

168339

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DÜZENSİZ AKIMDAKİ NOZULLU PERVANELERİN
DİZAYNI VE ANALİZİ**

Gemi İnşaatı Yük. Müh. Fahri ÇELİK

F.B.E. Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalında
hazırlanan

DOKTORA TEZİ

Tez Savunma Tarihi : 27 Mayıs 2005
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Mesut GÜNER (YTÜ)
Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Ahmet D. ALKAN (YTÜ)
: Prof. Dr. Muhittin SÖYLEMEZ (İTÜ)
: Prof. Dr. Abdi KÜKNER (İTÜ)
: Doç. Dr. Hüseyin YILMAZ (YTÜ)

Nezhi
Fahri
Muhittin
Abdi
Hüseyin

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	iv
KISALTMA LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. NOZULLU PERVANELERLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR.....	10
3. PERVANE TEORİLERİ VE TEMEL AKIM MODELLERİ.....	18
3.1 Pervane Teorileri.....	19
3.1.1. Momentum Teorisi.....	19
3.1.2. Kanat Elemanı Teorisi.....	20
3.1.3. Sirkülasyon Teorisi.....	22
3.2. Temel Akım Modelleri.....	29
3.2.1. Girdap Hattı ve Tabakası.....	29
3.2.2. Bağlı Girdap Modeli.....	34
3.2.3. Yüzey Girdap Modeli.....	35
3.2.4. Kaldırıcı Hat (Lifting Line) Modeli.....	37
3.2.5. Nozullu Pervaneler için Eksenel Momentum Teorisi.....	44
3.2.6. Kutta Şartı.....	47
4. NOZULLU PERVANE DİZAYN VE ANALİZİ.....	48
4.1 Nozullu Pervane Dizaynı.....	48
4.1.1 Nozul ve Göbek için Akım Modeli.....	48
4.1.2 Pervane Dizaynı.....	53
4.1.3 Etkileşim Hızlarının Hesaplanması.....	54
4.1.4 Nozullu Pervane Karakteristiklerinin Hesaplanması.....	55
4.2 Nozullu Pervane Analizi.....	57
4.2.1 Nozullu Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli.....	58
4.2.2 İndüklenmiş Hızların Hesaplanması.....	63
4.2.3 Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi.....	65
4.2.4 Değişken Serbest Girdap Bölgelerinin Yenilenmesi.....	69
4.2.5 Nozullu Pervane Kavite Analizi.....	71
4.2.6 Nozullu Pervane Üzerindeki Kuvvet ve Moment Bileşenlerinin Hesaplanması...	75
4.2.7 Göbek Etkisinin Hesaplara Katılması.....	78
5. NOZULLU PERVANE DİZAYN VE ANALİZ UYGULAMALARI.....	80
5.1 Nozullu Pervane Dizaynı.....	80
5.1.1 Nozul ve Göbek Analiz Uygulaması.....	80
5.1.2 Pervane Dizaynı.....	84

5.1.3	Nozullu Pervane Dizayn Uygulaması.....	87
5.2	Nozullu Pervane Analizi.....	92
5.2.1	Kaldırıcı Yüzey Metodu ile Nozullu Pervane Analizi.....	92
5.2.2	Nozullu Pervane CFD Analizi.....	93
5.2.3	Nozullu Pervane Analiz Uygulamaları.....	96
5.2.4	Göbek Etkisinin İncelenmesi.....	107
5.3	Nozul Boyu ve Pervanenin Nozul İçerisindeki Yerinin Nozullu Pervane Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi.....	110
5.3.1	Nozullu Pervane Sistemi 1 (NPS 1).....	110
5.3.2	Nozullu Pervane Sistemi 2 (NPS 2).....	116
6.	SONUÇLAR.....	122
	KAYNAKLAR.....	125
	EKLER.....	128
	EK 1.....	129
	EK 2.....	130
	EK 3.....	132
	ÖZGEÇMİŞ.....	136

SİMGE LİSTESİ

P	Basınç
V	Akım hızı
V_s	Gemi ilerleme hızı
ρ	Akışkanın yoğunluğu
u_a	İndüklenmiş eksenel akım hızı
η_i	Pervanenin ideal verimi
L	Kesit kaldırma kuvveti
D	Kesit direnç kuvveti
T	Pervane itmesi
ω	Pervanenin açısal hızı
V_A	Pervaneye gelen akım hızı
V_R	Kanat kesitine gelen bileşke akım hızı
α	Kanat kesitinin hücum açısı
β	İlerleme açısı
β_i	Hidrodinamik piç açısı
C_D	Direnç katsayısı
C_L	Kaldırma kuvveti katsayısı
c	Kesit kort boyu
Z	Kanat sayısı
Q	Pervane torku
Γ	Bağlı sirkülasyon
u_t	İndüklenmiş teğetsel akım hızı
R	Pervane yarıçapı
γ	Girdap yoğunluğu
k	Eliptik katsayı
K	Birinci tip eliptik katsayı
E	İkinci tip eliptik katsayı
Π	Üçüncü tip eliptik katsayı
G	Boyutsuz sirkülasyon
P_i	Pervane hatvesi (piçi)
K_T	İtme katsayısı
K_Q	Tork katsayısı
D	Pervane çapı
N	Pervane şaft devri
P_D	Pervaneye iletilen güç
BAR	Kanat alan oranı
A_n	Sirkülasyon katsayısı
ε_i	Sonsuzdaki piç açısı
J	İlerleme katsayısı
t	Kanat kesit kalınlığı
v_s	Kanat yüzeyindeki akım hızı
U_r	Radyal akım hızı
β_m	Kanat elemanının eğimi
u_r	İndüklenmiş radyal akım hızı
C_P	Basınç katsayısı
V_∞	Sonsuzdaki akım hızı
P_∞	Sonsuzdaki basınç
K	Katsayı matrisi
DC	Nozul boyu

τ	Nozullu pervanede pervane itmesinin toplam itmeye oranı
C_T	İtme yükleme katsayısı
C_{TD}	Nozul itme katsayısı
η	Pervane verimi
q	Kaynak yoğunluğu
Q	Kaynak elemanı şiddeti
σ	Kavitasyon sayısı
g	Yer çekimi ivmesi
R_b	Kavitasyon çekirdeği yarıçapı
P_c	Suyun buharlaşma basıncı
t_s	Suyun yüzey gerilmesi
P_a	Atmosfer basıncı
h	Şaft derinliği
r	Kontrol noktasının yarıçapı
T_c	Kavitasyon kalınlığı
M	Moment
Re	Reynold sayısı
$(P/D)_{ort}$	Ortalama piç oranı

Birimler SI sistemine göreler.

KISALTMA LİSTESİ

CFD	Computational Fluid Dynamics
ITTC	International Towing Tank Conference
MARIN	Maritime Research Institute Netherlands
MIT	Massachusetts Institute of Technology
NSMB	Netherlands Ship Model Basin
SSPA	İsveç Deniz Araştırmaları Merkezi



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Pervane hareketiyle meydana gelen enerji kayıpları.....	2
Şekil 1.2a	Hızlandırıcı nozul.....	4
Şekil 1.2b	Yavaşlatıcı nozul.....	4
Şekil 3.1	Pervane etrafındaki hız ve basınçlar.....	19
Şekil 3.2	Bir pervane kanat elemanı üzerindeki hız ve kuvvetler.....	20
Şekil 3.3	Magnus etkisi.....	23
Şekil 3.4	Profil etrafındaki sirkülasyon.....	24
Şekil 3.5	Başlangıç girdabı ve sirkülasyon.....	25
Şekil 3.6	Sonlu açıklığa sahip bir kanat profilinde kapalı girdap sistemi.....	26
Şekil 3.7	Orta yüklü bir pervanede kanat elemanına gelen hız ve kuvvetler.....	27
Şekil 3.8	İki boyutlu girdabın girdap hattı ile temsili.....	29
Şekil 3.9	Düz girdap tabakası.....	30
Şekil 3.10	Helisel girdap tabakası.....	30
Şekil 3.11	Biot-savart kanununun genel bir girdap hattına uygulanması.....	31
Şekil 3.12	Biot-savart kanununun doğrusal bir girdap hattına uygulanması.....	32
Şekil 3.13	Biot-savart kanununun yarı-sonsuz düzgün bir girdap hattına uygulanması.....	33
Şekil 3.14	Bağlı girdap ve kaldırma kuvveti.....	34
Şekil 3.15	Sınır tabaka.....	35
Şekil 3.16	Bir hidrofil için yüzey girdabı modeli.....	35
Şekil 3.17	Bir hidrofilin girdap panelleriyle modellenmesi.....	36
Şekil 3.18	Girdap hattındaki bozulma ve helisel girdap hattı.....	39
Şekil 3.19	Pervane silindir girdap modeli.....	42
Şekil 3.20	Bir nozullu pervane için ideal sevk verimi ve pervane düzlemine gelen boyutsuz eksenel akım hızının geniş bir itme oranı (τ) aralığında, itme yükleme katsayısına (C_T) göre değişimi.....	45
Şekil 3.21	İtme yüklemesinin (τ) bir fonksiyonu olarak nozullu pervane çapının nozulsuz pervane çapına oranı (D/D_0).....	46
Şekil 4.1	Nozul/göbek için yüzey girdap modeli.....	49
Şekil 4.2	Bir nozul yüzey elemanı üzerindeki basınç kuvveti.....	56
Şekil 4.3	Pervane kanadı kaldırıcı yüzey modeli.....	60
Şekil 4.4	Nozul girdap/kaynak modeli.....	62
Şekil 4.5	Bir girdap/kaynak elemanının kontrol noktasında indüklediği hız.....	64
Şekil 4.6	Değişken serbest girdap bölgelerinin yenilenmesi.....	70
Şekil 4.7	Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli.....	72
Şekil 4.8	Parçalı kavitasyon kalınlıklarının yuvarlatılması ve kanat kesitine etkileri.....	74
Şekil 4.9	Pervane anahtar kanadına ve nozul anahtar sektörüne etkiyen kuvvet ve moment bileşenleri.....	75
Şekil 5.1	Nozul/göbek analiz algoritması.....	81
Şekil 5.2	FLUENT ve yüzey girdap metodlarından elde edilen nozul iç ve dış yüzeylerindeki basınç dağılımlarının (C_p) karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.3	FLUENT ve yüzey girdap metodlarından elde edilen göbek yüzeyindeki basınç dağılımlarının (C_p) karşılaştırılması.....	82
Şekil 5.4	Göbekten kaynaklanan eksenel akım hızları (U_a/V).....	83
Şekil 5.5	Nozuldan kaynaklanan eksenel akım hızları (U_a/V).....	83
Şekil 5.6	Nozul ve göbekten kaynaklanan eksenel akım hızları (U_a/V).....	83
Şekil 5.7	Kaldırıcı hat dizayn yönteminin akış şeması.....	86
Şekil 5.8	Nozullu pervane dizayn algoritması.....	88

Şekil 5.9	NSMB Nozul no. 19-A kesit	89
Şekil 5.10	Sirkülasyon dağılımı.....	89
Şekil 5.11	Nozul içerisindeki iz dağılımı.....	90
Şekil 5.12	Hatve oranının (P/D) çap boyunca dağılımı	90
Şekil 5.13	Kaldırma kuvveti katsayısının (C_L) çap boyunca dağılımı.....	90
Şekil 5.14	Pervane tarafından indüklenmiş eksenel ve teğetsel hızların dağılımı.....	91
Şekil 5.15	Nozullu pervane kaldırıcı yüzey analiz prosedürünün akış şeması	95
Şekil 5.16	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.259$) (kaldırıcı yüzey metodu, kanat arkasında)	97
Şekil 5.17	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.259$) (kaldırıcı yüzey metodu, kanat yüzünde)	97
Şekil 5.18	Nozullu pervanenin üç boyutlu CAD resmi (NPS 1)	98
Şekil 5.19	Nozullu pervane üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.259$) (a) önden, b) arkadan görünüş)	99
Şekil 5.20	z-y Düzlemindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.259$)	99
Şekil 5.21	Nozullu pervane etrafındaki akım hatları ($J_A=0.259$)	99
Şekil 5.22	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.259$) (FLUENT; arkadan görünüş)	100
Şekil 5.23	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.259$) (FLUENT, önden görünüş)	100
Şekil 5.24	Kaldırıcı yüzey metodu ve FLUENT'ten elde edilen nozullu pervane performans katsayılarının karşılaştırılması.....	101
Şekil 5.25	Nozul kesiti (NPS 2).....	102
Şekil 5.26	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.302$) (kaldırıcı yüzey, kanat arkasında)	102
Şekil 5.27	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.302$) (kaldırıcı yüzey, kanat yüzünde)	102
Şekil 5.28	Nozullu pervanenin üç boyutlu CAD resmi	103
Şekil 5.29	Nozullu pervane üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.302$) (a) önden, b) arkadan görünüş)	104
Şekil 5.30	z-y Düzlemindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.302$)	104
Şekil 5.31	Nozullu pervane etrafındaki akım hatları ($J_A=0.302$)	104
Şekil 5.32	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.302$) (FLUENT, arkadan görünüş)	105
Şekil 5.33	Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_P) ($J_A=0.302$) (FLUENT, önden görünüş)	105
Şekil 5.34	Kaldırıcı yüzey metodu ve FLUENT'ten elde edilen pervane performans katsayılarının karşılaştırılması.....	106
Şekil 5.35	Göbek etrafındaki eksenel akım hızı (U_d/V) (Uygulama 1)	108
Şekil 5.36	Göbek etrafındaki eksenel hızların (U_d/V) değişimi (Uygulama 2).....	109
Şekil 5.37	İtme ve verimlerin gemi ilerleme hızına göre değişimi (NPS 1).....	111
Şekil 5.38	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0$) (NPS 1)	112
Şekil 5.39	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.05$) (NPS 1)	112
Şekil 5.40	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.1$) (NPS 1)	112
Şekil 5.41	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.15$) (NPS 1)	113
Şekil 5.42	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.2$) (NPS 1)	113

Şekil 5.43	Tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0$) (NPS 1).....	114
Şekil 5.44	Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.05$) (NPS 1)	114
Şekil 5.45	Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.1$) (NPS 1)	115
Şekil 5.46	Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.15$) (NPS 1)	115
Şekil 5.47	Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.2$) (NPS 1)	115
Şekil 5.48	İtme ve verimlerin gemi ilerleme hızına göre değişimi (NPS 2).....	116
Şekil 5.49	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0$) (NPS 2)	117
Şekil 5.50	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.1$) (NPS 2)	117
Şekil 5.51	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.2$) (NPS 2)	118
Şekil 5.52	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.3$) (NPS 2)	118
Şekil 5.53	Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.4$) (NPS 2)	118
Şekil 5.54	Tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0$) (NPS 2).....	119
Şekil 5.55	Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.05$) (NPS 2)	120
Şekil 5.56	Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.15$) (NPS 2)	120
Şekil 5.57	Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.2$) (NPS 2)	120

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1	Enerji tasarrufu sağlayıcı sevk cihazları.....	3
Çizelge 1.2	Değişik tipteki gemilere göre nozul kullanımı.....	5
Çizelge 5.1	Sonuçların karşılaştırılması	91
Çizelge 5.2	Nozullu pervane performans katsayıları ($J= 0.433$)	107
Çizelge 5.3	Nozul girişinde iz dağılımındaki değişim miktarları.....	108
Çizelge 5.4	Sonuçların karşılaştırılması (Uygulama 1)	108
Çizelge 5.5	Nozul girişinde iz dağılımındaki değişim miktarları.....	109
Çizelge 5.6	Sonuçların karşılaştırılması (Uygulama 2)	110
Çizelge Ek 2.1	Birinci (E) ve ikinci tip (K) eliptik integral toplamaları	130
Çizelge Ek 3.1	Pervane geometrisi (NPS 1)	132
Çizelge Ek 3.2	Kanat kesit geometrileri (NPS 1).....	132
Çizelge Ek 3.3	Pervane geometrisi (NPS 2)	133
Çizelge Ek 3.4	Kanat kesit geometrileri (NPS 2).....	133
Çizelge Ek 3.5	Pervane geometrisi (NPS 3)	134
Çizelge Ek 3.6	Kanat kesit geometrileri (NPS 3).....	134
Çizelge Ek 3.7	NSMB nozul no: 19A kesit geometrisi (NPS 1 ve NPS 3)	135
Çizelge Ek 3.8	Nozul kesit geometrisi (NPS 2).....	135
Çizelge Ek 3.9	Nozul girişindeki düzensiz iz dağılımı (NPS 3).....	135

ÖNSÖZ

Sunulan bu çalışmanın gemi inşaatı araştırmaları içinde önemli bir yere sahip olan pervane dizaynı/analizi üzerine yoğunlaşmasını sağlayan ve uzun doktora döneminde her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen, değerli danışmanım sayın Prof. Dr. Mesut GÜNER'e en derin şükranlarımı sunarım.

Ayrıca doktora çalışmalarım boyunca görüşlerinden istifade ettiğim tüm YTÜ Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine teşekkürü bir borç bilirim.

Bölümümüzdeki araştırma görevlisi arkadaşlara ve diğer personele de bana gösterdikleri moral destek ve verdikleri motivasyondan dolayı müteşekkirim.

Son olarak bu meşakkatli dönemde bana sonsuz sabır gösteren eşime ve oğluma teşekkür ederim.



ÖZET

Gemi pervanelerinde değişik enerji kayıplarının oluşumu kaçınılmazdır. Özellikle yüksek yükleme durumlarında en önemli yeri eksenel enerji kayıpları tutar. Bu kayıpları azaltarak genel sevk verimi artırılabilir. Bunun bir yolu da pervane etrafında nozul kullanmaktır. Bu nedenle, geniş uygulama alanına sahip olan nozullu pervane sevk sistemlerinin dizaynı ve performans analizi için bu çalışmada sayısal metodlar geliştirilmiştir. Dizayn metodunda; pervanenin kaldırıcı hat, nozul ve göbeğin eksenel simetrik yüzey girdap metoduyla modellendiği ve nozul, göbek ve pervane aralarındaki etkileşimi dikkate alan iteratif bir yöntem kullanılmıştır. Analiz metodunda ise; kesit kalınlıklarının kaynaklarla, hidrodinamik yüklerin de uygun girdap dağılımlarıyla modellendiği ve göbek etkisinin halka girdap modeliyle hesaplara katıldığı bir kaldırıcı yüzey yöntemi kullanılmıştır. Dizayn ve analiz metodlarının sayısal uygulamaları amacıyla Fortran programlama dilinde iki ayrı yazılım geliştirilmiştir. Ayrıca sonlu hacimlere dayalı Fluent ile de CFD analizi yapılmıştır.

Nozullu pervane dizayn metodu aynı zamanda, göbek ve nozul etrafındaki akım analizine imkan sağlamakta ve nozullu pervanenin tamamından veya bazı kısımlarından kaynaklanan herhangi bir noktadaki indüklenmiş hız bileşenlerini de hesaplamaya imkan tanımaktadır. Mevcut ve CFD analiz metodlarının her ikisi ile nozullu pervane üzerindeki basınç dağılımları elde edilebilmekte, ayrıca CFD yöntemiyle nozullu pervane çevresindeki akım hatları grafik ortamda elde edilebilmektedir. Mevcut analiz yöntemi göbeğin nozullu pervaneye etkisinin incelenmesine de imkan sağlamaktadır.

Çalışmada nozullu pervane dizaynı, nozul ve göbek analizi için birer örnek uygulama yapılmıştır. Dizayn uygulamasından elde edilen pervane hidrodinamik değerleri kaldırıcı yüzey metodundan bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Nozul ve göbek analizlerinde bulunan sonuçlar da Fluent'ten bulunan sonuçlarla karşılaştırılarak, aralarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür. Nozullu pervane analizi için üç uygulama gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve uyum içinde oldukları görülmüştür. Ayrıca parametrik çalışma amacıyla analizde kullanılan nozullu pervane sistemleri için nozul boyu ve pervanenin nozul içerisindeki konumunun sistemlerin performans katsayılarına etkileri incelenmiştir.

Sonuç olarak mevcut dizayn ve analiz yöntemleriyle kolay, hızlı ve güvenilir bir şekilde nozullu pervane dizaynı ve analizi gerçekleştirilebilmektedir.

Anahtar kelimeler: Nozullu pervane, kaldırıcı hat, kaldırıcı yüzey, sonlu hacimler metodu, yüzey girdap modeli

ABSTRACT

It is unavoidable to prevent energy losses in marine propeller. Especially axial energy losses take important place at high loading case of propeller. Therefore propulsive efficiency can be increased by reducing these energy losses. One of the ways of reducing energy losses is to use duct around the propeller. Therefore, numerical methods have been developed to design and analyse ducted propeller which has very wide application in naval architecture area. For the design of ducted propellers, an iterative method is applied in which the propeller is modelled by lifting line and, duct and hub are modelled by symmetrical surface vortices. For the analysis of propulsor, a lifting surface method, where section thickness is represented by sources and hydrodynamic loads are represented by vortex distributions, is used. The effects of hub are included as ring vorticity model. Two kinds of programs have been written in Fortran programming language for design and analysis of ducted propeller. In addition to the present method, a CFD analysis (FLUENT) is applied for analysis cases.

Ducted propeller design method has capability of calculating flow around hub and duct. It also provides any induced velocity due to propeller or duct at any point. Present and CFD methods give pressure distributions on propeller and duct. CFD method also provides streamlines around propeller. Present method is able to calculate the effects of hub on ducted propeller.

In this work, an application for propeller design, duct and hub analysis is carried out. The results obtained by use of the present design method are compared with those of lifting surface method. A good agreement is obtained between the finite volume method and present method for duct and hub analysis results. Three kinds of applications are carried out for ducted propeller analysis. The results of applications showed a good agreement between present and experimental methods. The effects of duct length location on propulsive characteristics is also investigated using the analysis tools.

Finally it can be concluded from this work that present design and analysis methods for ducted propeller offers reliable, fast and easy solution in compare with existing methods.

Key words: Ducted propeller, lifting line, lifting surface, finite volume method, surface vorticity model

1. GİRİŞ

Hava ve su gibi iki farklı ortamda bulunan bir geminin belirli bir hızda hareket edebilmesi için her iki ortamdaki kaynağın direnç kuvvetlerini yenmesi gerekir. Bu da geminin üreteceği itme kuvvetiyle sağlanır. Gemi suya hareket ettirecek itme kuvveti en basit ifadeyle, kullanılan sevk sisteminin suyu geminin hareket yönüne ters yönde hızlandırmasına tepki olarak oluşur. Bu prensip suya dış kuvvetlerin etkisi olmaksızın hareket eden her cisim için geçerlidir. Örneğin; insanların çektiği küreklerle hareket eden uzun bir kano, mekanik bir pedalla hareket ettirilen bir tekne, uskur pervaneli bir gemi ve suyu yüksek hızla atan su jetine sahip bir gemi vs.

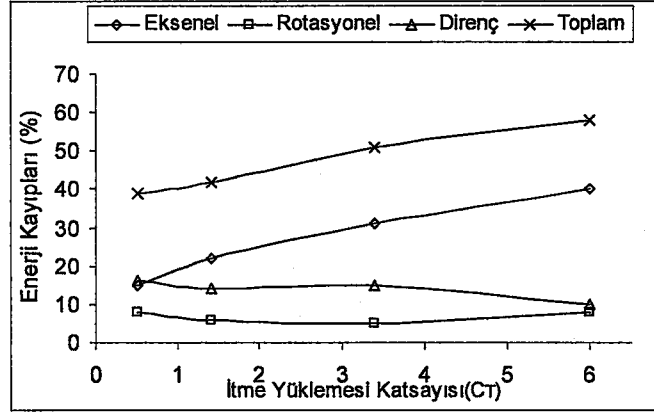
Bugüne kadar çeşitli gemi sevk sistemleri geliştirilmiş olmasına karşılık, bunların sağladığı verim ile uygulamadaki kolaylık dikkate alındığında, halen en yaygın uygulama alanına sahip olan uskur pervanelerdir. Klasik uskur pervanelerin dizaynının başladığı 1800'lü yılların başından bu yana pek çok gelişmeler olmuşsa da temel pervane yapısında önemli bir değişiklik olmamıştır.

Klasik uskur pervaneler kanatlarında oluşan kaldırma kuvveti ile itme sağlarlar. Ancak, pervaneye iletilen enerjinin tamamı itmeye dönüştürülemez. Bu enerjinin bir kısmı rotasyonel ve aksel kayıplar şeklinde pervane gerisine kinetik enerji olarak bırakılır. Pervane viskoz bir akışkanda çalıştığından dolayı diğer bir kayıp da direnç kaybıdır. Kanat alanı ne kadar küçük olursa o oranda direnç azaltılmış olur. Ancak kavitasyon ve mukavemet, kanat profilinin seçiminde sınırlayıcıdır. Kanat yüzeylerinin pürüzlülüğü de direnç kayıplarını artıran diğer bir faktördür. Sonuç olarak pervane hareketleriyle ilgili enerji kayıpları; akıma aksel ve rotasyonel yönde bırakılan ek kinetik enerji ile akışkanın kanat yüzeylerindeki sürtünmesinden kaynaklanan direnç kayıplarıdır. Pervane verimi (η_o), enerji kayıplarının fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\eta_o = 1 - AXL - ROTL - FRL \quad (1.1)$$

Burada; AXL , aksel enerji kayıp oranı; $ROTL$, rotasyonel enerji kayıp oranı ve FRL , kanat sürtünme kayıp oranıdır.

Şekil 1.1'de geniş bir yükleme katsayısı aralığındaki örnek gemiler için enerji kayıplarının değişimi verilmektedir (Glover, 1987). Şekilden, enerji kayıplarının pervane itme yüklemesi katsayısının bir fonksiyonu olduğu ve aksel kayıpların yüklemeyle birlikte gözle görülebilir bir şekilde arttığı görülmektedir. Bununla beraber rotasyonel enerji kayıpları ile sürtünme kayıpları ise geniş bir yükleme aralığında yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.



Şekil 1.1 Pervane hareketiyle meydana gelen enerji kayıpları (Glover, 1987)

Bu kayıpları azaltarak sevk verimini artırmanın en uygun yolu düşük makina devrinde çalışacak geniş çaplı pervaneler kullanarak pervane yükünü azaltmaktır. Ancak çoğu zaman gemi kış formu ve geminin çalıştığı suyun derinliği buna izin vermez. Çap sınırlamasının olduğu böyle durumlarda enerji kayıplarını en aza indirmek için yeni sevk sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir.

Pervanelerin geliştirilmesi genel olarak, mümkün olduğu kadar yüksek verim, düşük gürültü ve titreşim seviyesine sahip, aynı zamanda kavitasyon riskinin de enaz olduğu pervane sistemlerinin araştırılması şeklinde ifade edilebilir. Bu ise bizi, bir klasik tek pervaneye göre daha yüksek sevk verimi ve diğer şartları sağlayan ilave sevk sistemlerine götürür. Bu amaçla geliştirilen çok sayıda sevk sistemi bulunmaktadır. Fakat bazı sevk cihazlarının pratik olmayışı, pahalı oluşu veya teknik karmaşıklığı nedeniyle uygulama alanı dar kalmıştır. Enerji tasarrufu sağlayıcı ilave sevk sistemleri ve çalışma prensipleri hakkında Çelik ve Güner (1997), Glover (1987), ITTC (1990), Blaurock (1990), Patience (1991), Breslin ve Anderson (1994) ve Carlton'da (1994) geniş bilgi bulunabilir. Çizelge 1.1'de bir kısım enerji tasarrufu sağlayıcı ilave sevk cihazları ve bunların verimi artırma oranları gösterilmiştir.

Çizelge 1.1 Enerji tasarrufu sağlayıcı sevk cihazları (ITTC, 1990)

Sevk Sistemi		Verim Artışı (%)
Düşük Devirli Pervane		5-18
Zıt Dönüştü Pervaneler		7-20
Grim Tekerlekleri		8-12
Nozullu Pervane	Eksenel Simetrik Nozul	5-20
	Asimetrik Nozul	5-15
Asimetrik Kıç		1-9
Pervane Göbek Finleri		1-8
Dümen Balb Sistemi		1-3
İz Düzenleyici Nozul		6-7
Grouthes Dağıtıcıları		2-10
Stator		3-7

Enerji tasarrufu sağlayıcı sevk cihazlarından nozullu pervaneler, diğer sevk cihazları ile karşılaştırıldığında %20'ye kadar sağladığı verim artışıyla geniş bir kullanım alanına sahiptir. Römorkörlerde, itici teknelerde, balıkçı gemilerinde, büyük petrol tankerlerinde ve dökme yük gemilerinde yaygın olarak uygulanmaktadır.

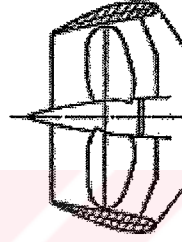
Genel olarak pervanenin nozul içinde kullanılması, verimi artırma (*Hızlandırıcı Nozul*), pervane kavitasyonunu azaltma (*Yavaşlatıcı Nozul*) veya pervaneyi dış etkenlerden koruma (her ikisi de) amaçlıdır. Kesit profili nedeniyle pervaneye gelen akımı hızlandıran ve pozitif bir itme sağlayarak genel sevk veriminde artışa neden olan nozul tipi "*Hızlandırıcı Nozul veya Kort Nozul*" olarak adlandırılır. Nozulun verim artışı sağlaması şu şekilde açıklanabilir: Nozulsuz durumda pervane kanat uçlarında meydana gelen serbest girdaplar, nozul profili etrafında bağlı girdaplar şekline dönüşerek ilave bir itme üretirler. Böylece kanat uçlarında meydana gelen kayıplar nozul tarafından telafi edilir. Telafi edilen bu kayıplar, nozulun kendi direncinden kaynaklanan kayıplardan daha büyük olduğu durumlarda nozullu pervane sisteminin verimi artar. Nozul kullanımıyla, nozulsuz durumdakinden daha küçük çaptaki bir pervane ile aynı verim elde edilebilir.

Bu tip nozulların kullanılması ile ağır yükleme durumlarında gerekli makine gücü azalır. Kanat uçlarında daha az serbest girdaplar oluşur. Dönen tipli nozul durumunda dümene ihtiyaç kalmaz ve mükemmel manevra kabiliyeti sağlar, aynı zamanda buzlu denizlerde çalışan gemilerde pervaneyi darbelere karşı korur.

Bütün bu sayılan avantajlarına karşılık, gemiye takılan her takıntı gibi hızlandırıcı nozul da direnç artışına sebep olur ve pervane üzerindeki statik basıncı düşürdüğü için kanatlarda kavitasyon riskini artırır. Bu tip nozullar ağır yüklü veya çap sınırlaması olan gemilerde özellikle; römorkörlerde, balıkçı gemilerinde, itici-çekici teknelerde ve buzlu denizlerde çalışan gemilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 1.2a).



Şekil 1.2a Hızlandırıcı nozul



Şekil 1.2b Yavaşlatıcı nozul

Hızlandırıcı Nozullar üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır (van Manen ve Oosterveld, 1966):

1. Optimum nozullu pervane çapı, nozulsuz pervane çapından daha küçük olmalıdır.
2. Nozul boyu küçük seçildiğinde çok düşük yüklerde bile verimde bir artış sağlanabilir.
3. Nozul iç yüzeyi ile pervane kanadı arasındaki açıklığın artması verim kaybına neden olur.
4. Nozul yapısına bağlı olarak pervaneye gelen eksenel hızların dağılımı yüz kavitasyonuna neden olabilir. Kavitasyon yönünden Wageningen-B tipi pervane serilerine göre daha hassas olan ve daha geniş kanat ucuna sahip Kaplan tipi pervane serilerinin kullanılması daha uygun olacaktır.
5. Verimlilik açısından, nozul boyu/çap oranının 0.5, pervane itmesi/toplam itme oranının ise 0.7 olması uygundur.

Hızlandırıcı nozul kullanmanın bir avantaj getirip getirmeyeceği, aşağıdaki basit formülle öngörülebilir:

$$K = \frac{n.P_D}{V_A^{2.5}} \quad (1.2)$$

Burada n , devir sayısı (1/s); P_D , pervaneye iletilen güç (kW) ve V_A , pervaneye gelen akım hızıdır (m/s).

$K > 26$ için nozul kullanımı avantajlıdır.

$K < 26$ için ise nozul kullanımı verimde düşüğe neden olur.

Çizelge 1.2’de değişik gemi tipleri için deneysel çalışmalardan, pervane dizayn katsayısı B_p ve itme katsayısı C_T değerlerine göre hızlandırıcı nozul kullanmanın uygun olup olmadığı gösterilmiştir.

Çizelge 1.2 Değişik tipteki gemilere göre nozul kullanımı (van Manen ve Oosterveld, 1966).

Gemi Tipi	B_p	C_T	Nozul Kullanımı
Çift pervaneli kargo ve yolcu gemileri	10-13	0.7-1.0	Uygun değil
Tek pervaneli kargo ve yolcu gemileri	20-33	1.5-2.0	Uygun
Kosterler	40-60	3	Uygun olabilir
Römorkörler	$100 \leq$	$6 \leq$	Uygun

Genellikle büyük yük gemilerinde, tankerlerde, hızlı savaş gemilerinde, torpidolarda ve kavitasyon riski taşıyan sistemlerde pervane kavitasyon olayını önlemek amacıyla kullanılan nozul tipi ise “Yavaşlatıcı Nozul” olarak adlandırılır (Şekil 1.2b). Yavaşlatıcı nozulun çalışma prensibi şu şekilde açıklanabilir: Şekil 1.2b’deki gibi nozul sehim hattı dış bükey olduğu için pervaneye gelen akımı yavaşlatır ve dolayısıyla pervane üzerindeki basıncın artmasını sağlar. Bu durum da kanatlarda kavitasyon oluşumunu güçleştirir.

Yavaşlatıcı nozulun kavitasyon olayını önlemesine karşılık, kendi başına negatif bir itme sağladığı için bunu karşılayacak şekilde pervane yükünün artırılması gerekir.

Yavaşlatıcı nozul ile ilgili yapılan deneysel çalışmalarda aşğıdaki sonuçlara ulaşılmıştır (van Manen ve Oosterveld, 1966):

1. Yavaşlatıcı nozul sevk veriminde azalmaya yol açar. Ancak bu azalma miktarı küçüktür.
2. Düşük yüklemelerde nozul direncinin neden olacağı verim kayıplarından sakınmak için, nozul boyunun daha kısa seçilmesi yararlı olacaktır.

Bu çalışmada nozullu pervanelerin dizayn ve analizi için nümerik yöntemler geliştirilecektir. Önce dizayn ve analiz için ayrı ayrı modeller oluşturulacak daha sonra sayısal uygulamalar için hesap yöntemleri sunulacaktır. Nozullu pervane dizaynı, pervanenin kaldırıcı hatlarla, nozul ve göbeğin yüzey girdap dağılımlarıyla modellendiği, nozul, göbek ve pervanenin etkileşimini dikkate alan iteratif bir işlemle gerçekleştirilecektir. Nozullu pervane performans analizi için ise nozul ve pervane kanat kalınlıklarının uygun kaynak dağılımlarıyla, hidrodinamik yüklerin de uygun girdap dağılımlarıyla modellendiği ve düzensiz akım etkilerini dikkate alan bir kaldırıcı yüzey metodu kullanılacaktır. Ayrıca kaldırıcı yüzey analiz metoduna göbek etkisi de dahil edilerek dizaynda olduğu gibi burada da göbek, yüzeyine yayılan halka girdap dağılımlarıyla temsil edilecektir. Sunulacak hesap prosedürüyle nozullu pervanede göbeğin etkisi incelenebilecektir.

Nozullu pervane dizayn ve analizini sayısal olarak gerçekleştirmek için iki ayrı bilgisayar programı geliştirilecektir. Programlar kullanılarak nozullu pervane dizaynı için bir örnek uygulama; nozullu pervane performans analizi için ise üç örnek sistem için uygulama yapılacaktır. Dizayn edilen nozullu pervanenin performans katsayıları kaldırıcı yüzey metodundan bulunan sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Analiz uygulamalarında ise kaldırıcı yüzey metodundan bulunan sonuçlar, ilk iki uygulamada Fluent programı kullanılarak sonlu hacimler yöntemiyle, üçüncüde ise deney sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır. Ayrıca analizde kullanılan ilk iki nozullu pervane sistemi için göbek etkisi incelenerek; nozul boyu ve pervanenin nozul içerisindeki yerinin farklı ilerleme katsayılarında sistemin karakteristiklerine etkilerinin araştırılacağı parametrik çalışmalar yapılacaktır.

Yukarıda anlatılan amaçlar doğrultusunda Bölüm 1 ve 2’de; nozullu pervane sevk sisteminin önemi ve kullanımını gerektiren hususlar ile bu sevk sistemi üzerine ilk pratik çalışmaların yapıldığı 1930’lardan günümüze kadar yapılmış deneysel ve teorik çalışmaların bazıları hakkında bilgi verilmiştir.

Bölüm 3’de ise; pervane dizaynında dikkat edilmesi gereken genel hususlar, temel pervane teorileri ve nozullu pervane dizayn ve analizinde kullanılan girdap/kaynak dağılımlarına

dayalı teorik akım modelleri anlatılarak bu modelleri oluşturan elemanların indükledikleri hızların hesabı için yöntemler verilmiştir.

Bölüm 4'te; nozullu pervane dizaynı ve performans analizi için iki ayrı teorik metod sunulmuştur. Nozullu pervane dizaynı metodu, pervane kanatlarının kaldırıcı hatlarla, nozul ve göbeğin ise yüzey girdap dağılımlarıyla temsil edildiği iteratif bir hesap prosedürü içermektedir. **Nozul/göbek ve pervanenin etkileşimi, birbirlerinin üzerindeki kontrol noktalarında indükledikleri hızlarla hesaplara dahil edilmektedir.** Hesap prosedüründe şu sıra takip edilir; ilk önce gelen ortalama akıma göre nozul/göbek yüzeyine yayılan yüzey girdap elemanlarının şiddetleri belirlenir. Bu işlem, nozul/göbek yüzeyinde Dirichlet sınır koşulunu sağlayacak şekilde oluşturulan lineer denklem sistemi çözülerek yapılır. Daha sonra nozul/göbek yüzeyindeki girdap elemanlarının pervane düzleminde indükledikleri hızlar Biot-Savart kanunu kullanılarak bulunur. Pervane kaldırıcı hatlarını oluşturan girdap dağılımlarının değerleri de pervane minimum enerji kaybı prensibini sağlayacak şekilde oluşturulan denklem sisteminin çözülmesiyle elde edilir. Pervaneye gelen akım hızı ile nozul/göbeğin indüklediği hızlar denklemlere sınır koşulları şeklinde dahil edilir. Daha sonra pervaneyi oluşturan girdap elemanlarının nozul/göbek kontrol noktalarında indükledikleri ortalama hızlar eliptik integraller yardımıyla hesaplanır. Son halde artık nozul/göbek sınır koşulları değişmiştir. Son durum için tekrar nozul/göbek girdap dağılımlarının değerleri hesaplanır ve yukarıda anlatılan işlemlere devam edilir. Pervane düzlemindeki kontrol noktalarında hesaplanan akım hızı yakınsayana kadar işlemlere devam edilir. Yakınsama sağlandıktan sonra pervane karakteristikleri ve pervane geometrisi kolayca hesaplanabilir.

Nozullu pervanelerin performans analizi için sunulan yöntemde pervane kanatları ve nozulun modellenmesi için kaldırıcı yüzey metodu kullanılır. Pervane ve nozul üzerindeki hidrodinamik yükler, kesit sehim hatlarının oluşturduğu yüzeylere yayılan girdap dağılımlarıyla, kalınlık etkileri de aynı yüzeylere yayılan kaynak dağılımlarıyla modellenir. Nozullu pervane üzerinde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu da kaynak dağılımlarıyla modellenerek, kaldırıcı yüzey geometrisindeki deformasyon şeklinde hesaplara dahil edilir. Gemi arkası düzensiz akım etkileri sadece nozullu pervane üzerindeki hidrodinamik yüklerin hesabına katılarak nozul ve pervane kalınlık etkileri ortalama akıma göre belirlenir. Bu şekilde kalınlık etkileri hesaplara zamanla değişmeyen sabit düzeltmeler olarak yansıtılır.

Nozullu pervane kaldırıcı yüzeylerindeki girdap ve kaynak dağılımlarının değerleri ise, nozul ve pervane kanatları üzerindeki kontrol noktalarında kinematik sınır şartı sağlanacak (akım kaldırıcı yüzeye teğet olacak) şekilde kaldırıcı yüzey denkleminin yazılmasıyla oluşturulan

lineer denklem sisteminin çözülmesiyle elde edilir. Pervane kanatları üzerindeki kontrol noktaları için lineer denklem sistemi oluşturulurken, nozul üzerinde ve nozul serbest girdap bölgesindeki girdap dağılımlarının da indükledikleri hızlar hesaba katılır. Aynı şekilde nozul kaldırıcı yüzeyindeki kontrol noktaları için de pervane tarafından indüklenen hızlar hesaba katılarak nozul-pervane etkileşimi sağlanmış olur. Herbir kanat pozisyonu için, pervane kanadı ve nozul yüzeyinde bu işlemler tekrarlanmak suretiyle istenilen yakınsaklık sağlanana kadar devam edilir.

Pervane ve nozul kaldırıcı yüzeylerindeki girdap ve kaynak dağılımlarının bu şekilde belirlenmesiyle, pervane kanatları ve nozul yüzeylerindeki akım alanları, basınç dağılımları ile pervane şaftına ve nozula etki eden kuvvetler bulunabilir. Ayrıca nozullu pervane üzerindeki tabaka kavitasyon bölgeleri de tespit edilebilir.

Kaldırıcı yüzey analiz metoduna göbek etkisi de katılarak metod geliştirilmiştir. Göbek etkisinin nozullu pervane kaldırıcı yüzey metoduna katılması, göbek yüzeyine yayılan halka girdap dağılımlarının nozullu pervane girişinde indükledikleri eksenel hızların hesaplanması ve gelen akıma eklenmesi suretiyle sağlanır. Göbek girdap dağılımlarının değerleri, nozullu pervaneye gelen ortalama çevresel akıma göre göbek yüzeyinde Dirichlet sınır koşulu sağlanacak şekilde oluşturulan lineer denklem sisteminin çözülmesiyle elde edilir. Girdap dağılımlarının indükledikleri hızların bulunmasında Biot-Savart kanunundan yararlanılır.

Bölüm 5’de; bir önceki bölümde anlatılan nozullu pervane dizayn ve analiz yöntemlerinin uygulamaları yapılmıştır. Nozullu pervane dizaynı kapsamında; önce dizaynın önemli aşamalarından olan nozul ve göbek analizi için geliştirilen Fortran programı kullanılarak örnek bir uygulama yapılmıştır. Nozul ve göbek üzerinde ve çevresinde bulunan basınç dağılımları ve akım hızları Fluent’ten bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasındaki uyum şekillerle gösterilmiştir. Daha sonra nozullu pervane dizaynı için geliştirilen Fortran programı ile örnek bir uygulama yapılarak bulunan pervane karakteristikleri kaldırıcı yüzey metodundan bulunan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında iyi bir uyum görülmüştür.

Analiz yönteminin ise; üç farklı nozullu pervane sistemi için uygulaması yapılmıştır. Bu kapsamda, ilk iki sistem için dört ilerleme katsayısı durumunda nozullu pervanelerin ürettikleri itmeler, torklar ve verimler bulunmuş, dizayn şartlarında kanat yüzeylerindeki basınç dağılımları (C_p) şekillerle gösterilmiştir. Teorik modelden bulunan sonuçlar, aynı sevk sistemlerinin FLUENT programında modellenerek incelenmesi ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Teorik model ile FLUENT’ten bulunan sonuçlar arasında iyi bir uyum

olduğu görölmüştür. Ayrıca her iki uygulama için dizayn şartlarında nozullu pervane etrafındaki akım hatları ve basınç dağılımları FLUENT'ten bulunarak gösterilmiştir. Bu iki uygulamada kullanılan nozullu pervane sistemleri farklı römorkörler için dizayn edilmiş gerçek projelerdir.

Üçüncü uygulamada ise bir model nozullu pervane için kaldırıcı yüzey metoduyla analiz yapılarak bulunan performans katsayıları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Burada da teorik ve deneysel sonuçlar arasında iyi bir uyum görölmüştür.

Daha sonra analizde kullanılan ilk iki nozullu pervane sistemi için bir önceki bölümde anlatılan metottan (kaldırıcı yüzey analiz metoduna göbek etkisinin katılmasına dair) geliştirilen bilgisayar programı ile göbek etkisi incelenmiştir. Sonuçta yeterince uzun seçilen göbek etkisinin ihmal edilebilir mertebelerde olduğu sonucuna varılmıştır.

Bölüm 5'in sonunda; analizde ve göbek etkisinin incelenmesinde kullanılan iki nozullu pervane sistemi için nozul boyunun ve pervanenin nozul içerisindeki konumunun sistemin karakteristiklerine etkileri farklı ilerleme katsayıları için incelenmiştir. Ayrıca nozullu ve nozulsuz sistemlerin geniş bir gemi ilerleme hızı aralığında itme ve verimlerdeki değişimler karşılaştırılmıştır. Nozullu pervane kullanımının hangi hız aralıklarında fayda sağlayıp sağlamayacağı şekillerle gösterilmiştir.

Son olarak Bölüm 6'da da; tezin genel bir değerlendirmesi yapılarak, bulunan sonuçlar tartışılmıştır.

2. NOZULLU PERVANELERLE İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Önemli oranda sağladığı verim artışı nedeniyle, özellikle römorkörlerde, itici teknelerde, balıkçı gemilerinde, büyük petrol tankerlerinde ve dökme yük gemilerinde yaygın olarak uygulanmakta olan nozullu pervane sevk sistemleri ile ilgili 1930'lardan beri çok sayıda deneysel ve teorik çalışmalar yapılmış ve halen de yapılmaktadır. Önceleri yapılan teorik çalışmalarda pervane ve nozul ayrı ayrı ele alındığından aralarındaki etkileşim yeterince dikkate alınamıyordu. 1960'lardan sonra bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle beraber bu konuda çok önemli ilerlemeler sağlandı. Nozullu pervane dizayn problemi için genellikle pervanenin kaldırıcı hatlarla, nozulun da yüzey girdap dağılımlarıyla modellendiği ve aralarındaki etkileşimi dikkate alan metodlar geliştirildi. Başlangıçta bu dizayn metodları sadece eksenel simetrik akım etkileşimini kabul ederken, 1990'lara doğru geliştirilen daha kompleks metodlarda nozul ve pervanenin asimetrik akım etkileşimi de hesaplara katılmıştır. Bu metodlarda pervane yine kaldırıcı hatlarla temsil edilirken, nozul ise nozul yüzeyini kaplayan panellere yayılmış kaynak/kuyu dağılımlarıyla temsil modellenmiştir.

Nozullu pervane performans analiz probleminde ise, genellikle pervane kaldırıcı hat, kaldırıcı yüzey veya yüzey panel metodlarıyla, nozul da yüzey panel veya kaldırıcı yüzey metodlarıyla modellenerek hesap prosedürleri geliştirilmiştir. Nozul ile pervanenin etkileşimi burada da iteratif bir prosedür içerisinde sağlanmıştır.

Son zamanlarda dizayn ve analiz problemlerinin birlikte düşünüldüğü sistematik dizayn prosedürleri de geliştirilmiştir. Bu prosedürlerde nozullu pervane analizi yapılırken iteratif olarak nozul ve pervane geometrileri değiştirilmek suretiyle optimum nozullu pervane dizaynı gerçekleştirilmektedir.

Nozullu pervanelerle ilgili yapılmış teorik ve deneysel çalışmalardan önemli bir kısmı aşağıda sunulacaktır:

Pervaneyi bir nozul içerisine yerleştirme fikri yani, nozullu pervane kavramı ilk olarak 1930'larda Stipa ve Kort tarafından ortaya atılmış ve deneysel olarak geliştirilmiştir. Stipa ve Kort'un çalışmaları ağır yüklü pervanelerde nozulun çok önemli verim artışları sağlayabileceğini göstermiştir.

Kuchemann ve Weber (1953), pervaneyi düzgün yük dağılımına sahip bir diskle temsil edip eksenel momentum teorisini kullanarak, nozullu pervane sistemi için ideal verim ve indüklenmiş eksenel hız ifadelerini elde ederek vermiştir. Ancak bu çalışmada gösterilmiştir ki, nozullu pervane dizaynında momentum teorisi sadece nozulun dağılayacağı itme veya direncin verime katkısı gibi geniş eğilimler verebilir.

Pervane ve nozulun etkileşimlerini dikkate alan ilk dizayn çalışmaları, MARIN'de (Hollanda Deniz Araştırmaları Enstitüsü) ve SSPA'da (İsveç Deniz Araştırmaları Merkezi) yapılan kapsamlı model deneylerine dayanmaktadır. Bu çalışmalar sırasıyla van Manen ve Oosterveld (1966) ve Dyne'da (1973) özetlenmiştir.

van Manen ve Oosterveld'de (1966), Ka pervane serileri kullanılarak, hızlandırıcı ve yavaşlatıcı her iki tip nozulu da kapsayan standart nozullarla MARIN'de yapılan kapsamlı sistematik deneysel çalışmalar sunulmuştur. Bu çalışmalardan, geniş bir aralıktaki nozullu pervane sistemleri için sistematik bir açıksu diyagram serisi hazırlanmıştır. Makalede deneysel verilerle, momentum teorisinden elde edilen veriler karşılaştırılarak aralarında iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir. Bununla beraber yazarlar, hızlandırıcı tip nozul kullanmanın sadece yüksek itme yüklemesinde çalışan pervanelerde önemli oranda verim artışı sağlayabileceği konusunda fikir birliğine varmışlardır.

