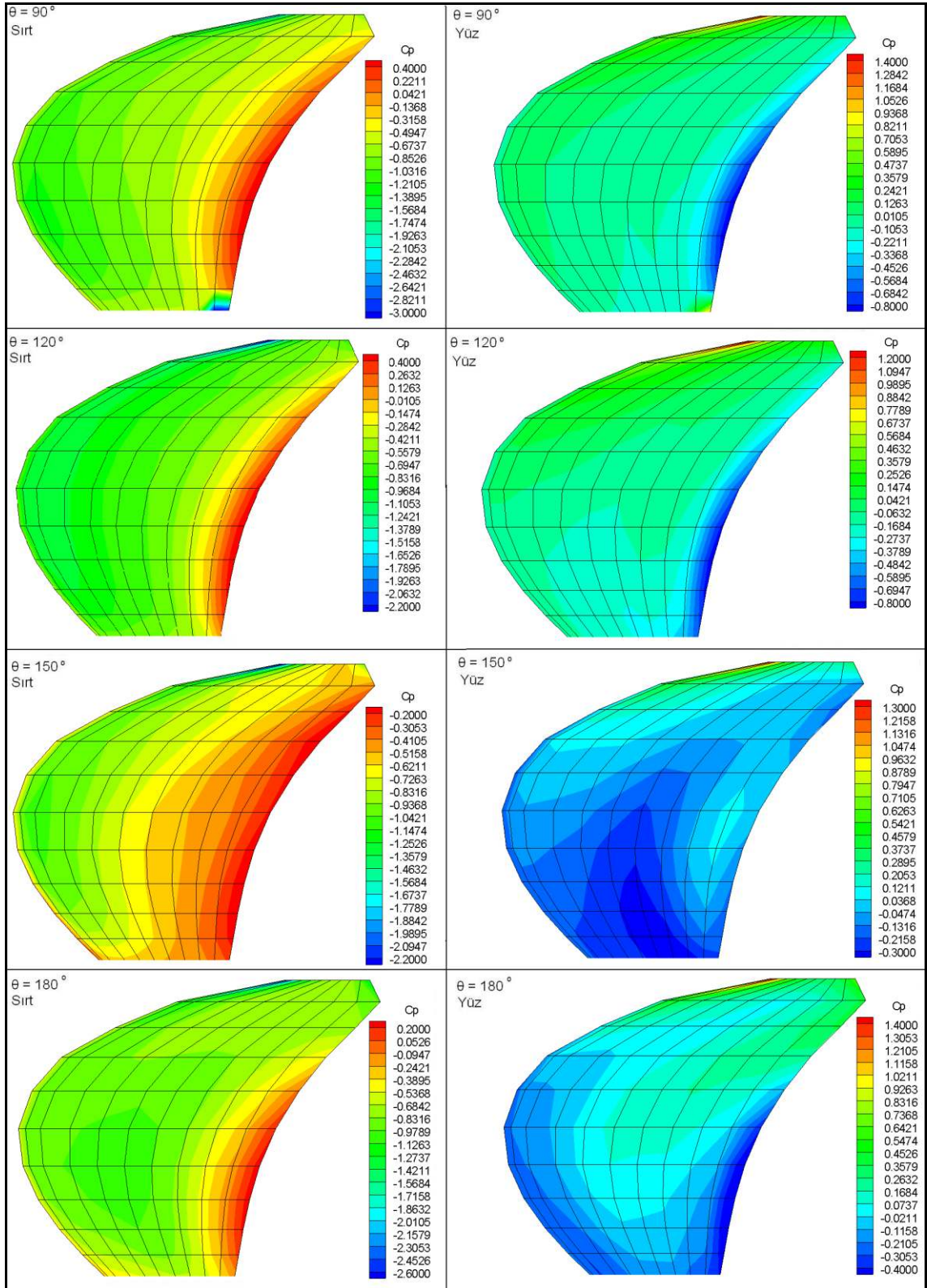


Şekil 4. 8 P1 pervanesinin bir tam devri esnasında meydana gelen basınç dağılımı ($r/R=0.724$ ve $x/c=0.4$)

Şekil 4. 9 ve Şekil 4. 10'da P1 pervanesinin $\theta=0^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=90^\circ$, $\theta=120^\circ$, $\theta=150^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonlarında, kanadın sırt ve emme tarafındaki basınç dağılımlarının kaldırıcı yüzey metotundan elde edilen değerleri gösterilmektedir.

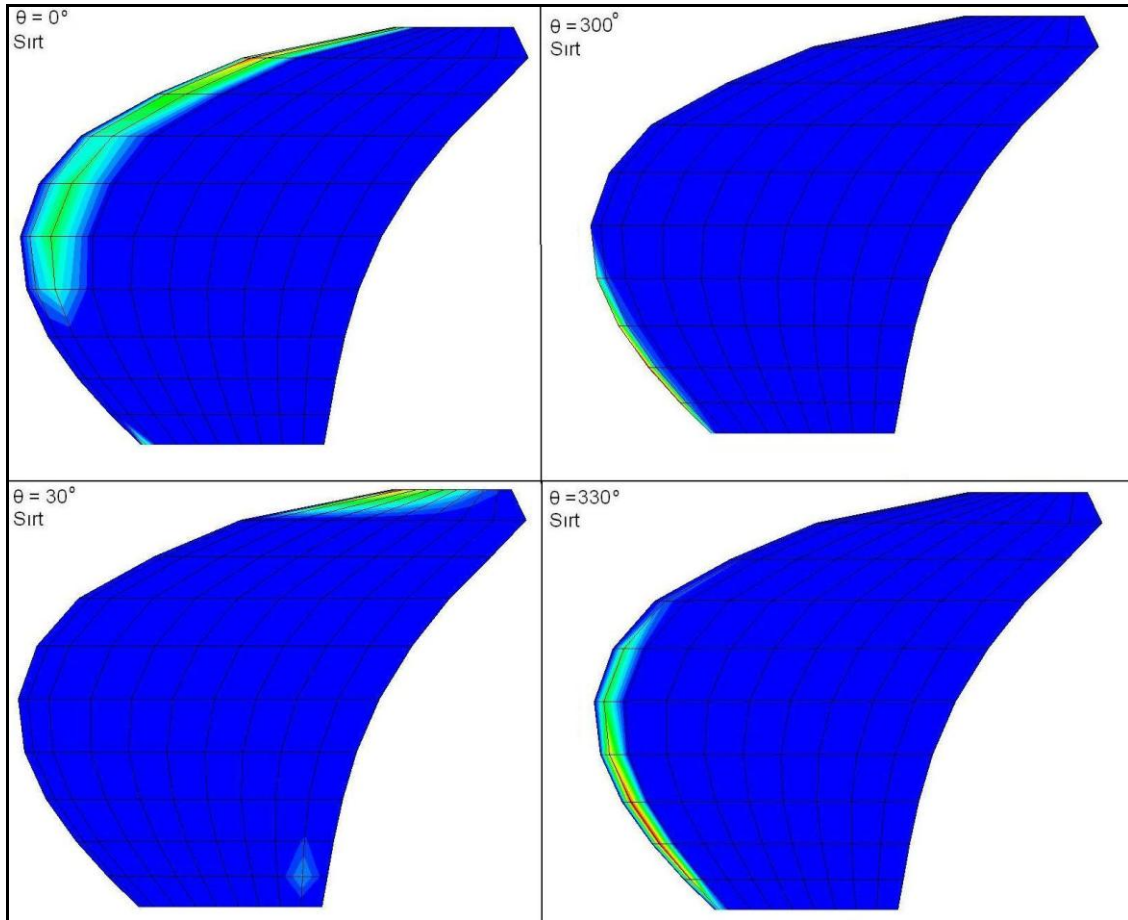


Şekil 4. 9 P1 pervanesinin 0° - 60° arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metotundan elde edilen sırtta ve yüzde basınç dağılımları



Şekil 4. 10 P1 pervanesinin 90° - 180° arasındaki açılardaki kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metotundan elde edilen sırtta ve yüzde basınç dağılımları

P1 pervanesinin ele alınan test koşulunda az miktarda tabaka kavitasyonu gösterdiği kaldırıcı yüzey metodu tarafından elde edilen sonuçlarda görülmüştür. Kaldırıcı yüzey metodu ile yapılan analizde pervanenin $\theta=80^\circ$ - 290° kanat pozisyon açıları arasında hiç tabaka kavitasyonu göstermediği, $\theta=40^\circ$ - 75° kanat pozisyon açıları arasında sadece kanadın uç kesitinde ($r/R=0.977$) çok az tabaka kavitasyonu gösterdiği ve $\theta=295^\circ$ - 40° kanat pozisyon açıları arasında giriş ucunda tabaka kavitasyonu gösterdiği tespit edilmiştir. $\theta=0^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=300^\circ$ ve $\theta=330^\circ$ 'deki tabaka kavitasyon formları Şekil 4. 11'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 11 P1 pervanesinin değişik kanat pozisyonlarında kaldırıcı yüzey metotundan elde edilen sırtta tabaka kavitasyon formları

Uygulama 2

İkinci uygulama olarak, tüm kesitlerinde NACA16 kalınlık dağılımı ile $a=0.8$ sehim dağılımı kullanılan P2 pervanesi ele alınmıştır. Pervaneye ait geometri Çizelge 4. 4’de, pervaneye ait karakteristikler ise Çizelge 4. 5’de verilmektedir. Pervanenin çalıştığı ortamdaki nominal iz dağılımı Şekil 4. 12’de gösterilmektedir.

Çizelge 4. 4 P2 pervanesine ait kanat geometrisi

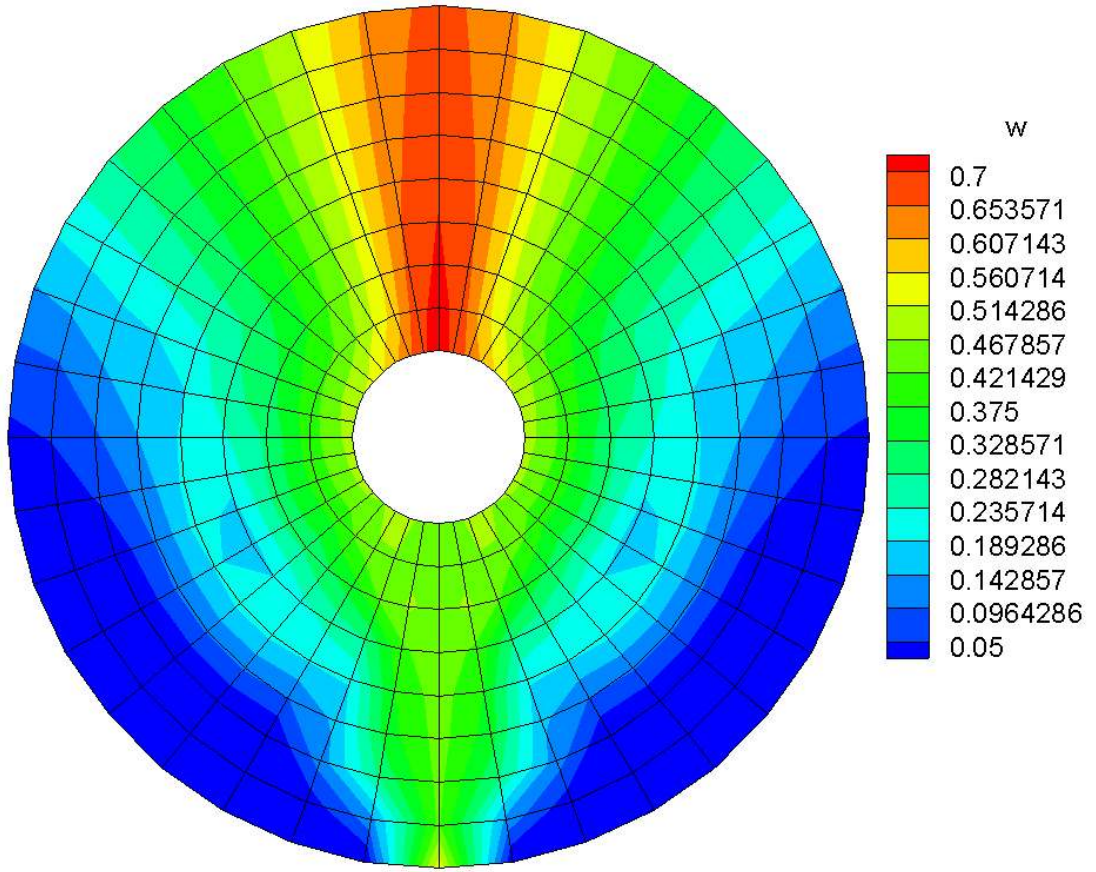
r/R	P/D	Kord (m)	Çalıklik (m)	Eğiklik (m)	Max. Kalınlık(m)	Max. Sehim (m)
0.2	0.5734	0.5979	0.0000	0.0399	0.1039	0.0000
0.3	0.5866	0.6982	0.0082	0.0599	0.0920	0.0220
0.4	0.6027	0.7825	0.0338	0.0798	0.0801	0.0174
0.5	0.6217	0.8477	0.0779	0.0998	0.0682	0.0149
0.6	0.6261	0.8906	0.1408	0.1197	0.0562	0.0139
0.7	0.6444	0.8953	0.2252	0.1397	0.0443	0.0158
0.8	0.6619	0.8350	0.3346	0.1597	0.0324	0.0147
0.9	0.6746	0.6615	0.4746	0.1796	0.0204	0.0147
1.0	0.6825	0.4500	0.6573	0.1996	0.0085	0.0000

