

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKNE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN SINIR TABAKA VE GEMİ
DİRENCİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Onur USTA

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Yüksek Lisans
Programı**

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEKNE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN SINIR TABAKA VE GEMİ
DİRENCİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Onur USTA
(508091021)**

Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Anabilim Dalı

**Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisliği Yüksek Lisans
Programı**

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Emin KORKUT

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508091021 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Onur USTA**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**TEKNE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN SINIR TABAKA VE GEMİ DİRENCİNE ETKİSİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr.Emin KORKUT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Kadir SARIÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ali Can TAKİNACI
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **4 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **4 Haziran 2012**

Canım aileme ve dostlarıma,

ÖNSÖZ

Tez çalışmam sırasında tüm bilgi ve deneyimini benimle paylaşarak her aşamada yanımda olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Emin KORKUT'a, göstermiş olduğu ilgi ve anlayış için çok teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresince bilgi ve desteklerini esirgemeyen, çalışma için gerekli olan verilerin temininde yardımcı olan Prof. Dr. Ömer GÖREN, Y. Doç. Dr. Devrim Bülent DANIŞMAN, Y. Doç. Dr. Uğur Oral ÜNAL'a teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmam sırasında bilgi ve desteklerini esirgemeyen Arş. Gör. Ahmet Gültekin AVCI ve Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı personeline teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında yardım ve destekleri ile her zaman yanımda olan dostlarım Cumhur İNCEKARA, Ferdi ÇAKICI, Murat ÖZDEMİR, Yasin Kaan İLTER'e özel olarak teşekkür ederim.

Bu tezin hazırlanmasında proje desteği ile katkıda bulunan İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederim.

Son olarak, tüm yüksek lisans eğitimim süresince yanımda olan aileme, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2012

Onur Usta
(Gemi İnşaatı ve Gemi Makinaları Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
SEMBOLLER	xiii
KISALTMALAR.....	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY.....	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Konunun Anlam ve Önemi	1
1.2 Genel Bilgiler.....	2
1.3 Amaç ve Kapsam.....	3
1.4 Literatür Araştırması	4
2. GEMİ DİRENCİ BİLEŞENLERİ VE MODEL DENEYLERİ İLE GEMİ DİRENCİNİ BELİRLEME YÖNTEMLERİ	9
2.1 Gemi Direnci ve Bileşenleri.....	9
2.2 Gereç ve Yöntemler.....	12
2.3 Gemi Model Deneyleri ile Gemi Direncinin Belirlenmesi	14
2.3.1 Froude yöntemi.....	14
2.3.2 Hughes yöntemi.....	16
2.3.2.1 k form faktörünün hesaplanması	17
2.3.3 Prohasha yöntemi	18
2.3.4 ITTC 1957 yöntemi	18
2.3.5 ITTC 1978 yöntemi	20
3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN SINIR TABAKA ÜZERİNE ETKİSİ	21
3.1 Sınır Tabaka Kavramı.....	21
3.2 Sınır Tabakanın Oluşumu	22
3.3 Levha Etrafındaki Sınır Tabaka	24
3.4 Gemi Etrafındaki Sınır Tabaka	27
3.5 Türbülans ve Türbülanslı Sınır Tabakanın Yapısı	27
3.5.1 Türbülanslı akış	27
3.5.2 Türbülanslı sınır tabakanın yapısı.....	28
3.5.2.1 Kayma gerilmesi ve sürtünme hızı	30
3.5.2.2 Uzunluk ve hız ölçekleri	31
3.5.2.3 İç tabaka	32
3.5.2.4 Dış tabaka	32
3.5.2.5 Birleşme (overlap) bölgesi - Logaritmik hız bölgesi (Log-law).....	33
3.5.2.6 Viskoz alt tabaka.....	34
3.5.2.7 Çeşitli bölgelerin sınır değerleri	34
3.6 Sınır Tabaka Kalınlığı	34
3.7 Sınır Tabakalarda Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi.....	36

4. TEKNE VE PERVANE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ.....	39
4.1 Tekne ve Pervane Yüzey Pürüzlülüğü Özellikleri	39
4.2 Pürüzlülük Rejimi	43
4.3 Antifouling Boya Türleri ve Pürüzlülüğe Etkileri	44
4.3.1 Kendi kendini temizleyen kopolimerler (Self polishing copolymers) (TBT SPC)	44
4.3.2 Bakır içerikli antifouling boyalar	45
4.3.3 Fouling salınımlı antifouling boyalar	45
4.3.4 Tribütlin (TBT) içermeyen SPC boyalar	46
4.3.5 TBT içermeyen kendisini cilalayan hibrit boyalar.....	46
4.4 Fouling Salınımlı Antifouling Boyaların Avantajları	46
4.5 Fouling Salınımlı Antifouling Boyaların Dezavantajları	48
4.6 Ekonomik Değerlendirmeler	48
5. PÜRÜZLÜLÜK GEOMETRİSİNİ TANIMLAYAN PARAMETRELER	51
5.1 Genlik Parametreleri	51
5.1.1 Sınır değer parametreleri	51
5.1.1.1 Tüm ölçüm uzunluğu için maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamı.....	52
5.1.1.2 Pürüzlülüğün 10 noktalı yüksekliği	52
5.1.2 Ortalama parametreleri.....	53
5.1.2.1 Karelerinin ortalamasının karekökü (RMS) pürüzlülüğü	53
5.1.2.2 Ortalama pürüzlülük	53
5.1.2.3 Ortalama görünür genlik	54
5.1.2.4 Rt50 tekne pürüzlülüğü	54
5.1.3 Yükseklik dağılımı parametreleri	55
5.2 Doku Parametreleri	56
5.2.1 Aralıkla parametreleri.....	57
5.2.1.1 Yüksek nokta sayısı.....	57
5.2.1.2 Tepe sayma dalga boyu	57
5.2.2 Hibrit parametreler	57
5.2.3 Spektral parametreler	57
5.2.4 Kesirsel parametreler.....	58
6. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	61
6.1 Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı	61
6.2 Deneyde Kullanılan Program, Araç ve Gereçler	62
6.3 Alüminyum Levhaların Özellikleri.....	62
6.4 Pürüzlülük Parametrelerinin Ölçümü ve Karşılaştırılması	64
6.5 Direnç Deneyleri Öncesi Kalibrasyon İşlemi	66
6.6 Direnç Deneylerinin Yapılışı.....	67
6.7 Direnç Deneylerinin Sonuçları ve Hesaplamalar.....	69
6.7.1 Dalga direnci hesabı	70
6.7.2 Viskoz direncin hesaplanması	72
6.7.3 Sürtünme direnci ve katsayısı hesaplaması	73
6.8 Sürtünme Direnci Karşılaştırması	73
6.9 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	75
7. SAYISAL HESAPLAMA.....	81
7.1 Çözüm geometrisinin oluşturulması	81
7.2 Meshin oluşturulması	84
7.3 Çözümün fiziksel özelliklerinin belirlenmesi	86

7.4 Çözümün Doğru Kabul Edilmesi (Yakınsaması) İçin Göz Önünde	
Bulundurulananlar	91
7.5 Matematiksel Model	92
7.5.1 k-Epsilon türbülans modeli	93
7.5.1.1 İki tabaka (two-layer) yaklaşımı	93
7.5.1.2 Gerçeklenebilir (Realizable) iki-tabaka k-Epsilon model.....	94
7.5.1.3 k-Epsilon duvar işleminin (wall treatment) belirlenmesi	94
7.6 Pürüzlülüğün Programdaki ifadesi ve hesaplamalara dahil edilmesi	95
7.6.1 Karışık (blended) duvar fonksiyonu	97
7.6.2 Pürüzlülük fonksiyonu	97
7.7 Sayısal Hesaplama Analizinin Sonuçları.....	98
7.8 Deney Sonuçları İle Sayısal Hesaplama Sonuçlarının Karşılaştırması	104
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	111
KAYNAKLAR.....	115
EKLER.....	121
ÖZGEÇMİŞ	133

SEMBOLLER

B	: Pürüzsüz duvar logaritmik hız bölgesi sabiti
C_A	: Korelasyon müsadese, pürüzlülük toleransı katsayısı
C_{AA}	: Hava direnci katsayısı
C_T	: Toplam direnç katsayısı
C_F	: Sürtünme direnci katsayısı
C_{PV}	: Viskoz basınç direnci katsayısı
C_V	: Viskoz direnç katsayısı
C_W	: Dalga direnci katsayısı
ΔC_{Fs}	: Tekne pürüzlülük katsayısı
f_w	: Duvar fonksiyonu
Fr	: Froude sayısı
h^+	: Pürüzlülük Reynolds sayısı
h	: Pürüzlülüğün ölçüsü ile ilgili bir özellik, pürüzlülük yüksekliği
h/m	: Rugosity
k	: Form faktörü
k	: Pürüzlülük yüksekliği
k^+	: Pürüzlülük Reynolds sayısı
k_s^+	: Eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği
L	: Boy, uzunluk
m	: Pürüzlülük doku parametresi
$p(z)$	: Olasılık sıklığı
$P(z)$	: Eklenerek artan (cumulative) yükseklik dağılımı
$\partial u / \partial y$	: Hız gradyanı (hızın türevi)
τ	: Kayma gerilmesi
τ_t	: Türbülans kayma gerilmesi
τ_w	: Duvar kayma (kesme) gerilmesi
μ	: Dinamik viskozite
δ	: Sınır tabaka kalınlığı
δ^+	: Reynolds sayısına bağlı sınır tabaka kalınlığı $\left(\frac{\delta U_\tau}{\nu} \right)$
ρ	: Yoğunluk
κ	: Von Karman sabiti
$\lambda = L_s / L_m$	: Ölçek katsayısı
λ	: Dalga boyu
λ	: Pürüzlülük mesafesi parametresi
R_T	: Toplam direnç
R_F	: Sürtünme direnci
R_{PV}	: Viskoz basınç direnci
R_V	: Viskoz direnç
R_W	: Dalga direnci
Re	: Reynolds sayısı

Re_τ	: Sürtünme Reynolds sayısı
R_a	: Ortalama pürüzlülük yüksekliği
R_t (R_{max})	: Maksimum pürüzlülük yüksekliği
R_z	: Pürüzlülüğün 10 noktalı yüksekliği
R_q	: Ortalama karekök (RMS) pürüzlülüğü
R_{t50}	: Ortalama pürüzlülük yüksekliği
$R(\tau)$	: Otokorelasyon fonksiyonu
S	: Islak alan
$u^+ = \frac{Q}{u_\tau}$	: Boyutsuz hız
$y^+ = \frac{y u_\tau}{\nu}$	: Boyutsuz mesafe. Sınır tabakada duvara en yakın hücrenin merkezinin duvara olan uzaklığı.
$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$	: Kayma hızı, sürtünme hızı
U_0	: Akışkan hızı
U	: Ortalama akış hızı
U_e	: Serbest akış hızı
$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$	: Kayma hızı
u	: Akışkan hızının yatay bileşeni, tam türbülanslı hız , $u = U + u'$
u'	: Dalgalanan akış hızı
$-\overline{u'v'}$	: Reynolds gerilmesi (ρ ile bölünmüş)
U^+	: Log-law hız profili
ΔU^+	: Pürüzlülük fonksiyonu, hız kaybı fonksiyonu.
χ	: Nikuradse'nin pürüzlülük fonksiyonu formu
χ_r	: Tam pürüzlü akış rejiminde Nikuradse'nin pürüzlülük fonksiyonunun sabit değeri
ν	: Kinematik viskozite

KISALTMALAR

AHR	: Ortalama Pürüzlülük Yüksekliği (Average Hull Roughness)
ATTC	: American Towing Tank Conference
BSRA	: British Ship Research Association
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (Computational Fluid Dynamics)
ITTC	: International Towing Tank Conference
IMO	: International Maritime Organization
PNS	: Parabolik Navier-Stokes denklemleri
RANS	: Reynolds Averaged Navier-Stokes denklemleri
LES	: Large Eddy Simulation
DES	: Detached Eddy Simulation
DNS	: Direct Numerical Solution
MAA	: Mean Apparent Amplitude
VOF	: Volume of Fluid

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : C_A için gemi boyuna göre önerilen değerler (Bertram, 2000)	20
Çizelge 6.1 : Levha 1'in pürüzlülük değerleri.....	64
Çizelge 6.2 : Levha 2'nin pürüzlülük değerleri.....	64
Çizelge 6.3 : Levha 3'ün pürüzlülük değerleri.....	65
Çizelge 6.4 : Levha 4'ün pürüzlülük değerleri.....	65
Çizelge 6.5 : Levha 5'in pürüzlülük değerleri.....	65
Çizelge 6.6 : Tek bileşenli dinamometre kalibrasyonu.....	66
Çizelge 6.7 : ITU Dawson programı ile hesaplanan dalga direnci değerleri.....	71
Çizelge 6.8 : Levha 1'in hıza göre sürtünme direnci.....	73
Çizelge 6.9 : Levha 2 ve levha 3'ün hıza göre sürtünme dirençleri.....	73
Çizelge 6.10 : Levha 4 ve levha 5'in hıza göre sürtünme dirençleri.....	74
Çizelge 6.11 : Levha 1'in çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	76
Çizelge 6.12 : Levha 1'in direnç katsayıları.....	76
Çizelge 6.13 : Levha 2'nin çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	76
Çizelge 6.14 : Levha 2'nin direnç katsayıları.....	77
Çizelge 6.15 : Levha 3'ün çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	77
Çizelge 6.16 : Levha 3'ün direnç katsayıları.....	77
Çizelge 6.17 : Levha 4'ün çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	78
Çizelge 6.18 : Levha 4'ün direnç katsayıları.....	78
Çizelge 6.19 : Levha 5'in çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	78
Çizelge 6.20 : Levha 5'in direnç katsayıları.....	79
Çizelge 7.1 : Levha 1'in verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	99
Çizelge 7.2 : Levha 1'in direnç katsayıları.....	99
Çizelge 7.3 : Levha 2'nin verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci	

katsayıları.....	99
Çizelge 7.4 : Levha 2'nin direnç katsayıları.....	100
Çizelge 7.5 : Levha 3'ün verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	100
Çizelge 7.6 : Levha 3'ün direnç katsayıları.....	100
Çizelge 7.7 : Levha 4'ün verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	101
Çizelge 7.8 : Levha 4'ün direnç katsayıları.....	101
Çizelge 7.9 : Levha 5'in verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	101
Çizelge 7.10 : Levha 5'in direnç katsayıları.....	102
Çizelge 7.11 : Pürüzsüz levhanın verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.....	102
Çizelge 7.12 : Pürüzsüz levhanın direnç katsayıları.....	102
Çizelge 7.13 : Levha 1'in direnç değerlerinin karşılaştırması.....	104
Çizelge 7.14 : Levha 2'in direnç değerlerinin karşılaştırması.....	105
Çizelge 7.15 : Levha 3'ün direnç değerlerinin karşılaştırması.....	106
Çizelge 7.16 : Levha 4'ün direnç değerlerinin karşılaştırması.....	108
Çizelge 7.17 : Levha 5'in direnç değerlerinin karşılaştırması.....	109
Çizelge A.1 : Alüminyum levhanın boyut özellikleri.....	122
Çizelge A.2 : 2.50 m/s hız için Belirsizlik analizi verileri.....	122
Çizelge A.3 : 3.0 m/s hız için Belirsizlik analizi verileri.....	123

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Direncin kavramsal gösterimi (Url-1).....	10
Şekil 2.2 : Gemi direncinin bileşenleri.	10
Şekil 2.3 : Gemilerin belirli direnç bileşenleri (Url-1).....	12
Şekil 2.4 : Form faktörü (k) ekstrapolasyonu (Bertram, 2000).....	18
Şekil 2.5 : ITTC 1957 yönteminin şematik gösterimi (Baykal ve Dikili, 2002).....	19
Şekil 3.1 : Gemide sınır tabaka oluşumu (Barlas, 1999).	23
Şekil 3.2 : Levha yüzeyi boyunca sınır tabaka.....	24
Şekil 3.3 : Laminer ve türbülanslı sınır tabaka hız profillerinin karşılaştırılması.....	25
Şekil 3.4 : Türbülanslı akışa ait boyutsuz hız dağılımı (Barlas, 1999).	26
Şekil 3.5 : Bir pürüzsüz duvar türbülanslı sınır tabaka için ortalama hız profili (Schultz ve diğ, 2004).....	29
Şekil 3.6 : Türbülanslı sınır tabaka profilleri: pürüzsüz ve pürüzlü duvar (Schultz ve diğ, 2004).	30
Şekil 3.7 : Türbülanslı sınır tabaka hız öğeleri (Url-3)..	31
Şekil 4.1 : Aynı genlik parametresine fakat farklı dokulara sahip iki yüzey ve onların otokorelasyon fonksiyonları (Thomas, 1999).....	41
Şekil 4.2 : Farklı pürüzlülük türlerinin görselleştirilmesi (Faltinsen, 2005).	42
Şekil 4.3 : Pürüzlülük türleri (Url-4).....	43
Şekil 4.4 : Antifouling boyaların karşılaştırılması (Url-4).	47
Şekil 4.5 : Artan yüzey pürüzlülüğü karşısında geminin hızını koruyabilmesi için gerekli güç/yakıt artışı (Url-4)	50
Şekil 4.6 : Tanker ve dökme yük gemileri için artan tekne pürüzlülüğü karşısında hız kaybı (Url-4).....	50
Şekil 5.1 : Örnek uzunluk ve ölçüm uzunluğu.	51
Şekil 5.2 : R değerleri (Url-5).	52
Şekil 5.3 : Pürüzlü bir yüzey için R_a , R_q ve R_t (Ünsalan, 1992).....	54
Şekil 5.4 : R_{t50} yüksekliğinin açıklaması	55
Şekil 5.5 : Profil yükseklik dağılımı $p(z)$ ve eklenerek artan (cumulative) yükseklik dağılımı $P(z)$ (Thomas, 1999).	55
Şekil 5.6 : Yaklaşık olarak aynı pürüzlülük genliğine sahip iki farklı dokuda yüzey (Mosaad, 1986).....	56
Şekil 5.7 : Otokovaryans fonksiyonunun yapısı (Thomas, 1999).....	57
Şekil 6.1 : Ata Nutku Gemi Model Laboratuvarı'ndaki Deney Havuzu.....	62
Şekil 6.2 : Levha 4 deney havuzuna götürülüyor.....	63
Şekil 6.3 : Alüminyum levhalardan üçü (soldan levha 5, levha 3 ve levha 2).....	65
Şekil 6.4 : R35-I dinamometresinin kalibrasyon grafiği.....	66
Şekil 6.5 : Levha 1, 50 cm draftta yaklaşık 3.76 m/s hızla çekiliyor.....	68
Şekil 6.6 : Levha 1, 41 cm draftta 2 m/s hızla çekiliyor.....	68
Şekil 6.7 : Levha 2'nin 0.52 m/s hızla çekilmesi deneyi öncesi sıfır alma işlemi.....	69
Şekil 6.8 : Levha 2'nin 2.01 m/s hızla çekilmesine ait resim.....	69
Şekil 6.9 : Levha ve serbest yüzeye dörtgen panel dağıtımı.....	71

Şekil 6.10 : Hesaplanan dalga direnci değerleri.....	71
Şekil 6.11: Prohaska yöntemi ile k form faktörü hesabı grafiği.....	72
Şekil 6.12 : Reynolds sayısı-sürtünme direnci katsayısı grafiği.....	74
Şekil 6.13 : Sürtünme direnci-hız grafiği.....	74
Şekil 6.14 : Hız- R_T ölçülen toplam direnç karşılaştırması.....	79
Şekil 6.15 : Reynolds sayısı-Toplam direnç katsayısı C_T grafiği.....	79
Şekil 7.1 : Alüminyum levha boyutları.....	81
Şekil 7.2 : Deney tankı ve levhanın mesh atılmadan önceki görüntüsü.....	82
Şekil 7.3 : Geometrinin yüzey isimlendirmeleri.....	83
Şekil 7.4 : Daha kaliteli mesh atabilmek için oluşturulan bloklar.....	83
Şekil 7.5 : Çözüm modelinin meshlenmiş hali görülmektedir.....	85
Şekil 7.6 : Levhanın suya girdiği kısımdaki prism layerlar ve mesh yapısı.....	86
Şekil 7.7 : Levhaya yakın bölgeye ve levhanın kendisine doğru giderek sıklaşan mesh.....	86
Şekil 7.8 : Levha 2'nin deney havuzunda 2 m/s hızla ilerlemesinin gösterimi.....	88
Şekil 7.9 : Belirlenen fiziksel koşullar.....	89
Şekil 7.10 : Çözüm modellerinin referans değerleri ve başlangıç koşulları.....	90
Şekil 7.11 : Çözüm modelinin hava ve su ortamlarına ayrılması.....	90
Şekil 7.12 : Artan pürüzlülük parametresi R^+ ile azalan E'	96
Şekil 7.13 : Levha 1'in 3 m/s hızda STAR-CCM direnç raporu.....	98
Şekil 7.14 : Hız-Toplam direnç grafiği.....	103
Şekil 7.15 : Reynolds sayısı-Toplam direnç katsayısı grafiği.....	103
Şekil 7.16 : Levha 1'in toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.....	104
Şekil 7.17 : Levha 1'in toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.....	104
Şekil 7.18 : Levha 1 için C_F karşılaştırması.....	105
Şekil 7.19 : Levha 2'nin toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.....	105
Şekil 7.20 : Levha 2'nin toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.....	106
Şekil 7.21 : Levha 2 için C_F karşılaştırması.....	106
Şekil 7.22 : Levha 3'ün toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.....	107
Şekil 7.23 : Levha 3'ün toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.....	107
Şekil 7.24 : Levha 3 için C_F karşılaştırması.....	107
Şekil 7.25 : Levha 4'ün toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.....	108
Şekil 7.26 : Levha 4'ün toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.....	108
Şekil 7.27 : Levha 4 için C_F karşılaştırması.....	109
Şekil 7.28 : Levha 5'in toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.....	109
Şekil 7.29 : Levha 5'in toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.....	110
Şekil 7.30 : Levha 5 için C_F karşılaştırması.....	110

TEKNE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN SINIR TABAKA VE GEMİ DİRENCİNE ETKİSİ

ÖZET

Dünya üzerindeki kaynakların azalmasıyla birlikte, son yıllarda yakıt fiyatları deniz taşımacılığının en büyük sorunlarından bir tanesi olmuştur. Artan yakıt fiyatları karşısında tüketimde azalmaya gitmek yani birim yol başına yakıt tüketimini düşürmek konu ile ilgilenen araştırmacıların temel hedefi olmuştur. Birim yol başına yakıt tüketimini düşürmek bir diğer ifade ile gemi sevk verimini artırmak, gemi direncini azaltmak ile mümkündür. Gemi direnci çeşitli direnç bileşenlerinin toplamından oluşmaktadır. Bu direnç bileşenlerinin her birine etkiyen çeşitli parametreler mevcuttur. Bu parametrelerden bir tanesi tekne yüzey pürüzlülüğüdür.

Tekne yüzey pürüzlülüğünün geminin performansı üzerinde negatif bir etki yarattığı ilk denizcilik faaliyetlerinden beri bilinen bir gerçektir. Tekne yüzeyi pürüzlendikçe, geminin toplam viskoz direnci (sürtünme direnci+viskoz basınç direnci) artmaktadır. Aynı şekilde pürüzlülük pervane üzerinde de direnci artırıcı etki yapar. Sınır tabaka için de pürüzlülük etkisi önemlidir.

Geminin dizayn aşamasında iken direnç kuvvetlerinin doğru şekilde hesaplanması, doğru sevk sisteminin kullanılması ve dolayısıyla geminin ömrü boyunca minimum yakıt tüketimi ile gereken performansı göstermesini sağlar. Geminin dizayn aşamasında iken hıza göre toplam direnç değerinin tahmin edilmesinde çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Model deneyleri ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği kullanılarak yapılan sayısal hesaplama en çok kullanılan metodlardandır. Gemi hidrodinamiğinde sayısal hesaplamalar her zaman önemli olsa da, model deneyleri gemiler için gereken gücü veya direnci hesaplamada dizayn spiralinin hayati bir kısmıdır. Ancak model deneyleri ile dirence etki eden tüm parametreler hesaba katılamaz. Teknenin boy, genişlik, draft gibi boyutlarının yanında pürüzlülük parametresi çok küçük olduğundan modelde pürüzlülüğü oluşturmak, gemideki pürüzlülüğü modelde ölçeklendirmek çok zordur.

Model deneyleri pürüzsüz kabul edilen yüzeyler ile türbülanslı akımda yapılır. Ancak gerçek gemi koşullarında tekne ve pervane yüzeyinde pürüzlülük vardır. Gerçek geminin direnci incelenirken pürüzlülük etkisi sürtünme direnci katsayısı C_F 'nin belirli bir yüzdesi olarak alınmaktadır. Pürüzlülük etkisi uzun yıllar boyunca pürüzsüz yüzey için elde edilen sürtünme direnci katsayısına bir sabit eklenerek veya çeşitli ampirik formüller ile hesaba katılmıştır. Günümüzde ise genellikle geminin su hattı boyuna göre değişen, C_A ile gösterilen korelasyon katsayısı (allowance coefficient) kullanılmaktadır. Bu katsayı tamamen ampirik olup ortalama bir pürüzlülük durumunu temsil eder. Bu sebeple, tüm gemi tipleri için ya da su hattı boyu aynı olan her gemi için aynı pürüzlülük katsayısını almak doğru değildir.

Geminin direnci açısından oldukça önemli olan pürüzlülük ve pürüzlülük parametreleri International Towing Tank Conference'de tartışılmakta ve konu ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

Bu tezde giriş bölümünde pürüzlülüğün sınır tabaka ve gemi direncine etkisine değinilmiş, konunun önemi, tarihsel gelişimi incelenerek yüzey pürüzlülüğü konusunda yapılan çalışmalardan örnekler verilmiştir.

İkinci bölümde gemi direncini oluşturan bileşenler anlatılmış, model deneyleri ile gemi direncini belirlemede kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Bir sonraki kısımda sınır tabaka kavramı incelenmiş, gemi yüzeyi etrafındaki 3 boyutlu sınır tabakanın davranışı ile türbülans ve türbülanslı sınır tabaka anlatılmıştır. Üçüncü bölümün son kısmında ise yüzey pürüzlülüğünün sınır tabaka üzerine etkisi incelenmiştir.

Dördüncü bölümde tekne ve pervane yüzey pürüzlülüğünün nasıl oluştuğu, pürüzlülüğün viskoz dirence etkisi, pürüzlülüğün en önemli kaynağı olan tekne yüzey kirlenmesinin önlenmesi için kullanılan antifouling boya çeşitleri, IMO'nun antifouling boya yasaklamaları ve pürüzlülük etkisinin ekonomik değerlendirmesi anlatılırken, beşinci bölümde pürüzlülük geometrisini tanımlayan parametreler açıklanmıştır.

Tüm bu teorik bilgilerden sonra yüzey pürüzlülük özellikleri birbirinden farklı olan, 4'ü farklı tip boyalar ile boyanmış 1 tanesi de referans olması için boyanmadan bırakılmış, bunun dışında tüm geometrik özellikleri aynı olan 5 adet alüminyum levhanın 0.5 m/s ile 3.75 m/s civarındaki 9 farklı hızda direnç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler ile levhaların çekildiği hızlara karşılık çeşitli analiz programları kullanılarak toplam direnç değerleri elde edilmiştir. Levhaların dalga dirençleri İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi bünyesinde geliştirilen akış çözücü (ITU Dawson) programı ile levhanın ıslak yüzeyi ve serbest su yüzeyi panellenip sabit şiddette kaynak/kuyu dağıtımı yapılarak hesaplanmıştır. Toplam direnç değerleri ile dalga direnci değerleri bilinen levhaların viskoz direnç değerleri elde edilmiş, levhaların çekildiği en düşük hızlar kullanılarak form faktörü belirlenmiş, bu sayede viskoz direnç değerlerinin form faktörüne bölümü ile sürtünme direnci değerleri bulunmuştur. Sonrasında levhaların direnç bileşenlerine karşılık gelen direnç katsayısı değerleri hesaplanarak çizelge ve grafikler halinde verilmiştir. Bir sonraki bölümde deneysel çalışma, STAR-CCM+ Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programında modellenerek toplam direnç değerleri bir de bu şekilde elde edilmiştir. 5 tane farklı pürüzlülüğe sahip levhanın 9 farklı hız için direnç değerleri elde edilmiştir. Sonrasında, karşılaştırma yapmak için bir de levhaya pürüzlülük yüksekliği değeri verilmeden, pürüzsüz halde 9 farklı hız için CFD analizleri yapılmıştır. Programda levhaların boyutları aynı alınarak, deney tankının boyutları ise sonuçlara etki etmeyecek şekilde küçültülerek modellenmiştir. Toplam direnç değerleri ve deneysel çalışma aşamasında yukarıda bahsedilen şekilde hesaplanan dalga direnci değerleri kullanılarak, diğer direnç değerleri hesaplanmıştır. Sonuçlar grafik ve çizelgeler halinde sunulmuştur.

Pürüzlülük yükseklikleri ile direnç arasında doğrudan bir ilişki olması beklense de, literatüre baktığımızda yüzey pürüzlülüğü ile direnç arasında doğrudan bilimsel bir bağıntı olduğunu savunan bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun sebebi, dirençteki artışın pürüzlülüğün yanında başka parametreler ile de ilişkisi olmasıdır. Hem deney, hem de CFD çalışması sonuçları değerlendirildiğinde, bu mertebede pürüzlülük yüksekliği ile direnç arasında doğrusal bir bağıntı kurulamayacağı görülmektedir.

Sonuç olarak, pürüzlülüğün gemi direnci üzerinde önemli bir rolü olduğu fakat pürüzlülük yüksekliği parametresi R_a 'nın bu kadar düşük değerleri için levha direnç değerleri arasında lineer bir ilişki kurulamadığı belirlenmiştir.

EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON BOUNDARY LAYER AND SHIP RESISTANCE

SUMMARY

In recent years, one of the biggest problems of marine transportation is increased fuel prices along with the depletion of resources in the world. Researchers have been working to find systems that save fuel energy for many years. It is very difficult to reduce fuel consumption by keeping the same efficiency of a ship. The only way is to reduce the ship resistance. Ship resistance is composed of various resistance components, such as wave making resistance and viscous resistance or friction resistance and residuary resistance. There are several parameters affecting components of the ship resistance. One of these parameters is surface roughness.

Negative effect of roughness on ship performance has been known since the first seafaring activities. Viscous resistance of the ship (friction resistance + viscous pressure resistance) increases as hull surface roughens. Increasing roughness on the hull surface, affects wake characteristics, so the propeller operating on this wake needs more thrust power to overcome increasing resistance. Roughness increases ship resistance and reduces service speed. Roughness has a negative effect on propeller also. As propeller surface roughness increases, propulsion efficiency of the ship decreases. In addition, surface roughness plays an important role on boundary layer.

Accurate prediction of the resistance of a requires effective designs. There are several ways to estimate total resistance of a ship at design phase. Model experiments and numerical calculations using Computational Fluid Dynamics are the most widely used methods. Numerical calculation is always important for ship hydrodynamics, and model experiments are crucial to calculate total resistance for supplying required power to get desired service velocity. It is not easy to simulate some parameters, playing an important role in ship resistance characteristics in model tests. Surface roughness is very small compared to other full scale dimensions of a ship such as length, beam, draft etc. For this reason, even though surface roughness of the ship is one of the most important parameters to estimate ship resistance, it cannot be simulated properly in model experiments.

Model experiments are carried out with smooth surface models with turbulent stimulators. However, full scale ships' surface and propeller have some roughness. Effect of that parameter could be added to resistance calculations in several ways. One of them is adding a certain percentage of frictional resistance coefficient. For many years, the effect of surface roughness have been obtained by adding a constant to friction coefficient that obtained for smooth surface or various empirical formulas. Nowadays, a correlation allowance that changes with length of waterline of the ship have been used. This coefficient is entirely empirical and represents an average surface roughness condition. Therefore, for each ship with the same length of

waterline or for all types of ships taking the same roughness coefficient is not enough for accurate calculations.

Researchers have developed numerous approaches to correlate roughness and drag. The purpose of the International Towing Tank Conference members is to determine a correlation allowance that account for the differences between experiment results from model tests and full scale measurements. Some researchers take the correlation allowance as a constant and some of them calculate it by empirical formulas. In fact, the correlation allowance should be estimated depending on roughness characteristics. Roughness height and texture are two main roughness characteristics to make a correlation between roughness and ship resistance.

In this thesis, the first section presents general information, purpose and scope and a literature review about effect of surface roughness on ship resistance.

In the second section, components of ship resistance are given and methods for conducting model experiments (Froude method, Hughes method, Prohaska method, ITTC 1957 and 1978 methods) to determine the resistance of a ship are explained in detail.

In the third section, the concept of boundary layer, formation of boundary layer, boundary layer around the plate and the boundary layer around the ship are explained. In nature, almost all flows are turbulent. Especially flow around the ship is definitely turbulent. Therefore, turbulent flow and structure of turbulent boundary layer are explained in detail in this section. Some explanations and definitions are given about inner layer, outer layer, viscous sublayer, log-law region, linear sublayer, buffer layer, shear stress, friction velocity and boundary layer thickness.

In the next section, characteristics of ship and propeller surface roughness, roughness effect to the viscous resistance, roughness regime, physical and biological roughness are explained. After that antifouling coatings and effect of antifouling coatings to the ship resistance are given. Antifouling coating types, such as self polishing copolymers, tributyltin self polishing copolymers, copper based antifouling coatings, controlled depletion copolymers, foul release antifouling coatings, TBT free self polishing copolymers, TBT free self polishing hybrid coatings are explained. The TBT ban and IMO regulations for antifouling coatings, economic importance of hull conditions are given briefly.

In the fifth section, roughness geometry parameters such as amplitude parameters and texture parameters are explained in detail. There are a lot of roughness parameters. The most important parameters that characterising roughness amplitude are extreme value parameters such as vertical separation of the highest peak and lowest valley of the filtered profile, vertical separation of the average of the five highest peaks and average of the five lowest valleys within the assessment length, average parameters such as root mean square roughness, arithmetic average of the absolute values of all points of the profile (center line average roughness) and height distribution parameters. The most important parameters that characterising texture characteristics are spacing parameters such as high spot count and peak count wave length, hybrid parameters, spectral parameters and fractal parameters.

In naval architecture, there has been a long tradition of doing plate experiments to investigate ship frictional resistance. In this respect, resistance experiments of five aluminum plates were carried out. Plates had the same geometrical particulars but different surface roughness characteristics. Four of the plates were coated with

different antifouling coatings and one of the plates was left uncoated as the reference plate.

Resistance experiments were carried out in the towing tank of Ata Nutku Ship Model Testing Laboratory for a range of towing speed 0.5 m/s to 3.75 m/s. Total resistance of the plates corresponding speeds were measured. The total resistance is composed of the various resistance components such as frictional/viscous and wave making components. Calculating wave making resistance of the plate or ship is very hard for turbulent flows. The flow solver (ITU-Dawson) employed in the thesis that calculates the wave resistance by distributing panels on the wetted surface of the plate and on the free surface on which a constant-strength source/sink distribution is made. By subtracting wave making resistance values from total resistances, viscous resistance values were obtained. Frictional resistance values were obtained by dividing viscous resistance values to $(1+k)$ form factor that was calculated by using lowest towing speed values. Then corresponding resistance coefficients of these resistance components were calculated and presented in tabular and graphical formats.

Characteristics of aluminum plates, calibration test before the resistance experiments, resistance tests, results of wave making resistance calculation, viscous resistance calculation, frictional resistance and frictional resistance coefficient calculations ITTC 1957 method and by using experimental results, comparing experiment results are explained at the sixth section.

After obtaining experimental resistance values, a numerical study which was part of the thesis has performed. In the seventh section of the thesis, CFD analyses of the model resistance experiments were carried out for 5 different plates and 9 different speeds. Numerical study was carried out by using STAR-CCM+ Computational Fluid Dynamics program. In STAR-CCM+ program, external conditions modeled with the same experimental conditions. The Aluminum plates were modelled with the same dimensions, however the towing tank was modelled with diminished dimensions that does not affect the results. Towing tank was modelled with 11.25 m length, 2.61 m width and 3.65 m depth in order to use a standard computer and to reduce computational time.

The creation of the geometry of the solution, creation of mesh, determining the solution of the physical conditions, convergence criteria of the solutions, turbulence model used in, k-Epsilon turbulence model, Two-Layer Approach, Realizable Two-Layer k-Epsilon Model, k-Epsilon wall treatment, blended wall function, roughness function are also explained in the seventh section.

Appropriate grid generation is crucial in CFD analyses to obtain accurate results. Several meshing trials were done to get the best solution grid. Eventually, a grid was created with 2,895,796 cells and 8,672,873 faces. After creating grid, physical conditions of the solution were determined. First of all, solution was determined as three dimensional and solution model divided into 2 parts as air and water by using Eulerian Multiphase. Volume of Fluid (VOF) method is used to obtain interface effects between fluid and air. Flow is considered flat to wave. Selection of turbulence model is crucial parameter of the solution. Realizable k-Epsilon Two-Layer All y^+ Wall Treatment is determined as Reynolds Average Turbulence model. If this turbulence model is chosen, solution is made using Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations. Roughness is given in blended wall function in this study. 2.5 mm

cut-off length R_a values of the plates were given as the roughness height for the plates.

After the post processing process of the STAR-CCM+ CFD analyses, results of the calculations are given in tables and graphs. Next, comparisons between experiment results and CFD results are done with tables and graphs. Results of the CFD study and experiments are very similar. The results have 6%-0.5% difference at speeds higher than 1.5 m/s, but at speeds lower than 1.5 m/s, difference is more than 10% for some plates. Uncertainty analyses are also calculated for the resistance tests given at the end of the thesis. The total uncertainties are calculated 1.40% for C_T resistance coefficient at 2.5 m/s speed and 1.20% for C_T resistance coefficient at 3.0 m/s speed.

It is a known fact that as roughness increases, resistance increases. Even though it is supposed that there is a correlation between surface roughness and resistance, if literature is reviewed, there is no study that specify a scientific correlation between them. The reason for this is the increase on resistance depends on not only roughness height parameter R_a , but also some other parameters like texture parameter. If experimental and CFD results that obtained in this study are evaluated, there is no linear correlation between roughness height and resistance in at these physical condition for the aluminum plates' surface.

According to the results, roughness plays an important role on ship resistance however, because of complicated structure, not only roughness height parameter R_a but also texture parameters are needed to make a better comparison.

1. GİRİŞ

Deniz taşımacılığında kullanılan yakıtların pahalılığı ve fosil yakıt kaynaklarının neredeyse bitme noktasına gelmesi günümüzde araştırmacıları mevcut enerji kaynaklarını daha verimli şekilde kullanacak yeni çözümler üretmeye zorlamaktadır. Bu konuda bulunabilecek çözümlerden bir tanesi gemi servis halinde iken toplam direncinin düşürülerek sevk veriminin artırılmasıdır. Geminin toplam direncine etki eden çeşitli parametreler vardır. Bunlardan bir tanesi de tekne ve pervane yüzey pürüzlülüğüdür.

Tekne yüzey pürüzlülüğünün geminin performansı üzerinde negatif bir etki yarattığı ilk denizcilik faaliyetlerinden itibaren bilinen bir gerçektir. Gemi yüzeyi; yüzeye sürülen boyalar, çevresel etkiler, dış kaplama saclarının korozyona uğraması, servis halinde iken su altında yaşayan yosun, midye gibi canlıların teknenin suyla temas eden kısımlarına yapışması (biyolojik kirlenme) gibi nedenlerle değişik şekil ve derecelerde pürüzlenir. Bu pürüzlülük zamanla geminin servis hızında düşüşe, gemi direncinde artışa neden olur.

1.1 Konunun Anlam ve Önemi

Gemiye etkiyen direnç kuvvetlerinin inşa öncesinde doğru bir şekilde tahmini daha etkin dizaynlar yapılabilmesine öncülük eder. Bunu yapabilmek için de, yüzey pürüzlülüğünün direnç üzerine etkisi iyi anlaşılmalıdır. Gemi yüzey koşulları geminin performansı üzerinde hayati bir öneme sahiptir. Yeni inşa edilmiş yük gemileri (dökme yük vb.) ve tankerlerin sürtünme direncinin toplam direncin %80-90'ını oluşturduğu, buna karşılık yüksek süratli gemilerde bu oranın %50 ve üzerinde olduğu bilinmektedir (Lackenby, 1962). Townsin (2003), pürüzlülüğü en aza indirilen, su ile temas eden yüzeyi sürekli temiz tutulan gemiler için dünya donanmalarının yılda 184 milyon ton daha az yakıt tüketeceğini hesaplamıştır. Bununla birlikte baca emisyonları, küresel ısınma, ozon tabakasının delinmesi gibi insanlık adına son derece önemli olan problemler için de tekne yüzey pürüzlülüğü etkili bir parametredir.

Tekne pürüzlülüğündeki artış, gemi izinde farklılık yaratacak, bu gemi izinde çalışan pervane, artan gemi direncini yenebilmek için daha fazla itme gücüne ihtiyaç duyacaktır. Pürüzlülük pervane için de benzer bir etki yapmaktadır. Pervane yüzey pürüzlülüğü arttıkça, pervane kanatlarının karşılaştığı direnç de artmaktadır. Pervane yüzey pürüzlülüğüne kavitasyon, erozyon ve biyolojik kirlenme sebep olmaktadır. Pervane yüzey pürüzlülüğündeki artış, pervane açık su verimini düşürdüğü için geminin sevk verimini de azaltmaktadır.

Pürüzlülüğün neden bu kadar önemli olduğuna tekne türlerine göre bakarsak, daha pürüzsüz bir tekne ve pervane yüzeyi; hızlı feribotlar için daha az yakıt masrafı, maksimum hız, daha az motor aşınması; askeri gemiler için yüksek hız, her zaman savaşa hazır olma, gürültü emisyonu; tanker ve dökme yük gemileri için kargo teslimat süresinde kısalma, daha az gaz emisyonları, minimum mekanik ve tamir masrafları; ticari gemiler için malı zamanında istenilen noktaya taşıma, daha az yakıt masrafı, çevre için güvenli olma açısından önemlidir.

Bu bakımdan, geminin seyri açısından oldukça önemli olan pürüzlülük ve pürüzlülük parametrelerinin incelenmesi ve doğru bir şekilde tespit edilmesi oldukça önemlidir. Konunun başta ITTC (International Towing Tank Conference) olmak üzere pek çok platformda güncel olarak tartışılıyor ve çalışılıyor olması da çalışmanın güncel ve üzerine araştırma yapılması gereken bir konu olduğuna işaret etmektedir.

1.2 Genel Bilgiler

Direnç, geminin hareketine ters yönde etki eden net kuvvet olarak tanımlanabilir (Alexandrou, 2011). Froude tarafından gemi direncinin iki ana bileşenden oluştuğu tanımlanmıştır: viskoz direnç ve dalga yapma direnci (Froude, 1872). Bu iki direnç bileşeni toplam direnci oluşturur. Tekne yüzeyi pürüzlendikçe, geminin toplam viskoz direnci (sürtünme direnci+viskoz basınç direnci) artmaktadır.

Gemi projesinin değişik aşamalarında sistematik model deneylerine dayalı yaklaşık yöntemlerle gemi toplam direnci hesaplanabilmektedir. Model deneyleri benzerlik kuralı doğrultusunda tam ölçek geminin belirli bir oranda küçültülmüş modeli ile yapılır. Burada konunun en önemli ayrıntısı, pürüzlülüğün boyutunun model ile gemi arasında ölçeklendirilememesidir. Yani modelde pürüzlülüğü gerçek gemi ile aynı özellikte fakat onun oransal olarak küçültülmüş hali şeklinde elde etmek çok zordur.