Spärenberg (1969), eksenel simetrik akım alanında çalışan hafif yüklü pervaneler için pervaneyi hareketli bir diskle modelleyerek yaptığı çalışmalarda nozulun verime katkısının olmadığını gösterilmiştir. Yani hafif yüklü pervaneler için ($C_T < 1.0$) nozullu pervane ile diskle modellenen nozulsuz pervane aynı verime sahip olmaktadır. Nozulun verime katkısı yoktur ve kullanılması gereksizdir.

Kobylnsky (1961), Morgan (1962) ve Dyne'de (1967) bir nozullu pervane etrafındaki akım analizi için verilen hesap yöntemlerinde genellikle nozul, nozulun boyuna kesitlerinin sehim veya kort hatları üzerlerine yayılan halka girdaplar ve kaynakların kullanıldığı lineer teoriye dayanılarak modellenmiştir. Pervane ise, kaldırıcı hat veya hareketli diskle temsil edilmek suretiyle hesaplar yapılmıştır. Ancak bu hesap prosedürlerinde nozul ile pervane arasındaki etkileşim yeterince hesaba katılamamıştır. Ryan ve Glover (1972) bu konuda önemli bir gelişme sağladılar. Nozullu pervane etrafındaki akımın analizi için, nozul ve göbeği eksenel simetriye sahip yüzey girdapları, pervaneyi de kaldırıcı hat teorisi ile modelleyip, nozul, göbek ve pervanenin etkileşim içerisinde oldukları bir prosedürü uyguladılar. Bu metodla nozul üzerindeki basınç dağılımları ve pervane üzerindeki radyal sirkülasyon dağılımları bulunabilmektedir. Böylece geliştirilen hesap prosedürü, geometrisi verilen bir nozulun analizinin ve dizayn şartları verilen bir nozullu pervanenin optimum dizaynının yapılabilmesine olanak sağlamaktadır.

Ryan ve Glover'ın (1972) verdiği metoda benzer fakat bazı basitleştirmeler içeren diğer bir metod Gibson ve Lewis (1972) tarafından verilmiştir. Bu metodda pervane hareketli bir diskle

temsil edilmiştir ancak disk yerine optimize edilmeden dizayn edilmiş radyal yüklü pervanelere de uygulanabilmektedir. Bu yüzden metod tamamen bir analiz metodudur.

Caracostas (1978), Ryan ve Glover'ın (1972) nozullu pervaneler için bir dizayn yöntemi olarak sundukları metodu, nozulsuz pervanelerin dizayn dışı analiz problemleri ve nozullu pervanelerin performans analizleri için geliştirmiştir. Bu methoda pervane, momentum, kanat elemanı ve kaldırıcı hat teorilerinin bir kombinasyonu ile modellenmiştir. Nozul performans analiz hesabı, yüzey girdap dağılımı tekniği kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmada geliştirilen metodun kullanılmasıyla elde edilen sayısal hesap ve açıksu test sonuçları karşılaştırılarak sonuçların kabul edilebilir bir uygunluk içerisinde olduğu gösterilmiştir.

Falco De Campos'da (1983) üniform ve radyal olarak değişken akışkan hız alanları için kapsamlı nozullu pervane performans hesapları bulunmaktadır. Çalışmada önce viskoz olmayan akım durumunda, kalın ve yuvarlak çıkış uçlu nozullarda potansiyel akım analizine dayalı bir eksenel simetrik yüzey girdabı metodu kullanılarak nozullu pervane akım analizi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra akışkanın viskoz etkilerini hesaba katmak amacıyla iterasyona dayalı bir sınır tabaka hesap şeması sunulmuştur. Çalışmada aynı zamanda, tamamen ayrışan eksenel simetrik akım hız alanında bir nozullu pervane için başka bir girdap tabakası metodu kullanılarak akım analizi yapılmıştır. Metod pervane-nozul etkileşimi için, gelen akımın girdap etkilerinin analizinde ve eksenel simetriye sahip akımda çalışan bir nozullu pervane ile gemi arasındaki etkileşimin incelenmesine kullanılabilir. Çalışmada çok sayıda deneysel sonuçlara da yer verilmiştir.

Kerwin vd. (1987) nozullu pervanelerin hidrodinamik analizi için, nozulun potansiyele dayalı bir panel metod, pervanenin de girdap ağı şeklindeki bir kaldırıcı yüzey metodu kullanılarak modellendiği komplike bir analiz metodu geliştirmiştir. Bu analiz metodunda önce nozul ve göbeğin modellendiği paneller üzerindeki girdap dağılımlarının değerleri, sisteme gelen üniform akım durumu için çözülmüştür. Daha sonra pervane kanatlarının modellenmesi için kurulan girdap ağ sistemi üzerindeki kontrol noktalarında göbek ve nozulun beraber olarak indükledikleri hız alanları hesap edilmiştir. Pervane kanatları üzerinde hesaplanan bu indüklenmiş hızlar, pervaneye gelen akımla beraber kanatları temsil eden girdap ağı elemanları şiddetlerinin bulunmasında kullanılmıştır. Pervane kanatlarının indüklediği hız alanları daha sonra, göbek ve nozul üzerindeki kontrol noktalarında hesaplanmıştır. İndüklenen hız alanları, nozul ve göbek etrafındaki akımı değiştirdiği için, nozul ve göbek üzerindeki girdap dağılımlarının değerlerini bulmak için yeniden aynı hesaplar tekrarlanmıştır. Böylece hesaplar, pervane ve nozul ile göbek arasındaki değişiklikler (girdap

şiddetleri ve indüklenmiş hızlar) kabul edilebilir bir tolerans aralığı yakalanana dek tekrar edilmek suretiyle nozullu pervane üzerindeki girdap dağılımları, hız dağılımları, basınç dağılımları, kuvvetler ve performans karakteristikleri hesaplanabilmektedir. Ancak bu teknik nozullu pervane sisteminin tam temsilinin sağlanabilmesi için çok sayıda panellere ayrıştırılmasına gereksinim duymaktadır. Bu sebeple pervane ön dizayn aşamasında uygun olmayabilir.

Kerwin vd. (1987) dekine benzer, dizayn amaçlı bir model Kinnas ve Coney (1988) tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada nozul, nozul yüzeyini oluşturan panellere yayılan kaynak/kuyu dağılımlarıyla, pervane ise kaldırıcı hatlarla temsil edilmiştir. Pervane kaldırıcı hatlarının radyal olarak değişen şiddetteki girdap nallarından oluştuğu kabul edilmiştir. Kaldırıcı hat üzerindeki girdap nalları şiddetlerinin belirlenmesinde, pervane minimum torkta gerekli itmeyi sağlayacak yani maksimum sevk verimine sahip olacak şekilde, lineer olmayan sayısal bir optimizasyon tekniğinden yararlanılmıştır. Bu modelde pervane ile nozul arasındaki eksenel simetrik olmayan akım etkileşimleri de hesaplara katılmıştır. Nozullu pervanelerin optimum dizaynı için geliştirilen bu metotla, pervane kanatlarının nozul üzerinde sebep olduğu asimetrik yük ve bunun sonucu ilave nozul direncinin, pervane kanatlarının direncinin, optimum kanat yük dağılımının, nozul itmesinin kanat yükü üzerindeki etkisinin, pervane ve nozuldaki savrulmalardan kaynaklanan ilave kayıpların ve nozullu pervane geometrisinin -kaviteasyon indeksini dikkate alarak veya almadan- belirlenmesi mümkün olmaktadır. Bu çalışmada nozul içerisinde çalışan bir pervane sistemi için gösterilmiştir ki, genel sevk verimi pervane yüklemesinin bir fonksiyonudur ve pervane yükleme katsayısı ($C_T < 0.7$) iken sistemin verimi nozulsuz pervaneden daha düşüktür. Ancak ($C_T > 1.0$) de verimde hızlı bir artış meydana gelmektedir. Tüm bunların yanında dikkat edilmesi gereken husus, bu nozullu pervane optimizasyon prosedüründe kullanılmış olan birçok pervane karakteristikleri hafif yüklü pervaneler içindir. Ayrıca nozul üzerindeki optimum yükün belirlenememesi ve küçük pervane-nozul aralıklarında viskoz akım etkilerinin gerçek bir şekilde hesaba katılamaması metodun eksikliği olarak sayılabilir.

Nozullu pervaneler için benzer bir çok adımlı dizayn metodu Coney (1989) tarafından verilmiştir. Bu metotta, geniş pervane-nozul aralıklarındaki potansiyel akım etkileri de hesaplara dahil edilmiştir. Ayrıca, izleyen girdaplar için daire içerisine yerleştirilmiş iki boyutlu girdaplardan oluşan bir şekil sistemi kullanılarak bu şekilde hesapların basitleştirilebileceği gösterilmiştir.

Kinnas ve Coney (1989), yukarda geçen dizayn ve analiz metodlarından da yararlanarak nozullu pervanelerin dizaynı için sistematik bir metod sunmuştur. Sistematik dizayn metodu genel olarak iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada kabaca nozul ve pervane geometrileri bulunmuş, ikinci aşamada ise, bulunan geometriler analiz edilerek değiştirilmek suretiyle nozullu pervane sistemi için son geometriler oluşturulmuştur. Metodun birinci aşaması olan dizayn prosedüründe, pervane kaldırıcı hatlarla ve nozul ise sınırlı boydaki bir silindir boyunca dağıtılan halka girdaplarla modellenmiştir. Kaldırıcı hat üzerindeki radyal sirkülasyon dağılımı, Kinnas ve Coney' de (1988) olduğu gibi, lineer olmayan bir optimizasyon tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Hesaplamalarda nozul ve pervane arasındaki asimetrik etkileşim de dikkate alınmıştır. Bu şekilde kaldırıcı hat modeliyle yaklaşık bir pervane ve nozul geometrisi belirlenmiştir. Daha sonra ikinci aşama olan analiz prosedüründe ise, birinci aşamada elde edilen yaklaşık geometriler, pervane için kaldırıcı yüzey ve nozul için ise bir yüzey panel metodu kullanılarak analiz edilmiştir. Nozul ve pervane etrafındaki eksenel simetriye sahip olmayan akım ekileri bu modelde de hesaplara katılmıştır. Metodun bulduğu nozul ve pervane yükü ile dizayn gereksinimleri karşılaştırılarak, kabul edilebilir bir doğruluğa ulaşana dek nozul ve pervane geometrileri değiştirilmek suretiyle sonuç geometrileri elde edilmiştir. Bu çalışmada, biri sıfır ve diğeri sınırlı pervane-nozul aralığına sahip iki örnek sistem için hesaplamalar yapılarak sunulmuştur.

Glover ve Szantry (1989), üniform olmayan akımda çalışan nozullu pervanelerin performans analizi için, süreksiz ve deforme olabilen kaldırıcı yüzey teorisine dayalı bir analiz metodu geliştirmişlerdir. Bu metotta pervane ve nozul kalınlıkları uygun kaynak ve kuyularla modellenirken, nozul ve pervane kanatları üzerindeki hidrodinamik yükler girdap dağılımlarıyla modellenmiştir. Kaynak/kuyu ve girdaplar, pervane için, kanat kesit sehim hatlarının ve nozul için, kesit sehim hatlarının oluşturduğu yüzeylere yayılmıştır. Nozullu pervane üzerindeki girdap ve kaynak dağılımlarının şiddetleri, yüzeylerde kinematik sınır şartını ifade eden denklem sistemlerinin iteratif bir prosedür içerisinde çözülmesiyle bulunmuştur. Nozul ve pervane kanat yüzeylerinde kinematik sınır şartı oluşturulurken, nozulun pervaneye ve pervanenin de nozula etkisi indükledikleri hızlarla hesaba katılmıştır. Ayrıca pervane kanatları veya nozul yüzeyinde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu da modelde, kaldırıcı yüzey geometrisindeki değişme şeklinde düşünülerek dikkate alınmıştır. Bu metod pervane ve nozul üzerindeki süreksiz basınç dağılımlarını ve hidrodinamik kuvvetleri öngörmekte ve bu şekilde, pervane kanatlarındaki, tabaka, kabarcık ve kanat uç kavitasyonlarının tayininde kullanılabilir. Geliştirilen metod, süreksiz pervane kavitasyonu tayininden başka, nozullu pervaneden kaynaklanan gemi yüzey basınçlarının

analizinde de uygulanabilmektedir. Çalışmada ayrıca kavitasyon tüneline elde edilen deney sonuçları ile teorik hesap sonuçları karşılaştırılarak iyi bir uyum sağladıkları gösterilmiştir.

Kinnas vd.'de (1991) de nozullu pervanelerin etrafındaki süreksiz akım analizi için potansiyele dayalı bir panel metod geliştirilmiştir. Bu çalışmada geliştirilen analiz prosedüründe, pervane için süreksiz bir kaldırıcı yüzey teorisi ve nozul için de potansiyele dayalı bir panel metod birlikte kullanılarak hesaplar yapılmıştır.

Hughes vd. (1991) MIT Su Tüneli'nde test edilen bir nozullu pervane modeline ait sonuçlar ile bu sonuçlarının analizini ve teorik metodlarla karşılaştırmasını vermiştir. Bu deneyde hazırlanan düzenekle nozul ve pervaneye etki eden kuvvetler ayrı ayrı ve geniş bir ilerleme sayısı aralığında ölçülmüştür. Aynı zamanda bir Lazer Doppler Hızölçer sistemi kullanılarak nozullu pervane çevresindeki akım hızları ölçülmüştür. Daha sonra bu hızlar kullanılarak pervane kanatları üzerindeki radyal sirkülasyon dağılımları hesaplanmıştır. Çalışmada, model deneyinden elde edilen sonuçlar, pervane kanatlarının kaldırıcı yüzey ve nozul ile göbeğin de yüzey panel metodu ile temsil edildiği teorik modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak aralarında iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir.

Falcao de Campos'da (1991) çevresel ve radyal olarak ayrılmış bir akımda çalışan bir nozullu pervane ile akım arasındaki üç boyutlu ve süreksiz etkileşimin analizi için bir metod sunulmuştur. Bu analiz metodunda, pervane hareketli bir diskle, nozul ise bir silindir üzerine yayılan dipol ve kaynak elemanlarıyla temsil edilmiştir. Çalışmada daha sonra, örneklerle simetrik ve asimetrik gelen akım durumunda nozul yükünün akım üzerine etkileri incelenmiştir.

Genelleştirilmiş şekil metodunun nozullu pervane dizaynına uygulanması Kinnas ve Coney (1992) tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada pervane kaldırıcı hatlarla modellenmiş ve pervane etrafındaki akım, pervane açık suda çalışıyormuş gibi incelenmiştir. Nozulun pervaneye etkisi ise, pervane olmadığı durumda nozulun değiştirdiği akım, kaldırıcı hatta gelen akım olarak alınmak suretiyle hesaba katılmıştır. Genelleştirilmiş şekiller, kaldırıcı hattan kaynaklanan girdap nallarının sebep olduğu nozul etrafındaki indüklenmiş hızlar kullanılmak suretiyle potansiyele dayalı bir sınır elemanları metoduyla belirlenmiştir. Pervane nozul içinde iken, pervane kanatları üzerindeki optimum radyal sirkülasyon dağılımları da sevk verimini maksimum yapacak şekilde farklı bir lineer olmayan optimizasyon tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Çalışmada sonuç olarak ana parametrelerden bazılarının, pervane sirkülasyon dağılımı ve sevk verimi üzerine etkileri birkaç örnekle gösterilmiştir.

Szantry (1997), Glover ve Szantry'da (1989) sunulan nozullu pervaneler için analiz metoduna yüzey panel metodunu da ekleyerek, kaldırıcı yüzey metodunu geliştirmiştir. Bu geliştirilen metotta pervane kanatları, göbek ve nozul, yüzeylerini kaplayan panellere yerleştirilen dipol elemanları (kaynak/kuyu) dağılımlarıyla modellenmiştir. Dipol dağılımlarının şiddetleri, yüzeylerde alınan kontrol noktalarında kinematik sınır şartı sağlanacak şekilde oluşturulan denklem sisteminin iteratif bir prosedür içerisinde çözülmesiyle bulunur. Nozul, pervane ve göbeğin etkileşimleri; birinin yüzeyindeki girdap panellerinin, diğerinin yüzeyindeki kontrol noktalarında indükledikleri hızlar vasıtasıyla hesaplara dahil edilmiştir. Bu etkileşim içersindeki iteratif prosedür, iterasyonlar arasındaki dipol şiddetleri kabul edilebilir bir tolerans aralığında yakınsayana kadar devam ettirilmiştir.. Paneller üzerindeki dipol elemanlarının değerleri belirlendikten sonra, nozul, pervane ve göbek yüzeylerindeki akım alanları, basınç dağılımları, kuvvet bileşenleri ve kavitasyon olayı belirlenebilmiştir. İtme ve tork gibi hidrodinamik kuvvetlerin önceden tahmininde kaldırıcı yüzey metodu, panel metoduna göre belki üstünlük sağlayabilir. Ancak, yüzey panel metodu, kavitasyon miktarının ve süresiz basınç kuvvetlerinin tahmininde çok önemli üstünlüklere sahiptir.

Yiu ve Zangeneh'de (1998) nozullu pervane dizaynında çok önemli olan, nozul ile pervane kanatları arasındaki kuvvetli etkileşimi dikkate alarak, nozul ve pervane kanatlarının eş-zamanlı olarak dizaynını sağlayan bir ters dizayn metodu geliştirmiştir. Metod üç boyutlu potansiyel akıma dayandırılmıştır. Ancak nozul girişindeki akım ayrışması ve pervane gerisindeki dönel akım etkileri Clebsch formülasyonu kullanılarak modellenmiştir. Geliştirilen metod nozul ile pervane kanatlarının etkileşimini dikkate alarak, dizayn şartlarında maksimum sevk verimi elde edilecek şekilde nozullu pervane geometrisini vermektedir. Çalışmada metodun üç ayrı nozullu pervane sevk sistemi için uygulanması sunulmuştur.

Nozullu pervane sevk sistemlerinin performans analiziyle ilgili son yıllarda yapılan çalışmaların çoğunu sayısal ve CFD metodları oluşturmaktadır. Bunlardan biri Kim vd.'de (2003) sunulmuştur. Bu çalışmada nozullu pervanelerin akustik incelemesi ve kavitasyon analizi için bir CFD metodu verilmiştir.

Diğer bir çalışmada Hsiao ve Chahine (2004), nozullu pervanelerde kavitasyon analizi için Navier-Stokes hesaplamalarını ve kabarcık dinamiğini kullanan sayısal bir metod sunmuşlardır. Çalışmada geliştirilen metottan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu gösterilmiştir.

Gu ve Kinnas (2003) nozullu pervanelerin performans analizi için nümerik bir metod sunmuştur. Burada nozullu pervane ile zıt dönüşlü pervanenin beraber bulunduğu sistemin analizi için girdap ağı ve sonlu hacimler metodlarının beraber kullanıldığı sayısal bir hesap metodu kullanılmıştır.

Benzer bir çalışma Kinnas vd.'de (2004) verilmiştir. Bu metotta nozullu pervane etrafındaki akımın modellenmesinde girdap ağı ve sonlu hacimler metodları beraber kullanılmıştır. Bu çalışmada pervane ve nozul arasındaki etkileşim incelenmiştir. Metodla nozullu pervane üzerindeki basınç dağılımları ve şafta gelen kuvvetler bulunabilmektedir. Çalışmada ayrıca metottan elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlarla desteklenmiştir.



3. PERVANE TEORİLERİ VE TEMEL AKIM MODELLERİ

Gemi sevkinde en yaygın olarak kullanılan sistem pervanedir. Pervane diğer sevk sistemlerine göre daha yüksek verimle çalışır ve karmaşık teknolojiler gerektirmez. Tipik bir pervane sisteminde sevk verimi %70'e kadar çıkabilir. Pervane, makinadan şaft ile gelen momenti itme kuvvetine dönüştürür.

Genel sevk veriminin maksimum yapılabilmesi için tek pervane en uygundur. Çift pervane sınırlı su çekimi, yüksek manevra kabiliyeti veya aşırı güç gerektiren hallerde tercih edilir. Çift pervane sistemi tek pervaneye göre daha ağır ve pahalıdır.

Verilen bir güç değeri için optimum pervane çapı, şaft devri ve gemi hızı esas alınarak hesaplanır. Güçteki artış ile pervane çapı artar; şaft devrinin artması ile de azalır. Kanat sayısının ve kanat alan oranının artması, pervane çapının küçülmesine yol açar. Kanat alanının büyüklüğü, pervane yükü ve gemi hızına bağlıdır. Çok küçük kanat alanına sahip pervanelerde kavitasyon sorunu çıkabilir. Öte yandan çok geniş kanat alanları ise aşırı sürtünme kayıplarına yol açar. Kullanılacak pervane tipi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Gemi tipi
- Gemi hızı
- Geminin tekne formu
- Geminin çalışma bölgesi

Tek pervaneli gemilerde gemi kıç formunun sevk bakımından dizayn edilmesi zorunludur. Çift pervaneli gemilerde ise kıç formu genellikle minimum direnç esas alınarak dizayn edilir.

Pervane karakteristiklerinin belirlenmesinde verimin maksimum yapılması esastır, ancak bu arada kavitasyon ve titreşim problemlerine de dikkat edilmelidir. Örneğin düşük kanat sayısı verimi artırır; buna karşılık titreşim olasılığı artar. Pervane çapı arttıkça yine verim iyileşir; fakat tekne ile pervane arasındaki açıklıklar azalacağı için titreşim olasılığı artar. Kanat sayısı genelde 3, 4 veya 5'tir.

Pervaneler olabildiğince tekneye yakın yerleştirilmeli ve izin en yoğun olduğu bölgede çalıştırılmalıdırlar. Bununla beraber pervanedeki negatif basınçtan kaynaklanan itme azalması, tekne ile pervane arasındaki uzaklık ile düşer. Bu uzaklık pervane çapına ulaşınca ihmal edilebilecek bir düzeye iner ancak diğer problemler nedeniyle bu durum genellikle tercih edilmez.

Pervanelerin büyük çoğunluğu sabit bir hatve değerine sahip olup belirli bir işletim durumunda en yüksek verime sahip olacak şekilde dizayn edilirler. Ancak bazı gemi tiplerinde işletim koşulları farklılıklar gösterir ve optimum pervane dizaynı güçleşir. Örneğin balıkçı gemilerinde ve römorkörlerde normal seyir (free-running) ve çekme (ağ, gemi, vs.) durumlarında pervanenin işletim koşulları çok farklıdır. Bu tür gemilerde her iki durum gözönüne alınarak dizayn yapılmalıdır (Arslan, 2002).

3.1 Pervane Teorileri

Pervane dizaynı için geliştirilen temel teoriler aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

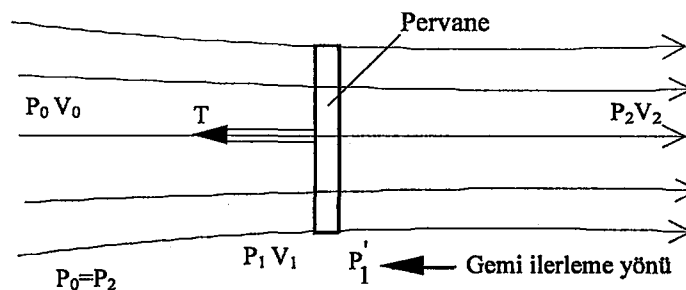
- Momentum Teorisi
- Kanat Elemanı Teorisi
- Sirkülasyon (Vorteks) Teorisi

3.1.1. Momentum Teorisi

Momentum teorisinde aşağıdaki kabuller yapılır:

- Akışkan viskoz değildir.
- Pervane sonsuz kanada sahiptir ve hareketli bir disk olarak düşünülür.
- Pervane teğetsel bir akım meydana getirmez.
- İtme pervane diski üzerinde üniform olarak yayılır.

Bu teoremin ortaya koyduğu en önemli sonuç, pervane üzerindeki indüklenmiş hızın, pervanenin yeterince gerisindeki indüklenmiş hızın yarısına eşit olmasıdır. Pervanenin ilerisinde ve gerisindeki akışkanın hızları ve basınçları Şekil 3.1'deki gibi olsun.



Şekil 3.1 Pervane etrafındaki hız ve basınçlar

Bernoulli denklemini pervane arkası ve önü için yazarsak:

$$\frac{1}{2}\rho(V_2)^2 + P_2 = \frac{1}{2}\rho(V_1)^2 + P_1' \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{2} \rho (V_0)^2 + P_0 = \frac{1}{2} \rho (V_1)^2 + P_1 \quad (3.2)$$

Pervane gerisindeki hız (V_2), pervaneye gelen akım hızına ($V_0=V_A$) pervanenin indüklemiş olduğu hız (u_a) eklenerek elde edilir:

$$V_2 = V_0 + u_a \quad (3.3)$$

(3.1), (3.2) ve (3.3) denklemlerini kullanarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\frac{1}{2} \rho \cdot u_a \cdot (2 V_0 + u_a) = P_1' - P_1 \quad (3.4)$$

Kesitin ön ve arkasındaki basınç farkları ise aşağıdaki gibi olur,

$$P_1' - P_1 = \rho \cdot V_1 \cdot u_a \quad (3.5)$$

Son iki denklemin birleştirilmesi ile, pervane diski üzerindeki indüklenmiş hızların, sonsuzdakinin yarısı kadar olacağı bulunur (Baykal ve Güner, 1996).

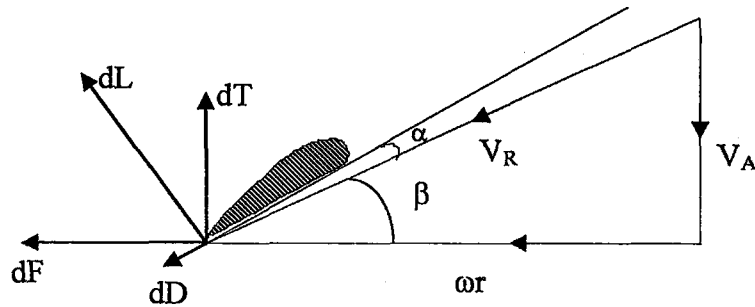
$$V_1 = V_0 + \frac{u_a}{2} \quad (3.6)$$

Pervanenin ideal verimi de aşağıdaki gibi bulunur,

$$\eta_{pi} = \frac{V_0}{V_0 + u_a / 2} \quad (3.7)$$

3.1.2. Kanat Elemanı Teorisi

Bu teoriye göre pervane kanadı belirli sayıda elemanlara ayrılır ve her bir elemanın hidrofoil gibi çalıştığı düşünülür. Her eleman için kuvvetler hesaplanır. Bir pervane kanat elemanı üzerindeki hızlar ve kuvvetler Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 Bir pervane kanat elemanı üzerindeki hız ve kuvvetler

Pervane eksenini etrafındaki açısal hız ω ile ve eksen doğrultusundaki öteleme hızı (V_A) ile verilsin. Yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi kesite gelen akım hızı,

$$\vec{V}_R = \vec{V}_A + \omega \vec{r} \quad (3.8)$$

dır. Şekilde $d\vec{D}$, direnç kuvveti ve $d\vec{L}$, kaldırma kuvvetidir. Bu kuvvetlerin pervane eksenini doğrultusunda ve buna dik doğrultudaki bileşenleri,

$$\begin{aligned} dT &= dL \cos \beta - dD \sin \beta \\ dF &= dL \sin \beta + dD \cos \beta \end{aligned} \quad (3.9)$$

olur.

$$C_L = \frac{dL}{\frac{\rho}{2}(cdr)V_R^2} \quad (3.10)$$

$$C_D = \frac{dD}{\frac{\rho}{2}(cdr)V_R^2} \quad (3.11)$$

olsun. Burada c , kort uzunluğudur. Pervane kanat sayısı Z ise,

$$dT = \frac{1}{2} \rho (cdr) V_R^2 Z [C_L \cos \beta - C_D \sin \beta] \quad (3.12)$$

$$dF = \frac{1}{2} \rho (cdr) V_R^2 Z [C_L \sin \beta + C_D \cos \beta]$$

bulunur. $A = Z \cdot c / 2\pi r$ dersek,

$$\frac{dT}{dr} = \pi r \rho \cdot A \frac{V_A^2}{\sin^2 \beta} [C_L \cos \beta - C_D \sin \beta] \quad (3.13)$$

$$\frac{dF}{dr} = \pi r \rho \cdot A \frac{V_A^2}{\sin^2 \beta} [C_L \sin \beta + C_D \cos \beta]$$

olur. Şekilden $V_R = V_A / \sin \beta$ dir. $\tan \gamma = C_D / C_L$ diyelim.

Kanat verimi,

$$\eta_r = \frac{dT V_A}{2\pi n dF} \quad (3.14)$$

$$\frac{dT}{dr} = \rho \pi r . A V_A^2 C_L \left[\frac{\cos(\beta + \gamma)}{\sin^2 \beta . \cos \gamma} \right] \quad (3.15)$$

$$\frac{dQ}{dr} = \rho \pi r^2 . A V_A^2 C_L \left[\frac{\sin(\beta + \gamma)}{\sin^2 \beta . \cos \gamma} \right]$$

dır. O halde kanat verimi,

$$\eta_r = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta + \gamma)} \quad (3.16)$$

olur.

Bu teoride giriş açılarının doğru olarak beirlenmesi önemlidir. Kanatların birbirine etkisi, kanatlar etrafında oluşan girdapların hızlar ve giriş açısına etkileri bu teoride ihmal edilmiştir. Pervane boyunca hızların değişiminin hesaba katılmaması bu teorinin en büyük eksikliğidir. Bu nedenle kanat elemanı teorisi ile yapılan hesaplar deneysel sonuçlardan farklı olmaktadır. Bu teorinin özelliği kanatların kaldırma ve direnç değerlerinin hesaba katılmasıdır. (Kafalı, 1982)

3.1.3. Sirkülasyon Teorisi

Kapalı bir eğri boyunca (belli bir t anında) akışkan hızlarının integrasyonuna sirkülasyon denir ve Γ ile gösterilir.

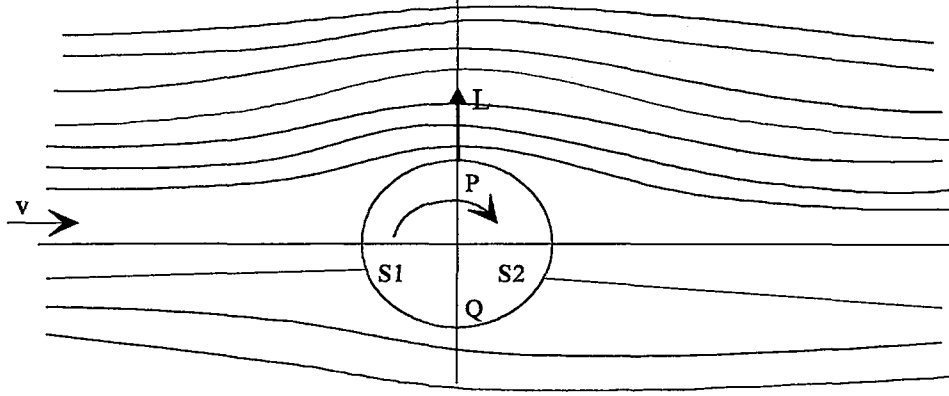
$$\Gamma = \oint \vec{V} . d\vec{s} \quad (3.17)$$

Hidrodinamikte iki türlü akış alanı mevcuttur:

- i. Girdapsız sıvı alanı, bu durumda kapalı eğri boyunca sirkülasyon değeri sıfırdır.
- ii. Girdaplı sıvı alanı, bu durumda kapalı eğri boyunca sirkülasyon sıfırdan farklı bir Γ değerine sahiptir.

Sonsuz uzunlukta bir silindir paralel bir akıma maruz bırakılırsa viskoz olmayan sıvıda hiçbir kuvvet oluşmaz. Buna karşılık sıvı eğer viskoz ise sadece akım yönünde D direnci oluşur. Eğer silindire bir dönme hareketi verilirse, sürtünmeden dolayı silindir etrafındaki sıvıya da dönme hareketi intikal etmiş olacağından, paralel akıma ait cereyan çizgilerinde, meydana gelen sirkülasyonun süperpozisyonu neticesi bir simetriksizlik meydana gelir. Şekil 3.3'deki sirkülasyonlu harekette, sıvı hızının P noktasında artması ve buna karşılık Q noktasında azalması dolayısıyla Bernoulli denklemi gereğince P noktasındaki basınç Q noktasındaki

basınçtan daha küçük olur. Bu sebeple paralel akıma dik bir L kaldırma kuvveti doğar. Bu kuvvetten dolayı silindir etkilenir. Bu olaya *Magnus etkisi* denir.



Şekil 3.3 Magnus etkisi

Şekil 3.3'de verilen sıvı elemanına (P-Q) arasında Bernoulli denklemini uygularsak,

$$p + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = (p + dp) + \frac{1}{2} \rho \cdot (v + dv)^2 \quad (3.18)$$

yazabiliriz. $(dv)^2$ nin ihmaliyle

$$dp = -\rho \cdot v \cdot dv \quad (3.19)$$

elde edilir. Şekildeki sıvı elemanına etki eden merkezkaç kuvvet,

$$K = (\rho \cdot dx \cdot dy \cdot dr) \cdot \frac{v^2}{r} \quad (3.20)$$

dir. Herhangi bir anda sıvı elemanının dengesi için (3.19) ve (3.20) denklemlerinin birbirine eşit yazılmaları gerekir. Bu eşitlikten ($v \cdot r = \text{sabit}$) bulunur. Bu sabit $\Gamma/2\pi$ olarak kabul edilirse,

$$v \cdot r = \frac{\Gamma}{2\pi} \quad (3.21)$$

denklemini elde ederiz.

Paralel akıma maruz asimetric kesitte kaldırma kuvveti şu şekilde oluşur: Kesitin sırt ve yüzündeki akışkan hızları farklı olduğu için Benoulli dekllemi gereğince iki yüz arasında basınç farkı oluşur (ön yüzde yüksek, sırtta ise düşük basınç). Profil boyunca bu basınç farkları entegre edilmek suretiyle toplam L kaldırma kuvveti bulunur. Şekil 3.4'de V , paralel

akım hızı; v' , girdap hızı; p_f , pervane yüzüne ve p_b , sırtına ait basınç değerleri olmak üzere Bernoulli denklemini uygularsak:

$$p_f + \frac{1}{2} \rho (V - v')^2 = p_b + \frac{1}{2} \rho (V + v')^2 \quad (3.22)$$

yazılabilir. Buradan,

$$\Delta p = p_f - p_b = 2 \rho V v' \quad (3.23)$$

elde edilir. $\Delta v = 2v'$ kesit yüz ve sırtına ait hız farkları olduğuna göre dx genişliğinde ve l uzunluğunda bir profil için birim kaldırma kuvveti,

$$dL = dx \cdot \int_0^l \Delta p \cdot dy = \rho V \cdot dx \int_0^l \Delta v \cdot dy \quad (3.24)$$

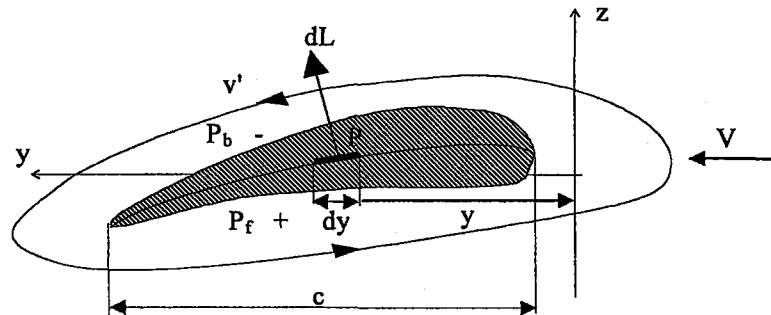
yazılabilir.

$$\Gamma = \oint v' \cdot ds = \int_0^l \Delta v \cdot dy \quad (3.25)$$

sirkülasyon değeri olduğundan, bir profilin dx genişliğinde ve l uzunluğundaki elemanına etki eden kaldırma kuvveti

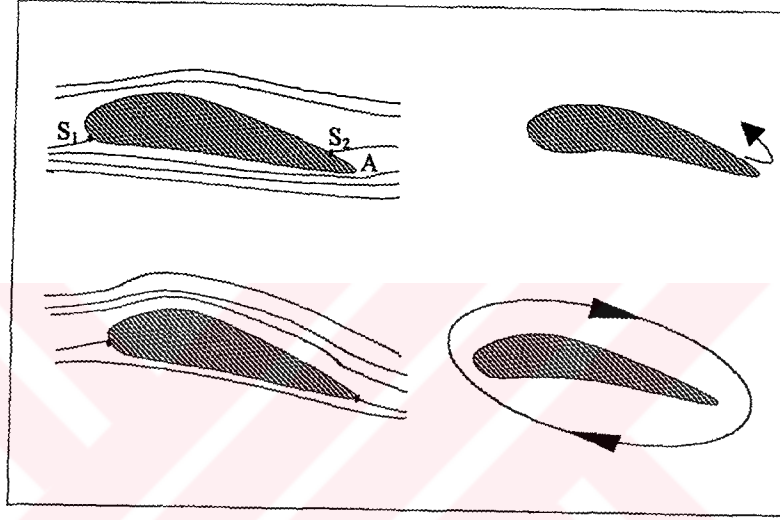
$$dL = \rho V \Gamma \cdot dx \quad (3.26)$$

olarak bulunur. Bu ifade hidrodinamikte Kutta-Joukowski teoremi olarak bilinir. Düzgün düzlemsel bir sıvı akımına maruz bir profilde kaldırma kuvvetinin hesap edilebilmesi için Γ sirkülasyon şiddetinin bilinmesi gerekir.



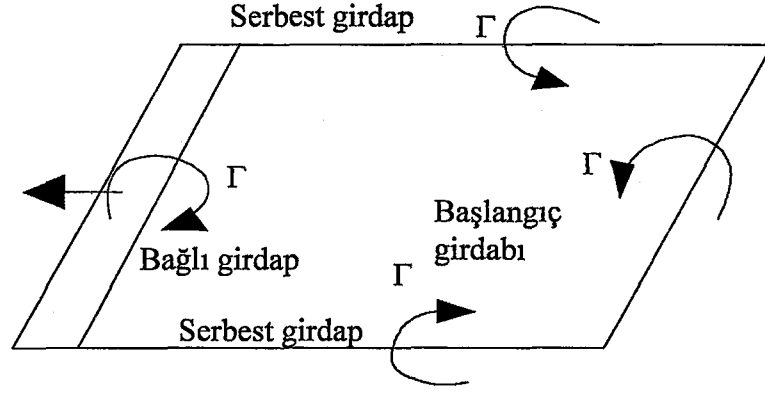
Şekil 3.4 Profil etrafındaki sirkülasyon

Şekil 3.5'de görüldüğü gibi S_2 ile gösterilen yığılma basıncı noktasındaki yüksek basınç dolayısıyla, takip kenarını dönen sıvı akımı geriye dönmeye zorlanmak suretiyle profilden bir serbest girdap ayrılır. Bu ayrılan girdaba başlangıç girdabı denilir. Başlangıç girdabının profilden ayrılması ile eşit şiddette ve ters yönde profil etrafında bir sirkülasyon akımı meydana gelir. S_2 yığılma basıncı noktası kayarak profilin takip kenarında oluşur. Başlangıç girdabı ise ana cereyanla beraber sonsuza kadar taşınır.



Şekil 3.5 Başlangıç girdabı ve sirkülasyon

Eğer profil uzunluğu sıfıra yaklaşacak şekilde küçültülürse limit durumunda profil yüzeyi aynı sirkülasyon şiddetine sahip bir girdap ipine dönüşür. Buna kaldırıcı doğru (lifting line) veya bağlı girdap denir. Bu şekilde sonsuz açıklığa sahip bir kanat profili yerine aynı sirkülasyon şiddetine sahip sonsuz uzunlukta bir girdap ipi kullanılabilir. Eğer kanat sonlu açıklığa sahipse, kanat uçlarında, profilin alt yüzüne ait yüksek basınç bölgesinden sırtına ait alçak basınç bölgesine doğru yan akımlar doğar. Bunun sonucu olarak kanat uçlarında uç-girdapları oluşur. Bu tür girdaplar serbest girdaplar olup profil geçtikten sonra profilin izi içerisinde kalırlar. Sonlu kanadı temsil eden bağlı girdapların zıttına olarak bu girdaplar gelen akıma paralel oldukları için herhangi bir kuvvet meydana getiremezler. Şekil 3.6'da sonlu açıklığa sahip bir kanat profilinde kapalı girdap sistemi gösterilmiştir (Sabuncu, 1983).



Şekil 3.6 Sonlu açıklığa sahip bir kanat profilinde kapalı girdap sistemi

Sirkülasyon Teorisinin Uskur Pervanelerine Uygulanması

Pervane kanadını yaklaşık olarak $\Gamma(r)$ değişken sirkülasyona sahip bir bağlı girdapla gösterebiliriz. Ayrıca bu bağlı girdaba, pervane kanadının sonlu açıklığa sahip olmasından dolayı, kanat açıklığına devam eden ve pervaneye gelen $V_R = \sqrt{V_A^2 + (\omega r)^2}$ bileşke hızına paralel olarak akım yönünde sonsuza kadar giden dr genişliğinde helisel girdaplardan oluşan yüzeyleri de ilave etmek gerekir.

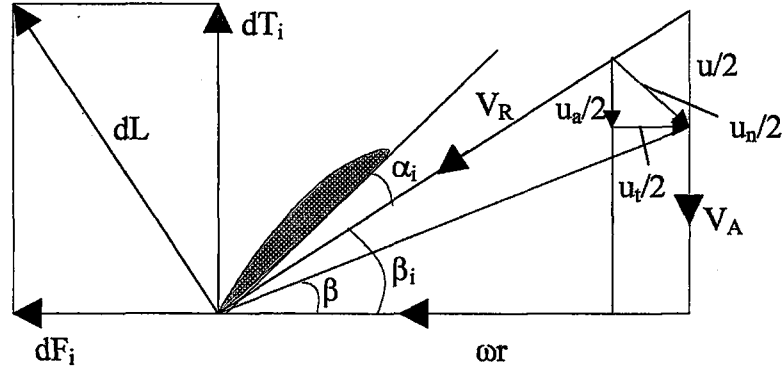
Helisel girdap yüzeyine ait birim helislerin, bu yüzey tarafından indüklenmiş hızları nazara almaksızın V_R hızına paralel olduklarını kabul etmek ancak hafif yüklü pervanelerde mümkündür.

Helisel yörüngeli serbest girdapların indüklemiş olduğu ilave hızlar hesaba katılmak suretiyle bulunan $V_R = \sqrt{(V_A + u_a)^2 + (\omega r - u_t)^2}$ bileşke hızına paralel olacak şekilde helisel yörüngeler düzeltilirse elde edilen teori orta yüklü pervanelere de uygulanabilir (Şekil 3.7).

Şekil 3.8'de V_R hızına dik doğrultuda oluşan dL kaldırma kuvvetinin pervanenin eksenel hareket yönü doğrultusundaki dT_i ve çevresel hareket yönü doğrultusundaki dF_i bileşenleri görülmektedir. Viskoz olmayan akışkanda dT_i itme kuvveti elemanı ve dF_i ise teğetsel kuvvet elemanı olarak adlandırılır. Bu kuvvetler arasında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir:

$$dT_i = \rho \cdot 2\pi \cdot r \cdot u_t (\omega r - u_t / 2) \cdot dr \quad (3.27)$$

$$dF_i = \rho \cdot 2\pi \cdot r \cdot u_t (V_a + u_a / 2) \cdot dr$$



Şekil 3.7 Orta yüklü bir pervanede kanat elemanına gelen hız ve kuvvetler

Üniform Akıma Maruz Pervanelerde Minimum Enerji Kaybı

Pervane disk alanı üzerindeki u_i ve u_a hızlarının değişimi pervane kanadına ait yükleme ile ilgilidir. Kanat üzerinde itme kuvveti değişimine uygun olarak fazla itme kuvveti temin eden kanat parçası suya daha fazla hız artımları verecektir. u_i ve u_a indüklenmiş hızlarına karşılık pervanenin suya bıraktığı eksenel ve teğetsel enerjiler birer kayıptır ve pervane verimi bu kayıplarla doğrudan ilgilidir. Maksimum pervane verimi ancak minimum enerji kaybını sağlayacak indüklenmiş hızların pervane kanadı üzerine dağıtılması ile mümkündür. Minimum enerji kaybı, üniform ve paralel akımda Betz hipotezinin uygulanması ile sağlanabilir.

Üniform akıma maruz pervane elemanına ait verim,

$$\eta'_p = \frac{dT \cdot V_A}{dF \cdot \omega r} \quad (3.28)$$

şeklindedir. Viskoz olmayan (ideal) bir sıvı için aynı elemana ait verim ifadesi,

$$\eta'_{pi} = \frac{dT_i \cdot V_A}{dF_i \cdot \omega r} \quad (3.29)$$

dir. Betz maksimum kanat verimine ulaşabilmek için kanat boyunca $\Gamma(r)$ sirkülasyon dağılımının ve itme kuvvetinin ne şekilde dağıtılması gerektiğini araştırmıştır. Bunun için r yarıçapına karşılık gelen $\Gamma(r)$ sirkülasyonuna $\Delta\Gamma$ kadar bir artma verilmiştir. Bu artış sonucunda itme kuvveti $\Delta(dT_i)$, teğetsel kuvvet $\Delta(dF_i)$, pervanenin vermiş olduğu güç $\Delta(dT_i) \cdot V_A$, pervanenin almış olduğu güç $\Delta(dF_i) \cdot \omega r$ kadar artmış olur. Bu şekilde $\Delta\Gamma$ nin pervane verimine etkisi,

$$\Delta\eta'_{pi} = \frac{\Delta(dT_i).V_A}{\Delta(dF_i).\omega.r} = K \quad (3.30)$$

bağıntısı ile elde edilir. Minimum enerji kaybını temin edebilmek için K oranının r yarıçapına bağlı olmayıp sabit bir değere eşit olması gerekir. Eğer K oranı r 'ye bağlı ise, öyle r yarıçapları bulmak mümkündür ki oralara ilave edilen $\Delta\Gamma$ sirkülasyon artışı K 'ya daha büyük değerler kazandırabilir. Dolayısıyla $\Gamma(r)$ sirkülasyon eğrisinde K 'yı büyük veren kısımlara küçük veren kısımlardan sirkülasyon ilave etmek suretiyle $\Gamma(r)$ eğrisinin şeklini değiştirmek ve verimi artırmak mümkün olur. Maksimum verimi elde etmek için her yarıçaptaki sirkülasyonun maksimum ve minimumunun kendisine eşit olacak şekilde bir dağılımın sağlanması gerekir. Bu ise ilave edilen $\Delta\Gamma$ sirkülasyon artışının her yarıçapta aynı tesiri göstermesini yani K değerinin sabit olmasını gerektirir.

Pervaneye $\Delta\Gamma$ kadar sirkülasyon artışı ilave edilir ve pervane ile $\Delta\Gamma$ sirkülasyon artışı arasındaki karşılıklı etkilerin ihmal edilmesi ile K değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\Delta\eta'_{pi} = \frac{\Delta(dT_i).V_A}{\Delta(dF_i).\omega.r} = K \quad (3.31)$$

bağıntısından hareketle,

$$\begin{aligned} \Delta dT_i &= \rho.\Delta\Gamma.(\omega.r - u_t / 2).dr \\ \Delta dF_i &= \rho.\Delta\Gamma.(V_A + u_a / 2).dr \end{aligned} \quad (3.32)$$

denklemlerini K oranında yerine koyarsak,

$$K = \frac{(\omega.r - \frac{1}{2}u_t).V_A}{(V_A + \frac{1}{2}u_a).\omega.r} \quad (3.33)$$

şeklinde bulunur. Kanat elemanına ait lokal verim ifadesinden hareketle,

$$\eta_{pi} = \frac{(\omega.r - \frac{1}{2}u_t).V_A}{(V_A + \frac{1}{2}u_a).\omega.r} = K \quad (3.34)$$

veya

$$\frac{\tan \beta}{\tan \beta_i} = \eta_{pi} = \text{sabit} \quad (3.35)$$

sonucu elde edilir. Sonuç olarak bir pervanede maksimum verimin elde edilebilmesi için (enerji kayıplarının minimum olabilmesi için) kanat yarıçapı boyunca verimin sabit bir değerde yani pervane verimine eşit olması gerekir.