Çizelge 4. 5 P2 pervanesine ait karakteristikler

Gemi hızı, V (m/s)	6.43
Pervane devir sayısı, n (1/s)	4.1170
$J=V/nD$	0.55
Pervane Çapı, D (m)	2.84
Kanat sayısı, Z	4
Göbek çapı/Pervane çapı oranı	0.176
Dönüş yönü	Sağ dönüşlü
Çalıklık	24°
Eğiklik	8°
Makina gücü (%100 MCR)	2665 BHP
Pervane Tipi	Sabit kanatlı, Eğrilikli
Pervane Açıksu Verimi	0.542
İtme katsayısı	0.15124
Tork katsayısı	0.01786

Çizelge 4. 6 P2 pervanesine ait eksenel boyutsuz hız dağılımı $(1-w_x)=\frac{V_x}{V}$

$1-w_x=V_x/V$									
θ [derece]	Boyutsuz yarıçap r/R								
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
0	0.281	0.284	0.291	0.298	0.305	0.312	0.317	0.321	0.325
10	0.306	0.317	0.334	0.347	0.355	0.362	0.370	0.376	0.384
20	0.358	0.415	0.442	0.456	0.464	0.471	0.478	0.485	0.493
30	0.399	0.483	0.520	0.538	0.549	0.557	0.565	0.572	0.578
40	0.440	0.535	0.577	0.605	0.620	0.631	0.640	0.648	0.654
50	0.475	0.568	0.628	0.658	0.680	0.696	0.707	0.717	0.725
60	0.486	0.580	0.653	0.711	0.735	0.754	0.771	0.784	0.794
70	0.496	0.589	0.675	0.722	0.784	0.811	0.826	0.847	0.862
80	0.503	0.596	0.689	0.741	0.812	0.835	0.866	0.911	0.920
90	0.508	0.601	0.712	0.769	0.806	0.859	0.912	0.947	0.962
100	0.513	0.605	0.708	0.796	0.800	0.886	0.944	0.989	1.000
110	0.515	0.608	0.702	0.821	0.797	0.900	0.985	1.000	1.000
120	0.516	0.608	0.700	0.828	0.806	0.896	1.000	1.000	1.000
130	0.519	0.608	0.707	0.811	0.796	0.896	1.000	1.000	1.000
140	0.536	0.573	0.678	0.777	0.799	0.898	1.000	1.000	1.000
150	0.513	0.540	0.645	0.750	0.807	0.905	1.000	1.000	1.000
160	0.528	0.533	0.571	0.716	0.805	0.847	0.881	0.981	1.000
170	0.538	0.543	0.526	0.587	0.625	0.649	0.712	0.870	1.000
180	0.536	0.541	0.546	0.551	0.556	0.561	0.566	0.572	0.450
190	0.538	0.543	0.526	0.587	0.625	0.649	0.712	0.870	1.000
200	0.528	0.533	0.571	0.716	0.805	0.847	0.881	0.981	1.000
210	0.513	0.540	0.645	0.750	0.807	0.905	1.000	1.000	1.000
220	0.536	0.573	0.678	0.777	0.799	0.898	1.000	1.000	1.000
230	0.519	0.608	0.707	0.811	0.796	0.896	1.000	1.000	1.000
240	0.516	0.608	0.700	0.828	0.806	0.896	1.000	1.000	1.000
250	0.515	0.608	0.702	0.821	0.797	0.900	0.985	1.000	1.000
260	0.513	0.605	0.708	0.796	0.800	0.886	0.944	0.989	1.000
270	0.508	0.601	0.712	0.769	0.806	0.859	0.912	0.947	0.962
280	0.503	0.596	0.689	0.741	0.812	0.835	0.866	0.911	0.920
290	0.496	0.589	0.675	0.722	0.784	0.811	0.826	0.847	0.862
300	0.486	0.58	0.653	0.711	0.735	0.754	0.771	0.784	0.794
310	0.475	0.568	0.628	0.658	0.680	0.696	0.707	0.717	0.725
320	0.440	0.535	0.577	0.605	0.620	0.631	0.640	0.648	0.654
330	0.399	0.483	0.520	0.538	0.549	0.557	0.565	0.572	0.578
340	0.358	0.415	0.442	0.456	0.464	0.471	0.478	0.485	0.493
350	0.306	0.317	0.334	0.347	0.355	0.362	0.370	0.376	0.384
360	0.281	0.284	0.291	0.298	0.305	0.312	0.317	0.321	0.325

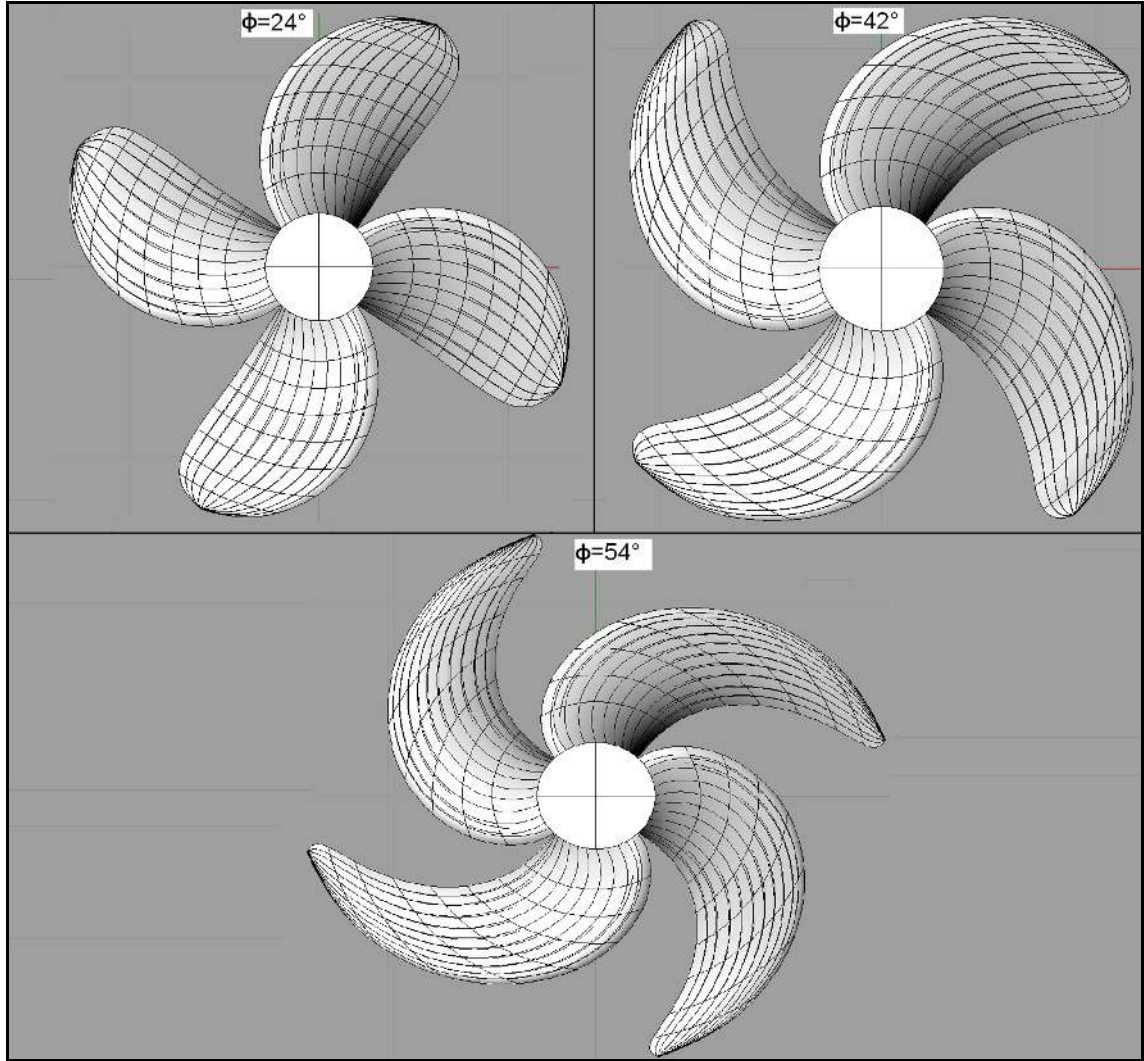


Şekil 4. 12 P2 pervanesine ait nominal iz dağılımı

Birinci uygulamadan farklı olarak, tabaka kavitasyonu üzerinde pervane geometrisinin etkisini incelemek için P2 pervanesinde birtakım parametrik çalışmalar yapılmıştır. İlk olarak, çalıklığın etkisini göstermek amacı ile orjinal P2 pervanesinin; çalıklık açıları $\phi=42^\circ$ ve $\phi=54^\circ$ olacak şekilde değiştirilerek farklı pervane geometrileri elde edilmiştir. Çalıklık; pervane kanadının simetrik olmaması, arkaya ve yana doğru bir eğriliği bulunmasıdır[27]. Orjinal P2 pervanesinden türetilmiş yeni pervanelere ait çalıklık miktarları boyutsuz yarıçap değerlerine göre metre cinsinden Çizelge 4. 7’de verilmiştir. Ayrıca, çalıklığı değiştirilerek türetilen yeni pervanelerin Rhinoceros programı yardımıyla çizilen geometrileri Şekil 4.13 ’de gösterilmektedir.

Çizelge 4. 7 Orjinal P2 pervanesinin yeni çalıklık miktarları

r/R	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
$\phi=24^\circ$ (orjinal)	0.000	0.008	0.034	0.078	0.141	0.225	0.335	0.475	0.657
$\phi=42^\circ$	0.000	0.016	0.068	0.156	0.282	0.450	0.669	0.949	1.315
$\phi=54^\circ$	0.000	0.025	0.101	0.234	0.422	0.676	1.004	1.424	1.972



Şekil 4. 13 Rhinoceros programında çizilen çeşitli çalıklık açlarına sahip P2 pervaneleri
Analizlerde hatve oranının etkisini göstermek amacı ile orjinal P2 pervanesinin; hatve oranları %10 arttırılıp ve %10 azaltılarak farklı pervane geometrileri elde edilmiştir. Hatve; pervanenin tam bir dönüşü sırasında ilerlediği mesafeye denir[27]. Orjinal P2

pervanesinden türetilmiş yeni pervanelere ait hatve oranları boyutsuz yarıçap değerlerine göre Çizelge 4. 8’de verilmiştir.