Bu yüzden de pürüzlülük etkisi sebebiyle dirençteki artışı doğrudan hesaplamak mümkün olamamaktadır.

Model deneyleri, pürüzsüz yüzeyler ile türbülanslı akımda yapılır. Fakat yukarıda da söylenildiği gibi gerçekte gemi ve pervane yüzeyinde pürüzlülükler vardır. Gerçek geminin direnci incelenirken pürüzlülük etkisi toplam sürtünme direnci katsayısı C_F 'nin belirli bir yüzdesi olarak, sürtünme direnci katsayısına bir sabit eklenerek veya çeşitli ampirik formüller ile alınmaktadır. Günümüzde ise genellikle geminin boyuna göre değişen, C_A ile gösterilen müsade katsayısı (allowance coefficient) kullanılmaktadır. Bu katsayı tamamen ampirik olup ortalama bir pürüzlülük durumunu temsil eder (Schultz ve diğ, 2004).

Pürüzlülük ile direnç arasında bir bağıntı kurabilmek için pürüzlülük yüksekliği ve texture dediğimiz doku parametresinin çok iyi analiz edilmesi gerekir. Townsin ve Dey (1990), tek bir pürüzlülük parametresi $Rt50$ kullanılarak, dokuları çok benzer ise, yeni gemi yüzeyleri için geniş bir aralıkta ek direncin gayet iyi tahmin edilebildiğini belirtmiştir.

1.3 Amaç ve Kapsam

Günümüzde araştırmacılar daha az yakıt tüketen sistemler yaratmak için gemilere etki eden toplam direnci en aza indirmeyi amaçlamaktadırlar. Gemi direncinin bileşenlerinden sürtünme direncini etkileyen parametrelerden bir tanesi de tekne yüzey pürüzlülüğüdür.

Böyle bir çalışma yapılmasının temelinde, pürüzlülük etkisinin sınır tabaka ve gemi performansına yol açtığı sonuçları incelemek, tekne yüzey pürüzlülüğünün direnç üzerindeki etkisinin incelenmesi bulunmaktadır.

Bu çalışma ile tekne yüzey pürüzlülüğünün sınır tabaka ve gemi performansına etkisi alanında yapılan çalışmalar incelenmiş, yüzel pürüzlülüğünün gemi toplam direncine etkisi İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi'ndeki Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'nda gerçekleştirilen deneysel çalışma ile belirlenmiş, aynı konuda Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) çalışması yapılarak (STAR-CCM+ hesaplamalı akışkanlar dinamiği programında) sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın deney aşamasında yüzey pürüzlülük özellikleri bilinen 1500 mm uzunluğunda, 610 mm yüksekliğinde, 50 mm kalınlığında, baş ve kış tarafı üçgen, orta kısmı dikdörtgen kesitli, yüzey pürüzlülükleri dışında tüm özellikleri aynı olan 5 adet alüminyum levha ile direnç deneyi yapılmış ve analiz programları kullanılarak deney hızlarına göre toplam direnç değerleri hesaplanmıştır.

Çalışmanın CFD kısmında, deneysel çalışma STAR-CCM+ programında deney ile aynı ortam ve koşulları yansıtacak şekilde modellenerek deneyde yapılan çalışma bilgisayar ortamında tekrarlanmıştır.

Bu çalışmada, akışkanlar mekaniğinde sayısal yöntemler ve deney tekniklerindeki gelişmeler incelenmiş, gemi yüzeyi etrafındaki sınır tabakanın davranışı ve bu sınır tabakaya pürüzlülüğün etkileri açıklanmıştır. Geminin direnç bileşenleri ele alınmış, pürüzlülüğün toplam direnç üzerindeki etkisi ve devamında pürüzlülük geometresini tanımlayan parametreler incelenmiştir.

Çalışmanın deney aşamasında ITTC'nin gemi model deneylerinde kalite sistemi uygulamaları dikkate alınmıştır.

1.4 Literatür Araştırması

Tarihe baktığımızda tekne yüzey pürüzlülüğü sebebiyle geminin güç gereksinimi artışının pek çok araştırmacının ilgisini çeken bir konu olduğunu görmekteyiz. Henüz 1873 yılında William Froude HMS Greyhound isimli küçük bir korvet ile çok sayıda direnç deneyi yapmıştır (Froude, 1874b). Gemi direncinin tam ölçekli ölçümleri ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmış olmasına karşın, "B.S.R.A. Resistance Experiments on the Lucy Ashton" adlı çalışmada, aynı özellikteki 2 tekne için konuşulursa, tekne yüzeyinde pürüzlülüğü fazla olanın hidrolik olarak pürüzsüz olan tekneden her zaman daha yüksek dirence sahip olduğu fakat toplam direncin ayrıca gemi yüzeyine uygulanan boyanın türü ve yüzey hazırlamasına bağlı olduğu açıklanmıştır (Conn ve diğ., 1953).

Schoenherr (1932), yüzey pürüzlülüğünün gemi direncini nasıl etkilediğini araştırmıştır. Tam ölçek gemi ölçümleri ile model deneylerinden elde edilen sonuçlar arasındaki farkı açıklayan korelasyon faktörünün C_A , 0.0004'e eşit sabit bir sayı olarak kabul edilebileceğini açıklamıştır.

1942 yılında American Towing Tank Conference (ATTC) sponsorluğunda David Taylor model havuzunda deneyler yapılmış ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar “Tentative roughness allowances for 1942 for use with the Schoenherr formula” adlı çalışmada yayımlanmıştır (ATTC, 1942). Amaç, pürüzlülüğün dirence etkisi ile ilgili sürekli yeni sonuçlarla güncellenen bir tablo yapılması imiş. Schoenherr’in formülü ilk defa 1942 yılında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu formül ile model testleriyle bulunan sonuçlardan toplam direnç katsayısı hesaplanmıştır. Bu model testleri ile gerçek gemi tecrübelerini karşılaştırmışlardır. Hem eski gemileri hem de yeni gemileri içeren bir çalışmadır. Farklı tanklarda testler yapılmıştır. Pürüzlülük derecesinin gemi direncine etkisini daha iyi anlamak için H M S Greyhound gibi eski gemilerin bilgilerini de içeren bir çalışmadır. “Yeni gemiler için önerilen pürüzlülük hattı” keyfi olarak en son tekne dip inşa düzeltmelerini içerecek şekilde çizilmiştir. American Towing Tank Conference, bireysel olarak pürüzlülük toleransı seçimi için bu hattın kullanılabileceğini belirtmiştir. Çalışmada model testlerden gemi direncinin hesabı için formül yayımlanmıştır.

Granville ve Grigson, yüzey pürüzlülüğünün gemi performansına etkisi konusunda önemli çalışmalar yapmıştır (Granville 1987; Grigson 1981, 1982, 1992). Bu iki araştırmacı model deney verilerini kullanarak tam ölçekli gemi için pürüzlülük etkisini belirlemeye çalışmışlardır. Yalnızca model testleri ile, gemi için direnç belirlenemediğinden modelden tam ölçeğe geçmede kullanabilecekleri pürüzlülük fonksiyonlarının belirlenmesi üzerinde durmuşlar, pürüzlülük ile sınır tabaka ve direnç arasında bağıntılar geliştirmişlerdir.

Townsin, gemi yüzey pürüzlülüğü üzerine çalışan en önemli araştırmacılardandır. Yaptığı çalışmalarla tekne ve pervane pürüzlülüğünün sebep olduğu direnç artışı ile ekonomik kayıpları detaylı bir biçimde hem deneysel hem de sayısal olarak incelemiş, somut sonuçlara ulaşmıştır. Ayrıca Dey ile birlikte yaptıkları çalışmalar ile pürüzlülük parametreleri arasında çeşitli korelasyonlar geliştirmişlerdir. BMT tekne pürüzlülük ölçüm cihazı ile ölçtükleri antifouling boya ile yeni boyanmış bir yüzeyin, sürtünme direnci ile maksimum pürüzlülük yüksekliği R_t arasında çok iyi bir korelasyon kurmuşlardır (Townsin ve Dey, 1990).

Tekne yüzey pürüzlülüğü alanında çok önemli çalışmalar yapan bir diğer araştırmacı olan Schultz, pürüzlülük fonksiyonunun belirlenmesi, dış tabaka benzerliği için kritik pürüzlülük yüksekliğinin hesaplanması Flack ve diğ. (2007), tam pürüzlü rejimde

hidrolik pürüzlülük ölçekleri incelemesi Flack ve Schultz (2010), kenar tabakada iki boyutlu pürüzlülük ile türbülans incelemesi Volino ve diğ. (2009) , sürtünme direnci ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki Schultz (2002), pürüzlülük ve biyolojik kirlenmenin gemi direnci ve gücüne etkisi Schultz (2007), farklı pürüzlülüklerdeki duvarların türbülanslı kenar tabaka özellikleri Schultz ve Flack (2007, 2009), antifouling boyaların sürtünme direnci ile ilişkisi Schultz (2004), yüzey pürüzlülüğünün hidrodinamik direnç ve türbülans üzerine etkisi Schultz ve diğ. (2004), biyokirlenmenin gemideki ekonomik etkisi Schultz ve diğ. (2011) ve benzeri çalışmalar ile literatürde önemli bir yere sahiptir.

Pervane pürüzlülüğü konusundaki çalışmaların tarihi daha kısadır. Lerbs'in 1951 yılında yayımlanan "On the effects of scale and roughness on free running propellers" adlı makalesinden elde edilen veriler ve Yayoyi Maru gemisi ile yapılan deneylerde Kan ve diğ. (1958), çalışmasından yararlanılarak pervane kanadının pürüzlenmesinin etkileri hesaplanmış ve farklı hesap yöntemleri geliştirilmiştir (Ünsalan, 1992).

Tekne ve pervane yüzeylerindeki pürüzlülük deniz ortamında aynı anda meydana geldiğinden araştırmacılar çoğunlukla pervane ve tekne yüzey pürüzlülüğünü birlikte incelemişlerdir. Pasifik Donanması'ndaki ABD Uçak Gemisi'nden yapılan bildiriye göre USS Ranger'ın 16 aylık seferi sonucu 18 knot hız civarında %14'lük güç artışı olduğu ve bu güç kaybının yarı yarıya pervane kirlenmesinden kaynaklandığı belirlenmiştir (Herring, 1980).

Tekne yüzey koşulları ile birlikte gemi performansındaki düşme ele alındığında, pervane yüzey koşullarının etkisi bazen gözden kaçırılır. Kimi araştırmacılar çalışmalarında pervane pürüzlülüğünü katmazlar çünkü pervane yüzey alanı tekneye göre önemsiz bir kısım olarak kalır ve pervane temizlenmesi özel dalgıçlar tarafından tekne yüzeyine oranla çok daha ucuz bir şekilde yapılabilir (Townsin, 2003).

Bununla birlikte, pervane pürüzlülüğü etkisi çok önemli olabilir. Mosaad'ın (1986) açıkladığı gibi, pervane yüzey koşullarının etkisi tekne yüzey koşullarına göre daha az önemlidir fakat birim alandaki enerji kaybı açısından değerlendirildiğinde daha önemli olduğu görülür. Ekonomik açıdan da pervane yüzeyi, tekne yüzeyine göre çok daha az maliyetle temizlenerek pürüzlülük ve kirlilik etkileri yok edilerek verimlilik artırılabilir. Bu da tekne yüzeyine uygulanan işlemlerin pervanelere de

uygulanması fikrini getirmiştir. Pervane yüzeyinin pürüzlülüğünü değiştiren faktörler, kirlenme ve pervane yüzeyi bozulmaları olarak iki kısımda değerlendirilebilir (Atlar ve diğ, 2002). Pervaneler için kirlenme, pervane yüzey bozulmalarına oranla çok daha önemli etkiler yaratır. Bununla birlikte, matematiksel ifadesinin zorluğu ve bu alanda teorik ve deneysel çalışmaların azlığı sebebiyle pervane kirlenmesinin direnç artışına etkisini sayısal olarak hesaplamak çok zordur. Kan ve diğ. (1958) tarafından, deneysel bir çalışma yapılmış ve teknenin güç kaybı açısından değerlendirildiğinde pervane kirlenmesinin pürüzlülüktan daha önemli olduğu sonucu bulunmuştur.

Atlar ve diğ. (2002), foul release boya ile boyanmış bir tanker pervanesinin başka tür bir boya ile boyanmış aynı pervaneden % 6 daha verimli olduğunu hesaplamışlardır. Bu da pervane yüzeyine uygulanan boya türünün doğru olmasının kirlenme ve pürüzlülük üzerinde olumlu etkileri olduğunu göstermektedir.

Mosaad (1986), farklı gemi tiplerinin pervaneleri için yapmış olduğu deneysel ve teorik çalışmalarda pervaneye düzgün bakım yapıldığında bunun ekonomik olarak çok büyük bir geri dönüşüm sağlayacağını belirtmiş ve kirlenme ve yüzey hasarları ile artan pürüzlülüğün direnç artışına etkisi konusunda pürüzlülük yükseklik ve doku parametreleri analizlerini de içeren deneysel çalışmalar yapılması gerektiği sonucuna ulaşmıştır.

Sürtünme direnci üzerinde tekne yüzey pürüzlülüğü etkisini farklı antifouling boya türlerini karşılaştırarak inceleyen pek çok çalışma mevcuttur. Bunlardan bazıları Musker (1980), Townsin ve diğ. (1986), Granville (1987), Medhurs (1989), Grigson (1992). Bu çalışmaların pek çoğu kendi kendini temizleyen (SPC) TBT boyalar ile boyalı yüzeylerin pürüzlülük-direnç ilişkileri üzerinedir.

Pürüzlülük ve direnç arasında korelasyon kurmak için pek çok yaklaşım yapılmıştır. Yukarıda da verildiği gibi Schoenherr tarafından yapılan deneyler sonucunda C_A , 0.0004 sabiti olarak alınmıştır. Daha sonra 1974'te Bowden ve Davison (1974), pürüzlülükle sürtünme direnci arasındaki artışını C_A , ortalama pürüzlülük yüksekliği (AHR) ve tekne su hattı boyuna göre hesaplamayı sağlayan formül vermiştir.

Bu formül daha sonra boyu 400 metreden küçük ve pürüzlülük değeri 200 μm 'den az olan gemiler için ITTC 1978'de yayımlanmıştır.

ITTC 1978, pürüzlülükle sürtünme direnci arasındaki artışı C_A , su hattı boyu ve k_s pürüzlülük yüksekliğine göre hesaplamayı sağlayan formül vermiştir.

Townsin ve Dey (1990) tarafından, bir dereceye kadar pürüzlü boyalı bir yüzey ile yeni boyanmış geminin direnci arasında bağıntı kurabilmek için $Rt50$ tanımlayıcı bir yüzey faktörü olarak kabul edilmiştir. Sonuç olarak Townsin ve diğ. (1986), direnç artışı ΔC_F yi hesaplamıştır.

Candries (2001), yapmış olduğu direnç deneyleri sonucu elde edilen toplam direnç katsayısından CFD SHIPFLOW programıyla hesapladığı dalga direnci değerlerini çıkartarak sürtünme direnci katsayılarını elde etmiştir. Farklı yüzeyler için dalga direncini aynı kabul etmiştir. Deneyle buldukları sonuçlarla CFD sonuçlarını karşılaştırdıklarında alüminyum yüzey için sürtünme direncinin Schoenherr sürtünme hattıyla denk düştüğünü göstermiştir.

2. GEMİ DİRENCİ BİLEŞENLERİ VE MODEL DENEYLERİ İLE GEMİ DİRENCİNİ BELİRLEME YÖNTEMLERİ

2.1 Gemi Direnci ve Bileşenleri

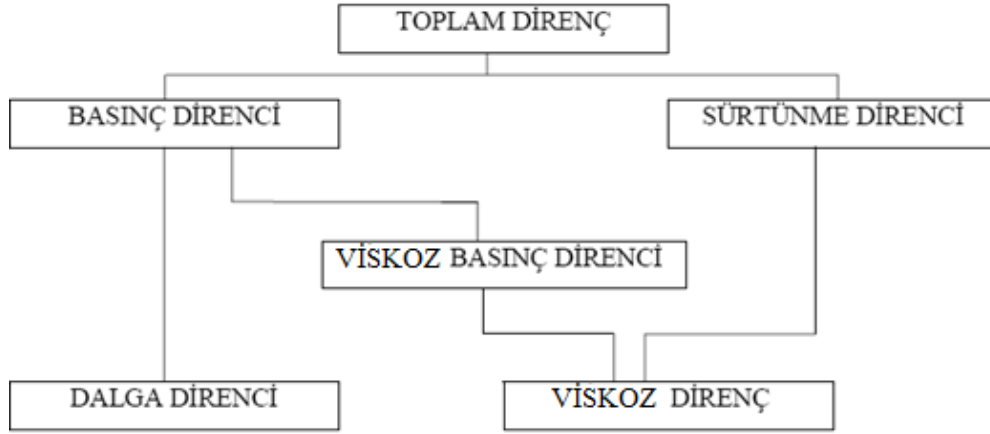
Gemi direncinin bir mühendislik problemi olarak tanımlanabilmesi için direncin oluşumu, bileşenleri ve bunları etkileyen faktörlerin belirlenebilmesi ve verilen bir form için belirlenen hız aralığında deneysel ve/veya sayısal yöntemlerle hesaplanabilir olabilmesi gerekmektedir. Bunun için gerçek gemi ölçümleri; standart kabul tecrübeleri ve özel tecrübeler ile yapılır. Bu sayede bir dizi gerçekleşen değer elde edilir. Model deneyleri standart deneyler, sistematik deneyler, araştırma deneyleri ve gözlemsel deneyler gibi yöntemleri içerir. Gemi ölçümleri ve model deneyleri ile amaç model sonuçlarından gerçek gemi sonuçlarını elde etmektir. Bu da analitik/sayısal modelleme ile gerçekleştirilir. Ampirik hesaplamalar, teorik hesaplamalar ve ölçek etkilerinin hesabı yöntemleri kullanılarak hesaplamaların deney sonuçlarına uyumu incelenir. Buradaki avantaj, istenen her büyüklüğün her ölçekte hesaplanabilmesidir (Url-1).

Bugün teorik gelişmeler, sayısal yöntemler, deneysel teknikler ve araştırma imkanlarına rağmen direnci etkileyen faktörlerin tümüyle kavranmış olduğunu ve ölçek probleminin çözüldüğünü söylemek mümkün değildir (Url-1).

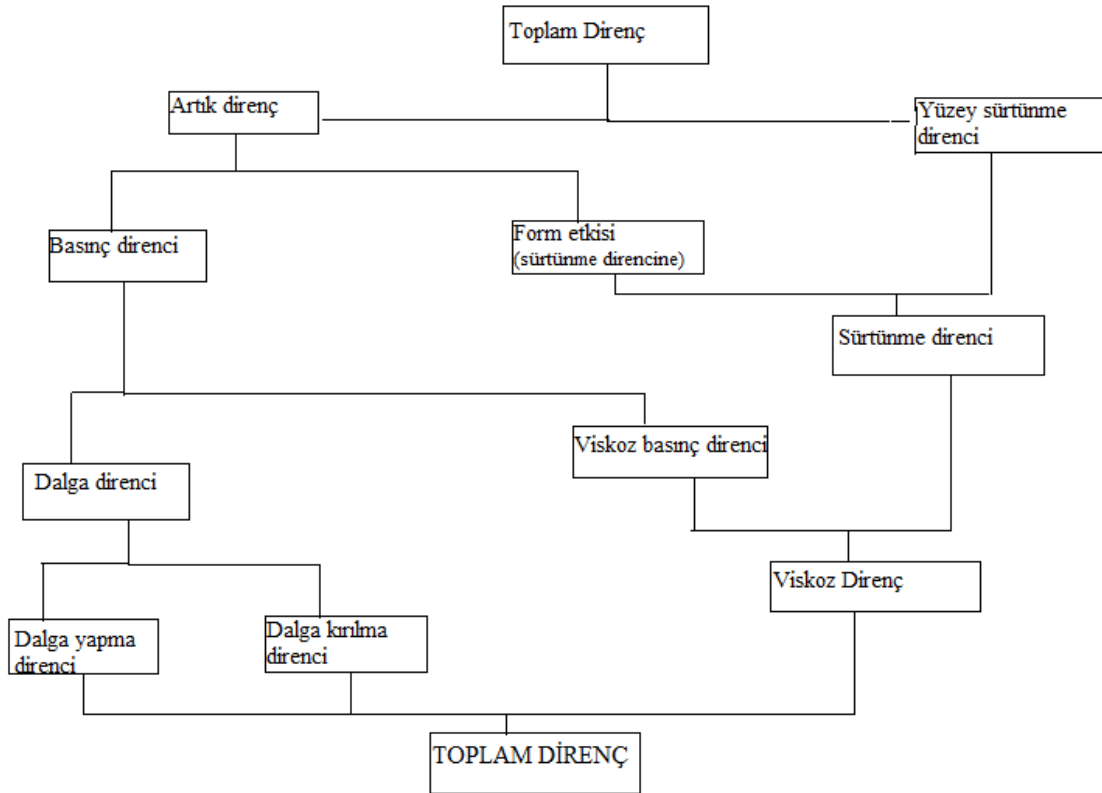
19. yüzyıl ortalarından önce gemilerin direnci ve belirli bir hızda gidebilmeleri için gereken güç ile ilgili çok az şey bilinmekte idi. Ölçek etkisi yönünden direnç bileşenlerinin ayrımı ve bunun model-gemi ekstrapolasyonunda kullanımı ilk defa gemi direnci çalışmalarının babası olarak kabul edilen Froude tarafından ortaya konulmuştur. Bugün Froude hipotezi olarak adlandırılan bu yöntemde toplam direnç sürtünme ve artık direnç olarak ikiye ayrılmış; sürtünme direncinin gemi ıslak alanıyla aynı alandaki bir eşdeğer levha direncine eşit olduğu kabul edilmiş ve toplam direnç ile sürtünme direnci arasındaki fark ise artık direnç olarak tanımlanmıştır. Froude'dan sonra, doğru sürtünme direnç katsayısı kullanımı üzerinde uzunca tartışmalar yapılmış, değişik formüller önerilmiş ve kullanılmış ise

de bugün dahi pek çok deney tankı bu temel yaklaşımı kullanmaktadır. Bu yaklaşımdan doğan farkların değerlendirilmesi için bir ekstrapolasyon faktörü $(1+x)$ yaratılmış ve mevcut veriler kullanılarak $(1+x)$ için ampirik formüller elde edilmiştir (Url-1).

Günümüzde toplam direncin basınç direnci ve sürtünme direnci bileşenlerinden oluştuğu hipotezi altında direnci şekil 2.1'deki formda değerlendirmek mümkündür:



Şekil 2.1 : Direncin kavramsal gösterimi (Url-1).



Şekil 2.2 : Gemi direncinin bileşenleri (Carlton, 2007; Avcı, 2011).

Şekil 2.2'de gemi direncinin bileşenleri ayrıntılı bir biçimde görülmektedir.

Bir geminin su altı yüzeyine suyun etkisiyle sürtünme, viskoz basınç ve dalga yapma direnç bileşenleri etki eder. Suyun viskoz özelliğinden kaynaklanan sürtünme ve viskoz basınç dirençlerinin toplamına viskoz direnç denir. Bir diğer tanımlamaya göre de viskoz basınç direnci ile dalga yapma direncinin toplamı artık direnci oluşturur, artık direnç ile sürtünme direncinin toplamı da, daha önce söylenildiği gibi toplam direnci verir (Baykal ve Dikili, 2002).

Rüzgarsız bir havada ve dalgasız, sakin bir denizde seyir halindeki bir gemiye etkiyen toplam direnç:

Toplam direnç = sürtünme direnci + viskoz basınç direnci + dalga yapma direnci

$$R_T = R_F + R_{PV} + R_W \quad (2.1)$$

Toplam direnç = viskoz direnç + dalga yapma direnci

$$R_T = R_V + R_W \quad (2.2)$$

Toplam direnç = sürtünme direnci + artık direnç

$$R_T = R_F + R_R \quad (2.3)$$

Sürtünme direnci (R_F) : Gemi ıslak yüzeyi üzerindeki teğetsel gerilmelerin gemi hareket yönünde integre edilmesi ile elde edilen direnç bileşenidir. Sürtünme direncinin geminin ıslak alanıyla aynı alana sahip bir levhanın direncine eşit olduğu kabul edilir.

Artık direnç (R_R) : Teknenin toplam direncinden herhangi bir özel formül ile hesaplanan sürtünme direncinin farkının alınması ile elde edilen dirençtir. Ticaret gemilerinde çoğunlukla bu direncin büyük bir kısmını dalga direnci oluşturmaktadır.

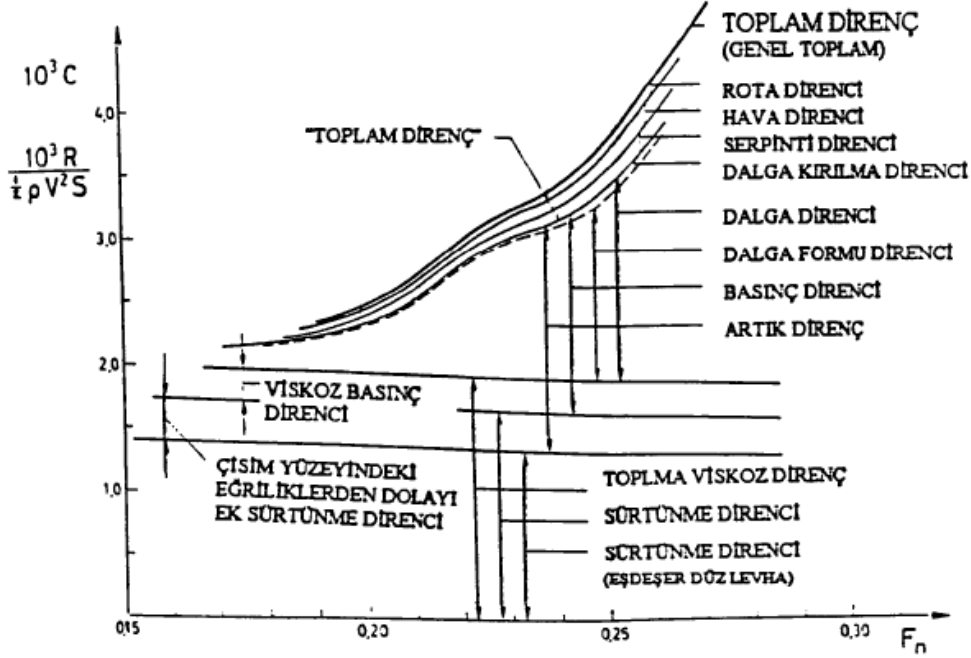
Viskoz direnç (R_V) : Geminin hareket ettiği akışkan içerisinde akışkanın viskoz etkilerinden dolayı harcanan enerjinin meydana getirdiği direnç bileşenidir. Geminin sualtı geometrisine, gemi ıslak yüzeyinin düzgünlüğüne ve alanına bağlıdır.

Dalga yapma direnci (R_W) : Gemi tarafından oluşturulan gravite dalgaların üretilmesinden harcanan enerji ile ilişkili olan direnç bileşenidir. Kısaca dalga direnci de denilir.

Basınç direnci (R_P) : Geminin hareketi doğrultusunda ıslak yüzeyinin normali yönündeki kuvvetin integre edilmesi ile elde edilen direnç bileşenidir.

Viskoz basınç direnci (R_{PV}) : Türbülans ve viskoziteden dolayı normal yönünde oluşan kuvvet bileşenlerinin integre edilmesi ile elde edilen direnç bileşenidir.

Aşağıdaki şekilde, gemilerin belirli direnç bileşenleri görülmektedir.



Şekil 2.3 : Gemilerin belirli direnç bileşenleri (Url-1).

2.2 Gereç ve Yöntemler

Gemi direnci ve güç gereksinimlerinin tahmini konusunda sonuca ulaşabilmek için model direnç deneylerindeki gemi modeli ile tam ölçekli geminin geometrik olarak benzer olması gerekmektedir. Gemi modelinin toplam direnci, iki ana bileşenin toplamından oluşmaktadır. Bunlar sürtünme direnci ve artık dirençtir.

$$R_{Tm} = R_{Fm} + R_{Rm} \quad (2.4)$$

Froude yaklaşımına göre toplam gemi direnci teğetsel direnç ve normal direnç olarak 2'ye ayrıldığında teğetsel yönlü direnç sürtünme direncidir, normal yönlü direnç ise artık dirençtir. Artık direnç de viskoz basınç direnci ve dalga yapma direnci şeklinde 2 kola ayrılabilir. Toplam direnç ile sürtünme direnci arasındaki farka eşit olan artık direnci ağırlıklı olarak dalga yapma direncinin oluşturduğunu söylemek mümkündür. Sürtünme direnci, akışkanın viskozitesinden kaynaklanan gemi gövdesindeki teğetsel kayma gerilmeleri kaynaklıdır. Denklem 2.4 alışlagelmiş şekilde boyutsuz olarak yazılabilir. Bunu yapmak için eşitlik referans dinamik basıncı, $\frac{1}{2} \rho_m U_m^2$, ve tekne modelinin ıslak alanı S_m ile bölünür (Yani her bir direnç katsayısı $\frac{1}{2} \rho S U^2$ ile

boyutsuzlaştırılmıştır.) Burada ρ_m model testleri için akışkan yoğunluğu ve U_m de gemi modelinin hızıdır. Böylece model için toplam direnç katsayısı C_{Tm} , modelin artık direnç katsayısı C_{Rm} ile modelin sürtünme direnci katsayısının C_{Fm} nin toplamı olur. Modelin artık direnç katsayısı Froude sayısının bir fonksiyonudur, $Fr_m = U_m/(gL_m)^{-1/2}$, burada g yerçekimi ivmesi ve L_m ise modelin boyudur. Benzer şekilde, modelin sürtünme direnci katsayısı Reynolds sayısının bir fonksiyonudur, $Re_m = U_m L_m \nu_m^{-1}$, burada ν_m model testleri için akışkanın kinematik viskozitesidir. Böylece modelin toplam direnç katsayısı:

$$C_{Tm} = C_{Fm}(Re_m) + C_{Rm}(Fr_m) \quad (2.5)$$

Model testleri kullanarak tam ölçekli bir geminin direncini doğru olarak belirleyebilmek için model ve gemi arasında dinamik benzerlik olmalıdır. Denklem 2.5'te görüldüğü üzere bunun sağlanabilmesi için gemi ve modelin Froude ve Reynolds sayıları eşlenmelidir. Pratikte bu imkânsızdır. Bunun yerine model ve geminin Froude sayılarının eşlendiği eksik dinamik stabilite aşağıda gösterildiği şekilde uygulanır:

$$Fr_m = Fr_s \quad (2.6)$$

$$\frac{U_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{U_s}{\sqrt{gL_s}} \quad (2.7)$$

Sürtünme direnci katsayısı C_{Fm} , ITTC 1957 formülü kullanılarak şöyle verilir:

$$C_{Fm} = \frac{0.075}{(\log_{10} Re_m - 2)^2} \quad (2.8)$$

Modelin artık direnç katsayısı C_{Rm} , denklem 2.5'ten bulunabilir. Artık direnç katsayısı Froude sayısının bir fonksiyonu olduğundan ve model testlerinde $Fr_m = Fr_s$ olduğundan $C_{Rm} = C_{Rs}$ olur.

Toplam direnç katsayısı C_{Ts} ,

$$C_{Ts} = C_{Rs} + C_{Fs} + C_A \quad (2.9)$$

Burada C_A korelasyon müsadesidir. Korelasyon müsadesi gerçek gemi direnci ile pervane karakteristikleri, gemi izindeki ölçek etkisi, viskoz dirençte üç boyutluluk etkisi, ve pürüzlülük ölçek etkilerindeki farklılıkları belirtmek için kullanılır. Bu çalışmada, tekne pürüzlülüğü etkisi ΔC_{Fs} şeklinde ayrıca ek sürtünme direnci terimi olarak alınacaktır. Böylece toplam gemi direnci katsayısı;

$$C_{TS} = C_{RS} + C_{FS} + C_A + \Delta C_{FS} \quad (2.10)$$

olur.

2.3 Gemi Model Deneyleri ile Gemi Direncinin Belirlenmesi

Gemi proje aşamasında iken model direnç deneyleri ve yaklaşık yöntemler ile gemi direnci hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu direnç yardımı ile gemi makine gücü belirlenerek uygun ana ve yardımcı makine seçimleri yapılmaktadır. Geminin inşasına başlanılmadan önce geminin su altı geometrisi, ana makine gücü ve gemi hızının bilinmesi ve bu değerlere göre inşaya başlanması gerekmektedir.

Gemi model direnç deneyleri geminin ahşap, parafin, sert plastik ya da kompozit bir malzemeden yapılmış bir modelinin deney havuzunda genellikle sakin su koşullarında değişik hızlarda direnç deneyine tabi tutularak (bir takım bilgisayar yazılımları yardımıyla) direnç değerlerinin elde edilmesi ve benzerlik kanunlarından faydalanılarak gerçek geminin karşıt hızlardaki direnç değerlerinin belirlenmesi ile yapılmaktadır.

Model deney sonuçları kullanılarak tam ölçekli bir geminin direnç değerlerinin elde edilmesinde çoğunlukla aşağıdaki yöntemler kullanılmaktadır:

2.3.1 Froude yöntemi

Model deneyleri yapılarak gemi direncinin bilimsel bir şekilde bulunması konusunda ilk çalışmalar 1860'lı yılların sonlarında William Froude tarafından yapılmıştır. Froude, toplam direnci sürtünme direnci ve artık direnç olmak üzere iki ana bileşene ayırarak, model deneyleri ile elde ettiği sonuçlardan yararlanarak toplam gemi direncini hesaplamanın zorluğunu (aynı anda Reynolds ve Froude sayılarının eşit olması) yenmiştir. Bilindiği üzere sürtünme direnci Reynolds sayısına, viskoz basınç direnci ve dalga yapma direncinin toplamı olan artık direnç ise hem Reynolds hem de Froude sayısına bağlı olduğu için teorik olarak bu yaklaşım doğru değildir ancak bu yaklaşım mühendislik hesaplamalarında büyük kolaylıklar sağladığından kullanılmaktadır (Baykal ve Dikili, 2002).

Froude, model deneylerinden yararlanarak toplam gemi direncinin bulunması için toplam direnci $R_T = R_F + R_R$ şeklinde bileşenlerine ayırarak aşağıdaki yöntemin takip edilmesini önerdi:

- $\lambda = L_s/L_m$ ölçeğine göre yapılan model, tam ölçek gemi ile aynı Froude sayısı değerine sahip olacak şekilde ($Fr_m = Fr_s$), değişik $V_m = \frac{V_s}{\sqrt{\lambda}}$ hızlarında çekilir.

- Modelin bu hızlardaki toplam direnç değeri, R_{Tm} , ölçülür.
- Modelin sürtünme direnci, R_{Fm} , aynı boy ve aynı ıslak yüzey alanına sahip düz bir levhanın aynı hızda çekilmesi ile bulunacak olan levha sürtünme direncine eşit kabul edilerek hesaplanır. Türbülanslı akım halinde Reynolds sayısına bağlı olarak düz levha sürtünme direnç katsayılarını veren formüllerden C_F hesaplandıktan sonra modelin sürtünme direnci

$$R_{Fm} = \frac{1}{2} C_{Fm} \rho_m S_m V_m^2 \quad (2.11)$$

ile hesaplanır.

- Model deneyi ile ölçülen toplam dirençten hesaplanan sürtünme direnci çıkartılarak modelin artık direnci bulunur.

$$R_{Tm} - R_{Fm} = R_{Rm} \quad (2.12)$$

- Froude benzerliği ile gemi ve modelin aynı Froude değerine sahip olmaları ($Fr_m = Fr_s$), ve dolayısıyla artık direnç katsayılarının eşit olması ($C_{Rm} = C_{Rs}$) gerçeğinin bir sonucu olarak Froude mukayese kanununa göre V_s hızındaki geminin artık direnci bulunur:

$$R_{Rs} = R_{Rm} \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3 = (R_{Tm} - R_{Fm}) \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3 \quad (2.13)$$

Bu direnç V_m model hızına karşılık geminin $V_s = V_m \lambda^{1/2}$ hızı için belirlenmiş olur.

- Geminin sürtünme direnç katsayısı ve sürtünme direnci model için yapılan hesaplamalardaki gibi bu sefer gemi boyu ve hızı kullanılarak $R_{Fs} = \frac{1}{2} C_{Fs} \rho_s S_s V_s^2$ formülü ile bulunur.
- Hesaplanan artık direnç ve sürtünme direnci toplanarak toplam gemi direnci bulunur.

$$R_{Ts} = R_{Fs} + R_{Rs} = R_{Fs} + (R_{Tm} - R_{Fm}) \frac{\rho_s}{\rho_m} \lambda^3 \quad (2.14)$$

Gemi ve model için sürtünme direnci katsayıları, levhalar ve dubalar üzerine yapılmış deneysel ve teorik çalışmalar dikkate alınarak, türbülanslı akım hali için verilmiş formüllerden hesaplanır (Url-2).

2.3.2 Hughes yöntemi

Hughes levha ve dubalar ile yaptığı deneyler sonucunda sürtünme direnci katsayısı için $C_F = \frac{0.067}{(\log_{10} Re - 2)^2}$ formülünü gemi-model uyum hattı olarak önermiştir (Baykal ve Dikili, 2002). Söz konusu bu direnç bileşenleri viskozite kaynaklı sürtünme ve viskoz basınç dirençleri ile yerçekimi kaynaklı dalga direncidir.

$$R_T(Re, Fr) = R_F(Re) + R_{pV}(Re) + R_w(Fr) \quad (2.15)$$

Bu üç direnç bileşeni ayrı ayrı ölçülemediğinden Reynolds sayısına bağlı olanları birleştirerek viskoz direnç bileşeni elde edilmiştir. Böylece Hughes yaklaşımına göre bir geminin direnci viskoz direnç ve dalga direncinin toplamıdır. $R_T(Re, Fr) = R_V(Re) + R_w(Fr)$ fiziki olarak daha doğru bir ayırım olur.

Bu durumu direnç katsayıları türünden yazarsak;

$$C_T(Re, Fr) = C_F(Re) + C_{pV}(Re) + C_w(Fr) \quad (2.16)$$

$$C_T(Re, Fr) = C_V(Re) + C_w(Fr) \quad (2.17)$$

Bu yöntemde sürtünme direnci yukarıda Froude yönteminde açıklandığı şekilde hesaplanır. Viskoz basınç direnci ise hesaplanan sürtünme direncini sabit bir k katsayısı ile çarparak bulunur. Bu k sabitine form faktörü adı verilmiştir, form faktörü tekne geometrisine bağlıdır ve düşük Froude sayılarında yapılan model deneyleri ile belirlenir. Form faktörünün gemi hızı ve ölçek ile değişmediği kabul edilir (Bertram, 2000).

Düşük Froude sayılarında dalga direnci çok küçük olur. Böylece dalga yapma direncinin ihmal edileceği noktalar bir hat oluşturur ve bu hat yaklaşık olarak iki boyutlu düz levha sürtünme direnç katsayısı eğrisine paralel olur (Baykal ve Dikili, 2002). Bu birleşme noktasında modelin toplam direnç katsayısı modelin aynı Reynolds sayısındaki viskoz direnç katsayısındaki gibi alınabilir. Böylece form katsayısı;

$$\frac{C_V}{C_F} = \frac{R_V}{R_F} = (1 + k) \quad (2.18)$$

- Bu yöntemde de Froude yöntemindeki gibi model tam ölçek gemi ile aynı Froude sayısı değerine sahip olacak şekilde değişik $V_m = \frac{V_s}{\sqrt{\lambda}}$ hızlarında çekilir. Modelin bu hızlardaki toplam direnç değeri ölçülür ve toplam direnç

katsayısı hesaplanır. Modelin sürtünme direnci katsayısı Froude yönteminde anlatıldığı şekilde Reynolds sayısına bağlı şekilde hesaplanır.

- k form faktörü belirlenir.
- Modelin viskoz direnç katsayısı $C_{Vm} = C_{Fm} + C_{Pvm} = (1 + k) C_{Fm}$ formülü ile hesaplanır.
- Modelin toplam direnç katsayısından viskoz direnç katsayısı çıkartılarak modelin dalga direnç katsayısı elde edilir. $C_{Tm} - C_{Vm} = C_{wm}$

Gemi ve model aynı Froude sayısına sahip idi, böylece dalga direnci katsayıları da eşit olacaktır.

- Geminin sürtünme direnci katsayısı C_{Fs} , Froude yönteminde anlatıldığı şekilde geminin Reynolds sayısına bağlı şekilde hesaplanır.

Geminin viskoz direnç katsayısı C_{Vs} , geminin toplam direnç katsayısı C_{Ts} ve dolayısıyla geminin toplam direnci hesaplanır. Yukarıda belirtildiği gibi k form faktörü hız ve ölçek ile değişmediğinden gemi ve modelin form faktörü aynı olur (Url-2).

$$C_{Vs} = C_{Fs} + C_{PVS} = (1 + k)C_{Fs} \quad (2.19)$$

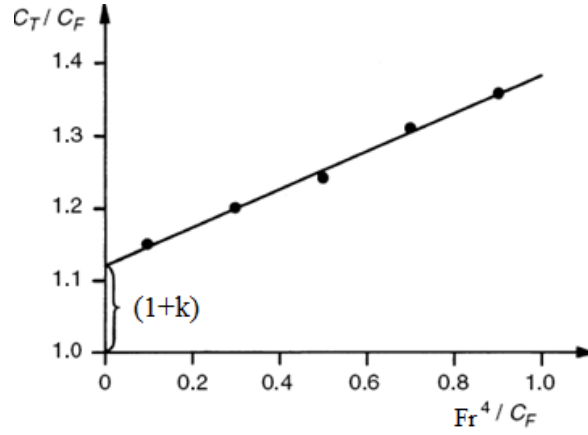
$$C_{Ts} = C_{ws} + (1 + k)C_{Fs} = C_{ws} + C_{Vs} \quad (2.20)$$

$$R_{Ts} = \frac{1}{2} C_{Ts} \rho_s S_s V_s^2 \quad (2.21)$$

2.3.2.1 k form faktörünün hesaplanması

k form faktörünün, Reynolds ve Froude sayılarından bağımsız olduğu ve gemi ile model için aynı olduğu kabul edilir (Bertram, 2000). Aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$\frac{C_T}{C_F} = (1 + k) + a \frac{Fr^4}{C_F} \quad (2.22)$$



Şekil 2.4 : Form faktörü (k) ekstrapolasyonu (Bertram, 2000).

Yukarıdaki şekilde regresyon analizi ile a 'yı belirlemek için çok sayıda Froude sayısı ile hesaplanan model testleri sonuçları görülmektedir.

Düşük Froude sayılarında yapılan model deney sonuçlarından yararlanarak k form faktörü hesaplanabilir.

2.3.3 Prohaska yöntemi

Prohasha 1966 yılında Hughes prensibine dayalı olarak, üç boyutlu form faktörünün belirlenmesi için aşağıdaki yaklaşımı önermiştir. Form faktörü ve C_T değerleri $k = \frac{C_V - C_F}{C_F}$, $C_T = C_w + (1 + k) C_F$ şeklindedir. Bu yöntemde dalga yapma direnç katsayısı $C_w = y F_n^4$ olarak kabul edilmektedir.