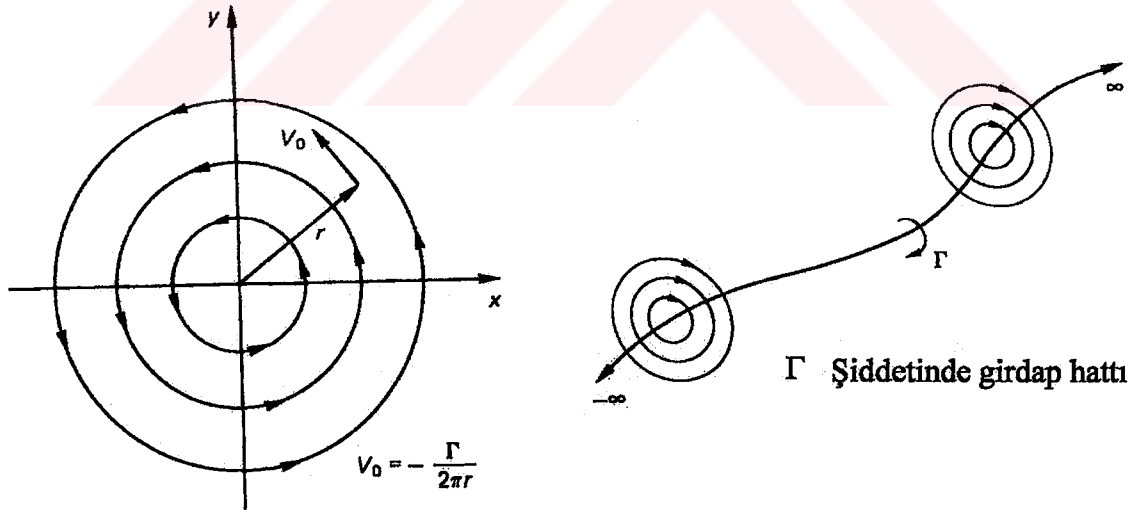
Betz'in hipotezinde teğetsel hızların sebep olduğu basınç azalması ve hüzme daralması yönünden gelebilecek etkiler ihmal edilmiştir, (Sabuncu, 1983).

3.2. Temel Akım Modelleri

3.2.1. Girdap Hattı ve Tabakası

Girdap hattı ve girdap tabakası kavramları birçok pervane matematiksel modelinin temelini oluşturur.

Sirkülasyon teorisine dayalı pervane modellerinin gelişiminde, gerçekte iki boyutlu olan girdap hareketi Şekil 3.8'de görüldüğü gibi bir girdap hattı olarak gösterilebilir. Girdap hattı, üç boyutlu uzayda tanımlı eğri boyunca hareketli ve sabit (Γ) şiddetindedir. Modellemelerde sirkülasyonun yönü saat yönünde ise pozitif kabul edilir.



Şekil 3.8 İki boyutlu girdabın girdap hattı ile temsili

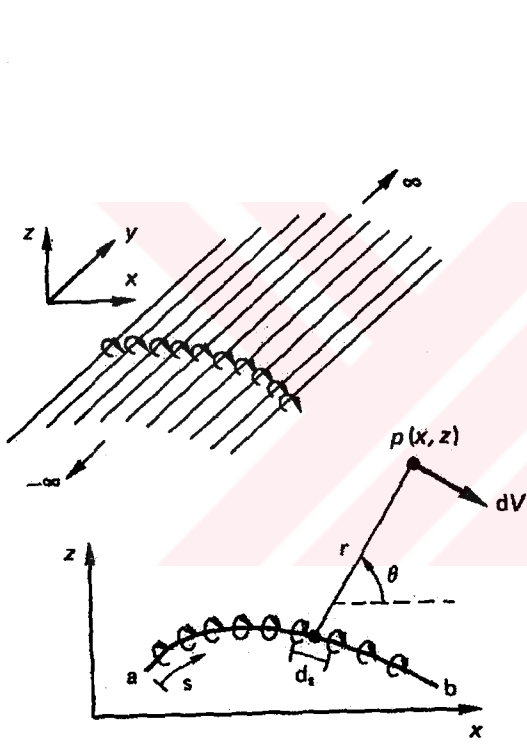
Bir girdap hattının temel karakteristikleri Alman matematik ve fizikçisi Helmholtz tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir:

- i. Girdap hattının hareketli olduğu eğri boyunca şiddeti sabittir.

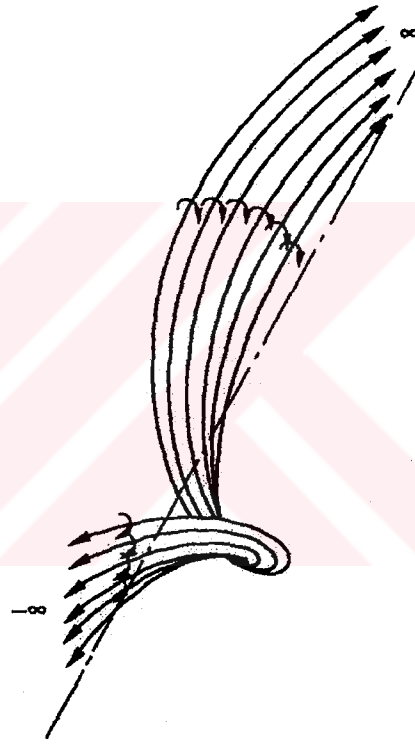
ii. Viskoz olmayan bir akışkan içinde girdap hattı oluşturulamaz ve mevcut bir girdap hattı sona erdirilemez. Girdap hattı akışkanın sonsuz sınırlarına kadar uzanır. Bu sebeple sonlu genişlikte bir akışkan içerisindeki girdap hattı kapalı bir eğri boyunca tertip edilmelidir.

Helmholtz teorileri olarak da adlandırılan bu teoriler özellikle pervane girdap modellemelerinde son derece önemlidir.

Girdap hattı kavramı bir girdap tabakası kavramına genişletilebilir. En genel şekilde girdap tabakasının, yanyana sonsuz sayıda düz girdap hatlarından oluştuğu düşünülür (Şekil 3.9). Ancak bir girdap tabakası düz girdap hatlarından oluşabileceği gibi, Şekil 3.10'de görüldüğü üzere, helisel bir yüzeyde helisel girdap hatlarından da oluşabilir.



Şekil 3.9 Düz girdap tabakası



Şekil 3.10 Helisel girdap tabakası

Şekil 3.9'da görülen girdap tabakasının birim uzunluktaki şiddetine $\gamma(s)$ dersek, tabakanın ds uzunluğundaki girdap şiddeti $\gamma(s).ds$ olur. Burada s , tabakanın ucundan başlayan eğrisel koordinat; ds de birim uzunluktur. Girdap tabakasının birim uzunluktaki şiddetinin r uzaklıkta bir $P(x, y, z)$ noktasında oluşturacağı dV hızı aşağıdaki gibi olur:

$$d\vec{V} = -\frac{\vec{\gamma}.d\vec{s}}{2\pi.r} \quad (3.36)$$

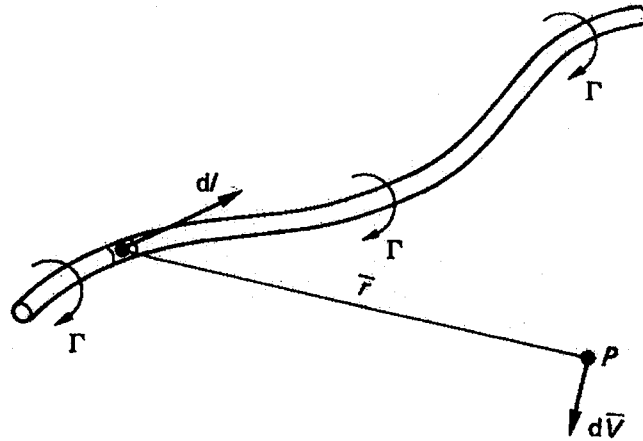
Girdap tabakasının $P(x, y, z)$ noktasında indükleyeceği toplam hız ise a'dan b'ye kadar tüm birim girdap şiddetlerinin oluşturduğu hızlar toplanarak bulunur.

Girdap tabakasının toplam sirkülasyon değeri (Γ), a ile b arasında yerleştirilen tüm birim girdapların integrasyonu ile aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\Gamma = \int_a^b \gamma \cdot ds \quad (3.37)$$

Girdap hatları veya tabakalarının neden olduğu indüklenmiş hızlar pervaneyi hem önden ve hem de arkadan çevreler. Pervane hareketinin matematiksel modelleri ekseriyetle, istenilen yeterli temsili sağlayacak şekilde bileşik girdap sistemlerine dayanır. Bu girdap sistemlerinin pervane çevresinde herhangi bir noktada meydana getireceği hız değişimlerinin (indüklenmiş hız) hesabında genellikle Biot-Savart kanunundan yararlanılır. Bu kanun potansiyel teorisinin bir sonucudur ve elektromagnetik alanlar ile viskoz olmayan ve sıkıştırılmayan akımların her ikisini de tarif eder. Biot-Savart kanunu genel halde Şekil 3.11'de görüldüğü gibi, verilen bir (Γ) şiddetindeki girdap hattının $d\vec{s}$ parçasından r uzaklıkta bir P noktasındaki indüklenmiş hız $d\vec{V}$ ise, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir (Carlton, 1994):

$$d\vec{V} = \frac{\Gamma}{4\pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{|\vec{r}|^3} \quad (3.38)$$

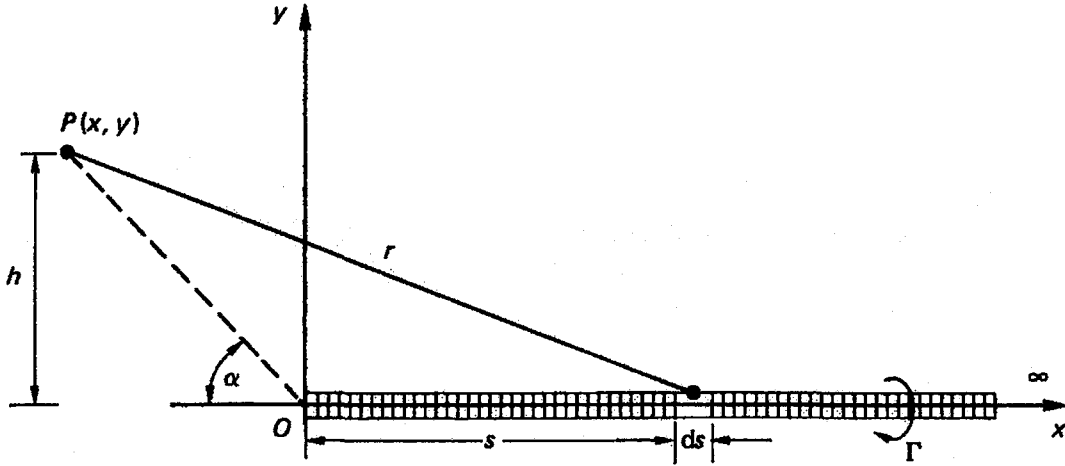


Şekil 3.11 Biot-savart kanununun genel bir girdap hattına uygulanması

Biot-Savart kanununun doğrudan pervaneye uygulanmasında ve pervaneden oluşan serbest girdap sisteminin temsiliinde yaygın olarak yarı-sonsuz doğrusal ve helisel girdap hatları kullanılır.

Yarı-sonsuz Doğrusal Girdap Hattı

Sistem Şekil 3.12'deki gibi düşünülür. Girdap hattı (O)'dan başlar ve O - x eksenini doğrultusunda sonsuza gider. Şekildeki ds , yarı-sonsuz doğrusal girdap hattının sonsuz küçük bir parçasıdır.



Şekil 3.12 Biot-savart kanununun doğrusal bir girdap hattına uygulanması

Gerçekte Helmholtz teoremine göre (O) noktasında girdap hattını sona erdirmek mümkün değildir. Fakat burada bizim amaçlarımız için sistemin (O)'dan başlayıp sonsuza kadar giden kısmını düşünmek yeterlidir.

ds 'den r uzaklıkta bir P noktasındaki birim indüklenmiş hız aşağıdaki gibidir:

$$d\vec{V} = \frac{\Gamma}{4\pi} \cdot \frac{\sin\theta \cdot ds}{r^2} \quad (3.39)$$

ve P deki toplam indüklenmiş hız,

$$V_P = \frac{\Gamma}{4\pi} \int_{\theta=\alpha}^{\theta=0} \frac{\sin\theta \cdot ds}{r^2} \quad (3.40)$$

dir. Burada $s = h \cdot (\cot\theta - \cot\alpha)$ dır.

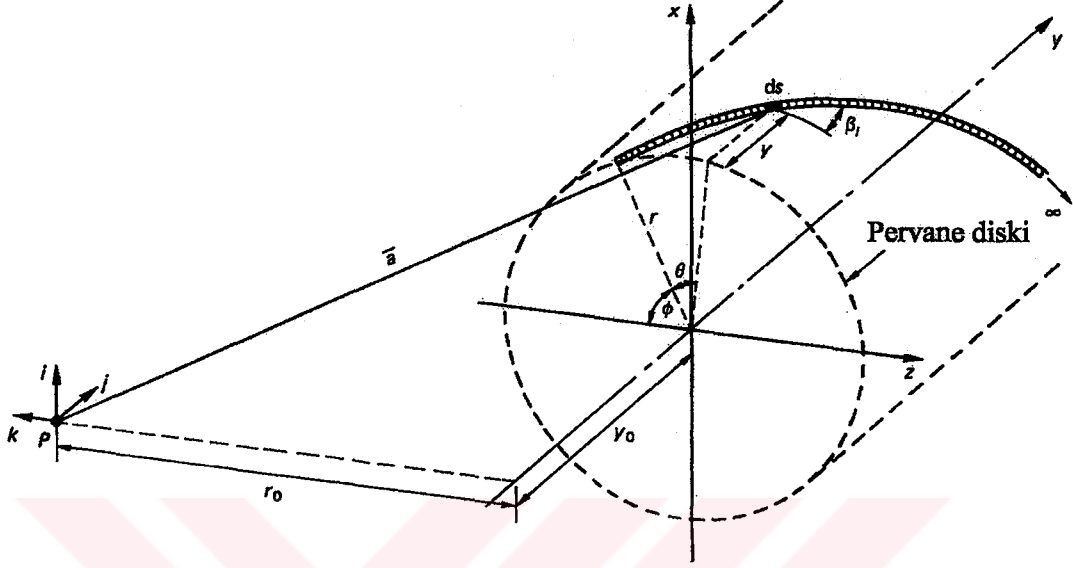
$$V_P = -\frac{\Gamma}{4\pi} \int_{\theta=\alpha}^{\theta=0} \sin\theta \cdot d\theta \quad (3.41)$$

$$V_P = \frac{\Gamma}{4\pi \cdot h} \cdot (1 - \cos\alpha)$$

bulunur. V_P nin yönü sayfa düzlemine dik ve dışarı doğrudur (Carlton, 1994).

Yarı-sonsuz Düzgün Helisel Girdap Hattı

Bu durumda da kavram birinci ile aynı olmasına rağmen, işlemler biraz daha kompleks olur. Burada pervane diskinden başlayan ve sonsuza kadar giden sabit pitch açılı ve çaplı yarı-sonsuz düzenli helisel bir girdap hattı düşünelim (Şekil 3.13).



Şekil 3.13 Biot-savart kanununun yarı-sonsuz düzgün bir girdap hattına uygulanması

Denklem 3.38'den P noktasında yarı-sonsuz düzenli girdap hattı tarafından indüklenmiş hız,

$$d\vec{u} = \frac{\Gamma}{4\pi|\vec{a}|^3} \cdot (d\vec{s} \times \vec{a}) \quad (3.42)$$

$$\vec{a} = a_x \cdot \vec{i} + a_y \cdot \vec{j} + a_z \cdot \vec{k} \quad (3.43)$$

ve problemin geometrisinden,

$$\vec{a} = -r \cdot \sin(\theta + \phi) \cdot \vec{i} - (y + y_0) \cdot \vec{j} + (r_0 - r \cdot \cos(\theta + \phi)) \cdot \vec{k} \quad (3.44)$$

$$\vec{s}(\theta) = r \cdot \sin(\theta + \phi) \cdot \vec{i} + r \theta \tan \beta_l \cdot \vec{j} + r \cdot \cos(\theta + \phi) \cdot \vec{k} \quad (3.45)$$

buradan,

$$d\vec{u} = \frac{\Gamma}{4\pi|\vec{a}|^3} \cdot \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ r \cdot \cos(\theta + \phi) & r \cdot \tan \beta_l & -r \cdot \sin(\theta + \phi) \\ -r \cdot \sin(\theta + \phi) & -(y + y_0) & r_0 - r \cos(\theta + \phi) \end{vmatrix} \quad (3.46)$$

dır. Burada skaler α ,

$$a = \left[(y + y_0)^2 + r^2 + r_0^2 - 2r_0.r.\cos(\theta + \phi) \right]^{3/2} \quad (3.47)$$

dır. u_x , u_y , u_z hız bileşenleri ise aşağıdaki gibi olur (Carlton, 1994):

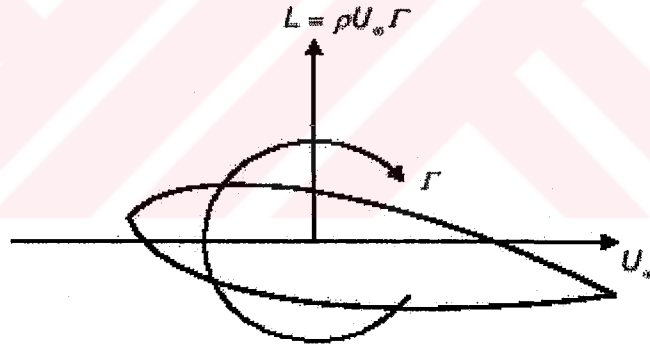
$$u_x = \frac{r\Gamma}{4\pi} \int_0^\infty \frac{\tan \beta_i.(r.\cos(\theta + \phi)) - (y + y_0).\sin(\theta + \phi)}{\left[(y + y_0)^2 + r^2 + r_0^2 - 2r_0.r.\cos(\theta + \phi) \right]^{3/2}} d\theta$$

$$u_y = \frac{r\Gamma}{4\pi} \int_0^\infty \frac{r - r_0.\cos(\theta + \phi)}{\left[(y + y_0)^2 + r^2 + r_0^2 - 2r_0.r.\cos(\theta + \phi) \right]^{3/2}} d\theta \quad (3.48)$$

$$u_z = \frac{r\Gamma}{4\pi} \int_0^\infty \frac{r.\tan \beta_i.\sin(\theta + \phi) - (y + y_0).\cos(\theta + \phi)}{\left[(y + y_0)^2 + r^2 + r_0^2 - 2r_0.r.\cos(\theta + \phi) \right]^{3/2}} d\theta$$

3.2.2. Bağlı Girdap Modeli

Bağlı girdap, bir hidrofoil etrafındaki sirkülasyonu temsil edecek tek bir girdap olarak düşünülebilir (Şekil 3.14). Ancak gerçek akımda imkansız olsa da, böyle bir model, kaldırma kuvvetinin modellenmesinde oldukça basit ve faydalıdır.



Şekil 3.14 Bağlı girdap ve kaldırma kuvveti

Hidrofoil etrafında birim şiddetteki girdap dağılımı $\gamma(s)$ ise, toplam sirkülasyon girdap dağılımının integrasyonu aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\Gamma = \int \gamma(s) ds \quad (3.49)$$

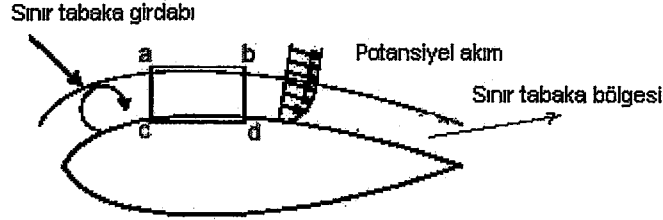
Hidrofoile etkiyen kaldırma kuvveti (L) Kutta-Joukowski teoremi kullanılmak suretiyle,

$$L = \rho U_\infty \Gamma \quad (3.50)$$

şeklinde yazılabilir. Burada; ρ , akışkan yoğunluğu; U_∞ , hidrofoile gelen akım hızı ve Γ , sirkülasyondur. Kaldırma kuvvetinin yönü gelen akıma diktir (Lewis, 1991).

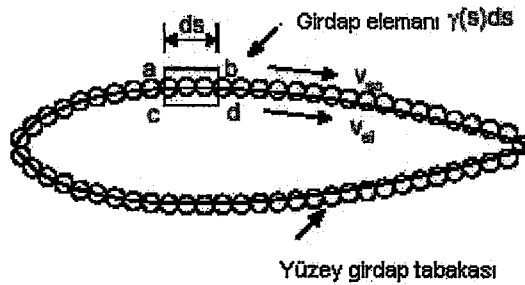
3.2.3. Yüzey Girdap Modeli

Hava ve su gibi düşük viskoziteye sahip akışkanlar içerisinde akıma maruz bir cismin yüzeyinde akım durağandır. Cismin yüzeyi yakınında viskoz etkiler dolayısıyla akım yavaşça hızlanır. Ancak, pratikte cismin yüzeyinden çok küçük bir mesafedeki akışkan hızı cisme gelen akım hızına eşittir. Cisim yüzeyinde akımın eşitlendiği bu mesafelerin oluşturduğu yüzeye “sınır tabaka” denir (Şekil 3.15). Sınır tabaka kalınlığı genellikle akım viskozitesine ve cismin relatif hızına bağlıdır.



Şekil 3.15 Sınır tabaka

Akışkan viskozitesini sıfır kabul edersek, sınır tabaka sonsuz ince bir kalınlığa sahip olur. Bu durumda sınır tabaka sonsuz ince bir girdap tabakasına dönüşür. Bu kavram potansiyel akım analizinde yüzey girdabı metodunun temelini oluşturur. Bu metod, viskoz olmayan potansiyel akımdaki bir cismin, cisim yüzeyine yayılan ve birim uzunluktaki şiddeti $\gamma(s)$ olan sonsuz ince bir girdap tabakası ile modellenmesine imkan sağlar (Şekil 3.16). Girdap tabakası içerisinde akışkan hızı süreksiz olarak değişir. Akışkan hızı cismin yüzeyinde sıfır ($v_{si}=0$), yüzey girdabı tabakasının tam dışarısında ise akım hızına ($v_{os}=v_s$) eşit ve cisim yüzeyine paraleldir. Burada (v_s), cisme gelen akım hızının yüzeye paralel bileşeni; (v_{os}), tabakanın dış yüzeyindeki hız ve (v_{si}), tabakanın iç yüzeyindeki hızdır.



Şekil 3.16 Bir hidrofoil için yüzey girdabı modeli

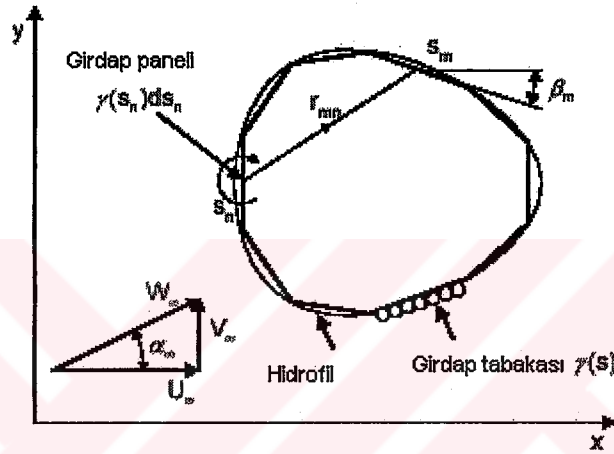
Şekil 3.16’da yüzey girdap tabakasının ds uzunluğundaki kısmını çevreleyen abcd içindeki sirkülasyon, abcd’nin çevresindeki teğetsel hızların toplamına eşittir:

$$\delta\Gamma = (v_{so} - v_{si})ds = \gamma(s).ds \quad (3.51)$$

Denklem (3.51) daki hızların yerine yukardaki eşitlikler konulursa,

$$\gamma(s) = v_{so} = v_s \quad (3.52)$$

bulunur. Denklem (3.52) gösteriyor ki, potansiyel akıma maruz bir cismi modelleyen yüzey girdap tabakasının şiddeti yüzeydeki akım hızına eşittir. Martensen (1959) tarafından potansiyel akım içindeki iki boyutlu aerofillerin modellenmesi maksadıyla geliştirilen bu metod “Martensen metodu” olarak adlandırılır.



Şekil 3.17 Bir hidrofoilin girdap panelleriyle modellenmesi

Şekil 3.17’de düzgün (W_∞) akımına karşı dış yüzeyi panellere ayrılmış bir hidrofoil görülmektedir. Hidrofoil, panellere şiddetleri sabit girdap tabakaları $\gamma(s).ds$ yerleştirilerek modellenir. Hidrofoile bu durumda girdap tabakalarının indüklediği ve üniform serbest akımdan oluşan bileşke akım alanı etkir. Hidrofoil yüzeyini temsil eden girdap tabaka şiddetlerinin belirlenmesi için Dirichlet sınır şartından yararlanılarak aşağıdaki integral denklem yazılır. Dirichlet sınır şartı, akımın cismin yüzey sınırında sıfır, geri kalan kısımlarda ise yüzeye paralel olması gerektiğini ifade eder.

$$-\frac{1}{2}\gamma(s_m) + \int \gamma(s_n)K(s_m, s_n)ds_n + W_\infty(\cos \alpha_\infty \cdot \cos \beta_m - \sin \alpha_\infty \cdot \sin \beta_m) = 0 \quad (3.53)$$

Denklem (3.53)’deki terimlerin fiziksel anlamları şu şekilde açıklanabilir: Birinci terim, girdap tabakasının ($\gamma(s_m)$) merkezi ile iç yüzeyi arasındaki hız farkını ifade eder. İkinci terim, m paneli haricinde kalan tüm girdap elemanlarının ($\gamma(s_n).ds_n$) indükledikleri hızlar toplamını ifade eder. Son terim ise, üniform akımın (W_∞) hidrofoil yüzeyine paralel olacak şekilde tekrar

hesaplanmasıyla m paneline etkisini ifade eder. Bu üç hızın toplamı sıfıra eşitlenerek s_m noktasında Dirichlet sınır şartı sağlanmış olur. $K(s_m, s_n)$, s_n noktasına yerleştirilmiş bir girdap panelin s_m de indükleyeceği hızın hesabında kullanılan ve sadece geometriye bağlı bir fonksiyondur:

$$K(s_m, s_n) = \frac{1}{2\pi} \frac{(y_m - y_n) \cdot \cos \beta_m - (x_m - x_n) \cdot \sin \beta_m}{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2} \quad (3.54)$$

Bu şekilde denklem (3.53) tüm panellerin orta noktalarında yazılmak suretiyle elde edilecek lineer denklem sistemi çözülerek bilinmeyen girdap tabaka şiddetleri bulunabilir. Girdap şiddetlerinin belirlenmesinden sonra hidrofoil üzerindeki tüm noktalarda hız alanları ve buna bağlı basınç dağılımları elde edilebilir. Basınç dağılımlarının veya tüm yüzeydeki girdap dağılımlarının integrasyonu ile da hidrofoile etkiyen kuvvet bileşenleri bulunabilir (Lewis, 1991).

3.2.4. Kaldırıcı Hat (Lifting Line) Modeli

Viskoz olmayan bir akışkanda, orta ve ağır yükte çalışan pervanelerin dizaynı için kaldırıcı hat teorisine dayalı bir yöntem sunulacaktır. 3.1.3'de Sirkülasyon teorisinde de anlatıldığı gibi pervane etrafındaki indüklenmiş hızları hesaba katmadan yapılacak bir analiz ancak hafif yüklü pervanelerde yeterli sonuç verebilir. Orta ve ağır yüklü pervanelerde ise, pervane gerisi serbest girdap tabakalarının yeterli temsili için indüklenmiş hızların hesaba katılmaları gerekir.

Kaldırıcı hat dizaynı metodunda amaç, bilinen bir gemi ilerleme hızında ve şaft devrinde pervane kanatlarını modelleyen kaldırıcı hat üzerindeki optimum yük dağılımının belirlenmesidir. Pervane kaldırıcı hat teorisinde kanatların sıfır kalınlıkta ve genişlikte olduğu kabul edilerek kanatlar radyal olarak değişken şiddette bağlı girdap dağılımlarıyla modellenir. Kaldırıcı hatlardan kaynaklanan serbest girdap tabakaları helisel yüzeylere yayılırlar. Helisel yüzey geometrileri pervanenin indüklediği hızların ve gemi arkası iz dağılımının fonksiyonudur. Pervane matematiksel modelinin geliştirilmesinde indüklenmiş hızların yeterli doğrulukta hesaplanması esastır. Bir girdap elemanının herhangi bir noktada indüklediği hız bileşenlerinin hesaplanmasında Biot-Savart kanunundan yararlanılır. Tüm girdap sisteminin bir noktada indüklediği toplam hızlar da girdap elemanlarının indüklediği hızların sayısal integrasyonu ile bulunur.

Kaldırıcı hat girdap modelinde göbek ve kanat ucunda sirkülasyonun sıfır olduğu ve bunların arasında ise sürekli olarak dağıldığı kabul edilir. Kaldırıcı hat üzerindeki radyal sirkülasyon dağılımı bir Fourier sinüs serisi ile boyutsuz olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$G_i = \frac{\Gamma_i}{\pi DV_s} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\phi_i) \quad (3.55)$$

Burada i , kanat kesit indisi; Γ_i , x_i 'deki bağlı sirkülasyon ve A_n , bağlı sirkülasyonun bilinmeyen Fourier katsayılarıdır. $x_i = r_i/R$, i 'nci kesit yarıçapının boyutsuz radyal koordinatı; R ise, pervane yarıçapıdır. Bu katsayıların belirlenmesiyle kaldırıcı hattın herhangi bir noktasında eksenel, teğetsel ve radyal indüklenmiş hız bileşenleri hesaplanabilir. Ayrıca hidrodinamik piç açısı, kaldırma katsayısı ile tork ve itme katsayıları gibi pervane karakteristikleri de bulunabilir.

Kaldırıcı hat üzerindeki açısal koordinat (ϕ_i) ile radyal koordinat (x_i) arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$x_i = x_h + \left(\frac{1-x_h}{2} \right) (1 - \cos \phi_i) \quad (3.56)$$

Burada x_h , boyutsuz göbek yarıçapıdır ve açısal koordinat (ϕ_i), 0'dan (göbekte) π 'ye (kanat ucunda) kadar değişir.

Kaldırıcı hattın x_i radyal koordinatından başlayan bir serbest girdap tabakasının şiddeti bağlı girdabın fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$\left(\frac{dG}{dx} \right)_i \quad (3.57)$$

x_i+dx radyal koordinatındaki boyutsuz sirkülasyon da aşağıdaki gibi olur:

$$G_{x_i+dx} = G_{x_i} + G \left(\frac{dG}{dx} dx \right)_i \quad (3.58)$$

Kaldırıcı hat dizayn probleminin çözümü verilen dizayn şartları altında minimum enerji kaybı sağlanacak şekilde A_n katsayılarının belirlenmesine indirgenmiş olur. Denklem (3.55)'deki seri normalde sonsuz elemanlı iken ilk dört beş terimden sonrasının değeri çok düşük olması sebebiyle ihmal edilebilir. Ancak radyal koordinat sayısı olan ilk 9 terim alınır. Pervane arkasındaki serbest girdap tabakalarının indüklediği hızlar bilinmeyen bağlı sirkülasyonun fonksiyonu olarak 9 yarıçapta Biot-Savart kanunu uygulanarak yazılır. Aynı zamanda bu

indüklenmiş hızların hesabında kullanılan indüksiyon faktörleri de her bir yarı çapta ifade edilir.

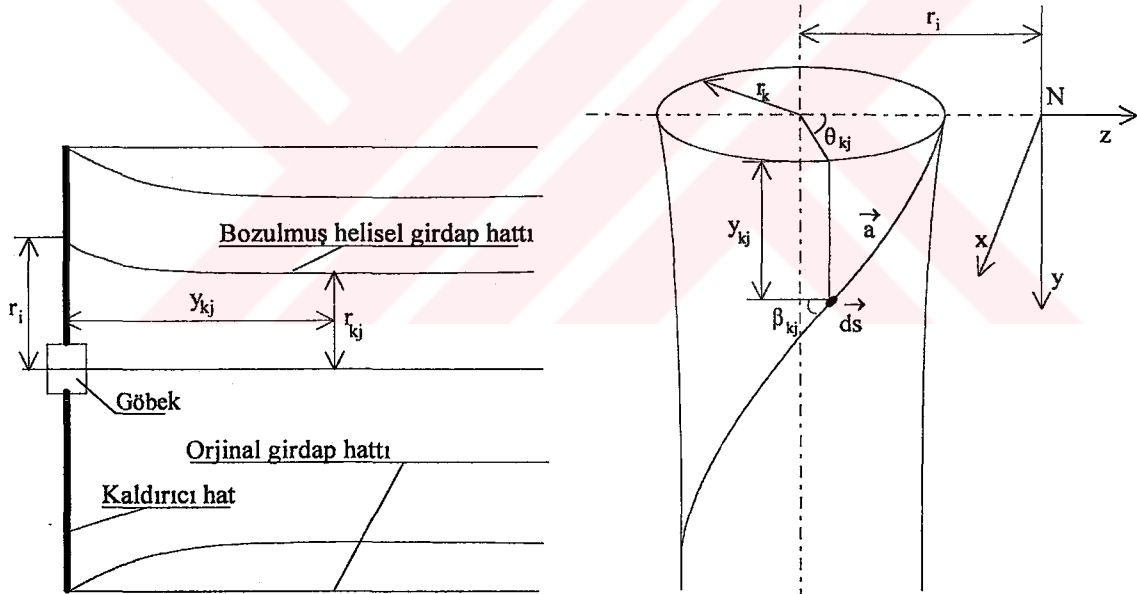
ds uzunluğundaki bir helisel girdap elemanının N noktasında indüklediği hız Biot-Savart Kanunundan aşağıdaki şekilde yazılabilir (Şekil 3.18). Biot-Savart kanunu:

$$d\vec{u} = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{a}}{a^3} \quad (3.59)$$

$$d\vec{u} = \frac{\Gamma}{4\pi a^3} \begin{bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \cot \beta_{kj} \cos(\theta_{kj} + \phi_z) & 1 & -\cot \beta_{kj} \sin(\theta_{kj} + \phi_z) \\ -r_{kj} \sin(\theta_{kj} + \phi_z) & -y_{kj} & -r_i - r_{kj} \cos(\theta_{kj} + \phi_z) \end{bmatrix} dy \quad (3.60)$$

Burada a :

$$a = \sqrt{[y_{kj}^2 + r_i^2 + r_{kj}^2 - 2r_i r_{kj} \cos(\theta_{kj} + \phi_z)]} \quad (3.61)$$



Şekil 3.18 Girdap hattındaki bozulma ve helisel girdap hattı

Kaldırıcı hattın aksenal uzaklık (y_{kj}), β_{kj} , x_{kj} ve θ_{kj} terimleri kullanılarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$y_{kj} = \int_0^{\theta_j} \frac{x_{kj}}{x_k} x_k \tan \beta_{kj} d\theta \quad (3.62)$$

Kaldırıcı hat üzerindeki x_k yarıçapından başlayan bir helisel girdap hattının x_i yarıçapında indüklediği toplam aksenal, teğetsel ve radyal hız bileşenleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$u_{a,t,r} = \int_{x_h}^{x_i} I_{a,t,r} \left(\frac{dG}{dx} \right)_k \frac{dx_k}{2(x_i - x_k)} \quad (3.63)$$

Burada $I_{a,t,r}$, eksenel, teğetsel ve radyal indüksiyon faktörleridir ve sadece geometrinin fonksiyonudur. Eksenel yöndeki indüksiyon faktörü,

$$I_a = \sum_1^Z (x_i - x_k) \int_0^\infty \tan \beta_{kj} \frac{x_{kj}}{a^3} (x_{kj} - x_i \cos(\theta_{kj} + \phi_z)) d\theta \quad (3.64)$$

teğetsel yöndeki indüksiyon faktörü,

$$I_t = \sum_1^Z (x_i - x_k) \int_0^\infty \tan \beta_{kj} \frac{x_{kj}}{a^3} (x_i - x_{kj} \cos(\theta_{kj} + \phi_z) - y_{kj} \cot \beta_{kj} \sin(\theta_{kj} + \phi_z)) d\theta \quad (3.65)$$

ve radyal yöndeki indüksiyon faktörü aşağıdaki şekilde yazılır:

$$I_r = \sum_1^Z (x_i - x_k) \int_0^\infty \tan \beta_{kj} \frac{x_{kj}}{a^3} (y_{kj} \cot \beta_{kj} \cos(\theta_{kj} + \phi_z) - x_{kj} \sin(\theta_{kj} + \phi_z)) d\theta \quad (3.66)$$

Yukardaki denklemler bir serbest girdap tabakasının kaldırıcı hat üzerindeki x_i radyal koordinatında indüklediği hız bileşenlerinin belirlenmesinde ana kısmı oluştururlar.

Denklem (3.63)'da x_i, x_k 'ya yaklaştıkça integraller sonsuza meyleder. Bu problem Guner'de (1994) anlatıldığı gibi iki referans noktası arasındaki mesafe belirli bir aralığın altına indiğinde integraller sabit bir değere eşitlenerek çözülür.

Serbest girdap tabakasının kaldırıcı hattın gerisinde bir (x_{ij}, y_{ij}) noktasındaki eğimi aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\tan \alpha_{ij} = \frac{U_{r_{ij}} + u_{r_{ij}}}{U_{a_{ij}} + u_{a_{ij}}} \quad (3.67)$$

Burada $U_{a_{ij}}, U_{r_{ij}}, (x_{ij}, y_{ij})$ 'deki eksenel ve radyal akım hızı; $u_{a_{ij}}, u_{r_{ij}}$ ise, pervane tarafından indüklenen eksenel ve radyal hız bileşenleridir.

Geometrisi bozulmuş girdap hattının yarıçapı da aşağıdaki formülden hesaplanabilir:

$$x_{ij} = x_i + \int_0^{\theta_{ij}} \tan(\alpha_{ij}) d\alpha_i \quad (3.68)$$

İzleyen girdapların hidrodinamik piç açıları aşağıdaki şekilde bulunabilir:

$$\beta_{ij} = \tan^{-1} \left[\frac{U_{a_{ij}} + u_{a_{ij}}}{\pi x_{ij} N D - u_{t_{ij}}} \right] \quad (3.69)$$

Burada N , pervane şaft devridir (1/s).

Denklem (3.68) ve (3.69)'den görülebileceği gibi, bozulmuş akımın şekli girdap hatları üzerindeki toplam hıza bağlıdır. Toplam hız; izleyen girdapların ve kaldırıcı hat üzerindeki bağlı girdapların indükledikleri hızlar ile pervaneye gelen akım hızından oluşur. Toplam hız ne derece doğru hesaplanabilirse pervane gerisindeki akım geometrisi de o derece doğru olarak hesaplanabilir. Kaldırıcı hat üzerindeki bağlı girdapların indükledikleri hızların hesabında kullanılacak denklemler de Biot-Savart kanunundan elde edilebilir. Kaldırıcı hattın $(0, x, \phi)$ noktasında yerleştirilmiş bir bağlı girdap elemanının (y, x_0, θ) noktasında indükleyeceği toplam hız bileşenleri boyutsuz olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$du_a = \sum_1^Z \int_{x_h}^{x_t} \frac{G}{2} \frac{x_0 \sin(\theta - \phi)}{a^3} dx \quad (3.70)$$

$$du_t = \sum_1^Z \int_{x_h}^{x_t} -\frac{G}{2} \frac{y \cos(\theta - \phi)}{a^3} dx \quad (3.71)$$

$$du_r = \sum_1^Z \int_{x_h}^{x_t} -\frac{G}{2} \frac{y \sin(\theta - \phi)}{a^3} dx \quad (3.72)$$

Kaldırıcı hat üzerindeki bağlı sirkülasyon dağılımını elde etmek için denklem (3.63) 9 (x_i) yarıçapında yazılır. A_n bilinmeyen sirkülasyon katsayılarının fonksiyonu olan bu denklemler Burril'in minimum enerji kaybı şartında yerine konularak aşağıdaki şekilde 9 bilinmeyenli 9 denklemden oluşan bir lineer denklem sistemi oluşturulur. Minimum enerji kaybı şartı aşağıdaki şekilde ifade edilir:

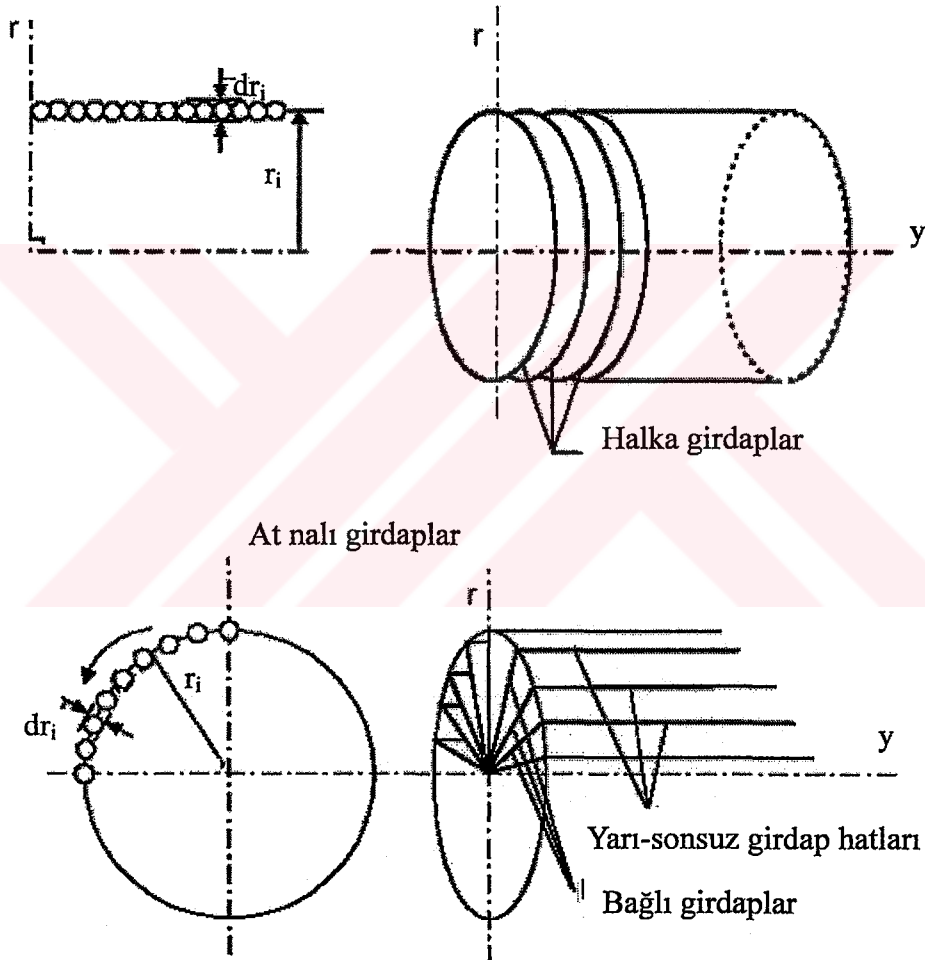
$$x_i \cdot \pi \cdot \tan \varepsilon_i = \text{sabit} \quad (3.73)$$

$$u_{a_i} - u_{t_i} \tan \varepsilon_i = \frac{1}{2} \left[\frac{x_i \pi \tan \varepsilon_i}{\frac{V_s}{nD}} - (1 - w_i) \right] \quad i = 1, 2, 3, \dots, 9 \quad (3.74)$$

Burada ε_i , pervane gerisinde sonsuzdaki piç açısı ve w_i , Taylor iz katsayısıdır. Denklem (3.74)'ün sayısal olarak çözülmesiyle sirkülasyon katsayıları ve dolayısıyla kaldırıcı hat üzerindeki bağlı sirkülasyon dağılımı bulunabilir (Guner, 1994).

Yarı-sonsuz Girdap Silindir Modeli

Yukardaki denklemlerle (3.70-72) yalnızca bir noktadaki indüklenmiş hız bileşenleri hesaplanabilir. Pervanenin aynı yarıçapı etrafındaki indüklenmiş hızların hesaplanması sonucunda, eğer bunların ortalaması alınırsa o yarıçaptaki ortalama hızlar bulunur. Fakat bu işlemlerin yukardaki denklemlerle yapılması bilgisayarda çok zaman alacağı için yeni bir metoda ihtiyaç vardır. Eğer pervane gerisindeki helisel girdap sistemi bir girdap silindiri ile temsil edilirse, pervane diski üzerinde bir r yarıçapında indüklenmiş ortalama hız bileşenleri eliptik integrallerle elde edilebilir. Bu girdap silindir, halka ve at nalı girdaplardan, at nalı girdaplar da bağlı girdaplardan ve yarı-sonsuz girdap hatlarından oluşur (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 Pervane silindir girdap modeli

Z kanatlı bir pervanede helisel girdapların piçi P_i , yarıçapı r_i ve şiddetleri de $(\frac{d\Gamma}{dr})_i$ olsun.

Bu durumda sirkülasyon $-Z(\frac{d\Gamma}{dr})_i$ olur. Halka girdaplardan oluşan sirkülasyon ise

$\gamma_{ri} \cdot P_i \cdot dr_i$ dir. Burada γ_{ri} , halka girdapların yoğunluğudur. Her iki sirkülasyon birbirine eşit olacağından,

$$\gamma_{ri} \cdot P_i \cdot dr_i = -Z \left(\frac{d\Gamma}{dr} \right)_i dr_i \quad (3.75)$$

$$P_i = 2\pi r_i \tan \beta_i \quad (3.76)$$

Halka girdap yoğunluğu,

$$\gamma_{ri} = -Z \left(\frac{d\Gamma / dr}{P_i} \right)_i \quad (3.77)$$

şeklinde bulunur. Bu denklem boyutsuzlaştırılırsa aşağıdaki gibi olur:

$$g_{ri} = \frac{\gamma_{ri}}{V_s / R} = -Z \frac{\left(\frac{dG}{dx} \right)_i}{x_i \tan \beta_i} \quad (3.78)$$

Benzer şekilde yarı-sonsuz girdap hatlarından dolayı da aşağıdaki denklem elde edilir:

$$g_{si} = Z \frac{\left(\frac{dG}{dx} \right)_i}{x_i} \quad (3.79)$$

Bu eşitliklerle eliptik integral şeklinde ortalama hızları bulmak için denklem (3.80) kullanılır.

$$u_a, u_t, u_r = - \int_{x_h}^{x_i} \delta u_{a,t,r} \frac{Z \left(\frac{dG}{dx} \right)_i}{x_i \tan \beta_i} dx \quad (3.80)$$

Denklemde $\delta u_{a,t,r}$, birim şiddetteki halka girdabın indüklediği aksenal, teğetsel ve radyal hız bileşenleridir ve aşağıdaki denklemlerden hesaplanır:

Eksenel hız bileşeni,

$$\delta u_a = \frac{1}{2\pi} \left\{ A + \frac{y}{\sqrt{y^2 + (r+1)^2}} \left[K(k) - \frac{r-1}{r+1} \Pi(\alpha^2, k) \right] \right\} \quad (3.81)$$

$$A = \pi \quad r^2 < 1$$

$$A = 0 \quad r^2 > 1$$

Teğetsel hız bileşeni,

$$\delta u_t = \frac{1}{2\pi} \left\{ B + \frac{y/r}{\sqrt{y^2 + (r+1)^2}} \left[K(k) + \frac{r-1}{r+1} \Pi(\alpha^2, k) \right] \right\} \quad (3.82)$$

$$B = 0 \quad r^2 < 1$$

$$B = \pi/r \quad r^2 > 1$$

Radyal hız bileşeni,

$$\delta u_r = \frac{2}{\pi k^2 \sqrt{y^2 + (r+1)^2}} \left[E(k) - \left(1 - \frac{k^2}{2} \right) K(k) \right] \quad (3.83)$$

$$k = \frac{4r}{y^2 + (x^2 + 1)^2} \quad \alpha = \frac{4r}{(r+1)^2}$$

Yukardaki denklemlerde $K(k)$, $E(k)$ ve $\Pi(\alpha^2, k)$ birinci, ikinci ve üçüncü tip eliptik integrallerin toplamıdır ve Dwight'da (1963) hesaplanmıştır (Güner, 1994).