Çizelge 4. 8 Orjinal P2 pervanesinin yeni hatve oranları

r/R	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Hatve Orjinal	0.573	0.587	0.603	0.622	0.626	0.644	0.662	0.675	0.683
%10 fazla Hatve	0.631	0.645	0.663	0.684	0.689	0.709	0.728	0.742	0.751
%10 eksik Hatve	0.568	0.581	0.597	0.615	0.620	0.638	0.655	0.668	0.676

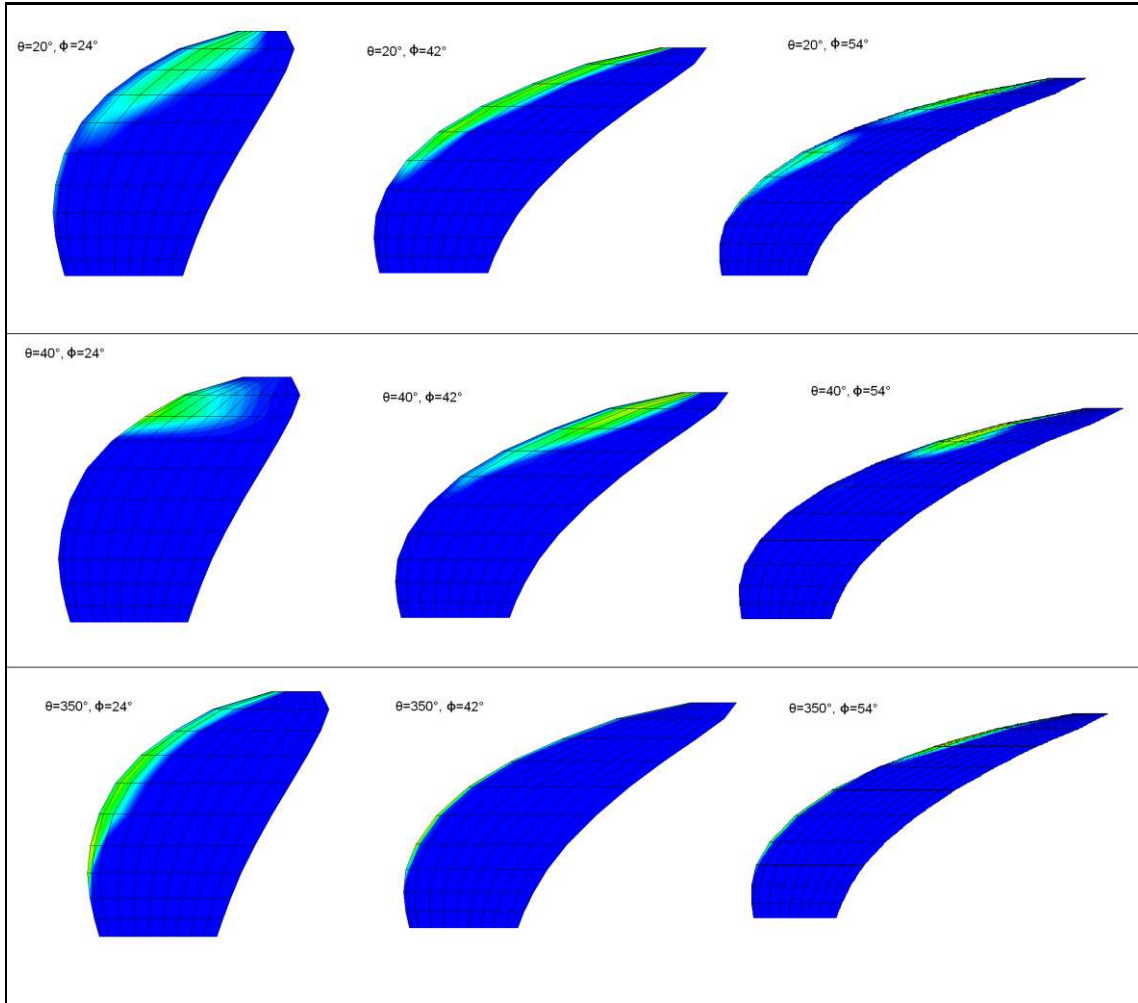
Analizlerde sehim miktarının etkisini göstermek amacı ile orjinal P2 pervanesinin; sehim miktarı %10 arttırılıp ve %10 azaltılarak farklı pervane geometrileri elde edilmiştir. Orjinal P2 pervanesinden türetilmiş yeni pervanelere ait sehim miktarları boyutsuz yarıçap değerlerine göre metre cinsinden Çizelge 4. 9’da verilmiştir.

Çizelge 4. 9 Orjinal P2 pervanesinin yeni sehim miktarları

r/R	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Sehim Orjinal	0.000	0.022	0.017	0.015	0.014	0.016	0.015	0.015	0.000
%10 fazla Sehim	0.000	0.024	0.019	0.016	0.015	0.017	0.016	0.016	0.000
%10 eksik Sehim	0.000	0.020	0.016	0.013	0.013	0.014	0.013	0.013	0.000

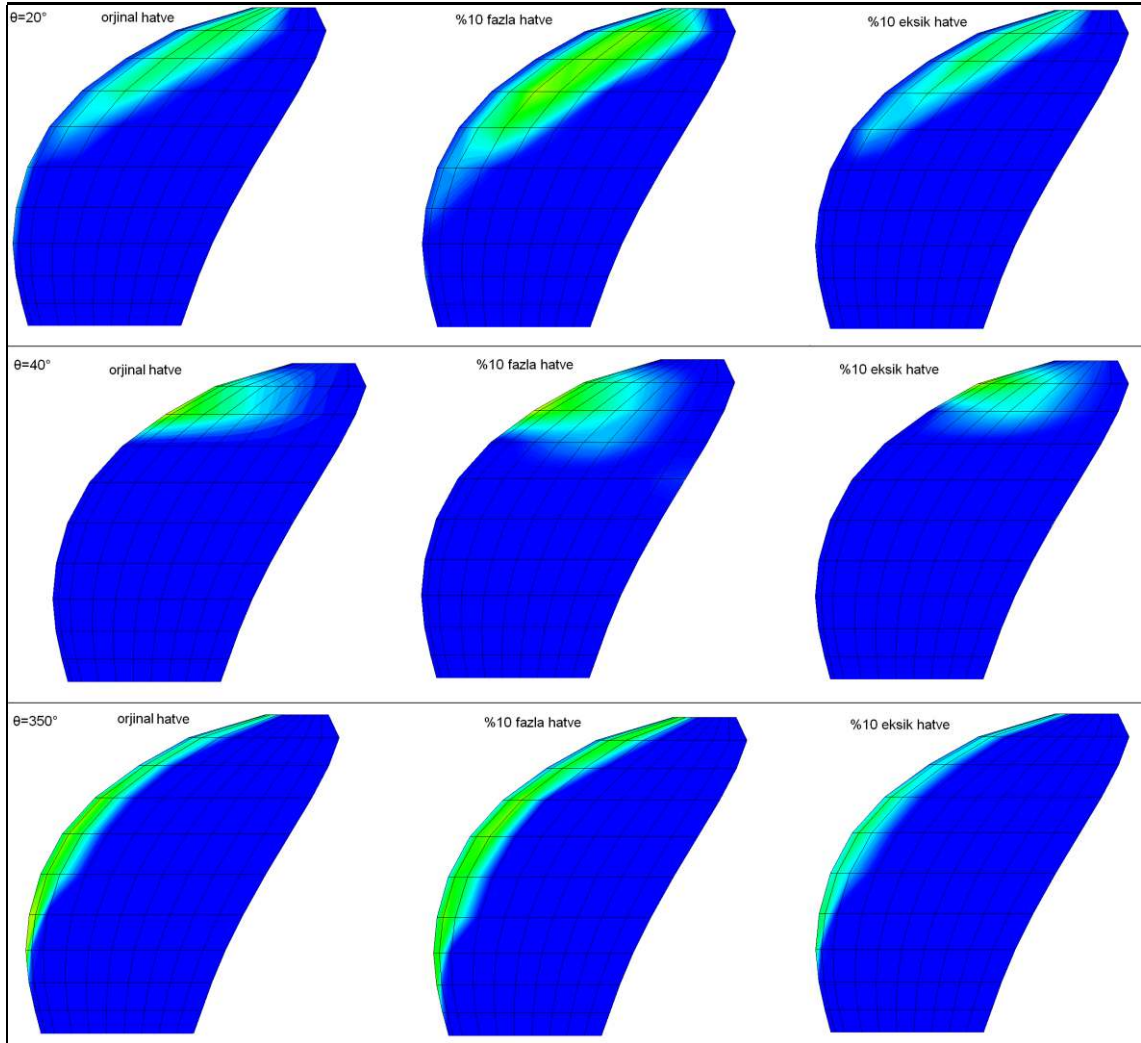
Çalıklığın, hatve oranının ve sehim miktarının tabaka kaviteye olan etkisini göstermek amacıyla söz konusu çalışma koşullarında, üç farklı çalıklık açısında ($\phi=24^\circ$, 42° ve 54°), üç farklı hatve oranında (orjinal hatve, %10 fazla hatve ve %10 eksik hatve) ve üç farklı sehim miktarında (orjinal sehim, %10 fazla sehim ve %10 eksik sehim) üç farklı kanat pozisyonu için ($\theta=20^\circ$, 40° ve 350°) oluşan tabaka kaviteye formları sırası ile Şekil 4. 14, Şekil 4. 15 ve Şekil 4. 16’da verilmektedir.

Şekil 4. 14’de görüldüğü gibi, çalıklık açısı arttıkça tabaka kavitasyonun azaldığı tespit edilmiştir.



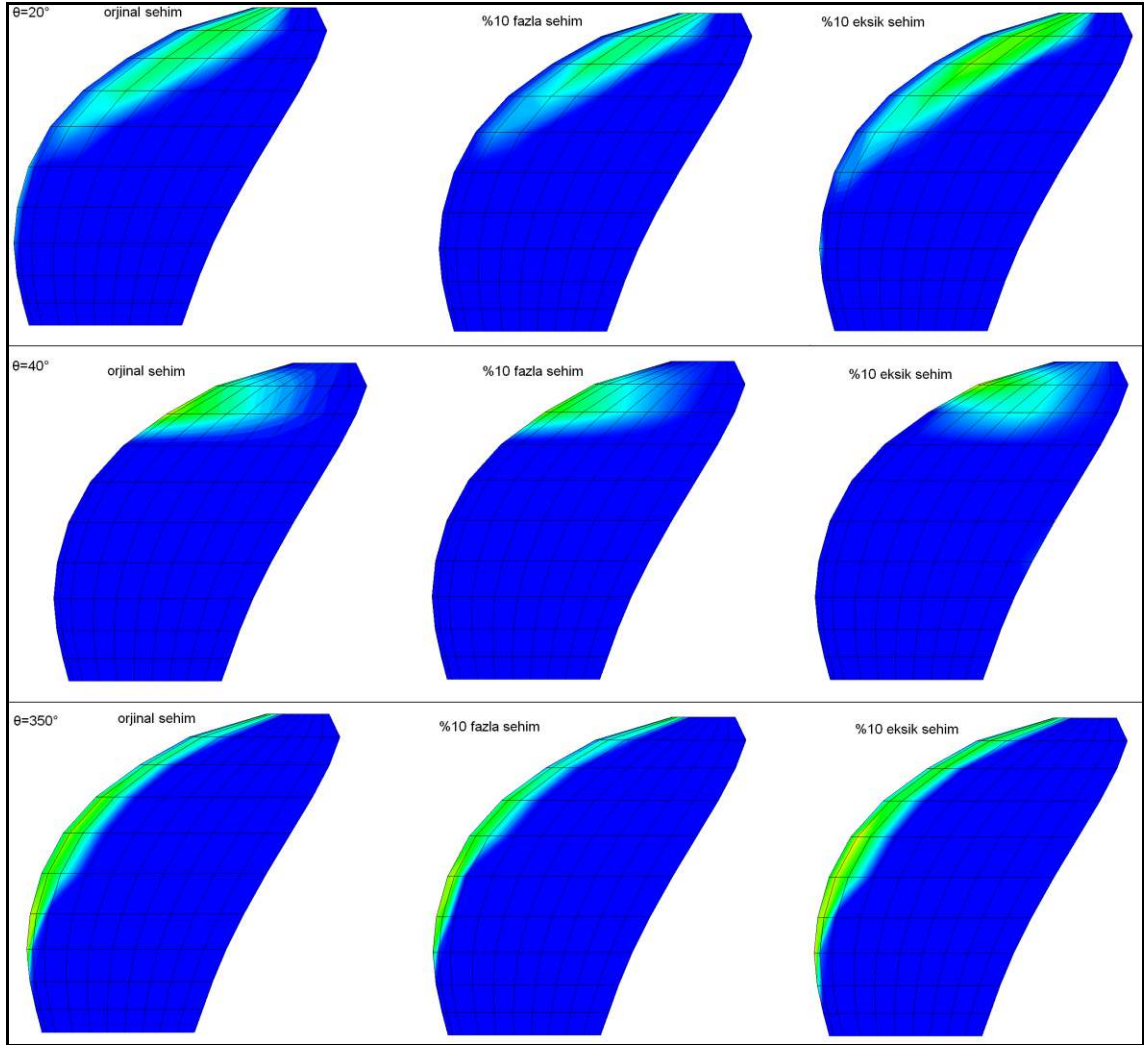
Şekil 4. 14 Farklı çalıklık açılarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu formları

Şekil 4. 15’de görüldüğü gibi hatve oranı arttıkça tabaka kavitasyonu artmaktadır. Hatve oranı azaldıkça tabaka kavitasyonu azalma göstermektedir.