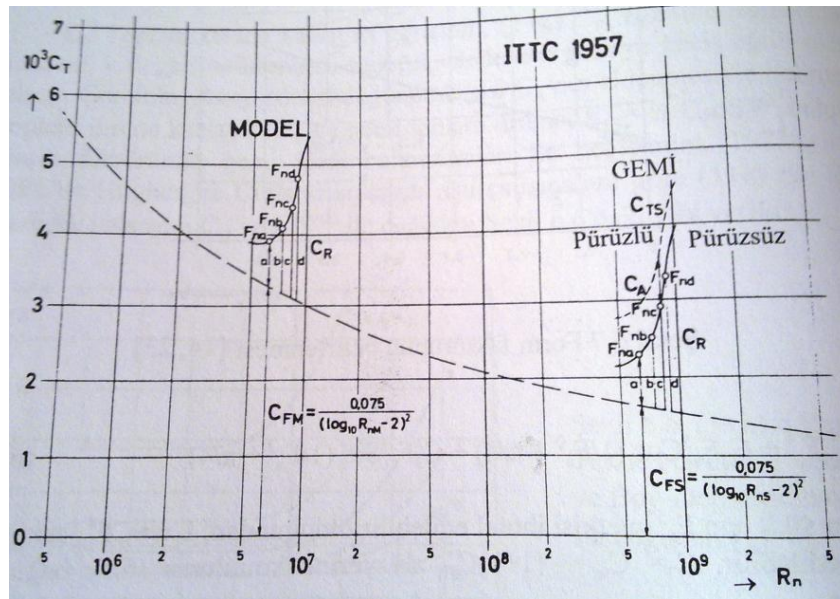
Toplam gemi direnci katsayısı formülünde yerine yazarak,

$$C_T = C_w + (1 + k) C_F = C F_n^4 + (1 + k) C_F \text{ elde edilir.}$$

2.3.4 ITTC 1957 yöntemi

International Towing Tank Conference (ITTC), 1957 yılında model deney sonuçlarının tam ölçekli gemiye uygulanışı için $C_F = 0.075 / (\log_{10} R_n - 2)^2$ formülünün uygulanması kararlaştırılmıştır. Böylece direnci bileşenlerine ayırarak yukarıdaki formülle belirlenen bir eğriyi, gemi-model uyum hattı olarak kabul etmişlerdir.

Modelin istenilen hızdaki sürtünme direnci katsayısı C_{Fm} hemen yukarıda verilen formülle hesaplandıktan sonra geminin toplam direnç katsayısından çıkartılarak, modelin artık direnç katsayısı bulunur. Aşağıdaki şekilde ITTC 1957 yönteminin şematik gösterimi görülmektedir.



Gemi ve modelin Froude benzerliğinden, artık direnç katsayıları eşit kabul edilir. Tam ölçekli gemi için sürtünme direnci katsayısı ITTC 1957 formülü ile hesaplanır. Böylece geminin bulunan artık direnç katsayıları ve sürtünme direnci katsayıları toplanarak toplam gemi direnç katsayısı bulunmuş olur. Bu işlemler farklı hızlar için tekrarlandığında farklı hızlar için toplam direnç katsayıları elde edilir. Bunlar nokta nokta şeklinde grafiğe aktarıldığında C_{Ts} eğrisi elde edilir. Buraya kadarki adımlarda gemi yüzey pürüzlülüğü dikkate alınmamıştı. Bulunan C_{Ts} değerlerine bir ilave direnç katsayısı eklenerek pürüzlü gemi yüzeyi için toplam direnç eğrisi elde edilir. Bazı model deney tankları pürüzlülük katsayısını $C_A = 0.0004$ sabiti olarak alırken, bazıları ise geminin deplasmanına ya da boyuna göre farklı değerlerde almaktadır.

Tarihe bakıldığında, C_A pürüzlülük toleransı katsayısı, tam ölçek gemi pürüzlü iken modelin pürüzsüz olmasından kaynaklanan bir katsayıdır. Bununla birlikte kimi zamanlar hızlı ve çok büyük gemilerde C_A negatif olmuştur. Bu nedenle, C_A için korelasyon katsayısı demek daha uygun olacaktır. C_A toplu olarak pürüzlülük toleransı, ölçüm düzeltmeleri, model-gemi korelasyon hattı gibi tüm düzeltmeleri kapsamaktadır. Model deneyleri C_A 'yı bir sabit değil, deneylerle belirlenmiş, gemi boyuna bağlı bir fonksiyon olarak kullanırlar (Bertram, 2000).

C_A hesabı için kullanılan evrensel bir formül olmamakla birlikte tersane ve mühendislere göre değişik formüller mevcuttur. Aşağıdaki tabloda örneklerini görebilirsiniz:

Çizelge 2.1 : C_A için gemi boyuna göre önerilen değerler (Bertram, 2000).

$L_{pp}(m)$	C_A
50-150	0.00035-0.0004
150-210	0.0002
210-260	0.0001
260-300	0
300-350	-0.0001
350-400	-0.00025

$$C_A = 0.35 * 10^{-3} - 2 * L_{pp} * 10^{-6} \quad (2.23)$$

$$C_A = 0.11 * (R_n * 10^{-9} - 2.1 - a)^2 - a + 0.62 \quad (2.24)$$

$a = \text{maksimum } (0.6, \min(C_B, 0.8))$ değerinde alınır (Bertram, 2000).

2.3.5 ITTC 1978 yöntemi

1957 yöntemindeki bir takım eksiklik ve hatalar sebebiyle ITTC 1978 yılında tek pervaneli gemilerin toplam direnç katsayısının aşağıdaki gibi belirlenmesi önerilmiştir:

$$C_{TS} = (1 + k)C_{FS} + C_R + \Delta C_F + C_{AA} \quad (2.25)$$

burada, k daha önceden verildiği gibi form faktörüdür. C_{FS} 1957 ITTC’de verilen gemi için sürtünme direnç katsayısıdır. C_R model ve gemi için aynı olduğu kabul edilen artık direnç katsayısıdır. $C_R = C_{Tm} - (1 + k)C_{Fm}$. ΔC_F pürüzlülük katsayısı, C_{AA} da hava direnci katsayısıdır.

$$\Delta C_F = \left[105 \left(\frac{k_s}{L_{wl}} \right)^{\frac{1}{3}} - 0.64 \right] 10^{-3} \quad (2.26)$$

burada pürüzlülük yüksekliği $k_s = 150 \mu m$ alınır.

$$C_{AA} = 0.001 \frac{A_T}{S} \quad (2.27)$$

A_T , su hattı üzerindeki geminin alın alanı, S ise ıslak yüzey alanıdır.

3. YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN SINIR TABAKA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

3.1 Sınır Tabaka Kavramı

Sınır tabaka teorisini Ludwig Prandtl geliştirmiştir. Prandtl sınır tabakayı, ortalama akışkan hızının duvarda sıfırdan tam serbest akış hızına arttığı yüzeye yakın ince bir tabaka olarak tanımlamıştır. Bu şekilde tanımlamıştır çünkü akışkan duvara yapışır (no-slip durumu) ve sürtünme kuvvetleri sınır tabakada akışkan hareketini yavaşlatır. Akışkan çok düşük viskoziteli olsa bile, akışın büyük hız gradyanları nedeniyle kenar tabakadaki sürtünme kayma gerilmeleri göz önünde bulundurulur, oysa sınır tabaka dışında çok küçüktürler (Schlichting, 1979).

Prandtl, gerçek bir akışkanın (viskoz) katı bir cismin yüzeyi ile temasında iki farklı akım bölgesi oluştuğunu henüz 1904 yılında belirtmiş, fakat bu görüş ancak 1930 yılından sonra değer kazanmıştır. Prandtl'in bahsettiği bölgelerden ilki hızın oldukça çabuk değiştiği ve içinde kesme gerilmelerinin oluştuğu (viskoz etkilerin görüldüğü) yüzey civarındaki ince sınır tabaka, diğeri de sınır tabaka dışında viskoz olmayan ve hızın cıdardan uzaklaşma ile değişmediği sabit hızlı akış bölgesidir (Schlichting, 1979).

Prandtl'in bu tarihi çıkışından önce, akışkanlar mekaniği bilimi farklı iki yönde gelişmekte idi. Teorik hidrodinamik, 1755'te Leonard Euler tarafından yayınlanan hareket denklemlerinden viskoz olmayan akış için geliştirildi. Ancak hidrodinamik biliminin sonuçları deneysel gözlemler ile çeliştiğinden, pratikte mühendisler kendi deneysel (ampirik) formüllerini geliştirdiler. Bu yaklaşım tamamı ile deneysel verilere dayanıyordu ve kuramsal hidrodinamiğin matematiksel yaklaşımından tamamen farklıydı.

Viskoz akışkanın hareketini tanımlayan denklemler (Navier-Stokes denklemleri) Prandtl'in çalışmaları öncesinde bilinmesine rağmen, bu denklemlerin matematiksel olarak çözümünün bir iki basit hal dışında güç olması, viskoz akışın kuramsal olarak incelenmesine engel olmuştur.

1974 yılında Larsson gemi etrafındaki sınır tabakayı ince bir tabaka kabul ederek, bu bölgede ve iz bölgesinde sınır tabaka denklemlerini, bu bölgenin dışında ise ideal akım kabulü yaparak akım problemini çözmüş ve SSPA 720 modeli için kapsamlı ölçüm deneyleri yapmıştır (Larsson, 1974). Larsson'un bu çalışması o güne kadarki, gemiler için türbülanslı tabakayı araştıran en önemli çalışmalardan birisidir.

O tarihten sonra da SSPA ve ITTC tarafından Göteborg-İsveç'te toplantılar düzenlenerek gemi için sınır tabaka çalışılmıştır. Çeşitli araştırmacılar konuyu araştırmışlardır. 1985 yılında Göteborg'ta yapılan 2. Uluslararası Gemi Viskoz Direnci Sempozyumu'nda dikkat çekici bir şekilde araştırmacıların sınır tabaka denklemleri yerine, PNS (Parabolik Navier-Stokes) denklemleri yada RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) kullandığı görülmüştür. Kullanılan türbülans modelleri ise basit cebrik türbülans modelleri yerine, daha evrensel cebrik türbülans modelleri ve iki denklemlili türbülans modelleridir. Ayrıca basit ve hesap süresi kısa koordinat sistemleri yerine akım doğrultusuna dik yönde, iki boyutta, ortogonal koordinat sistemleri kullanılmaya başlanmıştır (Larsson, 1985). Araştırmacılar o tarihten günümüze kadar konu ile ilgili çok çeşitli çalışmalar yapmış, bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte daha nitelikli çözümlemelere ulaşmışlardır.

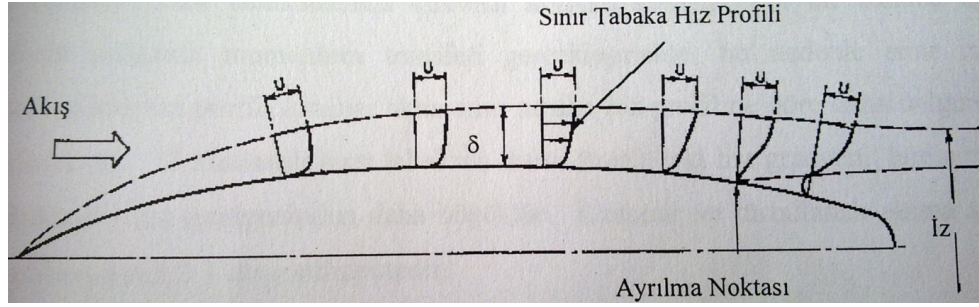
En doğru ve en kesin hesaplamalar, tam ölçekte yapılan ve en küçük türbülanslı hareketi kapsayacak, direkt olarak Navier-Stokes denklemlerinin kullanıldığı hesaplamalardır (Barlas, 1999).

3.2 Sınır Tabakanın Oluşumu

Doğadaki diğer olaylar gibi, gemi etrafındaki akış bölgesi de viskoz ve türbülanslıdır. Viskozite hem sınır tabaka hem de arkasındaki iz bölgesi için çok önemlidir. Bunun birinci nedeni, sınır tabaka içerisindeki sürtünme kuvvetleri, gemi için önemli bir viskoz direnç oluşturmaktadır. Bu viskoz direnç, özellikle ticaret gemileri için geminin toplam direnç bileşenleri içerisinde en önemlilerindendir. İkinci nedeni ise, gemi kıçında ve gemiye yakın iz bölgesindeki hız profillerinin dağılımının pervane dizaynı ve pervaneden alınacak verim açısından çok önemli olmasıdır (Barlas, 1999).

Aşağıdaki şekil 3.1'de gemi etrafındaki sınır tabaka oluşumu görülmektedir. Gemi modelini U_0 hızına sahip bir akışkanın içerisine yerleştirdiğimizde model etrafındaki akış için şunlar söylenebilir:

- 1- Modelin yüzeyine yakın, ince bir tabakada akışkan hızı, modelin yüzeyine doğru giderek azalmaktadır.
- 2- Bu ince bölgede hız değişimi öyle büyüktür ki, akışkanın kinematik viskozitesi küçük dahi olsa viskoz kuvvetler ile atalet kuvvetler aynı mertebededir.
- 3- Bu bölgenin sınırları U/U_0 bağıntısı ile tanımlanır.



Şekil 3.1 : Gemide sınır tabaka oluşumu (Barlas, 1999).

Sınır tabaka olarak adlandırılan bu bölge düzgün ve birbirine paralel akım hatları ile başlar, bu durumda akışkan kayması mikroskobik seviyededir. Bu akıma laminar akım denir. Cisim ve akım alanındaki şartlara göre akışkan karışması artarak makro düzeyde gerçekleşmeye başladığı durumda akım hatları düzgün ve birbirine paralel değildir, bu akıma türbülanslı akım denilmektedir.

Sınır tabakayı pek çok faktör etkileyebilir: akışın laminar ya da türbülanslı oluşu, akışın hızı ve akışkan özellikleri. Türbülanslı akışlarda yüzey pürüzlülüğü, sınır tabakayı duvar yakınında daha yüksek duvar kayma gerilmeleri yaratarak etkiler. Bu da daha yüksek sürtünme direnci anlamına gelir (Schultz ve diğ, 2004).

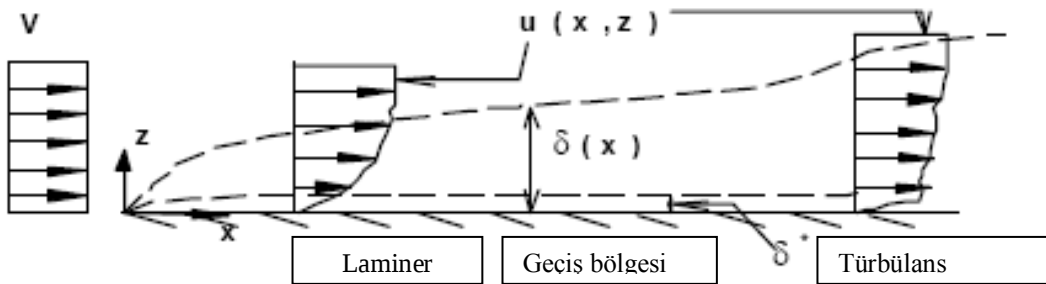
Gerçek akışkan durumunda, akışkan ile cismin yüzeyi arasında kayma olayı olmaz. Akışkan viskozitesi çok küçük ve katı cismin yüzeyi çok düzgün dahi olsa, katı cismin yüzeyi ile temas eden akışkan parçaları adeta yüzeye yapışarak hareket etmezler. Bundan dolayı bir katı cismin etrafında hareket eden akışkanın hızı, katı cismin yüzeyinde sıfırdır. Yüzeyden uzaklaştıkça akışkan tabakalarının birbirini sürüklemeye etkisi gittikçe azalır ve akışkan hızı artarak, belirli bir mesafe sonra yüzeyin yavaşlatıcı etkisinin hissedilmediği serbest akış bölgesindeki sürtünmesiz akım hızına erişir. Bu konumdan sonra hızın sabit olduğu kabul edilebilir. Kısacası akışkan hızının cismin yüzeyindeki sıfır değerinden, uniform akım hızına eriştiği kısma kadar olan hız değişim bölgesine sınır tabaka veya kenar tabaka adı verilir. Sınır tabaka içerisinde yüzeye dik yönde olan hızdaki büyük değişimler sonucunda

$\partial u / \partial y$ hız gradyanı yani hızın türevi, büyük değerlere ulaşarak akışkan viskozitesine bağlı olarak $\tau = \mu \partial u / \partial y$ kayma gerilmeleri oluşur. Böylece katı cisme yakın akışkan bölgesi olan sınır tabaka, yüzeye teğet kuvvetlerin oluşturduğu sürtünme direncinin kaynağı olur. Sınır tabaka dışındaki akışkan bölgesinde akıma dik yöndeki bir kesit üzerinde akışkan hızları sabit olduğundan $\partial u / \partial y = 0$ olur. Yani $\tau = 0$ ve $u = u_{\infty}$ olur. Sınır tabaka dışındaki bölgede viskozite etkisi ihmal edilebileceğinden sürtünme kuvveti de meydana gelmez (Baykal ve Dikili, 2002).

Sıkıştırılamaz akışkanın bir elemanı üzerindeki net viskoz kuvvet, kenar tabakada türbülans oluşumunun kavramsal olarak anlaşılmasının temelini biçimlendiren girdaplılığın yerel gradyanlarıyla belirlenir. Girdaplılık sadece solid kenarda üretilebilir ve normal koşullarda homojen bir akışkanın iç kısmında yaratılamaz veya azaltılamaz (Candries, 2001).

3.3 Levha Etrafındaki Sınır Tabaka

U sabit hızında uniform bir akım alanına hız doğrultusunda yerleştirilen düz bir levha etrafındaki iki boyutlu akım incelendiğinde, levha yüzeyinde akışkan parçalarının hızının sıfır olduğu ve akım doğrultusunda kalınlığı artan bir sınır tabaka olduğu görülür. Akım başlangıçta laminar, daha sonra akım hattındaki bozulmalar sebebiyle laminar-türbülanslı yani karışık, karışık bölgeyi takiben de tamamen türbülanslı olarak levha yüzeyine doğru yayılır. Böylece yüzeydeki ince bir laminar tabaka, ki ona viskoz alt tabaka da denir, dışında akış türbülanslı olur (Harvald, 1983). Laminerden türbülansa geçiş temel olarak atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı olan Reynolds sayısına $Re = \frac{U x}{\nu}$ bağlıdır ve pürüzsüz bir yüzey için $Re_x = 3 * 10^5$ de meydana gelir (Schlichting, 1979). $Re_x = 10^6$ da akım tamamen türbülanslıdır. Aşağıdaki şekilde levha yüzeyi boyunca sınır tabaka (laminer kısım, geçiş bölgesi ve türbülanslı kısım) görülmektedir.



Şekil 3.2 : Levha yüzeyi boyunca sınır tabaka (Schlichting, 1979).

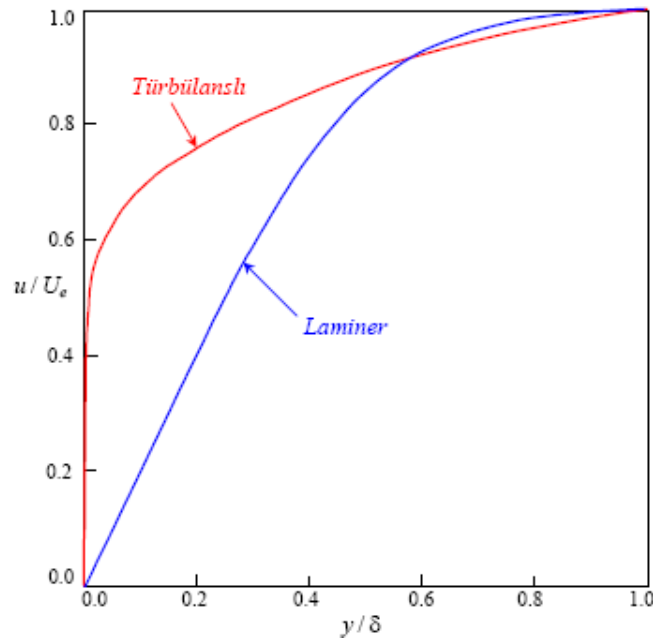
Sınır tabaka kalınlığı, levhanın başlangıç noktasında $\delta = 0$ iken levhanın sonuna doğru büyür fakat yine de x değerine kıyasla daima çok küçüktür.

Türbülanslı sınır tabakalarında akışkan karışmasının sonucu olarak büyük miktarda momentum transferi gerçekleşir. Bu yüzden sınır tabaka içerisindeki hız profilleri, laminar akım sınır tabaka hız profiline göre daha dolgun hale gelir. Şekil 3.2’den de görüleceği üzere, türbülanslı sınır tabakada duvar üzerindeki hız gradyeni laminar sınır tabakadaki hız gradyeninden daha büyüktür.

Türbülanslı sınır tabaka şekil 3.5’teki gibi iç tabaka ve dış tabaka olarak iki bölgeye ayrılabilir. Bunu yapmamızın nedeni, akışkanın basınç ve kayma gerilmesi gradyanlarına verdiği tepkidir (Barlas, 1999). Kıyaslandığında, iç tabaka dış tabakaya oranla çok küçüktür. İç tabaka kalınlığı, tüm sınır tabaka kalınlığının %10-%20’si kadardır.

İç tabaka da kendi içerisinde 3 parçaya ayrılabilir: viskoz alt tabaka, geçiş bölgesi (tampon tabaka), tamamen türbülanslı tabaka (log-law region).

Viskoz alt tabakada viskoz gerilmeler etkindir. Geçiş bölgesi diğer iki tabakayı birleştiren, hem viskoz hem de Reynolds gerilmelerinin aynı derecede öneme sahip olduğu ara bölgedir. Tamamen türbülanslı tabakada ise viskoz gerilmelerin etkisi en azdır, türbülans gerilmeleri ya da Reynolds gerilmeleri baskındır. Aşağıdaki şekilde laminar ve türbülanslı sınır tabakada hız profilleri görülmektedir.



Şekil 3.3 : Laminar ve türbülanslı sınır tabaka hız profillerinin karşılaştırılması (Url-3).

Düz bir levha üzerindeki türbülanslı akışa ait boyutsuz hız profili çok yalın bir şekilde incelenirse, boyutsuz hız u^+ ve cidardan olan boyutsuz mesafe y^+ 'ya bağlı şekilde aşağıdaki bağıntılar elde edilebilir:

$$u^+ = \frac{u}{U_\tau} \quad (3.1)$$

$$y^+ = \frac{y U_\tau}{\nu} \quad (3.2)$$

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.3)$$

Laminer alt tabaka (lineer) için aşağıdaki bağıntı yazılabilir: ($0 \leq y^+ \leq 5$)

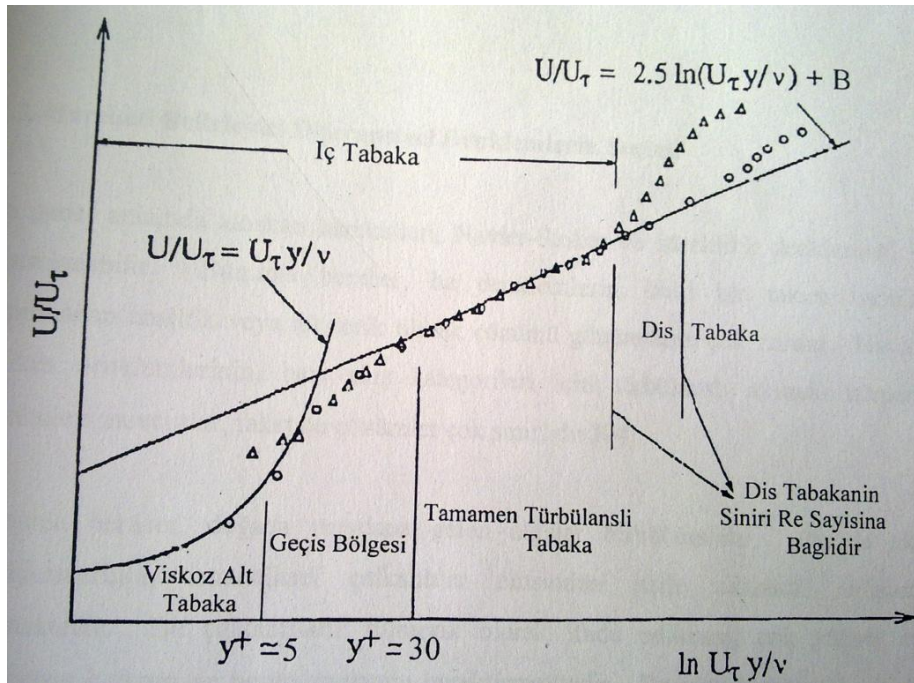
$$u^+ = y^+ \quad (3.4)$$

Türbülanslı tabaka için aşağıdaki bağıntı yazılabilir: ($30 \leq y^+ \leq 800$)

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad \kappa = 0.412, \quad B = 5.5 \quad (3.5)$$

Geçiş bölgesi (tampon bölge) için ($5 \leq y^+ \leq 30$), hız dağılımını doğru bir şekilde veren bağıntı bulunmamaktadır.

Aşağıdaki şekilde türbülanslı akış için boyutsuz hız dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.4 : Türbülanslı akışa ait boyutsuz hız dağılımı (Barlas, 1999).

3.4 Gemi Etrafındaki Sınır Tabaka

Gemi etrafındaki sınır tabaka incelemeleri 1898’de Michell ile başlamıştır ve o zamandan günümüze araştırmacılar gemi etrafındaki akımı modelleyebilmek için büyük çabalar harcamışlardır (Michell, 1898; Barlas, 1999). Yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu gemi dalga direnci üzerine yoğunlaşmıştır. Bunun sebebi, viskoz olmayan akışlar için genellikle kullanılan potansiyel akım teorisi ile kıyaslandığında, viskoz akışlar için kullanılan Navier-Stokes denklemlerinin daha karmaşık olması ve analitik uygulamalar için uygun olmamasıdır. Ancak, akışkanlar mekaniğinde sayısal yöntemler ve deney tekniklerindeki gelişmeler ile birlikte gemi yüzeyi etrafındaki 3 boyutlu sınır tabakanın davranışı açıklanabilmektedir (Barlas, 1999).

Bir deplasman gemisi dar ve uzun, üç boyutlu, genellikle düşey merkez eksene göre simetrik bir cisim olarak düşünülebilir. Gemi etrafındaki akım incelendiğinde, sınır tabakanın kalınlığı geminin baş kısmında nispeten incedir ve kıç kısma doğru gittikçe kalınlaşmaktadır. Gemi etrafındaki su akışının partikülleri, gemi ileri yönde ilerlerken kıça doğru anlık hız değişimleri gösterirler. Gemi etrafındaki viskoz akışın sayısal olarak incelenmesinin nedeni, deney olanaklarının kısıtlı ve pahalı olmasıdır.

3.5 Türbülans ve Türbülanslı Sınır Tabakanın Yapısı

3.5.1 Türbülanslı akış

Frank White 1991 yılında türbülanslı akış için “Türbülans o kadar kompleks bir yapıdadır ki, tam olarak analiz edilmesi ve sayısallaştırılması asla mümkün olmayacaktır. Türbülanslı akış geleceğin araştırma konusu olacaktır....” demiştir (Akinlade, 2005). Gerçekten de günümüzde türbülansın hala kesin olarak sayısallaştırıldığını söylemek zordur ve yakın geçmişte bu konuda pek çok çalışma yapılmıştır ve yapılmaya devam etmektedir.

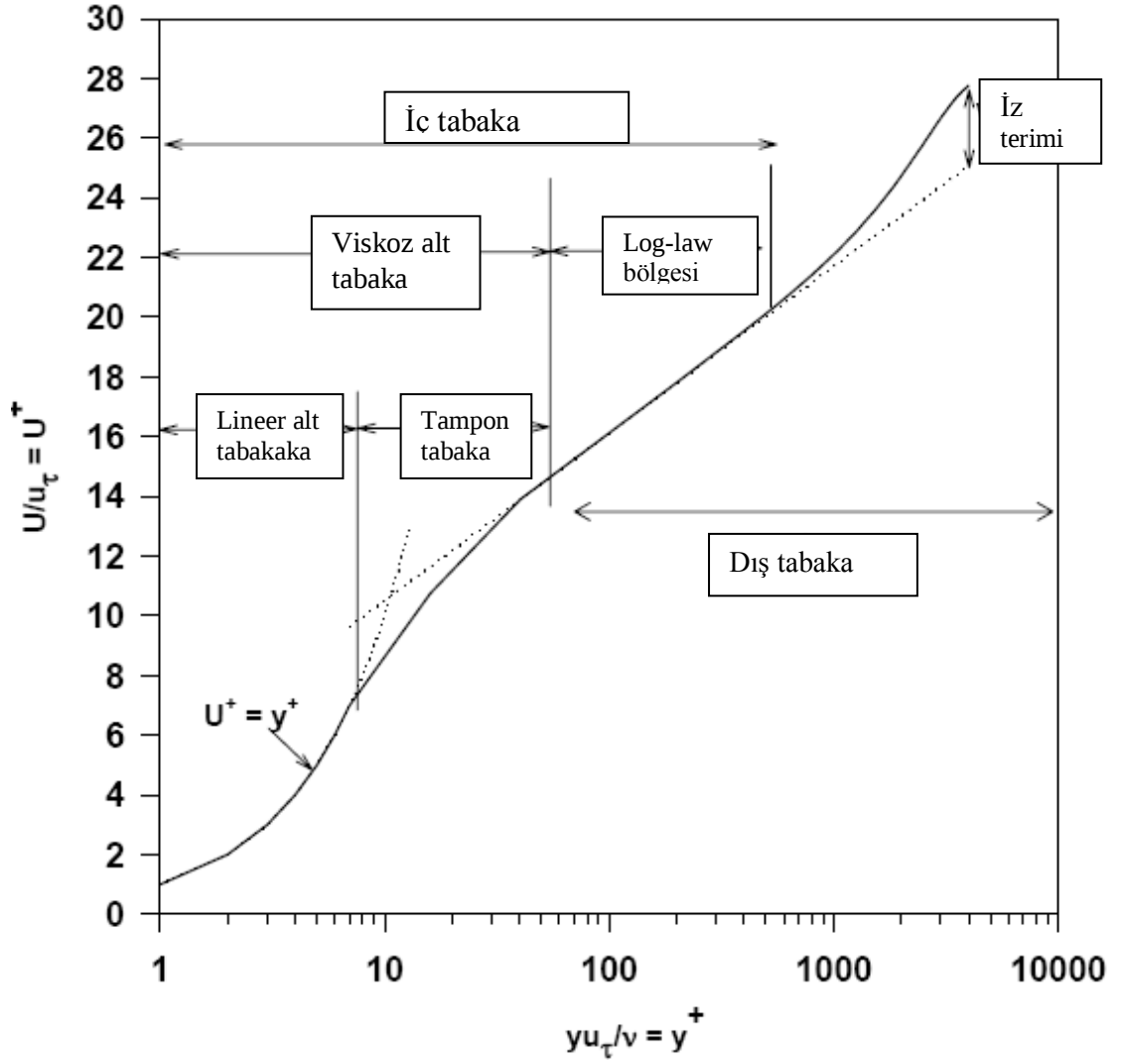
Akışkanlar mekaniğinde neredeyse tüm akışlarda türbülans vardır. Özellikle gemi etrafındaki akışta türbülans mutlaka vardır. Bunun anlamı; akışkan hareketi zamana bağlı (unsteady) (ortalama akış zamandan bağımsız olsa bile), üç boyutlu (ortalama akış iki boyutlu olsa bile), rotasyonel, enerji kaybı olan (sönümlenen), difüzyona uğrayan ve zamana ve mekana göre yüksek derecede düzensizdir. Türbülans hareketinde dönme hareketi (anafor, eddy) geniş bir boyut spektrumundadır, aynı akışkan hacminde büyük ve küçük girdaplar birarada bulunmaktadır. Büyük

girdaplar momentum transportunun büyük bir kısmını belirler. Küçük girdaplar viskoz kuvvetlere göre belirlenir (Akinlade, 2005).

Yukarıda da belirtildiği gibi karmaşık yapısı nedeni ile türbülanslı akışı tanımlamak ve tahmin etmek Newton tipi, sıkıştırılmaz, viskoz, türbülanslı bir akışkanı tanımlayan denklemler bilinmesine rağmen sadece teorik modeller kullanmak zordur. Bu bağlamda akışkanlar mekaniğinde türbülanslı akışları incelemek için iki temel yaklaşım kullanılmaktadır; sırasıyla deneysel ve sayısal çalışmalar. Nümerik çalışmalar; Direct Numerical Solution (DNS), Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) Yöntemleri, Detached Eddy Simulation (DES) ve Large Eddy Simulationu (LES) içermektedir. Bunlardan DNS Navier Stokes denklemlerini büyük bir doğruluk yüzdesi ile çözer fakat türbülanslı akışlar için çok pahalıdır. DES’de tüm anaforlar simule edildiğinden yöntemin uygulanması çok masraflıdır. Bu nedenle sadece araştırma amaçlı kullanılmaktadır. LES’de bazı önemli anaforlar simule edilir ve kalan kısım modellenir. Bu yöntemin de pratikte kullanımı pek mümkün değildir, çünkü çok fazla bilgisayar gücü gerektirmektedir. RANS yönteminde büyük küçük tüm anaforlar modellenmektedir. Bu çalışmanın CFD kısmında (STAR-CCM+) RANS yöntemi benimsenmiştir.

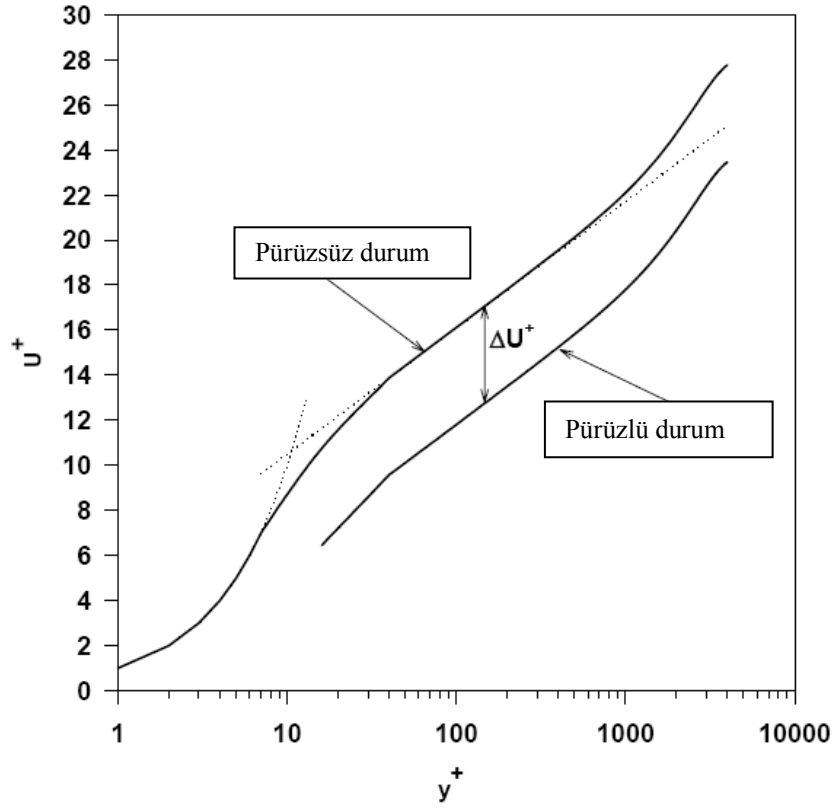
3.5.2 Türbülanslı sınır tabakanın yapısı

Türbülanslı sınır tabaka, şekil 3.5’te görüldüğü gibi çeşitli tabakaların bir bileşimi olarak modellenebilir. Viskoz alt tabaka dediğimiz duvara bitişik olan ilk tabaka, tamamen viskoziteden kaynaklı kayma gerilmelerine sahiptir. Bu alt tabaka çok incedir, genellikle duvardan sadece bir kaç yüz milimetre dışardadır (Akinlade, 2005). Dış tabaka, viskozitenin kayma gerilmesi üzerinde doğrudan etkisinin olmadığı bölgedir. Bu dış tabaka bölgesinde kayma gerilmeleri türbülans hareketleri kaynaklıdır. İç tabaka ile dış tabaka arasında toplam kayma gerilmesinin nominal olarak sabit ve maksimum olduğu logaritmik hız bölgesi bulunur. Genellikle, pürüzlü bir yüzey boyunca sınır tabaka, pürüzsüz duvar sınır tabaka ile aynı yöntemle modellenir.



Şekil 3.5 : Bir pürüzsüz duvar türbülanslı sınır tabaka için ortalama hız profili (Schultz ve diğ, 2004).

Yüzey pürüzlülüğünün logaritmik koordinatlarda çizildiğinde ortalama hız profilini aşağı yönde kaydırarak etkilediği düşünülmektedir. Pürüzlülükten kaynaklanan direnç akışın momentumunu düşürür (Schultz ve diğ, 2004). Pürüzlülük sebebiyle momentum kaybının ölçüsü pürüzlülük fonksiyonu ΔU^+ 'dır. Bu momentum azalması şekil 3.6'da görülebilir. Aşağıdaki şekilde pürüzsüz ve pürüzlü duvar için türbülanslı sınır tabaka profilleri görülmektedir. ΔU^+ , pürüzlülük fonksiyonu, ortalama hız profilinde pürüzlülük etkisini temsil etmektedir.



Şekil 3.6 : Türbülanslı sınır tabaka profilleri: pürüzsüz ve pürüzlü duvar (Schultz ve diğ, 2004).

Geçmişteki araştırmalar, yeterli yükseklikteki Reynolds sayılarında yüzey pürüzlülüğünün yüzeyin üzerinde birkaç pürüzlülük yüksekliğince uzanan bir alt tabaka dışarısında türbülanslı akışı etkilemediğini göstermektedir (Schultz ve diğ, 2004). Bu ifade yakın duvar bölgesi ile akışın geri kalanı arasında çok az bir etkileşim olduğu anlamına gelir. Geçmiş bazı çalışmalar yüzey pürüzlülüğü etkisinin duvar bölgesi ile sınırlı olmadığını fakat hızın logaritmik olarak değiştiği bölgesi boyunca uzandığını belirtmektedir. Ayrıca bu çalışmalarda yüzey pürüzlülüğünün yüzey direncine katkıda bulunan türbülans gerilmelerini etkilediği de iddia edilmektedir.

3.5.2.1 Kayma gerilmesi ve sürtünme hızı

Kayma gerilmesi (pozitif y eksenine yönünde birim alanda momentum taşınması oranı)

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \quad (3.6)$$

Viskoz kısım, duvarda tek bir momentum taşıyıcısından türbülanslı sınır tabakanın dış kısmında toplam gerilmenin ihmal edilebilir bir kısmına kadar değişir.

$y < 0.1\delta$ için, τ yaklaşık olarak sabit ve duvardaki değerine eşittir. ($\tau = \tau_w$). Bu kısım sabit gerilme tabakasıdır. τ_w 'nın birimi *yoğunluk * hız²* olduğundan, sürüklenme hızı, u_τ 'ye göre tanımlamak mümkündür:

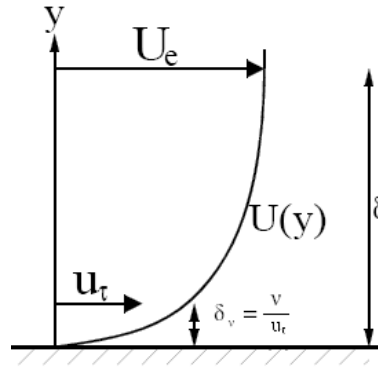
$$\tau_w = \rho u_\tau^2 \text{ ya da } u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho} \quad (3.7)$$

3.5.2.2 Uzunluk ve hız ölçkeleri

Duvar ögeleri

Duvara çok yakın bölgede en önemli parametreler kinematik viskozite ν ve duvar kayma gerilmesidir τ_w .

Karakteristik hız ve uzunluk ölçkeleri sürtünme hızı $u_\tau = \sqrt{\tau_w/\rho}$ ve viskoz uzunluk ölçeği $\delta_\nu = \frac{\nu}{u_\tau}$.



Şekil 3.7 : Türbülanslı sınır tabaka hız ögeleri (Url-3).

Yukarıdaki şekilde türbülanslı sınır tabakadaki hız bileşenleri görülmektedir. Levha etrafındaki sınır tabaka kısmında da verildiği gibi boyutsuz hız ve mesafe aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$U^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (3.8)$$

$$y^+ = \frac{y}{\delta_\nu} = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (3.9)$$

y^+ bir çeşit yerel Reynolds sayısıdır. Değeri duvardan farklı mesafelerde viskoz ve türbülans taşınmasının bağıl öneminin bir ölçüsüdür (Url3-).

Sınır tabaka ögeleri

y^+ 'nın büyük olduğu değerlerde viskozitenin momentum taşınması üzerine etkisi azdır ve yükseklikler sınır tabaka kalınlığının kesri biçiminde yazılabilir:

$$\eta = \frac{y}{\delta} \quad (3.10)$$

Sınır tabaka için evrensel bir parametre olan sürtünme Reynolds sayısı;

$$Re_\tau = \frac{u_\tau \delta}{\nu} \quad (3.11)$$

Tam gelişmiş sınır tabaka akışı U, y, ρ, ν, δ ve u_τ ile belirlenebilir. Boyutsal analiz yapıldığında (6 değişken, 3 bağımsız boyut) $6-3=3$ tane boyutsuz grup arasında fonksiyonel ilişki verilebilir (Url-3).

$$\frac{U}{u_\tau} = f\left(\frac{y}{\delta}, \frac{y}{\delta}\right) \text{ yani } U^+ = f(y^+, \eta) \quad (3.12)$$

Neredeyse tüm sınır tabaka analizleri iç tabaka ($\eta \rightarrow 0$) ve dış tabaka ($y^+ \gg 1$) limit durumlarına dayanmaktadır.

3.5.2.3 İç tabaka

Boyutsal parametreler U, y, τ_w, ρ, ν dir.

Boyut analizinde (5 parametre, 3 bağımsız boyut) $5-3=2$ tane bağımsız boyutsuz grup olur. Buna göre $U^+ = \frac{U}{u_\tau}$ ve $y^+ = \frac{y}{\delta} = \frac{u_\tau y}{\nu}$ şeklinde alınır (Url-3).

Buradan duvar kanununa ulaşılmış olur:

$$U^+ = f_w(y^+) \quad (3.13)$$

f_w nin evrensel bir fonksiyon olduğu yani dış akıştan bağımsız olması beklenir (Url-3).

İlk defa von Karman tarafından 1930 yılında ortaya çıkartılan akışkanlar dinamiğinde duvar kanunu, türbülanslı akışta belli bir noktada ortalama hızın bu noktadan “duvara” ya da akışkan bölgesinin sınırına olan mesafenin logaritmasıyla orantılı olduğunu belirtir.

3.5.2.4 Dış tabaka

Dış tabaka, $\frac{y}{\delta} > 0.1$ 'den 0.2 'ye kadar olan kısım, azalan bir türbülans kayma gerilmesi ile karakterize edilir. Reynolds sayısı benzerliği duvardan uzak konumdaki akış hareketlerinin viskoziteden bağımsız olduğunu varsayar. Başka bir deyişle, geometrik olarak benzer akışların Reynolds sayıları eşit ise dinamik olarak da benzer olmaları beklenir (Candries, 2001).

Boyutsal parametreler $U, y, \tau_w, \rho, \delta$ dır. Boyut analizi (5 parametre, 3 bağımsız boyut) yani 2 tane bağımsız boyutsuz grup olur. Buna göre $\frac{U_e - U}{u_\tau}$ ve $\eta = \frac{y}{\delta}$ şeklinde alınır (Url-3).

Buradan hız bozulması kanununa (velocity defect law) ulaşılır:

$$\frac{U_e - U}{u_\tau} = f_0(\eta) \quad (3.14)$$

f_w nin evrensel bir fonksiyon olmasının beklenmesinin aksine $f_0(\eta)$ belirli bir akışa göre değişiklik gösterir.

3.5.2.5 Birleşme (overlap) bölgesi - Logaritmik hız bölgesi (Log-law)

İç ve dış tabakalar sadece eğer birleşme bölgesinde hız profilleri logaritmik ise düzgünce birleşebilirler.