3.2.5. Nozullu Pervaneler için Eksenel Momentum Teorisi

Klasik uskur pervanelerinde olduğu gibi nozullu pervanelerde de ilk teorik dizayn çalışmaları eksenel momentum teorisi kullanılarak yapılmıştır. Bu çalışmalarda pervane hareketli bir diskle modellenmiştir. van Manen ve Oosterveld (1966) bu teoriyi kullanarak nozullu pervanelerin ideal verimini aşağıdaki şekilde vermektedir:

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + \tau C_T}} \quad (3.84)$$

burada C_T , itme yüklemesi katsayısı ve τ , pervane itmesinin toplam itmeye oranıdır:

$$C_T = \frac{T}{1/2 \rho V_a^2 \frac{\pi}{4} D^2} \quad (3.85)$$

$$\tau = \frac{T_p}{T_p + T_n} = \frac{T_p}{T} \quad (3.86)$$

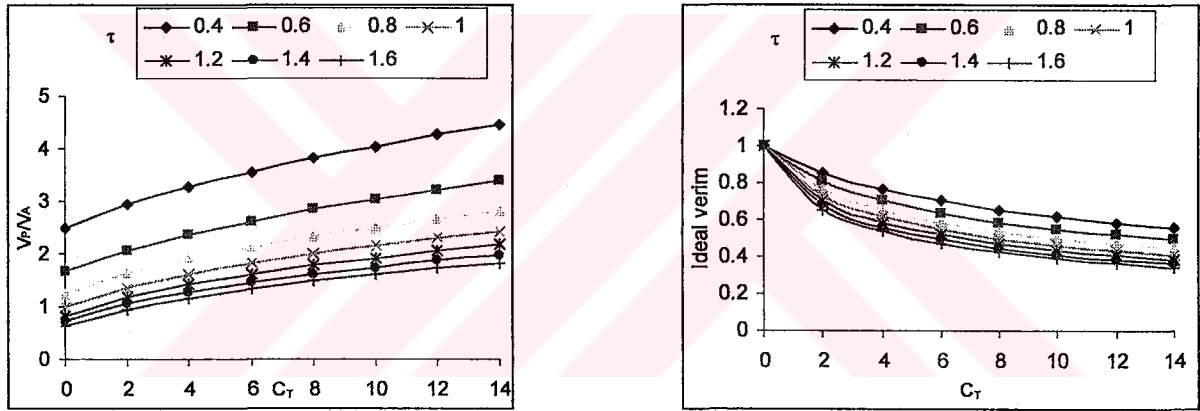
Burada T , toplam itme ($T_p + T_n$); V_a , nozullu pervaneye gelen akım hızı; D , pervane çapı; T_p , pervane itmesi ve T_n , nozul itmesidir.

Yine van Manen ve Oosterveld (1966) tarafından nozullu pervane diskine gelen akım hızı boyutsuz olarak momentum teorisi kullanılmak suretiyle itme oranı (τ) ve yükleme katsayısının (C_T) bir fonksiyonu şeklinde aşağıdaki gibi verilir:

$$\frac{V_p}{V_a} = \frac{C_T}{2(-1 + \sqrt{1 + \tau C_T})} \quad (3.87)$$

Burada V_p , pervane diskine gelen akım hızı ve V_a , nozullu pervaneye gelen akım hızıdır.

Şekil 3.20’de bir nozullu pervane sistemi için geniş bir itme oranı (τ) ve yükleme katsayısı (C_T) aralığında denklem (3.84) ve (3.87) kullanılarak hesaplanmış ideal verimin (η_i) ve pervane düzlemine gelen eksenel akım hızının (V_p/V_a) değişimi görülmektedir.



Şekil 3.20 Bir nozullu pervane için ideal sevk verimi ve pervane düzlemine gelen boyutsuz eksenel akım hızının geniş bir itme oranı (τ) aralığında, itme yükleme katsayısına (C_T) göre değişimi

(3.84) ve (3.87) denklemlerinden açıkça görülebileceği gibi sabit bir itme yüklemesi (C_T) durumunda itme oranı ($\tau < 1$) iken yani, nozul itmesi pozitif iken, nozullu pervanenin ideal verimi ve pervane diskine gelen eksenel akım hızı, nozulsuz pervaneye oranla daha yüksek olur. Bunun nedeni pervane etrafındaki nozulun profil kesitinden dolayı içindeki akımı hızlandırması ve etrafında oluşan bağlı sirkülasyonla pervane şaftına ilave bir itme sağlamasıdır. Bu tip nozullar Bölüm 1’de anlatıldığı gibi “Kort nozul” veya “Hızlandırıcı nozul” olarak adlandırılırlar.

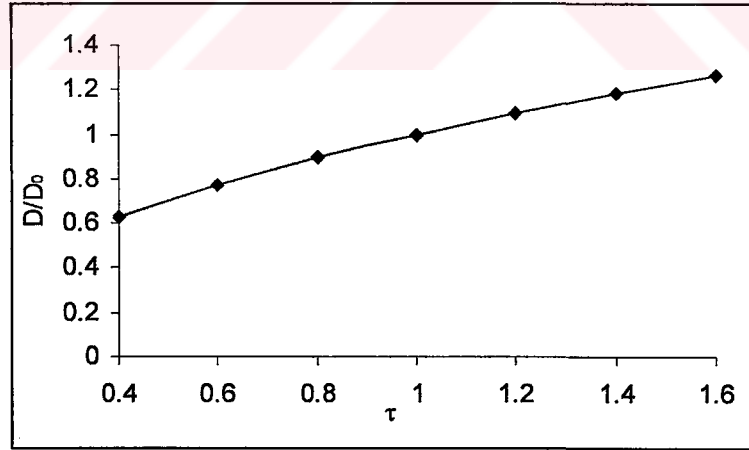
İtme oranı ($\tau > 1$) iken yani nozul negatif itme üretirken ise, pervane diskine gelen akım hızı ve ideal sevk verimi nozulsuz pervaneye göre daha düşük olur. Bunun açıklaması da kullanılan nozul profilinin dış bükey bir sehim hattına sahip olması nedeniyle akımı yavaşlatması ve radyal olarak dışarıya doğru bir kuvvet üreterek pervane shaftına negatif bir itme sağlaması şeklinde yapılabilir. Bu tip nozullara da “Yavaşlatıcı nozul” denir. Hızlandırıcı nozul, çap sınırlaması olan durumlarda ilave itme üreterek pervane çapını azaltmak, yavaşlatıcı nozul ise pervane üzerindeki statik basıncı artırarak kavitasyondan, titreşimden ve gürültüden pervaneyi korumak için kullanılır.

Nozullu ve nozulsuz pervanelerin çapları arasındaki ilişki itme oranının bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$D = D_0 \tau^{1/2} \quad (3.88)$$

Burada D_0 , nozulsuz pervane çapı ve D ise nozullu pervane çapıdır (van Manen ve Oosterveld, 1966).

Denklem (3.88)’in geniş bir itme yüklemesi (τ) aralığında hesaplanmasıyla elde edilmiş nozullu pervane çapının nozulsuz pervane çapına oranının (D/D_0) değişimi Şekil 3.21’de gösterilmektedir.



Şekil 3.21 İtme yüklemesinin (τ) bir fonksiyonu olarak nozullu pervane çapının nozulsuz pervane çapına oranı (D/D_0)

3.2.6. Kutta Şartı

Nozul ve pervane kesitlerinin modellenmelerinde dikkate alınması zorunlu olan Kutta şartı genel halde, akımın bir aerofilin yüz ve sırt kısımlarını takip eden uçta (trailing edge) pürüzsüzce, düzgün olarak terketmesi gerektiğini ifade eder. Daha açık olarak bu şart aşağıdaki gibidir:

1. Bir aerofili temsil eden Γ sirkülasyon değeri, özel bir hücum açısında akışkan, takibeden ucu düzgün olarak terkedecek şekilde belirlenmelidir.
2. Bir aerofilin takip eden ucunda üst ve alt yüzeyler arasındaki açı sonlu ve sıfırdan farklı ise takip eden uç durgun noktadır ve akışkan hızı sıfırdır.
3. Bir aerofilin takip eden ucunda üst ve alt yüzeyler arasındaki açı sıfır ve uç sivri ise takip eden uçtaki hızlar sıfırdan farklı, yönleri ve büyüklükleri de eşittir.

Kutta şartından dolayı takip eden uçta birim girdap şiddeti,

$$\gamma(TE) = 0 \quad (3.89)$$

şeklinde olur (Carlton, 1994).

4. NOZULLU PERVANE DİZAYN VE ANALİZİ

Nozullu pervane dizaynında verilen şartlar altında optimum sevk sistemi geometrisi aranırken, analizde ise, verilen bir nozullu pervane geometrisi ve akım şartında, sistem etrafındaki akım alanı, sistemin üreteceği itme, gerekli tork ve basınç dağılımları araştırılır. Basınç dağılımları aynı zamanda titreşim ve kavitasyon için öngörü sağlar. Sevk sistemi analizinde, sistemin olası çalışma şartları için performans tahminleri de elde edilebilir. Bu bölümde nozullu pervane dizayn ve analizi için teorik metodlar sunulacaktır.

4.1 Nozullu Pervane Dizaynı

Genel olarak bir gemi sevk sistemi dizaynı, verilen belirli bir shaft gücü ve akım durumunda maksimum verimde maksimum itmeyi üretecek sevk sistemi geometrisinin elde edilmesi şeklinde tarif edilebilir. Ancak bu yapılırken sevk sisteminin kavitasyon, titreşim, gürültü ve mukavemet gibi diğer performans kriterlerini de sağlaması gerekir. Nozullu pervane sevk sistemi için sunulacak teorik dizayn metodunda amaç maksimum itme ve verimi sağlamak olacaktır. Diğer kriterler ise basit formüllerle dikkate alınır.

Burada pervane dizaynı için kaldırıcı hat ve nozul/göbek etrafındaki akım analizi için yüzey girdap modelleri birlikte kullanılmak suretiyle nozullu pervaneler için bir dizayn metodu geliştirilecektir. Metotta pervane dizaynı ve nozul/göbek analizi ayrı ayrı ele alınır. Ancak pervane ile nozul ve göbek arasındaki kuvvetli akım etkileşimi iteratif bir prosedür içerisinde hesaplara dahil edilir. Nozul ve göbeği modelleyen girdap dağılımlarının pervane diskinde ve pervane kaldırıcı hat girdap modelinin de nozul/göbek üzerindeki kontrol noktalarında indükledikleri hızlar Biot-Savart kanunu kullanılarak hesaplanır.

Nozullu pervane dizaynında geometrileri bilinen nozul ve göbek ile etkileşim halinde olacak maksimum verimli pervane araştırılır. Nozul ve göbek için ise akım analizi gerçekleştirilir. Yani burada esas olan pervane dizaynıdır. Nozul ve göbek için kurulan analiz metodu bir tamamlayıcı olarak hesaplara katılır.

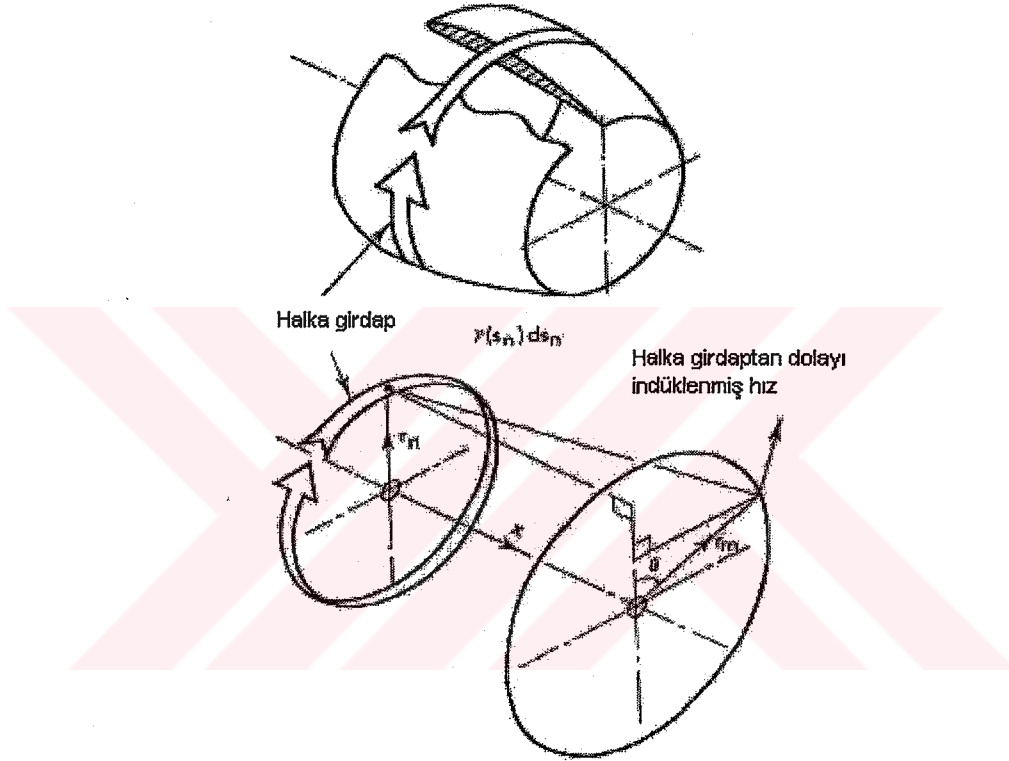
4.1.1 Nozul ve Göbek için Akım Modeli

Nozullu pervane dizaynında kullanılmak üzere nozul ve göbek etrafındaki akım analizi için Ryan ve Glover (1972) tarafından geliştirilen yüzey girdap metoduna dayalı bir model kullanılır. Bölüm (3.2.3)'de 2-D hidrofil için anlatılan yüzey girdap modeli, nozul ve göbek için genişletilmiştir. Bu metodda nozul ve göbeğe gelen akım ile nozul ve göbek geometrilerinin eksenel simetrik oldukları kabul edilir. Nozul ve göbeğin bulunduğu akışkan viskoz değildir. Eksenel simetrik akımda girdap şiddeti çevresel koordinattan bağımsızdır ve

yüzey girdap vektörünün yalnızca bir çevresel bileşeni vardır. Ayrıca nozul ve göbek yüzeyindeki girdap dağılımları sabittir ki bu da, nozul ve göbekten ize hiç girdap bırakılmayacağı anlamına gelir (Lewis, 1991).

Nozul ve göbek yüzey girdap modelinde nozul/göbeğin tüm yüzeyine $\gamma(s)$ yoğunluğunda sürekli halka girdaplar dağıtılır (Şekil 4.1). Yüzey sınırlarında akım hızı sıfırdır ve halka girdapların yoğunluğu $\gamma(s)$ yüzeye çok yakın teğetsel akım hızına (v_s) eşittir

$$v_s = \gamma(s) \quad (4.1)$$



Şekil 4.1 Nozul/göbek için yüzey girdap modeli (Lewis, 1991)

Nozul/göbek yüzeyine yerleştirilen girdap şiddetleri, yüzey sınırlarında Dirichlet sınır şartı sağlanacak yani, yüzeyde hiç teğetsel hız olmayacak şekilde belirlenir. Bunun için 2-D probleminde olduğu gibi, nozul/göbeği modelleyen halka girdap şiddetlerinin belirlenebilmesi amacıyla tüm yüzeylerde sınır şartı yazılarak lineer bir denklem sistemi elde edilir. Yüzeylerde alınan her bir (s_m) kontrol noktasında Dirichlet sınır şartını ifade eden yönetici denklem aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$-\frac{1}{2}\gamma(s_m) + \int \gamma(s_n)K(s_m, s_n)ds_n + U_a \cdot \cos \beta_m + U_r \cdot \sin \beta_m = 0 \quad (4.2)$$

Denklemde m , kontrol noktasının bulunduğu paneli; n , halka girdabın bulunduğu paneli; γ , birim girdap şiddetini; U_a ve U_r , kontrol noktasına gelen akımın eksenel ve radyal bileşenlerini; β_m ise, kontrol noktasının bulunduğu panelin eğimini gösterir.

Burada birinci ve ikinci terimler yerleştirilen tüm halka girdap şiddetlerinin kontrol noktalarında indükledikleri hızların etkisini, üçüncü ve dördüncü terimler de nozul/göbeğe gelen dış akımın etkisini ifade eder.

$K(s_m, s_n)$ ise, girdap elemanları ile kontrol noktaları arasındaki geometrik ilişkiyi yansıtan birim girdap elemanının indüklediği yüzeye paralel hızdır. Halka girdapların indükledikleri hızlar Biot-Savart kanunuyla hesaplanır. Birim şiddetteki bir halka girdabın indüklediği hız aşağıdaki şekilde yazılır:

$$K(s_m, s_n) = du_a^r \cdot \cos \beta_m + du_r^r \cdot \sin \beta_m \quad (4.3)$$

Burada du_a^r ve du_r^r , birim şiddetteki bir girdap halkasının (m) kontrol noktasında indüklediği sırasıyla eksenel ve radyal hız bileşenleridir. Bu hızlar Biot-Savart formülünden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$du_a^r = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_n (r_n - r_m \cos \theta)}{[(x_m - x_n)^2 + r_m^2 + r_n^2 - 2r_m r_n \cos \theta]^{3/2}} d\theta$$

$$du_r^r = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{r_n (x_m - x_n) \cos \theta}{[(x_m - x_n)^2 + r_m^2 + r_n^2 - 2r_m r_n \cos \theta]^{3/2}} d\theta \quad (4.4)$$

Nozul/göbek geometrisi ile bunlara gelen akım alanı verildiğinde oluşturulan lineer denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle, nozul/göbek yüzeylerindeki girdap dağılımlarının şiddetleri, nozul için çıkış kenarında Kutta şartı da sağlanacak şekilde belirlenir. Girdap dağılımları belirlendikten sonra nozul ve göbek yüzeyindeki basınç dağılımları Bernoulli denklemi yardımıyla bulunabilir. Tüm yüzeylerde basınç dağılımlarının integrasyonu ile da nozul/göbeğe etkiyen toplam kuvvetler elde edilebilir.

Nozul/Göbeğin İndüklediği Hız

Nozul/göbeğin herhangi bir noktada indüklediği hız, yüzey girdap dağılımının $\gamma(s_n)$ belirlenmesinden sonra Biot-Savart kanunu kullanılmak suretiyle kolayca elde edilebilir. Nozullu pervane dizaynında gerekli olan nozul/göbeğin pervane düzleminde indüklediği eksenel hız bileşenidir. Nozul/göbeğin pervane diskinde veya herhangi bir (x, r) noktasında indüklediği eksenel hız bileşeni boyutsuz olarak aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$\frac{u_a}{V_s} = \int \delta u_a^r \gamma(s_n) ds \quad (4.5)$$

Burada δu_a^r , denklem (4.4)'de verilen birim halka girdabın indüklediği eksenel hızdır. Herhangi bir noktada nozul/göbeğin indüklediği radyal hız bileşeni de benzer şekilde hesaplanabilir. Denklemden δu_a^r yerine δu_r^r gelir.

Yönetici Denklemin Sayısal Olarak Çözülmesi

Nozul/göbeği modelleyen halka girdap elemanlarının şiddetlerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulan yönetici denklemin (denklem 4.2) sayısal çözümü için, nozul/göbek yüzeyi sabit girdap yoğunluğunda düz elemanlardan oluşan parçalara ayrılır. Yönetici denklem yüzey üzerindeki kontrol noktalarında yazılarak bilinmeyen girdap elemanı şiddetlerine bağlı bir lineer denklem sistemi oluşturulur. Lineer denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle nozul/göbek üzerinde sabit şiddetteki halka girdap dağılımları belirlenir.

Nozul/göbek yüzeyinin M adet düz halka girdap elemanından $\gamma(s_n) \cdot \Delta s_n$ olduğu kabul edilir ve integrasyon için trapez metodu kullanılırsa, problem aşağıdaki şekilde oluşturulan lineer denklem sistemindeki bilinmeyen girdap elemanlarının $\gamma(s_n)$ belirlenmesine indirgenmiş olur:

$$\sum_{n=1}^M K(s_m, s_n) \cdot \gamma(s_n) \cdot \Delta s_n = -V_a \cdot \cos \beta_m \quad (4.6)$$

Yukardaki denklemden bulunması gereken $-\frac{1}{2}\gamma(s_m)$ ifadesi, kontrol noktasındaki girdap elemanının kendine etkisini gösteren $K(s_m, s_m)$ 'de dahil edilmiştir. Denklemden $K(s_m, s_n)$ aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$K(s_m, s_n) = \delta u_a^r \cos \beta_m + \delta u_r^r \sin \beta_m \quad (4.7)$$

Burada δu_a^r ve δu_r^r denklem (4.4)'de verilen birim halka girdabın indüklediği eksenel ve radyal hız bileşenleridir.

Bu hesaplamalarda dikkat edilmesi gereken bir husus m ve n noktalarının çakışması durumunda bir halka girdabın kendi bulunduğu noktada indüklediği hız sonsuz olacaktır. Bu durumda $K(s_m, s_m)$ aşağıdaki şekilde alınır:

$$K(s_m, s_m) = -\frac{1}{2} + \frac{ds_m}{4\pi R_m} - \frac{ds_m}{4\pi R_m} \left[\ln \frac{8\pi r_m}{ds_m} - \frac{1}{4} \right] \left(\frac{dx}{ds} \right)_m \quad (4.8)$$

Ayrıca nozul için hesaplamalar yapılırken göbekten ayrı olarak iki düzeltmenin yapılması gerekir: Sırt çapraz düzeltmesi ve Kutta şartının sağlanması:

1. Sırt çapraz düzeltmesi:

Özellikle ince kesitli nozullarda kesitin bir yüzündeki girdap elemanının diğer yüzde tam karşısındaki bir kontrol noktasında indüklediği hızı bulurken $K(s_m, s_n)$ 'lerde düzeltme yapılması gerekir. Bu düzeltme aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir:

$$K(s_{M+1-m}, s_m) = -\frac{1}{\Delta s_{M+1-m}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq M+1-m}}^M K(s_n, s_m) \cdot \Delta s_n \quad (4.9)$$

2. Kutta Şartının Sağlanması:

Bölüm (3.2.6)'da anlatıldığı gibi Kutta şartı, nozul çıkış kenarında akımın düzgün olarak terketmesini yani sirkülasyonun ve basınç yükünün olmamasını gerektirir. Bu şart çıkış ucuna yakın iki eleman için aşağıdaki şekilde basitçe sağlanabilir:

$$\gamma(s_{te+1}) = -\gamma(s_{te}) \quad (4.10)$$

olmalıdır.

Yönetici denklemin m 'inci kontrol noktası için yazılmasını ifade eden denklem (4.6), tüm kontrol noktalarında yazılmak suretiyle aşağıdaki şekilde bir lineer denklem sistemi oluşturulur:

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1M} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \dots & K_{2M} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \dots & K_{3M} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ K_{M1} & K_{M2} & K_{M3} & \dots & K_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \gamma(s_1) \\ \gamma(s_2) \\ \gamma(s_3) \\ \cdot \\ \cdot \\ \gamma(s_M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} RHS_1 \\ RHS_2 \\ RHS_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ RHS_M \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Burada,

$$RHS_m = -V_a \cdot \cos \beta_m \quad (4.12)$$

$$K_{mn} = K(s_m, s_n) \cdot \Delta s_n \quad (4.13)$$

dir.

Basınç Dağılımlarının Hesaplanması

Nozul/göbek etrafındaki basınç dağılımını bulmak için aşağıda verilen basınç katsayısından yararlanılır:

$$C_p = \frac{P_m - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} \quad (4.14)$$

Burada,

p_m , hesap yapılacak noktadaki statik basınç

p_∞ , sonsuzdaki statik basınçtır.

Denklem (4.14), Bernoulli denklemi ve yüzeye yakın akım hızının girdap şiddetine eşitliğini ifade eden denklem (4.1)'den yararlanılmak suretiyle basınç katsayısı (C_p), akım hızı ve girdap şiddetinin bir fonksiyonu olarak aşağıdaki şekilde bulunur:

$$C_p = 1 - \left(\frac{\gamma(s)}{V_\infty} \right)^2 \quad (4.15)$$

Nozul/göbeği modelleyen girdap dağılımları $\gamma(s)$ belirlendikten sonra ve gelen akım V_∞ da biliniyorsa, nozul/göbek yüzeyindeki basınç dağılımları denklem (4.15) kullanılarak belirlenebilir (Lewis, 1991).

4.1.2 Pervane Dizaynı

Nozul ve göbek etkileşimi altında pervane dizaynı için Bölüm (3.2.4)'te anlatılan kaldırıcı hat modeli kullanılır. Buna göre pervane kanatlarının sıfır kalınlık ve genişlikte olduğu kabul edilerek kalınlık etkileri ihmal edilir. Kanatlar üzerindeki hidrodinamik yükler ise kaldırıcı hat üzerine yerleştirilen bağlı girdap dağılımlarıyla temsil edilir. Sayısal çözüm için girdap dağılımları, kaldırıcı hat üzerinde kanat kesitlerinin bulunduğu radyal koordinatlara parçalı elemanlar şeklinde yerleştirilir. Girdap elemanlarının şiddetleri Burrill'in minimum enerji kaybı prensibi sağlanacak yani her kesit için pervane gerisindeki helisel girdap hatlarının sonsuzda piçleri sabit olacak şekilde oluşturulan lineer denklem sisteminin çözülmesiyle belirlenir. Girdap dağılımlarının belirlenmesiyle pervane kanat kesitlerinin piç açıları, itme katsayıları, direnç katsayıları ve tüm pervanenin performans katsayıları hesaplanabilir. Pervane dizaynında kullanılan kaldırıcı hat teorisinin matematiksel ayrıntıları Güner (1994) ve Güner and Atlar'da (1999) bulunabilir.

4.1.3 Etkileşim Hızlarının Hesaplanması

Pervanenin Nozula Etkisi

Nozullu pervane dizayn aşamalarından olan nozul/göbek etrafındaki akım analizinde, nozul dışındaki sistemlerin indükledikleri hızların da yönetici denklemde yer almaları gerekir. Bir başka deyişle pervanenin indüklediği hızın da hesaplara katılması gerekir. Nozul içerisinde bir pervane bulunuyorsa denklem (4.6)'nın sağ tarafındaki akım bileşenleri aşağıdaki şekilde olur:

$$RHS = (V_a + u_a^p) \cos \beta_m + u_r^p \sin \beta_m \quad (4.16)$$

Burada u_a^p ve u_r^p , pervane girdap sisteminin indüklediği ortalama eksenel ve radyal hız bileşenleri; V_a da, nozullu pervaneye gelen ortalama akım hızıdır.

Pervane tarafından indüklenen u_a^p ve u_r^p ortalama hızlarının hesaplanmasında Bölüm (3.2.4)'ün sonunda anlatılan eliptik integrallerden yararlanılır. Şöyle ki, pervane gerisindeki helisel girdap sistemi bir girdap silindir ile temsil edilir. Bu girdap silindir, halka ve at nalı girdaplardan, at nalı girdaplar da bağlı girdaplardan ve yarı-sonsuz girdap hatlarından oluşur (Şekil 3.19). Bu sistemin her hangi bir noktada indükleyeceği hız bileşenleri artık pervane girdap sisteminin indükleyeceği ortalama hızlar olacaktır (denklem 3.80).

Nozul yüzeyindeki kontrol noktalarında Dirichlet sınır şartını ifade için oluşturulan (4.6) yönetici denklemi pervanenin indüklediği hızların da dahil edilmesiyle aşağıdaki şekli alır:

$$\sum_{n=1}^M K(s_m, s_n) \gamma(s_n) \Delta s_n = -(V_a + u_a^p) \cos \beta_m - u_r^p \sin \beta_m \quad (4.17)$$

Denklem (4.17) yukarıda anlatıldığı gibi, nozul üzerindeki tüm kontrol noktalarında yazılarak lineer bir denklem sistemi oluşturulur. Denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle de nozulu modelleyen girdap dağılımlarının şiddetleri belirlenmiş olur.

Bu bölümde pervanenin nozula etkisi için anlatılan herşey göbek için de geçerlidir. Yani, pervanenin etkisi altında göbek üzerinde yazılacak yönetici denklem de (4.17) olacaktır.

Nozulun Pervaneye Etkisi

Pervane kaldırıcı hat modeline gelen akım alanı bulunurken de nozul ve göbek girdap sisteminin indüklediği eksenel hız bileşenlerinin hesaba katılmaları gerekir. Bu şekilde pervane düzlemine gelen toplam akım hızı aşağıdaki gibi olur:

$$U_a^p = V_a + u_a^p + u_a^d \quad (4.18)$$

Burada u_a^p , pervane gerisindeki akımı modelleyen serbest girdap sisteminin pervane düzleminde indüklediği aksel hız ve u_a^d ise, nozul ve göbeği modelleyen halka girdap sisteminin pervane düzleminde indüklediği aksel hızdır (denklem 4.5).

Nozul ve Göbeğin Birbirlerine Etkisi

Nozullu pervane sisteminde, nozul veya göbek için akım analizi yapılırken pervanenin etkisi dışında birbirlerine etkilerinin de dikkate alınması gerekir. Bunun için hesaplarda yapılması gereken tek değişiklik yine (4.6) yönetici denkleminin sağ tarafında olacaktır. RHS, yukarıda pervanenin nozula etkisinde verilen denklem (4.16)'yla aynı şekilde olur. Yalnız bu durumda u_a^p ve u_r^p hızlarına nozul veya göbek girdap sisteminin indüklediği aksel ve radyal hızlar da ilave edilmelidir. Bu hızların hesabı, yukarıda nozulun pervaneye etkisinde olduğu gibi (4.5) denklemi kullanılarak yapılır.

4.1.4 Nozullu Pervane Karakteristiklerinin Hesaplanması

Pervane Karakteristiklerinin Hesaplanması

Herbir radyal koordinattaki pervane karakteristikleri aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

Hidrodinamik piç açısı,

$$\beta_i = \tan^{-1} \frac{V_a + u_a}{\pi x_i n D - u_i} \quad (4.19)$$

İtme katsayısı,

$$\left(\frac{K_T}{dx} \right)_i = \frac{\left(\frac{c.c_l}{D} \right)_i \left[\frac{\pi x}{J} - u_{ti} \right]^2 J^2 \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \tan \beta_i \right)}{4 \cos \beta_i} \quad (4.20)$$

Tork katsayısı,

$$\left(\frac{K_Q}{dx} \right)_i = \frac{x_i \left(\frac{c.c_l}{D} \right)_i \left[(1 - w_i) + u_{ti} \right]^2 J^2 \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \tan \beta_i \right)}{8 \sin \beta_i} \quad (4.21)$$

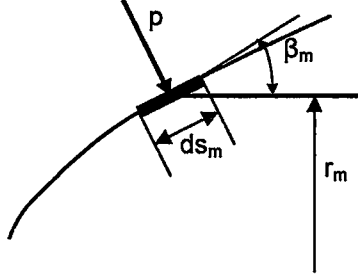
Yukardaki denklemlerden elde edilen herbir yarıçaptaki pervane karakteristikleri çap boyunca entegre edilerek pervaneye ait toplam değerler bulunur (Güner, 1994).

Diğer pervane karakteristikleri Ek 1'de verilmiştir.

Nozul Karakteristiklerinin Hesaplanması

Nozula etki eden aksenal kuvveti yani itmeyi hesaplamak için nozul üzerinde r_m yarıçapında, β_m eğimine sahip bir yüzey elemanını ds_m ele alalım (Şekil 4.2). Yüzey elemanına etki eden yatay kuvvet bileşeni dT_{Di} aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$dT_{Di} = -(p_m - p_\infty) 2\pi r_m ds_m \sin \beta_m \quad (4.22)$$



Şekil 4.2 Bir nozul yüzey elemanı üzerindeki basınç kuvveti

Denklem (4.14) ile (4.22) birleştirilerek nozul yüzey elemanına etkiyen yatay kuvvet bileşeni basınç katsayısının (C_p) bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Nozul yüzeyini tanımlayan M adet yüzey elemanı üzerindeki basınçların integrasyonu ile da viskoz olmayan akım durumunda nozul itmesi aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$T_{Di} = -\pi \rho V_a^2 \sum_{m=1}^M C_{p_m} r_m \sin \beta_m ds_m \quad (4.23)$$

Yüarıdaki denklemlerde i indisi, viskoz olmayan akışkan ortamını gösterir. Denklem (4.23)

$\frac{1}{2} \rho V_a^2 \pi R^2$ ile bölünmek suretiyle boyutsuzlaştırılırsa, viskoz olmayan akımda (inviscid) nozul itme katsayısı aşağıdaki gibi bulunur:

$$C_{TDi} = -\frac{8}{D^2} \sum_{m=1}^M C_{p_m} r_m \sin \beta_m ds_m \quad (4.24)$$

Viskoz akım durumu için nozul yüzeyine etki eden direnç katsayısı Brockett (1999) tarafından bir ampirik formülle aşağıdaki şekilde verilir:

$$C_{TDv} = 0.0045 \frac{S_D}{4\pi D_D^2} \quad (4.25)$$

Burada S_D , nozul yüzey alanı ve D_D , nozul çapıdır. Buradan viskoz akımda nozul itme katsayısı,

$$C_{TD} = C_{TDi} - C_{TDv} \quad (4.26)$$

olarak bulunur.

Pervane şaft devrine bağlı ikinci bir itme katsayısı K_{TD} de aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$K_{TD} = \frac{T_D}{\rho n^2 D^4} = \frac{T_{Di} - T_{Dv}}{\rho n^2 D^4} \quad (4.27)$$

(4.23), (4.25) ve (4.26) denklemleri (4.27)'de yerine konulursa, nozul için şaft devrine bağlı itme katsayısı,

$$K_{TD} = \pi C_{TD} \frac{J_{va}^2}{8} \quad (4.28)$$

olarak bulunur. Burada J_{va} , viskoz ortamda ilerleme katsayısıdır.

Nozullu pervane karakteristikleri ise, yukarda nozul için verilenlere pervane katsayıları da eklenmek suretiyle bulunabilir.

4.2 Nozullu Pervane Analizi

Pervane dizaynı geliştirmenin standart aşamalarından biri de, performans analizidir. Gemi arkasında çalışan pervaneye gelen güçlü düzensiz akım, şaft üzerindeki kuvvetlerin ve pervane üzerindeki basınç alanının düzensizliğini netice verir. Bu düzensizliklere pervane kanadı ve nozul yüzeyinde çeşitli şekillerde ortaya çıkabilen süreksiz kavitasyonlar da katkı sağlar. Düzensiz yük formları, gemi bünyesinde yüksek seviyede titreşimlerin oluşmasına neden olabilir. Bu sebeple sevk sistemi dizaynının ilk aşamalarında bunların kontrol altında bulundurulmaları son derece önemlidir. Bu bölümde, nozullu pervaneler için yukarıda bahsedilen amaç doğrultusunda, Glover ve Szantyr (1989) tarafından geliştirilen kaldırıcı yüzey modeline dayalı bir analiz metodu sunulacaktır. Daha sonra analiz metoduna göbeğin etkisi de katılmak suretiyle metod geliştirilecektir. Analiz metodundan aşağıdaki sonuçlar elde edilebilecektir:

- Pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımları
- Pervane kanadı üzerindeki tabaka kavitasyon bölgeleri
- Nozul yüzeyindeki basınç dağılımları
- Nozul yüzeyindeki tabaka kavitasyon bölgeleri
- Pervane şaftına gelen kuvvetler ve
- Nozul üzerindeki kuvvetler.

4.2.1 Nozullu Pervane Kaldırıcı Yüzey Modeli

Düzensiz akımda çalışan nozullu pervanelerin analizi için geliştirilen bu medotta, pervane kanatları ve nozulun temsili için deforme olabilen bir kaldırıcı yüzey modeli kullanılır. Nozullu pervanede hidrodinamik yüklerin ve kalınlıkların modellenmeleri ayrı ayrı ele alınarak, pervane ve nozul 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 hesabında dahil edilir. Kesit kalınlıklarının kaynak dağılımlarıyla modellenmesi nozullu pervaneye gelen çevresel ortalama akıma göre yapılır. Bu şekilde kalınlık etkileri hesaplara zamanla değişmeyen sabit düzeltmeler şeklinde yansıtılır.

Hesapları basitleştirmek için pervane kanatlarından biri *anahtar kanat* ve bu kanata bitişik olan nozulun $360^\circ/Z$ 'lik kısmı *nozul anahtar sektörü* olarak seçilir. Anahtar kanadın hemen arkasından itibaren $360^\circ/Z$ 'e kadar olan serbest girdap yüzeyi, *değişken serbest girdap bölgesi* olarak tanımlanır. Değişken bölgedeki girdap dağılımları, kanadın üniform olmayan akımda hareket etmesi nedeniyle anahtar kanat üzerinde oluşabilecek değişken hidrodinamik yüklerin belirlenmesinde kullanılır. *Anahtar kanat* için değişken bölge haricinde kalan ve diğer kanatların ise tüm serbest girdap yüzeyleri, pervane serbest girdap sisteminin sürekli bölgelerini oluştururlar.

Nozul arkasında kalan serbest girdapların silindiriksel bir yüzeye sahip oldukları ve büzülmenin olmadığı kabul edilir. Serbest girdap yüzeyinin anahtar sektörden hemen sonra gelen çapraz bir bölmesi, *nozul serbest girdap yüzeyinin değişken bölgesi* olarak tanımlanır. Pervanede olduğu gibi bu bölgenin amacı, üniform olmayan akım sebebiyle, nozul üzerinde oluşabilecek hidrodinamik yüklerin belirlenmesi için bir kaynak oluşturmaktır. Nozulda da, değişken girdap bölgesinin haricinde kalan ve anahtar sektör dışındaki nozul izleyen girdap bölgeleri, nozul serbest girdap sisteminin sürekli bölgelerini oluştururlar.

Kanat, nozul ve serbest girdap yüzeylerine yerleştirilen girdap elemanlarının indüklediği hızların bulunmasında Biot-Savart kanunundan yararlanılır. Nozul ve pervane yükünü modelleyen bağlı girdap elemanlarının değerleri, kaldırıcı yüzeylerde kinematik sınır şartı sağlanacak şekilde oluşturulan lineer denklem sistemlerinin çözülmesiyle bulunur. Bağlı girdap elemanı şiddetlerinin belirlenmesinden sonra, nozul ve pervane yüzeylerine gelen sonuç akımları, basınç dağılımları ve sisteme etkiyen kuvvetler bulunabilir (Glover and Szantyr, 1989).

Kinematik Sınır Şartı

Nozullu pervane kaldırıcı yüzey modelinde, hidrodinamik yükleri temsil eden girdap dağılımlarının belirlenmesinde kinematik sınır şartından yararlanılır. Kinematik sınır şartı, kaldırıcı yüzey denklemi formülasyonunun temelini oluşturur. Bu şarta göre, kaldırıcı yüzeye gelen akım hızının yüzeye paralel olması gerekir. Bir başka deyişle kaldırıcı yüzeyden hiç akım geçmemeli, nozul ve pervane sehim hattı yüzeyleri üzerlerindeki tüm noktalarda toplam normal hız sıfır olmalıdır. Pervane ve nozul kaldırıcı yüzeyleri için bu şart aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{4\pi} \left[\int_{S_p} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_p \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS + \int_{S_{pv}} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{pv} \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS + \int_{S_{ps}} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{ps} \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS + \int_{S_d} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_d \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_d} \right) dS + \right. \\ & \left. \int_{S_{dv}} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{dv} \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_d} \right) dS + \int_{S_{ds}} \vec{n} \cdot \vec{\gamma}_{ds} \cdot \nabla \left(-\frac{1}{r_d} \right) dS + \int_{S_p} (q_p + q_{pc}) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS + \int_{S_d} (q_d + q_{dc}) \frac{\partial}{\partial n} \left(-\frac{1}{r_p} \right) dS \right] \\ & + (\vec{V} + \vec{\omega} \cdot \vec{R}) \cdot \vec{n} = 0 \end{aligned} \quad (4.29)$$

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

$\vec{\gamma}_d$, nozul üzerindeki girdap dağılımı

$\vec{\gamma}_{dv}$, nozul serbest girdap sisteminin değişken bölgesine ait girdap dağılımı

$\vec{\gamma}_{ds}$, nozul serbest girdap sisteminin sürekli bölgesine ait girdap dağılımı

q_p , pervane kanat kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı

q_{pc} , pervane kanadı üzerindeki tabaka kavitastonu kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı

q_d , nozul kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı

q_{dc} , nozul üzerindeki tabaka kavitastonu kalınlığını temsil eden kaynak dağılımı

r_d, r_p , alan elemanı dS ile hesap yapılacak nokta arasındaki uzaklık

S_p , pervane kanatlarının alanı

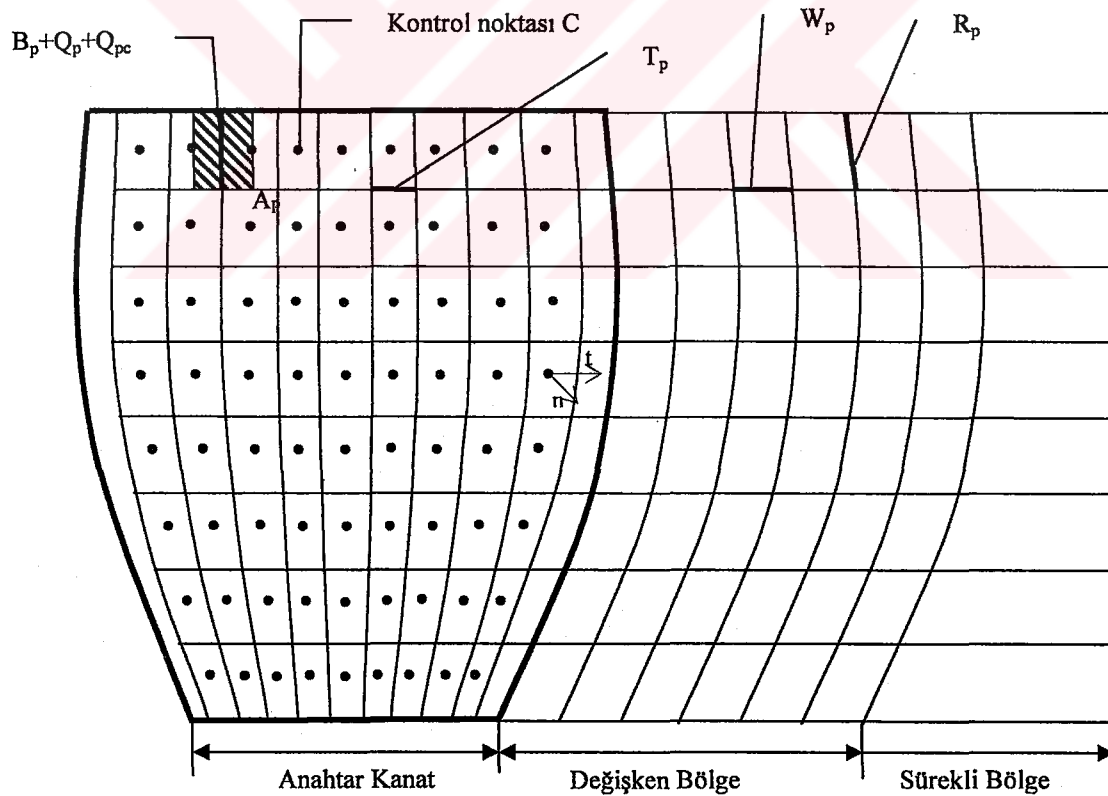
S_{pv} , pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesinin alanı

- S_{ps} , pervane serbest girdap sisteminin sürekli bölgesinin alanı
 S_d , nozul alanı
 S_{dv} , nozul serbest girdap sisteminin değişken bölgesinin alanı
 S_{ds} , nozul serbest girdap sisteminin düzenli bölgesinin alanı
 $\vec{V}$, nozullu pervaneye gelen akımın hızı

Yukarıdaki denklemde q_{pc} ve q_{dc} yalnızca kavitasyon tespit edildiğinde yer alır. Benzer şekilde $\vec{\omega} \cdot R$ da pervanenin dönmesiyle ilgilidir ve sadece pervane üzerindeki bir noktada hesap yapıldığı zaman yer alır. Pervane kanatları veya nozul üzerinde tabaka kavitasyonu görüldüğünde normal vektör $\vec{n}$, orjinal kaldırıcı yüzey geometrisindeki bozulmayı yansıtacak şekilde değişir.

Pervane Kanadı Kaldırıcı Yüzey Modeli

Pervane kanadını modelleyen girdap ve kaynak dağılımlarının belirlenmesi amacıyla denklem (4.29)'un sayısal olarak çözülebilmesi için, kaldırıcı yüzey panellere ayrılarak üzerlerine girdap ve kaynak elemanları yerleştirilir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 Pervane kanadı kaldırıcı yüzey modeli

Şekilden de görülebileceği gibi kort yönündeki 8 şerit boyunca onar tane bağlı girdap elemanı ($\vec{B}_p$) düzgün olarak yayılır. Herbir girdap elemanının şiddeti, A_p alanına yayılan sürekli

girdap dağılımının şiddetine eşittir. Sirkülasyonun korunumu hakkındaki Kelvin teoreminin sağlanması maksadıyla $\bar{B}_p$ bağlı girdap elemanları $\bar{T}_p$ izleyen girdap elemanlarıyla desteklenir. İzleyen girdaplar çıkış kenarından ayrıldıktan sonra genel bir helis şeklinde serbest girdap yüzeylerini oluştururlar. Bu izleyen girdap elemanlarının şiddetleri bağlı girdap elemanlarının şiddetleri cinsinden ifade edilebilir. Çünkü, (A_p) alanının etrafında şiddetleri eşit, ama yönleri farklıdır. Böylece pervane kanadı üzerindeki hidrodinamik yükün hesaplanması için gerekli altyapı hazırlanmış olur.

Anahtar kanat üzerinde girdap elemanlarının arasında kalan bölmelerin orta noktalarına (C) kontrol noktaları yerleştirilir. Kontrol noktaları, kinematik sınır şartının sağlanmasında kullanılır. Ancak anahtar kanat üzerinde 80 tane şiddeti bilinmeyen bağlı girdap elemanı ($\bar{B}_p$) olmasına karşılık toplam 72 tane kontrol noktası (C) vardır. Bu durum, akımın çıkış kenarını düzgün olarak terkettiğini yani bağlı girdabın sıfır olduğunu ifade eden Kutta şartından yararlanılmak suretiyle bilinmeyen bağlı girdap elemanı sayısı da 72'ye indirilerek çözülür.

Pervane çıkış kenarını takiben yerleştirilen değişken serbest girdap bölgesi, düzgün helis şeklindedir ve radyal yönde 6 eşit sektörden oluşur. Sektörler arası $360^\circ/6Z$ dir. Bu bölgede aynı yarıçap üzerindeki izleyen girdap elemanları ($\bar{W}_p$) farklı sektörlerde farklı şiddete sahip olabilirler. ($\bar{W}_p$)'ler, sirkülasyonun korunumu ile ilgili Kelvin teoreminin sağlanması amacıyla ($\bar{R}_p$) radyal izleyen 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.

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. Pervane kanadının geçtiği düzensiz akım durumlarından etkilenmez. Hesaplarda kolaylık sağlaması bakımından yarı-sonsuz girdap hatları pervanenin 6 devrinde kesilirler.

Kanatların kalınlık etkilerini temsil eden kaynak elemanları (Q_p) ve kanat üzerindeki tabaka kavitasyon etkilerini temsil eden kaynak elemanları (Q_{pc}) bağlı girdap elemanlarıyla üstüste gelecek şekilde yerleştirilirler. Kaynak elemanlarının şiddetleri, kanat veya tabaka kavitasyonu birim hacmine gelen akımı kesecek yani kalınlıkları temsil edecek şekilde belirlenir (Glover and Szantyr, 1989).

Kaynak şiddetleri ortalama başlangıç akımına göre bulunur ve düzensiz akım durumundaki tüm hesaplarda bu değerler kullanılır. Anahtar kanat üzerindeki bir kaynağın şiddeti aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$Q_p = V_{IN} \cdot \Delta R \cdot \Delta X \cdot \frac{dt}{dx} \quad (4.30)$$

Burada;

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

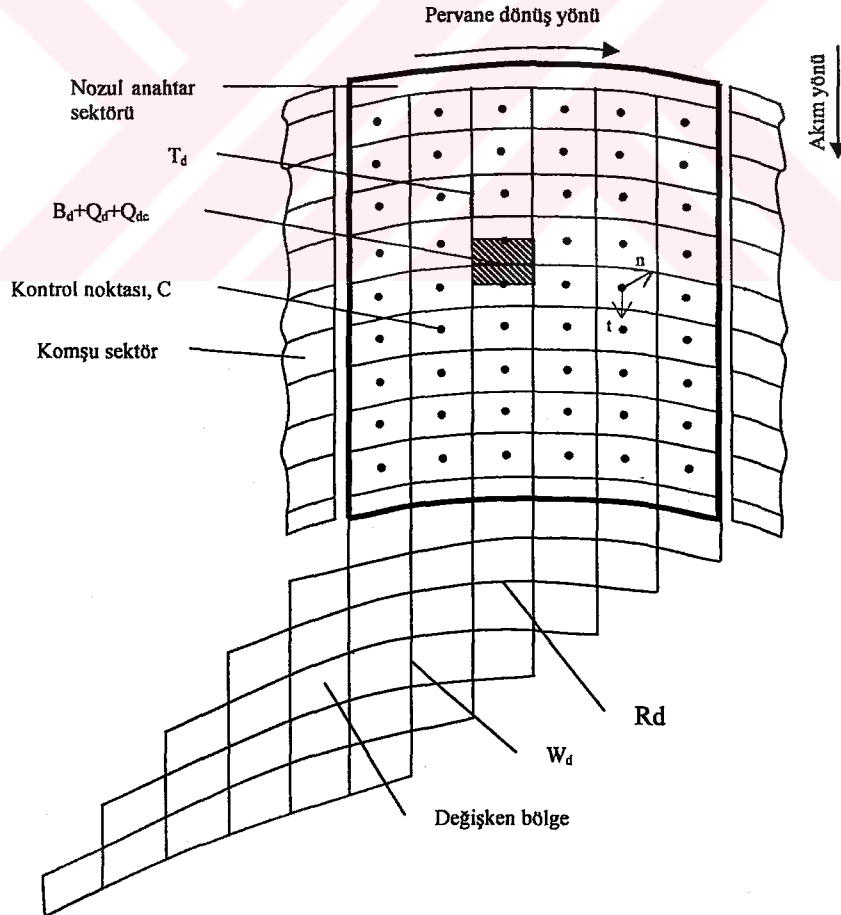
ΔR , radyal şerit genişliği

ΔX , kanat hacim elemanının boyu ve

$\frac{dt}{dx}$, kanat kalınlığının akım yönündeki bölgesel türevidir.