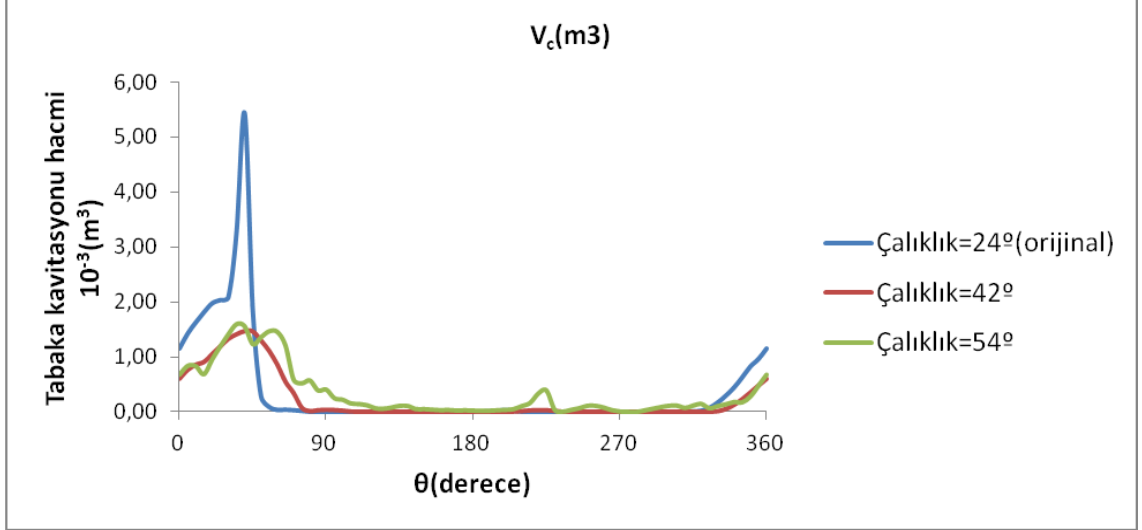
Şekil 4. 15 Farklı hatve oranlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu formları

Şekil 4. 16’da görüldüğü üzere, sehim miktarı arttıkça tabaka kavitasyonu azalmaktadır. Sehim miktarı azaldıkça $\theta=20^\circ$ ve 350° ’de tabaka kavitasyonu artmakta, $\theta=40^\circ$ tabaka kavitasyonu azalmaktadır.



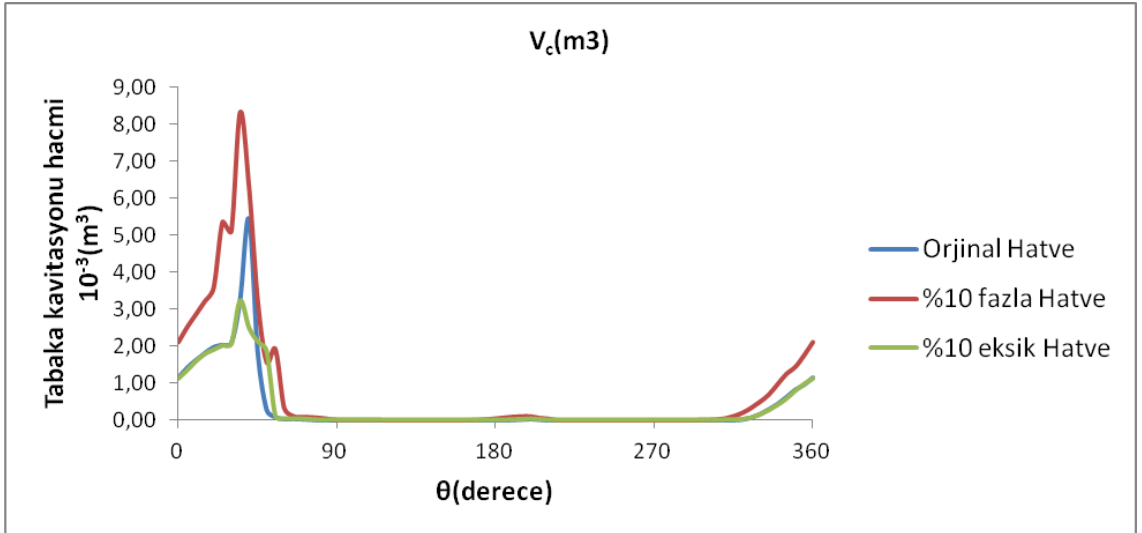
Şekil 4. 16 Farklı sehim miktarlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu formları

Şekil 4. 17’de görüldüğü üzere, çalıklık açısı arttıkça pervanenin tabaka kavitasyonu hacimleri azalmaktadır. Şekil 4. 17’de verilen grafikten çıkarılabilecek bu sonuçlar, Ek-B’de verilen sayısal değerler yardımı ile daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 17 Farklı çalıklıkta P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu hacimleri

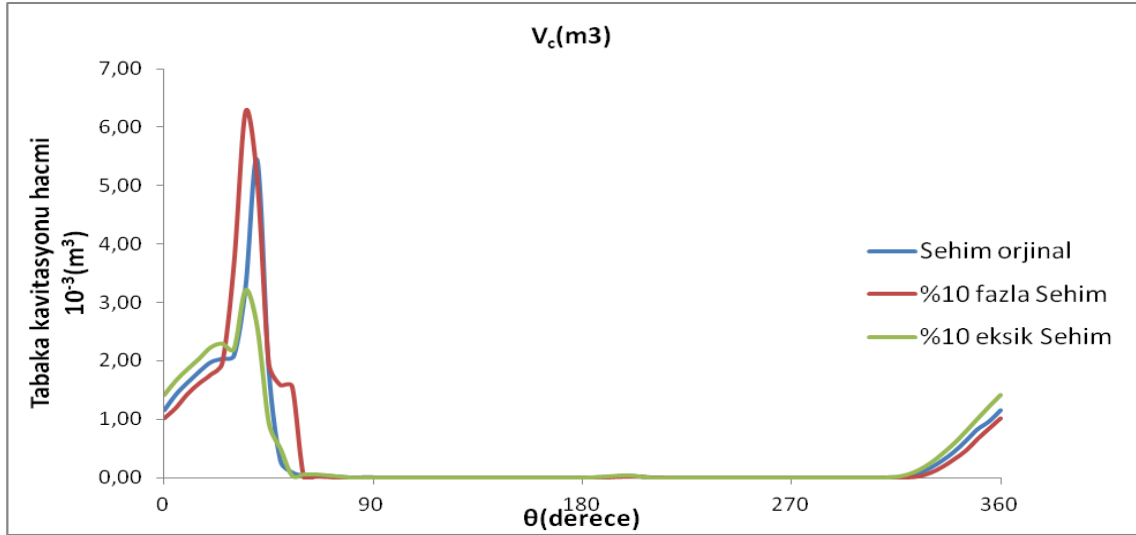
Şekil 4. 18’de görüldüğü üzere, hatve oranı arttıkça pervanenin tabaka kavitasyonu hacimleri artmakta, hatve oranı azaldıkça tabaka kavitasyonu hacimleri azalmaktadır. Şekil 4. 18’de verilen grafikten çıkarılabilecek bu sonuçlar, Ek-B’de verilen sayısal değerler yardımı ile daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 18 Farklı hatve oranlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu hacimleri

Şekil 4. 19’da görüldüğü üzere, kanat pozisyonları $\theta=0^\circ-60^\circ$ arasında sehim miktarı arttıkça pervanenin tabaka kavitasyonu hacimleri artmakta, $\theta=310^\circ-360^\circ$ arasında sehim miktarı arttıkça pervanenin tabaka kavitasyonu hacimleri azalmaktadır. $\theta=35^\circ-$

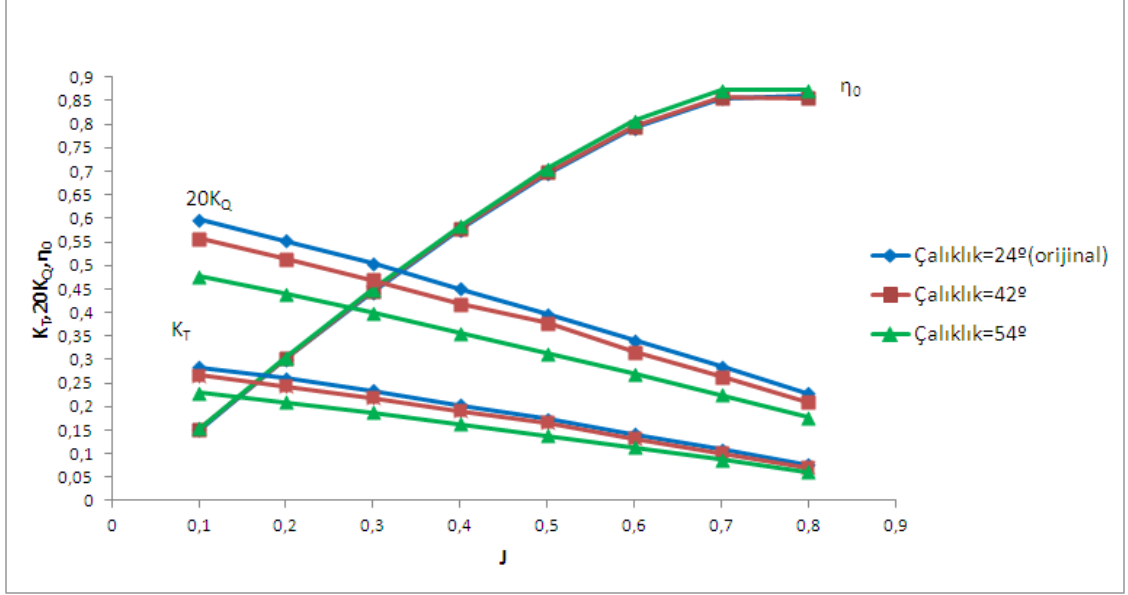
45° ve 80°-95° arasında sehim miktarı azaldıkça pervanenin tabaka kavitasyonu hacimleri azalmakta, $\theta=0^\circ$ -30°, 180°-205° ve 300°-360° arasında sehim miktarı azaldıkça pervanenin tabaka kavitasyonu hacimlerinin arttığı tespit edilmiştir. Şekil 4. 19'da verilen grafikten çıkarılabilecek bu sonuçlar, Ek-B'de verilen sayısal değerler yardımı ile daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 19 Farklı sehim miktarlarında P2 pervanesinin tabaka kavitasyonu hacimleri Orjinal P2 pervanesinin kanat geometrisinin üç farklı çalıklık açısına, üç farklı hatve oranına ve üç farklı sehim miktarına göre değiştirilerek tabaka kavitasyonuna olan etkilerinin incelenmesine ilaveten, söz konusu geometrik değişikliklerinin pervanenin performans karakteristiklerine olan etkileri de incelenmiştir. Analiz hesaplamaları, sekiz farklı ilerleme sayısı ($J= 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ ve 0.8) için gerçekleştirilmiştir. Üç farklı çalıklık açısı, üç farklı hatve oranı ve üç farklı sehim miktarına göre toplam $9 \times 8 = 72$ adet analiz gerçekleştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4. 20, Şekil 4. 21 ve Şekil 4. 22'de ve sırasıyla P2 pervanesi üzerinde farklı çalıklık açısının, farklı hatve oranının ve farklı sehim miktarının performans karakteristiklerine olan etkileri gösterilmiştir. Aynı zamanda, P2 pervanesinin bir tam devri için söz konusu değişikliklerin itme ve tork katsayısı üzerine olan etkileri Şekil 4. 23, Şekil 4. 24, Şekil 4. 25, Şekil 4. 26, Şekil 4. 27 ve Şekil 4. 28'de gösterilmiştir ($J=0.55$).