Dış tabaka: $U_e^+ - U^+ = f_0(\eta)$, iç tabaka: $U^+ = f_w(y^+)$

$\delta^+ = \delta u_\tau / \nu$, böylece $y^+ = \eta \delta^+$ ve $U_e^+(\delta^+) = f_0(\eta) + f_w(\eta \delta^+)$

$\eta \delta^+$ nun sonucu, f_w nin bir fonksiyonu için η ve δ^+ nın ayrı toplamaları olarak f_w logaritmik olmalıdır. Bu durum değişkenlere göre türev alınarak kanıtlanabilir. Çeşitli işlemler neticesinde;

$y^+ \frac{df_w}{dy^+} = \text{sabit}$, bu sabit de von Karman sabiti cinsinden yazılırsa,

$$\frac{df_w}{dy^+} = \frac{1}{\kappa y^+} \quad (3.15)$$

Bu ifadenin integrali alındığında

$$f_w = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (3.16)$$

elde edilir. B pürüzsüz duvar log-law sabitidir.

Böylece logaritmik hız bölgesi (log-law) hız profili:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \quad (3.17)$$

Kaynaklar arasında farklılıklar olmasına rağmen çoğunlukla $\kappa=0.41$, $B=5$ alınmaktadır.

Log-law bölgesinde $\frac{\partial U}{\partial y} = \frac{u_\tau}{\kappa y}$ ya da $\frac{y}{u_\tau} \frac{\partial U}{\partial y} = y^+ \frac{\partial U^+}{\partial y^+} = \text{sabittir}$. Bu eşitlik log-law kuralının türetilmesinde alternatif bir başlangıç noktası olarak sıklıkla kullanılmaktadır.

3.5.2.6 Viskoz alt tabaka

Viskozite sadece $y^+ > 30$ da önemli olmaya başlar ve viskoz bölge, lineer alt bölge ve tampon (buffer) bölge olarak alt bölümlere ayrılmıştır.

Duvarın çok yakınında, türbülans dalgalanmaları sönümlenir ve duvar kayma gerilmesi neredeyse tamamen viskozdur.

$$\mu \frac{\partial U}{\partial y} = \tau_w \text{ sabiti, lineer bir hız profili verir: } U = \frac{\tau_w}{\mu} y$$

$$\tau_w = \rho u_\tau^2 \text{ şeklinde ayarlayıp yeniden düzenlenirse: } U^+ = y^+$$

Deneyler, lineer viskoz alt tabakanın yaklaşık olarak $y^+ < 5$ e karşılık geldiğini göstermektedir (Url-3).

3.5.2.7 Çeşitli bölgelerin sınır değerleri

İç tabakada (yaklaşık $\frac{y}{\delta} < 0.1$) hız u_τ ve y^+ ile orantılı fakat δ ile değildir.

Dış tabakada (yaklaşık $y^+ > 50$) viskozitenin direkt etkisi ihmal edilebilir.

Birleşme bölgesi (overlap region) yeteri kadar yüksek Reynolds sayılarında bulunur.

Birleşme bölgesinde ortalama hız profilleri logaritmik olmak zorundadır.

Lineer alt tabaka $y^+ < 5$ -lineer hız profili

Tampon (buffer) bölge $5 < y^+ < 30$

Log-law bölgesi $y^+ > 30$, $y/\delta < 0.3$ -logaritmik hız profili (Url-3).

3.6 Sınır Tabaka Kalınlığı

Sınır tabaka viskoz kuvvetlerin önemli olduğu katı cisim yüzeyine yakın olan bölgedir. Sınır tabaka kalınlığı, katı cisim yüzeyinden ölçülen ve hızın %1 yaklaşıklıkla serbest akım hızına eşit olduğu noktaya kadar olan mesafedir. Hız profili, yumuşak bir şekilde ve asimptotik olarak serbest akıma birleştiği için, sınır tabaka kalınlığı δ 'yı ölçmek zordur. Sınır tabakanın gerçek kalınlığı belirlenemez,

ama ilerleme hızının %1'i kadar azaldığı nokta, sınır tabakanın nihyeti olarak kabul edilir. Yani hızın ulaşması gereken değerinin %99'una eriştiği nokta, sınır tabaka hattıdır.

Önceki kısımda da belirtildiği gibi, laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş temel olarak Reynolds sayısı ile ilişkilidir ve Schlichting'e (1979) göre pürüzsüz yüzeyler için $Re_x = 3 * 2 * 10^5$ de laminardan türbülansa geçiş meydana gelir. Geçiş aşaması ayrıca yüzey pürüzlülüğü, basınç ve serbest akış hız değişimlerine ve diğer faktörlere de bağlıdır. Yüzey pürüzlülüğü, Reynolds sayısını artırarak geçişi hızlandırıcı etki yapar. Gemi yüzeyleri için akış yönünde laminar kenar tabaka uzunluğu gemi boyuna oranla çok küçük, Reynolds sayısı çok yüksek olduğundan bu çalışmada tam türbülanslı kenar tabakalar üzerinde durulmuştur.

Tam türbülanslı akışta hız ortalama ve değişken (dalgalanan) hız olarak iki kısma ayrılır:

$$u = U + u' \quad (3.18)$$

Bu durum Reynolds dekompozisyonu (dağılması, ayrışması) olarak adlandırılır. Dalgalanan hızlar geniş bir frekans aralığında 3 boyutlu girdaplı hareketler şeklindedir ve akışta karışmaya, momentum değişimlerine, kayma gerilmelerinde artışa ve ısı transferine neden olurlar (Candries, 2001).

Türbülanslı akış hareketi uzun bir süre düzensiz ve karmakarışık-kaotik bir hareket olarak düşünülse de türbülans olgubilimi tekrar eden dinamik akış örneklerinden ‘‘ahenkli hareketlerden’’ oluşmaktadır (Candries, 2001).

Sınır tabaka kalınlığı iki şekilde belirlenebilir; akışkan sabit cisim hareketli kabul edilerek ya da bunun tersi şekilde cisim sabit akışkan hareketli kabul edilerek.

Sınır tabaka kalınlığı ve sınır tabaka içerisindeki hız dağılımı problemleri üzerine çalışmalar yapan Von Karman aşağıdaki kabulleri yapmıştır: (Baykal ve Dikili, 2002).

- Düzgün yüzeylerde hız dağılımı akışkanın viskozitesi, akışkanın kütleli yoğunluğu ve sürtünme kuvvetine bağlıdır.
- Sürtünme direnci, $n=1.75$ gibi, hızın belirli bir n kuvveti ile değişir.
- Sınır tabaka içerisinde hız dağılımı $u = U(y/\delta)^n$ ile ifade edilir.

Buradaki n sayısı levhanın yüzey koşuluna göre değişen bir sayıdır. Parlak cilalı çelik yüzeyli gemiler, temiz yüzeyli gemiler, parafin, ağaç gibi malzemelerden yapılmış gemi modelleri, kirli yüzeyler vb. için değişmektedir.

Blasius'a göre laminar akım halinde sınır tabaka kalınlığı;

$$\delta_{(x)lam} = 5 \sqrt{\frac{\nu x}{U}} \quad (3.19)$$

olarak verilmektedir.

Türbülanslı bölge için sınır tabaka kalınlığı farklı Reynolds sayıları için değişik formüllerle ifade edilmektedir:

$$\text{Prandtl-Von Karman } \delta_{(x)tür} = 0.37 \cdot x \cdot \left(\frac{\nu}{u x}\right)^{1/5} \quad 10^6 < Re < 10^7$$

Aynı formül Reynolds sayısı cinsinden şöyle verilebilir:

$$\delta_{(x)tür} = \frac{0.37 \cdot x}{\sqrt[5]{Re}} \quad (3.20)$$

Windel ve Gaudel (Schneekluth, 1988) gemi ve model için

$$\delta_{(x)tür} = 0.085 \cdot x \cdot Re_x^{-0.1} \quad 10^6 < Re < 10^7 \quad (3.21)$$

formülünü önermektedir.

Baker ve Allen, gemilerde sınır tabaka kalınlığı için aşağıdaki yaklaşık formülleri önermişlerdir (Kafalı, 1972).

$$\text{Baker formülü } \delta^2 + 1.5\delta = 0.02 x$$

$$\text{Allen fomülü } \delta^2 + 4 \delta = 0.065 x$$

Burada x olarak alınan sınır tabakanın hesaplandığı konumun gemi başından uzaklığıdır.

3.7 Sınır Tabakalarda Yüzey Pürüzlülüğünün Etkisi

Pürüzlü alt tabaka terimi bir pürüzsüz duvar türbülanslı sınır tabakadaki viskoz alt tabaka ile benzerdir. Pürüzlülük Reynolds sayısı $h^+ = \frac{h U_\tau}{\nu}$ olarak tanımlanır. Fiziksel olarak karakteristik pürüzlülük yüksekliğinin viskoz uzunluk ölçeğine oranını temsil eder.

Reynolds sayısı benzerliği duvardan uzaktaki akışkan hareketlerinin akışkanın viskozitesinden ν bağımsız olduğunu farzeder. Yani geometrik olarak benzer akışların Reynolds sayıları eşit ise dinamik olarak da benzer olmaları ve tam türbülanslı akış için yeterince büyük bütün Reynolds sayıları için yapısal olarak benzer olmaları beklenir. Duvar benzerlik hipotezine göre pürüzlülük alt tabakası dışında bir sınır tabakadaki yüksek Reynolds sayısında türbülanslı hareketler, duvarın rolü için hız ölçeği U_τ , yükseklik y ve sınır tabaka kalınlığının δ alınması haricinde, duvar pürüzlülüğü ve viskoziteden bağımsızdır (Candries, 2001).

Pürüzlü yüzey üzerinde üç akış rejimi vardır ve pürüzlülük Reynolds sayısı $h^+ = \frac{hU_\tau}{\nu}$, yüzey pürüzlülüğünün akış üzerindeki etkisinin derecesini belirler. Yüzeyde viskoz alt tabakayı etkilemeyen küçük pürüzlülükler olduğunda, yüzey hidrolik olarak veya dinamik olarak pürüzsüzdür denir. Duvar yakınındaki akış ayrılmaya uğramadan pürüzlülük şeklini takip eder. Bu yüzden bu mertebedeki pürüzlülük direnci arttırmaz. Nikuradse'nin kum tanesi pürüzlülüğüne göre bu rejim $h^+ = \frac{h_s U_\tau}{\nu} < 5$ te meydana çıkar (Schlichting, 1979).

Pürüzlülük çıkıntıları viskoz alt tabakanın dışına uzandığında form direnci ve girdap salgılanması (eddy shedding) bundan etkilenir. Bu durumda ek direnç oluşur ve yüzey üzerindeki akışlar geçiş (transitional) rejiminde olur. Reynolds sayısının artışı ile alt tabakanın kalınlığı azalırken, bu evrede pürüzlülük etkisi yüzey topografisine ve Reynolds sayısına bağlıdır. Nikuradse'nin kum tanesi pürüzlülüğüne göre bu rejim $5 \leq \frac{h_s U_\tau}{\nu} \leq 70$ te meydana çıkar (Schlichting, 1979). τ_w duvar kayma gerilmesi hem viskoz hem de türbülans bileşenlerine bağlıdır.

Tam pürüzlü rejimde form direnci baskındır ve pürüzlülük etkisiyle akış ayrılması ve girdap saçılması viskoz etkiye göre tamamen üstündür. Bu aşamada pürüzlülük etkisi artık Reynolds sayısına bağlı değildir. Nikuradse'nin kum tanesi pürüzlülüğüne göre bu rejim $\frac{h_s U_\tau}{\nu} \geq 70$ te meydana çıkar (Schlichting, 1979). Lineer alt tabaka tamamen bozulmuştur ve τ_w türbülans bileşenleri tarafından domine edilmiştir.

Eğer hız profili sınır tabaka bünyesinde incelenirse pürüzlülük etkisi şöyle verilebilir:

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \log(y^+) + B - \Delta U^+ \quad (3.22)$$

Burada von Karman sabiti 0.41'dir, B pürüzsüz duvar logaritmik hız bölgesi sabiti (5 alınabilir), ΔU^+ pürüzlülük fonksiyonudur.

Bu rejimde direncin kare kanununa uyduğu bilinmektedir ($R_F \sim U_e^2$). Lackenby (1962), tam gelişmiş kum pürüzlülüğü için direnç katsayısını şöyle vermiştir:

$$C_F = [1.89 - 1.62 \log(\frac{h_s}{L})]^{-2.5} \quad \text{ve} \quad C_F = [2.87 - 1.58 \log(\frac{h_s}{X})]^{-2.5} \quad (3.23)$$

Yaklaşık olarak aynı Reynolds biriminde meshli ve kum tanesi yüzeylerde pürüzlülük yüksekliği önemli derecede farklı olmasına rağmen benzer pürüzlülük fonksiyonları elde edilir. Bu da bize pürüzlülük yüksekliğinin tek başına yüzey pürüzlülüğünün sebep olduğu momentum azalmasını ölçeklendirmede yeterli olmadığını gösterir.

4. TEKNE VE PERVANE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ

4.1 Tekne ve Pervane Yüzey Pürüzlülüğü Özellikleri

Tekne ve pervane yüzeyinde pürüzlülüğün oluşmasının pek çok nedeni vardır: Yeni gemiler için bile yüzey pürüzlülüğü kaçınılmazdır ve korozyon, kirlenme ve mekanik hasar arttıkça gemi servis halinde yaşlanır iken pürüzlülük de artar. Eğer kirlenme (fouling) ara havuzlama periyodunda (interdocking period) kontrol edilebilirse, bir çeşit enerji kaybı olarak ihmal edilebilir boyutta kalabilir (Ünsalan, 1992).

Gemi yüzey pürüzlülüğü gibi pervane pürüzlülüğünün de ölçülmesi ve sayısallaştırılması tartışmalı bir konudur (Ünsalan, 1992). Her ikise de teoride aynı işlem uygulanmasına karşın, pervane pürüzlülüğünü farklı yapan etmenler:

- a) Daha küçük Reynolds sayısı akışları
- b) Eğer eksenel veya radyal yönlerde kanadın yüzeyi boyunca kavitasyon hasarı ya da kirlenme meydana gelmişse, daha büyük pürüzlülük varyasyonları yapılır.
- c) Daha yüksek pürüzlülük eğimi, yani daha yüksek değerlerde pürüzlülük yükseklik/dalgaboyu oranları.

Pervane yüzeyi, üretimi itibari ile parlatılmış bir yüzeye sahip olmasına karşın işletim hayatı boyunca çeşitli nedenlerle yüzeyinde bozulmalarla karşılaşır. Bunlardan birisi kavitasyondur, bir diğeri de kullanılan pervanenin alaşımına bağımlı olan deniz ortamının yol açtığı kimyasal hasardır. Pervane pürüzlülüğü, boyut olarak küçük olmasına rağmen, yüzey pürüzlülüğü ile karşılaştırıldığında performans düşürücü etkisinin aynı mertebede olduğu görülür (Ünsalan, 1992).

En çok rastlanan pervane bozulması korozyondur. Tekne yüzeyi için de pürüzlülüğü artıran en önemli faktörlerden birisi olan korozyon, malzeme yüzeyinden başlayan ve malzeme derinliklerine doğru kimyasal ve elektrokimyasal bir reaksiyonla tesir oluşturarak bir malzemenin değişikliğe uğraması ya da aşınması olayıdır. Tekne korozyonu için bakarsak; deniz suyu en büyük hacimli elektrolittir ve genel olarak

uniform bileşime sahiptir. Tekne, düşük dirence sahip bu elektrolit içerisinde yüzdüğünden ve oksijen ile atmosferik reaksiyonlara maruz kaldığından korozyon için mükemmel bir ortamdır. Tekne malzemesi olarak çoğunlukla çelik kullanılır ve bütün çelikler deniz suyu içerisinde, sudaki oksijen konsantrasyonu ve çeliğin kimyasal yapısına göre korozyona maruz kalırlar. Teknede ayrı cins metallerin birarada bulunması, yüzeyin pürüzlü olması, yüzeyin hasara uğramış yada kötü boyanmış olması, yüzeyde kaynaklı, perçinli, bükümlü kısımların fazla olması korozyonu hızlandıran etmenlerdir.

Korozyon pervane kanadının her iki tarafında, özellikle de suya göre hızın çok yüksek olduğu dış yarı alanlarda meydana gelir. Çelik, deniz suyu ile biraraya geldiğinde korozyona uğrar yani aşınmaya başlar. Böylece yüzey pürüzlenir. Korozyonun zararlı etkilerinden kurtulmak için çelik tabakanın deniz suyu ile temasını engelleyen modern boya sistemleri geliştirilmektedir. Bir yüzey korozyona uğradığında kalan diğer yüzeylere göre o kısım daha zayıftır ve korozyona uğrayan kısımda gerilme yoğunluğu maksimumdur. Günümüzde korozyona dayanıklılık ve performans açısından pervane malzemesi olarak çoğunlukla manganez bronz alaşımı kullanıldığını görmekteyiz. Saf bakır ve sertifikalı diğer madenlerden (nikel, demir, alüminyum, mangan, çinko) dökümhanede imal edilen bu alaşım kimyasal ve mekanik özellikleri sayesinde pervanenin sağlam ve uzun ömürlü olmasını sağlar.

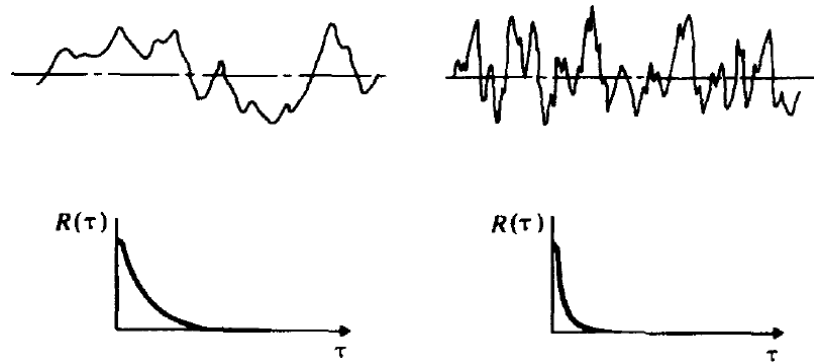
Boyanmış gemi yüzeyi durumunda, yüzey topografyası birkaç mikrondan bir kaç metreye kadar değişen aralıkta dalga boylarından oluşmaktadır. Bu durumda gemi yüzeyi üç şekilde sınıflandırılmıştır: yüzey pürüzlülüğü, dalgalılık ve form hatası. Dalgalılık ve form hatası birlikte yapısal pürüzlülük olarak kabul edilmektedir (Lackenby, 1962). Ayrım oldukça keyfidir ve araştırmacılar tarafından kararlaştırılmış pürüzlülüğü dalgalılıktan ayıran bir dalgaboyu bulunmamaktadır.

Pürüzlü yüzeyler boyunca akış probleminin araştırmalarından pek çoğunda, yüzeylerin karakterizasyonları tek bir parametre ile, pürüzlülük elemanlarının yüksekliği ile yapılmıştır. Bir gemi yüzeyindeki düzgün olmayan pürüzlülük için de bu uygulanmıştır. Gemi yüzeyindeki pürüzlülük çoğunlukla BMT Hull Roughness Analyser (tekne pürüzlülük analiz cihazı) ya da onun benzeri cihazlar ile ölçülmektedir. Tekne pürüzlülüğünü ölçmek için uçlu (iğneli) aletlerin yanında pnömatik aletler de kullanılmış olsa da uçlu cihazlar her zaman daha geçerli

olmuştur. Rt50 okumalarının ortalaması olarak AHR, ortalama tekne pürüzlülüğü, tekne yüzeylerinin karakterizasyonunda uluslararası olarak kabul edilen tek pürüzlülük parametresi olmuştur (ITTC 1990). Bununla birlikte, Rt50 gibi aynı yükseklik veya genlik parametresine sahip iki yüzey, oldukça farklı dokulara sahip olabileceğinden, pürüzlülük kavramının tek bir pürüzlülük parametresi ile temsil edilmesinin yanlış olduğu farkedilmiştir. En azından dokuyu tanımlayan bir parametre daha olması gerekmektedir.

Buna durumu araştıran Dey'e göre yeni yani yüzeyi pürüzsüz veya çok az pürüzlü gemilerde ek direncin yaklaşık olarak belirlenebilmesinde Rt50 parametresi yeterli iken, Candries (2001) yapmış olduğu deneysel çalışma ile, pürüzsüz bir yüzey için fouling salınımlı boya ile boyanmış yüzeylerin ek direnci ile Rt50 arasında herhangi bir bağıntı olmadığını göstermiştir. Bunun nedeni fouling salınımlı boya sisteminin fiziksel bileşimi nedeniyle dokusunun Tribütülin içermeyen (TBT free) sistemden oldukça farklı olmasıdır. Demek ki, farklı boya kullanılması yüzey dokusunda farklılık oluşturduğundan farklı boyalar ile boyanmış yeni yüzeyler ile tekne direnci arasında bağıntı kurabilmek için pürüzlülük parametrelerinin yanında doku parametreleri de gereklidir (Candries, 2001).

Literatürde çeşitli yükseklik ve doku parametreleri kullanılmıştır. Bir yüzeye başka bir ölçüm işlemi yapmadan belli bir ortalama pürüzlülüğe veya eğime sahip olduğunu söylemek hatalı olur. Aşağıdaki şekilde aynı genlik parametresine fakat farklı dokulara sahip iki yüzey ve onların otokorelasyon fonksiyonlarının birbirlerinden ne kadar farklı oldukları görülmektedir.

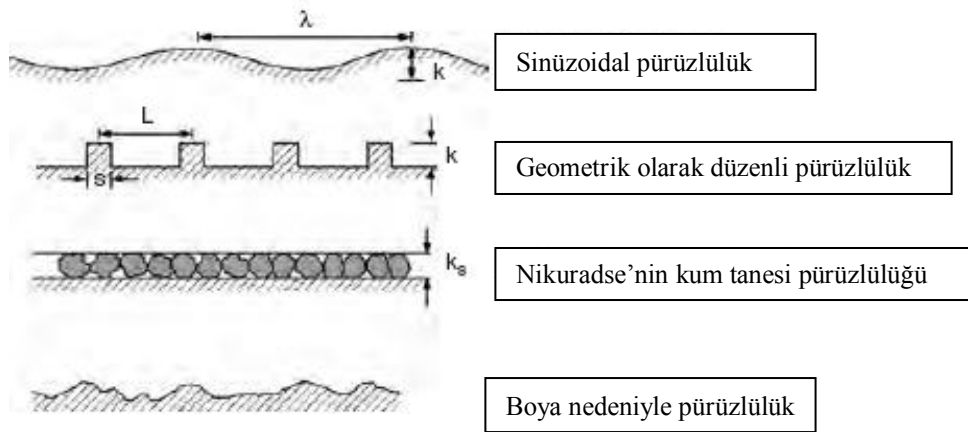


Şekil 4.1 : Aynı genlik parametresine fakat farklı dokulara sahip iki yüzey ve onların otokorelasyon fonksiyonları (Thomas, 1999).

Yükseklik parametreleri uzun dalgaboyu kesimine duyarlı iken, doku parametreleri kısa dalga boyu kesimine duyarlıdır (Thomas, 1999). Pürüzlülük parametrelerinin yükseklik ya da doku hesaba katılmaksızın tanımlanabilmesi için, uzun ve kısa dalgaboyu kesimi değerleri belirlenmelidir.

Pürüzlülüğün etkisi temel olarak yükseklik, form, pürüzlülük dağılımı gibi pek çok parametreye bağlıdır. Aşağıdaki şekil pürüzlülüğün hem idealleştirilmiş türlerini hem de boya nedeniyle pürüzlülüğü göstermektedir. Aşağıdaki şekildeki sinüsoidal pürüzlülüğe bakarsak, bu şekilden de görüleceği üzere pürüzlülük yüksekliği k ve dalgaboyu λ ya bağlıdır (Faltinsen, 2005).

Aşağıdaki şekilde farklı pürüzlülük türleri (sinüsoidal pürüzlülük, geometrik olarak düzenli pürüzlülük, Nikuradse'nin kum pürüzlülüğü ve boya nedeniyle pürüzlülük) görselleştirilmiştir.



Şekil 4.2 : Farklı pürüzlülük türlerinin görselleştirilmesi (Faltinsen, 2005).

Eğer dikdörtgen pürüzlülük elemanları arasında geometrik bir düzen varsa, şekil 4.2'den görüldüğü gibi akış k 'ya, her bir kenarın yatay uzunluğu s 'ye ve birbiri ardı gelen iki pürüzlülük arasındaki mesafe L ye bağlı olur.

Viskoz dirençte pürüzlülük etkisini karakterize etmek için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden birisi eşdeğer kum tanesi yüksekliği kullanmaktır. Bu, yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi aynı k_s yüksekliğinde birbirine yaklaşık olarak eşit mesafede olan kum taneleriyle Nikuradze'nin 1933 yılında yaptığı deneylerde anlatılmıştır (Faltinsen, 2005).

Toplam sürtünme direncini en fazla artıran geminin baş kısmındaki pürüzlülüklerdir. Gemi boyunun baştan ilk çeyreği kadarlık kısım toplam sürtünme direncinin büyük

kısmını oluşturur ve kışa doğru gidildikçe pürüzlülüğün dirence etkisi azalır. Pürüzlülük sürtünme direncine doğrudan etki eder fakat bunun tam olarak ölçülebilmesi çok zordur.

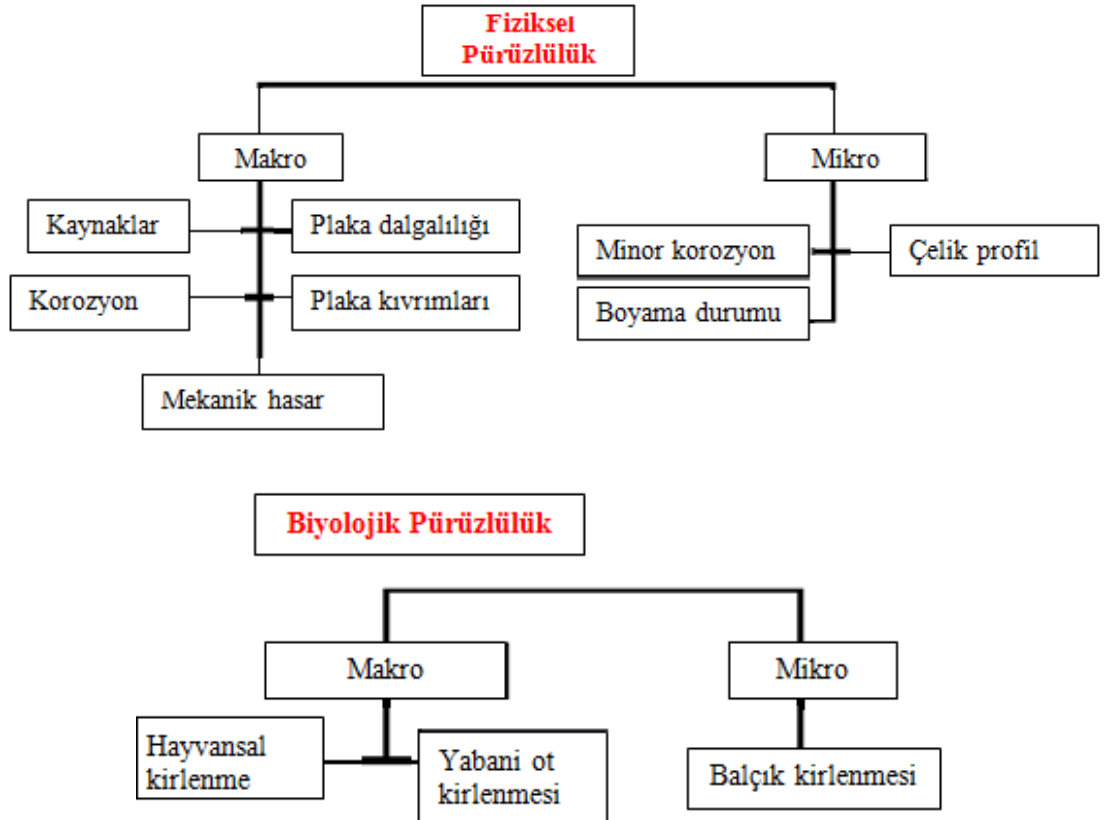
4.2 Pürüzlülük Rejimi

Mikropürüzlülük rejimi, yüzey dalga uzunluğunun birkaç mikrondan birkaç milimetreye kadar mertebesini içerir.

Makropürüzlülük rejimi, milimetre ölçeğinden santimetre ölçeğinedir.

Yapısal pürüzlülük, santimetre ölçeğinden daha yüksek değerlere uzanan dalga boyu seviyesine sahiptir.

Bir başka yaklaşıma göre de tekne pürüzlülüğü iki ana türden oluşur, fiziksel pürüzlülük ve biyolojik pürüzlülük (kirlenme) (Url-4). Her biri kendi makro ve mikro özelliklerindedir.



Şekil 4.3 : Pürüzlülük türleri (Url-4).

4.3 Antifouling Boya Türleri ve Pürüzlülüğe Etkileri

Bir geminin denize indirildikten sonraki performansı pek çok parametreye bağlı olmakla birlikte, bunlardan belki de en kritiği doğru yüzey bakımındır. Korozyonu ve kirlenmeyi kontrol etmede gemiyi boyamak en eko-verimli yöntemdir ve düzenli bakım servis maliyetlerini minimumda tutmada önemlidir (Candries, 2000). Gemi kirlenmesi en fazla antifouling boyalar ile önlenmektedir. Kirlenme problemini kontrol edebilmek için teknenin su ile temas eden kısımlarına antifouling boyalar uygulanmaktadır. Bu boyaların pek çoğu zehirli atıklar içerdiğinden insan, deniz canlıları, deniz ve çevre için son derece zararlıdır. Bu nedenle antifouling boyalar bir takım yasalar ile sınırlandırılmıştır.

Antifouling boyalar sadece kirliliği dolayısıyla pürüzlülüğü önlemekle kalmaz, yüzey dokusunu da güçlendirirler. 4000'den fazla deniz kirliliği türü olduğundan antifouling boyalar tekne yüzeyini canlılardan korumak için çok geniş bir aktivite spektrumuna sahip olmalı (Candries, 2001).

Gemiler seyir halinde iken yüzeylerinde oluşan kirlenme ve pürüzlülük artışı, kullanılan antifouling türüne önemli derecede bağlıdır. Fouling salınımlı boyaların kullanılmaya başlanması ile birlikte gemi direnci açısından doğru antifouling boya seçimi çok önemli bir hale gelmiştir. Antifouling boyaların direnç performansı üzerine etkisi konuşulduğunda ve hangisinin tercih edilmesi gerektiği tartışıldığında en önemli özellik kirlenmeyi uzun süre engellemesidir.

4.3.1 Kendi kendini temizleyen kopolimerler (Self polishing copolymers) (TBT SPC)

Bu ürünlerde deniz suyu ile TBT arasında kimyasal reaksiyon olur ve zehirli madde salarak yüzeye herhangi bir madde yapışması engellenmiş olur. Kirlenmeyi önleme açısından iyi derecede koruma sağlasalar da, TBT gibi canlılar için son derece zararlı bir madde içerirler. Çevre için zararlı olduğundan kullanımında bir takım yasal sınırlamalar, yasaklar getirilmiştir. Çünkü henüz 1980'li yılların başında TBT'nin denizde yaşayan canlı türleri için son derece zararlı olduğu anlaşılmıştır. Böylece ilk olarak 1989 yılında Avrupa Birliği ülkelerinde ve diğer bazı ülkelerde boyu 20 metreden küçük tekneler için tüm antifouling ürünlerinde TBT kullanımı yasaklanmıştır. Daha sonra Uluslararası Denizcilik Örgütü Çevre Koruma Komitesi

(IMO-MEPC), 2003 ve 2008 yıllarında yaptığı düzenlemeler ile tüm tartışmalara rağmen, çevreye zehirli madde salınımı yapan uygulamaların yasaklanmasına karar vermiştir (Candries, 2000). Böylece deniz ve canlılar için zararlı maddeler içeren antifouling boyaların 2003'ten itibaren kullanımı, 17.9.2008'den itibaren de tamamen yasaklanmasına karar verilmiştir.

Kendi kendini temizleyen (SPC) antifoulingler için, ortalama pürüzlülük artışı yılda 20 mikron kadar bulunmuştur (Url-4).

4.3.2 Bakır içerikli antifouling boyalar

1986'dan beri, geleneksel antifoulingler reçine ile takviye edilmektedir ve aşağıda bunlar ‘‘Kontrollü Tükenen Polimer’’ (controlled depletion polymer = CDP =interspeed 340) antifoulingler olarak bahsedilecektir. Reçine boya kimyasında uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan bir maddedir ve denizde çok az miktarda çözünür. Reçinenin ucuz bir malzeme olmasının yanında bir takım eksiklikleri de vardır. Eğer boya içerisine çok fazla reçine koyarsanız bu boyanan malzemenin kısa sürede çatlamasına, deforme olmasına sebep olur. Bunun üstesinden gelmek için CDP teknolojisinde akrilik, vinil, polyester gibi maddeler kullanılır (Candries, 2000). Bu boyaların ortalama tekne pürüzlülüğü artışı yılda tahminen 40 mikrondur.

4.3.3 Fouling salınımlı antifouling boyalar (Intersleek 425 ve Intersleek 700)

Silikon bazlı çevreye zararsız antifouling boyalardır. SPC boyalar ile karşılaştırıldığında yüzey özellikleri çok farklıdır. Çevresel açıdan bakıldığında, denize herhangi bir zehirli madde salgılamayan boyalar en iyisidir. Bu amaçla, 1975 yılında TBT SPC sistemlerin kullanılmaya başlamasından bir yıldan az bir süre sonra silikon elastomerine dayalı bir teknoloji ile bu boyalar ortaya çıkmıştır. Fakat 1975-1990 yılları arasında pek kullanılmamışlardır (Candries ve Atlar, 2000). Bu ürünler kirlenmeyi kontrol etmek için çevreye zehirli madde olan biositler salmazlar ve kaygan ve yapıştırmayan yüzeyleri sayesinde kirletici canlıların yüzeye yapışmaları çok zordur. Fouling salınımlı antifouling boya ile boyama çok pürüzsüz bir yüzey sağlar (ortalama 100 mikron) ve uygulanmaları biraz pahalı olduğundan gemi sahipleri ve operatörleri yüzeye zarar gelmemesi için çok dikkatli davranırlar. Fouling salınımlı antifouling boya uygulanan bir teknenin ortalama tekne pürüzlülüğü (AHR) yılda sadece 5 mikron kadar artar (Url-4).

4.3.4 Tributilin (TBT) içermeyen SPC boyalar (Intersmooth SPC)

Asıl gelişimini TBT'nin yasaklanması ile birlikte ilk olarak Japon boya üreticileri ile yapmıştır. 3 ana türü vardır: bakır akrilat, silil akrilat, çinko akrilat.

Bakır akrilat sistem ilk olarak 1990 yılında "Ecoflex SPC" marka adı ile üretilmiştir. TBT SPC'de olduğu gibi deniz suyu ile reksiyona girerek çözülebilir ince bir tabaka oluşturmaktadır. Ecoflex SPC ürünlerindeki biyositler bakır oksit ve çinko pritiyondur. Bakır antifouling boyalarda tek başına kullanıldığında insan ve çevre için zararlı değildir. Antifouling boyalarda kullanımının TBT'ye oranla çok daha güvenli olduğu bilinmektedir. Çinko pritiyonun değeri düşürülür ve boyadan denize çözüldüğünde zehirleyici etkisini kaybetmekte ve böylece çevreye zarar vermemektedir (Candries, 2000).

Bu boya türünün dayanıklı ve güçlü bir yapısı olduğundan tekne yüzeyini uzun süre koruyabilir. 5 yıl önce gövdesinin tamamına Ecoflex SPC uygulanmış gemiler günümüzde dünya denizlerinde sorunsuz şekilde seyirlerini yapmaktadırlar. Performansları da en az TBT SPC boya ile boyanmış kadar iyidir (Candries ve Atlar, 2000).

Uygulanan bir teknenin ortalama tekne pürüzlülüğü TBT SPC ile aynı, yılda 20 mikron kadar artar (Url-4).

4.3.5 Tributilin içermeyen kendisini temizleyen hibrit (hybrid TBT free self polishing) boyalar (Interswift 655)

Bu boyalar CDP ile SPC arasında bir koruma sağlarlar. Uygulanan bir teknenin ortalama tekne pürüzlülüğü (AHR) yılda 30 mikron kadar artar.

4.4 Fouling Salınımlı Antifouling Boyaların Avantajları (Url-4).

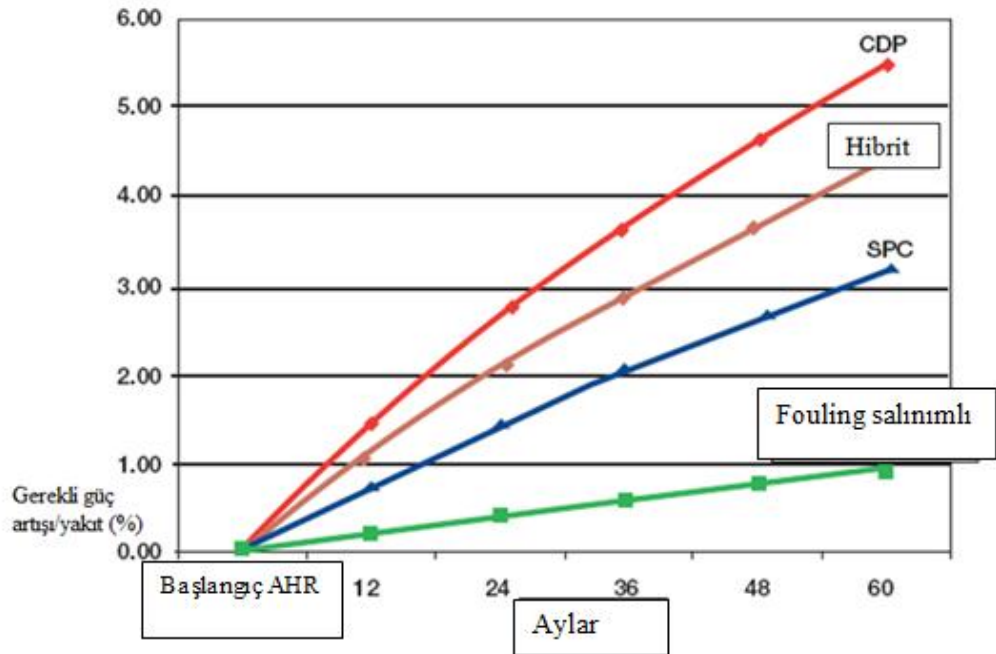
- Çevreye zehirli madde salınımı yoktur.
- Gelecekte çevresel kurallardan etkilenmeyecektir.
- İlk uygulamada diğer türlere göre boya daha az hacimli kullanılır.
- Pek çok gemi türü için iyi antifouling özelliği gösterir.
- Mekanik hasarlara karşı direnci iyidir.
- Tekne pürüzlülüğündeki azalma daha yüksek tekne performansı verir ve emisyonları düşürür.

- Diğer boyalardan daha kısa sürede uygulanabilir, ileriki bakımlar için daha az boya ve uygulama masrafları getirir.

Ayrıca, Anderson ve diğ. (2003), yaptıkları çalışmada fouling salınımlı boyaların düzelen pürüzsüz yüzey sayesinde doğrudan %4 yakıt kazancı sağladığını belirtmişlerdir.

Candries ve diğ. (2001), fouling salınımlı sistemler ile SPC antifouling boyalar ile yüzey korunmasını incelemiş ve aynı şartlar altında fouling salınımlı sistemlerin SPC antifoulinglere göre daha az dirence sahip olduğunu, fakat sadece pürüzlülük parametreleri değil, yüzey dokusunun da (texture) bilinmesi halinde sağlıklı sonuçlara ulaşılabilineceğini açıklamışlardır.

Yine Candries (2001), Newcastle-Upon-Tyne'daki doktora tezinde, fouling salınımlı antifouling boya ile boyanmış yüzeyler ile TBT içermeyen SPC ile boyanmış yüzeyleri incelemiştir. Farklı boyutlarda iki düz plaka ile bir katamaran modeli için yaptığı deneylerde her üç düzenekte de fouling salınımlı boya ile boyanan yüzeyin TBT içermeyen SPC ile boyanan yüzeye göre daha düşük sürtünme direnci bulmuştur.



Şekil 4.4 : Antifouling boyaların karşılaştırılması (Url-4).

Yukarıdaki şekilde, dört farklı anti fouling boya türü için zamana karşı artan güç gereksinimi grafiği görülmektedir.

4.5 Fouling Salınımı Antifouling Boyaların Dezavantajları (Url-4).

- İlk uygulama ve boya masrafları diğer boya türlerinden daha fazladır.
- Uygulama kalitesi çok önemlidir.
- Uygulanışı esnasında maske ve özel ekipman gereklidir.
- Zehirli madde yani biosit içermeyen bir ürün olduğundan balçığa, tortuya (slime) karşı direnci biosit içeren antifoulinglerden daha azdır.

4.6 Ekonomik Değerlendirmeler

Su altı tekne koşullarının ve pervanenin temiz, pürüzsüz olmasının ekonomik etkisi hafife alınmamalıdır. Teknedeki su altı pürüzlülüklerindeki artış, tekne işletim maliyetlerinde önemli bir artışa neden olabilir. Dünya denizciliğinde tekne yüzey pürüzlülüğünün en temel nedeni fouling denilen tekne ve pervane kirlenmeleridir. Bu kirlenmeler seyir halinde gemide pürüzlenmeye yol açmakta, teknenin dokusunda tekneye zarar verici deformasyonlara neden olmaktadır.

Tekne kirliliği meselesinde, deniz boyası kimyacıları ve deniz biyologları rotayı ileriye doğru doğrulturlar, gemi inşa mühendisleri maliyetleri hesaplarlar ve gemi operatörleri de faturaları öderler (Townsin, 2003). Bu nedenle bu çalışmada pürüzlülüğün yol açtığı ekonomik kayıplardan bahsetmek yerinde olacaktır.

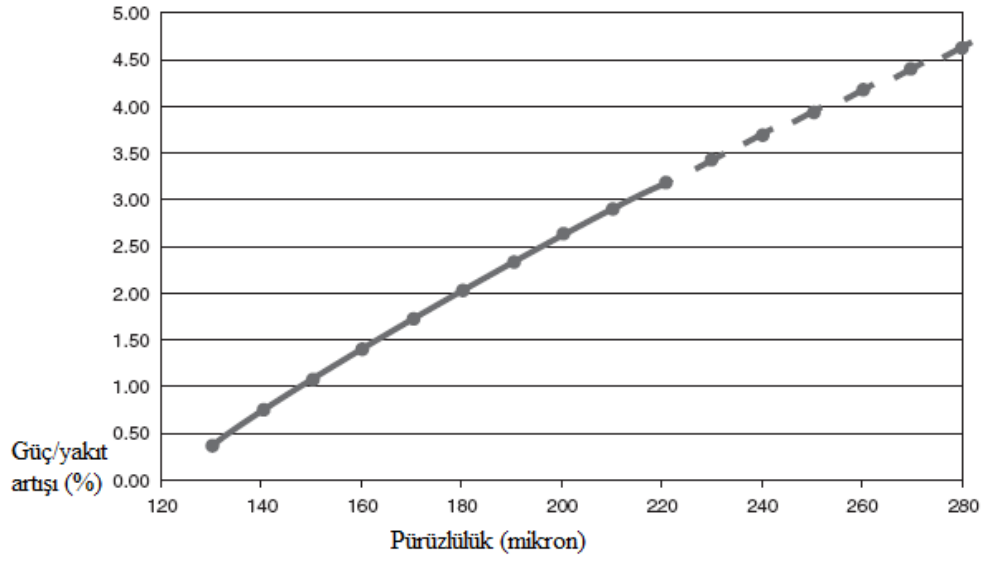
Gemi kirlenmesinin kaybı, toplam gemi direncinde artma dolayısıyla sabit güç için gemi hızında düşme, sabit hız için gerekli gemi gücünde artma; sonuç olarak artan yakıt tüketimi, zamanlama kayıpları ve diğer gecikmelerden ötürü kayıplar dolayısıyla “ekonomik” kayıplardır (Townsin, 2003).