Nozul Kaldırıcı Yüzey Modeli

Pervane kanadında olduğu gibi nozul kaldırıcı yüzey modelinde de girdap ve kaynak dağılımları, yüzeydeki panellere parçalı şekilde yerleştirilirler (Şekil 4.4).



Şekil 4.4 Nozul girdap/kaynak modeli

Bu modelde, nozul kesit sehim hatları yüzeyi (Z.6) adet boyuna ve 9 adet de enine şeritten oluşan bölmelere ayrılır. Nozul kaldırıcı yüzeyine yayılan bağlı girdap elemanları ($\bar{B}_d$), izleyen girdap elemanları ($\bar{T}_d$), nozul kesit kalınlığını temsil eden kaynaklar (Q_d) ve nozul üzerinde oluşması muhtemel tabaka kavitasyon kalınlığını temsil eden kaynaklar (Q_{dc}), pervane kanadındaki benzer şekilde yerleştirilirler. Nozul kesit kalınlık etkilerini temsil eden kaynak elemanlarının (Q_d) şiddetlerinin hesabı, pervane için yukarıda anlatıldığı şekilde denklem (4.30) kullanılarak yapılır. Ancak nozulda (V_{IN}) ortalama gelen akım hızı pervane dönmesini içermez. Nozul kaldırıcı yüzeyinin anahtar kanada yakın 6 adet boyuna şeritten oluşan bölmelerinin meydana getirdiği bölge, “*nozul anahtar sektörü*” olarak tanımlanır. Pervane kanadı ile beraber nozul anahtar sektörü de hareket eder. Yani, her bir analiz konumunda anahtar sektöre yeni bir şerit ilave olurken son şerit de dışarda bırakılır. Anahtar sektör üzerindeki bölmelerin ortalarına kontrol noktaları yerleştirilir. Bu noktalar nozul üzerinde kinematik sınır şartının sağlanmasında kullanılır. Nozul anahtar sektörü üzerinde şiddetleri bilinmeyen bağlı girdap elemanlarının sayısı 60 olmasına karşılık kontrol noktalarının sayısı ise 54’tür. Bu sorun pervanede olduğu gibi, akımın nozul çıkış kenarını düzgün olarak terkettiğini ifade eden Kutta şartı kullanılmak suretiyle, bilinmeyen bağlı girdap elemanları sayısı da 54’e indirilerek çözülür.

Nozul çıkış kenarını takiben yerleştirilen değişken girdap bölgesi düzgün silindirikseldir ve genişliği $360^\circ/6.Z$ olan altı eşit boyuna şeritten meydana gelir. Bu bölgedeki girdaplar, nozul anahtar sektörü üzerinde indükledikleri hızlar vasıtasıyla, bir sonraki analiz pozisyonunda kinematik sınır şartını etkilerler. Nozul serbest girdap yüzeyinin değişken bölgesi ($\bar{W}_d$) izleyen ve ($\bar{R}_d$) çevresel girdap elemanlarından oluşur. Değişken bölgenin arkasında kalan ve sadece ($\bar{W}_d$) izleyen girdap elemanlarından oluşan nozul serbest girdap sisteminin geri kalan kısmı ise nozul sürekli girdap bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölge gerçekte yarı-sonsuz iken, hesaplarda kolaylık sağlaması bakımından pervanede olduğu gibi 6 tam devirde sonlandırılır (Glover and Szantyr, 1989).

4.2.2 İndüklenmiş Hızların Hesaplanması

Nozullu pervane kaldırıcı yüzey modelinde, girdap elemanlarının indükledikleri hızların bulunmasında indüksiyon katsayı matrisleri oluşturularak hesaplar 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 hızlı bir şekilde indüklenmiş hızların

hesaplanmasında ya da, bilinmeyen girdap şiddetlerinin belirlenmesinde kullanılabilirler. İşlemlerde esneklik sağlaması açısından nozullu pervane girdap modelinin herbir ana bölümünde ayrı indüksiyon katsayı matrisleri oluşturulur. Normal ve teğetsel hız bileşenleri için de ayrı matrisler kullanılır.

Bir indüksiyon katsayıları matrisi aynı zamanda, nozullu pervane girdap modelinin bir bölgesindeki tüm girdap elemanlarının, herbir kontrol noktasında indüklenmiş hıza katkılarının toplanması şeklinde de değerlendirilebilir. İndüklenmiş hızların hesabında Biot-Savart formülü kullanılır (Şekil 4.5):

$$\vec{V}_\Gamma = \frac{\Gamma}{4\pi} \cdot \frac{\vec{L} \times \vec{R}}{\vec{R}^3} \quad (4.31)$$

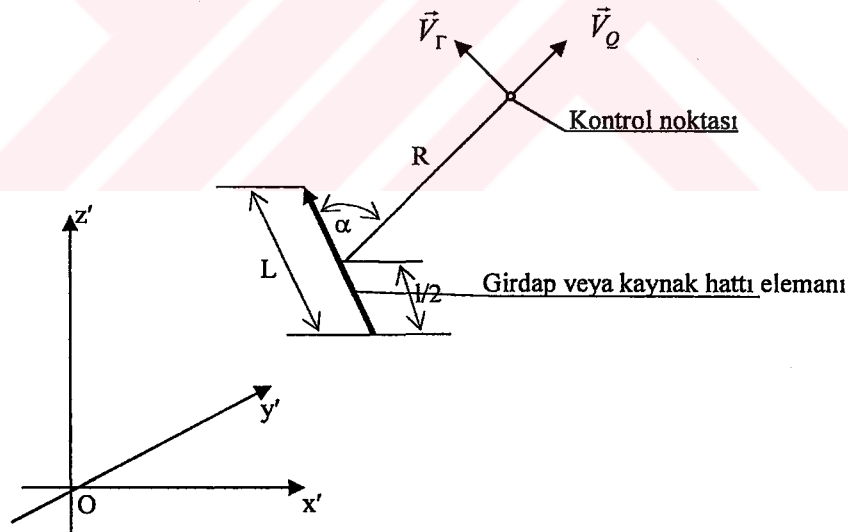
Burada;

$\vec{V}_\Gamma$, İndüklenmiş hız

Γ , Girdap elemanının şiddeti

$\vec{L}$, Girdap elemanı

$\vec{R}$, Hesap yapılacak noktalar arasındaki uzaklık vektörüdür.



Şekil 4.5 Bir girdap/kaynak elemanının kontrol noktasında indüklediği hız

Kesit kalınlıklarını modelleyen kaynak elemanlarının indüklediği hızlar da aşağıdaki formülden bulunur:

$$\vec{V}_Q = \frac{Q \cdot \vec{R}}{4\pi \cdot \vec{R}^3} \quad (4.32)$$

Burada Q , kaynak elemanının şiddetidir.

4.2.3 Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi

Anahtar Kanat Başlangıç Konumunda iken ($\phi = 0$) Kaynak/Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi (İlk Yaklaşım)

Nozullu pervane kaldırıcı yüzey modelinde süreksiz hidrodinamik yükler için ilk yaklaşım hesapları anahtar kanat dik konumda iken yapılır. Aynı zamanda sürekli serbest girdap bölgelerindeki girdap elemanlarının şiddetleri ve kesit kalınlıklarını modelleyen kaynak dağılımlarının şiddetleri de bu aşamada belirlenir. Tüm bu ilk yaklaşım hesaplarında nozullu pervaneye gelen ortalama çevresel akım kullanılır. Yani nozullu pervanenin bu aşamada düzensiz akım etkilerine maruz olmadığı kabul edilir

Nozullu pervane girdap modelini oluşturan tüm girdap elemanlarının; anahtar kanat ve anahtar sektör üzerindeki herbir kontrol noktasında indükledikleri hızların toplamı şeklinde denklem (4.29-32) kullanılarak yazılır. Nozullu pervane kaldırıcı yüzey modelinde kinematik sınır şartını ifade eden bu lineer denklem sistemi dört ana gruba ayrılabilir:

I. Pervanenin anahtar kanada etkisi:

1. Pervane kanatlarının anahtar kanada,
2. Pervane değişken serbest girdap bölgesinin anahtar kanada ve
3. Pervane sürekli serbest girdap bölgesinin anahtar kanada etkisinden oluşur.

II. Nozulun anahtar sektöre etkisi:

1. Nozulun anahtar sektöre,
2. Nozul değişken serbest girdap bölgesinin anahtar sektöre ve
3. Nozul sürekli serbest girdap bölgesinin anahtar sektöre etkisinden oluşur.

III. Pervanenin nozula etkisi:

1. Pervane kanatlarının nozul anahtar sektörüne,
2. Pervane değişken serbest girdap bölgesinin anahtar sektöre ve
3. Pervane sürekli serbest girdap bölgesinin anahtar sektöre etkisinden oluşur.

IV. Nozulun pervaneye etkisi

1. Nozulun pervane anahtar kanadına,
2. Nozul değişken serbest girdap bölgesinin anahtar kanada ve
3. Nozul sürekli girdap bölgesinin anahtar kanada etkisinden oluşur.

Lineer denklem sisteminin sağ tarafı ise, nozul ve kanat kalınlıklarını modelleyen kaynak dağılımlarının indükledikleri hızlar, nozullu pervaneye gelen akım hızı ve pervanede rotasyonel hızdan oluşur. Bu şekilde oluşturulan lineer denklem sistemi, 126 bilinmeyen bağlı girdap elemanı ve 126 denklemden oluşur. Serbest girdap bölgeleri, diğer kanat ve

sektörlerdeki bilinmeyen girdap elemanları ise anahtar kanat ve sektördeki bağlı girdap elemanlarının şiddetleri cinsinden ifade edilerek denklemlere katılır.

(126x126) boyutundaki bu lineer denklem sisteminin sayısal olarak çözülmesiyle pervane ve nozul üzerindeki tüm bağlı girdap elemanlarının şiddetleri ortalama akıma göre bulunmuş olur. Bilinmeyen girdap elemanları bulunduktan sonra nozul ve pervane yüzeylerindeki akım hızları denklem (4.31) ve (4.32) kullanılarak bulunabilir. Böylece başlangıç durumunda nozullu pervane üzerindeki hidrodinamik yük dağılımı hesapları için altyapı hazırlanmış olur.

Üniform olmayan akım alanında çalışan nozullu pervaneler için geliştirilen analiz yönteminde aşağıdaki girdap bölgelerinin düzensiz akımdan etkilenecekleri kabul edilir:

- ❖ anahtar kanat,
- ❖ pervane serbest girdap sisteminin değişken bölgesi,
- ❖ nozul anahtar sektörü ve
- ❖ nozul serbest girdap bölgesinin değişken bölgesi.

Nozullu 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:

- anahtar kanat dışındaki pervane kanatları 2,3,.....Z,
- pervane serbest girdap sisteminin sürekli kısmı,
- nozul anahtar sektörü dışındaki nozul sektörleri 2,3,.....Z,
- nozul serbest girdap bölgesinin sürekli kısmı,
- kanat kalınlıklarını modelleyen kaynaklar ve
- nozul kalınlıklarını modelleyen kaynaklar.

Anahtar Kanat ($\phi = \phi_n$) Konumunda iken Pervane Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi

Analiz yapılacak ilk kanat pozisyonunda ($\phi_1 = 360^\circ/6.Z$), 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.

Nozul anahtar sektörünün anahtar kanat üzerinde indüklediği hızlar, daha önce elde edilen indüksiyon katsayıları matrisi ve girdap dağılımları kullanılarak bulunur. Nozul ve pervane serbest girdap bölgelerinin indükledikleri hızlar da Biot-Savart formülü kullanılarak elde edilir.

Üniform olmayan akımda ($\varphi = \varphi_n$) kanat pozisyonu için akım analizi üç adımda gerçekleştirilir:

I. Adım: Pervane kanadı üzerindeki kinematik sınır şartı, nozul etkisini hesaba katmak için, bir önceki kanat konumunda bulunan nozul anahtar sektörü üzerindeki girdap dağılımı kullanılarak çözülür. Bu şekilde pervane üzerindeki yeni girdap dağılımları belirlenir.

II. Adım: Nozul anahtar sektörü üzerindeki kinematik sınır şartı, pervane anahtar kanadının nozula etkisini hesaba katmak için, kanat üzerindeki yeni girdap dağılımı kullanılmak suretiyle çözülür ve nozul üzerinde de yeni girdap dağılımları bulunur.

III. Adım: Son adım olarak, pervane üzerindeki girdap dağılımı, nozul anahtar sektörü üzerindeki yeni girdap dağılımı kullanılmak suretiyle tekrar elde edilir. Nümerik deneyler bu üç adımın, pratikte karşılaşılması muhtemel düzensiz akım durumları için yeterli sonuçları verdiği yönündedir. Bu sebeple iterasyon III. Adımdan sonra kesilebilir.

Kavitasyon analizi için bir sonraki aşamada kullanılacak olan basınç dağılımları da, nozul için ikinci, pervane için ise üçüncü adımın sonunda hesaplanır.

Bu aşamada lineer denklem sisteminin ana matrisi, pervane anahtar kanadı üzerindeki girdap elemanlarının yine pervane anahtar kanadı üzerindeki kontrol noktalarında indükledikleri hızı ifade eden (72x72) 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),
- Nozul anahtar sektörünün indüklediği hız ve
- Pervane ve nozul değişken girdap bölgelerinin indükledikleri hız.

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

Anahtar Kanat ($\varphi = \varphi_n$) Konumunda iken Nozul Girdap Dağılımlarının Belirlenmesi

Anahtar kanadın anahtar sektör üzerinde indüklediği hızlar, daha önce elde edilen indüksiyon katsayıları matrisi ve bir önceki kanat pozisyonunda bulunan girdap dağılımı kullanılarak hesaplanır. Nozul ve pervane serbest girdap bölgelerinin indükledikleri hızlar da Biot-Savart formülü yardımıyla hesaplanır.

Bu durumda lineer denklem sisteminin ana matrisi, nozul anahtar sektörü üzerindeki girdap elemanlarının yine nozul anahtar sektörü üzerindeki kontrol noktalarında indükledikleri hızı

ifade eden indüksiyon katsayıları matrisidir. Denklem sisteminin sağ tarafı ise aşağıdaki hızlardan oluşur:

- İndüklenmiş hızların sürekli kısmı,
- Pervane anahtar kanadı tarafından yeni girdap dağılımına göre indüklenen hızlar,
- Nozul ve pervane değişken bölgelerinin indükledikleri hızlar ve
- Mevcut kanat pozisyonunda kontrol noktalarındaki akım hızı.

Bu şekilde (54x54) boyutunda oluşturulan denklem sisteminin çözülmesi sonucunda nozul anahtar sektörü için yeni girdap dağılımı ve nozul yüzeyindeki akım hız alanları bulunmuş olur.

Basınç Dağılımlarının Hesaplanması

Pervane kanadının sırtındaki ve yüzündeki basınç dağılımları Bernoulli denkleminde elde edilen aşağıdaki (4.33) denklem kullanılarak hesaplanır:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho (nD)^2} = \left[1 - \left(\frac{V_T \pm \frac{1}{2} V_G}{V_\infty} \right)^2 \right] \left(\frac{V_\infty}{nD} \right)^2 \quad (4.33)$$

Burada;

- C_p , boyutsuz basınç katsayısı
 p , hesap noktasındaki basınç
 p_∞ , bozulmayan akımdaki basınç
 ρ , suyun yoğunluğu
 n , shaft devri
 D , pervane çapı
 V_T , hesap noktasındaki toplam teğetsel hız
 V_G , hesap noktasında pervane kanadının emme ve basınç yüzleri arasındaki teğetsel hız farkı (kanat sırtı için (+), kanat yüzü için (-))
 V_∞ , nozullu pervaneye gelen akım hızıdır.

Pervanenin çalıştığı akım viskoz ise, viskozite etkileri için düzeltme aşağıdaki şekilde yapılır:

$$\Delta C_p = 2\pi [\alpha (VCA - 1.0) + \alpha_o (VCA.VCC - 1.0)] \quad (4.34)$$

Burada;

- α , kanat giriş açısı ($\alpha = C_L/2\pi - \alpha_o$)
 α_o , sıfır kaldırma kuvveti açısı

VCA,VCC, pervane kanat kesitine etkiyen kaldırma kuvveti için boyutsuz düzeltme katsayılarıdır (Burrill,1944).

ΔC_p düzeltilmesi C_p 'ye şu şekilde yansıtılır: Kanadın emme yüzü için giriş ucundan itibaren kortun dörtte üçüne ve basınç yüzü için de kortun dörtte birine üniform olarak eklenir.

Nozul yüzeyindeki basınç dağılımının hesabı, pervanede olduğu gibi Bernoulli denklemi kullanılarak yapılır. Ancak viskoz etkilerin hesabında basınç düzeltme katsayıları nozul kesiti için aşağıdaki şekilde olur:

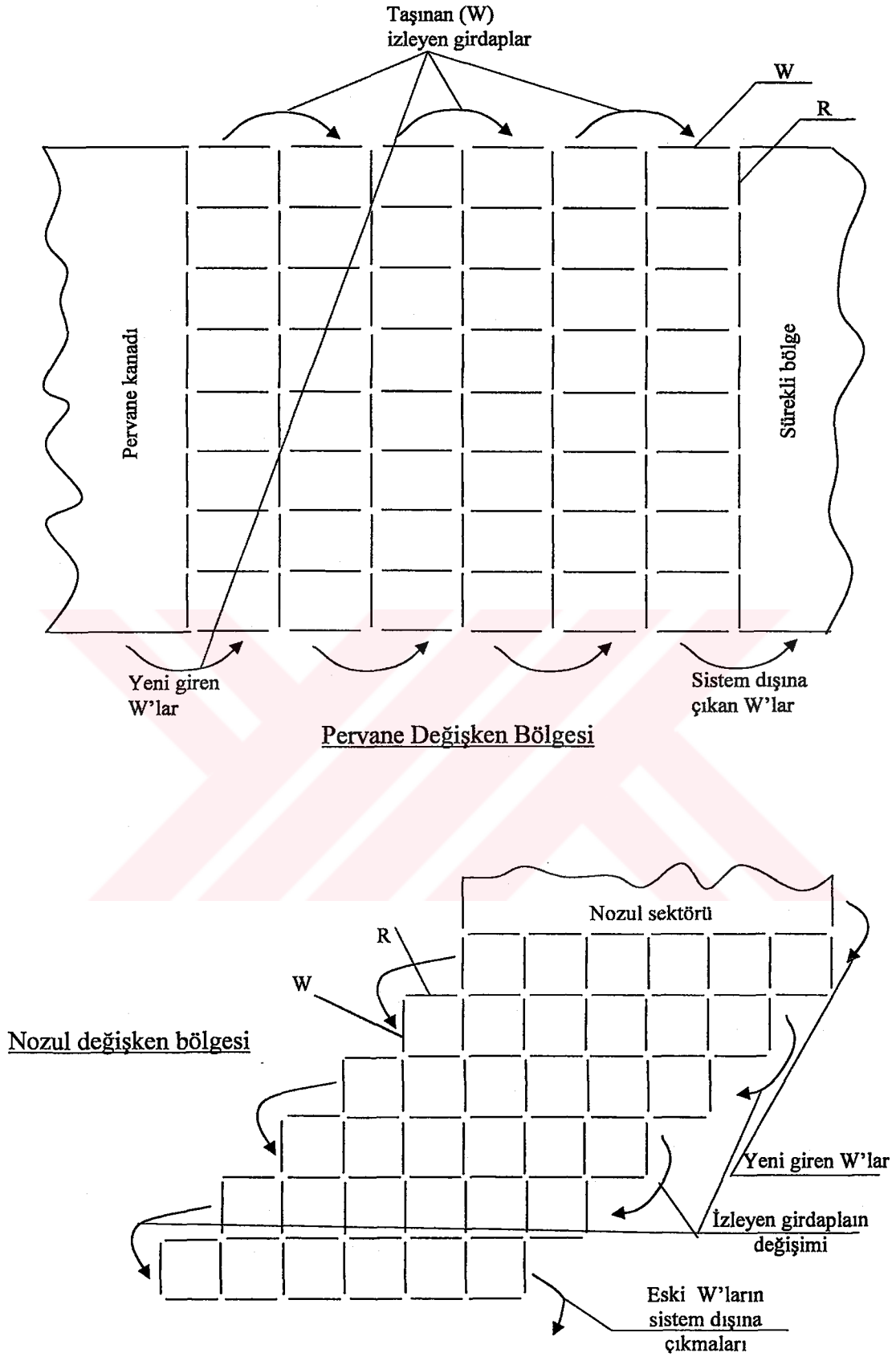
$$\Delta C_p = 2\pi [\alpha_o (VAD - 1.0) + \alpha_o (VAD.VCD - 1.0)] \quad (4.35)$$

Denklemde VAD, VCD, nozul kesitine etkiyen kaldırma kuvveti için boyutsuz düzeltme katsayılarıdır (Burrill,1944).

4.2.4 Değişken Serbest Girdap Bölgelerinin Yenilenmesi

Mevcut kanat analiz pozisyonunda, anahtar kanat etrafındaki akım hesapları yukarda anlatılan üç adımda tamamlandıktan sonra, kanat üzerindeki akım değişikliklerinin saklanması amacıyla, anahtar kanat izleyen kenarını takip eden değişken bölgedeki girdap dağılımları yenilenir. Şöyle ki, izleyen girdap elemanlarının şiddetleri bir basamak geriye taşınır (Şekil 4.6). Değişken bölgedeki her bir yarıçapta, pervane anahtar kanadının son şeritindeki izleyen girdap elemanları sisteme katılırken, değişken bölgenin son şeritindeki 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.

Pervanede olduğu gibi nozul değişken girdap bölgesi için de yeni girdap dağılımları bulunur (Şekil 4.6). Bunun amacı da mevcut pervane analiz pozisyonunda nozul üzerindeki akım değişiklikleri için bir kayıt görevini gördürmektir.



Şekil 4.6 Değişken serbest girdap bölgelerinin yenilenmesi

4.2.5 Nozullu Pervane Kavitasyon Analizi

Pervane Kanadında Tabaka Kavitasyonunun Tespiti ve Analizi

Pervane kanatları üzerindeki tabaka kavitasyonunun incelenmesi tüm kanat kesitleri için bağımsız olarak gerçekleştirilir ve aşağıda tanımlanan şekliyle kavitasyon sayısına dayalı olarak yapılır. Tabaka kavitasyonunun kanat giriş ucundan itibaren başladığı ve kanat boyunca yayıldığı kabul edilir. Basınç değeri, kavitasyon çekirdeğinin patlamasına elverişli olacak minimum değerine indiği zaman kavitasyon olayı başlar. Bu şart aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

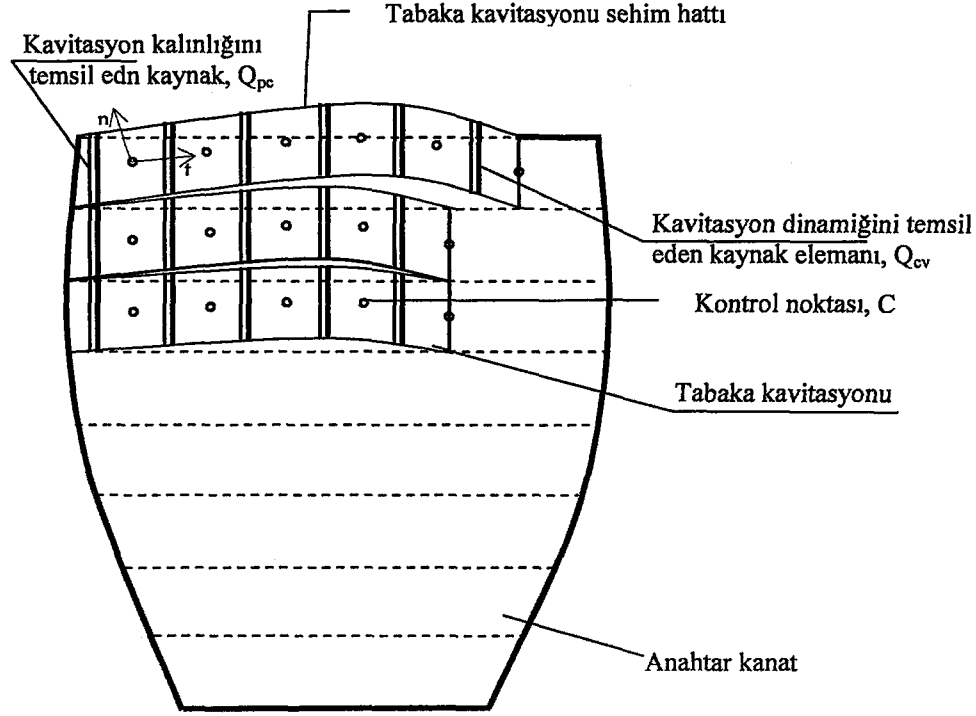
$$C_p + \sigma + \frac{4t_s}{\rho(nD)^2 R_b} < 0 \quad (4.36)$$

Burada;

$$\sigma = \frac{p_a + \rho gh - p_c}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} = \frac{1013 \times 96.2 + \rho \cdot g \cdot (h - r \cdot \cos \theta) - p_c}{\frac{1}{2} \rho (nD)^2}$$

- σ , kavitasyon sayısı
- C_p , boyutsuz basınç katsayısı
- t_s , suyun yüzey gerilmesi
- R_b , kavitasyon çekirdeği yarıçapı
- ρ , suyun yoğunluğu
- g , yerçekimi ivmesi
- P_a , atmosfer basıncı
- n , pervane devir sayısı
- D , pervane çapı
- h , shaft derinliği
- r , kontrol noktasının yarıçapı (boyutlu)
- θ , kontrol noktasının konum açısı
- p_c , suyun kritik buharlaşma basıncıdır.

Şekil 4.7’de pervane anahtar kanadı üzerinde oluşması olası tabaka kavitasyonu ve onun kaynak dağılımlarıyla modellenmesi görülmektedir.



Şekil 4.7 Pervane tabaka kavitasyonu kaynak modeli

Tabaka kavitasyonu yüzeyinde kuvvet dengesine dayalı dinamik sınır şartı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$-C_p = \sigma + \frac{4t_s}{\rho(nD)^2 R_{loc}} \quad (4.37)$$

Burada R_{loc} , kavitasyonun eğrilik yarıçapıdır.

Ancak hiçbir zaman bir tabaka kavitasyonu tam denge halinde değildir. İç kısımdaki basınç yüzey gerilmesinden daha fazla ise kavitasyon genişler, tersi durumunda da küçülür. Kavitasyonun deformasyonu için makul basınç farkı aşağıdaki şekilde verilebilir:

$$\frac{\Delta p}{\rho} = \left[-C_p - \sigma - \frac{4t_s}{\rho(nD)^2 R_{loc}} \right] (nD)^2 \quad (4.38)$$

Kavitasyon ilk tespit edildiği zaman eğrilik yarıçapının (R_{loc}) sonsuz olduğu kabul edilir. Analizin ileri aşamalarında ise kort yönünde eğrisel yüzeye sahip bir kesit olarak düşünülür.

Tabaka kavitasyonunun dinamik özellikleri, pervane kanadının tabaka kavitasyonu ile kaplı kısmına yayılan ilave kaynak dağılımlarıyla (Q_{cv}) modellenir (Şekil 4.7). Kaynakların şiddetleri, kavitasyonla kaplı bölgedeki tüm kontrol noktaları için yüzeydeki dinamik sınır şartı sağlanacak şekilde yazılan lineer denklem sisteminin çözümünden elde edilir. Her bir kontrol noktası için aşağıdaki denklem yazılır:

$$\frac{1}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{1}{r_i} \cdot \frac{dQ_{cv}}{dt} = \frac{\Delta p}{\rho} \quad (4.39)$$

Burada r_i , kaynakla kontrol noktası arasındaki uzaklıktır.

Kavitasyon yüzeyinin normal yöndeki deformasyon hızı aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$V_{DEF} = \frac{1}{\Delta R \cdot V_{\infty}} \cdot \frac{dQ_{cv}}{dt} \quad (4.40)$$

Burada;

ΔR , Kavitasyon şeritinin genişliği,

V_{∞} , Hesap yapılan kanat kesitine gelen bileşke akım hızıdır.

Kanat analiz pozisyonları arasındaki Δt zaman periyodunda deformasyon hızı V_{DEF} 'in sabit kaldığı kabul edilerek, peryot sonunda kavitasyon kalınlığı aşağıdaki şekilde hesaplanır:

$$T_{ef} = T_{c(j-1)} + V_{DEF} \cdot \Delta t \quad (4.41)$$

Tabaka kavitasyonu orjinal kanat sehim hattını değiştirir. Böylece analiz edilecek bir sonraki kanat pozisyonundaki kinematik sınır şartını da etkiler. Bunun için tabaka kavitasyonu kalınlığı kaynaklarla modellenerek kaynak şiddetleri aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$Q_{pc} = V \cdot \Delta R \cdot \Delta X \cdot \frac{dT_c}{dx} \quad (4.42)$$

Burada;

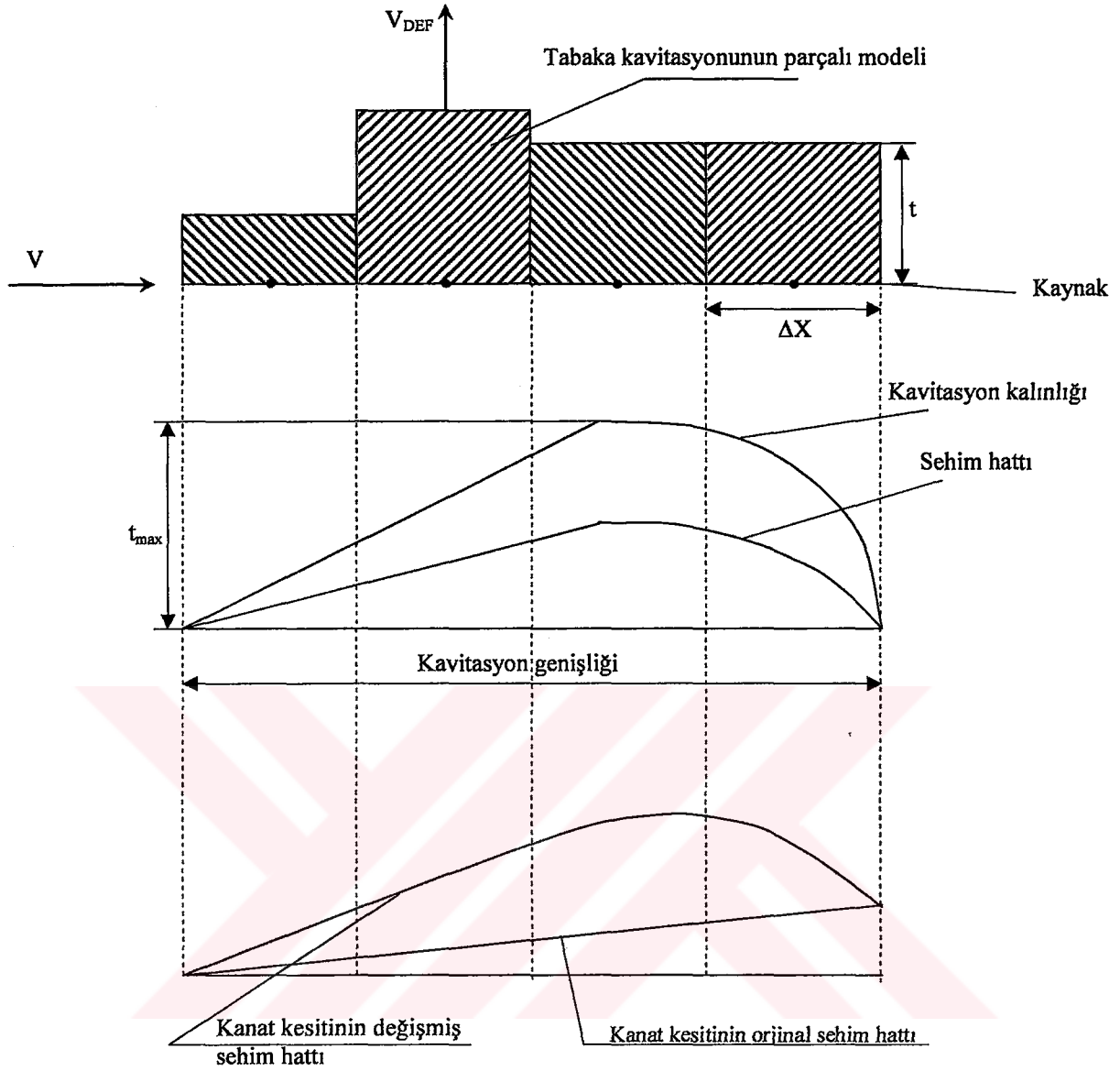
V , Kaynak elemanına gelen akım hızı

ΔR , Kort yönündeki şeritin radyal genişliği

ΔX , Tabaka kavitasyonu hacim elemanının boyu ve

T_c , kavitasyon kalınlığıdır.

Şekil 4.8'da parçalı kavitasyon kalınlıkları, bunların yuvarlatılmaları ve pervane sehim hattına etkileri görülmektedir.



Şekil 4.8 Parçalı kavitasyon kalınlıklarının yuvarlatılması ve kanat kesitine etkileri

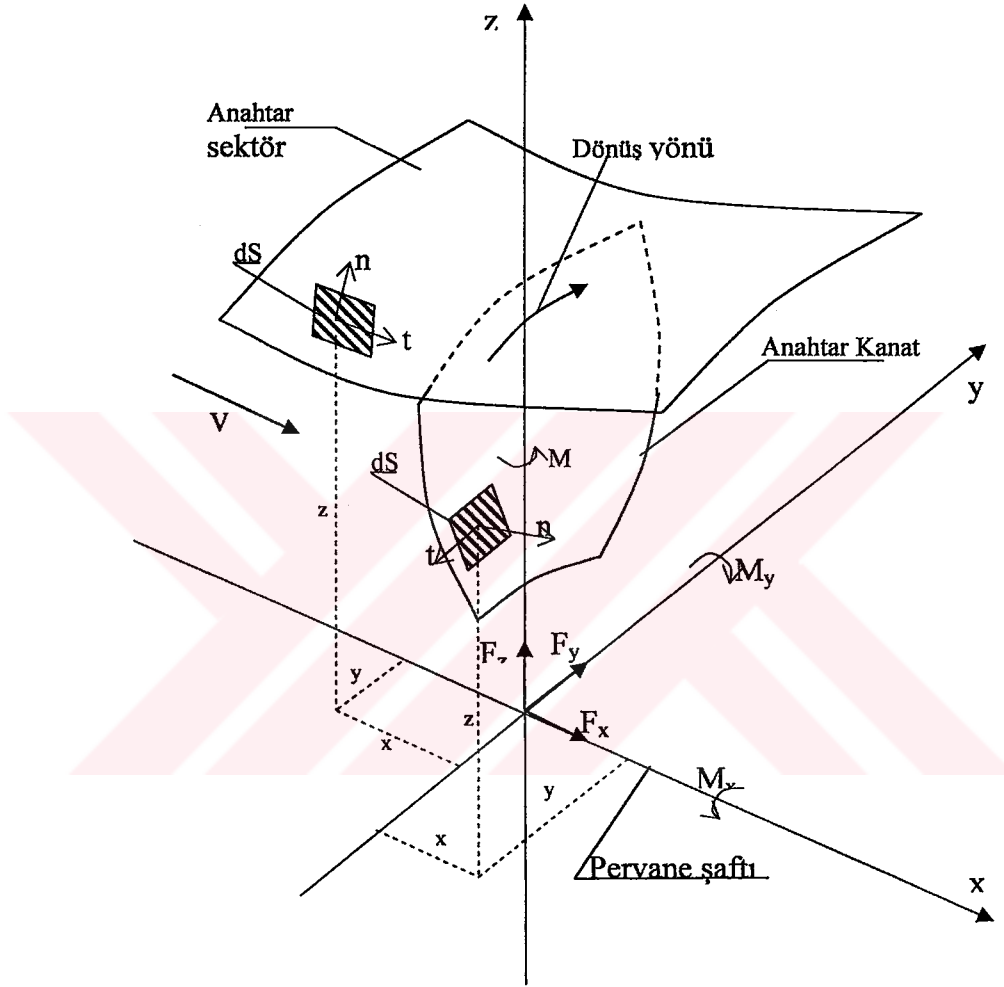
Nozul Yüzeyinde Tabaka Kavitasyonunun Tespiti ve Analizi

Nozul üzerindeki kavitasyon analizi de pervaneye benzer şekilde yapılır. Kavitasyon nozul yüzey geometrisinde meydana gelen bozulma olarak ele alınır ve bir sonraki kanat analiz pozisyonunda nozul anahtar sektörü kaldırıcı yüzeyindeki kinematik sınır şartını etkiler. Bununla beraber nozul üzerinde kendisinden kaynaklanan kavitasyon olayının görülmesi çok nadirdir.

Nozul yüzeyinde oluşması muhtemel tabaka kavitasyonu kalınlıklarının modellenmesinde kullanılan kaynak elemanı (Q_{dc}) şiddetleri de pervanede olduğu gibi denklem (4.42) ile hesaplanır. Burada tek fark, nozul kaldırıcı yüzeyinde kaynağa gelen akım hızı pervane dönmesini içermez.

4.2.6 Nozullu Pervane Üzerindeki Kuvvet ve Moment Bileşenlerinin Hesaplanması

Herbir kanat pozisyonunda pervane anahtar kanadı üzerindeki kuvvet ve moment bileşenlerinin hesaplanmaları, kanat yüzeyindeki basınç dağılımlarının integrasyonu ile yapılır (Şekil 4.9). Bunun için daha önce hesaplanan basınç dağılımları kullanılır. Pervane yüzeyindeki hiçbir noktada basıncın, kritik değerin altına inmeyeceği kabul edilir.



Şekil 4.9 Pervane anahtar kanadına ve nozul anahtar sektörüne etkiyen kuvvet ve moment bileşenleri

Anahtar kanat üzerindeki kuvvet ve moment bileşenleri aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

$$\begin{aligned}
 F_{sx} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot n_x + C_D \cdot t_x] ds \\
 F_{sy} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot n_y + C_D \cdot t_y] ds \\
 F_{sz} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot n_z + C_D \cdot t_z] ds \\
 M_{sx} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot (n_z \cdot y - n_y \cdot z) + C_D \cdot (t_z \cdot y - t_y \cdot z)] ds \\
 M_{sy} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot (n_x \cdot z - n_z \cdot x) + C_D \cdot (t_x \cdot z - t_z \cdot x)] ds \\
 M_{sz} &= -\frac{1}{2} \rho (nD)^2 \int_S [\Delta C_p \cdot (n_y \cdot x - n_x \cdot y) + C_D \cdot (t_y \cdot x - t_x \cdot y)] ds
 \end{aligned} \tag{4.43}$$

Burada;

ρ , Suyun yoğunluğu

n , Pervane devri

ΔC_p , Emme ve basınç kenarları arasındaki basınç 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 alanıdır.

Kanat kesit direnç katsayıları için aşağıdaki formül kullanılır, Burrill (1944):

$$C_D = \frac{2.D}{(3.46 \log R_e - 5.6)^2} - \frac{900}{R_e} + 0.1 \left(\frac{t}{c}\right)^2 + 0.01 \left(\frac{t}{c}\right) \tag{4.44}$$

Burada;

R_e , kanat kesitinin Reynold sayısı

$\frac{t}{c}$, boyutsuz maksimum kesit kalınlığıdır.

Yukarda pervane anahtar kanadı için yapılan işlemler benzer şekilde nozul anahtar sektörü için de gerçekleştirilir (Şekil 4.9). Ancak nozul kesit direnç katsayıları aşağıdaki formülünden hesaplanır, Oosterveld (1970):

$$C_{DD} = \left[1 + 2 \cdot \left(\frac{t}{c} \right)^2 \right] \frac{2 \cdot D}{(3.46 \log R_e - 5.46)^2} - \frac{900}{R_e} \quad (4.45)$$

Pervane şaftına gelen toplam kuvvet ve moment bileşenleri ise aşağıdaki formüllerle hesaplanır:

x , y ve z kuvvet bileşenleri,

$$\begin{aligned} F_{px} &= \sum_{i=1}^Z F_{sx}^i \\ F_{py} &= \sum_{i=1}^Z (F_{sz}^i \cdot \cos \theta + F_{sy}^i \cdot \sin \theta) \\ F_{pz} &= \sum_{i=1}^Z (F_{sz}^i \cdot \sin \theta - F_{sy}^i \cdot \cos \theta) \end{aligned} \quad (4.46)$$

x , y ve z moment bileşenleri,

$$\begin{aligned} M_{px} &= \sum_{i=1}^Z M_{sx}^i \\ M_{py} &= \sum_{i=1}^Z (M_{sz}^i \cdot \cos \theta + M_{sy}^i \cdot \sin \theta) \\ M_{pz} &= \sum_{i=1}^Z (M_{sz}^i \cdot \sin \theta - M_{sy}^i \cdot \cos \theta) \end{aligned} \quad (4.47)$$

Burada;

Z , Pervane kanat sayısı

θ , kanat pozisyon açısı, $\theta = \varphi + 360 \cdot (i-1) / Z$

φ , pervane pozisyon açısıdır.

Nozulun tamamına etkiyen kuvvet ve moment bileşenlerinin hesaplanmasında da yukarıda pervane için verilen aynı denklemler kullanılabilir (Glover and Szantyr, 1989).

4.2.7 Göbek Etkisinin Hesaplara Katılması

Bu bölümde, yukarıda anlatılan kaldırıcı yüzey analiz metoduna göbek etkisinin de dahil edilerek metodun geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bunun için Bölüm 4.1.1’de nozullu pervane dizaynında anlatılan göbek geometrisinin aksenal simetrik yüzey girdap dağılımlarıyla modellendiği bir yöntem kullanılır. Orada anlatıldığı gibi yüzey girdap metodunda, akışkanın viskoz olmadığı ve aksenal simetrik hız alanına sahip olduğu kabul edilir. Göbek geometrisi de aksenal simetrik seçilerek, yüzeyine yayılan halka girdap dağılımlarıyla temsil edilir. Sayısal çözüm için göbek geometrisi elemanlara ayrılarak eleman ortaları kontrol noktası seçilir. Parçalı yapıdaki göbek halka girdap sisteminde girdap elemanlarının değerleri, göbek üzerindeki tüm kontrol noktalarında Dirichlet sınır şartı sağlanacak şekilde oluşturulan lineer denklem sisteminin çözülmesiyle bulunur. Dirichlet sınır şartı göbek yüzeyindeki teğetsel hızların sıfır olmasını ifade eder ve aşağıdaki şekildedir:

$$-\frac{1}{2}\gamma(s_m) + \int \gamma(s_n)K(s_m, s_n)ds_n + U_a \cdot \cos \beta_m + U_r \cdot \sin \beta_m = 0 \quad (4.48)$$

Burada m , kontrol noktasının bulunduğu elemanı; n , halka girdabın bulunduğu elemanı; γ , halka girdap yoğunluğunu; U_a ve U_r , kontrol noktasına gelen akımın aksenal ve radyal bileşenlerini; β_m ise, kontrol noktasının bulunduğu elemanın eğimini gösterir.

Göbek halka girdap modelinde indüklenmiş hızlar Biot-Savart kanunu uygulanmak suretiyle bulunabilir. Ancak Küchemann ve Weber (1953) bir halka girdabın indüklediği hızların hesabı için eliptik integralleri kullanarak basit ifadeler verir ki bu ifadeler, hızlı hesaplama için çok daha uygundur. δu_a^r ve δu_r^r , aksenal ve radyal hız bileşenlerini göstermek üzere, silindirik koordinatlarda (x_n, r_n) konumunda yerleştirilmiş birim şiddetteki bir halka girdabın (x_m, r_m) kontrol noktasında indüklediği hız bileşenleri aşağıdaki şekilde verilir:

$$\delta u_a^r = -\frac{1}{2\pi r_n \sqrt{x^2 + (r+1)^2}} \left\{ K(x) - \left[1 + \frac{2(r-1)}{x^2 + (r-1)^2} \right] E(k) \right\} \quad (4.49)$$

$$\delta u_r^r = \frac{x/r}{2\pi r_n \sqrt{x^2 + (r+1)^2}} \left\{ K(x) - \left[1 + \frac{2r}{x^2 + (r-1)^2} \right] E(k) \right\} \quad (4.50)$$

Burada x ve r , boyutsuz koordinatlardır ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$x = \frac{x_m - x_n}{r_n} \quad (4.51)$$

$$r = \frac{r_m}{r_n}$$

$K(k)$ ve $E(k)$, sırasıyla birinci ve ikinci tip eliptik integrallerin toplamıdır ve Lewis (1991) tarafından bir çizelge şeklinde verilmiştir (Ek 2). Eliptik katsayı k ,

$$k = \sqrt{\frac{4r}{x^2 + (r+1)^2}} \quad (4.52)$$

dır.

Üniform akım durumunda göbeği modelleyen girdap elemanlarının şiddetleri $\gamma(s_n)$ belirlendikten sonra nozul girişindeki bir noktada göbek halka girdap sisteminin indüklediği eksenel hız bileşeni aşağıdaki şekilde bulunur:

$$\frac{u_a}{V_s} = \int \delta u'_a \gamma(s_n) ds \quad (4.53)$$

Burada V_s , üniform akım hızı ve $\delta u'_a$, denklem (4.49)'da verilen birim halka girdabın indüklediği eksenel hızdır.

Nozul girişinde hesaplanan indüklenmiş hızlar, nozullu pervaneye gelen akım alanına eklenerek yeni iz dağılımları bulunur. Artık yukarıda anlatılan kaldırıcı yüzey analiz metodunda bu iz dağılımları kullanılarak hesaplar yapılır. Böylece göbek etkisi, kaldırıcı yüzey metoduna, nozul ve pervane kanat kalınlık etkilerine benzer şekilde, tüm hesaplarda sabit kalacak bir düzeltme şeklinde dahil edilmiş olur.

5. NOZULLU PERVANE DİZAYN VE ANALİZ UYGULAMALARI

Bu bölümde, Bölüm 4'te sunulan nozullu pervane dizayn ve analiz yöntemlerine örnek uygulamalar yapılacaktır. Nozullu pervane dizaynı kapsamında nozullu pervane dizaynında önemli bir aşama olan nozul ve göbek analizindeki hesap prosedürü ve örnek bir nozul ve göbek için analiz uygulamaları yapılacaktır. Bulunan sonuçlar FLUENT'ten bulunan sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Sonra pervane dizayn prosedürü sunulacaktır. Ayrıca her ikisinin birlikte düşünülmesiyle nozul, göbek ve pervanenin etkileşim içerisinde oldukları nozullu pervane dizayn prosedürü ve bu prosedürden geliştirilen Fortran programı kullanılarak yapılan örnek dizayn uygulaması sunulacaktır.