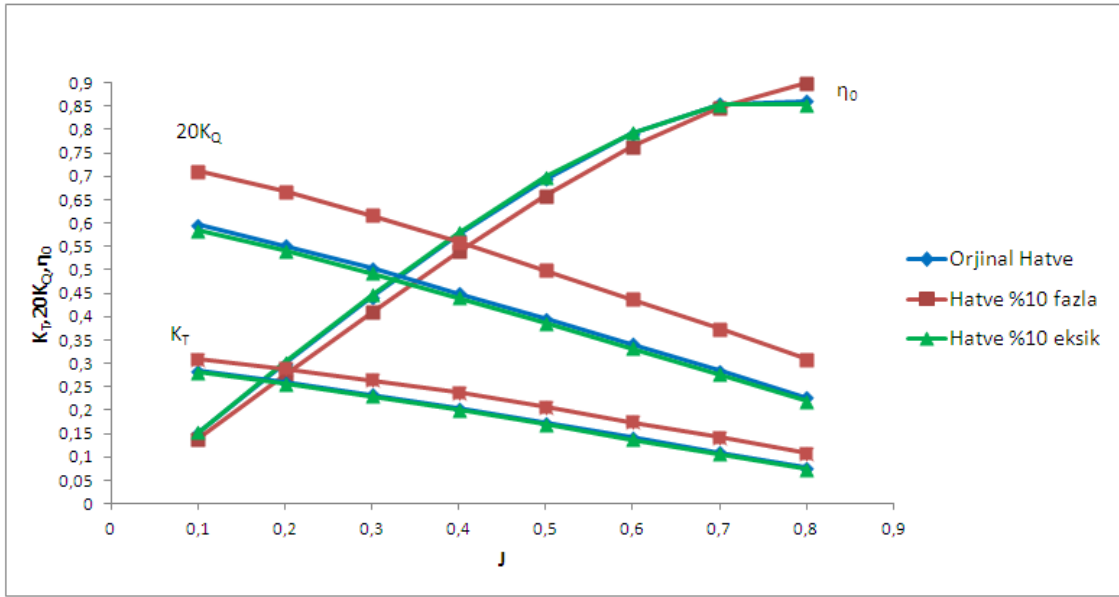
Şekil 4. 20'de görüldüğü gibi ilerleme katsayıları ve çalıklık açıları arttıkça pervane açık su veriminde artma, itme ve tork katsayılarında ise azalma göstermektedir. En yüksek verim $J=0.7$ koşulunda ve çalıklık açısı 54° iken, $\eta_o = 0.873$ olarak elde edilmiş ve en

yüksek verim oranı artışı ise %2.07 olarak elde edilmiştir. Şekil 4. 20’de verilen grafikten çıkarılabilecek bu sonuçlar, Ek-A’da verilen sayısal değerler yardımı ile daha iyi anlaşılmaktadır.



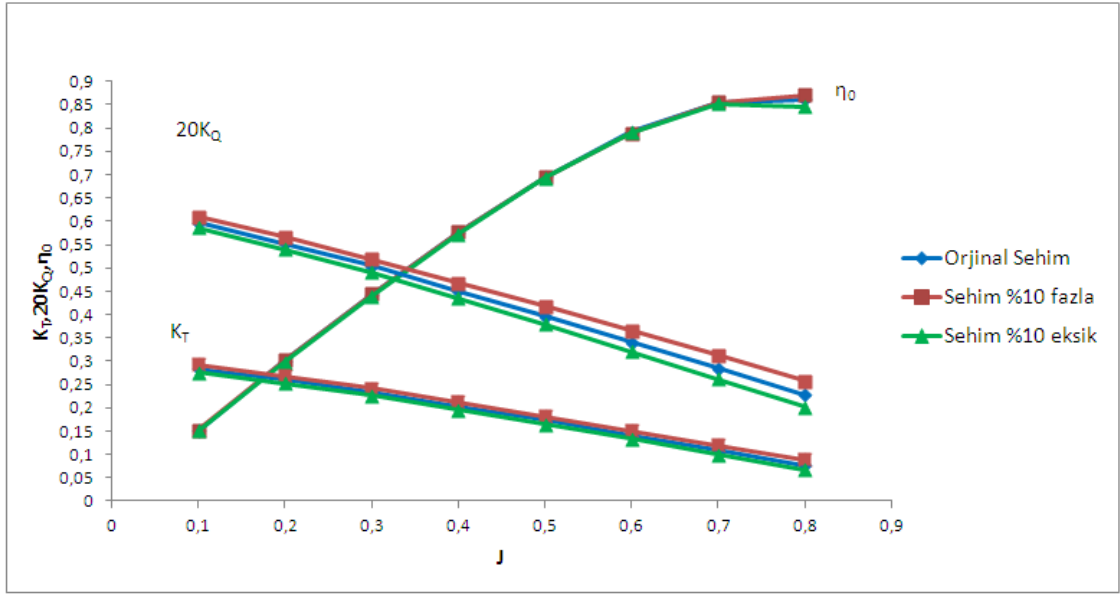
Şekil 4. 20 Farklı çalıklık açılarında P2 pervanesinin performans karakteristikleri

Şekil 4. 21’de görüldüğü gibi ilerleme katsayıları ve hatve oranı arttıkça; orijinal hatveye göre itme ve tork katsayıları artma göstermekte, hatve oranı azaldıkça orijinal hatveye göre itme ve tork katsayıları azalma göstermektedir. İlerleme katsayıları ve hatve oranı arttıkça; verimde ise azalma görülmektedir. Ancak buna rağmen, en yüksek verim $\eta_0 = 0.899$ olarak ve en yüksek verim oranı artışı ise %4.47 olarak, $J=0.8$ koşulunda hatve oranı %10 fazla iken elde edilmiştir. İlerleme katsayıları arttıkça ve hatve oranı azaldıkça; $J=0.1-0.7$ arasında verimde artma, $J=0.7-0.8$ arasında ise verimde azalma görülmektedir. Ayrıca en yüksek verim oranı azalması ise $J=0.1$ ve hatve oranı %10 fazla iken %8.42 olarak elde edilmiştir. Şekil 4. 21’de verilen grafikten çıkarılabilecek bu sonuçlar, Ek-A’da verilen sayısal değerler yardımı ile daha iyi anlaşılmaktadır.



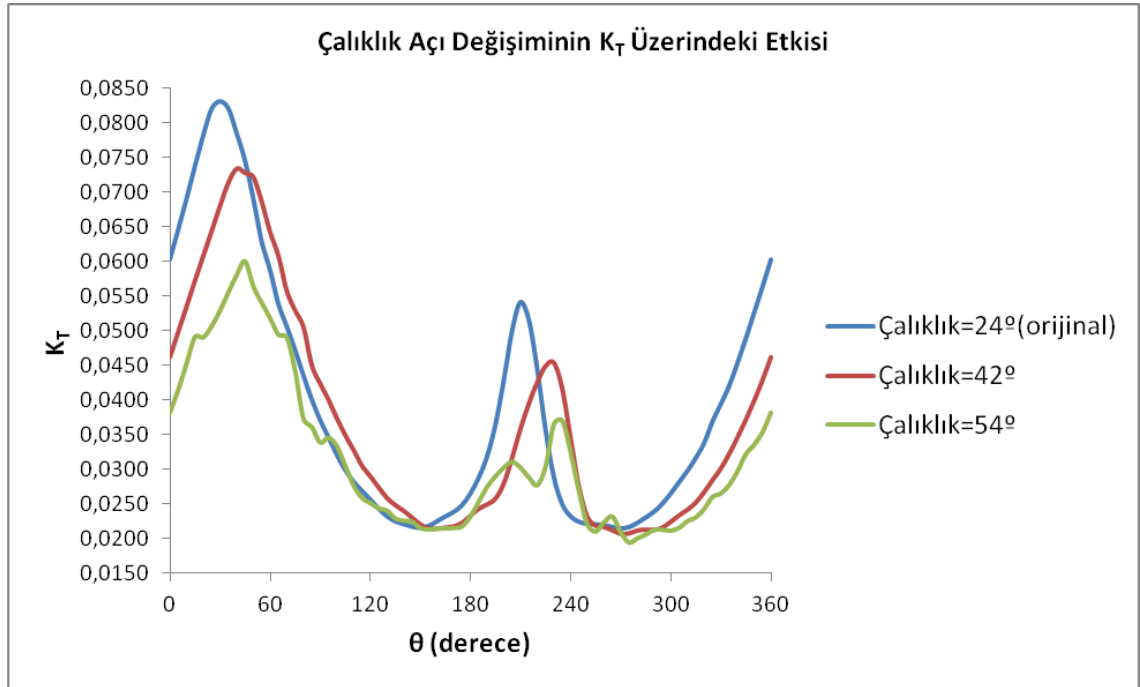
Şekil 4. 21 Farklı hatve oranlarında P2 pervanesinin performans karakteristikleri

Şekil 4. 22’de görüldüğü gibi ilerleme katsayıları ve sehim miktarı arttıkça; orjinal sehimde göre itme ve tork katsayıları artma göstermekte, sehim miktarı azaldıkça orjinal sehimde göre itme ve tork katsayıları azalma göstermektedir. $J=0.1-0.5$ arasında ve sehim miktarı arttıkça; verimde artış, $J=0.5-0.8$ arasında verimde azalma görülmektedir. $J=0.8$ ve sehim miktarı %10 fazla iken; en yüksek verim $\eta_0 = 0.87$ olarak ve en yüksek verim oranı artışı ise %1.09 olarak elde edilmiştir. İlerleme katsayıları ve sehim miktarı azaldıkça; verimde azalma görülmektedir. $J=0.8$ ve sehim miktarı %10 eksik iken; en düşük verim $\eta_0 = 0.845$ olarak ve en yüksek verim oranı azalması ise %1.71 olarak elde edilmiştir. Şekil 4. 22’de verilen grafikten çıkarılabilecek bu sonuçlar, Ek-A’da verilen sayısal değerler yardımı ile daha iyi anlaşılmaktadır.