Tekne yüzey boyaları veya antifouling boyalar kullanılarak yapılan tasarruflar 4 grupta toplanabilir; gemi sürtünme direncindeki düşmeden kaynaklı yakıt maliyeti tasarrufu, uzayan ara havuzlama periyotları nedeniyle tasarruflar, mantıken daha düşük kuru havuz maliyetleri ve dolaylı tasarruflar, mesela daha düşük limandan yakıt alma taşımacılığı gereksinimleri. Bu 4 gruptan ABD geçmişe göre yılda sırasıyla 720, 409, 800 ve 1080 milyon dolar kar yapmaktadır ve toplam olarak da dünya donanmaları yılda yaklaşık 3000 milyon dolar kar yapılmaktadır (Townsin, 2003).

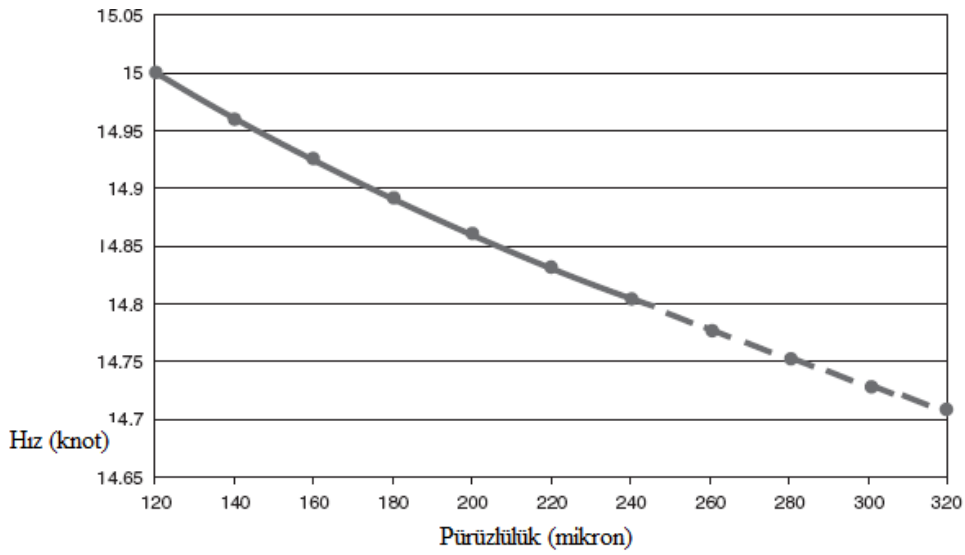
Milne de pürüzlülüğü en aza indirilen, yüzeyi sürekli temiz tutulan gemiler için, dünya donanmalarının yılda 184 milyon ton daha az yakıt tüketeceğini hesaplamıştır. Bununla birlikte duman bacası emisyonları, küresel ısınma, ozon tabakasının delinmesi, asit yağmurları gibi insanlık adına son derece önemli meseleler için de tekne yüzey pürüzlülüğü hayati bir önem taşımaktadır (Townsin, 2003).

Townsin ve arkadaşları, 1976-1986 arasındaki 10 yıllık zamanda daha iyi dip bakımı sonucu pürüzlülük azalması neticesinde İngiltere donanmasında yılda 30 milyon pounda eşdeğer yakıt tasarrufu sağlandığını tahmin etmişlerdir (Townsin ve diğ., 1986).

Schultz ve diğ. (2011) biyolojik kirlenmenin tekne yüzeyi üzerine ekonomik etkisini incelemiştir. Gemi performansının kirlenme etkisiyle düşmesi neticesinde masrafları incelemişlerdir. Amerikan donanmasında çok farklı amaca hizmet eden çok farklı teknik özelliklerde tekne bulunduğundan, genelleme yapabilecekleri, yaygın olarak kullanılan tipte bir gemi ile toplamda 15 yıl süren araştırmalarını yapmışlardır. Masrafları tekne temizlenmesi, yakıt tüketimi, tekne kaplanması ve diğer değişkenler şeklinde başlıklar altında tüm detayları hesaba katarak incelemişlerdir. Sonuçları 4 farklı pürüzlülük durumu için karşılaştırmışlardır. (1. durum hidrolik olarak pürüzsüz, 2-antifouling boyalı üzerinde kirlenme olmayan, 3-antifouling boyalı ve orta kirlilikte, 4-antifouling boyalı ve tam kirli yüzey). İlk 2 koşulda kirlenme ve pürüzlülük olmadığı varsayıldığından yakıt ve bakım masrafı artışı yoktur, sadece tekne yüzeyini temiz tutmak için yüzey temizleme ve boyamada yıldan yıla gider artışı olmaktadır. Bununla birlikte 3. ve 4. durumlarda hem yakıt artışı hem de yüzey bakım masraflarında çok ciddi artışlar saptanmıştır. 3. durumdaki pürüzlülük etkisi 1. durumdaki hidrolik olarak pürüzsüz yüzey ile kıyaslandığında yıllık sadece yakıt masrafları artışının %10.3 olduğu görülmüştür. Bu da geminin operasyon koşulları dikkate alınarak hesaplandığında gemi başına yılda 1.15 milyon dolar artışa denk gelmektedir. 1. durum ile 4. durum kıyaslandığında ise bu artışın %20.4 olduğu hesaplanmıştır. Yüzey bakımı için de antikorosif boya ve kirlenme kontrollü üst boya şeklinde 2 farklı boya türünü incelemiş ve daha az kirlenme ve pürüzlenme olan boyanın bakım masrafları daha yüksek bile olsa daha karlı olduğunu belirlemişlerdir.



Şekil 4.5 : Artan yüzey pürüzlülüğü karşısında geminin hızını koruyabilmesi için gerekli güç/yakıt artışı (Url-4).



Şekil 4.6 : Tanker ve dökme yük gemileri için artan tekne pürüzlülüğü karşısında hız kaybı (Url-4).

5. PÜRÜZLÜLÜK GEOMETRİSİNİ TANIMLAYAN PARAMETRELER

Yüzey profili dijital olarak ya da analog olarak belirlendiğinde araştırmanın amacına göre yüzey pürüzlülüğünü belirlemede hangi parametrelerin hesaplanabilir olduğu bilinerek analizler geliştirilmelidir (Ünsalan, 1992). Bu parametreler genlik ve dalgaboyu ile duyarlı olan genlik parametreleri ve doku parametreleri olarak sınıflandırılabilir. Pürüzlülüğü tanımlayan parametrelerin geliştirilmesi, pürüzlülüğü ölçen cihazlardaki gelişmelerle paraleldir.

Cut-off (kesme): Hangi dalgaboylarının pürüzlülüğe, hangilerinin dalgalılığa ait olduğunu belirleyen bir profil filtresidir. Kesme uzunluğu (cut-off length) ise pürüzlülük ölçümlerinin uzunluk aralığını belirtir.

Aşağıdaki şekilde pürüzlülük için örnek uzunluk ve ölçüm uzunluğunun temsili gösterimi verilmiştir.



Şekil 5.1 : Örnek uzunluk ve ölçüm uzunluğu.

5.1 Genlik Parametreleri

Genlik parametresi, direnç üzerinde en belirgin etkiye sahip olduğundan pürüzlülük ölçütlerinden en önemlisidir. Sınır değer parametreleri, ortalama parametreler ve yükseklik dağılımının özellikleri olarak 3 kısımda incelenebilir.

5.1.1 Sınır değer parametreleri

Sınır değer parametreleri istatistikçiler tarafından verimsiz parametreler olarak bilinir çünkü sayısal değerleri örnekten örneğe çok fazla değişkenlik gösterir ve bu yüzden,

yüzey bu parametrelerle temsil edilirken çok dikkat edilmelidir. Sınır değer parametreleri tartışıldığında, tepe noktasının tanımı genel bir sorundur.

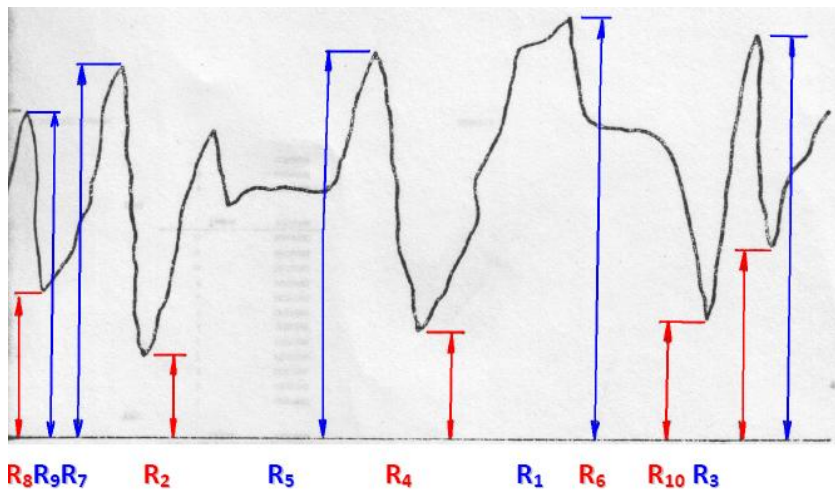
5.1.1.1 Tüm ölçüm uzunluğu için maksimum yükseklik ile maksimum derinliğin toplamı, R_t yada R_{max} : Sınır değer parametrelerindendir. Bu parametre örnekleme uzunluğu içerisinde en yüksek tepe ile çukur noktaları arasındaki fark olarak tanımlanır. Filtre edilmiş pürüzlülüğün en yüksek tepesi ile en derin girintisi arasındaki düşey mesafedir.

Yüzey profili birden fazla örnekleme uzunluğu içerdiği zaman, R_t örnekleme uzunluklarından elde edilen aritmetik ortalamalar ile hesaplanabilir.

5.1.1.2 Pürüzlülüğün 10 noktalı yüksekliği R_z : Değerlendirme aralığındaki en yüksek beş çıkıntı ile en derin beş girintinin mutlak değerlerinin ortalaması yani en yüksek 5 tepe değerinin ortalaması ve en düşük 5 çukur değerinin ortalamasının bir değerlendirme boyu dahilinde dikey dağılımı olan R_z , büyük çoğunlukla R_t nin yerini almıştır.

$$R_z = \left[\frac{(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9) - (R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})}{5} \right] \frac{1000}{V_q}$$

Buradaki $(R_1 + R_3 + R_5 + R_7 + R_9)$ tepe yükseklikleri, $(R_2 + R_4 + R_6 + R_8 + R_{10})$ de çukurların derinlikleridir. V_q bir düşey büyültme değeridir (Url-5). Aşağıdaki şekilde R değerlerinin gösterimi görülmektedir.



Şekil 5.2 : R değerleri (Url-5).

5.1.2 Ortalama Parametreleri

Yüzeyin ortalama özelliklerini belirtirler. Elektrikle çalışan ölçüm aletlerinin kullanımı ile birlikte bu parametreler kullanılır hale gelmiştir.

5.1.2.1 Karelerinin ortalamasının karekökü (RMS) pürüzlülüğü , R_q : Profilin tüm noktalarının karelerinin değerlerinin ortalama kareköküdür. Başka bir deyişle, orta eksenin altında ve üstünde meydana gelen sapmaların geometrik ortalama değeridir. Ayrıca yüzey yapısı hakkında da bilgi verir.

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L z^2(x) dx} \quad (5.1)$$

Burada L ölçme boyudur. Pratikte, filtrelenmiş bir profil için bir kaç kesme boyudur.

Amerikalı araştırmacılar, sinyalin ortalama karekök değerine karşılık veren bir AC voltmetre boyunca elektriksel sinyali geçirmiş ve böylece RMS pürüzlülüğünü açıklamışlardır (Thomas, 1999).

5.1.2.2 Ortalama pürüzlülük , R_a : En çok kullanılan pürüzlülük yüksekliği parametresidir. Yüzey pürüzlülüğü ölçen aletlerden doğrudan okunabilir. Aritmetik ortalama pürüzlülük diye de bilinir. Profilin tüm noktalarının mutlak pürüzlülük değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Yüzeyde oluşan girinti ve çıkıntıların alan bakımından eşitlendiği orta eksenin üstünde ve altında kalan alanların aritmetik ortalamasını veren çizgiler arası mesafe olarak tanımlanabilir.

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \quad (5.2)$$

Burada x yüzey boyunca mesafe, $z(x)$ yüzey profilinin yüksekliği ve L ise örnekleme uzunluğudur.

Thomas (1999), pek çok yüzey için R_q ve R_a 'nın birbiriyle ilişkili olduğundan alternatifli olarak kullanılabileceklerini belirtmiştir.

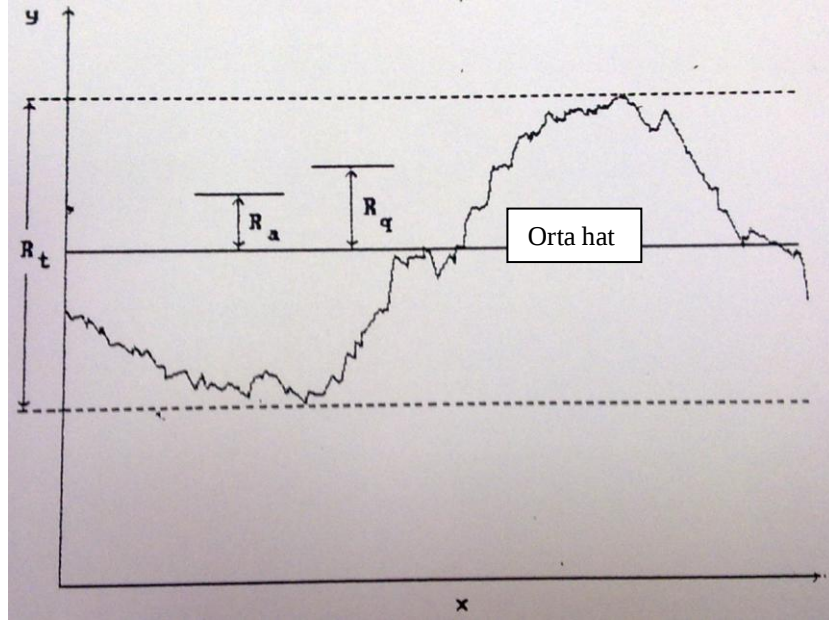
Hidrolik açıdan ne kadar önemli olduğu düşünüldüğünde, pürüzlülük yüksekliği miktarı tartışmalı bir konudur. Ünsalan (1992), bununla birlikte Townsin ve Dey'in araştırmaları pürüzlülük yüksekliği parametrelerinin aşağıdaki şekilde ilişkilendirilebileceğini gösteriyor:

$$R_q(\lambda) = 1.25 R_a(\lambda) \quad (5.3)$$

λ : uzun dalga kesimi

$$\frac{R_t(\lambda)}{R_q(\lambda)} = 0.65 \ln \lambda + 2.1 \quad (5.4)$$

Aşağıdaki şekilde pürüzlü bir yüzey için R_a , R_q ve R_t değerlerinin x-y düzleminde gösterimi görülmektedir.



Şekil 5.3 : Pürüzlü bir yüzey için R_a , R_q ve R_t (Ünsalan, 1992).

5.1.2.3 Ortalama görünür genlik, (Mean Apparent Amplitude) MAA

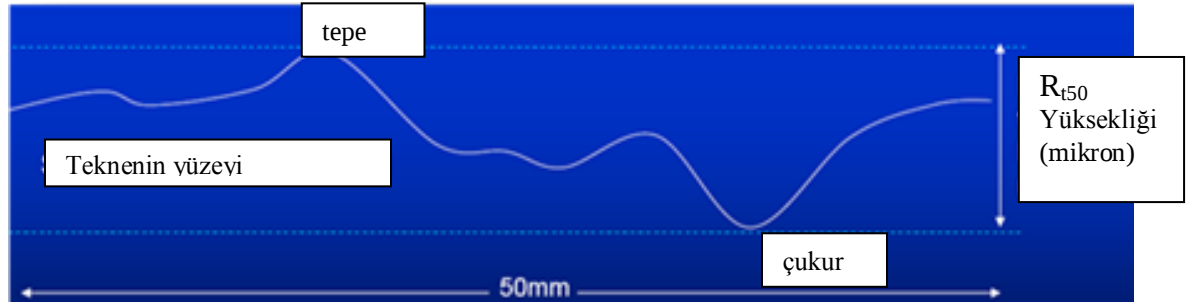
BSRA tarafından, el ile yapılan değerlendirmeler için geliştirilmiştir. Profili 50 milimetrelilik (orjinali 2 inch) örnekleme uzunluklarına bölerek, yüzey profillerinin tepe ve çukur noktalar boyunca 50 mm uzunluk içindeki kapalı alanlarının hesaplanması ile elde edilebilir. Elektronik pürüzlülük ölçüm cihazları kullanılarak, bu parametrenin yerini ona sayısal olarak çok yakın olan R_t (tepeden çukura maksimum pürüzlülük genişliği) almıştır.

5.1.2.4 R_{t50} tekne pürüzlülüğü

Tekne yüzeyinde mikron mertebesinde ölçülen su altında herhangi 50 mm uzunluğu boyunca verilen R_{t50} , yüzeyde en yüksek pürüzlülük tepesi ile en düşük çukur arasındaki mesafedir. Teknelerin pürüzlülükleri ölçülürken yüzey probu her lokasyonda yaklaşık olarak 750 mm mesafe tarayarak 12 R_{t50} kaydı alınır. Yüzey 5 iskele 5 tane de sancak tarafında olacak şekilde boyuna 10 eşit parçaya bölünerek bir

tarafıta toplam 50 değeri okunur. 30 tane düşeyde, 20 tane de yatayda değeri okunur. 100 ölçümden sonra AHR hesaplanır ve pürüzlülük dağılımı çizilir.

Tekne pürüzlülüğü, geminin başı ve kıçısı arasında değışen bir nitelikte olduğundan genellikle ortalama bir formda kabul edilir. Gemideki pürüzlülük dağılımı en az 3 pürüzlülük dağılımının üst üste toplanmasıdır. Biri yüzeydeki varolan temel boya kaynaklı pürüzlülük, diğeri aşırı püskürtme kaynaklı, diğeri de alt katmandaki çeliğin pürüzlülüğü.

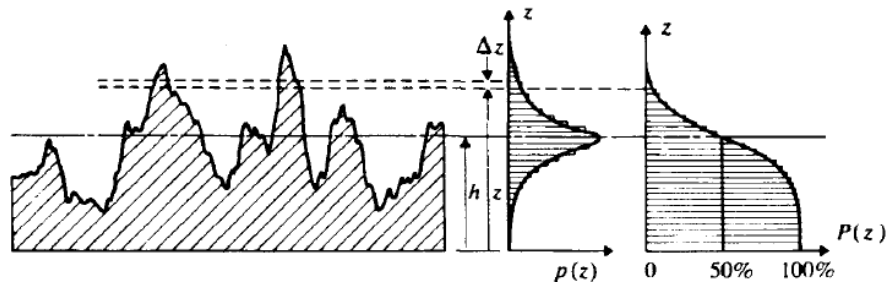


Şekil 5.4 : R_{t50} yüksekliğinin açıklaması.

5.1.3 Yükseklik dağılımı parametreleri

Sınır değeri parametrelerinin aksine, ortalama parametreleri profilin boyutsal ya da dokusal varyasyonu hakkında bilgi içermez. Yüzeyin noktadan noktaya yükseklik değışimini içerir. İncelememizi bir adım daha ilerletip yüzey yüksekliğini istatistiksel dağılıma göre, dokudan tamamen bağımsız şekilde inceleyebiliriz.

Bir x noktasındaki yükseklik $z(x)$ yerine, yüksekliklerin dağılımı olarak olasılık sıklığı $p(z)$ göz önünde bulundurulur. Şekil 5.5'ten de görüleceği üzere z ile $z+dz$ arasında yer alan bir yüksekliğin olasılığı $p(z) dz$ dir ve bir yüksekliğin giderek artan (cumulative) olasılığı h 'ın hemen altında olacaktır.



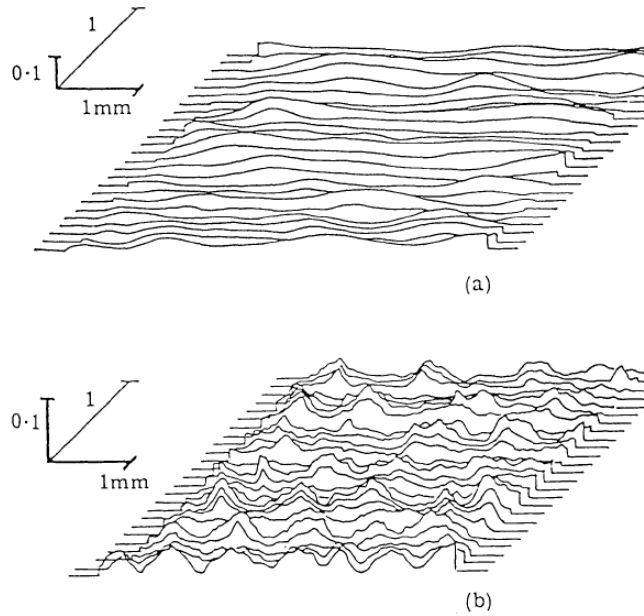
Şekil 5.5 : Profil yükseklik dağılımı $p(z)$ ve eklenerek artan (cumulative) yükseklik dağılımı $P(z)$ (Thomas, 1999).

$$P(z) = \int_{-\infty}^h p(z) dz \quad (5.5)$$

Eşdeğer kum tanesi pürüzlülüğü, k_s : Nikuradse (1933), 1930'lu yıllarda borularda akış direnci ile ilgili deneyler yaparak eş değer kum tanesi pürüzlülüğünü kullanmıştır. Pürüzlülük için sonuçları grain (tane) büyüklüğüne (k_s) göre açıklandığından, akış direnci için bu parametrenin sonuçlarının avantajlarını alabilmek için eşdeğer kum tanesi pürüzlülüğü cinsinden diğer pürüzlülük formlarının da açıklanması yarar sağlayacaktır. Diğerleri gibi bir gemi yüzey pürüzlülük türü değildir.

5.2 Doku Parametreleri

Bir yüzeyin sadece genlik parametreleri varyasyonları ile sınırlandırılması yetersizdir. Pürüzlülük etkileri açısından, tüm genlik parametreleri aynı olan iki farklı dokudaki yüzeyi aynı şekilde tanımlamak mümkün değildir.



Şekil 5.6 : Yaklaşık olarak aynı pürüzlülük genliğine sahip iki farklı dokuda yüzey. (Mosaad, 1986).

Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere aynı pürüzlülüğe sahip iki farklı dokudaki yüzeyin özellikleri birbirinden farklıdır.

5.2.1 Aralıklama parametreleri

5.2.1.1 Yüksek nokta sayısı, De , bir profilin birim uzunluğundaki tepe sayısı ve onun karşısı S de iki yerel tepe arasındaki ortalama mesafedir. Yerel bir tepe, bir sonraki en düşüğü ile yükseklik farkı R_t değerinin en az %1'i olan yerdeki bir nokta olarak tanımlanır. De ile ilgili çeşitli araştırmacılar farklı tanımlamalar yapmıştır.

Thomas (1999), De 'yi iki orta hat keşişimi arasındaki ortalama uzaklık olan Sm 'nin karşısı olarak tanımlamıştır. Medhurst (1989), ise De 'yi birim uzunluktaki maksimum ve minimum noktalarının (ekstremum) sayısı olarak tanımlamıştır.

5.2.1.2 Tepe sayma (peak count) dalgaboyu, λ_{pc} , ortahat (meanline) yakınlarında yerleşmiş bir orta çizgi boyunca keşişen profillerin zamanlara bölünmüş olan iz uzunluğunun 2 katı olarak tanımlanır. Orta çizginin yüksekliği rastgele seçilir ve profilin ölçülen R_a s (ortalama centerline pürüzlülük genliği) ile eşit alınabilir (Ünsalan, 1992).

$$\lambda_{pc} = \frac{2 * (profile\ length)}{Number\ of\ crossings} \quad (5.6)$$

5.2.2 Hibrit parametreler

Hibrit parametreler bünyelerinde hem yükseklik hem de aralık bilgisi bulundurulur ve genellikle profilin diferensiyelinden türetilirler. Δa ortalama mutlak eğimdir ve Sq profilin RMS eğim açısı iken, yüzey profilinin kesme boyu üzerine ortalama mutlak eğim açısı Sa yı elde edebilmek için derecelere dönüştürülebilir. Örnekleme aralığının değeri artarken, ortalama eğim değeri mantık olarak azalır. Farklı değerleri için benzer yükseklik parametreleri ile yüzeyler farklı bir dokuya sahip olur ve farklı hidrodinamik direnç oluştururlar.

Ortalama dalgaboyu λa , boyutsal dalgaboyu varyasyonlarının ortalama ölçüsüdür ve $\lambda a = \frac{2\pi R_a}{\Delta a}$ olarak tanımlanır (Candries, 2001).

5.2.3 Spektral parametreler

Bir yüzeyin dokusunu incelemenin diğer bir yolu rastgele süreç fonksiyonlarını hesaplamak, özellikle otokorelasyon fonksiyonu (ACF) ve onun güç spektral sıklığı fonksiyonunu (PSDF) yi hesaplamaktır. Otokovaryans fonksiyonunun (ACVF) bir fonksiyonu $z(x)$, matematiksel olarak şöyle tanımlanır:

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} z(x) z(x + \tau) dx \quad (5.7)$$

Pürüzlü bir yüzey için otokorelasyon fonksiyonu şöyle yazılabilir:

$$R(\tau) = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{1}{L} \int_0^L z(x) z(x + \tau) dx \quad (5.8)$$

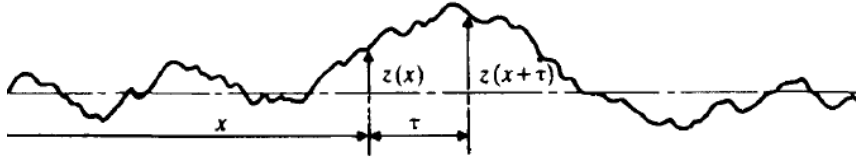
L uzunluğundaki bir $z(x)$ profili için $R(\tau)$ sayısal olarak şöyle yazılabilir:

$$R(\tau) = \frac{1}{L-\tau} \int_0^{L-\tau} \int_{-\infty}^{\infty} z(x) z(x + \tau) \quad (5.9)$$

Burada $z(x)$ ve $z(x + \tau)$ bir τ gecikmesiyle ayrılan yükseklik çiftleridir. Bunu şöyle standartlaştırabiliriz:

$\rho(\tau) = R(\tau)/R(0)$. Burada $R(0)$ yükseklik dağılımının varyansı R_q^2 ye eşit olur. ($\tau = 0$ olduğunda otokorelasyon fonksiyonu R_q^2 ye eşit olur). Korelasyon uzunluğu τ_c ACF nin 1 den keyfi bir değere düşmesi boyunca, genellikle 0.5 yada $1/e$ yani $\tau_{0.5}$ ve $\tau_{1/e}$ boyunca alınan uzunluk olarak tanımlanır (Candries, 2001).

Aşağıdaki şekilde otokovaryans fonksiyonunun yapısı görülmektedir.



Şekil 5.7 : Otokovaryans fonksiyonunun yapısı.

Şimdiye kadar açıklanan parametreler için en önemli problem, bu parametrelerin hiçbirisi yüzeyin geometrisine özgü değildir, genlik ve doku parametreleri, ölçüm aletinin alçak geçirim ve yüksek geçirim süzmesine, başka bir deyişle örnekleme aralığına ve kesme boyuna duyarlıdır. Örneğin korelasyon uzunluğu gibi bir parametre kesme uzunluğu arttığında artma eğilimi gösterir (Thomas, 1999). Bu yüzden temel teorik önemine rağmen yüzeyin özelliklerinin belirlenmesinde pek fazla kullanılmamaktadır.

5.2.4 Kesirsel parametreler

Bazı yüzeylerin kesirsel davranış denilen özel bir özelliğe sahip olduğu fikrini Mandelbrot getirmiştir. Mandelbrot kesirsel davranışın meydana gelmesine kar taneleri ve bulutların oluşumu örneklerini vermiştir (Stout, 2000). Kesirsel davranışa göre bir geometri, bir kurala göre ya da rastgele tüm ölçek aralıklarında kendine özgü benzerlik gösterir. Bir başka deyişle, yüzey ve yüzey profilleri öklid geometrisinin kurallarına uymadan, kesirsel boyutu ile karakterize edilebilir.

Kesirsel davranış, bilimde ve mühendislikte çok sayıda uygulamayı karakterize etme ve düzensizlikleri tanımlamada kullanılır. Kesirsel davranış ile pürüzlü yüzeyler arasındaki alaka şudur: kendine özgü benzerlik, herhangi bir pürüzlülük parametresinin örnekleme ölçeğinden bağımsız olduğunu belirtir. Bu teknik

yüzeylerin özelliklerinin gerçek bir şekilde bazı kesirsel parametrelerle mesela kesirsel boyut ve uzunluk boyutlarıyla ölçekleme faktörü anlamına gelen topothesy ile örnekleme aralığı ya da ölçme ölçek etkisi olmadan açıklama olanağı sağlar.

Tüm yüzeyler kesirsel davranış göstermez. Kesirsellik, yüzeyin nasıl oluştuğuna ve yüzey işleminin pürüzlülük yapısının nasıl değiştiğine bağlıdır. Majumdar ve Bhushan yüzeyin katı bir maddenin çatlamasıyla, malzemenin birikmesiyle ya da bir sıvının katılaşmasıyla oluştuğunu savunmuşlardır. Bunlar kesirsel yüzeyler oluşturan doğal ve rastgele olan işlemlerdir. Kesirsel boyutlandırma, ölçüm aletinin özelliklerinden bağımsız ve tüm ölçekler için geçerli olan gerçek bir pürüzlülük parametresidir (Candries, 2001).

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

Yüzey koşulları incelenirken levhalar ile deney yapmak gemi inşa alanında Froude'dan beri bir gelenek halini almıştır. Levha seçiminin temel nedeni dalga direncinin çok düşük olması sebebiyle sürtünme direncinin toplam direncin çok büyük kısmını oluşturması ve böylece yüzey koşullarının etkisinin incelenmesinde ideal durumun oluşturulmasıdır. Deneysel çalışma vasıtasıyla toplam direnç hesabı yapılırken aynı Froude sayılarında dalga direnci eşit alınmaktadır. Bunun sebebi, Froude sayısı dalga yaratımı konusunda model ile gemi arasındaki benzerliği temsil eder. Farklı boylardaki model levhaları ile aynı Froude sayısında deney yapıldığında, aynı dalga yaratımı (wave generation) olduğu kabul edilir.

Bu çalışmada alüminyum levha modelleri deney havuzunda direnç deneylerine tabi tutularak pürüzlülük nedeniyle oluşan ek direnç elde edilmeye çalışılmıştır. Deneyler farklı pürüzlülükteki alüminyum levhalarının farklı hızlarda çekilmesi ile sürtünme direnci katsayısındaki değişimi elde edebilme esasına dayanmaktadır. Aynı çalışma STAR-CCM+ CFD programında modellenerek direnç katsayıları karşılaştırılmıştır. Hız-sürtünme direnci katsayısı eğrileri ve Reynolds sayısı-toplam direnç katsayısı eğrileri çizilerek deney ile CFD sonuçları karşılaştırılmıştır.

Toplam direncin ölçülmesi dışında dalga profilleri video kamera ile kayıt altına alınmıştır.

6.1 Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı

Türkiye'deki gemi inşa endüstrisindeki gelişmeler ile paralel olarak bilimsel ve teknik gereksinimler de artmaktadır. Ata Nutku Gemi Model Laboratuvarı, sağladığı eğitim, araştırma ve geliştirme olanakları ile Türkiye'de denizcilik teknolojisi adına önemli bir rol oynamaktadır.

Daha önceden Gemi Enstitüsü adıyla faaliyet göstermekte olan Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'ndaki büyük çekme tankı, 160m x 6m x 4.5m boyutlarındadır. Suyun yüksekliği 3.40m dir ($L*B*D$).

Aaşığıdaki şekilde deneysel çalışmanın yapıldığı Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'ndaki deney havuzu görülmektedir.



şekil 6.1 : Ata Nutku Gemi Model Laboratuvarı'ndaki Deney Havuzu.

6.2 Deneylerde Kullanılan Program, Araç ve Gereçler

Direnç deneylerinde tek bileşenli Kempf & Remmers dinamometresi kullanılarak akım yönündeki direnç llmştr. Deneylerde 5 adet farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip alüminyum levha kullanılmıştır. Levhalardan bir tanesi (levha 1) boyanmamış ve referans olarak kullanılmıştır. Diğerk levhalar farklı pürüzlülük değerklerine sahip boyalar ile boyanmıştır.

6.3 Alüminyum Levhaların zellikleri

Çalışmada 5 adet farklı boyalar ile boyanmış dolayısıyla yüzey pürüzlülük özellikleri farklı onun dışında diğerk tüm özellikleri özdeş alüminyum levhalar kullanılmıştır. Alüminyum levhaların yüzey özellikleri hazır ölçülmüş olarak deneye başlanmıştır. Böylece BMT tekne pürüzlülük ölçüm cihazı ve benzeri yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazları ile yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesinde karşılaşılacak olası problemlerin ve ölçüm hatalarının önüne geilmıştır. Bununla birlikte, levhaların pürüzlülük ölçümlerinin deneyden hemen önce yapılmamış olması sebebi ile pürüzlülükteki çok küçük derecelerdeki zamana bağlı değişimler dikkate alınmamıştır.

Levhaların boyları 1500 mm, derinlikleri 610 mm, kalınlıkları 50 mm'dir. Baş ve kık kısımları 73.50 mm uzunluğunda daralarak gelmektedir yani üçgensel kesittir. Aşağıda levhaların ana boyutları verilmiştir.

Boy (L)	1.5m
Genişlik (B)	0.05m
Yükseklik (D)	0.61m
Draft (T)	0.41m
Islak alan (S)	1.3081 m ²

Pürüzlülüğün dirence olan etkisi için, kalınlığı ihmal edilebilir boyutlarda çok ince levhalar kullanılarak daha net sonuçlar alınabilirdi. Ancak konunun ileriki çalışmalarda tam ölçek gemi formları ile bütünleştirilmesi düşüncesi ve ince levhanın getireceği problemler (yüksek basınç karşısında rijitliğini kaybetmesi, dinamometreye bağlanması ve direnç deneyleri boyunca sabit tutulabilmesi vb.) nedeniyle bu boyutlardaki levhaların kullanılmasına karar verilmiştir.

Şekil 6.2'de alüminyum levha 4'ün direnç deneyi öncesi deney tankına götürülürken çekilen resmi görülmektedir.



Şekil 6.2 : Levha 4 deney havuzuna götürülüyor.

6.4 Pürüzlülük Parametrelerinin Ölçümü ve Karşılaştırılması

Boyanmış bir yüzey texture (doku) denilen kavram ile tanımlanır. Doku, aralarında pürüzlülüğün de olduğu dört elemandan oluşur. Dalgalılık (waviness), lay (yüzey dokusunun baskın olan kısmı), yüzey kusurları (boya çizikleri ya da kaynak izleri) diğer doku parametreleridir. Bu dört bileşen yüzeyde farklı büyüklüklerde, birbiriyle iç içe geçmiş şekilde bulunur. Yüzey dokusunu tanımlamada her biri ayrı ayrı önemlidir (Thomas, 1999). Bu sebeple yüzeyin pürüzlülük özelliğinin belirlenebilmesi için dalgalılık kısmı bir kısa geçiş filtresi (short-pass filter) ile çıkartılmalıdır.

5. bölümde incelendiği üzere pürüzlülük çeşitli parametreler ile ifade edilir. Çalışmada pürüzlülük yüksekliğinin dirence olan etkisi incelendiğinden, levhaların kesme uzunluklarına (cut-off length) göre pürüzlülük yüksekliklerinin (Ra, Rq, Rt, Rz) verilmesi yeterli görülmüştür.

Deneyde kullanılan 2, 3, 4, 5 numaralı levhaların boyanma işlemleri aynı koşullarda aynı teknikler ile yapılmıştır. 1 numaralı levha diğerlerine referans olması için boyanmamıştır. Levhaların pürüzlülük yüksekliği parametreleri aşağıda verilmiştir: (Taylan ve diğ, 2010).

Çizelge 6.1 : Levha 1'in pürüzlülük değerleri.

LEVHA 1	Kesme (mm)	2.5	0.8	0.25	0.08
	Ra (μm)	1.81	0.98	0.755	0.742
	Rq (μm)	2.13	1.20	0.982	0.992
	Rt (μm)	11.4	6.78	5.2	5.27
	Rz (μm)	9.98	5.93	4.35	3.19

Çizelge 6.2 : Levha 2'nin pürüzlülük değerleri.

LEVHA 2	Kesme (mm)	2.5	0.8	0.25	0.08
	Ra (μm)	2.16	1.02	0.34	0.198
	Rq (μm)	2.4	1.2	0.402	0.261
	Rt (μm)	11	4.94	2.12	1.65
	Rz (μm)	8.94	4.45	1.57	0.835

Çizelge 6.3 : Levha 3'ün pürüzlülük değerleri.

LEVHA 3	Kesme (mm)	2.5	0.8	0.25	0.08
	Ra (µm)	2.47	0.428	0.241	0.169
	Rq (µm)	3.02	0.603	0.292	0.206
	Rt (µm)	11.9	5.09	1.500	1.060
	Rz (µm)	11.1	3.82	1.300	0.725

Çizelge 6.4 : Levha 4'ün pürüzlülük değerleri.

LEVHA 4	Kesme (mm)	2.5	0.8	0.25	0.08
	Ra (µm)	4.47	1.19	0.726	0.223
	Rq (µm)	5.17	1.36	0.854	0.281
	Rt (µm)	18.6	6.01	3.770	1.460
	Rz (µm)	17.9	5.11	2.940	0.923

Çizelge 6.5 : Levha 5'in pürüzlülük değerleri.

LEVHA 5	Kesme (mm)	2.5	0.8	0.25	0.08
	Ra (µm)	2.12	0.803	0.396	0.172
	Rq (µm)	2.38	0.928	0.493	0.212
	Rt (µm)	8.39	3.88	2.75	0.952
	Rz (µm)	7.99	3.66	1.91	0.762



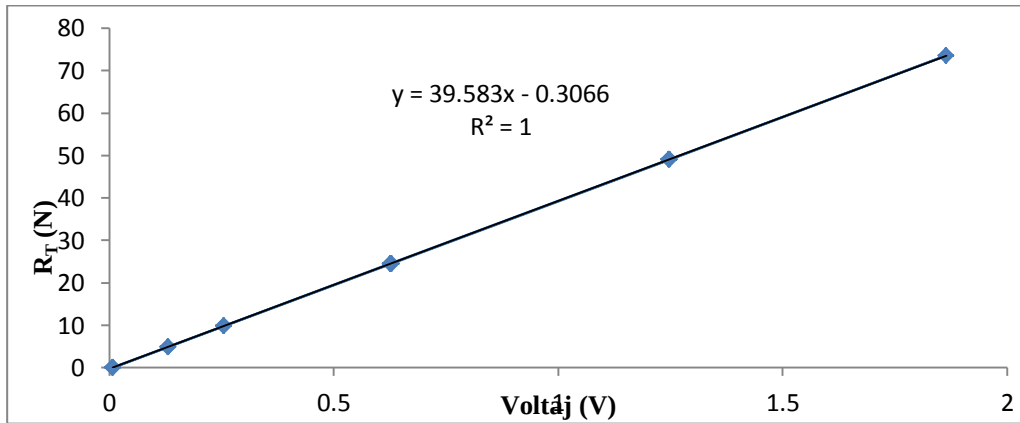
Şekil 6.3 : Alüminyum levhalardan üçü. (soldan sağa levha 5, levha 3 ve levha 2).

6.5 Direnç Deneyleri Öncesi Kalibrasyon İşlemi

Direnç deneyi sonuçlarının aynı mertebede hata içermesi açısından deneyde kullanılacak olan tek bileşenli Kemf & Remmers R35-I dinamometresi kalibre edilmiştir. Kalibrasyon işlemi 1V→ 1kg prensibi ile sırasıyla 1 kg, 2 kg, 5 kg, 10 kg ve 15 kg ağırlıklarının dinamometrenin itme kefesine konulup sonrasında aynı sıra ile geri alınıp Labview programında analiz yapılarak karşılık gelen voltaj değerlerinin bulunmasıyla yapılmıştır. Her ağırlık konulduktan sonra voltaj değerlerinin sabit olduğu durumda 10-15 saniye için değerler kaydedilmiştir. Önce 15 kg'a kadar ağırlıklar kefeye konulmuş, sonra ağırlıklar sırayla alınarak dinamometrenin hem ağırlık konması hem de ağırlık azaltılmasına olan karşılığı kontrol edilmiştir. Burada yapılan işlem ağırlıkların değişimi ile dinamometredeki hassasiyetin amplifier ve bilgisayar programı aracılığıyla belirlenmesidir. Aşağıda kalibrasyon işlemine ait Çizelge 6.6 ve Şekil 6.4 görülmektedir.

Çizelge 6.6 : Tek bileşenli dinamometre kalibrasyonu.

Durum	Koyulan ağırlık	Mevcut ağırlık	Ölçülen ağırlık	Ölçülen direnç	Voltaj
	kg	kg	kg	N	V
1	0	0	0	0	0.008
2	1	1	0.5	4.905	0.132
3	1	2	1	9.81	0.256
4	3	5	2.5	24.525	0.629
5	5	10	5	49.05	1.249
6	5	15	7.5	73.525	1.865
7	-5	10	5	49.905	1.247
8	-5	5	2.5	24.525	0.626
9	-3	2	1	9.81	0.255
10	-1	1	0.5	4.905	0.131
11	-1	0	0	0	0.007



Şekil 6.4 : R35-I dinamometresinin kalibrasyon grafiği.

Yukarıdaki şekilde R35-I dinamometresi ile yapılan kalibrasyon işlemi görülmektedir. Düşey eksen ölçülen ağırlık değerlerini, yatay eksen ise elde edilen voltaj değerlerini göstermektedir. Kalibrasyon eğrisi lineer olmalıdır ve eğrinin eğimi itme için gerekli olan kalibrasyon katsayısını vermektedir.