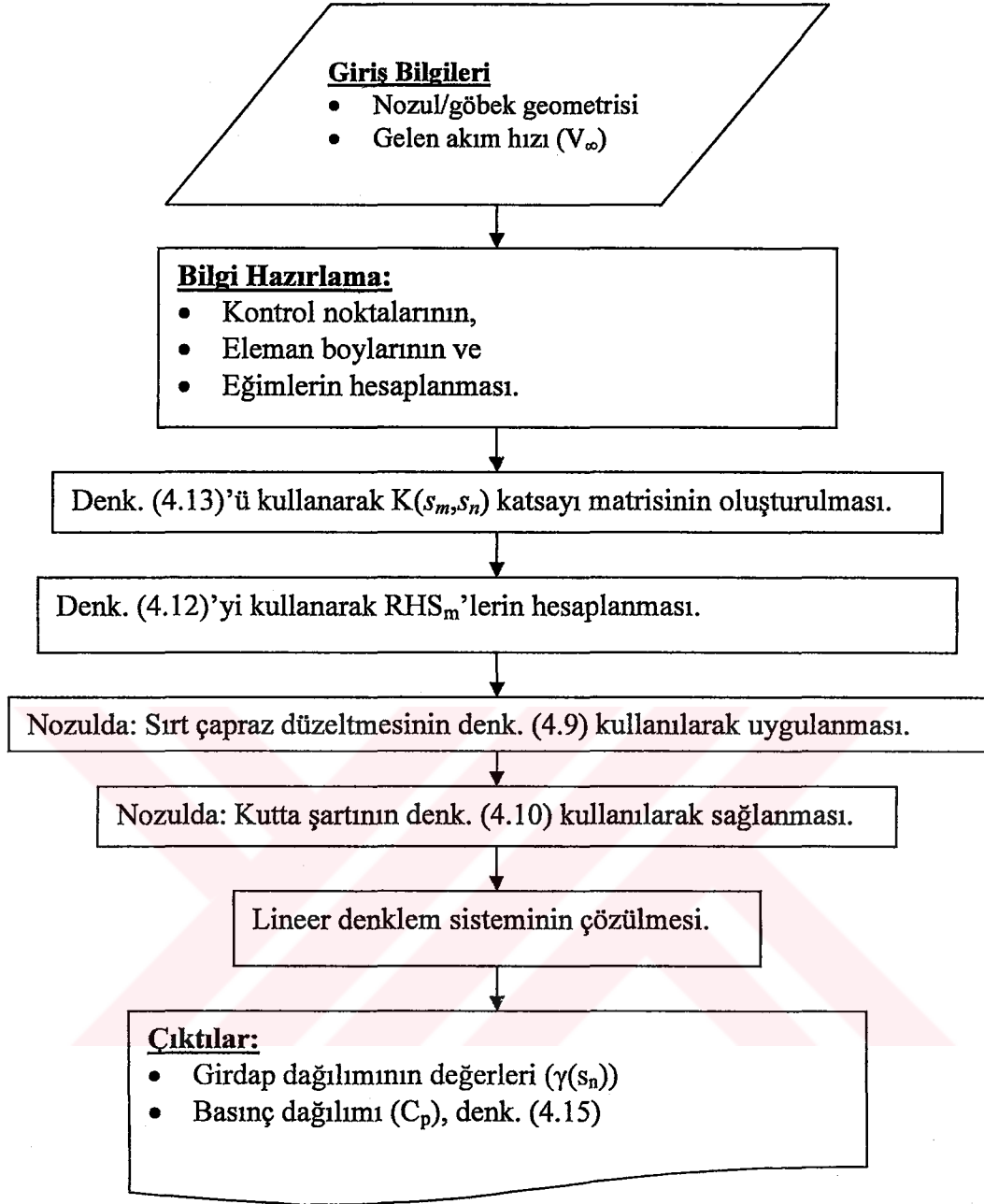
Nozullu pervane analizinde ise kaldırıcı yüzey ve CFD analiz metodlarında takip edilecek hesap sıraları verilip örnek iki nozullu pervane sistemi için her iki metodla kapsamlı analiz çalışmaları yapılarak bulunan sonuçlar şekillerle karşılaştırılacaktır. Daha sonra bir model nozullu pervane için kaldırıcı yüzey metodundan bulunan pervane karakteristikleri deneysel sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Ayrıca örnek iki nozullu pervane sistemi için Bölüm (4.2.7)'de sunulan yöntemle göbek etkisi incelenecektir.

Daha sonra nozul boyunun ve pervanenin nozul içerisindeki konumunun nozullu pervane karakteristiklerine etkilerinin örnek iki sistem için kapsamlı olarak incelendiği parametrik çalışmalar sunulacaktır.

5.1 Nozullu Pervane Dizaynı

5.1.1 Nozul ve Göbek Analiz Uygulaması

Verilen bir nozul/göbek geometrisi ile gelen akım şartında, göbek ve nozulun modellendiği halka girdap tabakalarının şiddetleri, Dirichlet sınır şartından yararlanılmak suretiyle oluşturulan lineer denklem sisteminin çözülmesiyle elde edilir. Daha sonra denklem (4.15) kullanılarak nozul ve göbek yüzeylerindeki basınç dağılımları bulunabilir. Burada kısaca anlatılan nozul ve göbek akım analizindeki hesap sırası Şekil 5.1'de daha açık olarak görülmektedir.

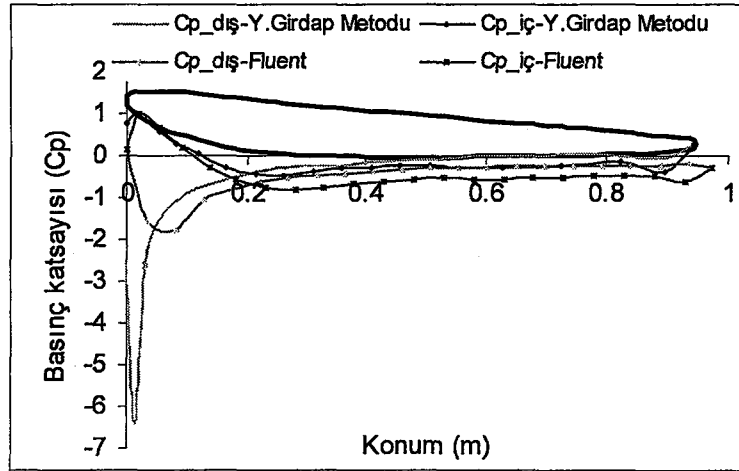


Şekil 5.1 Nozul/göbek analiz algoritması

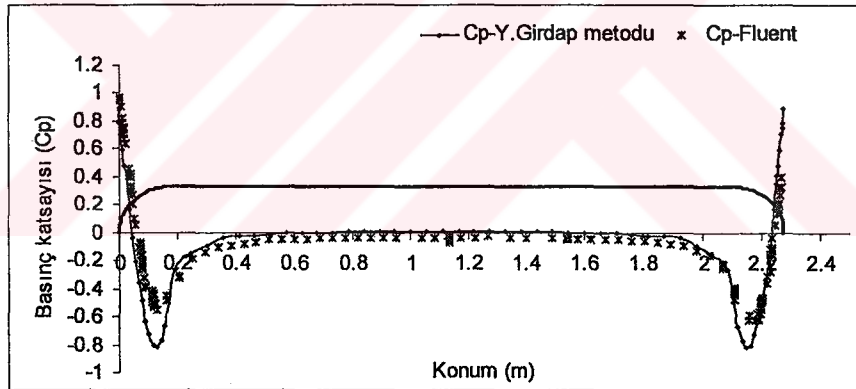
Nozul ve göbek etrafındaki akım analizi için Bölüm (4.1.1)'de anlatılan yöntemin sayısal uygulaması amacıyla Şekil 5.1'deki algorithmadan geliştirilen Fortran programı kullanılır. Bulunan sonuçlar sonlu hacimler metoduna dayalı bir akışkanlar mekaniği programı olan FLUENT'den elde edilen sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Ayrıca göbek ve nozulun tek ve beraber bulundukları durumlar için aksenal akım hızı dağılımları da grafiklerle gösterilecektir. Bu amaçla $D = 1.95$ m. çapında bir römorkör pervanesi için dizayn edilen nozul ve göbek geometrileri kullanılır. Nozul profil kesiti için NSMB Nozul No. 19-A kullanılarak nozul

boyu $DC = 0.5D$ alınır. Göbek geometrisi ise, pervane çapına eşit uzunlukta bir silindirin uçlarına birer yarım küre ilave edilerek oluşturulur. Silindir ve kürelerin çapları $0.167D$ 'dir.

Şekil (5.2) ve (5.3)'te nozul ve göbek üzerinde yüzey girdap ve sonlu hacimler metodlarından elde edilen basınç dağılımlarının karşılaştırılmaları görülmektedir ($V = 1 \text{ m/s}$).



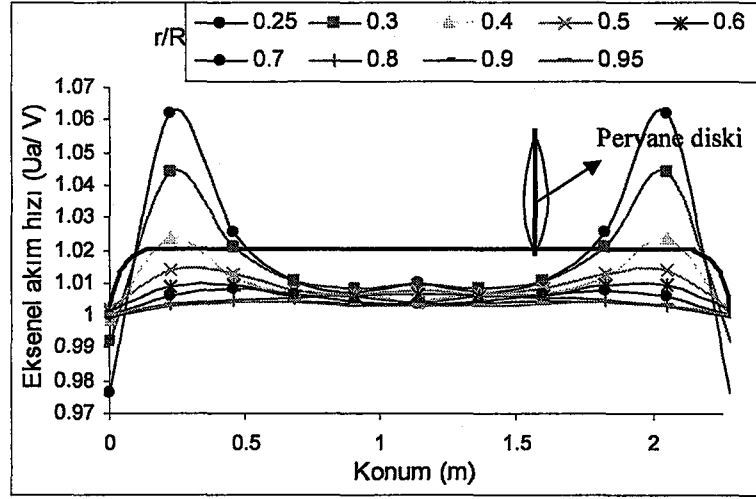
Şekil 5.2 FLUENT ve yüzey girdap metodlarından elde edilen nozul iç ve dış yüzeylerindeki basınç dağılımlarının (C_p) karşılaştırılması



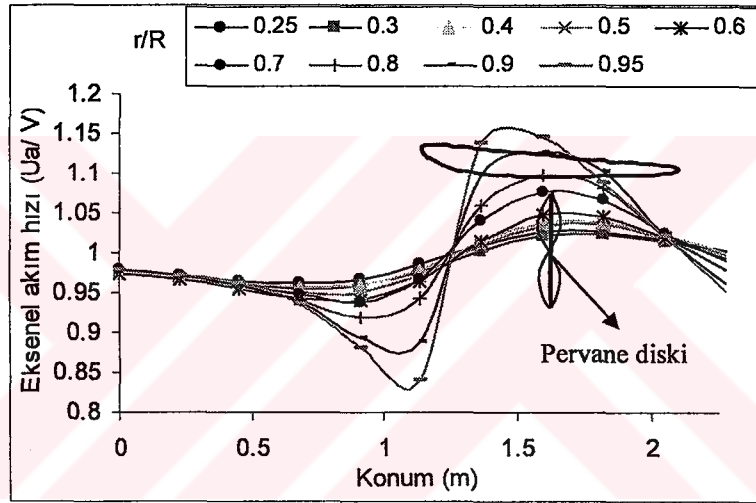
Şekil 5.3 FLUENT ve yüzey girdap metodlarından elde edilen göbek yüzeyindeki basınç dağılımlarının (C_p) karşılaştırılması

Şekillerden görüldüğü üzere sonlu hacimler ve yüzey girdap metodlarından bulunan sonuçlar oldukça iyi bir uyum göstermektedir.

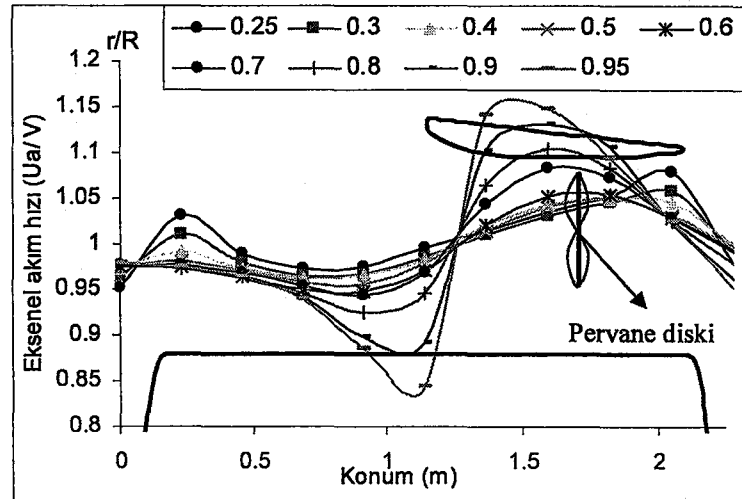
Şekil (5.4-6)'da ise göbek etrafındaki 9 radyal koordinatta sırasıyla göbekten kaynaklanan, nozuldan kaynaklanan ve göbek ile nozuldan kaynaklanan eksenel akım hızlarının göbek boyunca değişimleri görülmektedir ($V = 1 \text{ m/s}$). (Grafiklerdeki nozul ve göbek geometileri sadece yatay ekseninde gerçek ölçülere sahiptirler.)



Şekil 5.4 Göbekten kaynaklanan aksenal akım hızları (U_a/V)



Şekil 5.5 Nozuldan kaynaklanan aksenal akım hızları (U_a/V)



Şekil 5.6 Nozul ve göbekten kaynaklanan aksenal akım hızları (U_a/V)

Yukardaki şekillerden açıkça görülebileceği gibi pervane düzleminde göbek yaklaşık 0 - 0.01, nozul 0 - 0.15 ve nozul ile göbek de 0.04 – 0.16 arasında gelen üniform akım hızında artışa neden olmaktadır. Buradan görülmektedir ki, pervane veya nozullu pervane dizaynında göbeğin etkisi çok az iken, nozulun etkisi oldukça fazla olmaktadır.

5.1.2 Pervane Dizaynı

Bölüm (3.2.4)'te teorisi verilen kaldırıcı hat metoduna göre Güner (1994) tarafından geliştirilen dizayn programı için gerekli giriş bilgileri aşağıdaki şekilde verilebilir:

- Gemi hızı, V_s (knot)
- Pervaneye iletilen güç, P_D (kw)
- Pervane devir sayısı, N (d/d)
- Pervane kanat sayısı, Z
- Pervane çapı, D (m)
- İz dağılımı, $(I-w)$
- Kanat alan oranı (BAR)

Pervane çapı D , $Bp-\delta$ diyagramlarından verimi maksimum yapacak şekilde bulunur. İz dağılımı ya deneysel sonuçlardan veya Güner'de (1994) verilen yöntemle bulunabilir. Dizayn edilecek pervane gerekli tork katsayısı K_{Q0} değerini sağlamalıdır:

$$K_{Q0} = \frac{33.55 P_D}{\left[\frac{ND}{10} \right]^3 \cdot D^2} \quad (5.1)$$

Kaldırıcı hat üzerindeki sirkülasyon dağılımı, 9 adet radyal koordinattaki girdap değerleri kullanılarak bilinmeyen A_n katsayılarının bağılısı olarak bir Fourier sinüs serisi ile ifade edilir. Seri normalde sonsuz elemanlı iken ilk dört beş terimden sonrasının değeri çok düşük olması sebebiyle ihmal edilebilir. Ancak bu hesaplamalarda lineer bir denklem sisteminin oluşması için radyal koordinat sayısı olan ilk 9 terim alınır. Pervane arkasındaki serbest girdap tabakalarının sebep olduğu indüklenmiş hızlar bağlı sirkülasyonun fonksiyonu olarak 9 yarıçapta Biot-Savart kanunu uygulanarak yazılır. Aynı zamanda bu indüklenmiş hızların hesabında kullanılan indüksiyon faktörleri de her bir yarıçapta ifade edilir. Oluşturulan bu denklem sistemi Burrill'in (1955-56) minimum enerji kaybı şartı kullanılarak çözülür. Bu şart aşağıdaki gibidir:

$$x_i \cdot \pi \cdot \tan \varepsilon_i = \text{sabit} \quad (5.2)$$

Burada $x_i = r_i / R$, i 'nci kesit yarıçapının boyutsuz radyal koordinatı; R , pervane yarıçapı ve α_i , helisel girdap tabakasının sonsuzdaki piç açısıdır.

Yani, pervanenin her kesitinden oluşan serbest girdap tabakalarının piçinin pervanenin çok gerisinde sabit kalması gerekir. Bu şart sağlanırsa pervane kanadı üzerindeki optimum sirkülasyon ve yük dağılımı sağlanmış, aynı zamanda da suya bırakılan enerji minimum, pervaneden elde edilecek itme ise maksimum yapılmış olur. Bu hesap yönteminde kanat kök ve ucundaki sirkülasyon değerleri sıfır kabul edilir.

Sirkülasyon dağılımı bulunduktan sonra, kaldırıcı hat boyunca alınan kontrol noktalarında aksel ve teğetsel indüklenmiş hız bileşenleri hesaplanır. Daha sonra her bir kesit için hidrodinamik piç açıları ve tork katsayıları hesaplanır. Göbekten pervane ucuna kadar hesaplanan tork katsayıları entegre edilerek kanadın toplam tork katsayısı bulunur. İşlem dizayn şartlarında gerekli tork katsayısı istenilen bir tolerans aralığında elde edilene dek hidrodinamik piç açısı değiştirilerek tekrar edilir.

İterasyon işlemi tamamlandıktan sonra (4.1.4)'de verilen pervane karakteristikleri hesaplanır ve pervane dizaynı tamamlanmış olur.

Şekil 5.7'de yukarıda anlatılan kaldırıcı hat dizayn yönteminin akış şeması görülmektedir.

Pervane kanat kort genişlikleri $c(x)$ ise aşağıdaki formülden bulunabilir;

$$\frac{c(x)}{D} = \frac{c'(x)}{Z} \cdot BAR \quad (5.3)$$

Burada BAR , pervane kanat alan oranı; $c'(x)$ ise herbir kanat kesiti için aşağıda verilmiştir:

$X=r/R$	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95	1.0
$C'(x)$	1.633	1.808	1.964	2.096	2.192	2.232	2.171	1.893	1.536	0.000

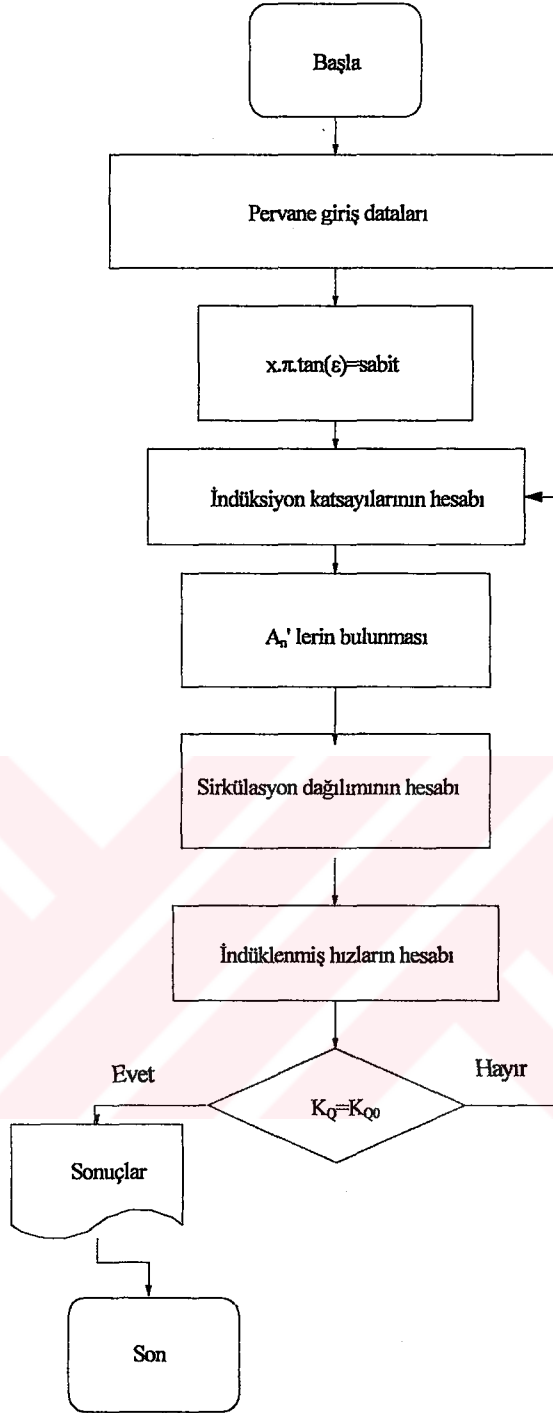
Herbir kesitteki direnç katsayıları ise aşağıdaki formülden yararlanılarak hesaplanabilir;

$$c_D(x) = 2 \left(1 + 2 \frac{t(x)}{c(x)} \right) \left[1.89 + 1.62 \log \left(\frac{c(x)}{30 \cdot 10^{-6}} \right) \right]^{-2.5} \quad (5.4)$$

Bu formülde geçen maksimum kanat kesit kalınlığı, $t(x)$, aşağıdaki şekilde bulunabilir;

$$\frac{t(x)}{D} = (BTF - 0.003) \cdot (1 - x) + 0.003 \quad (5.5)$$

Burada BTF , kanat kalınlık katsayısıdır ve 0.0425 alınabilir, (Güner ve Atlar, 1994).



Şekil 5.7 Kaldırıcı hat dizayn yönteminin akış şeması

Yukarıdaki hesap prosedüründe pervane gerisindeki akım deformasyonunun etkisi dikkate alınmamıştır.

5.1.3 Nozullu Pervane Dizayn Uygulaması

Nozullu pervanenin dizaynı dört adımda aşağıdaki şekilde gerçekleştirilir;

İlk adımda: Nozul ve göbeğin pervane diskinde indükledikleri eksenel hız bileşenleri bulunarak hesaplara başlanır. Bu şekilde ilk yaklaşım olarak pervaneye gelen akım alanı bulunur.

İkinci adımda: Nozul ve göbek etkisi de dikkate alınarak bulunan pervaneye gelen akım durumunda pervaneyi modelleyen girdap hatlarının şiddetleri yukarıda (5.1.2)'de anlatıldığı şekilde bulunur.

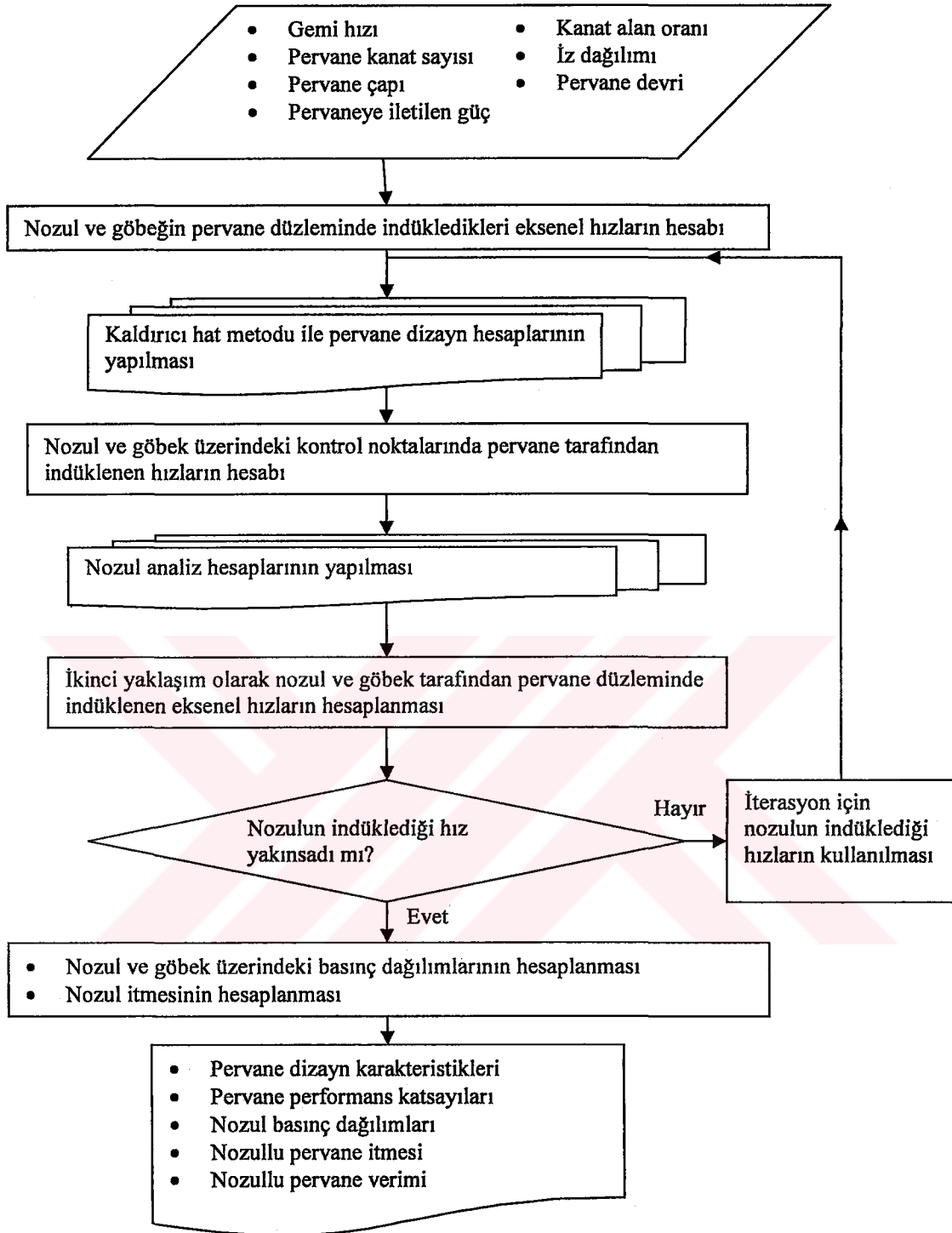
Üçüncü Adım: Pervane karakteristikleri (denk. 4.19-21.) hesaplanır, pervane girdap sisteminin nozul ve göbek üzerindeki kontrol noktalarında indükledikleri ortalama eksenel ve radyal hız bileşenleri bulunur. Ortalama hız bileşenlerinin hesabında (3.2.4)'ün sonunda anlatılan eliptik integrallerden yararlanılır.

Dördüncü Adım, Nozul ve göbeği modelleyen girdap elemanlarının (γ_{sm}) şiddetleri ikinci yaklaşım olarak bulunur. Girdap şiddetlerinin belirlenmesiyle, yüzeylerdeki basınç dağılımları (denk. 4.15)ve nozul performans katsayıları (denk.4.26-27)hesaplanır.

Yukarıda anlatılan dört adım, nozulun pervane üzerinde indüklediği hızlar verilen bir tolerans aralığında yakınsayana kadar tekrar edilir. Yakınsama sağlandıktan sonra nozul ve göbek üzerindeki basınç dağılımları ve performans katsayıları bulunur. Pervanede de, her yarıçapta değişken hidrodinamik piç açıları ve pervane optimum yük dağılımı bulunur. Aynı zamanda pervane karakteristik katsayıları da hesaplanarak nozullu pervane dizaynı tamamlanır.

Bundan sonraki aşamada kesit kort uzunlukları (denk. 5.3), maksimum kesit (denk. 5.5) ve sehim kalınlıkları gibi pervane geometrisi ise kolayca hesaplanabilir.

Şekil 5.8'de bir nozullu pervane sistemi için yukarıda anlatılan dizayn metodunun algoritması görülmektedir.



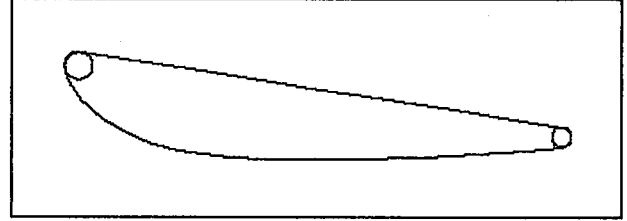
Şekil 5.8 Nozullu pervane dizayn algoritması

Bölüm (4.1)'de anlatılan nozullu pervane dizayn yönteminin sayısal uygulaması için Şekil 5.8'de verilen algorithmadan geliştirilen Fortran programı kullanılacaktır. Bu amaçla aşağıda verilen dizayn şartlarında bir römorkör için nozullu pervane dizaynı yapılarak bazı pervane karakteristiklerinin pervane çapı boyunca değişimleri grafiklerle gösterilecektir. Daha sonra dizayn edilen nozullu pervanenin itme katsayısı (K_T), tork katsayısı (K_Q) ve verim (η)

değerleri, Glover ve Szantyr'ın (1989) kaldırıcı yüzey analiz metodundan bulunan sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

Pervane Bilgileri

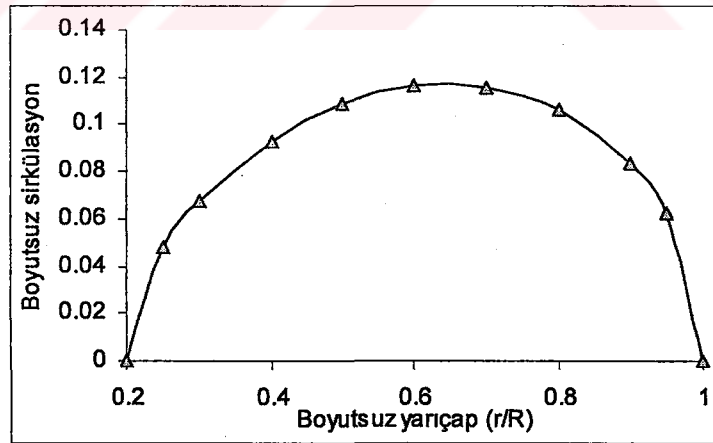
- Pervane çapı, $D = 1.95$ m
- Pervane devri, $N = 260$ d/d
- Kanat sayısı, $Z = 4$
- Gemi hızı, $V = 5.8$ knot
- Piç/Çap oranı $(P/D)_{ort} = 1.1205$
- Şaft derinliği, $H = 3.5$ m
- İz katsayısı $(1-W) = 0.850$
- Nozul Boyu (DC) = 0.975 m
- Pervane ile nozul arasındaki açıklık = 0.005 m
- Pervanenin nozul içerisindeki konumu = $0.5DC$



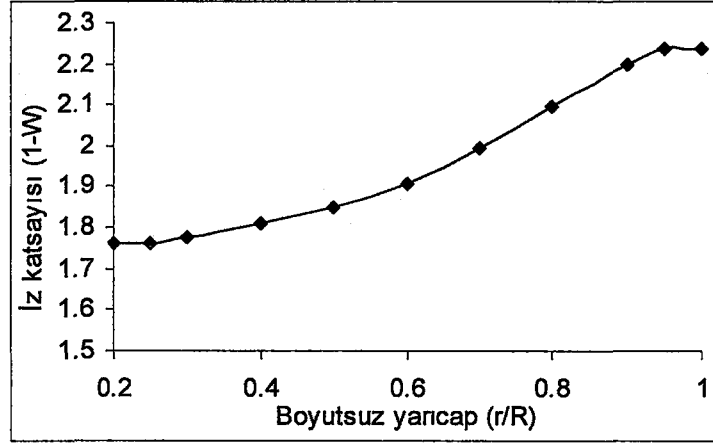
Şekil 5.9 NSMB Nozul no. 19-A kesit

Nozul profili için Şekil 5.9'da görülen kesit kullanıldı.

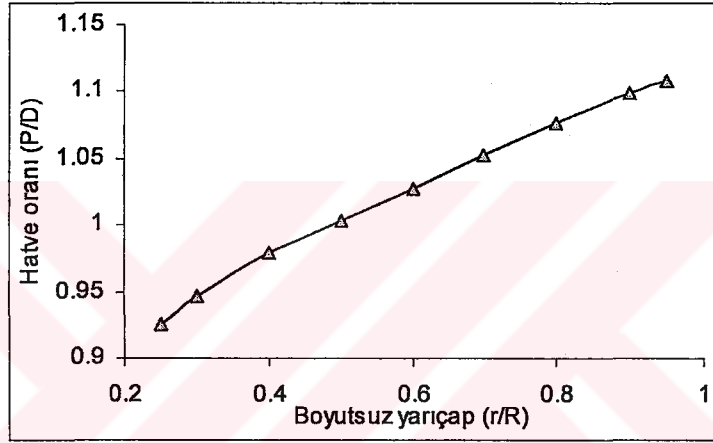
Aşağıdaki şekillerde dizayn edilen nozullu pervane için boyutsuz sirkülasyon (G), pervane diski üzerindeki iz dağılımı ($1-W$), hatve oranı (P/D), kaldırma kuvveti katsayısı (C_L) ile pervane tarafından yine pervane diski üzerinde indüklenmiş aksel ve teğetsel hızların çap boyunca dağılımları görülmektedir.



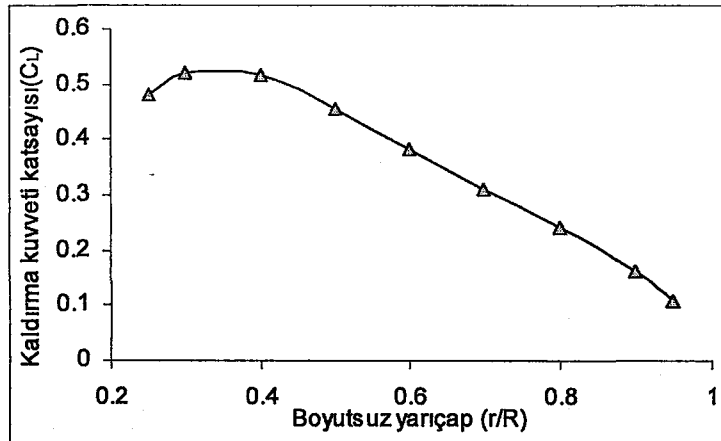
Şekil 5.10 Sirkülasyon dağılımı



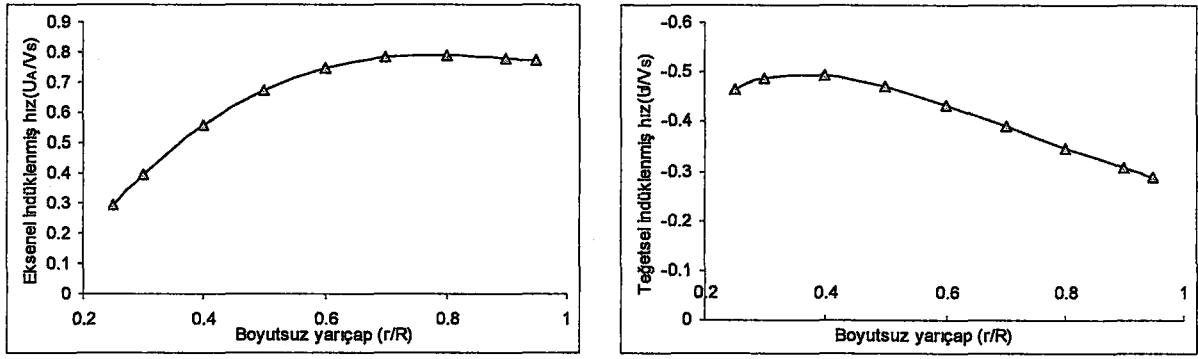
Şekil 5.11 Nozul içerisindeki iz dağılımı



Şekil 5.12 Hatve oranının (P/D) çap boyunca dağılımı



Şekil 5.13 Kaldırma kuvveti katsayısının (C_L) çap boyunca dağılımı



Şekil 5.14 Pervane tarafından indüklenmiş eksenel ve teğetsel hızların dağılımı

Çizelge 5.1'de nozullu pervane dizaynı için geliştirilen mevcut metod ve kaldırıcı yüzey analiz metodundan elde edilen temel pervane performans katsayılarının karşılaştırılması verilmektedir.

Çizelge 5.1 Sonuçların karşılaştırılması

	Mevcut dizayn metodu	Kaldırıcı yüzey analiz metodu
K_T	0.3132	0.2601
K_Q	0.0511	0.0525
η	0.541	0.544

Çizelge 5.1'den de görülebileceği gibi; pervanenin kaldırıcı hatlarla, nozul ve göbeğin de yüzey girdap dağılımlarıyla modellendiği mevcut metod ile dizayn edilen nozullu pervanenin performans katsayıları, kaldırıcı yüzey analiz metodu sonuçlarıyla uyumludur. Özellikle verimlerdeki uyum oldukça iyidir. İtme ve tork katsayılarındaki farklar da kabul edilebilir düzeydedir. Buradan anlaşılmaktadır ki geliştirilen mevcut metod ile göbek ve nozul etkilerinin iteratif olarak hesaba katılmasıyla son derece gerçekçi ve hızlı bir şekilde nozullu pervane dizaynı yapılabilir.

5.2 Nozullu Pervane Analizi

5.2.1 Kaldırıcı Yüzey Metodu ile Nozullu Pervane Analizi

Bölüm (4.2)'de anlatılan yönteme uygun olarak yazılan bilgisayar programı ile nümerik işlemler aşağıdaki sıra ile gerçekleştirilmiş ve analiz sonuçları elde edilmiştir:

Birinci Adım: Anahtar kanat başlangıç konumunda iken ($\phi = 0$), nozullu pervaneye gelen ortalama akıma göre nozul ve pervane kanatları üzerindeki kinematik sınır şartını ifade eden denklem (4.29) çözülerek girdap dağılımlarının değerleri bulunur ($\vec{\gamma}_{po}, \vec{\gamma}_{do}$). Ortalama akıma göre bulunan bu girdap dağılımları, daha sonra kaldırıcı yüzey modelin sürekli kısımlarının (pervane anahtar kanadı haricindeki kanatlar, nozul anahtar sektörü haricindeki sektörler ve serbest girdap sisteminin sürekli kısmında yani, pervane anahtar kanadı için değişken serbest girdap kısmının gerisinde kalan bölge ve diğer kanatlar için ise tüm serbest girdap yüzeyleri, nozulda da benzer şekilde...) indükledikleri hızların hesaplanmasında kullanılır. Bununla beraber, ($\vec{\gamma}_{po}$) ve ($\vec{\gamma}_{do}$), serbest girdap sisteminin değişken bölgelerinde de başlangıçta öngörü sağlar. Sonraki aşamalarda ise değişken bölgelerdeki girdaplar, akımın düzensiz olması nedeniyle kanat ve nozul üzerindeki süreksiz yük dağılımlarını yansıtacak şekilde değişir.

Bu aşamada nozul ve pervane kesitlerini modelleyen kaynak dağılımları da ortalama akıma göre hesaplanır ve ilerki tüm kanat analiz pozisyonlarında kullanılır. Dolayısıyla, kesit kalınlıklarının da düzensiz akımdan etkilenmedikleri kabul edilir.

İkinci Adım: Üniform olmayan akım hız alanında pervane 1.5 tam dönüş yapacak şekilde, 9.Z adet anahtar kanat pozisyonu için analiz yapılır. İlk 3.Z analiz pozisyonu hazırlık hesaplarıyla ilgilidir. Sonraki 6.Z analiz pozisyonu ise süreksiz basınç ve kuvvetlerin son analizlerini kapsar. Üniform olmayan akım hız alanının neden olduğu süreksizlik olayı kendini sadece, anahtar kanat ($\vec{\gamma}_p$), nozul anahtar sektörü ($\vec{\gamma}_d$) ile pervane ($\vec{\gamma}_{pv}$) ve nozul ($\vec{\gamma}_{dv}$) değişken serbest girdap bölgelerinde gösterir. Kaldırıcı yüzey modelinin kalan kısımları, tüm hesaplamalar boyunca, ($\vec{\gamma}_{po}$) ve ($\vec{\gamma}_{do}$) ile tanımlanan hidrodinamik yükleriyle kalırlar.

Kinematik sınır şartı, her bir analiz yapılacak kanat pozisyonunda iteratif olarak çözülür. İlk önce kinematik sınır şartı, sadece pervane anahtar kanadı için, nozul anahtar sektörünün etkilerini hesaba katmak amacıyla ($\vec{\gamma}_{do}$)'ler kullanılarak çözülür. Bu, anahtar kanattaki girdap dağılımlarının ($\vec{\gamma}_p$) hesabında ilk yaklaşımı verir. Daha sonra da kinematik sınır şartı, nozul anahtar sektörü için, pervane anahtar kanadı etkilerini hesaba katacak şekilde ($\vec{\gamma}_p$)'ler kullanılarak çözülür. Bu da nozul anahtar sektörü üzerindeki girdap dağılımlarının ($\vec{\gamma}_d$)

hesabında ilk yaklaşımdır. Bu işleme iterasyonlar arasındaki girdap dağılımı değerleri kabul edilebilir bir uygunlukta olana kadar devam edilir.

Üçüncü Adım: Uyumlu sonuçlar elde edildiğinde, pervane anahtar kanat yüzeyi ve nozul anahtar sektör yüzeyinde, denklem (4.33) kullanılarak basınç dağılımları hesaplanır. Denklem (4.36-42) kullanılarak kavitasyon analizi yapılır. Denklem (4.43-47) kullanılarak da nozul ve pervane üzerindeki kuvvet ve moment bileşenleri hesaplanır. Anahtar kanat veya nozul anahtar sektörü üzerinde tabaka kavitasyonu tespit edildiğinde, bir sonraki kinematik sınır şartına kaldırıcı yüzey geometrisinde değişme şeklinde dahil edilir.

Dördüncü Adım: Serbest girdap sisteminin değişken bölümündeki girdap dağılımları ($\vec{\gamma}_{pv}$) ve ($\vec{\gamma}_{dv}$) yenilenir. Yukarda anlatılan (2.,3. ve 4.) adımlardaki işlemler tüm analiz pozisyonları için tekrarlanır

Nozul anahtar sektörü, pervane anahtar kanadına yakın şeritlerden oluşur. Burada dikkat edilmesi gereken bir nokta, anahtar kanat hareketi doğrultusunda bir nozul anahtar sektör şeridini geçince, anahtar sektöre yeni bir şerit eklenir ve geride kalan bir şerit de dışarda bırakılır. Yani, anahtar sektör de anahtar kanatla beraber hareket eder.

Beşinci ve Son Adım: Üniform olmayan hız alanında tüm anahtar kanat analiz pozisyonları için işlem yapıldıktan sonra, pervane ve nozul üzerindeki kuvvet ve momentler hesaplanarak analiz prosedürü tamamlanır.

Yukarda beş adımda özetlenen kaldırıcı yüzey analiz prosedüründe takip edilecek işlem sırası daha açık olarak Şekil 5.15’de görülmektedir.

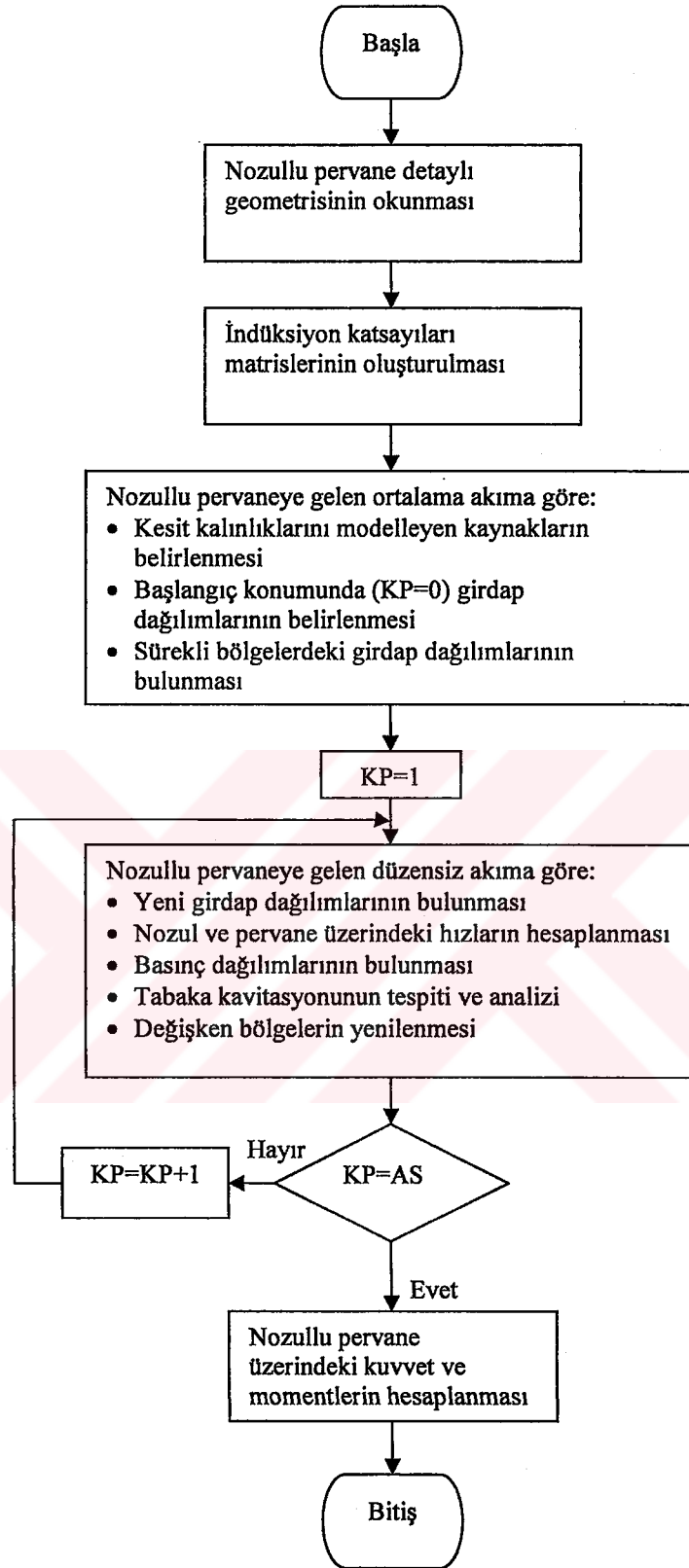
5.2.2 Nozullu Pervane CFD Analizi

Yukarıda anlatılan kaldırıcı yüzey metodunun yanısıra akışkan uygulamalarında oldukça gelişmiş bir paket program olan FLUENT kullanılarak da nozullu pervane sisteminin analizi yapılabilir. Üç boyutlu geometrisi bilinen bir nozullu pervane üzerinde veya etrafındaki basınç, hız dağılımları ile sistemin tamamına veya bir parçasına etkiyen kuvvet bileşenleri hesaplanabilir.

FLUENT programı bir akışkan problemini çözmek için “*sonlu hacimler metodunu*” kullanır. Yani, sınır koşulları verilen bir akışkan hacminin sonlu sayıda küçük ve birbirine komşu kontrol hacimlerinden oluştuğunu kabul eder. Akışkanın herhangi bir noktasındaki basınç, hız, sıcaklık vs. gibi özelliklerinin hesaplanabilmesi için tüm kontrol hacimlerinin herbirinin üzerinde yönetici kısmi diferansiyel denklemleri uygular. Bunlar momentum denklemleri ile

kütle ve enerjinin korunumunu ifade eden denklemlerdir. Kontrol hacimlerinde yazılan kısmi diferansiyel denklemlerin oluşturduğu ve genellikle lineer olmayan sistemlerin çözülmesiyle sonuca ulaşılır. FLUENT bu denklem sistemlerini, çözüm kullanıcı tarafından verilen tolerans aralığında yakınsayacak şekilde iterasyonla çözer. Yakınsama genellikle iki iterasyon arasındaki çözüm değerlerinin farkına bağlı uygulanır. Normalde tüm kontrol noktalarında denklemlerin tam olarak sağlanması gerçekleştirilemez ama önemli olan yeterli yakınsamanın sağlanmasıdır.





Şekil 5.15 Nozullu pervane kaldırıcı yüzey analiz prosedürünün akış şeması

Yukarıda basit mantığı anlatılan FLUENT programı ile nozullu pervane analizinde takip edilen sıra aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- CFD analizine hazırlık aşamasında nozullu pervane ve etrafındaki akım geometrileri Rhino veya başka bir çizim programı kullanılarak modellenir.
- Oluşturulan model GAMBIT'te meşlenir ve sınır koşulları tanımlanır (girişte hız, çıkışta basınç veya duvar vb.). Meşleme işleminde yüzey ve hacimler için uygun meş elemanları ve aralıkların seçilmesine dikkat edilir.
- Hazırlanan geometriler FLUENT'te çağrılır ve akışkan özellikleri ve sınır koşulları tanımlanır (akış modelleri, türbülans modelleri, akımın süreksizliği, referans hız ve basınç değerleri, sınırlardaki hız ve basınçlar, istenilen tolerans aralığı vs.).
- Gerekli yakınsama sağlanana dek yapılacak iterasyon sonucunda çözüme ulaşılır.
- Sonuç olarak, nozullu pervane üzerindeki hız ve basınç dağılımları ve sistemin bir parçasına veya tamamına etkiyen kuvvet ve moment bileşenleri bulunabilir.

5.2.3 Nozullu Pervane Analiz Uygulamaları

Bu bölümde üç değişik nozullu pervane sistemi için analiz uygulamaları sunulacaktır. İlk iki uygulamada farklı römorkörler için dizayn edilmiş nozullu pervaneler kullanılacaktır. Bu sistemler kaldırıcı yüzey ve sonlu hacimler (FLUENT) metodlarıyla farklı ilerleme katsayılarında ($J_A = \frac{V_A}{ND}$) analiz edilerek, dizayn şartlarında her iki metottan elde edilen nozullu pervane kanatları üzerindeki basınç dağılımları ve FLUENT'ten bulunan nozullu pervane çevresindeki akım hatları gösterilecektir. Daha sonra sistemlerin performans karakteristikleri farklı ilerleme katsayıları (J_A) için karşılaştırılacaktır.

Üçüncü uygulamada ise kaldırıcı yüzey metoduyla bir nozullu pervane modeli analiz edilerek, bulunan performans katsayıları deneysel sonuçlarla karşılaştırılacaktır.

Nozullu Pervane Analiz Uygulaması 1

Dizayn bilgileri (NPS 1)

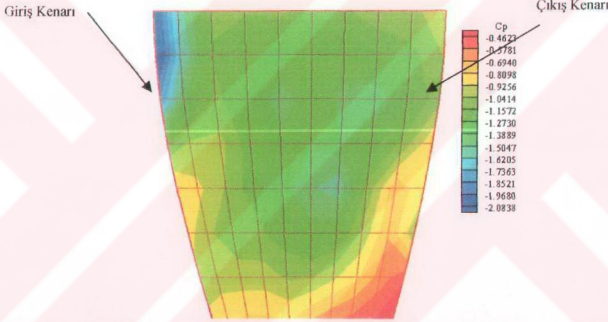
- Pervane çapı, $D = 0.737 \text{ m}$
- Pervane devri, $N = 802 \text{ d/d}$
- Kanat sayısı, $Z = 4$
- Gemi hızı, $V = 5.8 \text{ knot}$ (çekme şartlarında)
- Piç/Çap oranı $(P/D)_{\text{ort}} = 0.9402$

- Şaft derinliği, $H = 1.329 \text{ m}$
- Nozul Boyu (DC)= 0.614 m
- Pervane ile nozul arasındaki açıklık = 0.002 m
- Pervanenin nozul içerisindeki konumu = $0.5DC$

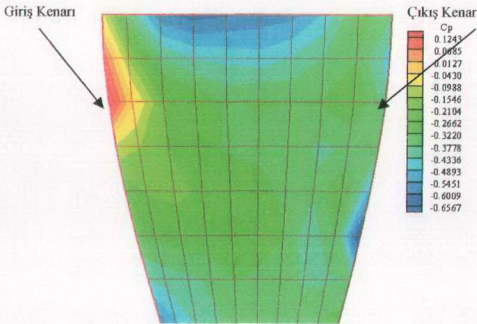
Nozullu pervane geometrisine ait diğer ayrıntılar Ek 3’de verilmiştir.