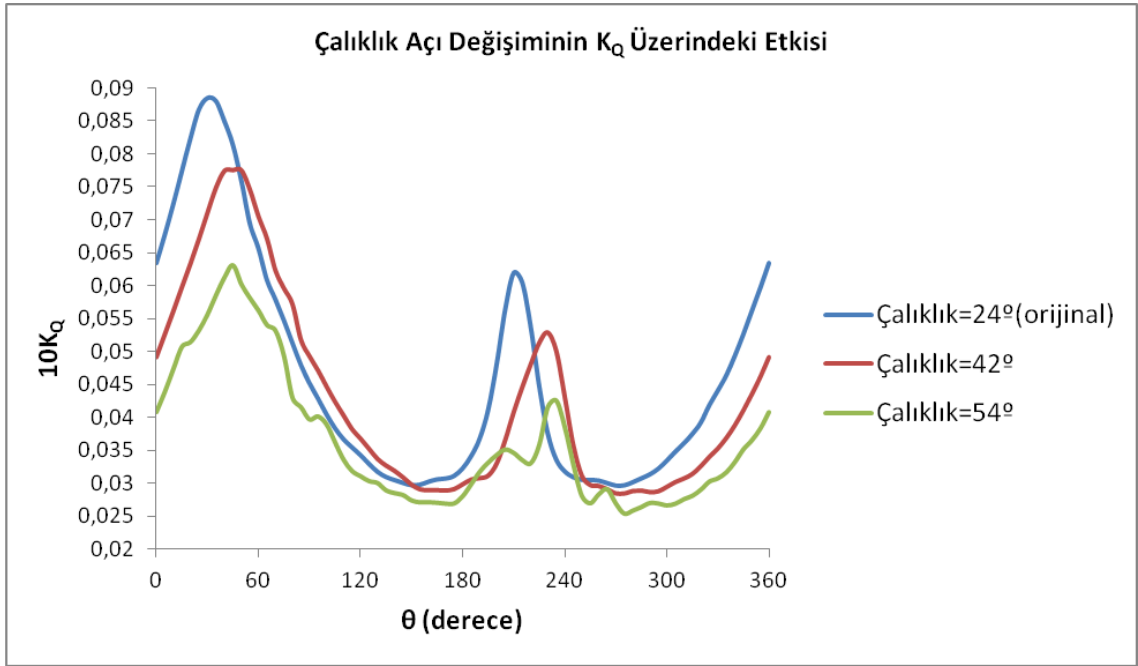


Şekil 4. 22 Farklı sehim miktarlarında P2 pervanesinin performans karakteristikleri

Şekil 4. 23 ve Şekil 4. 24'te görüldüğü gibi çalıklık açısı arttıkça itme ve tork katsayıları azalma göstermekte ve ayrıca dalgalanma göstermektedir.

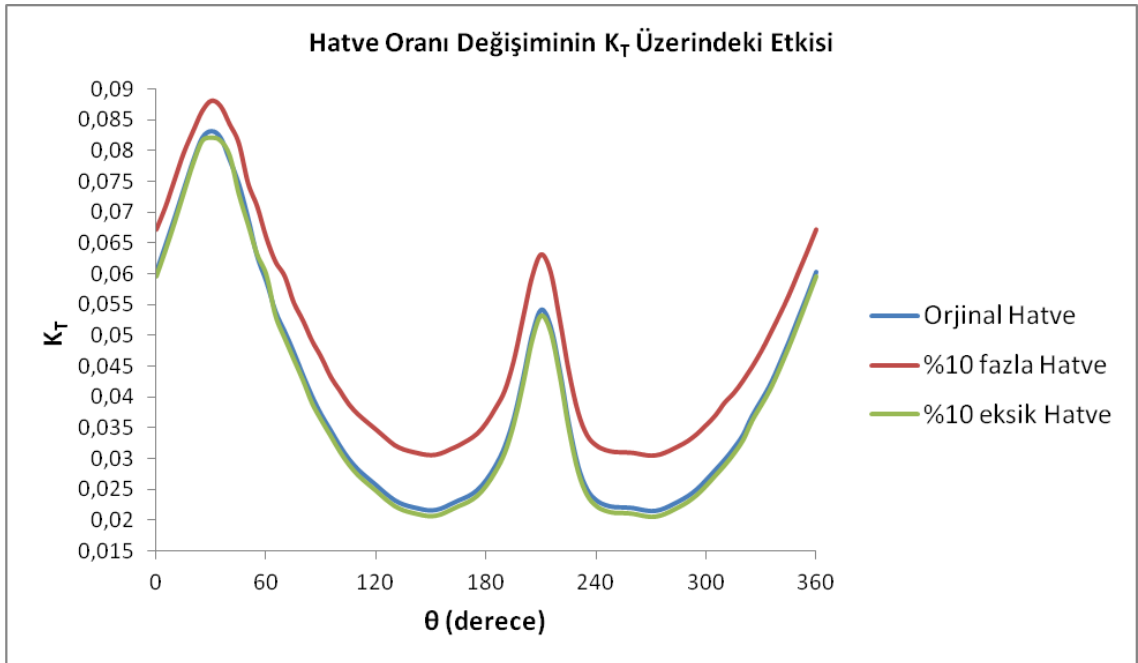


Şekil 4. 23 P2 pervanesinin çalıklık açısı değişiminin itme katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$)

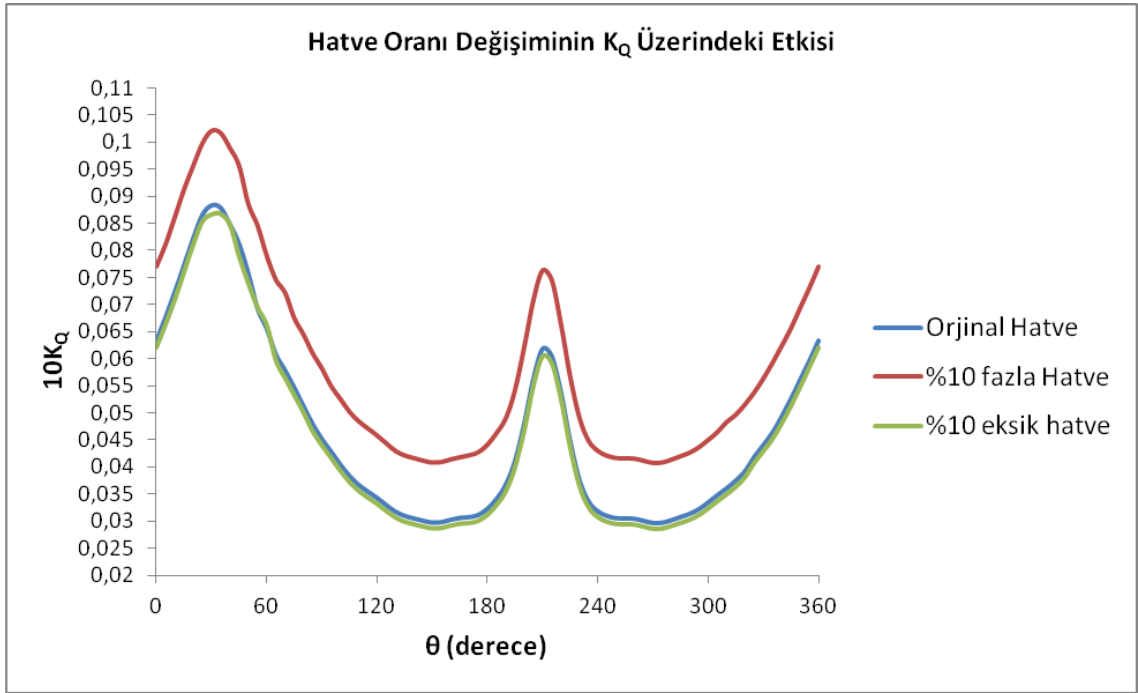


Şekil 4. 24 P2 pervanesinin çalıklık açısı değişiminin tork katsayısı üzerindeki etkisi (J=0.55)

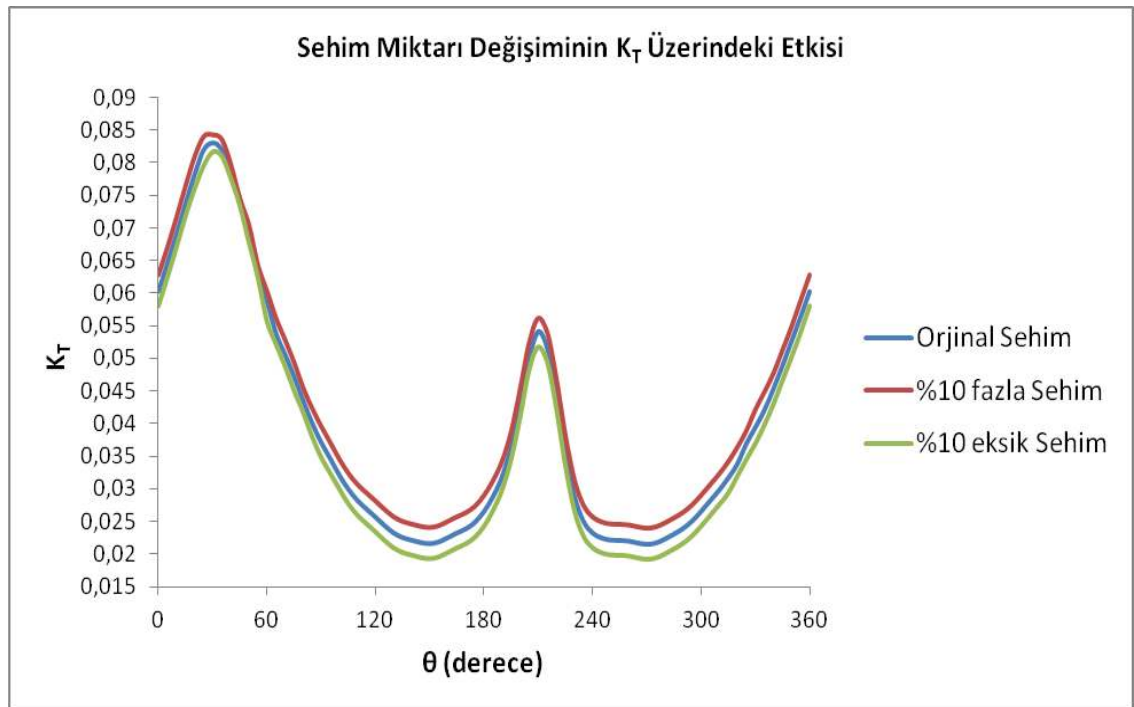
Şekil 4. 25, Şekil 4. 26, Şekil 4. 27 ve Şekil 4. 28’de görüldüğü gibi hatve oranı ve sehim miktarı arttıkça itme ve tork katsayıları artma göstermekte, azaldıkça itme ve tork katsayıları azalma göstermektedir.



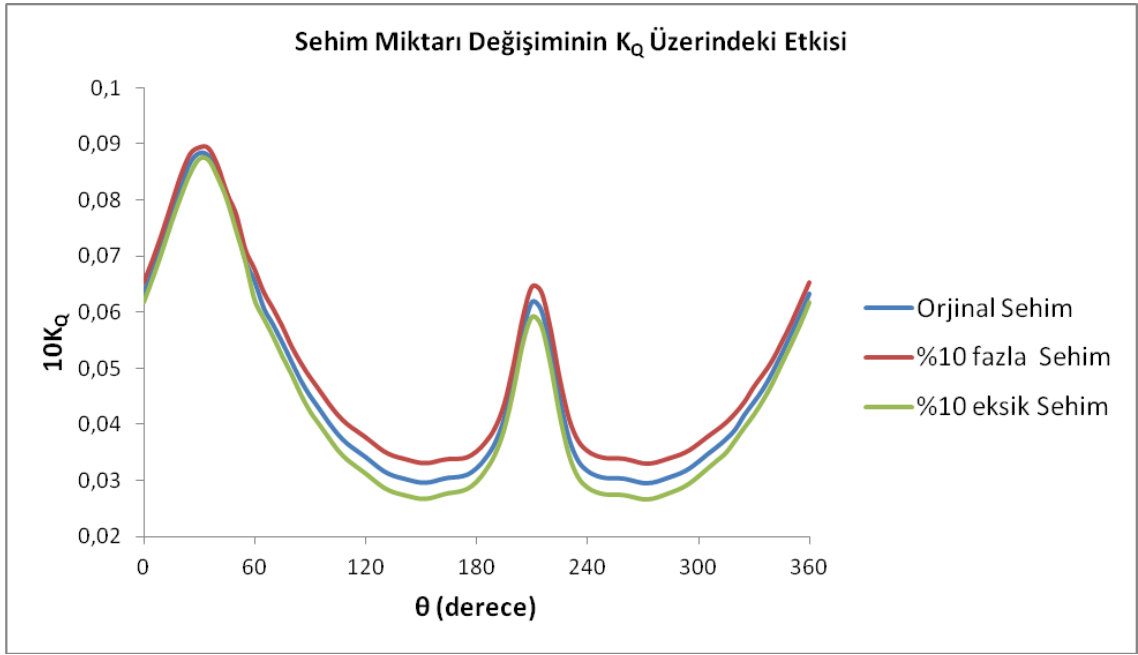
Şekil 4. 25 P2 pervanesinin hatve oranının değişiminin itme katsayısı üzerindeki etkisi (J=0.55)



Şekil 4. 26 P2 pervanesinin hatve oranının değişiminin tork katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$)



Şekil 4. 27 P2 pervanesinin sehim miktarının değişiminin itme katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$)



Şekil 4. 28 P2 pervanesinin sehim miktarının değişiminin tork katsayısı üzerindeki etkisi ($J=0.55$)

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, kavitasyon çeşitleri, kavitasyonun fiziği ve etkileri açıklanmaya çalışılmış ve pervane dizayn ve analizinde kullanılan kaldırıcı yüzey metotuna geniş bir yer verilmiştir. Çalışmanın asıl konusu olan düzensiz akımda çalışan pervanelerin performans ve tabaka kavitasyonu analizi için temeli Szantyr'ın kaldırıcı yüzey metotuna dayanan ve geliştirilmekte olan bir metot kullanılmıştır.