6.6 Deneylerin Yapılışı

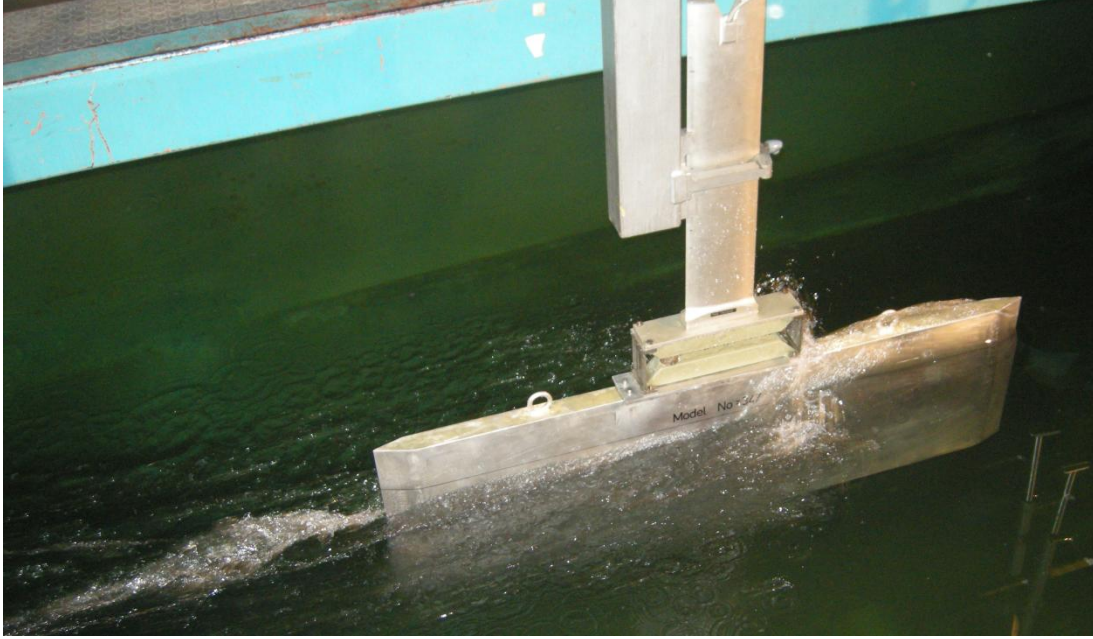
Farklı pürüzlülükteki alüminyum levhalar önce boyanmamış olandan başlanarak 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.3, 3.5 ve 3.75 m/s civarındaki hızlarda Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarı'ndaki deney havuzunda direnç deneyleri yapılmıştır. Her bir deneyden önce Labview programı ile "sıfır" hızdaki direnç kayda alınarak analiz edilmiş, sonrasında bu direnç deney ile elde edilen "ölçülen dirençten" çıkartılarak "net direnç" elde edilmiştir. Deneylerde belirlenen hıza ulaşıldığında Labview programı ile kayıt alınmaya başlanmış ve her bir hız değerinde 15-20 saniye kayıt alınmıştır. (3 m/s üzeri hızlarda 12 saniye civarında). Ayrıca deneyler video kamera ile kayda alınmış, akım ve dalga hareketleri incelenmiştir. Her bir deneyden sonra suyun dinlenmesi gözlemlenmiş ve sudaki dalgalanma durduktan sonra yeni deneye geçilmiştir. Deneyler esnasında aynı koşullarda kalınmasına özen gösterilmiş, su sıcaklığı, ölçüm aletlerinin hassasiyeti, alınan dataların süresi parametreleri her bir deney için aynı tutulmaya çalışılmıştır. Her gün sabah ve öğleden sonra deneye başlanmadan önce deney havuzundaki suyun sıcaklığı ölçülmüştür. Levhaların pürüzlülük ölçümleri aynı koşullarda, aynı teknikler ile yapılmıştır.

Asıl deneylere başlanmadan önce, referans olarak seçilen boyasız levha 1, 50 cm draftta (11 cm fribordda) çekilmiş fakat 3 m/s ve üzeri hızlarda dinamometre üzerine su sıçraması tehlikesi nedeniyle daha yüksek bir fribordda çekilmesi gerektiğine karar verilerek tüm deneyler 20 cm fribordda yapılmıştır. Maksimum hız değerinin 4 m/s civarında tutulmasının nedeni de su sıçraması etkisine maruz kalmamak ve dinamometreyi fazla yormamaktır. Deneyler aynı boyutlardaki levhalar ile aynı fribordda, yaklaşık olarak aynı koşullarda (sadece suyun sıcaklığında maksimum 1 °C fark ölçülmüştür) yapılmıştır. Levhaların çekildiği su sıcaklıkları:

Levha 1 ve levha 3 → 14.5°C ; Levha 2 → 15°C ; Levha 4 ve levha 5 → 15.5°C

Aşağıdaki 2 şekil, neden 50 cm draftta deneylere başlanmadığını göstermektedir. Görüldüğü üzere levha üzerine, dinamometre seviyesine kadar sıçrayan su deney

koşullarının sağlıklı olmasına yol açmış ve bu nedenle levhaların daha yüksek bir fribordda çekilmesine karar verilmiştir.



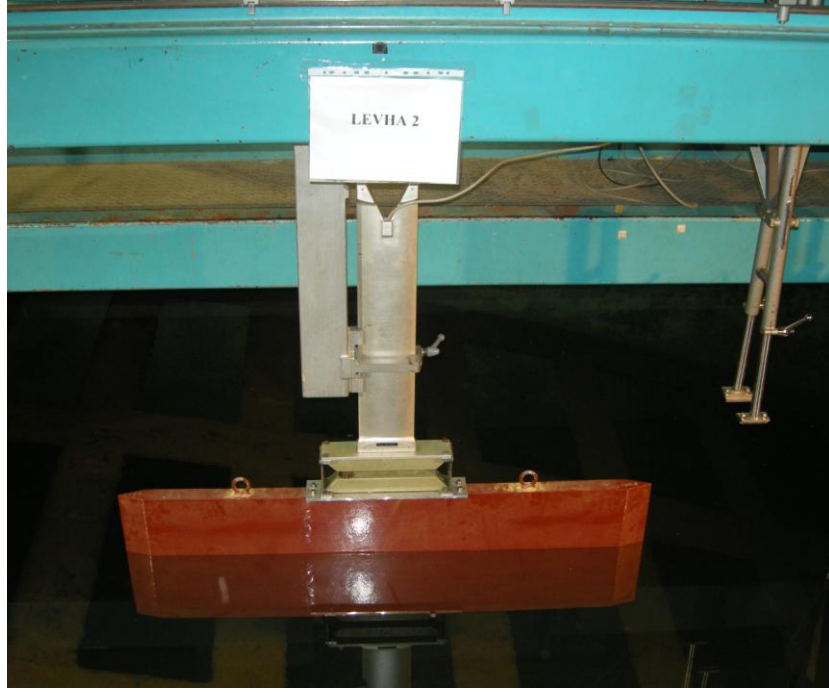
Şekil 6.5 : Levha 1, 50 cm draftta yaklaşık 3.76 m/s hızla çekiliyor.

Aşağıdaki şekilde boyasız alüminyum levha 1'in 41 cm draft (20 cm fribord) değerinde çekilişinden bir resim görülmektedir.



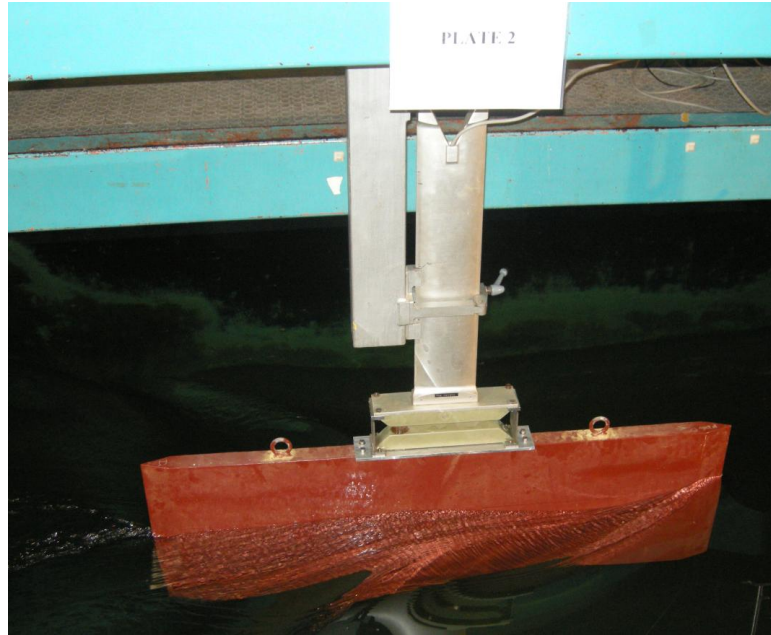
Şekil 6.6 : Levha 1, 41 cm draftta 2 m/s hızla çekiliyor.

Aşağıdaki şekilde levha 2'nin 0.52 m/s hızla çekilmesi deneyi öncesi sıfır alma işlemi sırasında görüntüsü görülmektedir.



Şekil 6.7 : Levha 2'nin 0.52 m/s hızla çekilmesi deneyi öncesi sıfır alma işlemi.

Aşağıda levha 2'nin 2.01 m/s hızla çekilmesine ait resim görülmektedir.



Şekil 6.8 : Levha 2'nin 2.01 m/s hızla çekilmesine ait resim.

6.7 Direnç Deneylerinin Sonuçları ve Hesaplamalar

Toplam direncin viskoz direnç ve dalga yapma direnci bileşenlerinden oluştuğu bilgisi 2. bölümde verilmişti. deneyler sonucu elde edilen toplam direnç katsayısı değerleri, ITU Dawson CFD programı ile hesaplanan Gören, (1990) dalga direnci

katsayısı değerlerinden çıkartılarak viskoz direnç katsayıları elde edilmiştir. Bu viskoz direnç katsayıları da çok düşük Froude sayılarındaki direnç deneyi sonuçları kullanılarak Prohaska yöntemi ile hesaplanan $(1+k)$ form faktörü ile bölünerek sürtünme direnci katsayıları elde edilmiştir. Sonrasında levhaların direnç deneylerindeki şartlarına göre hesaplanan Reynolds sayıları kullanılarak ITTC 1957 formülü ile hesaplanan sürtünme direnci katsayıları ile karşılaştırılmıştır.

6.7.1 Dalga direnci hesabı

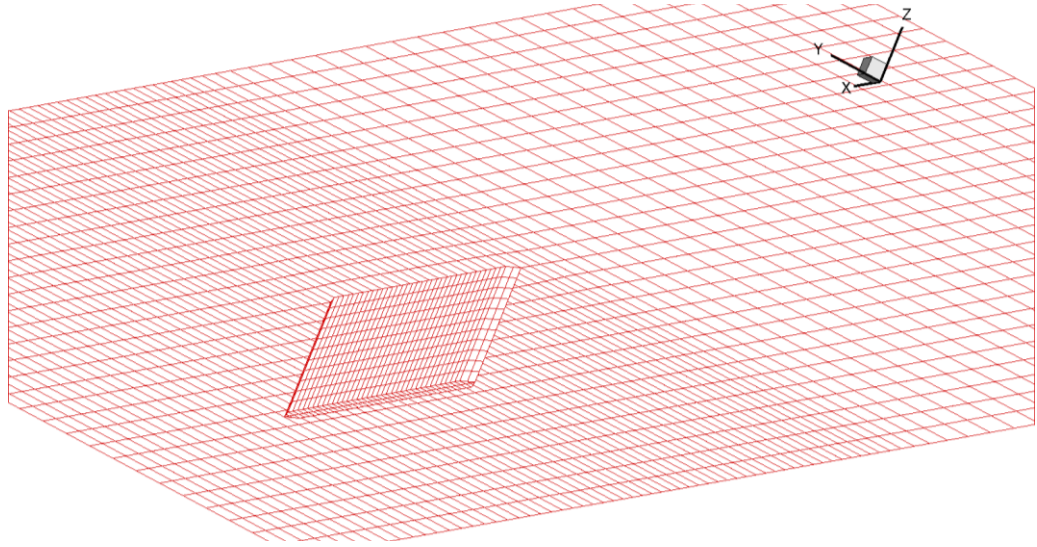
Dalga direncini geminin hareketi sırasında oluşturduğu dalgalar için harcadığı enerji olarak açıklamak mümkündür. Yerçekimi kaynaklıdır ve oluşumunda viskoz etkiler yoktur. Geminin ya da levhanın su yüzeyindeki hareketinde oluşan dalgalar nedeniyle viskoz dirence ek olarak gemi yüzeyinde ek basınçlar doğar. Dalga direnci, bu basınçların hareket yönündeki bileşenlerinin gemi ya da levha yüzeyi boyunca integrasyonu ile bulunur (Aldoğan, 1977). Su yönünde ilerleyen gemi ya da bu çalışmada olduğu gibi levhaya etkiyen bu direnç sürtünme ve viskoz basınç dirençlerine ek bir dirençtir.

Yapılan bu çalışmada geometrik özellikleri aynı olduğundan, dalga direncinin levhaların yüzey özellikleri ile değişmediği, yani deneyde kullanılan 5 levhanın aynı hızları için aynı koşullarda aynı dalga yapma direncine sahip olduğu düşünülmüştür. Fakat deneylerde su sıcaklığı gibi çevresel koşullardaki değişiklikler dalga direnci katsayısı hesaplarında dikkate alınmıştır.

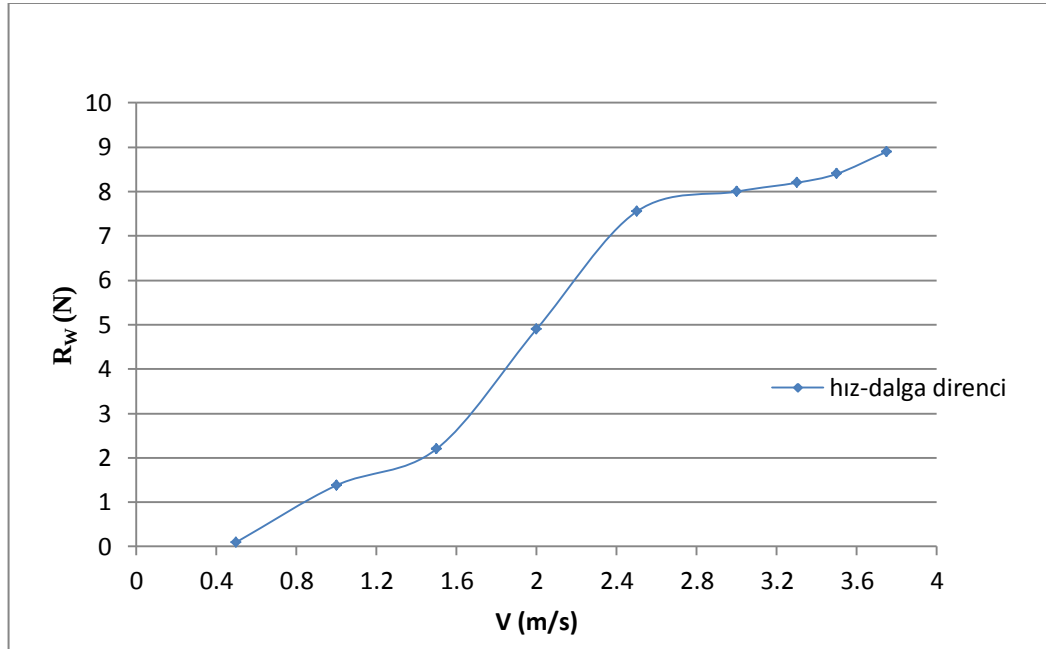
Çalışmada dalga direnci 0.5- 1- 1.5- 2- 2.5- 3- 3.5- 4 m/s hızları için hesaplanmış, sonrasında her bir levhanın çekildiği hızlardaki aralıkları için eğriler çizilerek belirlenmiştir.

Karmaşık ve lineer olmayan yapısı nedeniyle dalga direncini deneysel yollarla belirlemek çok güçtür. Bu sebeple dalga direncini hesaplamak üzere bir takım sayısal yöntemler geliştirilmiştir.

Bu çalışmada incelenen levhaların dalga dirençleri İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi bünyesinde geliştirilen akış çözücü (ITU Dawson) programı ile levhanın ıslak yüzeyi ve serbest su yüzeyi panellenip sabit şiddette kaynak/kuyu dağıtımı yapılarak hesaplanmıştır. Program Hess ve Smith'e ve Dawson teorisine dayanmaktadır (Gören, 1990).



Şekil 6.9 : Levha ve serbest yüzeye dörtgen panel dağıtımı.



Şekil 6.10 : Hesaplanan dalga direnci değerleri.

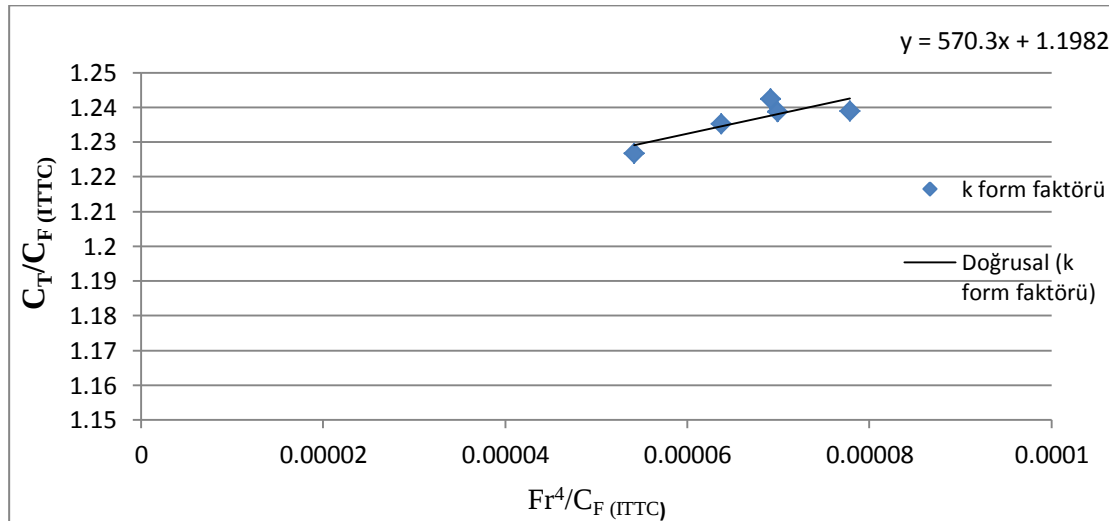
Çizelge 6.7 : ITU Dawson programı ile hesaplanan dalga direnci değerleri.

Hız m/s	Froude sayısı	Dalga direnci N
0.5	0.130	0.1
1	0.261	1.38
1.5	0.391	2.2
2	0.521	4.9
2.5	0.652	7.55
3	0.782	8
3.5	0.912	8.4
4	1.043	9.5

6.7.2 Viskoz direncin hesaplanması

Bölüm 2’de direnç bileşenleri detaylı bir şekilde açıklanmış ve gemi toplam direncinin dalga direnci ile viskoz direncin toplamı olarak veya sürtünme direnci ile artık direncin toplamı olarak kabul edilebileceği ve gemi viskoz direncinin $C_V = C_F(1 + k)$ eşitliği ile bulunabileceği belirtilmişti. Eşitlikteki k form faktörünün bulunmasına yönelik bilgiler yine bölüm 2’de anlatılmış idi. Düşük Froude sayılarında sakin suda hareket eden bir geminin oluşturduğu dalgalar ve dolayısıyla dalga direnci ihmal edilebilir boyuttadır. (Url-2). Böyle bir gemiye etkiyen direncin tamamı viskozite kaynaklıdır. Böylece yapılan direnç deneyinde düşük hızlardaki modelin toplam direnci viskoz dirence eşit olacaktır. Ancak bu çalışmada gemi değil levha söz konusu olduğundan ve levhanın genişliği yüksek olduğundan (50 mm) çok düşük Froude sayılarında bile dalga direnci olacaktır. Form faktörü hesabında bu durum dikkate alınmıştır.

k form faktörü Prohaska yöntemi ile direnç deneylerindeki en düşük Froude sayılarındaki, yani en düşük hızlardaki, değerleri kullanılarak hesaplanmıştır. Düşey ekseninde deneylerden elde edilen toplam direnç katsayısının ITTC 1957 formülü ile hesaplanan sürtünme direnci katsayısına oranı ($C_T/C_{F(ITTC)}$) ve yatay ekseninde Froude sayısının 4. kuvvetinin sürtünme direnci katsayısına oranı ($\frac{Fn^4}{C_{F(ITTC)}}$) değerlerinin oluşturduğu lineer doğru ile hesaplanmıştır.



Şekil 6.11 : Prohaska yöntemi ile k form faktörü hesabı grafiği.

Ayrıca form faktörü hesabı STAR-CCM+ programında da düşük Froude sayıları için hesaplanmış ve sonuç olarak k form faktörü = (1+k)=1.20 alınmıştır.

6.7.3 Sürtünme direnci ve katsayısı hesaplaması

Çalışmada levhaların sürtünme dirençleri ITTC 1957 formülü ile ve deneysel çalışma sonucu hesaplanan direnç değerleri yardımı ile olmak üzere 2 şekilde hesaplanmıştır.

$$C_T = C_w + (1 + k)C_F \quad (6.1)$$

ITTC 1957’de daha önceden de verilen eşitlik:

$$C_F = 0.075/(\log Re - 2)^2 \quad (6.2)$$

6.8 Sürtünme Direnci Karşılaştırması

Deneyler ile hesaplanan toplam dirençten dalga dirençlerinin çıkartılıp form faktörüne bölünmesi ile yani $R_T = R_w + (1 + k)R_F$ eşitliği ile levhaların sürtünme dirençleri hesaplanmıştır. (Bölümün sonunda, levhaların deneysel veriler ile, CFD analizi ile ve ITTC 1957 formülü kullanılarak olmak üzere üç farklı hesaplama ile elde edilen sürtünme direnci katsayıları grafikler halinde verilmiştir).

Çizelge 6.8 : Levha 1’in hıza göre sürtünme direnci.

Levha 1	Hız	Sürtünme direnci
	m/s	N
1	0.54	1.109
2	1.03	2.821
3	1.53	5.277
4	2.06	10.333
5	2.59	14.904
6	3.03	19.206
7	3.36	23.155
8	3.7	28.079
9	3.89	30.640

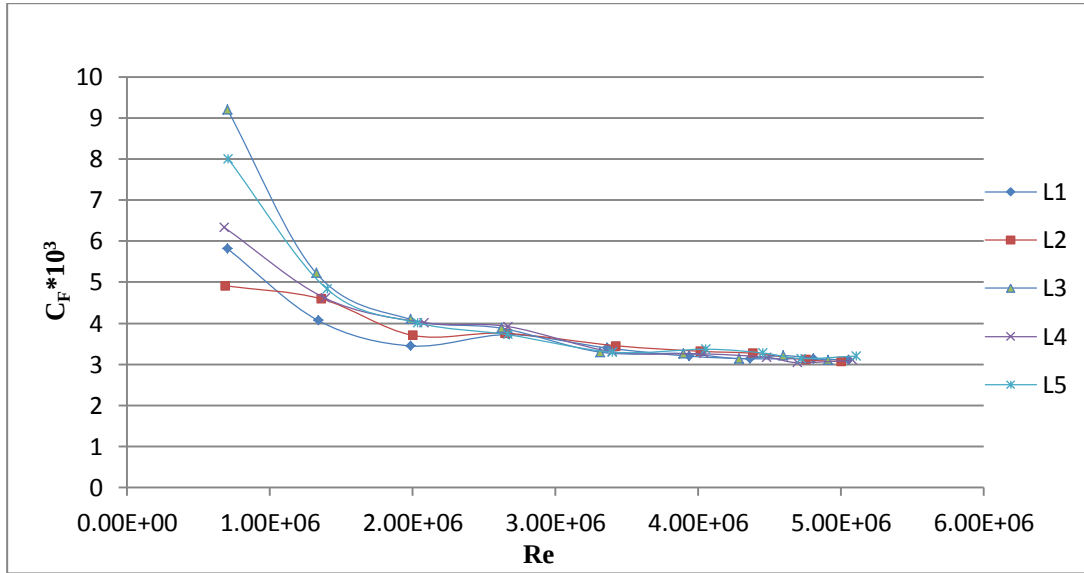
Çizelge 6.9 : Levha 2 ve levha 3’ ün hıza göre sürtünme dirençleri.

Levha 2	Hız	Sürtünme direnci	Levha 3	Hız	Sürtünme direnci
	m/s	N		m/s	N
1	0.52	0.868	1	0.54	1.755
2	1.03	3.188	2	1.02	3.548
3	1.52	5.597	3	1.53	6.267
4	2.01	9.920	4	2.02	10.344
5	2.6	15.264	5	2.55	14.022
6	3.05	20.181	6	3	19.215
7	3.33	23.697	7	3.3	22.348
8	3.61	26.522	8	3.54	26.320
9	3.8	28.951	9	3.78	28.992

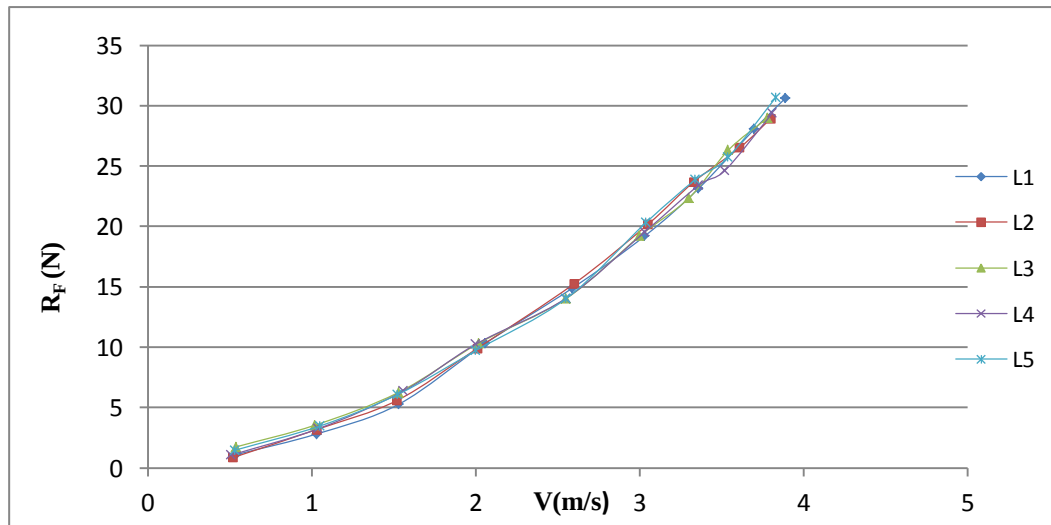
Çizelge 6.10 : Levha 4 ve levha 5' in hıza göre sürtünme dirençleri.

Levha 4	Hız	Sürtünme direnci	Levha 5	Hız	Sürtünme direnci
	m/s	N		m/s	N
1	0.51	1.076	1	0.53	1.469
2	1.04	3.259	2	1.05	3.481
3	1.56	6.387	3	1.525	6.095
4	2	10.25	4	2	9.732
5	2.55	14.051	5	2.55	14.018
6	3.03	19.543	6	3.04	20.347
7	3.36	23.416	7	3.34	23.884
8	3.52	24.639	8	3.54	25.739
9	3.81	29.407	9	3.83	30.691

Sürtünme direnci değerleri incelendiğinde eşit hızlar karşılaştırıldığında 2 m/s ve üzeri hızlarda en yüksek direnç değerlerinin levha 4'e ait olduğu belirlenmiştir.



Şekil 6.12 : Reynolds sayısı-sürtünme direnci katsayısı grafiği.



Şekil 6.13 : Sürtünme direnci-hız grafiği.

6.9 Deney Sonuçlarının Karşılaştırması

Deneyler öncesi de öngörüldüğü gibi levhalar arasında çok büyük direnç farklılıkları hesaplanmamıştır. Bunun sebebi, pürüzlülük yükseklikleri arasındaki farkın çok az oluşu ve levhanın pürüzlülüğün etkisini ön plana çıkartacak şekilde ince olmamasıdır. Ancak, ölçülen toplam direnç değerleri incelendiğinde, levha 4'ün direnç değerlerinin diğer levhaların direnç değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Düşük hızlarda, hızın 2.5 m/s den küçük olduğu bölgede levhalar arasında çok fazla direnç farklılıkları görülmemektedir. Hızın 3.3 m/s den yüksek olduğu bölgede levha 4'teki direncin en yüksek olduğu, en düşük dirence sahip olan levhanın levha 2 olduğu, sonrasında çoktan aza doğru levha 5, levha 1 ve levha 3 şeklinde sıralandıkları belirlenmiştir.

Toplam direnç katsayılarına bakıldığında ise, düşük Reynolds sayılarında, ($5 \cdot 10^5 - 2 \cdot 10^6$) yine levha 4'teki toplam direnç katsayısının diğerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. Levha 3 için de düşük Reynolds sayılarında toplam direnç katsayısının sırasıyla levha 1, levha 5 ve levha 2'den yüksek olduğu görülmektedir. Bu aralıkta levha 3 için toplam direnç katsayısı başta levha 1, levha 5 ve levha 2'den yüksektir, sonrasında levha 1 in direnç katsayısı daha yüksektir. Reynolds sayısının $2.5 \cdot 10^6 - 3.5 \cdot 10^6$ aralığında ise levha 4 ve levha 5'in diğerlerine oranla yüksek toplam direnç katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Reynolds sayısının $3.5 \cdot 10^6$ 'dan yüksek olduğu durumlarda ise toplam direnç katsayısı değerlerinde levha 4 en yüksektir, diğerleri arasında çok fazla fark olmadığı ancak yüksekten düşüğe doğru levha 5, levha 3, levha 1 ve levha 2 şeklinde sıralandığı görülmektedir.

Aşağıda çizelgeler halinde her bir levhanın çekilen her bir hız için Froude sayıları, Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları; onun hemen aşağısında da her bir levhanın direnç deneyleri sonuçları ile hesaplanan toplam direnç katsayısı, dalga direnci katsayısı, viskoz direnç katsayısı, sürtünme direnci katsayısı, artık direnç katsayısı ve deneysel çalışmadan bağımsız olarak ITTC 1957 formülü ile hesaplanan sürtünme direnci katsayısı verilmiştir.

Çizelge 6.11 : Levha 1'in çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 1	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Ölçülen direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.54	0.141	0.702	1.491
2	1.03	0.269	1.338	4.767
3	1.53	0.399	1.988	8.593
4	2.06	0.537	2.676	17.520
5	2.59	0.675	3.365	25.525
6	3.03	0.790	3.936	31.068
7	3.36	0.876	4.365	36.022
8	3.7	0.965	4.807	42.575
9	3.89	1.014	5.054	45.999

Çizelge 6.12 : Levha 1'in direnç katsayıları.

Levha 1	C_T	C_W	C_V	C_F	C_R	C_F (ITTC)
	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$
1	7.823	0.839	6.984	5.819	2.003	5.070
2	6.875	1.991	4.883	4.069	2.806	4.404
3	5.616	1.476	4.139	3.449	2.167	4.059
4	6.316	1.845	4.471	3.725	2.591	3.825
5	5.821	1.742	4.079	3.399	2.422	3.659
6	5.177	1.336	3.841	3.200	1.977	3.552
7	4.881	1.116	3.765	3.137	1.744	3.483
8	4.758	0.992	3.765	3.137	1.620	3.421
9	4.650	0.933	3.717	3.097	1.553	3.390

Çizelge 6.13 : Levha 2'nin çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 2	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Ölçülen direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.52	0.136	0.685	1.177
2	1.03	0.269	1.356	5.209
3	1.52	0.396	2.001	8.956
4	2.01	0.524	2.646	16.824
5	2.6	0.678	3.423	25.967
6	3.05	0.795	4.015	32.245
7	3.33	0.868	4.384	36.669
8	3.61	0.941	4.752	40.407
9	3.8	0.990	5.0024	43.811

Çizelge 6.14 : Levha 2'nin direnç katsayıları.

Levha 2	C_T *10 ³	C_W *10 ³	C_V *10 ³	C_F *10 ³	C_R *10 ³	$C_{F(ITTC)}$ *10 ³
1	6.661	0.763	5.897	4.914	1.747	5.098
2	7.512	1.994	5.518	4.598	2.914	4.392
3	5.931	1.483	4.448	3.706	2.225	4.053
4	6.371	1.863	4.508	3.756	2.615	3.834
5	5.877	1.731	4.146	3.454	2.422	3.647
6	5.303	1.320	3.983	3.319	1.984	3.538
7	5.059	1.135	3.923	3.269	1.790	3.480
8	4.744	1.007	3.737	3.113	1.630	3.428
9	4.641	0.960	3.681	3.067	1.574	3.396

Çizelge 6.15 : Levha 3'ün çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 3	Hız m/s	Froude sayısı	Reynolds sayısı *10 ⁶	Ölçülen direnç N
1	0.54	0.141	0.702	2.266
2	1.02	0.266	1.325	5.640
3	1.53	0.399	1.988	9.780
4	2.02	0.527	2.624	17.353
5	2.55	0.665	3.313	24.446
6	3	0.782	3.897	31.058
7	3.3	0.860	4.287	35.051
8	3.54	0.923	4.599	40.064
9	3.78	0.985	4.9106	43.811

Çizelge 6.16 : Levha 3'ün direnç katsayıları.

Levha 3	C_T *10 ³	C_W *10 ³	C_V *10 ³	C_F *10 ³	C_R *10 ³	$C_{F(ITTC)}$ *10 ³
1	11.889	0.839	11.049	9.207	2.681	5.070
2	8.294	2.032	6.262	5.218	3.076	4.413
3	6.392	1.476	4.915	4.095	2.296	4.059
4	6.506	1.852	4.654	3.878	2.628	3.840
5	5.752	1.792	3.959	3.298	2.453	3.670
6	5.279	1.359	3.920	3.266	2.013	3.558
7	4.924	1.156	3.767	3.139	1.784	3.495
8	4.891	1.035	3.856	3.213	1.678	3.449
9	4.690	0.965	3.725	3.104	1.587	3.408

Çizelge 6.17 : Levha 4'ün çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 4	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Ölçülen direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.51	0.133	0.680	1.422
2	1.04	0.271	1.387	5.295
3	1.56	0.407	2.081	9.985
4	2	0.521	2.668	17.202
5	2.55	0.665	3.401	24.467
6	3.03	0.790	4.042	31.472
7	3.36	0.876	4.482	36.335
8	3.52	0.918	4.695	38.007
9	3.81	0.993	5.0821	44.379

Çizelge 6.18 : Levha 4'ün direnç katsayıları.

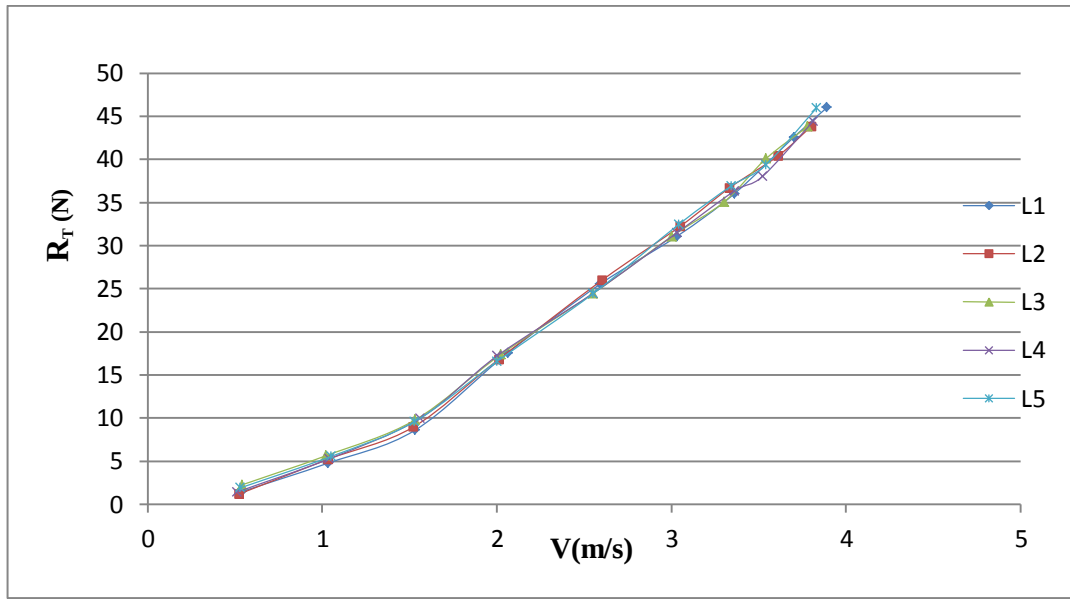
Levha 4	C_T	C_W	C_V	C_F	C_R	$C_{F(ITTC)}$
	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$
1	8.367	0.764	7.602	6.335	2.037	5.105
2	7.491	1.957	5.533	4.610	2.880	4.371
3	6.278	1.458	4.819	4.015	2.262	4.022
4	6.580	1.874	4.706	3.921	2.659	3.828
5	5.757	1.789	3.968	3.306	2.451	3.652
6	5.245	1.336	3.909	3.257	1.988	3.534
7	4.925	1.116	3.808	3.173	1.751	3.466
8	4.694	1.042	3.651	3.042	1.651	3.436
9	4.677	0.958	3.720	3.099	1.578	3.386

Çizelge 6.19 : Levha 5'in çekildiği hızlardaki dirençleri, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

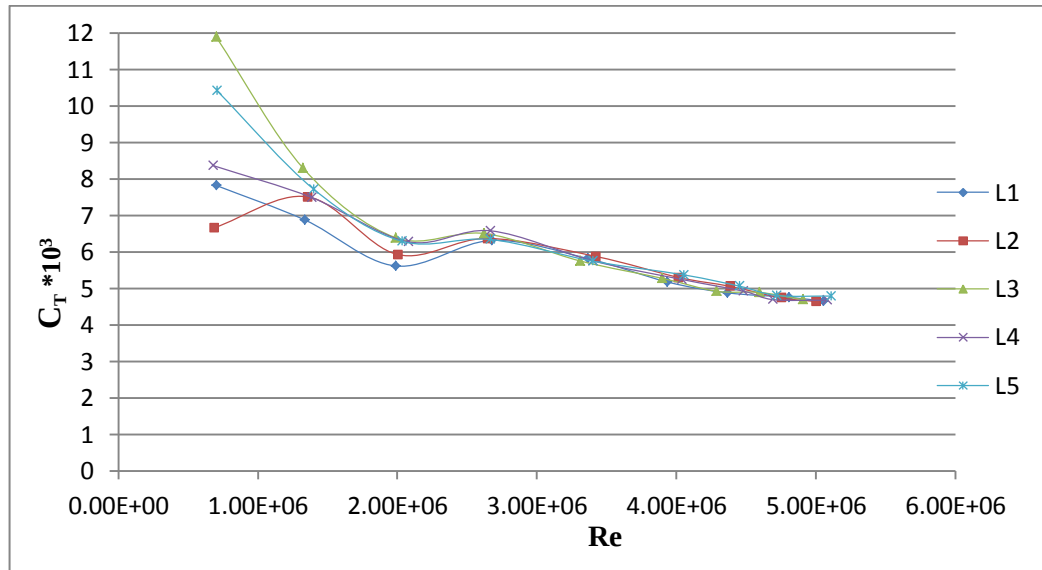
Levha 5	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Ölçülen direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.53	0.138	0.707	1.912
2	1.05	0.274	1.401	5.562
3	1.525	0.398	2.034	9.564
4	2	0.521	2.668	16.578
5	2.55	0.665	3.401	24.426
6	3.04	0.792	4.055	32.441
7	3.34	0.871	4.455	36.895
8	3.54	0.923	4.722	39.367
9	3.83	0.998	5.109	45.940

Çizelge 6.20 : Levha 5'in direnç katsayıları.

Levha 5	C_T *10 ³	C_W *10 ³	C_V *10 ³	C_F *10 ³	C_R *10 ³	$C_{F(ITTC)}$ *10 ³
1	10.420	0.817	9.603	8.002	2.418	5.061
2	7.719	1.922	5.797	4.831	2.888	4.362
3	6.293	1.480	4.813	4.010	2.282	4.040
4	6.342	1.874	4.467	3.722	2.619	3.828
5	5.748	1.789	3.958	3.298	2.449	3.652
6	5.371	1.328	4.043	3.368	2.002	3.532
7	5.060	1.129	3.931	3.275	1.785	3.470
8	4.807	1.035	3.771	3.142	1.664	3.432
9	4.792	0.950	3.842	3.201	1.591	3.383



Şekil 6.14 : Hız- R_T ölçülen toplam direnç karşılaştırması.



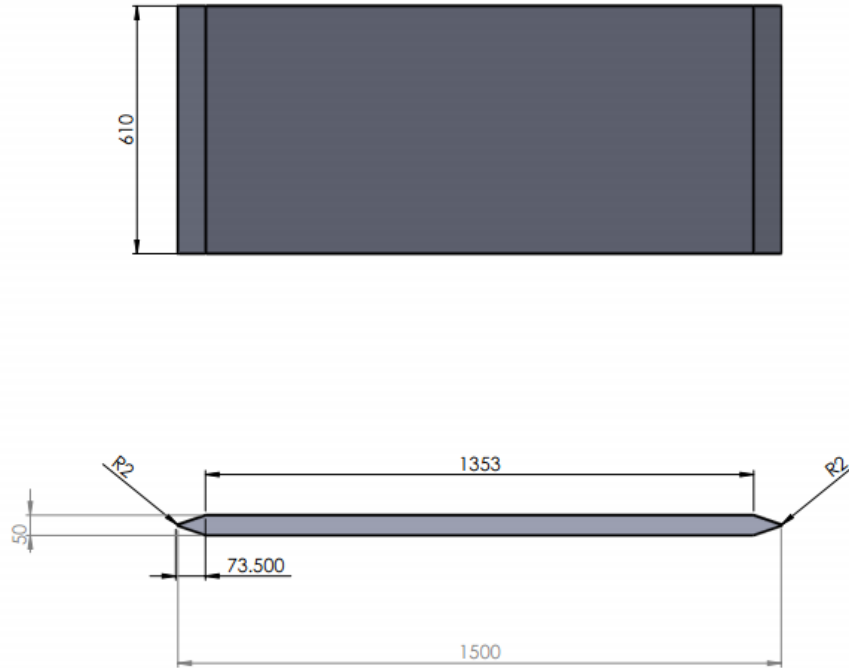
Şekil 6.15 : Reynolds sayısı-Toplam direnç katsayısı C_T grafiği.

7. SAYISAL HESAPLAMA

Çalışmanın bu kısmında STAR-CCM+ programı ile yapılan modelleme çalışmasından elde edilen sonuçlar verilecek ve yorumlanacaktır.

7.1 Çözüm Geometrisinin Oluşturulması

Çözüm için ilk önce deneyde yapılan işlemlerin bilgisayar ortamında modellenmesi gerekmektedir. Alüminyum levhaların çizim işlemleri Solidworks 2010 programında yapılmıştır. Şekil 7.1’de alüminyum levha modellerinin teknik resmi görülmektedir.



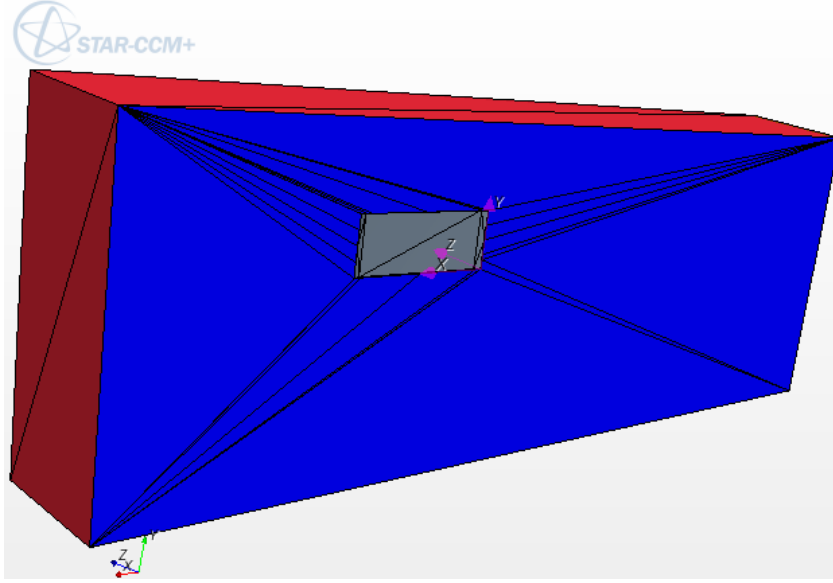
Şekil 7.1 : Alüminyum levha boyutları.

Alüminyum levha solidworks programında çizildikten sonra STAR-CCM+ programında import edilerek deney havuzu ve levhadan oluşan katı model için akış modellemesi ve sonrasında mesh için hazır hale getirilmiştir.

Modelleme işleminde levhaların boyutları gerçek değerleri ile birebir aynı alınmıştır. Deney havuzu ise 11.25 m boyunda, 2.61 m genişliğinde ve 3.65 m derinliğinde modellenmiştir. Levha havuzun önden 2.75 m, kıçtan ise 7 m arasına monte

edilmiştir. Hava kısmı 1.1 m, su kısmı ise 2.55 m derinliğe sahiptir. CFD hesaplarında deneysel hacmin küçültülerek alınmasının sebebi bilgisayarda gereksiz işlem yükünden kurtulmak, daha kısa sürede aynı sonuçları elde etmek içindir (Khor ve Xiao, 2011).