Pervane kanatları Ka-4.70, nozul ise Şekil 5.9’da görülen NSMB Nozul no.19-A kesit geometrisine sahiptir.

Yukarıda dizayn bilgileri verilen (NPS 1)’in Şekil 5.15’deki kaldırıcı yüzey analiz prosedüründen geliştirilen bilgisayar programı kullanılarak analiz edilmesi sonucu dizayn şartlarında ($J_A=0.259$) nozullu pervane kanadının ön ve arkasındaki basınç dağılımları aşağıda Şekil (5.16-17)’de gösterildiği şekilde bulunmuştur. Analiz sonuçları verilen nozullu pervane kanadı dik konumdadır ($\varphi = 0$).



Şekil 5.16 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.259$) (kaldırıcı yüzey metodu, kanat arkasında)

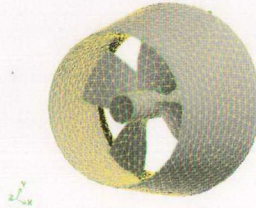


Şekil 5.17 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.259$) (kaldırıcı yüzey metodu, kanat yüzünde)

Nozullu pervanenin ($J_A=0.259$) için yapılan analizinde Şekil (5.16-17)'den görülebileceği gibi; basıncın en düşük olduğu yer pervane sırtının kanat ucu ve giriş kenarına yakın bölgelerdir. Bu bölgeler aynı zamanda tabaka kavitasyonu riskinin de en yüksek olduğu yerlerdir. Ancak kanat sırtında bu bölgelerin dışında da az miktarda düşük basınç bölgeleri oluşmaktadır (Şekil 5.16). Kanat ortalarında bulunan bu bölgeler kabarcık kavitasyonu riskini taşır.

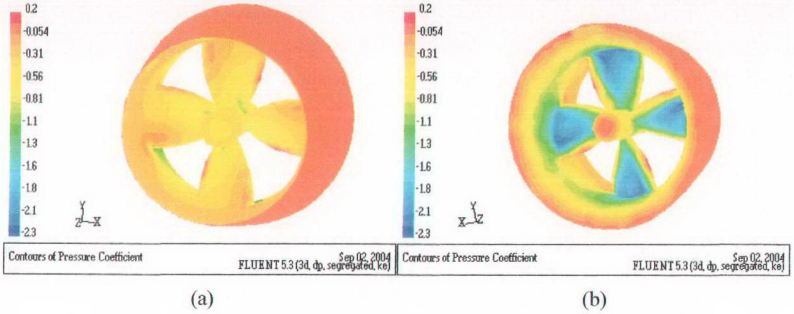
Kanat ön yüzünde ise Şekil 5.17'den görülebileceği gibi giriş kenarına yakın bölgelerde basınç yüksek iken çıkış kenarına doğru azalmaktadır. Bununla beraber özellikle kanat kenarlarında süreksizlikler söz konusudur. Bu durum titreşim ve gürültü için önemlidir. Pervane kanat yüzlerinde kavitasyon oluşumuna ise nadiren rastlanır. Şekillerden görülebileceği gibi kanat yüzündeki basınç dağılımları, kanat sırtına oranla oldukça yüksek mertebelerdedir.

Yukarıda kaldırıcı yüzey metodu ile analiz sonuçları verilen (NPS 1)'in ayrıca sonlu hacimler metodunu kullanan FLUENT programı ile de analizi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla (NPS 1)'in Rhino ve GAMBIT programlarının beraber kullanılmasıyla oluşturulan üç boyutlu nozullu pervane resmi Şekil 5.18'de görülmektedir. Resimde görülen geometri kullanılmak suretiyle (5.2.2)'de anlatılan işlem sırası takip edilerek FLUENT'te CFD analizi yapılır. Bu amaçla oluşturulan nozullu pervane ve çevresindeki akışkan geometrileri GAMBIT'te meshlenir. FLUENT, sınır koşulları verilen bir akışkan geometrisinin sonlu sayıda küçük hacimlerden oluştuğunu kabul eder ve her bir küçük hacim üzerinde diferansiyel denklemleri iteratif olarak çözmek suretiyle sonuca ulaşır. Nozullu pervane analizinde FLUENT'in kullanacağı sonlu sayıdaki küçük hacim elemanları meshlemeyle oluşturulur. Bu amaçla nozul ve pervane yüzeyleri üçgen şeklindeki elemanlarla, akışkan hacmi de prizmatik elemanlarla meshlenir. GAMBIT'te meshlenen geometri FLUENT'te çağrılıp sınır koşulları tanımlandıktan sonra, iterasyonla gerekli yakınsama sağlanarak sonuca ulaşılır.

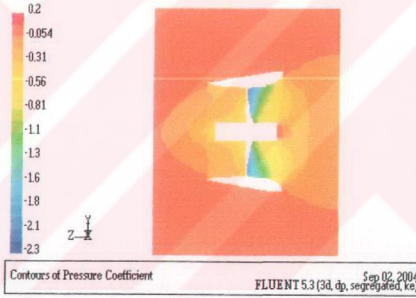


Şekil 5.18 Nozullu pervanenin üç boyutlu CAD resmi (NPS 1)

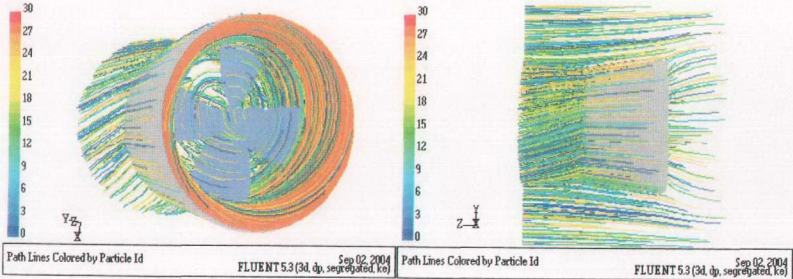
Şekil (5.19-21)'de analizi yapılan nozullu pervanenin dizayn şartlarında ($J_A=0.259$) FLUENT'ten bulunan sırasıyla; üzerindeki basınç dağılımı (C_p) (önden ve arkadan), çevresindeki basınç dağılımı (C_p) (düşey kesitte) ve etrafındaki akım hatları görülmektedir.



Şekil 5.19 Nozullu pervane üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.259$)
(a) önden, b) arkadan görüntüsü)



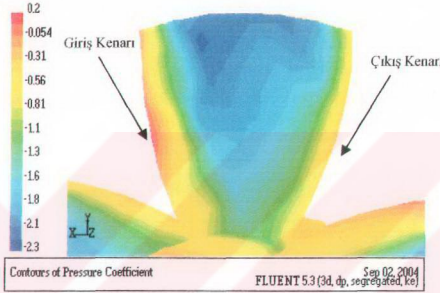
Şekil 5.20 z-y Düzlemindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.259$)



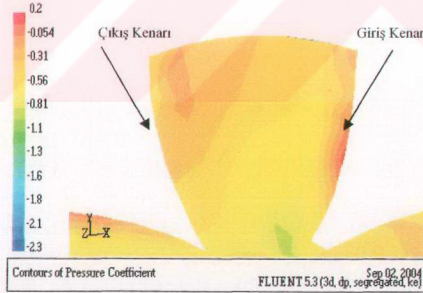
Şekil 5.21 Nozullu pervane etrafındaki akım hatları ($J_A=0.259$)

(NPS 1)'in dizayn şartlarında ($J_A=0.259$) yapılan FLUENT analizinde Şekil (5.19-20)'den görüldüğü gibi pervane kanatlarının önünde basınç bölgeleri oluşurken, arkasında ise emme bölgeleri oluşmaktadır. Nozulun akımı hızlandırması sebebiyle beklenildiği üzere nozul içerisindeki basınç nozul dışına göre oldukça düşmektedir. Şekil 5.21'de gösterilen nozul etrafındaki akım hatlarından da; nozulun akımı toplaması ve hızlandırması açık olarak görülebilmektedir.

Dizayn şartlarında ($J_A=0.259$) (NPS 1)'in FLUENT'ten elde edilen pervane kanatları üzerindeki basınç dağılımları (önden ve arkadan) Şekil (5.22-3)'de verilmektedir.



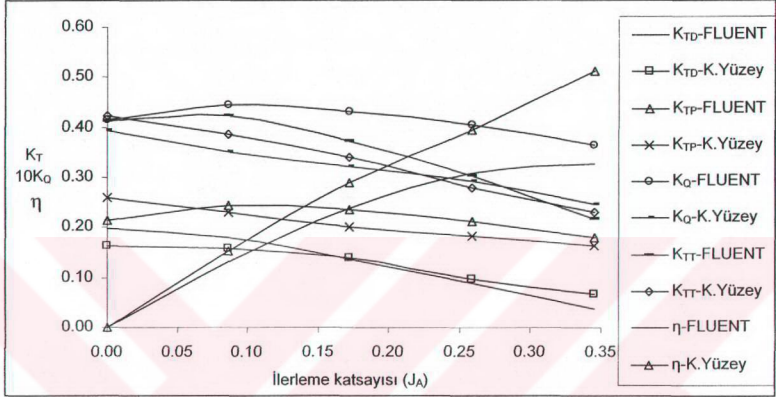
Şekil 5.22 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.259$) (FLUENT; arkadan görünüş)



Şekil 5.23 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.259$) (FLUENT, önden görünüş)

Şekil (5.22-3)'de gösterilen kanat ön ve arkasındaki basınç dağılımları Şekil (5.16-7)'de verilen kaldırıcı yüzey metodu analiz sonuçlarıyla uyum içerisindedir. Özellikle kanat arkasındaki kaviteasyon riski taşıyan düşük basınç bölgeleri FLUENT analizinden de açık olarak görülebilmektedir (Şekil 5.22).

Yukarıda dizayn şartlarında ($J_A=0.259$) kaldırıcı yüzey metodu ve FLUENT ile analiz sonuçları verilen (NPS 1)'in benzer şekilde dört farklı ilerleme katsayısı ($J_A = 0, 0.086, 0.173$ ve 0.345) için daha analizleri gerçekleştirilmiştir. FLUENT ve kaldırıcı yüzey metodlarından elde edilen (NPS 1)'in performans katsayılarının ilerleme katsayısı ile değişimleri Şekil 5.24'te gösterilmiştir.



Şekil 5.24 Kaldırıcı yüzey metodu ve FLUENT'ten elde edilen nozullu pervane performans katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 5.24'ten görülebileceği gibi; kaldırıcı yüzey metodu ve FLUENT analizlerinden elde edilen özellikle pervane, nozul ve nozullu pervane itme katsayısı eğrileri arasında oldukça iyi bir uyum vardır.

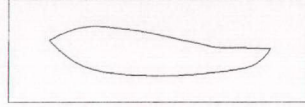
Nozullu Pervane Analiz Uygulaması 2

Dizayn bilgileri (NPS 2)

- Pervane çapı, $D = 1.95 \text{ m}$
- Pervane devri, $N = 260 \text{ d/d}$
- Kanat sayısı, $Z = 4$
- Gemi hızı, $V = 5.8 \text{ Knot}$
- Piç/Çap oranı $(P/D)_{ort} = 1.1205$
- Şaft derinliği, $H = 3.5 \text{ m}$
- Nozul Boyu $(DC) = 0.975$
- Pervane ile nozul arasındaki açıklık $= 0.005 \text{ m}$

- Pervanenin nozul içerisindeki konumu = $0.5DC$

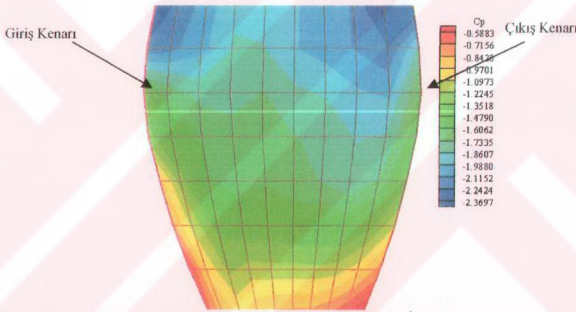
Nozullu pervane geometrisine ait diğer ayrıntılar Ek 3’de verilmiştir.



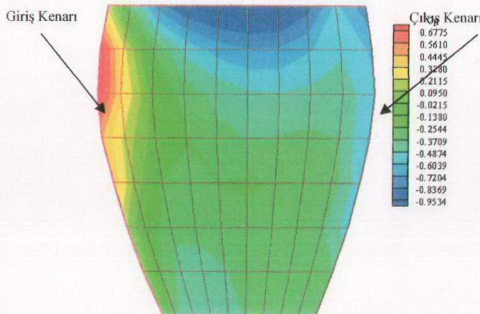
Şekil 5.25 Nozul kesiti (NPS 2)

Uygulama 2’de kullanılan nozullu pervane de Ka-4.70 kesit geometrisine sahiptir. Ancak nozul için Şekil 5.25’de görülen kesit geometrisi kullanılmıştır.

Uygulama 1’dekine benzer şekilde bu uygulamada da yukarıda dizayn bilgileri verilen (NPS 2) önce kaldırıcı yüzey metoduyla daha sonra da FLUENT ile analiz edilmiştir. Kaldırıcı yüzey metodundan dizayn şartlarında ve pervane kanadı dik konumda iken elde edilen kanat sırtı ve yüzündeki basınç dağılımları Şekil (5.26-27)’de gösterilmiştir.



Şekil 5.26 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.302$) (kaldırıcı yüzey, kanat arkasında)



Şekil 5.27 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.302$) (kaldırıcı yüzey, kanat yüzünde)

(NPS 2)'nin kaldırıcı yüzey metodu ile dizayn şartlarında ($J_{A1}=0.302$) analizi sonucu pervane üzerindeki en düşük basınç bölgelerinin kanat sırtında ve iki farklı bölgede oluştuğu görülmektedir (Şekil 5.26). Kavitasyon riskinin de en yüksek olduğu bu bölgelerden biri kanat ucunda giriş kenarına yakın, diğeri de yine kanat ucunda ve çıkış kenarına yakın olarak görülmektedir.

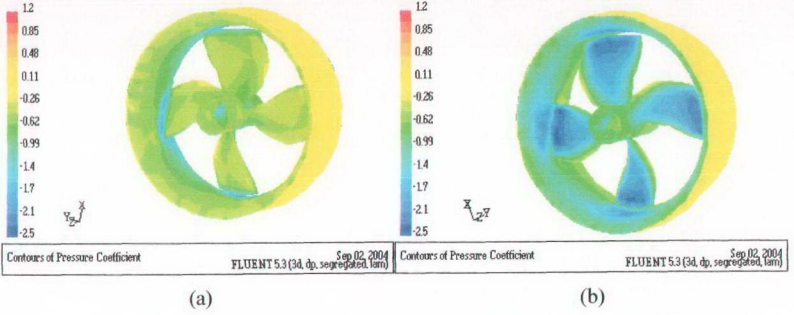
Kanat yüzünde ise basınç değerleri kanat sırtına oranla oldukça yüksek mertebelerdedir. Kanat girişi çevresinde basınç pozitif iken geri kalan bölgelerde ise negatif değer almaktadır (Şekil 5.27). Kanat yüzünde basıncın en düşük olduğu yer ise kanat ucudur. Dizayn şartlarında pervane yüzündeki basınç dağılımı genel olarak sürekli bir yapıya sahiptir.

(NPS 2)'nin Şekil 5.28'de gösterilen nozullu pervane geometrisi kullanılarak dizayn şartlarında sonlu hacimler metoduyla FLUENT'te analizi gerçekleştirilmiştir. Uygulama 1'dekine benzer şekilde nozullu pervane geometrisi Rhino ve GAMBIT beraber kullanılarak çizilmiştir. Nozullu pervane ve çevresindeki akışkan geometrileri GAMBIT'te meşlenmiştir. Meşlenen geometriler FLUENT'te çağrılıp sınır koşulları tanımlanarak iterasyonla çözüme ulaşılmıştır.

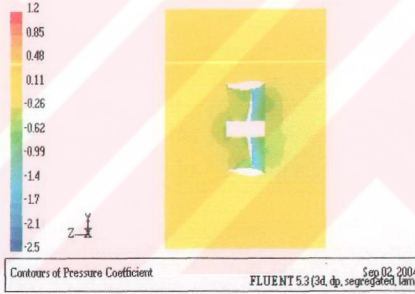


Şekil 5.28 Nozullu pervanenin üç boyutlu CAD resmi

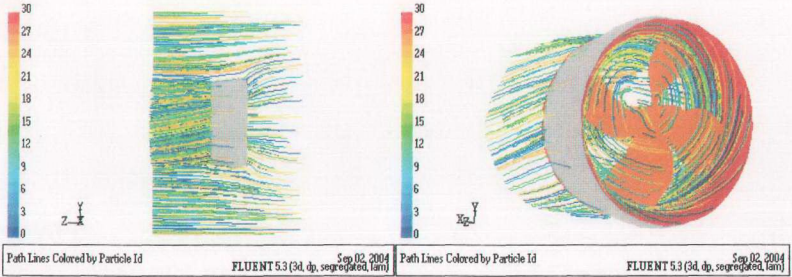
Aşağıda Şekil 5.29-31'de ($J_A=0.302$) dizayn şartlarında FLUENT'ten bulunan; nozullu pervane üzerindeki basınç dağılımları (C_p), dikey kesitte etrafındaki basınç dağılımları ve üç boyutlu çevresindeki akım hatları görülmektedir.



Şekil 5.29 Nozullu pervane üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.302$)
(a) önden, b) arkadan görünüş)



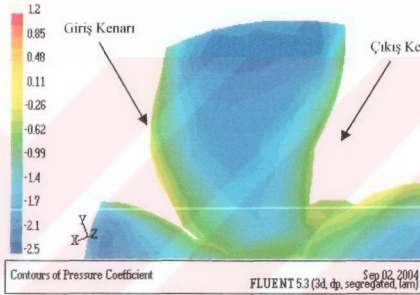
Şekil 5.30 z-y Düzlemindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.302$)



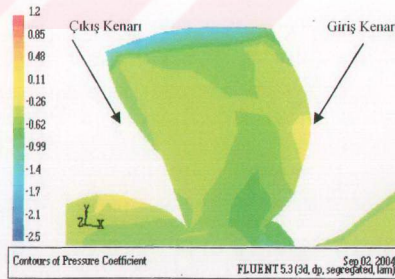
Şekil 5.31 Nozullu pervane etrafındaki akım hatları ($J_A=0.302$)

(NPS 2)'nin dizayn şartlarında ($J_A=0.302$) yapılan CFD analizinde elde edilen nozullu pervane etrafındaki basınç dağılımları (NPS 1)'dekine benzer şekilde bulunmuştur (Şekil 5.29-30). Şekillerden pervane kanatlarının üzerindeki basınç dağılımlarının çoğunlukla negatif olduğu görülmektedir. Kanat sırtlarında görülen düşük basınç bölgeleri beklentilere uygundur. Yine şekillerden görülebileceği üzere nozul dış yüzeyinde pozitif basınç vardır. Nozul iç yüzeyinde ise pervane sırtındaki kadar olmasa da negatif basınç bölgelerinin oluştuğu gözlenmektedir. Şekil 5.31'de ise nozullu pervane etrafındaki akım hatları ve nozulun akımı toplayarak hızlandırması açık olarak görülebilmektedir.

($J_A=0.302$) için FLUENT'ten elde edilen pervane kanatları üzerindeki basınç dağılımları (önden ve arkadan) Şekil (5.32-33)'te verilmiştir.



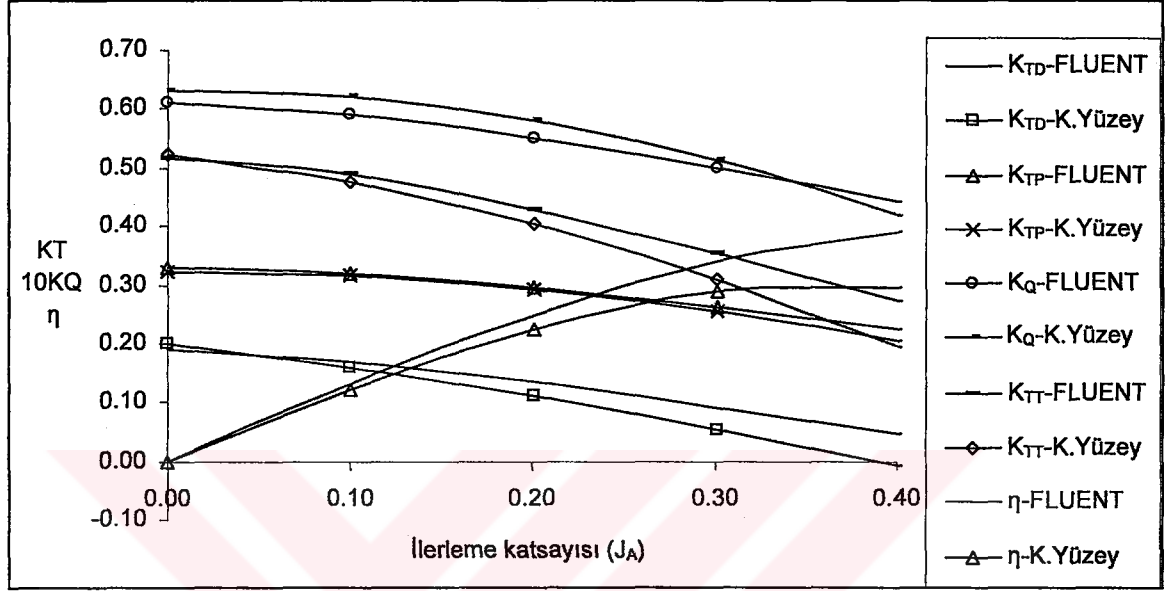
Şekil 5.32 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.302$) (FLUENT, arkadan görünüşü)



Şekil 5.33 Nozullu pervane kanadı üzerindeki basınç dağılımı (C_p) ($J_A=0.302$) (FLUENT, önden görünüşü)

Şekil (5.32-33)'te gösterilen ve FLUENT'ten bulunan basınç dağılımları, genel olarak kaldırıcı yüzey analiz metodundan elde edilenlerle (Şekil 5.26-27) uyum içerisindedir.

Uygulama 1’de olduğu gibi bu uygulamada da (NPS 2) dizayn şartlarının dışında dört farklı ilerleme katsayısı ($J_A=0, 0.101, 0.201$ ve 0.403) için daha hem kaldırıcı yüzey hem de FLUENT ile analiz edilmiştir. Aşağıda Şekil 5.34’te FLUENT ve kaldırıcı yüzey metodlarıyla analiz edilen nozullu pervanenin performans katsayılarının farklı ilerleme katsayılarında değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.34 Kaldırıcı yüzey metodu ve FLUENT’ten elde edilen pervane performans katsayılarının karşılaştırılması

Şekil 5.34’ten açık olarak görülebileceği gibi farklı ilerleme katsayıları için her iki metodla hesaplanan nozullu pervane performans katsayıları birbirlerine oldukça yakındır. Özellikle pervane itme katsayılarında tam bir uyum görülmektedir.

Nozullu Pervane Analiz Uygulaması 3

Bu uygulamada üniform olmayan akım alanında NSMB 19.A profil kesitine sahip nozul içerisine yerleştirilmiş Ka-4.55 pervane sistemi için kaldırıcı yüzey metodu ve deneyden elde edilen analiz sonuçları karşılaştırılacaktır. Nozullu pervane modelinin testleri Emerson Kaviteasyon Tünelinde yapılmış olup, bu deneye ait bilgiler Glover ve Szantyr’da (1988) bulunmaktadır. Nozul boyu pervane çapının 0.50’si ve pervane nozulun tam ortasında yerleştirilmiştir. Pervane modelinin çapı 0.25 m’dir (Nozullu pervane geometrisine ait diğer ayrıntılar ve düzensiz iz dağılımı Ek 3’de bulunabilir). Dizayn şartlarında ilerleme katsayısı $J = 0.433$, pervaneye iletilen güç 4.518 kW ve nozullu pervaneye gelen akım hızı 3.048 m/s dir. Kaldırıcı yüzey teorisi kullanılarak yazılan bilgisayar programından ve deney sonuçlarından bulunan performans katsayıları Çizelge 5.2’de verilmektedir:

Çizelge 5.2 Nozullu pervane performans katsayıları ($J= 0.433$)

	Kaldırıcı yüzey metodu	Deneyisel sonuçlar
K_Q	0.0318	0.032
K_{TP}	0.1716	0.180
K_{TD}	0.0588	0.040
K_{TT}	0.2304	0.220
η	0.497	0.474

Yukardaki çizelgeden görülebileceği gibi, teorik model ve deney sonuçları arasında iyi bir uyum bulunmaktadır.

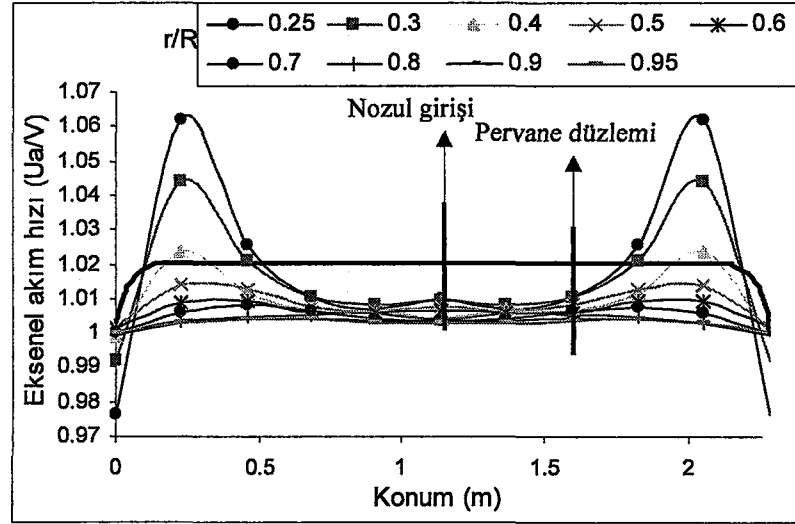
5.2.4 Göbek Etkisinin İncelenmesi

Burada Bölüm (4.2.7)'de anlatılan göbek etkisinin kaldırıcı yüzey modeline katılarak incelenmesi ile ilgili yöntemle iki örnek uygulama yapılacaktır. Bu amaçla önce göbek akım analizi için yüzey girdap modeline dayalı geliştirilen bir program daha sonra da, kaldırıcı yüzey modelinden geliştirilen mevcut bir program kullanılacaktır.

Uygulama 1.

Bölüm (5.2.2)'de 2. uygulamada ayrıntılı dizayn bilgileri verilen bir römorkör için dizayn edilmiş $D = 1.95$ m. çapındaki nozullu pervane (NPS 2) kullanılarak göbek etkisi incelenecektir. Göbek geometrisi; ortada $0.167D$ çapında ve D boyunda bir silindir ile uçlarda iki yarım küreden oluşur. Şekil 5.35'de görüldüğü gibi nozul girişi göbeğin tam ortasında ve pervane diski göbek silindir boyunun $\frac{3}{4}$ 'ündedir.

Şekil 5.35'de yüzey girdap metodu kullanılarak, göbek etrafındaki 9 radyal koordinatta hesaplanan boyutsuz eksenel hızların göbek boyunca değişimleri görülmektedir. Hesaplarda göbeğe gelen üniform akım hızı ($V = 1$ m/s) alındı.



Şekil 5.35 Göbek etrafındaki aksel akım hızı (U_a/V) (Uygulama 1)

Göbeğin nozul girişindeki iz dağılımını değiştirme miktarları (Şekil 5.35'den) ile ilk ve son durumdaki iz dağılımları Çizelge 5.3'te görülmektedir:

Çizelge 5.3 Nozul girişinde iz dağılımındaki değişim miktarları

r/R	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
İz (1-W)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
İzdeki değişim miktarı	0.0101	0.0092	0.0043	0.0076	0.0066	0.0033	0.0041	0.003	0.003
Son durumda iz	0.9101	0.9092	0.9043	0.9076	0.9066	0.9033	0.9041	0.9030	0.9030

Çizelge 5.3'te ilk ve son durumdaki iz dağılımları, kaldırıcı yüzey modelinde kullanılmak suretiyle hesaplanan göbeğin; nozul, pervane ve tüm sisteme etkisi aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir:

Çizelge 5.4 Sonuçların karşılaştırılması (Uygulama 1)

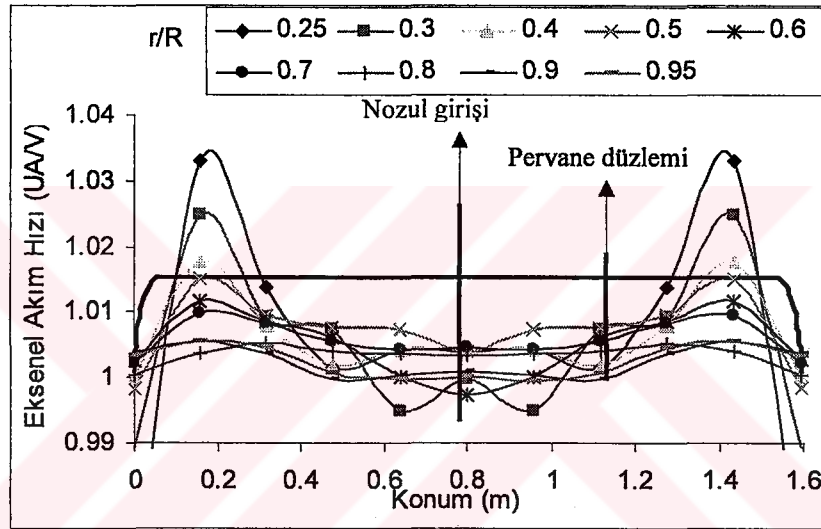
	Göbeksiz	Göbekli	İtmedeki Azalma (%)
Nozul İtmesi(kN)	20.1240	19.9203	1.0
Pervane İtmesi(kN)	74.2061	74.0991	0.1
Toplam İtme(kN)	94.3300	94.0194	0.3

Göbek boyu $1.167D$ alınarak yapılan bu uygulamada, nozullu pervane kaldırıcı yüzey metoduna göbeğin dahil edilmesinin, sistemin toplam itmesinde yaklaşık %0.3'lük bir azalmaya neden olduğu görülmektedir.

Uygulama 2.

Bölüm (5.2.2)'de 1. uygulamada ayrıntılı dizayn bilgileri verilen $D = 0.737$ m çapındaki römorkör nozullu pervanesi için göbek etkisi incelenecektir. Göbek geometrisi Uygulama 1'de anlatıldığı şekildedir. Ancak bu örnekte göbek silindir boyu $2D$ alındı.

Uygulama 2 için yüzey girdap metodundan elde edilen boyutsuz eksenel hızların göbek boyunca değişimleri Şekil 5.36'da görülmektedir ($V = 1$ m/s).



Şekil 5.36 Göbek etrafındaki eksenel hızların (U_a/V) değişimi (Uygulama 2)

Göbek tarafından nozul girişindeki iz dağılımını değiştirme miktarları ile ilk ve son durumlardaki iz dağılımları Çizelge 5.5'de görülmektedir:

Çizelge 5.5 Nozul girişinde iz dağılımındaki değişim miktarları

r/R	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	0.95
İz ($1-W_N$)	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
İzdeki değişim miktarı	0.004	-0.0003	0.0043	0.0041	-0.0028	0.0045	0.0033	0.0009	0
Son durumda iz	0.9040	0.8970	0.9043	0.9041	0.8972	0.9045	0.9033	0.9009	0.9000

Göbek boyu 2.167D olarak alınan bu uygulamada, göbeğin nozullu pervane sistemine etkisi, göbek için yüzey girdap ve nozullu pervane için kaldırıcı yüzey analiz metodları kullanılarak Çizelge 5.6’da gösterildiği şekilde bulunur:

Çizelge 5.6 Sonuçların karşılaştırılması (Uygulama 2)

	Göbeksiz	Göbekli	İtmedeki Azalma (%)
Nozul İtmesi(kN)	6.3182	6.3062	0.18
Pervane İtmesi(kN)	10.1862	10.1839	0.02
Toplam İtme(kN)	16.5044	16.4901	0.09

Bu uygulama sonucunda göbeğin nozullu pervane toplam itmesinde sağladığı azalma yaklaşık %0.09, pervane itmesindeki azalma %0.02 ve nozul itmesindeki azalma da %0.18 olarak görülmektedir.

Sonuç olarak, benzer iki nozullu pervane sevk sistemi için yapılan uygulamalardan, özellikle yeterince uzun seçilen göbeğin nozullu pervane sistemine etkisinin, oldukça sınırlı kalacağı anlaşılmaktadır. Ancak kısa seçilen göbekler için nozullu pervane analiz metodunda, göbek etkisinin yukarıda anlatılan yöntemle hesaplara katılması yararlı olacaktır.

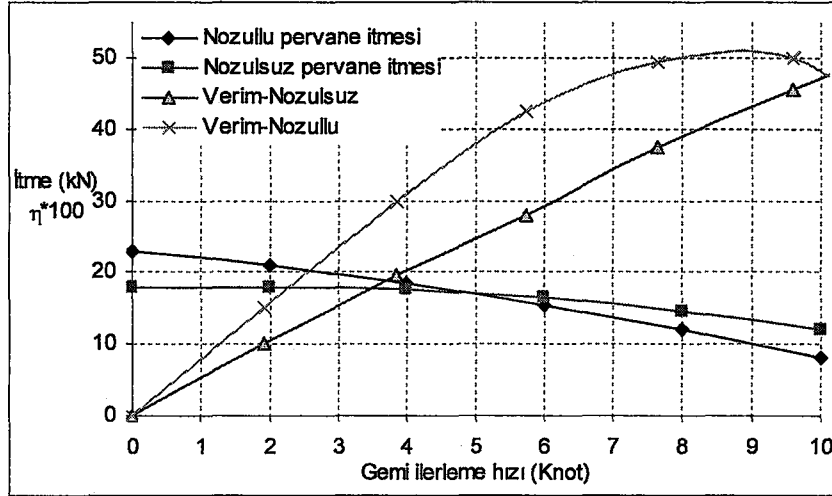
5.3 Nozul Boyu ve Pervanenin Nozul İçerisindeki Yerinin Nozullu Pervane Karakteristiklerine Etkilerinin İncelenmesi

5.3.1 Nozullu Pervane Sistemi 1 (NPS 1)

Burada Bölüm (5.2.2)’deki analiz uygulaması 1’de dizayn bilgileri verilen nozullu pervane sistemi (NPS 1) için bazı inceleme çalışmaları sunulacaktır. (NPS 1) ve (NPS 2) için sunulacak her iki çalışmada da Şekil 5.15’de akış şeması verilen kaldırıcı yüzey analiz metodundan geliştirilmiş bilgisayar yazılımı kullanılacaktır. Bu kapsamda önce geniş bir hız aralığında nozullu ve nozulsuz sistemin karakteristikleri incelenerek, nozul kullanmanın hangi hız aralıklarında faydalı olabileceği araştırılacaktır. Daha sonra ise nozullu pervanenin çalıştığı geniş ilerleme katsayısı aralığında ($J_A = \frac{V_A}{ND}$) pervanenin nozul içerisindeki konumunun ve pervane çapıyla orantılı nozul boyunun yine geniş bir aralıkta değiştirilmesi

durumunda sistemin performans katsayılarının ne şekilde değişeceği incelenecektir. Bir başka değişle (NPS 1) için optimum hız aralığı, nozul boyu ve pervanenin konumu araştırılacaktır.

Şekil 5.37’de nozullu ve nozulsuz sistemin gemi ilerleme hızının fonksiyonu olarak itme ve verimindeki değişim gösterilmiştir.

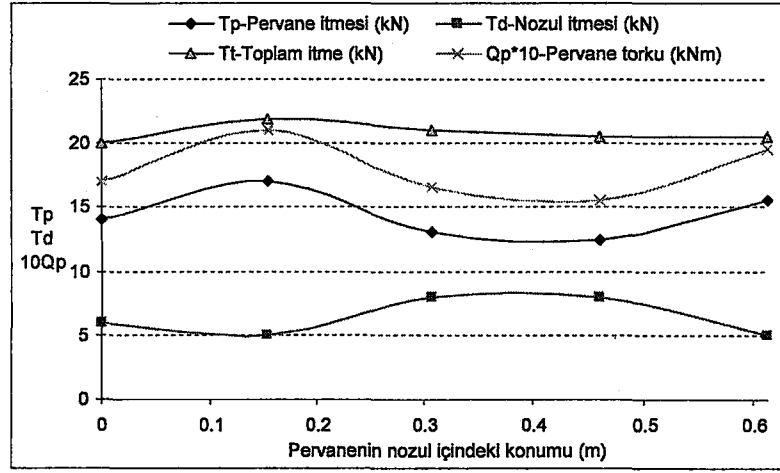


Şekil 5.37 İtme ve verimlerin gemi ilerleme hızına göre değişimi (NPS 1)

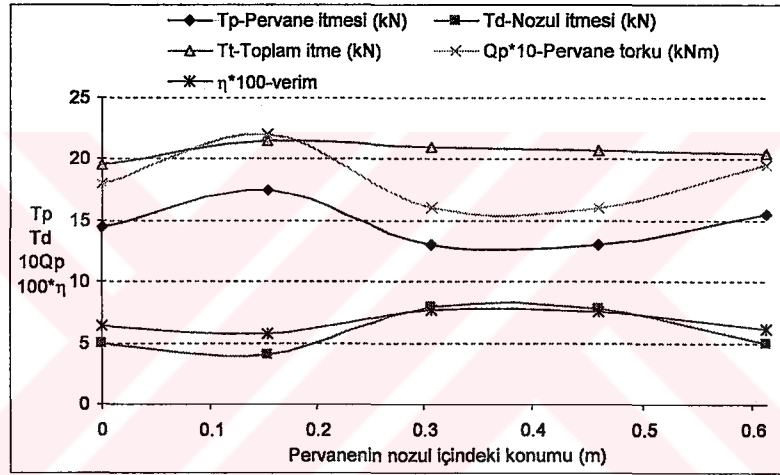
Şekil 5.37’den nozullu pervane itmesinin, gemi ilerleme hızı yaklaşık 5 Knot’a kadar tek pervaneden daha fazla olduğu görülmektedir. (NPS 1)’in bir römorkör için dizayn edildiği düşünüldüğünde yüksek itme önemlidir ve sistemin 0 – 5 Knot gemi ilerleme hızında çalıştırılması gerekir. Daha yüksek hızlarda ise sistemin sağlayacağı itme tek pervaneden daha düşüktür. Ancak verim eğrilerine bakıldığında yaklaşık 10 Knot’a kadar nozullu pervane veriminin tek pervaneden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun anlamı römorkör için eğer öncelik yüksek itme gereksinimi değilse, nozullu pervane kullanımı 10 Knot’a kadar fayda sağlayabilmektedir. Daha yüksek hızlarda ise nozul kullanımı tamamen zararlı hale gelmektedir.

Pervanenin Nozul İçerisindeki Konumunun Etkisi (NPS 1)

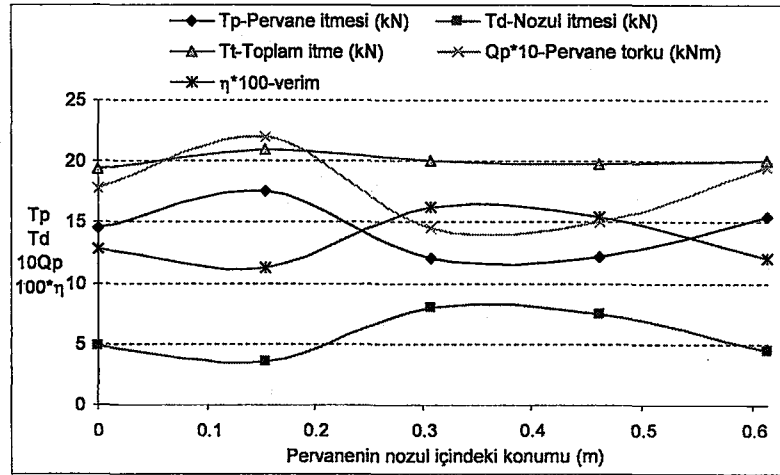
Aşağıda Şekil (5.38-42)’de (NPS 1)’in farklı ilerleme katsayılarında (J_A) pervanenin nozul içerisindeki konumuna göre; nozul itmesi, pervane itmesi ve verim gibi bazı karakteristiklerdeki değişim görülmektedir. Bu incelemelerde nozul boyu $0.5D$ alınmıştır.



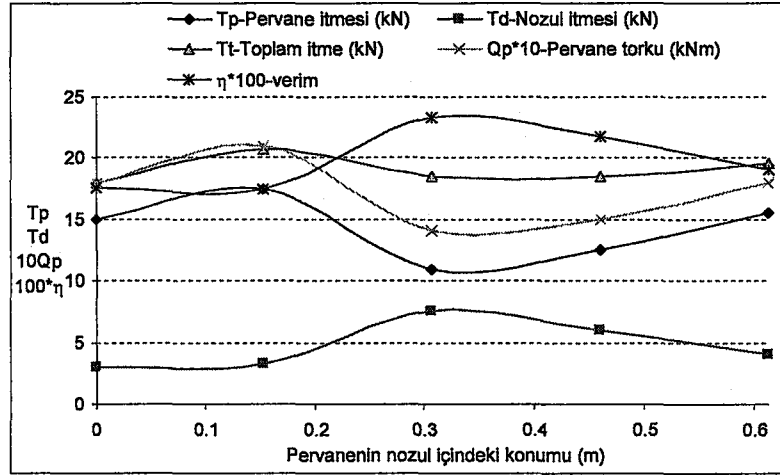
Şekil 5.38 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0$)
(NPS 1)



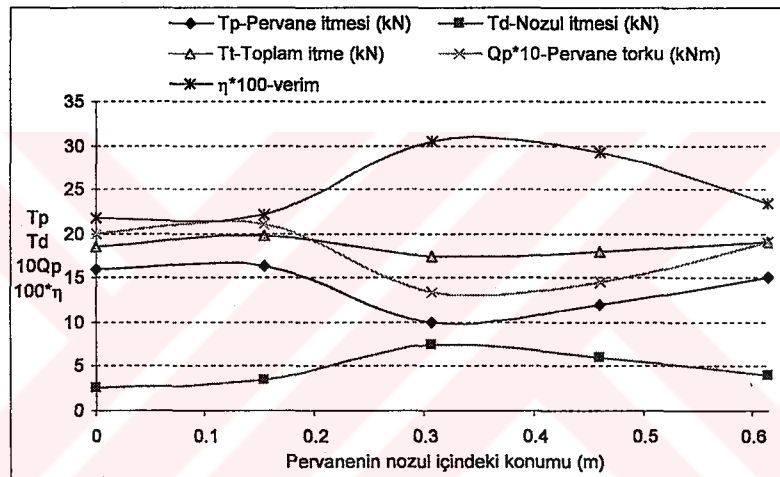
Şekil 5.39 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi
($J_A = 0.05$) (NPS 1)



Şekil 5.40 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi
($J_A = 0.1$) (NPS 1)



Şekil 5.41 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi
($J_A = 0.15$) (NPS 1)

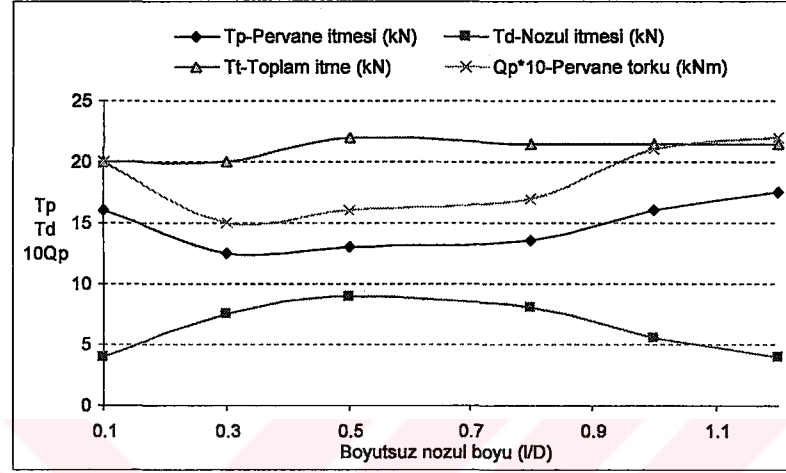


Şekil 5.42 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi
($J_A = 0.2$) (NPS 1)

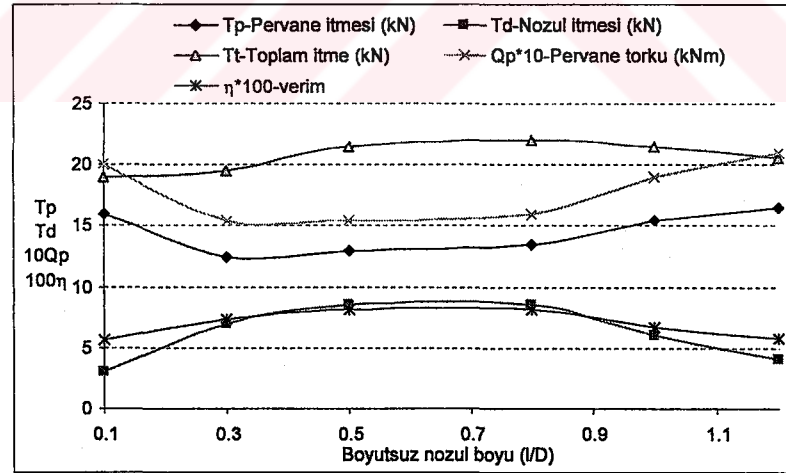
Yukarıdaki şekillerden görülebileceği gibi; nozullu pervanenin toplam itmesi pervane, nozul boyunun yaklaşık %25'inde iken maksimum olmaktadır. Pervane itmesi yaklaşık aynı konumda, nozul itmesi ise nozul ortasına yakın en yüksek değerine ulaşmaktadır. Bu durum hemen hemen tüm ilerleme katsayıları için geçerlidir. Sistemin verimi ise, düşük ilerleme katsayılarında nozul ortasının biraz ilerilerinde; daha yüksek ilerleme katsayılarında ise nozul ortasına yakın maksimum olmaktadır. Tüm bunlardan anlaşılmaktadır ki analiz edilen (NPS 1) için nozul boyu $0.5 D$ iken pervanenin nozul ortasına yerleştirilmesi verim açısından uygun olacaktır. Pervane nozul ortasına yerleştirildiğinde sistemin toplam itmesindeki kayıp düşük hızlarda %5 mertebesinde daha yüksek hızlarda ise biraz daha yüksek olmaktadır ki bu da kabul edilebilir bir durumdur.

Nozul Boyunun Etkisi (NPS 1)

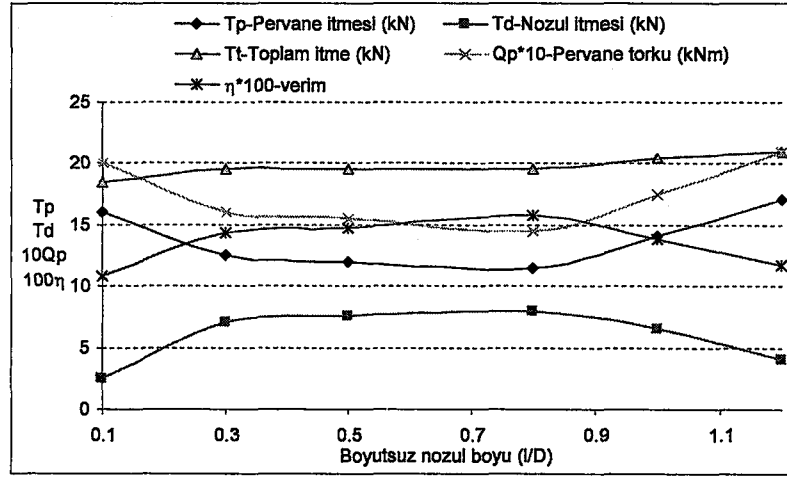
Burada nozul boyunun sistemin performans katsayılarına etkisi incelenirken pervanenin, yukarıdaki analiz sonucu olarak nozul boyunun tam ortasında yerleştirildiği kabul edilir. Bu şartlarda gemi hızı değiştirilerek yeni ilerleme katsayıları ve analiz sonuçları elde edilir. Şekil (5.43-47)'de (NPS 1) için farklı ilerleme katsayılarında nozul boyuna göre sistem karakteristiklerindeki değişimler gösterilmiştir.