Çalışmanın uygulaması olarak yukarıda bahsedilen kaldırıcı yüzey teorisine dayalı tabaka kavitasyonu analiz yöntemi için örnek hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalarda kullanılmak üzere tam ölçekte P1 ile P2 pervaneleri seçilmiş ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. P1 pervanesinin farklı boyutsuz yarıçaplarda (r/R) $\theta=0^\circ$ ve $\theta=180^\circ$ kanat pozisyonlarında elde edilen basınç dağılımları boyutsuz kort uzunluğuna (x/c) göre karşılaştırılmalı olarak verilmiş, bir tam devrinde ($\theta=0^\circ-360^\circ$) anahtar kanadının sırtında ve yüzünde oluşan basınç dağılımları ve sırtında oluşan tabaka kavitasyon formları incelenmiştir. P1 pervanesinin $\theta=295^\circ-40^\circ$ kanat pozisyon açıları arasında giriş ucunda tabaka kavitasyonu gösterdiği, $\theta=80^\circ-290^\circ$ kanat pozisyon açıları arasında hiç tabaka kavitasyonu göstermediği tespit edilmiştir. P2 pervanesi için, farklı çalıklık açısı, farklı hatve oranı ve farklı sehim miktarında yeni pervane geometrileri türetilmiştir. Türetilen bu yeni pervanelerin hidrodinamik karakteristikleri ve tabaka kavitasyonu yönünden değişimleri sayısal olarak analiz edilmiş olup ve elde edilen sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Pervanelerde çalıklık açısı ve sehim miktarı artmasının ve hatve oranının azalmasının, pervanelerin açık su veriminde artma ve tabaka kavitasyonu formunda azalma gösterdiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak gemi pervanelerinde çalıklık açısı artışının, hatve oranı ve sehim miktarı artma ve/veya azalmasına oranla kanat kavitasyon karakteristiğini önemli ölçüde değiştirebildiği gözlemlenmiştir. Ek-B’de verilen tablolarda görüldüğü üzere, geometrisi değiştirilmiş yeni P2 pervanesinin ($\phi=42^\circ$ ve $\theta=40^\circ$) orjinal P2 pervanesine göre %73 oranında tabaka kavitasyonu hacminin azaldığı tespit edilmiştir. Daha ileriki çalışmalarda, pervanelere ait geometrik değişkenler (eğiklik, kanat kesit formları, giriş uçları vb.) ve çalışma koşulları (kavitasyon sayısı, ilerleme sayısı vb.) gibi daha fazla sayıda parametre dikkate alınarak kavitasyon ve performans analizlerinin gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

-
- [1] Ekinci, S., (2007). Gemi Pervane Yüzeyinde Tabaka Kavitasyonunun Sayısal Olarak İncelenmesi, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
 - [2] Mueller, A.C. and Kinnas, S.A., (1999). "Propeller Sheet Cavitation Predictions Using a Panel Method", Journal of Fluids Engineering, June, 121 (2): 282.
 - [3] Iga, Y. and Nohmi M., (2003). "Numerical Study of Sheet Cavitation Breakoff Phenomenon on a Cascade Hydrofoil", Journal of Fluids Engineering, June, 125 (4): 643, Japan.
 - [4] Kinnas S.A., Lee H. and Young Y.L., (2003). "Modeling of Unsteady Sheet Cavitation on Marine Propeller Blades", International Journal of Rotating Machinery, 9: 263, USA.
 - [5] Stutz, B., (2003). "Influence of Roughness on the Two-Phase Flow Structure of Sheet Cavitation", Journal of Fluids Engineering, July, 125 (4): 652, France.
 - [6] Young, Y.L., Kinnas, S.A., (2003). "Numerical Modeling of Supercavitating Propeller Flows", Journal of Ship Research, March, 47(1), pp 48.
 - [7] Lee H., Kinnas S.A., (2004). "Application of a Boundary Element Method in the Prediction of Unsteady Blade Sheet and Developed Tip Vortex Cavitation on Marine Propellers", Journal of Ship Research, March, 48 (1): 15.
 - [8] Vaz G., Bosschers J. and Falcão de Campos, J.A.C., (2005). "Validation of a BEM for modelling steady sheet cavitation on marine propellers", MARINE International Conference on Computational Methods in Marine Engineering, June, Barcelona.
 - [9] Delgosha, O.C., Stutz, B., Vabre A. and Legoupil S., (2007). "Analysis of Cavitating Flow Structure by Experimental and Numerical Investigations", Journal of Fluid Mechanics, 10 May, 578: 171, France.
 - [10] Castellani, I.,(2006). "Cavity Length and Re-Entrant Jet in 2-D Sheet Cavitation", Advances in Fluid Mechanics VI, 52: 341.
 - [11] Foeth, E.J., van Doorne, C.W.H., van Terwisga T., and Wieneke B., (2006). "Time resolved PIV and flow visualization of 3D sheet cavitation", Experiments in Fluids, February, 40 (4): 503.

- [12] Rusak, Z., Morris, W.J., Peles, Y., (2007). "Prediction of Leading-Edge Sheet Cavitation Inception on Hydrofoils at Low to Moderate Reynolds Number Flows", *Journal of Fluids Engineering*, December, 129 (12): 1540.
- [13] Amromin, E., (2007). "Determination of Cavity Detachment for Sheet Cavitation", *Journal of Fluids Engineering*, September, 129 (9): 1105.
- [14] Kinnas, S.A., Lee, H., Gu, H. and Natarajan, S., (2007). "Prediction of Sheet Cavitation on A Rudder Subject to Propeller Flow", *Journal of Ship Research*, March, 51 (1): 65.
- [15] Bosschers J., Vaz G., Starke A.R. and van Wijngaarden E., (2008). "Computational Analysis of Propeller Sheet Cavitation and Propeller-Ship Interaction", *RINA conference - MARINE CFD2008*, 26-27 March, Southampton, pp. 1, UK.
- [16] Ye J. and Xiong Y., (2008). "Prediction of Podded Propeller Cavitation Using An Unsteady Surface Panel Method", *Journal of Hydrodynamics*, 9 April, 20 (6): 790, China.
- [17] Koop A.H., (2008). "Numerical Simulation of Unsteady Three-Dimensional Sheet Cavitation", *Thesis University of Twente*, 12 September, Netherlands.
- [18] 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.
- [19] Gaggero S. and Brizzolara S., (2008). "A Potential Panel Method for The Prediction of Midchord Face and Back Cavitation", *University of Genoa, Department of Naval Architecture and Marine Engineering*.
- [20] Bosschers, J., (2009). "Modeling and Analysis of A Cavitating Vortex in 2d Unsteady Viscous Flow", *CAV2009*, 17-22 August, Ann Arbor, Michigan, USA.
- [21] Arazgaldi R., Hajilouy A. and Farhanieh B., (2009). "Experimental and Numerical Investigation of Marine Propeller Cavitation", *Sharif University of Technology, Archive of Scientia Iranica, Transaction B: Mechanical Engineering*, December, 16 (6): 525.
- [22] Epps B., Chalfant J., Kimball R., Techet A., Flood K. and Chrysosostomidis C., (2007). "OpenProp: An Open-source Parametric Design and Analysis Tool for Propellers", *MIT Mechanical Engineering*.
- [23] Sampson, R., (2008), *Resistance&Propulsion(I) MAR 2010 Cavitation*, <http://research.ncl.ac.uk/cavitation/archive/MAR2010%20-%20Cavitation.pdf>, 16 Ekim 2011.
- [24] Carlton, J. S.,(2008). *Marine propellers and propulsion. – 2nd ed.*, Global Head of Marine Technology and Investigation, Lloyd's Register, pp.207-246.

- [25] Çelik, F., Kavitasyon, Kavitasyonun Etkileri, Kavitasyonun Başlangıcı, Kavitasyon Kontrolu,
<http://www.yildiz.edu.tr/~fcelik/dersler/gemidirenci/PDF/9.%20Kavitasyon.pdf>, 21 Haziran 2011.
- [26] Szantyr J.A. and Glover E.J.,(2005). Emerson Cavitation Tunnel Report No:3/90, pp.23-24.
- [27] 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.

EK-A

**P2 PERVANESİNE AİT PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİ ANALİZ
SONUÇLARI**

Durum 1 $\phi=24^\circ$						
J	$V_A(m/s)$	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η_o
0.1	1.17	320.44	95.758	0.283523	0.029833	0.151255
0.2	2.34	293.859	88.632	0.260004	0.027613	0.299721
0.3	3.51	264.148	80.852	0.233716	0.025189	0.443013
0.4	4.68	230.230	72.284	0.203706	0.02252	0.575862
0.5	5.85	195.634	63.662	0.173095	0.019834	0.6945
0.6	7.02	159.941	54.788	0.141514	0.017069	0.791706
0.7	8.18	123.523	45.704	0.109292	0.014239	0.855126
0.8	9.35	86.838	36.482	0.076834	0.011366	0.860716
Durum 2 $\phi=42^\circ$						
J	$V_A(m/s)$	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η_o
0.1	1.17	301.018	89.384	0.266338	0.027847	0.15222
0.2	2.34	275.161	82.474	0.24346	0.025694	0.301605
0.3	3.51	246.973	75.164	0.21852	0.023417	0.445553
0.4	4.68	215.022	67.118	0.19025	0.02091	0.579218
0.5	5.85	187.045	60.589	0.1655	0.01888	0.69769
0.6	7.02	148.952	50.783	0.131791	0.015821	0.795459
0.7	8.18	114.562	42.304	0.101364	0.01318	0.856832
0.8	9.35	79.273	33.521	0.07014	0.010443	0.855139
Durum 3 $\phi=54^\circ$						
J	$V_A(m/s)$	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η_o
0.1	1.17	259.576	76.488	0.229671	0.02383	0.153394
0.2	2.34	236.532	70.513	0.209282	0.021968	0.303242
0.3	3.51	212.021	64.153	0.187594	0.019987	0.448148
0.4	4.68	184.399	57.174	0.163155	0.017812	0.583121
0.5	5.85	156.955	50.303	0.138872	0.015672	0.705163
0.6	7.02	128.636	43.245	0.113816	0.013473	0.806708
0.7	8.18	99.250	35.975	0.087816	0.011208	0.872903
0.8	9.35	68.419	28.359	0.060537	0.008835	0.872397