Aşağıdaki şekilde STAR-CCM programında modelin (deney tankı ve levha) mesh atılmadan önceki son hali görülmektedir.

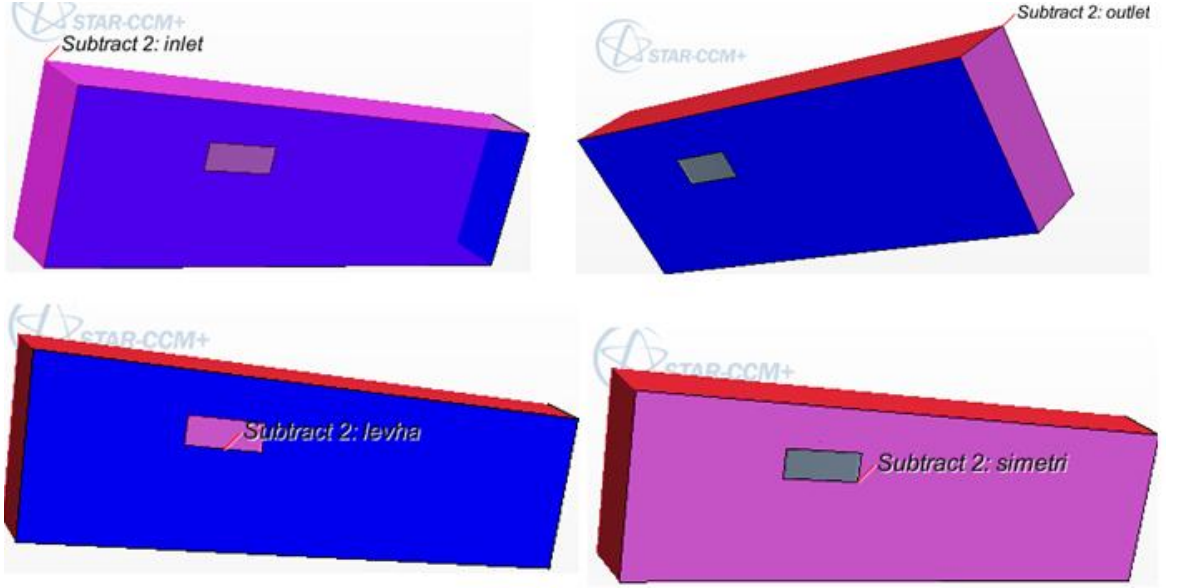


Şekil 7.2 : Deney tankı ve levhanın mesh atılmadan önceki görüntüsü.

Geometri STARCCM+ programına atıldığında yüzeyler tanımlanmamıştı. Levhaların bir bölümü su, bir bölümü de hava ortamındadır. Deney modelinin yüzeyleri farklı özelliktedir. Bu nedenle yüzeyler aşağıdaki şekil 7.3'teki gibi isimlendirilerek tanımlanmıştır. Deney tankının alt, üst ve akımın geldiği yüzeyler inlet olarak, akışın çıktığı yüzey outlet, alüminyum plaka levha, simetri yüzeyi de simetri olarak isimlendirilmiştir. Şekil 7.3'te pembe renkli kısımlar bu yüzeylerdir ve subtract 2 komutu ile gösterilmiştir.

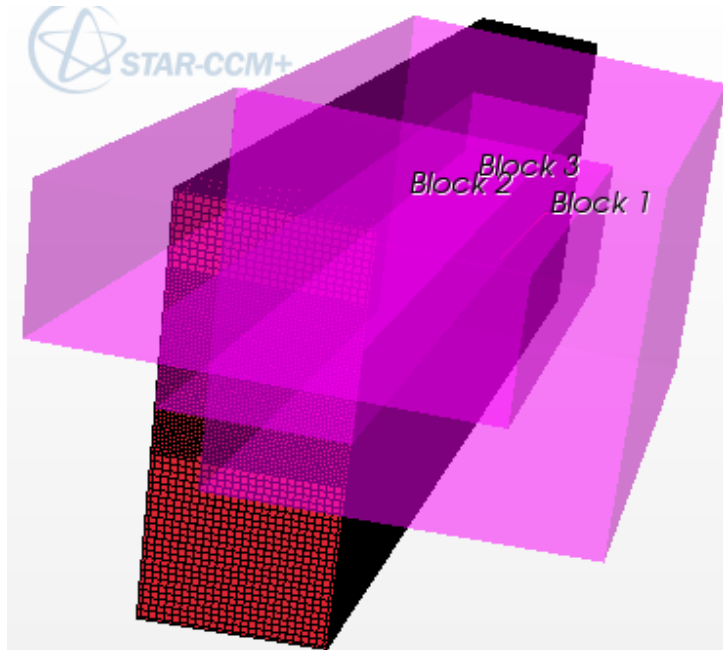
Yüzeyler isimlendirildikten sonra her bir yüzey üzerine gelinerek yüzeylerin uygun sınır koşullarına göre ayarlanması gerekmektedir. Sırasıyla, inlet isimli yüzey velocity inlet, outlet isimli yüzey pressure outlet, levha isimli yüzey wall, simetri isimli yüzey symmetry plane olarak ayarlanmıştır. Sonrasında çözüm ağı modelleri "continua-mesh1-models" adımları ile Surface Remesher, Trimmer ve Prism Layer Mesher olarak belirlenmiştir. Surface remesher homejen yüzey meshleri oluşturulmasına, trimmer köşelerdeki fazla meshlerin trimlenmesine yaramaktadır.

Prism layer mesher ile levhanın dört bir tarafına 12 adet pirizma tabakası atılmış ve bu sayede akış sırasında oluşan sınır tabaka etkilerini görebilmek ve düşük y^+ değerlerine inmek mümkün olmuştur.



Şekil 7.3 : Geometrinin yüzey isimlendirmeleri.

Yüzeylerde levhanın üst ve alt kısımlarının, sınır tabaka hattının kısacası mesh kalitesinin çok önemli olduğu bölgelere daha sık mesh atabilmek için 3 adet blok (volumetrik control) oluşturulmuştur. Aşağıdaki şekilde oluşturulan 3 blok görülmektedir.



Şekil 7.4 : Daha kaliteli mesh atabilmek için oluşturulan bloklar.

7.2 Mesh'in Oluşturulması

Meshin istenilen kalitede olmaması, genellikle çözüm zamanını çok fazla artırmaz hatta seyrek mesh atıldıysa çözüm zamanı kısılır fakat meshin gereken sıklıkta olmaması çözümün doğrulukunu ve efektifliğini doğrudan etkiler. Genel bir pencereden bakarsak, meshin kaliteli oluşunu şunlar belirler:

- Mesh yoğunluğu: çözüm için kullanılan model ve akış özelliklerine uygun mesh sıklıkta mesh atılması gerekmektedir.
- Mesh dağılımı: yüksek ve düşük gradyanlı bölgelerde mesh dağılımı farklı olmalıdır. Örneğin buradaki çözümde levha üzerinde ve levhaya yakın bölgede mesh sıklığı, modelin kalan kısmından çok daha yoğundur.
- Yakın duvar tabakaları (near wall layers): seçilen türbülans modeli, çözümün hassasiyeti, ısı transferi vb. etkilerin çözümde yer alması açısından meshin yakın duvar tabakaları içermesi gerekmektedir. Bu çalışmada bu maddenin yerine getirilmesi için levhanın (akışın) hareket doğrultusunda, levha üzerine ve levha etrafına çok düzgün, orantılı ve sık dörtgen (küp) mesh atılmış, kenar tabaka etkilerinin görülebilmesi için levha etrafına levhadan uzaklaştıkça büyüyen 12 adet prizma tabakası oluşturulmuştur.

Hücreler arası seviyede ise aşağıdaki kriterler mesh oluşturulurken dikkate alınmıştır:

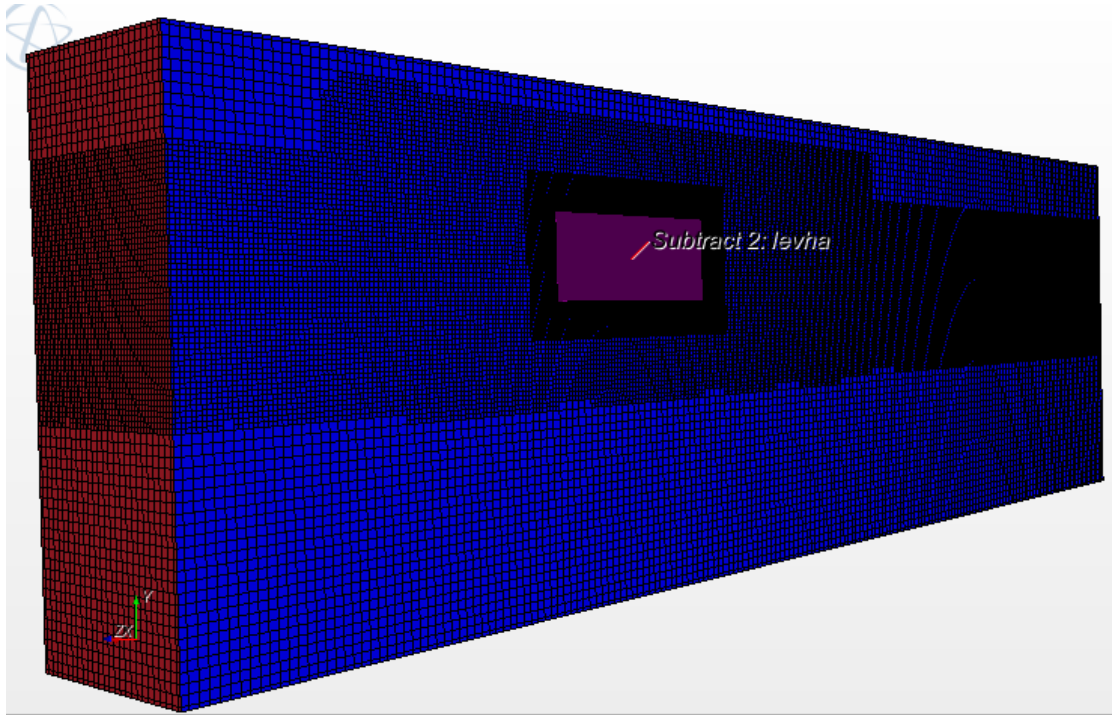
- Umulan akış rejimi için hücrelerin en-boy oranının (aspect ratio) doğru olması gerekir. Çalışmada çoğunlukla kare mesh atılmaya çalışılmıştır.
- y^+ aralığı. y^+ değerlerinin seçilen türbülans modellerine uygun olması gerekmektedir.
- Hacim oranı. Hücrelerin hacmi ile onlara komşu hücrelerin hacimleri arasında bir ahenk olmalı, hacimler birden büyüüp küçülmemelidir.
- Çalıklık açısı (skewness angle). Hücre çalıklık açıları çok büyük olmamalıdır.

Oluşturulan model boyutlarına ve elde edilmesi istenilen çözüme uygun şekilde çözüm ağı oluşturulması hem genel mesh özelliklerinin belirlendiği ‘‘continua-reference values’’ adımıdan, hem oluşturulan 3 adet volumetrik kontrol için, hem de inlet, outlet, levha ve simetri yüzeyleri için ayrı ayrı temel boyut, (base size), maksimum hücre boyutu (maximum cell size), relatif boyut (relative size), prizma tabakası sayısı (number of prism layers), prizma tabakası büyümesi (prism layer

stretching), prizma tabakası kalınlığı (prism layer thickness), yüzey eğrilik derecesi (surface curvature), yüzey büyüme oranı (surface growth rate), yüzey boyutları (surface sizes) vb. mesh durumları ve mesh değerleri oluşturulması gereken mesh özelliklerine göre yoğun çalışmalar sonucu çözüme uygun şekilde belirlenmiştir.

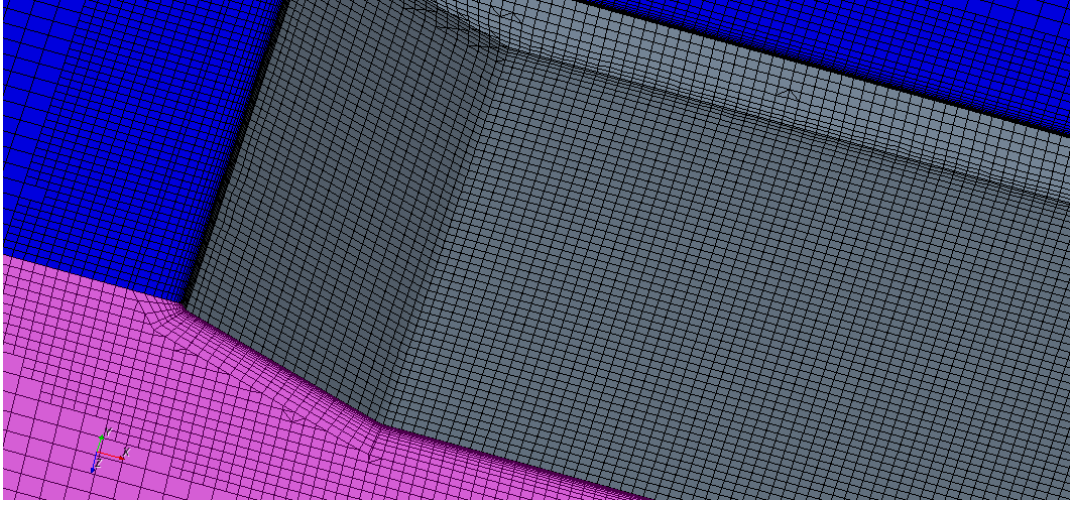
Çalışmanın mesh atma aşamasında pek çok deneme yapılmıştır. Atılan meshe göre diğer özellikler atanıp çözümleme yapılmış, sonuçlara göre mesh'te düzeltmelere gidilmiştir. Çözüm geometrisine ilk önce 6,552,187 hücre ve 19,654,681 yüzeyden oluşan mesh atılmıştır. Bu çözüm ağı ile birkaç çözümleme yapılmış, sonrasında çözümleme süresinin çok uzun olması ve hücre sayısının bu kadar fazla olmasının çözüme pek fazla olumlu katkı yapmayacağı ön görülerek (grid independence) hücre sayısı azaltılmıştır. Sonuç olarak 2,895,796 hücre ve 8,672,873 yüzeyden oluşan çözüm modeli oluşturulmuştur. Bu yeni çözüm ağı ile yapılan çözümlemenin ilk çözüm ağı ile yapılandan çok daha kısa sürede yaklaşık aynı sonuçları vermesi sebebi ile tüm levhalar için tüm hızlarda bu çözüm ağı kullanılmıştır.

Aşağıdaki şekilde çözüm modeline mesh atıldıktan sonraki hali görülmektedir.

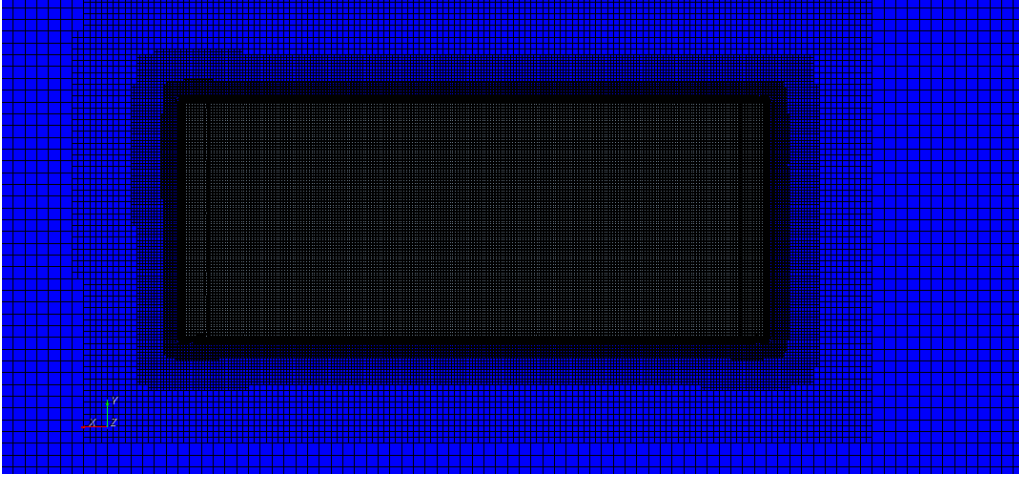


Şekil 7.5 : Çözüm modelinin meshlenmiş hali görülmektedir.

Yukarıdaki şekilden de görüleceği üzere levhanın üzerine ve levhaya yakın akışkan bölgesine çok sık mesh atılmıştır. Doğru sonuçlar alabilmek için özellikle serbest yüzey bölgesinde meshlerin sıklığı çok fazladır. y^+ değerine göre mesh'te düzenlemeler yapılmıştır.



Şekil 7.6 : Levhanın suya girdiği kısımdaki prism layerlar ve mesh yapısı.



Şekil 7.7: Levhaya yakın bölgeye ve levhanın kendisine doğru giderek sıklaşan mesh.

7.3 Çözümün Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Akışkan özellikleri hava ve su için STARCCM+ programının fiziksel koşullar kısmında her bir deney ile aynı koşullarda olacak şekilde aynı sıcaklık, yoğunluk, viskozite değerlerinde ayarlanmıştır.

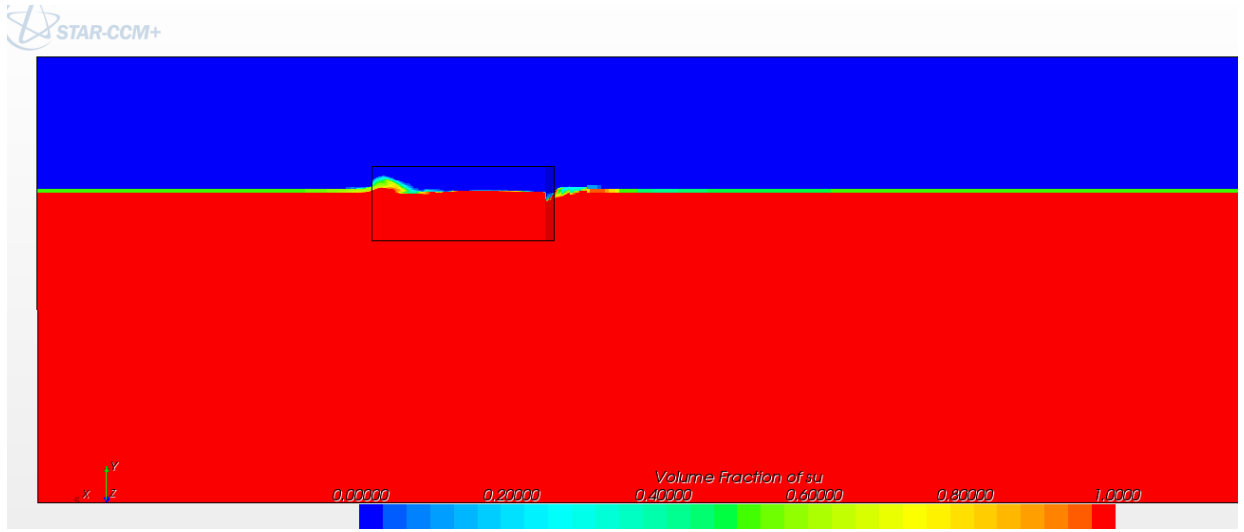
Deney sırasında levhalar iki farklı akışkan ortamındadır. (hava ve su). Bu yüzden sayısal hesaplama da deney koşulları ile aynı şekilde hava ve su ortamı birlikte modellenerek yapılmıştır. Volume of Fluid (VOF) yöntemi ile, bir diğer adı ile interface-capturing method (arayüz yakalama yöntemi), hava ve su olmak üzere iki farklı sıvı etkisi analizlerde yer almıştır. Bu yöntemde grid uzayda sabitlenmiştir ve serbest yüzeyin lokasyonunun etkileri ilave bir transport denklemi çözerek

gerçekleştirilir. Serbest su yüzeyi etkilerinin de analizlerde yer alması sonuçların gerçek deney sonuçları ile bu denli yakın çıkmasında etkilidir.

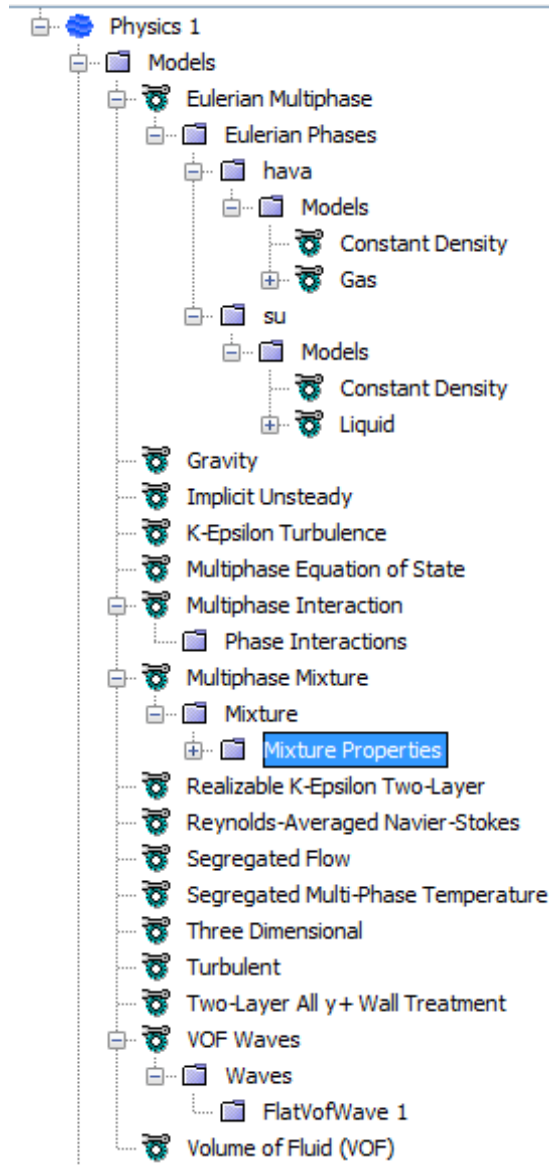
Bir yüzey üzerinde $Rn > 5 \cdot 10^5$ ise akım laminardan türbülanslıya geçmeye başlamıştır. $Rn > 1 \cdot 10^6$ ise akım kesinlikle türbülanslıdır. Deney sonuçlarından da görülebileceği üzere Reynolds sayısının en düşük hız değerinde bile $1 \cdot 10^6$ 'ya yakın bir değerde olması akımı türbülanslı bölgeye sokmaktadır. Bundan dolayı oluşturulan sistemde akış türbülanslı kabul edilmiştir.

Çözüm ağı oluşturulduktan sonra fiziksel şartlar belirlenmiştir. İlk önce çözüm üç boyutlu (three dimensional) tanımlanmıştır. Euler çok fazlı (Eulerian Multiphase) komutu kullanılarak tıpkı gerçek deney ortamındaki gibi levhanın draft değerinden olmak üzere çözüm modeli 2 fazlı akışkan ortamına (hava ve su) alınmıştır. Buradan hava ve suyun fiziksel özellikleri deneyler ile aynı değerlerde olacak şekilde girilmiştir. Yerçekimi etkisi gravite (gravity) komutu ile -y ekseninde verilmiştir. Deney koşulları aslında zamana göre değişmeyen (steady) durum için çözümlenebilir. Ancak VOF yöntemi kullanılarak iki farklı akışkan modellendiği için onların zamana göre etkileşimlerinin ihmal edilmesi sonuçlardaki hata oranını artıracaktır. Ayrıca STAR-CCM+ programında iki farklı faz akışı durumunda zamanla değişen çözüm uygulanması gerekmektedir. Bu yüzden zaman olarak implicit unsteady verilmiş ve zaman adımları ile durdurma kriterleri (maksimum iç iterasyon, maksimum fiziksel zaman, zaman adımı) çözüme uygun şekilde belirlenerek girilmiştir. Çözümleme türbülanslı akışta kabul edilmiştir. Bu yüzden viskoz rejimi türbülanslıdır. (turbulence). Reynolds ortalama türbülans (Reynolds averaged turbulence) modeli olarak K-Epsilon turbulence seçilmiştir. (K-Epsilon two layer all y^+ wall treatment). Bu seçenekler seçildiğinde Reynolds ortalama Navier-Stokes denklemlerine göre çözüm yapılması (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ve Gerçeklenir K-Epsilon iki tabaka (Realizable K-Epsilon two-layer) seçemeleri otomatik olarak program tarafından atanmaktadır. Seçilen türbülans modeli $k-\epsilon$ ve çözüm denklemleri ile ilgili detaylı açıklama ilerleyen sayfalarda verilmiştir. Çok fazlı durum denklemi (multiphase equation of state) ve çok fazlı etkileşim (multiphase interaction) seçenekleri programın kendi ayarlarında (default) olarak bırakılmıştır. Çok fazlı karışım (multiphase mixture) sekmesinde akışkanların özellikleri (dinamik viskozite, belirli sıcaklık, ısı iletim katsayısı, türbülans Prandtl sayısı) girilmiştir. Çok fazlı akışlarda akış türü ayrılmış akım (segregated flow)

alınmaktadır. Segregated flow modeli akış denklemlerini (her bir hız ve basınç bileşeni için bir tane) ayrıklaştırarak çözer. Momentum ve süreklilik denklemleri arasındaki bağlantı bir öngörme-düzeltilme yöntemi (predictor-corrector) ile sağlanır. Sıkıştırılamaz akışlarda, ısı transferinin önemsiz olduğu akışlarda, yoğunluk, viskozite gibi değerlerin çözüm sırasında anlık sıcaklık değişimlerinden etkilenmediği kabul edilen durumlarda segregated flow tercih edilmektedir. Hava ve suyun sıcaklıkları farklı olduğundan ayrılmış çok fazlı ısı derecesi (segregated multiphase temperature) seçilmiştir.



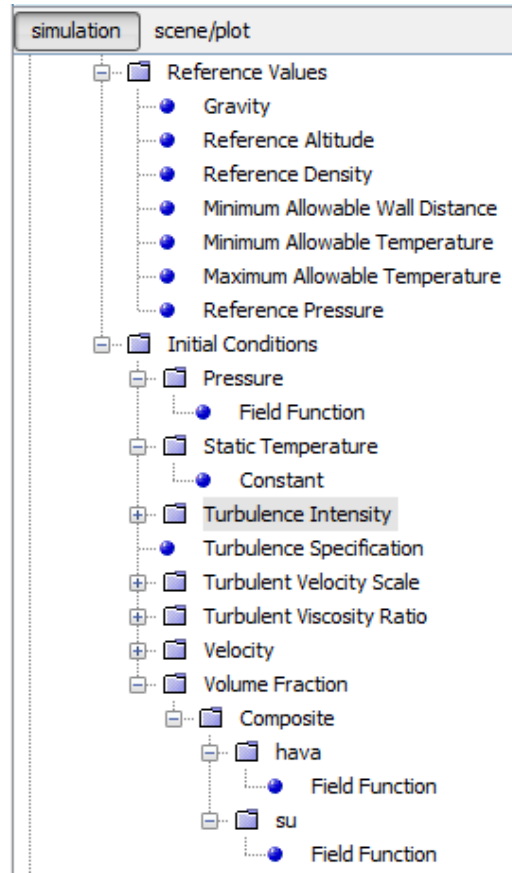
Şekil 7.8 : Levha 2'nin deney havuzunda 2 m/s hızla ilerlemesinin gösterimi.



Şekil 7.9 : Belirlenen fiziksel koşullar.

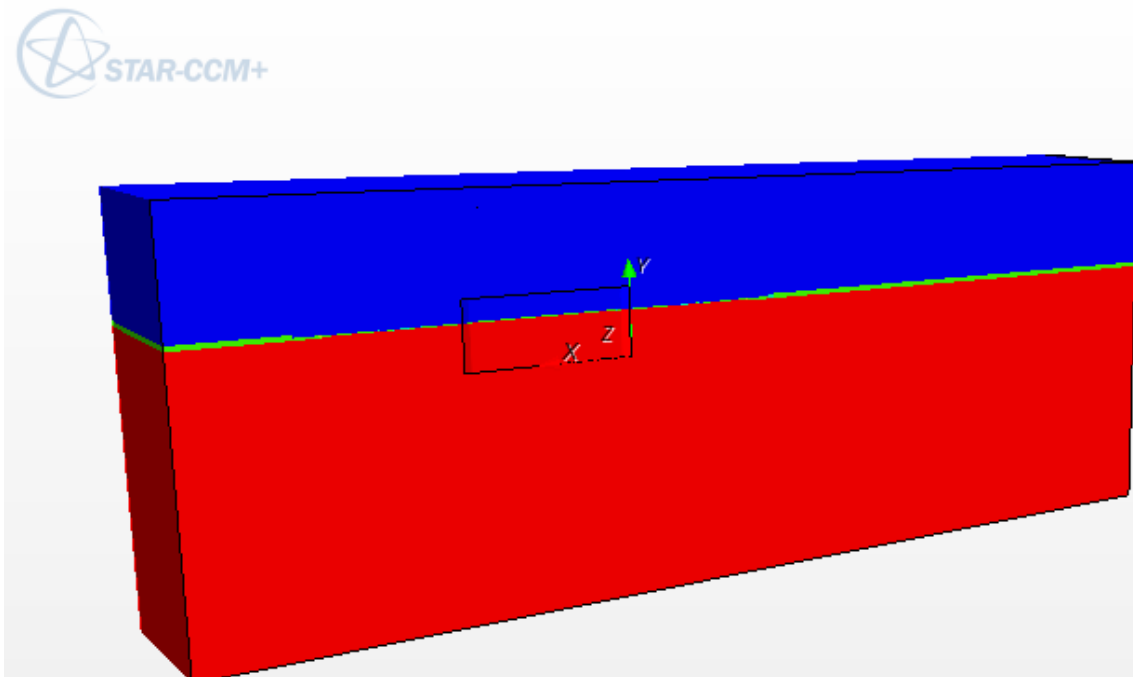
Yukarıda da bahsedildiği gibi akışta serbest yüzey etkilerinin sonuca dahil edilmesi için akışkan hacmine (volume of fluid) göre çözümleme benimsenmiş ve bu da düz dalgalar (flat to wave) ile çözüme aktarılmıştır. Yani çözümlemede iki akışkanın (hava ve su) levhaya düz dalgalar halinde gelmekte olduğu modellenmiştir. FlattoWave kısmından akışkanların özellikleri (su ve havanın seviyeleri, akış yönü, hava ve suyun hızları ve yoğunlukları girilmiştir.

Sonrasında analizler için referans değerleri ve başlangıç koşulları girilmiştir.



Şekil 7.10 : Çözüm modellerinin referans değerleri ve başlangıç koşulları.

Aşağıdaki şekilde modelin 2 fazlı akışkan (hava ve su) ortamındaki görüntüsü görülmektedir.



Şekil 7.11 : Çözüm modelinin hava ve su ortamlarına ayrılması.

7.4 Çözümün Doğru Kabul Edilmesi (Yakınsaması) İçin Gözönünde Bulundurulananlar

Her çözümün yakınsama kriterleri çözüm amacına göre değişkenlik gösterir. Programda zamana göre değişen (implicit unsteady) akış tanımlandığından, residü (residual) değerlerinin yakınsamasına göre değerlendirme yapmak yanlış olacaktır. Mevcut çözüm için yakınsama kriterlerimiz toplam direnç değerlerinin deney ile tutarlılık göstermesi ve belirli iterasyon sayısından sonra değişiminin 0.01 ve altında olması ve y^+ değerleridir. Toplam direnç değerlerinin belli bir iterasyon adımından sonra artık değişmediği daha doğrusu değişmiyor kabul edildiği kısımda çözüm durdurulabilir. Bu sayı akış hızına göre değişkenlik gösterse de, yapılan analizlerde en düşük iterasyon sayısı 1700'dür. Bununla birlikte, düşük hızlarda deneysel sonuçlara en yakın sonucun 1400-1500 iterasyon arasında yakalandığı belirlenmiştir. Hesaplama sınır tabaka etkilerini görebilmek için sınır tabakanın duvara çok yakın olan viskoz alt tabakada işlem yapılması gerekmektedir. Bu sebeple duvara en yakın olan ilk hücrenin merkezinin duvara mesafesini boyutsuz olarak gösteren y^+ değerinin 5'ten küçük olması gerekmektedir. y^+ değerine göre hangi türbülans modelleriyle işlem yapılacağı belirlenmiştir. Analiz sonuçlarında levhalarda hava ile suyun birleştiği bölgedeki y^+ değerleri çoğunlukla 1 ile 7 arasında olduğu belirlenmiştir.

Y^+ hakkında bilgiler

y^+ değeri daha önceden de verildiği üzere ilk grid noktasının merkezi ile duvar (levha) arasındaki boyutsuz mesafedir. Çözümde kenar tabaka etkilerini görmek isteniyorsa veya burada olduğu gibi yüzeydeki çok küçük değişikliklerin etkisinin sonuca nasıl etki ettiği görülmek isteniyorsa y^+ değeri küçük olmalıdır. y^+ değerine göre sınır tabakanın hangi bölgesine kadar inildiği belirlenmekte, sınır tabakanın neresinde kalındığına göre türbülans modeli vs. belirlenmelidir. 3. bölümde de verildiği üzere $y^+ \leq 5$ ise lineer alt tabaka, $5 < y^+ < 30$ ise tampon bölge, $30 \leq y^+ \leq 800$ ise log-law (logaritmik hız) bölgesindedir. Çalışmada levha gibi basit bir geometri için çözümleme yapıldığından y^+ değerleri tampon bölgede olsa dahi sonuçlardaki hata oranı düşük çıkacaktır. Normalde gemi gibi karmaşık geometrilerde y^+ değerinin tampon bölgede olmasından kaçınılmalıdır. Bunun sebebi, hiçbir türbülans modeli için bu bölgede çözüm yapılamamasıdır.

7.5 Matematiksel Model

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği (CFD) analizlerinde doğru sonuçlar almak için en önemli parametrelerden birisi hiç kuşkusuz seçilen türbülans modelidir. Unutulmamalıdır ki her akış simülasyonu için tek bir türbülans modeli kullanılamaz. Modellenen durum, alınmak istenen sonucun hassasiyeti, akışkan özellikleri vb. pek çok parametreye göre çözümde hangi matematiksel denklemlerin ne şekilde kullanılacağını belirleyen türbülans modeli seçilir. Bununla birlikte, türbülanslı akış tam olarak tanımlayabilmek engin bilgi ve tecrübe gerektirmektedir.

STAR-CCM+ programında türbülans modelleyen 3 temel yaklaşım kullanılmaktadır: RANS denklemleri, LES ve DES. Bu çalışmada 3. bölümde de bahsedildiği üzere RANS denklemleri ile çözüm yapılmıştır.

STARCCM+ programında serbest yüzey akışının matematiksel tanımı homojen çok fazlı (Eulerean Multiphase) akışkan yaklaşımı ile yapılır. Bu yaklaşımda hava ve su aynı hız alanı (velocity field), sıcaklık, türbülans vb. diğer ilgili alanları paylaşır ve belirgin bir arayüz ile ayrılmışlardır. Unsteady, viskoz, sıkıştırılamaz akışkan hareketini tanımlayan yerel denklemler Navier-Stokes denklemleridir.

Reynolds Ortalamalı Navier Stokes denklemlerini elde etmek için anlık hız ve basınç ortalama değer ve kararsız değer (fluctuating) bileşenlerine ayrılır.

Navier-Stokes denklemlerinin bir formu:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_i} = 0 \quad \text{kütlenin korunumu} \quad (7.1)$$

$$\frac{\partial \rho v_i}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j v_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial p}{\partial x_i} = 0 \quad \text{momentumun korunumu} \quad (7.2)$$

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j E)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} v_i) \quad \text{conservation of energy} \quad (7.3)$$

$$\text{Newton tipi akışkan: } \tau_{ij} = \mu \left[\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial v_k}{\partial x_k} \right] \quad (7.4)$$

3 boyutta: 5 denklem ve 7 bilinmeyen (p, ρ, v_i, E, T, μ, τ).

STAR-CCM+ programında 4 farklı türbülans modeli sınıfı kullanılmaktadır. Spalart-Allmaras, K-Epsilon, K-Omega ve Reynolds Stress Transport modelleri (Star-Ccm+ User Guide, 2011).

Çalışmada k-Epsilon türbülans modeli kullanılmıştır.

7.5.1 k-Epsilon türbülans modeli

$k-\epsilon$, mühendislik çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan türbülans modellerinden birisidir. Sağlamlık, hesap süresi ve çözümün doğruluğu arasında çok iyi bir optimizasyonla oluşturulmuştur. İki denklemlidir, başka bir deyişle akışın türbülans özelliğini göstermek için iki ekstra taşınım (transport) denklemi içerir. Taşınım ilk değişken türbülanstaki enerjiyi belirleyen türbülans kinetik enerji k , ikincisi de türbülansın ölçeğini belirleyen türbülans yitimi (dissipation) ϵ dir.

Orjinal formunda k-epsilon türbülans modeli duvar fonksiyonlarıyla uygulanıyordu fakat daha sonra viskoz alt tabakayı çözümlemek için Düşük Reynolds sayısı (Low Reynolds number) ve İki-tabaka (two-layer) diye 2 yaklaşımı kullanmak için modifiye edilmiştir.

Çalışmada k-epsilon türbülans modeli olarak Gerçeklenebilir iki-tabaka k-epsilon modeli (Realizable Two-layer k-epsilon) kullanılmıştır.

7.5.1.1 İki-tabaka (two-layer) yaklaşımı

İki-tabaka yaklaşımı, k-epsilon modelin viskoz alt tabakada uygulanmasını sağlayan düşük Reynolds sayısı yaklaşımına bir alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu yaklaşımda hesaplama 2 tabakaya bölünür. Duvara bitişik olan tabaka, türbülans yitim oranı ϵ ve türbülans viskozitesi μ duvar mesafesinin fonksiyonudur. Yakın duvar tabakasında belirlenen ϵ değerleri, duvardan uzaktaki, dönüşüm denklemleri kullanılarak hesaplanan değerler ile çok düzgün bir biçimde harmanlanır. Türbülanslı kinetik enerji denklemi tüm akış boyunca çözülür. ϵ ve μ nun bu açık tanımlaması tartışılır şekilde sönümleme fonksiyonu yaklaşımından daha az ampirik değildir ve çoğunlukla daha iyi sonuç vermektedir.

STAR-CCM+ programında iki-tabaka formülasyonu ya düşük Reynolds sayısı tipi meshlerde $y^+ \sim 1$ ya da duvar fonksiyonu tipi meshlerde $y^+ > 30$ düzgün çalışır (Star-Ccm+ User Guide, 2011).

7.5.1.2 Gerçeklenebilir iki-tabaka k-Epsilon model

Önce gerçeklenebilir k-epsilon modeli incelersek, bu model türbülans yitim oranı ϵ için yeni bir taşınma (transport) denklemi içermektedir. Modelin kritik bir katsayısı olan C_μ , standart modeldeki gibi sabit almak yerine, ortalama akış ve türbülans özelliklerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bu modelin normal gerilmelerde türbülansın fiziği ile uyumlu belli matematiksel sınırlamaları sağlamasını sağlar. Bir C_μ değişkeninin anlayışı, sınır tabakada deneysel veriler ile de uyumludur (Star-Ccm+ User Guide, 2011).

Pek çok uygulama için gerçeklenebilir k-epsilon modeli standart k-epsilon modelden önemli oranda daha iyidir (Star-Ccm+ User Guide, 2011). STAR-CCM+ da her iki model de, viskoz alt tabakayı çözümleyen kaliteli meshler ile kullanılmalarına yarayan iki-tabaka yaklaşımı ile uygulanır.

Gerçeklenebilir iki-tabaka k-epsilon model, gerçeklenebilir k-epsilon model ile iki tabaka yaklaşımının kombine edilmesiyle oluşur. Modellerdeki katsayılar aynıdır, fakat model bu çalışmada olduğu gibi bir tüm y^+ duvar işlemi (Two-layer-all y^+ treatment) ile ek bir esneklik kazanır.

k-epsilon modellerinden Gerçeklenebilir İki-Tabaka Model seçildiğinde, duvar işlemi tüm y^+ (all y^+) olmaktadır.

Çalışmada k-epsilon model ve duvar işlemi (wall treatment) seçiminde aşağıdaki bilgiler göz önünde bulundurulmuştur:

Standart k-epsilon model ve gerçeklenebilir k-epsilon model y^+ değerleri 30 ve üzeri olan iri (kaba) meshli modeller için uygundur.

Standart iki-tabaka k-epsilon model ve bu çalışmada kullanılan gerçeklenebilir iki-tabaka k-epsilon model ise daha fazla mesh esnekliğine sahiptir. Özellikle gerçeklenebilir iki-tabaka k-epsilon model hem düşük y^+ değerlerinde, hem de yüksek y^+ değerlerinde iyi sonuçlar verir. Ve ayrıca tampon tabakada, $5 < y^+ < 30$, en az hatalı sonuçlar veren modeldir.

7.5.1.3 k-Epsilon duvar işleminin (wall treatment) belirlenmesi

k-epsilon modellerinde 6 tane duvar işlemi kullanılabilir: yüksek y^+ duvar işlemi, düşük y^+ duvar işlemi, bütün (all) y^+ duvar işlemi, iki-tabaka bütün y^+ duvar

işlemi, çok fazlı yüksek y^+ duvar işlemi ve çok fazlı iki-tabaka bütün y^+ duvar işlemi.

Yüksek y^+ duvar işlemi bilgisayar hafızası ve çözüm süresi açısından en uygun seçenek gibi görünse de buradaki çözüme uygun değildir. Burada sınır tabaka etkilerinin önemli olduğu, çok düzgün ve sık mesh atılmış bir model vardır ve bu yüzden düşük y^+ değerlerinde işlem yapılmalıdır. Oysa ki Yüksek y^+ duvar işlemi $y^+ > 30$ bölgesinde iyi sonuçlar verirken, $y^+ < 12$ değerlerinde hatalı sonuç vermektedir (Star-Ccm+ User Guide, 2011).

Düşük y^+ duvar işlemi, çok kaliteli meshe sahip ve y^+ değerinin 1 ve 1 den küçük olduğu aralıkta çok iyi sonuçlar verirken, daha yüksek y^+ değerlerinde hatalı sonuç vermektedir (Star-Ccm+ User Guide, 2011).

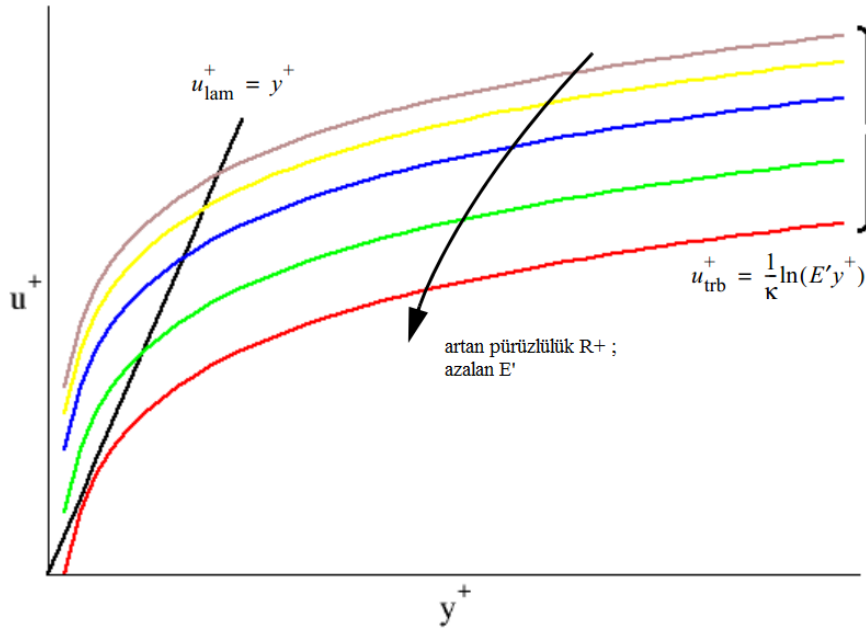
Çalışmada yukarıdaki iki işlemten daha genel olan ve bu çalışma için kullanılması şiddetle önerilen iki-tabaka bütün y^+ duvar işlemi (two-layer all y^+ wall treatment) seçilmiştir. Bütün y^+ duvar işlemi çok kaliteli, düzgün yada kaba, iri meshlerde duvar işlemini iyileştirmeyi amaçlayan hibrit bir yaklaşımdır. Bu duvar işleminin dizayn amacı $y^+ \sim 1$ gibi çok düşük y^+ işlem ve $y^+ > 30$ gibi yüksek y^+ işlem değerleri ile benzer sonuçlar vermektir. İki-tabaka bütün y^+ duvar işleminin formülasyonu bütün y^+ duvar işleminin aynısıdır fakat iki-tabaka duvar formüllerine uygun şekilde ϵ için bir duvar sınır koşulu içermektedir (Star-Ccm+ User Guide, 2011).