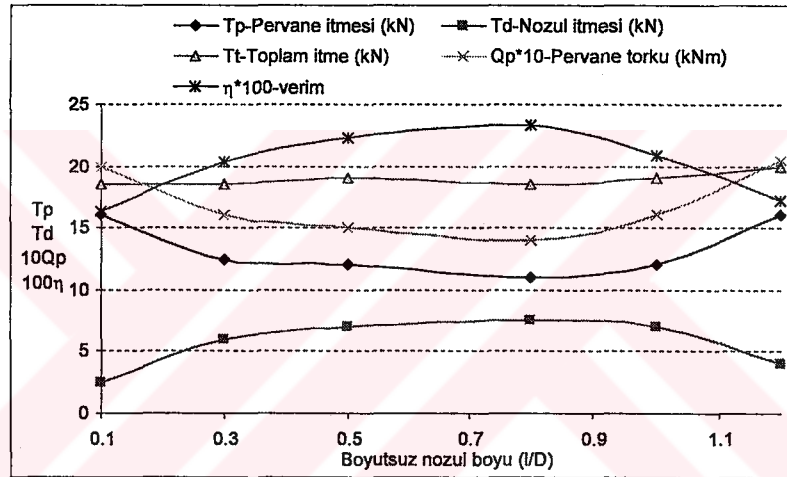
Şekil 5.43 Tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0$) (NPS 1)



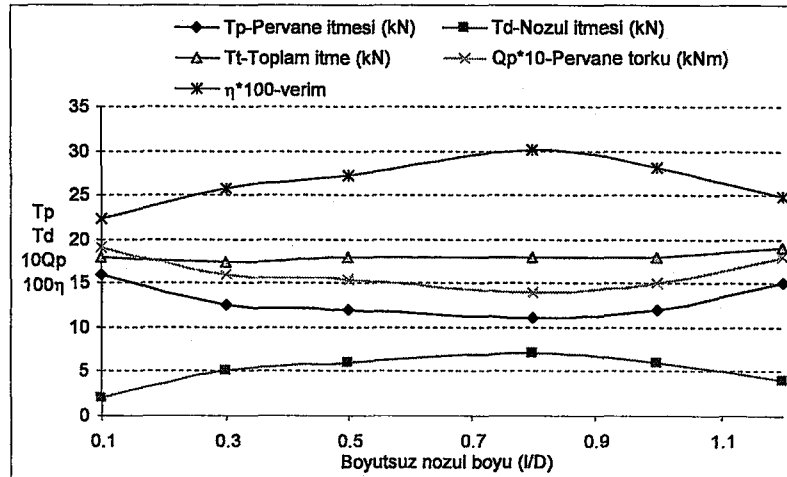
Şekil 5.44 Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.05$) (NPS 1)



Şekil 5.45 Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.1$)
(NPS 1)



Şekil 5.46 Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.15$)
(NPS 1)

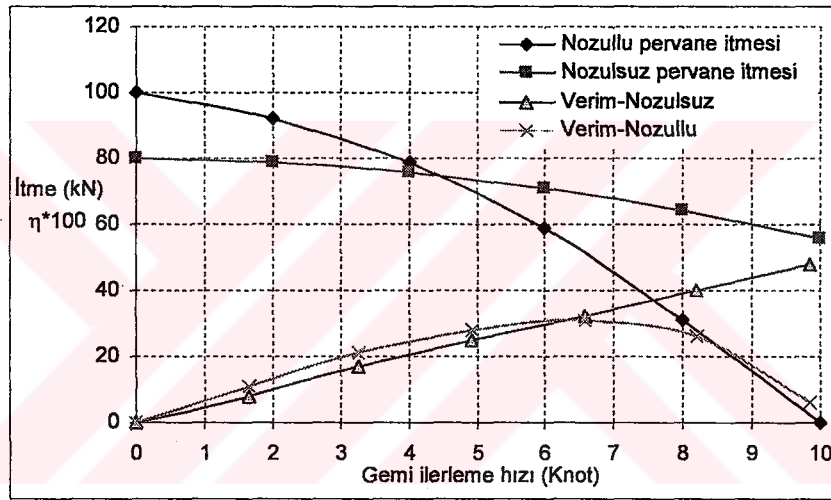


Şekil 5.47 Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.2$)
(NPS 1)

Nozul boyu etkisinin incelendiği yukarıdaki şekillerden tüm ilerleme katsayılarında ortalama aynı eğilim gözükmemektedir. Şöyle ki, pervane ve nozul itmeleri 0.3-0.9 aralığında yaklaşık olarak sabit kalırken; uçlarda nozul itmesi bir miktar azalmakta, pervane itmesi ise artmaktadır. Buna bağlı olarak özellikle daha yüksek ilerleme katsayılarında toplam itme hemen hemen sabit kalmaktadır. Ancak sistemin verimi tüm ilerleme katsayılarında $\eta = 0.8D$ civarında maksimum olmaktadır. Buradan açıkça görülmektedir ki, bu nozullu pervane sistemi için nozul boyunun pervane çapının %80'i seçilmesi uygun olacaktır.

5.3.2 Nozullu Pervane Sistemi 2 (NPS 2)

Yukarıda (NPS 1) için yapılan parametrik çalışmalar burada (NPS 2) için yapılacaktır. Bu kapsamda nozullu ve nozulsuz durumdaki sistemlerin gemi ilerleme hızına göre itme ve verimlerinin karşılaştırılmaları Şekil 5.48'de görülmektedir.

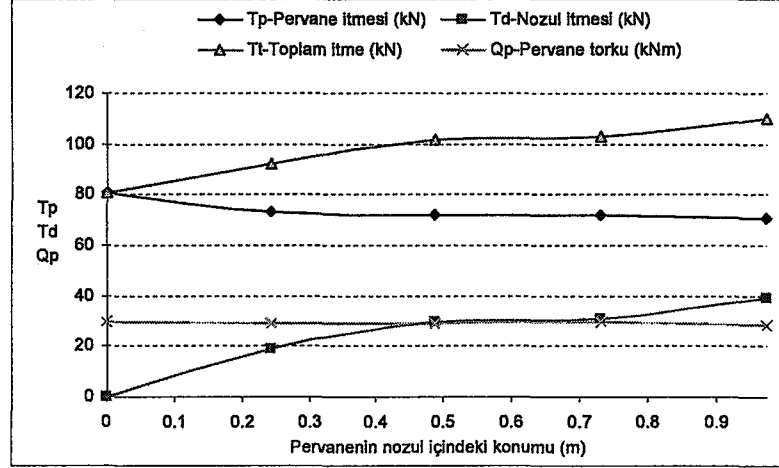


Şekil 5.48 İtme ve verimlerin gemi ilerleme hızına göre değişimi (NPS 2)

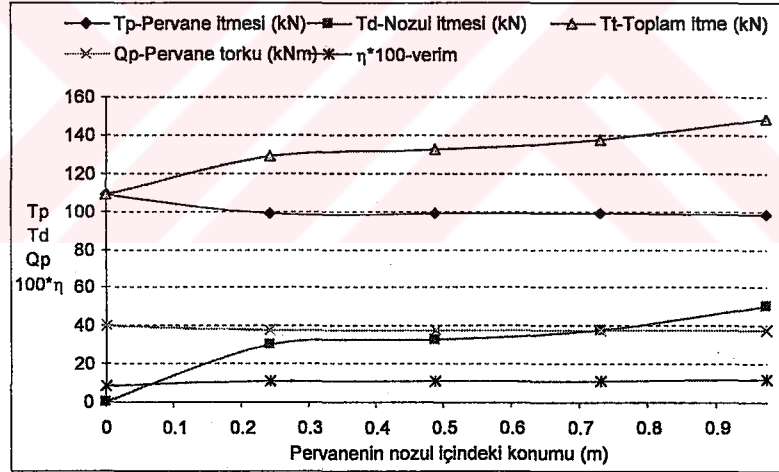
Şekil 5.48'den; nozullu pervane itmesinin yaklaşık 4.3 Knot gemi ilerleme hızına kadar, veriminin ise 6.2 Knot'a kadar nozulsuz pervaneden daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan, (NPS 2)'nin bir römorkör için dizayn edildiği düşünüldüğünde gemi ilerleme hızının 0 - 4.3 Knot arasında tutulması gerekir. Daha yüksek hızlarda ise nozul kullanılması itme açısından zararlı olacaktır. Bununla beraber yüksek itme gereksiniminin olmadığı durumlarda nozullu pervane sistemi kullanımı verim açısından yaklaşık 6.2 Knot'a kadar yararlı olabilir.

Pervanenin Nozul İçerisindeki Konumunun Etkisi (NPS 2)

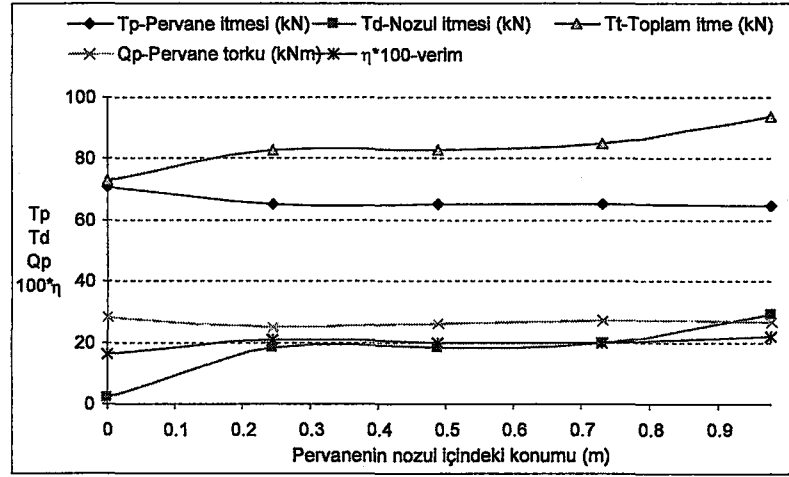
Şekil (5.49-53)'te (NPS 2) için farklı ilerleme katsayılarında pervanenin nozul içerisindeki konumuna göre sistemin bazı karakteristiklerindeki değişimler gösterilmiştir. Nozul boyu pervane çapının %50'si alınmıştır.



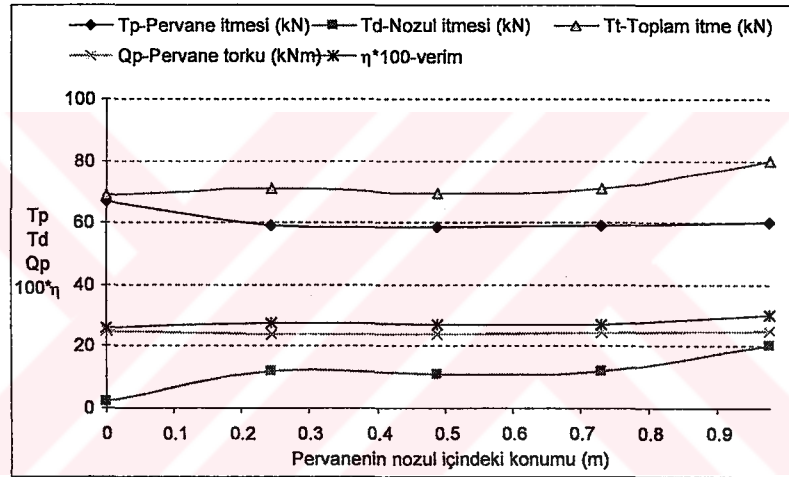
Şekil 5.49 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0$) (NPS 2)



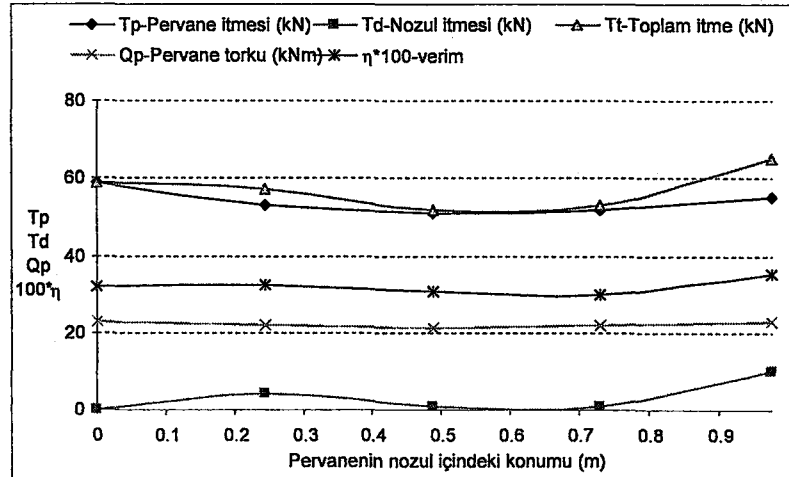
Şekil 5.50 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi ($J_A = 0.1$) (NPS 2)



Şekil 5.51 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi
($J_A = 0.2$) (NPS 2)



Şekil 5.52 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi
($J_A = 0.3$) (NPS 2)

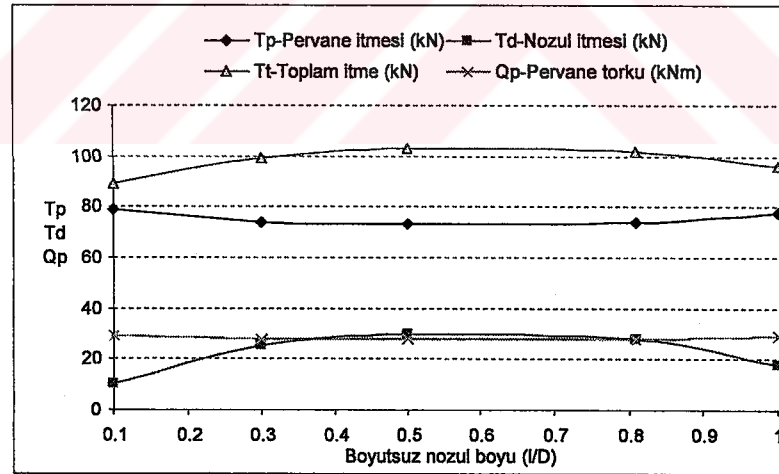


Şekil 5.53 Pervanenin nozul içindeki konumuna göre verim, tork ve itmelerin değişimi
($J_A = 0.4$) (NPS 2)

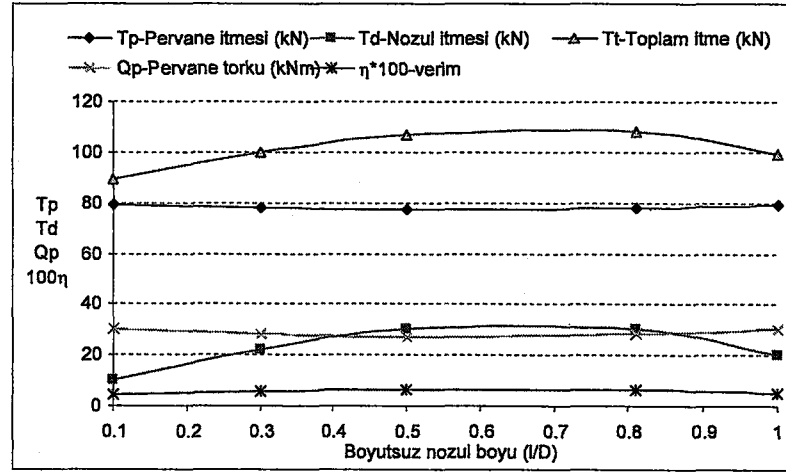
(NPS 2) için ilerleme katsayısı (J_A), 0 – 0.4 aralığında değiştirilerek yapılan incelemede; pervane ve nozul itmelerinin her ikisinin de ilerleme katsayısının artmasıyla azaldıkları görülmektedir. Ancak nozul itmesindeki azalma daha fazladır. Bu da deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir. Genel olarak tüm ilerleme katsayılarında verimin pervanenin nozul içerisindeki konumundan önemli oranda etkilenmediği görülmektedir. Buna karşılık pervanenin nozul çıkışına doğru yerleştirilmesi durumunda sistemin toplam itmesi biraz daha yüksek olmaktadır. van Manen ve Oosterveld'de (1966) sonuçları sunulan ve NSMB nozul no: 19A içerisinde Ka pervane serileriyle yapılmış kapsamlı deneysel çalışmalarda pervanenin nozulun tam ortasında bulunması durumunda sistemden maksimum verimin elde edilebileceği sonucuna varılmıştır. (NPS 2) ile yapılan bu çalışmada Şekil 5.25'de görülen standart dışı nozul kesiti kullanılması sonuçları kısmen farklı çıkartmıştır. Pervanenin nozul çıkışına yakın yerleştirilmesi bu durum için daha avantajlı olabilir. Buradan da anlaşılmaktadır ki, nozullu pervane dizaynında nozul kesiti seçimi son derece önemli bir role sahiptir.

Nozul Boyunun Etkisi (NPS 2)

Şekil (5.54-57)'de nozul boyuna göre farklı ilerleme katsayıları için nozullu pervane karakteristiklerindeki değişim incelenmiştir. Bu incelemelerde de pervanenin konumu 0.5D'dir.

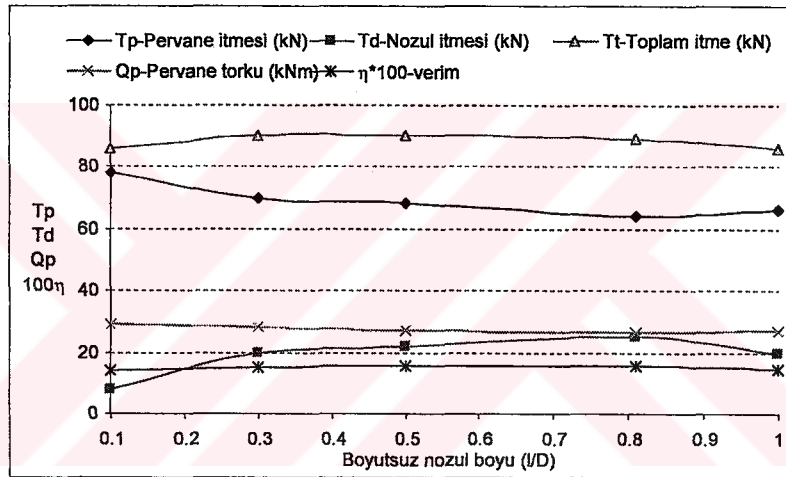


Şekil 5.54 Tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0$)
(NPS 2)



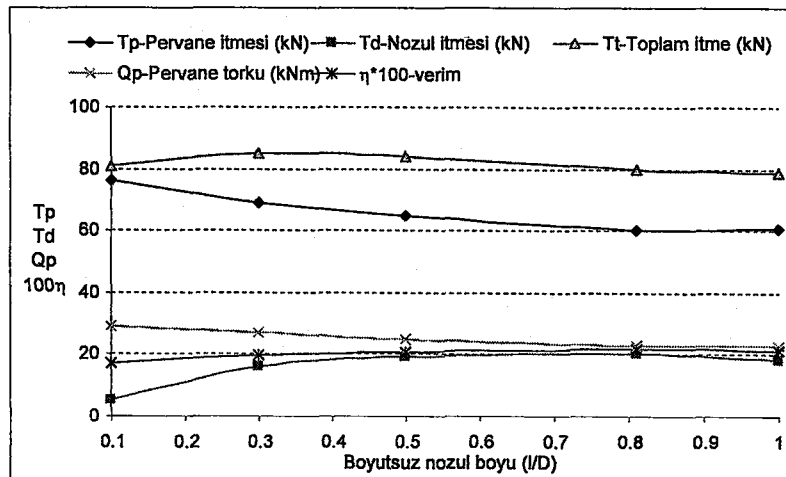
Şekil 5.55 Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.05$)

(NPS 2)



Şekil 5.56 Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.15$)

(NPS 2)



Şekil 5.57 Verim, tork ve itmelerin nozul boyuna (l/D) göre değişimi ($J_A = 0.2$)

(NPS 2)

(NPS 2) için nozul boyunun incelendiği bu çalışmadan (Şekil 5.54-57) sistemin verimin nozul boyundan çok az etkilendiği anlaşılmaktadır. Bu durum hemen hemen tüm ilerleme katsayılarında geçerlidir. Pervane itmesi düşük ilerleme katsayılarında nozul boyundan yaklaşık olarak bağımsızdır denilebilir. Daha yüksek ilerleme katsayılarında ise nozul boyundaki artışla beraber azalmaktadır. Nozul itmesi; ilerleme katsayısı ile ters orantılıdır. İlerleme katsayısı arttıkça nozul itmesi azalmaktadır. Ancak nozul boyunun artmasıyla nozul itmesi de artmaktadır. Genel olarak bakıldığında sistemin toplam itmesi $0.5 - 0.6 D$ civarında maksimum olmaktadır. Verimin de yaklaşık sabit kaldığı düşünüldüğünde bu sistemde nozul boyunun $0.5D$ alınması uygun olacaktır.



6. SONUÇLAR

Balıkçı gemilerinden tankerlere ve denizaltılardan römorkörlere kadar geniş bir kullanım alanına sahip olan nozullu pervane sevk sistemleri üzerine 1960'lardan bu tarafa çok önemli çalışmalar yapılmış ve halen devam etmektedir. Önceleri nozullu pervane dizaynında momentum teorisinin nozullu pervaneye uygulandığı teorik modeller ve performans analizinde de deneysel çalışmalar kullanılırken; bilgisayar teknolojisinin gelişmesine paralel olarak nozul ile pervaneyi ve aralarındaki etkileşimi daha gerçekçi modelleyen sirkülasyon teorilerinin kullanıldığı metodlar geliştirilmiştir. Dizaynda ekseriyetle pervanenin kaldırıcı hatlarla, nozulun da yüzey girdap veya potansiyele dayalı panel metodlarıyla modellendiği yöntemler kullanılırken analizde çoğunlukla, pervane ve nozulun kaldırıcı yüzey veya potansiyele dayalı panel metodları ile modellendiği yöntemler kullanılmıştır. Son yıllarda da nozullu pervane analizi için Navier-Stokes denklemlerinin sayısal olarak çözüldüğü CFD metodları yaygın olarak kullanılmaktadır.

Sunulan bu çalışmada,

- Nozullu pervane sistemleri, nozul çeşitleri ve gereksinimi hakkında genel bilgiler ile daha önce yapılmış çalışmalar verilmiştir.
- Temel pervane teorileri ve nozullu pervane dizayn ve analizinde kullanılan temel akım modelleri anlatılmıştır.
- İleri bir kaldırıcı hat pervane dizayn yönteminin nozul ve göbek için eksenel simetrik yüzey girdap modeliyle beraber kullanılmasıyla; nozul, göbek ve pervane arasındaki etkileşimi iteratif olarak hesaba katan bir nozullu pervane dizayn yöntemi geliştirilerek sunulmuştur. Bu yöntemde nozullu pervane etrafındaki üç boyutlu iz dağılımları kullanılabilmekte ve sistemin gerisindeki akım deformasyonu hesaplara katılabilmektedir.
- Düzensiz akımda çalışan nozullu pervane sevk sistemlerinin performans analizi için kaldırıcı yüzey teorisine dayalı bir metod sunulmuştur. Bu metotta nozul ve pervane kalınlıkları kaynak dağılımlarıyla modellenirken, hidrodinamik yükler de uygun girdap dağılımlarıyla modellenmiştir. Oluşması muhtemel tabaka kavitasyon bölgeleri geometrideki değişme şeklinde hesaplara dahil edilmiştir. Metoda nozullu pervanedeki göbek etkisi de dahil edilerek geliştirilmiştir. Göbek için halka girdap modelinin kullanıldığı yöntemde, nozul girişinde indüklenen hızların hesaplanmasıyla sonuca ulaşılmıştır.

- Çalışmanın uygulaması olarak yukarıda bahsedilen nozullu pervane dizayn ve analiz yöntemleri için örnek uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçları FLUENT CFD metodundan elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Ayrıca göbek ve nozul etrafındaki akım analizi için de örnek bir uygulama yapılmıştır. Nozullu pervanede göbek etkisi de iki farklı sistemde incelenmiştir. Daha sonra aynı nozullu pervane sistemleri için nozul boyu ve pervanenin nozul içerisindeki konumunun sistemin karakteristiklerine etkilerinin farklı ilerleme katsayılarında incelendiği parametrik çalışmalar sunulmuştur.

Yukarıda kısaca özetlenen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Geliştirilen nozullu pervane dizayn yönteminde nozul ve göbek yüzeylerinde, pervane diski üzerinde ve pervane gerisi akım alanındaki radyal ve eksenel olarak değişken iz dağılımları hesaplara katılabilmektedir. Nozul, göbek ve pervane arasındaki kuvvetli etkileşim de iteratif olarak dikkate alınmaktadır. Ayrıca sunulan yöntemde pervane gerisi akımındaki deformasyona izin verilmektedir. Bu şekilde sunulan yöntemden geliştirilen Fortran programı ile verilen dizayn şartları için oldukça gerçekçi ve çabuk olarak nozullu pervane dizaynı yapılabilmektedir. Yazılan programda nozul ve göbek geometrileri, pervanenin nozul içerisindeki yeri ve nozul boyu dışarıdan da girilebilmektedir. Ayrıca nozullu pervane dizaynının önemli aşamalarından olan nozul ve göbek etrafındaki akım analiz prosedürleriyle de, pervanenin bulunmadığı tek nozul, tek göbek veya ikisinin beraber bulunduğu durumlarda ve de aralarındaki etkileşim dikkate alınarak akım analizleri de yapılabilmektedir.
- Nozullu pervane dizaynında elde edilen sonuçları değerlendirmenin bir yolu da nozullu pervane analizidir. Özellikle pervane kanatları üzerinde ve dolayısıyla pervane şaftında oluşacak süreksiz yük dağılımları; titreşim, gürültü ve gemi bünyesinde zorlanmalar gibi istenmeyen olumsuzluklara neden olabilir. Gemi arkası akımındaki düzensizlikler ve oluşması muhtemel kavitasyon olayları da bu olumsuzluklara katkı sağlar. Dizayn aşamalarında bunların ön görülerek kontrol altında tutulmaları gerekir. Çalışmada sunulan yöntemle nozullu pervane sevk sistemleri için hem yukarıda geçen olumsuzlukların kontroluna temel hazırlanmakta, hem de sistemin performansının tahmini yapılabilmektedir. Bu yöntemle ayrıca farklı göbek geometrileri için, göbeğin sisteme etkileri de incelenebilmektedir. Nozullu pervane dizayn yönteminde olduğu gibi, mevcut analiz yöntemi de nozul boyu veya pervanenin nozul içerisindeki konumunun etkilerinin incelenebileceği parametrik çalışmalara imkan vermektedir.

- Çalışmada iki farklı römorkör için dizayn edilmiş nozullu pervane sistemleri kullanılarak analiz uygulamaları yapılmıştır. Kaldırıcı yüzey ve sonlu hacimler metodlarıyla farklı ilerleme katsayıları için yapılan analizlerde genelde yakın sonuçlara ulaşılmıştır. Özellikle düşük ilerleme katsayılarında nozullu pervane karakteristikleri çok iyi bir uyum göstermektedirler. İlerleme katsayıları arttıkça bazı küçük farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Bunun nedeninin; sonlu hacimler metodunda, oluşturulan akışkan geometrilerinin meşlenlenmelerinde kullanılan tekniklerden kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Bunlardan birisi de sınırlı sayıda meş elemanı kullanımıdır. Burada kullanılan bilgisayar kapasitesi sınırlandırıcı olmuştur. Nozullu pervane analiz uygulamaları kapsamında ayrıca bir nozullu pervane modeli için kaldırıcı yüzey metoduyla analiz gerçekleştirilmiştir. Bulunan nozullu pervane karakteristikleri model deneyi sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve aralarında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, sunulan mevcut nozullu pervane dizayn ve analiz yöntemleri ile etkileşimli bir biçimde nozullu pervane sevk performans değerleri hızlı ve güvenilir bir şekilde bütün yükleme şartlarında elde edilebilmektedir. Mevcut çalışma ticari CFD yöntemleri ile karşılaştırıldığında kolay ve hızlı çözümler vermekte, ayrıca bu yöntemlerin kısıtları da aşılmaktadır. Çalışmanın devamı olarak, tekne/sevk sistemi etkileşiminin birlikte ele alındığı pervane/nozul dizayn ve analiz yönteminin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Arslan, F. (2002), *Pervane Dizayn Kriterleri, Bitirme Ödevi, Deniz Harp Okulu, İstanbul.*
- Blaurock, J. (1990), "An Appraisal of Unconventional Aftbody Configurations and Propulsion Devices", *Marine Technology, SNAME*, 27(6): 325-336.
- Breslin, J.P. and Andersen, P. (1994), *Hydrodynamics of Ship Propeller*, Cambridge University Press.
- Brockett, T.E., (1999), "Interaction of Ducted Propulsor and Stern for an Axisymmetric Hull", *International Shipbuilding Progress*, 46(445): 61-89.
- Burrill, L.C, (1944), "Calculation of Marine Propeller Performance Characteristics", *Trans N.E.C.I.E.S.* 60.
- Burrill, L.C, (1955-56), "The Optimum Diameter of Marine Propellers", *Trans N.E.C.I.E.S.*, 72.
- Caracostas, N. (1978), "Off-Design Performance Analysis of Ducted Propellers", *Proc. Propellers/Shafting'78 Symposium, SNAME*, pp. 3.1-3.18, Virginia, USA.
- Carlton, J.S. (1994), *Marine Propellers & Propulsion*, Butterworth- Heinemann Ltd., Oxford.
- Coney, W.B. (1989), *A Method for the Design of a Class of Optimum Marine Propulsors*, PhD. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, USA.
- Çelik, F. ve Güner M. (1997), "Enerji Tasarrufu Sağlayıcı Sevk Cihazları", II. Karamürsel Denizcilik Sempozyumu, 30 Haziran-4 Temmuz 1997, Karamürsel.
- Dwight, H.B. (1963), *Tables of Integrals and Other Mathematical Data*, MacMillan, New York.
- Dyne, G. (1967), "A Method for the Design of Ducted Propellers in a Uniform Flow", Publication No. 62, Swedish State Shipbuilding Experimental Tank, Gotenberg, Sweden.
- Dyne, G. (1973), "Systematic Studies of Accelerating Ducted Propellers in Axial and Inclined Flows", In *Trans. of Symp. on Ducted Propellers*, pp.114-24, London.
- Falcao de Campos, J. A. C. (1983), *On the Calculation of Ducted Propeller Performance in Axisymmetric Flows*, Technical Report 696, Netherlands Ship Model Basin, Wageningen, The Netherlands.
- Falcao de Campos, J. A. (1991), "A Three-Dimensional Theory for the Design Problem of Propeller Ducts in a Shear Flow", *Proc. Eighteenth Symposium on Naval Hydrodynamics(1991)*, pp645- 664.
- Gibson, I. S. ve Lewis, M. A. (1972), "Ducted Propeller Analysis by Surface Vorticity and Actuator Disc Theory", *Proc. Symposium on Ducted Propellers*, pp.1-10, RINA, London.
- Glover, E. J. (1987), "Propulsive Devices for Improved Propulsive Efficiency", *Trans. Institute of Marine Engineers*, 99(31): 23- 29.
- Glover, E.J and Szantyr, J (1988). "Results of Experimental Verification of the Program for Analysis of Ducted Propellers in the Non-Uniform Inflow Field", *Technical Report No. 4/88*, School of Marine Technology, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle.
- Glover, E.J. ve Szantyr, J. (1989), "The Analysis of Unsteady Cavitation and Hull Surface Pressures for Ducted Propellers", *Trans. RINA*, 132: 65-78.
- Gu, H. ve Kinnas, S.A. (2003), "Modeling of Contra-Rotating and Ducted Propellers via Coupling of a Vortex-Lattice with a Finite VolumeMethod", *Propellers/Shafting 2003 Symposium, SNAME, Virginia Beach, VA, September 17-18, 2003.*

- Güner, M. (1994), A Rational Approach to the Design of Propulsors Behind Axisymmetric Bodies, Ph.D. Thesis, University of Newcastle upon Tyne, UK.
- Güner, M. ve Atlar, M. (1994), "Pervane/Stator Sevk Sistemi", Gemi ve Deniz Teknolojisi, Sayı:2-5
- Güner, M. and Atlar, M. (1999) "A Rational Approach to the Design of Propeller/Stator Combination", International Shipbuilding Progress, 46(447): 241-263.
- Hsiao, C.T. ve Chahine, G.L. (2004), "Numerical Study of Cavitation Inception due to Vortex/Vortex Interaction in a Ducted Propulsor", 25th Symposium on Naval Hydrodynamics, St. John's, 8-13 August 2004, Newfoundland and Labrador, Canada.
- Hughes, M.J. ve Kinnas, S.A. (1991), "An Analysis Method for a Ducted Propeller with Pre-Swirl Stator Blades", Proc. Propellers/Shafting'91 Symposium, SNAME, pp. 15.1-15.8, Virginia, USA.
- Kafalı, K., (1982), Gemi Formunun Statik ve Dinamik Esasları, İTÜ, İstanbul.
- Kerwin, J.E., Kinnas, S.A., Lee, J.T. ve Shih, W.Z. (1987), "A Surface Panel Method for the Hydrodynamic Analysis of Ducted Propellers", Trans. SNAME, 95: 93-122.
- Kim, J., Paterson, E. ve Stern, F. (2003), "Verification & Validation and Sub-Visual Cavitation and Acoustic Modeling for Ducted Marine Propulsor", The 8th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, September 22-25, 2003, Busan, Korea.
- Kinnas, S.A. ve Coney, W.B. (1988), "On the Optimum Ducted Propeller Loading", Proc. Propellers/Shafting'88 Symposium, SNAME, pp. 1.1-1.13, Virginia, USA.
- Kinnas, S.A. ve Coney, W.B., (1989), "A Systematic Method for the Design of Ducted Propellers", Fourth International PRADS89 Symposium, pp: 1-8, Varna.
- Kinnas, S.A, Hsin, C.Y. ve Keenan, D. (1991), "A Potential Based Panel Method for the Unsteady Flow Around Open and Ducted Propellers", Proc. Eighteenth Symposium on Naval Hydrodynamics(1991), pp:667- 684.
- Kinnas, S.A. ve Coney, W.B. (1992), "The Generalized Image Model - An Application to the Design of Ducted Propellers", Journal of Ship Research, 36(3): 197-209.
- Kinnas, S.A., Lee, H., Gu, H. ve Gupta, A. (2004), "Prediction of Performance of Ducted and Podded Propellers", 25th Symposium on Naval Hydrodynamics St. John's, 8-13 August 2004, Newfoundland and Labrador, Canada.
- Kobylnsky, L. (1961), "The Calculation of Nozzle Propeller System Based on the Theory of Thin Annular Airfoils with Arbitrary Circulation Distribution", International Ship Building Progress, 8: 41-63.
- Küchemann, D. ve Weber, J. (1953), Aerodynamics of Propulsion, McGraw-Hill, New York.
- Lewis, R.I., (1991), Vortex Element Methods for Fluid Dynamic Analysis of Engineering Systems, Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Martensen, E. (1959), "Berechnung der Druckverteilung and Gitterprofilen in Ebener Potentialströmung mit einer Fredholmschen Integralgleichung", Arch. Rat. Mech., Anal. 3, 235-270.
- Morgan, W.B. (1962), "Theory of the Annular Aerofoil and Ducted Propeller", Proc. Fourth Symposium on Naval Hydrodynamics, pp151- 107.
- Oosterveld, M.W.C, (1970), Wake Adapted Ducted Propellers, NSMB Wageningen Publication, No.345, Holland.

Patience, G. (1991), "Developments in Marine Propellers", Proc. Institute of Mechanical Engineers", 205: 1-12.

Ryan, P.J. ve Glover, E.J., (1972), "A Ducted Propeller Design Method: A New Approach Using Surface Vorticity Distribution Techniques and Lifting Line Theory", Trans. RINA, 144: 545-563.

Sabuncu, T., (1983), Gemi Sevki, İTÜ, İstanbul.

Sparenberg, J.A (1969), "On Optimum Propellers with A Duct of Finite Length", Journal of Ship Research, 35(2): 115-61.

Szantyr, J ve Glover, E.J. (1988), The Unsteady Lifting Surface Program for Analysis of Ducted Propellers in the Non-Uniform Inflow Field, Technical Report No. 3/88, School of Marine Technology, University of Newcastle upon Tyne, Newcastle.

Szantyr, J.A. ve Glover, E.J. (1989), "The Analysis of Unsteady Propeller Cavitation and Hull Surface Pressures for Ducted Propellers", Trans. RINA.

Szantyr, J. (1997), "A Surface Panel Method for Analysis of Open and Ducted Propellers", Proc. Hydronav'97 Conference, pp. 353-364, Wroclaw, Poland.

The Propulsor Committee (1990), Proc. 19th International Towing Tank Conference (ITTC), 1: 109-160, Madrid, Spain.

van Manen, J.D. ve Oosterveld, M.W.C. (1966), "Analysis of Ducted Propeller Design", Trans. SNAME, 74: 522-561, 1966.

Yiu, K.F.C. ve Zangeneh, M. (1998), "On the Simultaneous Design of Blade and Duct Geometry of Marine Ducted Propulsors", Journal of Ship Research, 42(4): 274-296.

İNTERNET KAYNAKLARI

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

EKLER

- Ek 1 Pervane karakteristikleri
- Ek 2 Birinci (E) ve ikinci tip (K) eliptik katsayılar
- Ek 3 Nozullu pervane geometrileri



Ek 1 Pervane karakteristikleri

İlerleme Katsayısı:

$$J = \frac{V_s}{ND}$$

Tork Katsayısı:

$$K_Q = \frac{Q}{\rho \cdot N^2 \cdot D^5}$$

İtme Katsayısı:

$$K_T = \frac{T}{\rho \cdot N^2 \cdot D^4}$$

Yükleme Katsayısı:

$$C_T = \frac{8K_T}{\pi J_s^2 (1 - W_T)^2}$$

Verim:

$$\eta = \frac{J(1 - W_T) \cdot K_T}{2\pi \cdot K_Q}$$

Hidrodinamik Piç Açısı:

$$\beta_i = \tan^{-1} \left(\frac{V_a + u_a}{wr - u_t} \right)$$

Ek 2 Birinci (E) ve ikinci tip (K) eliptik katsayılar

Çizelge Ek 2.1 Birinci (E) ve ikinci tip (K) eliptik integral toplamları (Lewis, 1991)

ϕ	K	E	ϕ	K	E
0.00	1.570796	1.570796	20.50	1.622594	1.524165
0.50	1.570826	1.570766	21.00	1.625234	1.625234
1.00	1.570916	1.570677	21.50	1.627945	1.516639
1.50	1.571066	1.570527	22.00	1.630729	1.514147
2.00	1.572175	1.570318	22.50	1.633586	1.511603
2.50	1.571544	1.570049	23.00	1.636517	1.509007
3.00	1.571874	1.569720	23.50	1.639523	1.506360
3.50	1.572263	1.569332	24.00	1.642604	1.503662
4.00	1.572712	1.568884	24.50	1.645761	1.500914
4.50	1.573222	1.568376	25.00	1.648995	1.498115
5.00	1.573792	1.567809	25.50	1.652307	1.495266
5.50	1.574423	1.567183	26.00	1.655697	1.492369
6.00	1.575114	1.566497	26.50	1.659166	1.489422
6.50	1.575865	1.565752	27.00	1.662716	1.486427
7.00	1.576678	1.564948	27.50	1.666347	1.483384
7.50	1.577552	1.564948	28.00	1.670059	1.480293
8.00	1.578487	1.563162	28.50	1.673855	1.477155
8.50	1.579483	1.562181	29.00	1.677735	1.473970
9.00	1.580541	1.561142	29.50	1.681700	1.470739
9.50	1.581661	1.560044	30.00	1.685750	1.467462
10.00	1.582843	1.558887	30.50	1.689888	1.464140
10.50	1.584087	1.557673	31.00	1.694114	1.460774
11.00	1.585394	1.556400	31.50	1.698430	1.145363
11.50	1.586764	1.555069	32.00	1.702836	1.453908
12.00	1.588197	1.553681	32.50	1.707334	1.446869
12.50	1.589694	1.552235	33.00	1.711925	1.446869
13.00	1.591254	1.550732	33.50	1.716610	1.443286
13.50	1.159288	1.549172	34.00	1.721391	1.439662
14.00	1.594568	1.547555	34.50	1.726269	1.435997
14.50	1.596323	1.545881	35.00	1.731245	1.432291
15.00	1.598142	1.544150	35.50	1.736321	1.428545
15.50	1.600027	1.542364	36.00	1.741499	1.424760
16.00	1.601979	1.540522	36.50	1.746780	1.420937
16.50	1.603996	1.538623	37.00	1.752165	1.417075
17.00	1.606081	1.536670	37.50	1.757657	1.413176
17.50	1.608234	1.534661	38.00	1.763256	1.409240
18.00	1.610454	1.532597	38.50	1.768965	1.405268
18.50	1.612743	1.530479	39.00	1.774786	1.401260
19.00	1.615101	1.528306	39.50	1.780720	1.397217
19.50	1.617528	1.526080	40.00	1.786769	1.393140
20.00	1.610026	1.523799	40.50	1.792936	1.389030

ϕ	K	E	ϕ	K	E
41.00	1.799222	1.384887	65.50	2.326124	1.159178
41.50	1.805629	1.380711	66.00	2.343905	1.154547
42.00	1.812160	1.376504	66.50	2.362147	1.149936
42.50	1.818817	1.372267	67.00	2.380870	1.145348
43.00	1.825602	1.367999	67.50	2.400094	1.140783
43.50	1.832518	1.363702	68.00	2.419842	1.136244
44.00	1.839567	1.359377	68.50	2.440135	1.131733
44.50	1.846751	1.355024	69.00	2.460999	1.127250
45.00	1.854075	1.350644	69.50	2.482462	1.122797
45.50	1.861539	1.346238	70.00	2.504550	1.118378
46.00	1.869148	1.341806	70.50	2.527296	1.113992
46.50	1.876903	1.337350	71.00	2.550731	1.109643
47.00	1.884809	1.332870	71.50	2.574893	1.105333
47.50	1.892868	1.328367	72.00	2.599820	1.101062
48.00	1.901083	1.323842	72.50	2.625553	1.096834
48.50	1.909459	1.319296	73.00	2.652138	1.092650
49.00	1.917998	1.314730	73.50	2.679625	1.088513
49.50	1.926704	1.310144	74.00	2.708068	1.084425
50.00	1.935581	1.305539	74.50	2.737525	1.080388
50.50	1.944633	1.300917	75.00	2.768063	1.076405
51.00	1.953865	1.296278	75.50	2.799753	1.072478
51.50	1.963280	1.291623	76.00	2.832673	1.068610
52.00	1.972882	1.286954	76.50	2.866911	1.064802
52.50	1.982677	1.282270	77.00	2.902565	1.061059
53.00	1.992670	1.277574	77.50	2.939744	1.057383
53.50	2.002864	1.272866	78.00	2.978569	1.053777
54.00	2.013267	1.268147	78.50	3.019179	1.050244
54.50	2.023882	1.263417	79.00	3.061729	1.046786
55.00	2.045773	1.258680	79.50	3.106396	1.043409
55.50	2.045773	1.253934	80.00	3.153385	1.040114
56.00	2.057062	1.249182	80.50	3.202930	1.066907
56.50	2.068588	1.244424	81.00	3.255303	1.033789
57.00	2.080358	1.239661	81.50	3.310823	1.030767
57.50	2.092379	1.234895	82.00	3.369868	1.027844
58.00	2.104658	1.230127	82.50	3.343289	1.025024
58.50	2.117203	1.225358	83.00	3.500422	1.022313
59.00	2.130021	1.220589	83.50	3.573138	1.019715
59.50	2.143123	1.215821	84.00	3.651856	1.017237
60.00	2.156516	1.211056	84.50	3.737613	1.014884
60.50	2.170209	1.206295	85.00	3.831742	1.012664
61.00	2.184213	1.201538	85.50	3.935998	1.010582
61.50	2.198538	1.196788	86.00	4.052758	1.008648
62.00	2.213195	1.192046	86.50	4.185351	1.006870
62.50	2.228194	1.187312	87.00	4.338654	1.005259
63.00	2.243549	1.182589	87.50	4.520223	1.005259
63.50	2.592720	1.177878	88.00	4.742717	1.002584
64.00	2.275376	1.173179	88.50	5.029861	1.001552
64.50	2.291876	1.168496	89.00	5.434910	1.000752
65.00	2.308787	1.163828	89.50	6.127779	1.000214

Ek 3 Nozullu pervane geometrileri

Çizelge Ek 3.1 Pervane geometrisi (NPS 1)

Yarıçap	Piç	Kort	Çalıklık	Eğiklik
r/R	P/D	Cl (m)	Sl (m)	RKl (m)
0.2	0.9402	0.1705	-0.0090	0.0000
0.3	0.9402	0.1945	-0.0060	0.0000
0.4	0.9402	0.2163	-0.0030	0.0000
0.5	0.9402	0.2362	-0.0020	0.0000
0.6	0.9402	0.3039	0.0000	0.0000
0.7	0.9402	0.2688	0.0000	0.0000
0.8	0.9402	0.2795	0.0000	0.0000
0.9	0.9402	0.2860	0.0000	0.0000
1	0.9402	0.2866	0.0000	0.0000

Çizelge Ek 3.2 Kanat kesit geometrileri (NPS 1)

[illegible]

Çizelge Ek 3.3 Pervane geometrisi (NPS 2)

Nozul Geometrilere:

Çizelge Ek 3.7 NSMB nozul no: 19A kesit geometrisi (NPS 1 ve NPS 3)

x/c/L	0.0000	0.0125	0.0250	0.0500	0.1000	0.1500	0.2000	0.3000	0.4000	0.5000	0.7000	0.8000	0.9000	0.9500	1.0000
Tdis/L	0.1820	0.2070	0.2100	0.2070	0.2000	0.1930	0.1840	0.1690	0.1540	0.1380	0.1080	0.0940	0.0790	0.0723	0.0440
tic/L	0.1820	0.1460	0.1280	0.1000	0.0630	0.0380	0.0210	0.0048	0.0000	0.0000	0.0029	0.0082	0.0144	0.0185	0.0440

Çizelge Ek 3.8 Nozul kesit geometrisi (NPS 2)

x/c/L	0.0000	0.1760	0.3160	0.4550	0.5710	0.6720	0.7590	0.8400	0.9200	1.0000
tdis/L	0.1643	0.2267	0.2183	0.1974	0.1704	0.1489	0.5300	0.1290	0.1260	0.1234
tic/L	0.1643	0.0352	0.0079	0.0000	0.0000	0.0074	0.0166	0.0283	0.0474	0.1234

Çizelge Ek 3.9 Nozul girişindeki düzensiz iz dağılımı (NPS 3)

r/R	0.420	0.480	0.560	0.660	0.840	1.020	1.200	1.380
W1=	0.611	0.624	0.598	0.584	0.584	0.584	0.598	0.584
W2=	0.624	0.624	0.570	0.526	0.637	0.721	0.721	0.743
W3=	0.721	0.732	0.765	0.754	0.754	0.816	0.816	0.845
W4=	0.786	0.754	0.816	0.836	0.836	0.836	0.816	0.826
W5=	0.826	0.845	0.836	0.826	0.911	0.954	0.945	0.945
W6=	0.864	0.855	0.864	0.937	0.962	0.945	0.979	0.979
W7=	0.883	0.883	0.945	0.971	0.937	0.954	0.954	0.945
W8=	0.816	0.892	0.928	0.937	0.937	0.971	0.971	0.979
W9=	0.855	0.892	0.954	0.954	0.971	0.971	0.928	0.987
W10=	0.836	0.864	0.954	0.954	0.979	0.971	0.979	0.975
W11=	0.786	0.826	0.971	0.971	0.962	0.954	0.962	0.971
W12=	0.786	0.775	0.892	0.892	0.971	0.979	0.954	1.004
W13=	0.721	0.764	0.883	0.883	0.945	0.962	0.962	1.007
W14=	0.743	0.764	0.883	0.883	0.962	1.011	0.945	0.991
W15=	0.826	0.826	0.962	0.962	0.962	0.979	0.945	0.995
W16=	0.816	0.836	0.958	0.958	0.975	0.958	0.937	1.000
W17=	0.811	0.883	0.937	0.937	0.979	0.967	0.962	0.991
W18=	0.811	0.836	0.937	0.937	0.962	0.971	0.945	0.979
W19=	0.853	0.845	0.945	0.945	0.987	0.962	0.962	0.971
W20=	0.864	0.855	0.855	0.855	0.937	0.954	0.962	0.962
W21=	0.806	0.845	0.826	0.816	0.816	0.864	0.945	0.953
W22=	0.754	0.754	0.816	0.836	0.816	0.816	0.816	0.806
W23=	0.721	0.732	0.732	0.743	0.721	0.786	0.786	0.796
W24=	0.624	0.637	0.624	0.570	0.570	0.611	0.611	0.721

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	05.05.1973	
Doğum yeri	Isparta	
Lise	1987-1990	Isparta Lisesi
Lisans	1990-1994	İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	1995-1997	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora	1997-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gemi İnşaatı Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

1995-Devam ediyor YTÜ Makine Fakültesi Gemi İnşaatı Müh. Bölümü
Araştırma Görevlisi