Durum 4 Orjinal Hatve						
J	V _A (m/s)	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η _o
0.1	1.17	320.44	95.758	0.283523	0.029833	0.151255
0.2	2.34	293.859	88.632	0.260004	0.027613	0.299721
0.3	3.51	264.148	80.852	0.233716	0.025189	0.443013
0.4	4.68	230.23	72.284	0.203706	0.02252	0.575862
0.5	5.85	195.634	63.662	0.173095	0.019834	0.6945
0.6	7.02	159.941	54.788	0.141514	0.017069	0.791706
0.7	8.18	123.523	45.704	0.109292	0.014239	0.855126
0.8	9.35	86.838	36.482	0.076834	0.011366	0.860716
Durum 5 %10 Fazla Hatve						
J	V _A (m/s)	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η _o
0.1	1.17	350.146	114.262	0.309806	0.035598	0.138511
0.2	2.34	327.261	107.27	0.289558	0.03342	0.275794
0.3	3.51	299.364	98.976	0.264875	0.030836	0.410137
0.4	4.68	268.269	89.945	0.237362	0.028022	0.539252
0.5	5.85	233.258	80.118	0.206385	0.02496	0.657983
0.6	7.02	197.387	70.15	0.174646	0.021855	0.763098
0.7	8.18	160.496	59.927	0.142006	0.01867	0.84738
0.8	9.35	123.107	49.505	0.108924	0.015423	0.899212
Durum 6 %10 Eksik Hatve						
J	V _A (m/s)	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η _o
0.1	1.17	316.906	93.813	0.280396	0.029227	0.152688
0.2	2.34	290.665	86.918	0.257178	0.027079	0.302309
0.3	3.51	260.406	79.098	0.230405	0.024643	0.446422
0.4	4.68	226.38	70.634	0.200299	0.022006	0.579459
0.5	5.85	191.977	62.167	0.16986	0.019368	0.697907
0.6	7.02	156.024	53.327	0.138049	0.016614	0.793476
0.7	8.18	119.989	44.439	0.106165	0.013845	0.854306
0.8	9.35	83.317	35.317	0.073718	0.011003	0.853057

Durum 7 Orjinal Sehim						
J	V _A (m/s)	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η _o
0.1	1.17	320.440	95.758	0.283523	0.029833	0.151255
0.2	2.34	293.859	88.632	0.260004	0.027613	0.299721
0.3	3.51	264.148	80.852	0.233716	0.025189	0.443013
0.4	4.68	230.230	72.284	0.203706	0.02252	0.575862
0.5	5.85	195.634	63.662	0.173095	0.019834	0.6945
0.6	7.02	159.941	54.788	0.141514	0.017069	0.791706
0.7	8.18	123.523	45.704	0.109292	0.014239	0.855126
0.8	9.35	86.838	36.482	0.076834	0.011366	0.860716
Durum 8 %10 Fazla Sehim						
J	V _A (m/s)	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η _o
0.1	1.17	329.96	97.762	0.291946	0.030457	0.152556
0.2	2.34	303.049	90.762	0.268135	0.028277	0.30184
0.3	3.51	272.476	83.082	0.241085	0.025884	0.444714
0.4	4.68	239.548	75.118	0.21195	0.023403	0.576563
0.5	5.85	205.877	67.056	0.182158	0.020891	0.693871
0.6	7.02	170.62	58.615	0.150963	0.018261	0.789425
0.7	8.18	135.336	50.099	0.119744	0.015608	0.854714
0.8	9.35	99.563	41.376	0.088093	0.012891	0.870118
Durum 9 %10 Eksik Sehim						
J	V _A (m/s)	T(kN)	Q(kNm)	KT	KQ	η _o
0.1	1.17	312.204	94.171	0.276236	0.029339	0.149851
0.2	2.34	285.01	86.71	0.252174	0.027014	0.297139
0.3	3.51	255.466	78.756	0.226034	0.024536	0.439855
0.4	4.68	221.352	69.834	0.19585	0.021757	0.57308
0.5	5.85	186.288	60.797	0.164826	0.018941	0.692486
0.6	7.02	150.123	51.524	0.132828	0.016052	0.790182
0.7	8.18	113.149	42.028	0.100113	0.013094	0.851821
0.8	9.35	75.657	32.338	0.066941	0.010075	0.845988

P2 PERVANESİNE AİT KAVİTASYON ANALİZ SONUÇLARI

Durum 1 $\phi=24^\circ$	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	1.151
5	1.419
10	1.624
15	1.809
20	1.971
25	2.031
30	2.084
35	3.260
40	5.425
45	1.835
50	0.282
55	0.087
60	0.034
65	0.038
70	0.028
75	0.016
80	0.001
85	0.002
90	0.002
95	0.000
100	0.000
105	0.000
110	0.000
115	0.000
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.000
170	0.000
175	0.000
180	0.000

Durum 2 $\phi=42^\circ$	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	0.598
5	0.760
10	0.853
15	0.903
20	1.044
25	1.185
30	1.325
35	1.405
40	1.463
45	1.456
50	1.292
55	1.104
60	0.855
65	0.543
70	0.339
75	0.073
80	0.013
85	0.029
90	0.036
95	0.030
100	0.021
105	0.005
110	0.000
115	0.001
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.000
170	0.000
175	0.000
180	0.000

Durum 3 $\phi=54^\circ$	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	0.683
5	0.842
10	0.838
15	0.693
20	0.958
25	1.195
30	1.416
35	1.599
40	1.561
45	1.237
50	1.362
55	1.471
60	1.459
65	1.213
70	0.593
75	0.526
80	0.576
85	0.397
90	0.413
95	0.255
100	0.229
105	0.163
110	0.150
115	0.128
120	0.073
125	0.065
130	0.086
135	0.117
140	0.114
145	0.057
150	0.057
155	0.048
160	0.039
165	0.041
170	0.032
175	0.037
180	0.030

Durum 1 $\phi=24^\circ$	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.001
190	0.009
195	0.021
200	0.031
205	0.017
210	0.000
215	0.000
220	0.000
225	0.000
230	0.000
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.000
295	0.000
300	0.000
305	0.000
310	0.001
315	0.004
320	0.021
325	0.072
330	0.168
335	0.293
340	0.440
345	0.625
350	0.822
355	0.959
360	1.151

Durum 2 $\phi=42^\circ$	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.000
190	0.000
195	0.000
200	0.000
205	0.004
210	0.013
215	0.024
220	0.029
225	0.027
230	0.016
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.000
295	0.000
300	0.000
305	0.000
310	0.000
315	0.000
320	0.000
325	0.000
330	0.010
335	0.051
340	0.125
345	0.227
350	0.349
355	0.476
360	0.598

Durum 3 $\phi=54^\circ$	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.024
190	0.028
195	0.037
200	0.044
205	0.059
210	0.114
215	0.171
220	0.341
225	0.397
230	0.047
235	0.013
240	0.043
245	0.073
250	0.118
255	0.119
260	0.087
265	0.040
270	0.014
275	0.010
280	0.007
285	0.034
290	0.064
295	0.093
300	0.119
305	0.122
310	0.081
315	0.123
320	0.151
325	0.073
330	0.114
335	0.145
340	0.186
345	0.181
350	0.286
355	0.483
360	0.683

Durum 4 Orjinal Hatve	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	1.151
5	1.419
10	1.624
15	1.809
20	1.971
25	2.031
30	2.084
35	3.260
40	5.425
45	1.835
50	0.282
55	0.087
60	0.034
65	0.038
70	0.028
75	0.016
80	0.001
85	0.002
90	0.002
95	0.000
100	0.000
105	0.000
110	0.000
115	0.000
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.000
170	0.000
175	0.000
180	0.000

Durum 5 %10 Fazla Hatve	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	2.111
5	2.520
10	2.866
15	3.214
20	3.581
25	5.356
30	5.114
35	8.317
40	6.323
45	3.226
50	1.573
55	1.916
60	0.330
65	0.112
70	0.085
75	0.079
80	0.063
85	0.036
90	0.006
95	0.006
100	0.005
105	0.005
110	0.004
115	0.002
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.001
170	0.008
175	0.024
180	0.045

Durum 6 %10 Eksik Hatve	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	1.112
5	1.337
10	1.582
15	1.777
20	1.890
25	2.003
30	2.050
35	3.212
40	2.489
45	2.107
50	1.845
55	0.097
60	0.031
65	0.033
70	0.027
75	0.014
80	0.000
85	0.001
90	0.001
95	0.000
100	0.000
105	0.000
110	0.000
115	0.000
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.000
170	0.000
175	0.000
180	0.000

Durum 4 Orjinal Hatve	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.001
190	0.009
195	0.021
200	0.031
205	0.017
210	0.000
215	0.000
220	0.000
225	0.000
230	0.000
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.000
295	0.000
300	0.000
305	0.000
310	0.001
315	0.004
320	0.021
325	0.072
330	0.168
335	0.293
340	0.440
345	0.625
350	0.822
355	0.959
360	1.151

Durum 5 %10 Fazla Hatve	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.068
190	0.092
195	0.105
200	0.100
205	0.060
210	0.039
215	0.000
220	0.001
225	0.001
230	0.000
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.001
295	0.003
300	0.005
305	0.015
310	0.046
315	0.109
320	0.199
325	0.334
330	0.498
335	0.694
340	0.977
345	1.253
350	1.440
355	1.753
360	2.111

Durum 6 %10 Eksik Hatve	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.000
190	0.006
195	0.018
200	0.027
205	0.014
210	0.000
215	0.000
220	0.000
225	0.000
230	0.000
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.000
295	0.000
300	0.000
305	0.000
310	0.001
315	0.003
320	0.013
325	0.056
330	0.142
335	0.260
340	0.402
345	0.568
350	0.782
355	0.961
360	1.112

Durum 7 Orjinal Sehim	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	1.151
5	1.419
10	1.624
15	1.809
20	1.971
25	2.031
30	2.084
35	3.260
40	5.425
45	1.835
50	0.282
55	0.087
60	0.034
65	0.038
70	0.028
75	0.016
80	0.001
85	0.002
90	0.002
95	0.000
100	0.000
105	0.000
110	0.000
115	0.000
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.000
170	0.000
175	0.000
180	0.000

Durum 8 %10 Fazla Sehim	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	1.016
5	1.196
10	1.432
15	1.613
20	1.763
25	1.967
30	3.655
35	6.260
40	5.098
45	1.948
50	1.581
55	1.562
60	0.018
65	0.020
70	0.013
75	0.000
80	0.002
85	0.003
90	0.001
95	0.000
100	0.000
105	0.000
110	0.000
115	0.000
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.000
170	0.000
175	0.000
180	0.000

Durum 9 %10 Eksik Sehim	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
0	1.418
5	1.665
10	1.859
15	2.039
20	2.232
25	2.296
30	2.203
35	3.214
40	2.585
45	0.944
50	0.500
55	0.038
60	0.057
65	0.059
70	0.044
75	0.023
80	0.005
85	0.000
90	0.001
95	0.000
100	0.000
105	0.000
110	0.000
115	0.000
120	0.000
125	0.000
130	0.000
135	0.000
140	0.000
145	0.000
150	0.000
155	0.000
160	0.000
165	0.000
170	0.000
175	0.000
180	0.002

Durum 7 Orjinal Sehim	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.001
190	0.009
195	0.021
200	0.031
205	0.017
210	0.000
215	0.000
220	0.000
225	0.000
230	0.000
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.000
295	0.000
300	0.000
305	0.000
310	0.001
315	0.004
320	0.021
325	0.072
330	0.168
335	0.293
340	0.440
345	0.625
350	0.822
355	0.959
360	1.151

Durum 8 %10 Fazla Sehim	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.000
190	0.003
195	0.014
200	0.019
205	0.018
210	0.000
215	0.000
220	0.000
225	0.000
230	0.000
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.000
295	0.000
300	0.000
305	0.000
310	0.000
315	0.002
320	0.005
325	0.026
330	0.087
335	0.187
340	0.317
345	0.462
350	0.661
355	0.840
360	1.016

Durum 9 %10 Eksik Sehim	
θ	$V_c(m^3)*10^3$
185	0.009
190	0.022
195	0.036
200	0.041
205	0.020
210	0.000
215	0.000
220	0.000
225	0.000
230	0.000
235	0.000
240	0.000
245	0.000
250	0.000
255	0.000
260	0.000
265	0.000
270	0.000
275	0.000
280	0.000
285	0.000
290	0.000
295	0.000
300	0.000
305	0.000
310	0.003
315	0.016
320	0.058
325	0.138
330	0.258
335	0.415
340	0.590
345	0.794
350	1.008
355	1.219
360	1.418

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Elis PEHLIVANOĞLU
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.07.1985 / Ruşçuk-BULGARİSTAN
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : elis.pehlivan@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Gemi İnş. ve Mak.	Y.T.Ü	2008
Lise	Fen	Gazi Süper Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2009-	Karadeniz Holding	Satınalma Uzmanı
2007-2009	Sedef Tersanesi	Ticari Proje Mühendisi