7.6 Pürüzlülüğün Programdaki İfadesi ve Hesaplamalara Dahil Edilmesi

Hemen önceki konuda STAR-CCM+ programındaki duvar işlemlerinden bahsedilmişti. Duvar kuralı türbülanslı sınır tabakalarda hız, sıcaklık gibi ortalama akış özelliklerinin matematiksel açıklamasıdır. Programda duvar kuralı özel olarak seçilebilir değildir, seçilen türbülans modeline göre belirlenmektedir. Sönümleme fonksiyonları içeren ya da o özellikte davranan türbülans modelleri bütün y^+ duvar işleminde (all y^+ wall treatment) standart olarak karışık (blended) duvar kuralı kullanır. Bu çalışmada da karışık duvar fonksiyonu (blended wall function) kullanılmıştır. Bu sınır koşulu sadece kayma durumu olmayan türbülanslı akışlarda kullanılır. Duvar pürüzlülüğünün kullanılması, türbülanslı duvar fonksiyonu katsayısı

E' 'deki bir azalma ile birleştirilmiştir. Bu, iç tabakadaki erozyon etkisini duvar kuralının logaritmik bölgesini aşağı doğru kaydırarak üretir.

Aşağıdaki şekilde de görüldüğü gibi, pürüzlülük parametresi R^+ nın büyük değerleri için logaritmik profil alt tabakada lineer profil ile keşismeyebilir. Bu tam pürüzlü rejimde olursa, alt tabaka ile bir ilgisi olmadığından problem olmaz. Bu eğriler geçiş bölgesinde keşismediğinde STAR-CCM+ tarafından u^+ nın asla sıfırdan düşük olmaması koşulu ile logaritmik profil kullanılır.



Şekil 7.12 : Artan pürüzlülük parametresi R^+ ile azalan E' .

Fiziksel açıdan $y^+ < R^+$ şeklinde bir durum anlamsız olacaktır. Hesabın doğruluğu için pürüzlülük fonksiyonu, duvara en yakın hücrenin merkezinin duvara olan uzaklığından (y^+) daha küçük olmak zorundadır. (Star-Ccm+ User Guide, 2011). Çalışmada alüminyum levhaların yüzeyine, bölüm 6.4'te verilen 2.5 mm kesme uzunluğundaki R_a pürüzlülük yüksekliği değerleri sabit pürüzlülük yüksekliği olarak verilerek hesaba katılmıştır. Programda kullanılan 2.5 mm kesme uzunluğundaki R_a ortalama pürüzlülük yüksekliği değerlerine bakıldığında, bu değerlerin analizlerde hesaplanan y^+ değerlerinden oldukça küçük olduğu, dolayısıyla çözümün fiziki açıdan mantıklı ve uygun olduğu söylenebilir. R_a ortalama pürüzlülük yüksekliğinin seçilmiş olmasının sebebi, R_a 'nın en yaygın olarak kullanılan pürüzlülük yüksekliği parametresi olmasıdır. Çünkü yüzeydeki düzensizliklerin (pürüzlerin) ortalamasını, verilen bir kesme uzunluğu üzerinde en yüksek ve en düşük noktalar arasında ortalama bir çizgi boyunca elde etmeyi sağlamaktadır. Ayrıca, Candries (2001),

yapmış olduğu çalışmada 8 tanesi foul release boya ile yeni boyanmış olan 41 farklı yüzey seçiminde, direnç ile pürüzlülük arasında korelasyon oluşturmada pürüzlülüğün ortalama pürüzlülük yüksekliği R_a ile ifade edildiğinde en iyi sonuçları elde ettiğini açıklamıştır.

7.6.1 Karışık (blended) duvar fonksiyonu

Karışık duvar fonksiyonu, tampon bölgeyi viskoz alt tabaka ve log-law bölgesi arasında uygun bir şekilde karıştırma temeline dayanmaktadır Star-Ccm+ User Guide, (2011), momentum için, Reichardt kuralı kullanılır:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(1 + \kappa y^+) + C \left[1 - \exp\left(\frac{y^+}{D}\right) - \frac{y^+}{D} \exp(-by^+) \right] \quad (7.5)$$

Burada $D = y_m^+$, $C = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{E'}{\kappa}$, $b = \frac{1}{2} \left(\frac{D\kappa}{C} \right) + \frac{1}{D}$ dir.

Programda kullanılan karışık duvar fonksiyonu özellikleri;

$E = 9$, $\kappa = 0.42$ dir.

7.6.2 Pürüzlülük fonksiyonu

Programda tanımlanan pürüzlülük fonksiyonu f , log-law katsayısı E' 'yi pürüzlülük parametresinin bir fonksiyonu olarak düzenler.

$$R^+ = \frac{r u^*}{v} \quad (7.6)$$

Burada r , eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliğidir. Fonksiyonun programdaki kullanımını aşağıdaki gibidir:

$$f = 1, \quad R^+ \leq R_{smooth}^+$$

$$f = \left[B \left(\frac{R^+ - R_{smooth}^+}{R_{rough}^+ - R_{smooth}^+} \right) + C R^+ - R^+ \right]^a, \quad R_{smooth}^+ \leq R^+ \leq R_{rough}^+$$

$$f = B + C R^+, \quad R^+ \geq R_{rough}^+$$

Burada a değeri şöyle verilir:

$$a = \sin \left[\frac{\pi}{2} \frac{\log \left(R^+ / R_{smooth}^+ \right)}{\log \left(R_{rough}^+ / R_{smooth}^+ \right)} \right] \quad (7.7)$$

Programda kullanılan değerler;

$$B = 0, \quad C = 0.253, \quad R_{smooth}^+ = 2.25, \quad R_{rough}^+ = 90$$

7.7 Sayısal Hesaplama Analizinin Sonuçları

Sayısal hesaplama sonuçları ile deney sonuçlarının yüzde 100 aynı olması beklenen bir durum değildir ve pratikte pek mümkün değildir. Bu çalışmadaki deney sonuçları ile STAR-CCM+ programı kullanılarak yapılan sayısal hesaplama sonuçları 1 m/s den yüksek hızlarda %1 ile %7 arasında birbiriyle tutarlı bulunmuştur. Deneysel sonuçlar ile özellikle düşük hızlarda (0.5 ve 1 m/s) fark daha fazladır. Analizelerin tüm levhalar için aynı hız için aynı iterasyon sayısındaki sonuçları alınmıştır. Bununla birlikte, farklı hızlarda yakınsamalar aynı iterasyon sayısında olmamıştır ve dolayısıyla farklı hızlarda iterasyon sayıları arasında farklılıklar bulunmaktadır.

Programda pressure olarak hesaplanan kuvvet (direnc) bileşeni basınçtan kaynaklanan, yüzeye dik kuvvet ile viskoz basınç kuvvetinin toplamıdır. Dalga direnci+viskoz basınç direnci=artık direnc.

Shear olarak hesaplanan kuvvet ise yüzeye teğet, akış yönüyle aynı yönde sürtünme direncidir.

Net kuvvet de bu ikisinin toplamı olan toplam direnc olmaktadır.

Component in direction: [-1.000000e+00, 0.000000e+00, 0.000000e+00] in Laboratory coordinate system

Part	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
levha	6.890446e+00	8.875682e+00	1.576613e+01
Total:	6.890446e+00	8.875683e+00	1.576613e+01

Monitor value: 15.766128540039062

Şekil 7.13 : Levha 1'in 3 m/s hızda STAR-CCM+ direnc raporu.

Not: Programda simetri plaka özelliği kullanıldığından, alınan direnc değerleri normalde olması gereken değerlerin yarısıdır. Bu yüzden STAR-CCM+ programından alınan toplam direnc değerleri 2 ile çarpılmıştır.

Aşağıda çizelgeler halinde STAR-CCM+ programı ile analizleri yapılan levhaların her bir hız için Froude sayıları, Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları; onun hemen aşağısında da her bir levhanın CFD sonuçları ile hesaplanan toplam direnc katsayısı, dalga direnci katsayısı, viskoz

direnç katsayısı, sürtünme direnci katsayısı, artık direnç katsayısı ve CFD çalışmasından bağımsız olarak ITTC 1957 formülü ile hesaplanan sürtünme direnci katsayısı verilmiştir.

Çizelge 7.1 : Levha 1'in verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 1	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Hesaplanan direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.50	0.130	0.650	1.324
2	1.0	0.261	1.299	5.181
3	1.50	0.391	1.949	10.057
4	2.0	0.521	2.598	16.503
5	2.50	0.652	3.248	24.188
6	3.0	0.782	3.897	31.533
7	3.3	0.860	4.287	36.153
8	3.50	0.912	4.547	38.957
9	3.75	0.978	4.872	42.908

Çizelge 7.2 : Levha 1'in direnç katsayıları.

Levha 1	C_T	C_W	C_V	C_F	C_R	$C_F (ITTC)$
	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$
1	8.103	0.612	7.491	6.242	1.860	5.159
2	7.927	2.111	5.816	4.846	3.080	4.432
3	6.838	1.496	5.342	4.452	2.386	4.076
4	6.312	1.874	4.438	3.698	2.614	3.848
5	5.921	1.848	4.073	3.394	2.527	3.685
6	5.360	1.360	4.000	3.334	2.027	3.559
7	5.079	1.159	3.920	3.267	1.812	3.495
8	4.865	1.049	3.816	3.180	1.685	3.457
9	4.668	0.974	3.694	3.079	1.589	3.414

Çizelge 7.3 : Levha 2'nin verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 2	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Hesaplanan direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.50	0.130	0.658	1.326
2	1.0	0.261	1.316	5.119
3	1.50	0.391	1.975	10.055
4	2.0	0.521	2.633	16.428
5	2.50	0.652	3.291	23.814
6	3.0	0.782	3.949	31.776
7	3.3	0.860	4.344	36.208
8	3.50	0.912	4.608	39.522
9	3.75	0.978	4.936	42.857

Çizelge 7.4 : Levha 2'nin direnç katsayıları.

Levha 2	C_T *10 ³	C_W *10 ³	C_V *10 ³	C_F *10 ³	C_R *10 ³	$C_{F(ITTC)}$ *10 ³
1	8.114	0.612	7.502	6.252	1.862	5.144
2	7.832	2.111	5.721	4.767	3.065	4.420
3	6.837	1.496	5.341	4.451	2.386	4.065
4	6.283	1.874	4.409	3.674	2.609	3.838
5	5.830	1.848	3.981	3.318	2.512	3.675
6	5.402	1.360	4.042	3.368	2.034	3.550
7	5.087	1.159	3.928	3.273	1.814	3.487
8	4.936	1.049	3.887	3.239	1.697	3.449
9	4.663	0.974	3.689	3.074	1.589	3.405

Çizelge 7.5 : Levha 3'ün verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 3	Hız m/s	Froude sayısı	Reynolds sayısı *10 ⁶	Hesaplanan direnç N
1	0.50	0.650	0.658	1.324
2	1.0	1.299	1.316	5.194
3	1.50	1.949	1.975	10.027
4	2.0	2.598	2.633	16.541
5	2.50	3.248	3.291	23.644
6	3.0	3.897	3.949	31.609
7	3.3	4.287	4.344	36.282
8	3.50	4.547	4.608	39.076
9	3.75	4.871	4.936	42.786

Çizelge 7.6 : Levha 3'ün direnç katsayıları.

Levha 3	C_T *10 ³	C_W *10 ³	C_V *10 ³	C_F *10 ³	C_R *10 ³	$C_{F(ITTC)}$ *10 ³
1	8.100	0.612	7.488	6.240	1.860	5.160
2	7.946	2.111	5.835	4.862	3.084	4.432
3	6.818	1.496	5.322	4.435	2.383	4.076
4	6.326	1.874	4.452	3.370	2.616	3.848
5	5.787	1.848	3.939	3.283	2.505	3.685
6	5.373	1.360	4.013	3.344	2.029	3.559
7	5.097	1.159	3.938	3.282	1.814	3.495
8	4.880	1.049	3.831	3.192	1.688	3.457
9	4.655	0.974	3.681	3.068	1.587	3.413

Çizelge 7.7 : Levha 4'ün verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 4	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Hesaplanan direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.50	0.130	0.667	1.329
2	1.0	0.261	1.334	5.196
3	1.50	0.391	2.001	10.029
4	2.0	0.521	2.668	16.488
5	2.50	0.652	3.335	23.651
6	3.0	0.782	4.002	31.600
7	3.3	0.860	4.402	36.157
8	3.50	0.912	4.669	39.053
9	3.75	0.978	5.002	42.904

Çizelge 7.8 : Levha 4'ün direnç katsayıları.

Levha 4	C_T	C_W	C_V	C_F	C_R	$C_{F(ITTC)}$
	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$	$\cdot 10^3$
1	8.135	0.612	7.523	6.269	1.866	5.129
2	7.950	2.112	5.839	4.866	3.085	4.407
3	6.820	1.496	5.324	4.436	2.383	4.054
4	6.307	1.874	4.433	3.694	2.613	3.828
5	5.790	1.848	3.942	3.285	2.505	3.666
6	5.372	1.360	4.012	3.344	2.029	3.541
7	5.080	1.159	3.921	3.267	1.813	3.478
8	4.878	1.049	3.829	3.191	1.687	3.440
9	4.668	0.974	3.694	3.079	1.590	3.396

Çizelge 7.9 : Levha 5'in verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Levha 5	Hız	Froude sayısı	Reynolds sayısı	Hesaplanan direnç
	m/s		$\cdot 10^6$	N
1	0.50	0.130	0.667	1.326
2	1.0	0.261	1.334	5.185
3	1.50	0.391	2.001	10.028
4	2.0	0.521	2.668	16.513
5	2.50	0.652	3.335	23.659
6	3.0	0.782	4.002	31.744
7	3.3	0.860	4.402	36.156
8	3.50	0.912	4.669	39.028
9	3.75	0.978	5.002	43.044

Çizelge 7.10 : Levha 5'in direnç katsayıları.

Levha 5	C_T *10 ³	C_W *10 ³	C_V *10 ³	C_F *10 ³	C_R *10 ³	C_F (ITTC) *10 ³
1	8.118	0.612	7.506	6.255	1.863	5.129
2	7.934	2.112	5.822	4.852	3.082	4.407
3	6.819	1.496	5.323	4.436	2.383	4.054
4	6.317	1.874	4.442	3.702	2.615	3.828
5	5.792	1.848	3.944	3.286	2.506	3.666
6	5.397	1.360	4.037	3.364	2.033	3.541
7	5.080	1.159	3.921	3.267	1.813	3.478
8	4.875	1.049	3.826	3.188	1.687	3.440
9	4.683	0.974	3.710	3.091	1.592	3.396

5 adet farklı pürüzlülük yüksekliğine sahip levhanın analizlerinden sonra, karşılaştırma yapabilmek için yine aynı geometriye sahip özdeş pürüzsüz levhanın analizleri gerçekleştirilmiştir. Pürüzsüz levhanın analizinde, suyun sıcaklığı 14.5 °C (levha 1 ve 3 ile aynı) olduğu kabul edilmiştir.

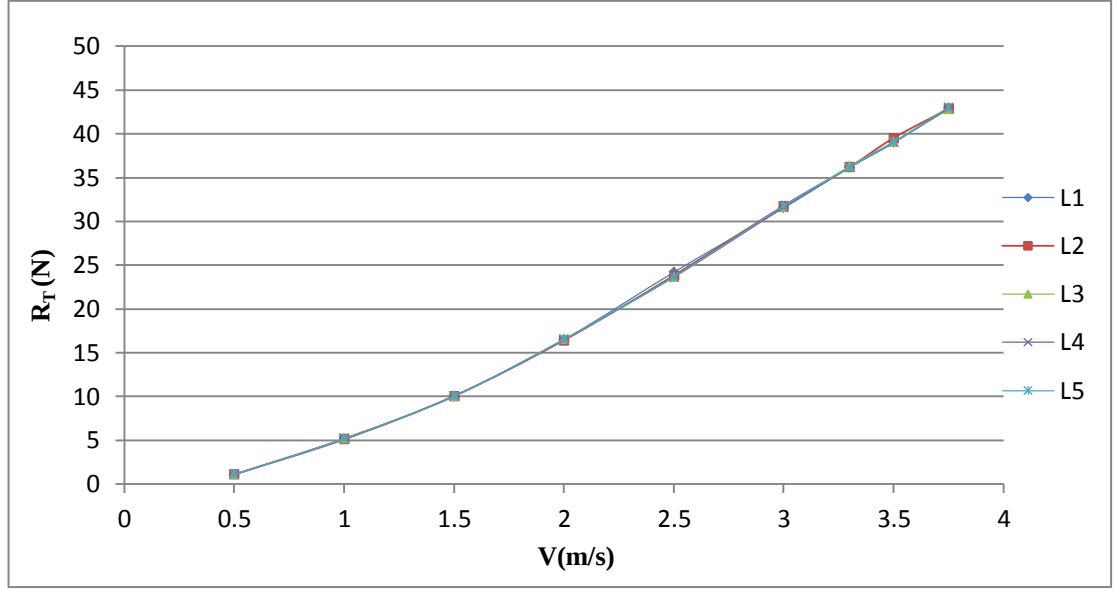
Çizelge 7.11 : Pürüzsüz levhanın verilen hızlardaki direnç, Froude ve Reynolds sayıları ve ITTC 1957 formülüne göre hesaplanan sürtünme direnci katsayıları.

Pürüzsüz levha	Hız m/s	Froude sayısı	Reynolds sayısı *10 ⁶	Hesaplanan direnç N	C_F (ITTC) *10 ³
1	0.50	0.650	0.658	1.323	5.159
2	1.0	1.299	1.316	5.103	4.432
3	1.50	1.949	1.975	10.037	4.077
4	2.0	2.598	2.633	16.497	3.848
5	2.50	3.248	3.291	23.662	3.685
6	3.0	3.897	3.949	31.694	3.559
7	3.3	4.287	4.344	36.063	3.495
8	3.50	4.547	4.608	38.954	3.457
9	3.75	4.871	4.936	42.884	3.413

Çizelge 7.12 : Pürüzsüz levhanın direnç katsayıları.

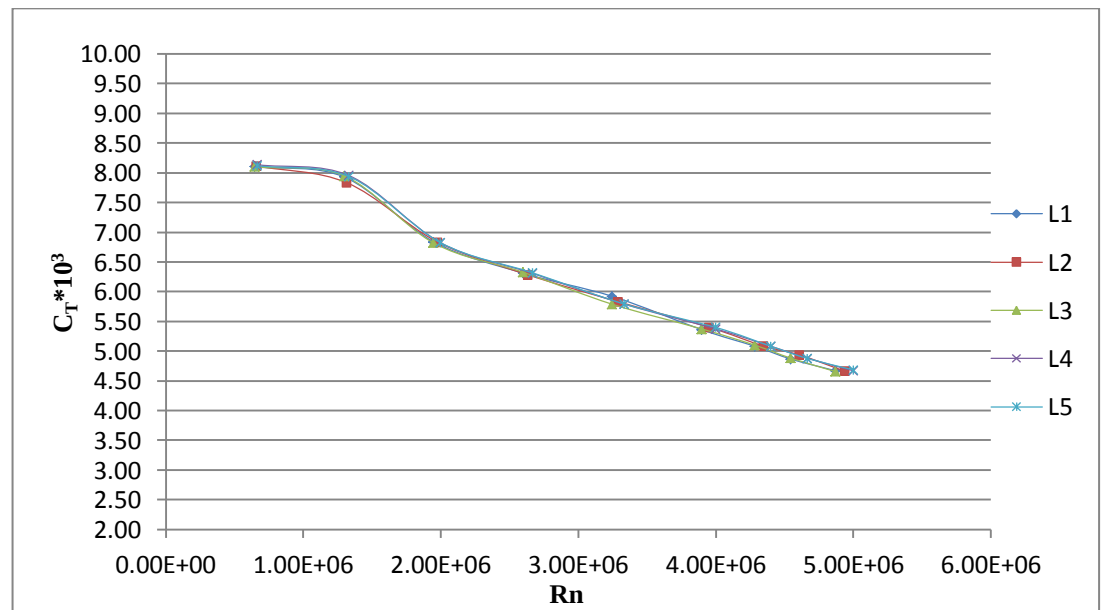
Pürüzsüz	C_T *10 ³	C_W *10 ³	C_V *10 ³	C_F *10 ³	C_R *10 ³	C_F (ITTC) *10 ³
1	8.098	0.612	7.486	6.239	1.860	5.129
2	7.807	2.112	5.696	4.746	3.060	4.407
3	6.825	1.496	5.329	4.441	2.384	4.054
4	6.309	1.874	4.435	3.696	2.613	3.828
5	5.792	1.848	3.944	3.286	2.505	3.666
6	5.387	1.360	4.028	3.356	2.031	3.541
7	5.066	1.159	3.907	3.256	1.810	3.478
8	4.865	1.049	3.816	3.180	1.685	3.440
9	4.665	0.974	3.692	3.076	1.589	3.396

Pürüzsüz levhanın analiz sonuçlarına bakıldığında, aynı hızlarda direnç değerlerinin programda pürüzlülük yüksekliği girilerek alınan sonuçlardan daha düşük olduğunu, bunun da çalışmanın deney ve CFD çalışmaları öncesindeki öngörüler ile tutarlı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 7.14 : Hız-Toplam direnç grafiği.

Yukarıdaki şekilde hızlara karşılık STAR-CCM+ programından elde edilen toplam direnç değerleri görülmektedir. Hemen aşağıdaki şekilde ise Reynolds sayısına karşılık toplam direnç katsayısı grafiği görülmektedir.

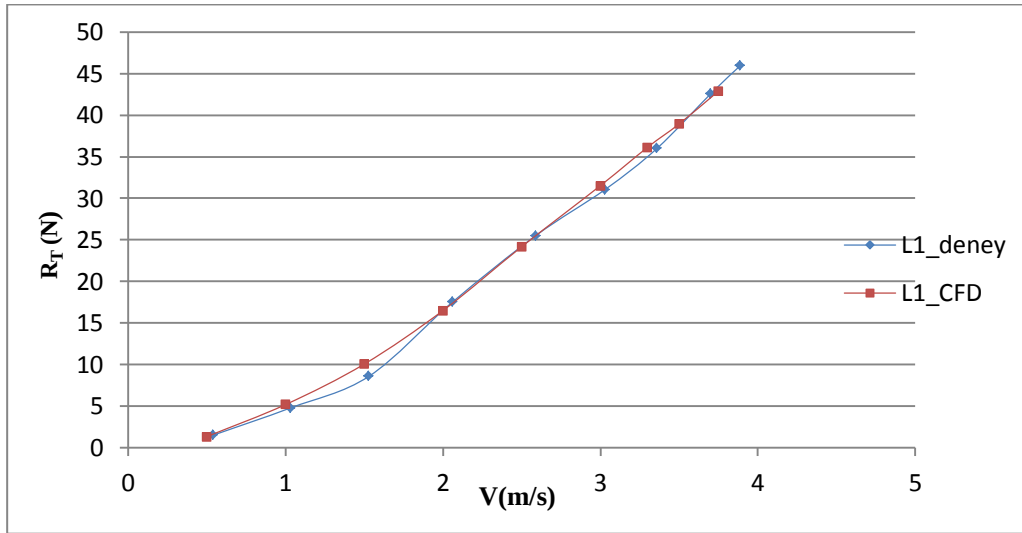


Şekil 7.15: Reynolds sayısı-Toplam direnç katsayısı grafiği.

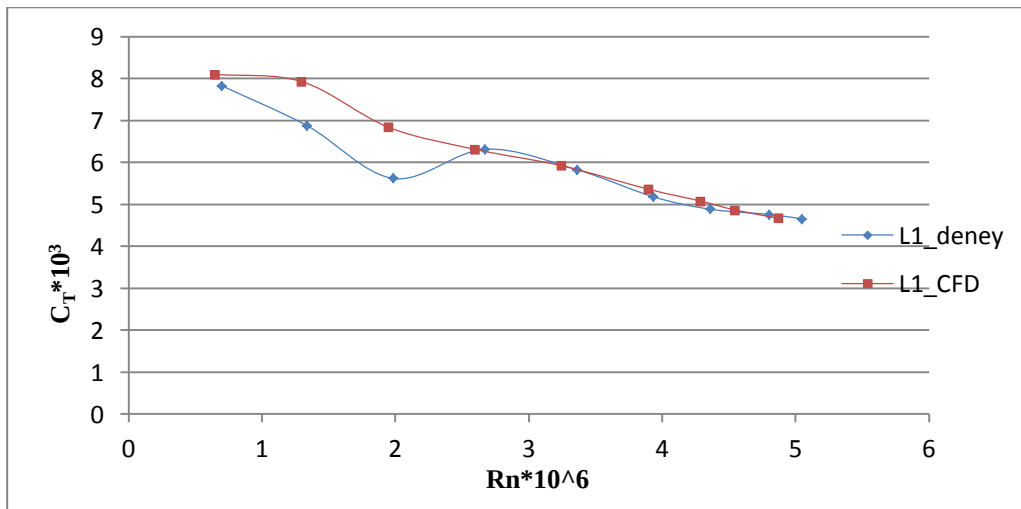
7.8 Deney Sonuçları İle Sayısal Hesaplama Sonuçlarının Karşılaştırılması

Çizelge 7.13 : Levha 1'in direnç değerlerinin karşılaştırması.

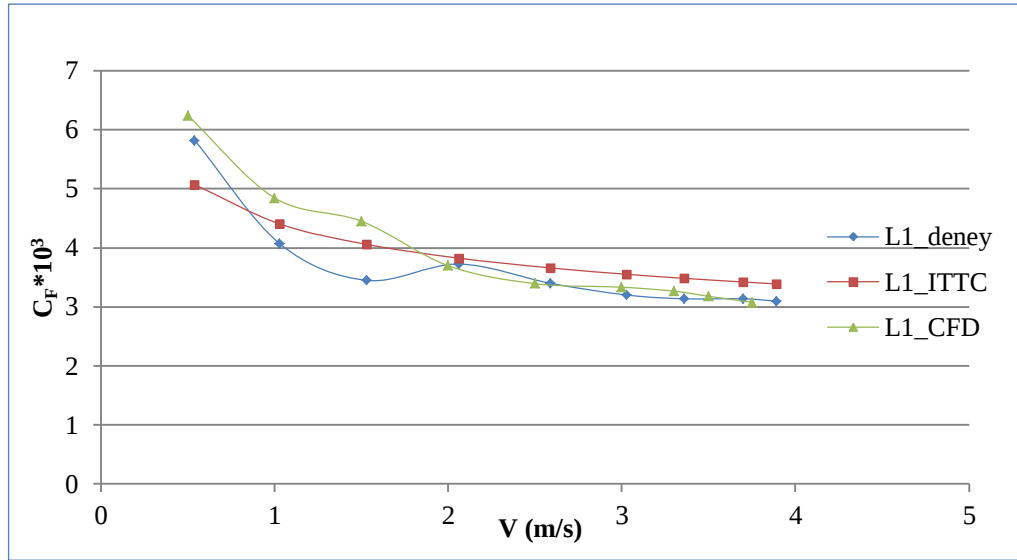
Levha 1	Hız m/s	Ölçülen direnç N	C_T *10 ³	Hız m/s	Hesaplanan direnç N	C_T *10 ³
1	0.54	1.491	7.823	0.50	1.3241	8.102
2	1.03	4.767	6.875	1.0	5.181	7.927
3	1.53	8.593	5.616	1.50	10.057	6.838
4	2.06	17.520	6.316	2.0	16.502	6.312
5	2.59	25.525	5.821	2.50	24.187	5.921
6	3.03	31.068	5.177	3.0	31.533	5.360
7	3.36	36.022	4.881	3.3	36.153	5.079
8	3.7	42.575	4.757	3.50	38.957	4.865
9	3.89	45.999	4.650	3.75	42.908	4.668



Şekil 7.16 : Levha 1'in toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.



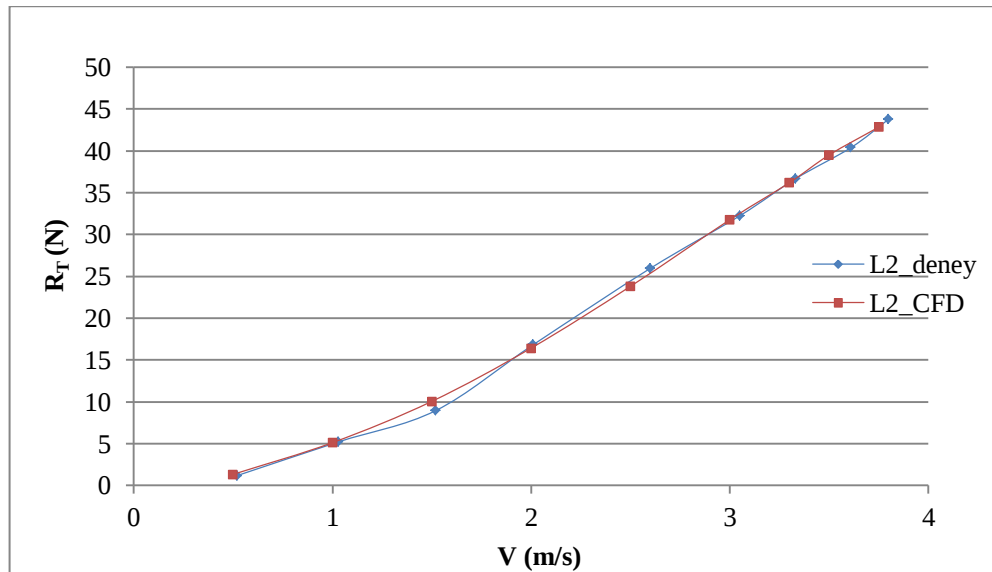
Şekil 7.17 : Levha 1'in toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.



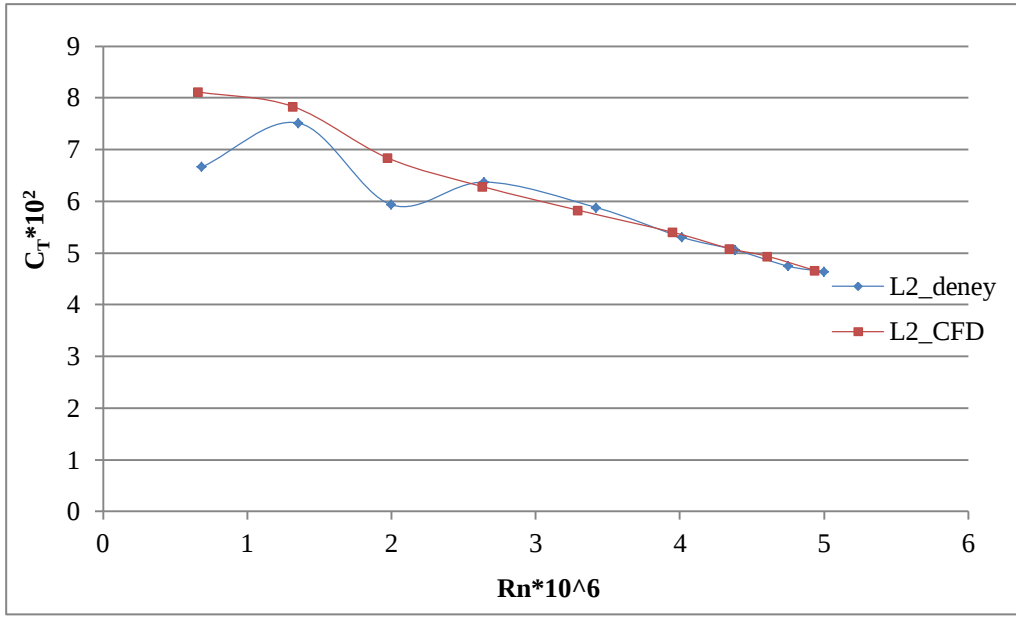
Şekil 7.18 : Levha 1 için C_F karşılaştırması.

Çizelge 7.14 : Levha 2'in direnç değerlerinin karşılaştırması.

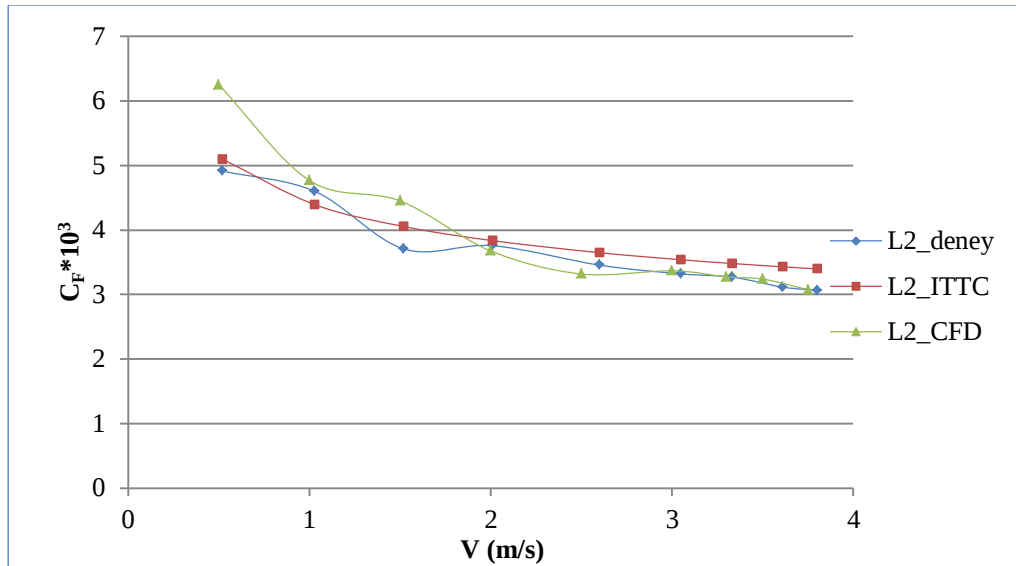
Levha 2	Hız	Ölçülen direnç N	C_T *10 ³	Hız	Hesaplanan direnç N	C_T *10 ³
	m/s			m/s		
1	0.52	1.177	6.661	0.50	1.325	8.114
2	1.03	5.209	7.512	1.0	5.119	7.831
3	1.52	8.956	5.931	1.50	10.054	6.836
4	2.01	16.824	6.371	2.0	16.427	6.283
5	2.6	25.967	5.877	2.50	23.814	5.829
6	3.05	32.245	5.303	3.0	31.776	5.401
7	3.33	36.669	5.059	3.3	36.207	5.086
8	3.61	40.407	4.744	3.50	39.522	4.936
9	3.8	43.811	4.641	3.75	42.857	4.662



Şekil 7.19 : Levha 2'nin toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.



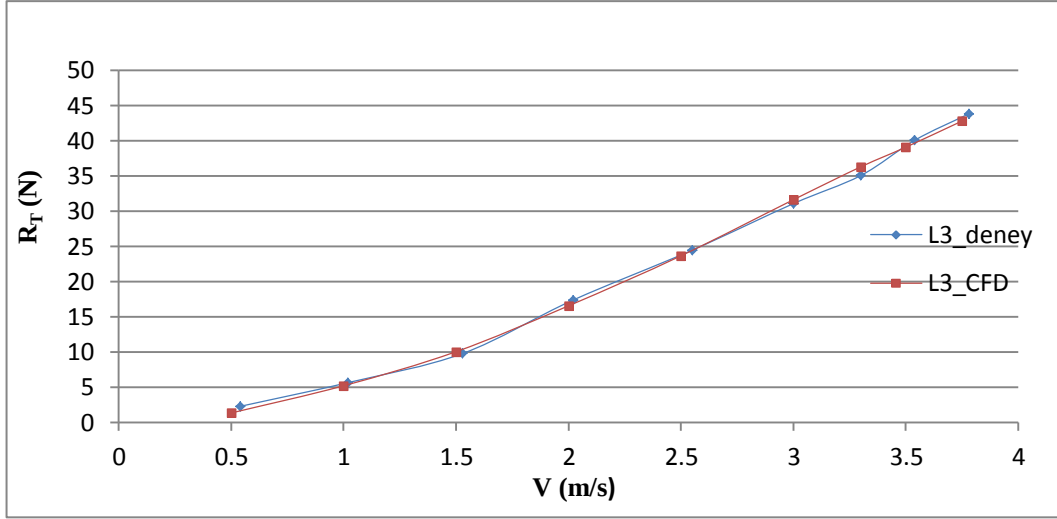
Şekil 7.20 : Levha 2'nin toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.



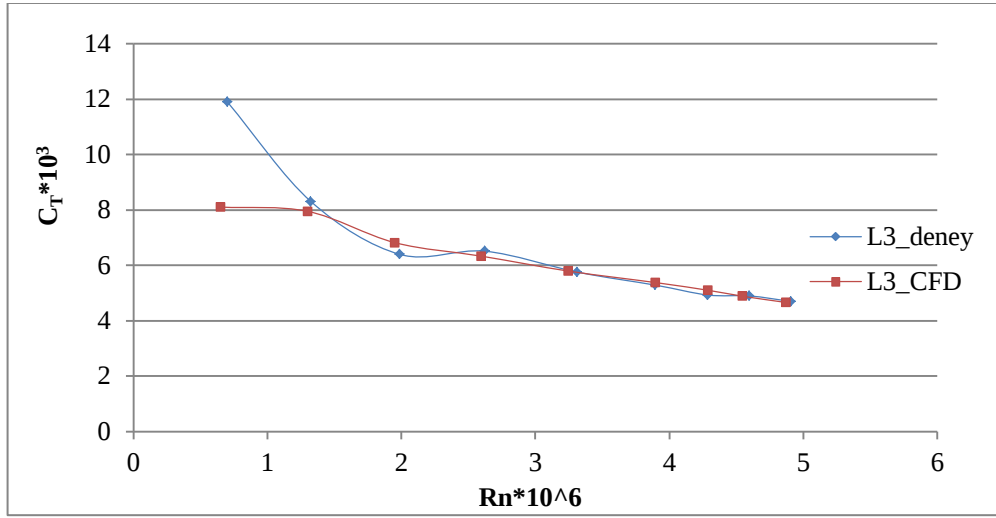
Şekil 7.21 : Levha 2 için C_F karşılaştırması.

Çizelge 7.15 : Levha 3'ün direnç değerlerinin karşılaştırması.

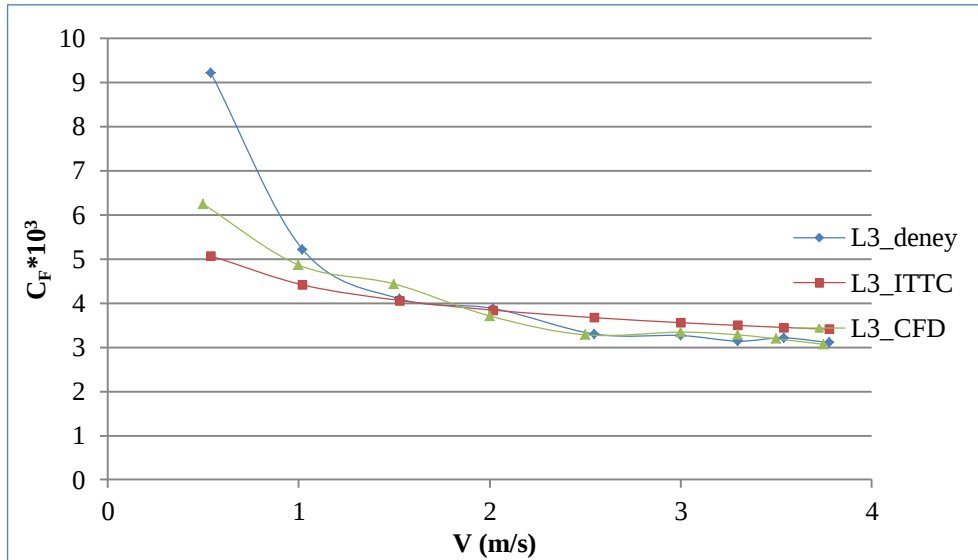
Levha 3	Hız	Ölçülen direnç	C _T *10 ³	Hız	Hesaplanan direnç	C _T *10 ³
	m/s	N		m/s	N	
1	0.54	2.2661	11.888	0.50	1.3237	8.1002
2	1.02	5.6407	8.2943	1.0	5.194	7.946
3	1.53	9.7805	6.3918	1.50	10.027	6.817
4	2.02	17.354	6.5064	2.0	16.541	6.326
5	2.55	24.446	5.7515	2.50	23.643	5.787
6	3	31.058	5.2794	3.0	31.609	5.373
7	3.3	35.051	4.9240	3.3	36.282	5.097
8	3.54	40.064	4.8909	3.50	39.075	4.879
9	3.78	43.811	4.6908	3.75	42.786	4.654



Şekil 7.22 : Levha 3'ün toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.



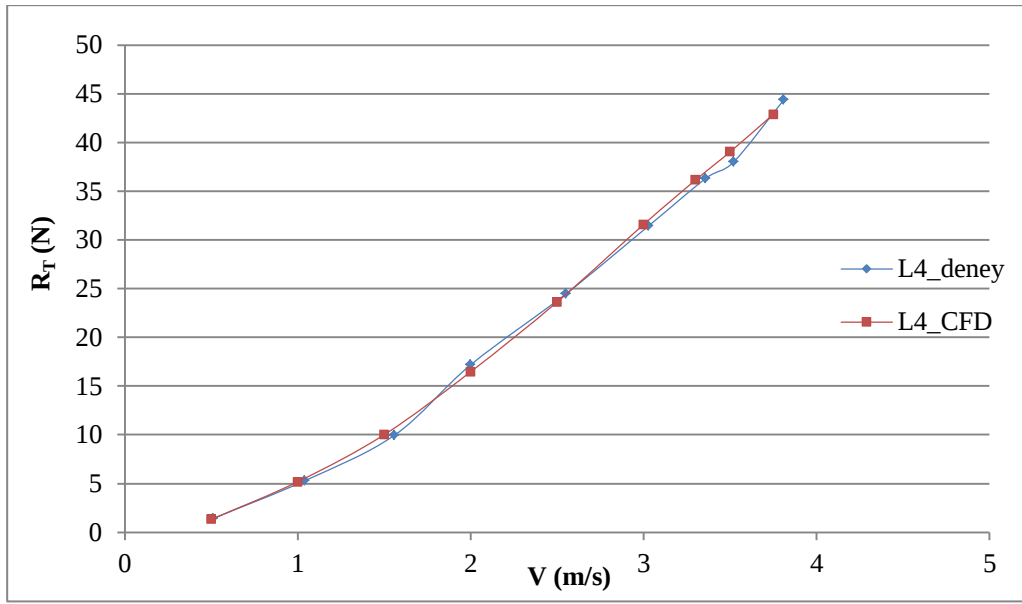
Şekil 7.23 : Levha 3'ün toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.



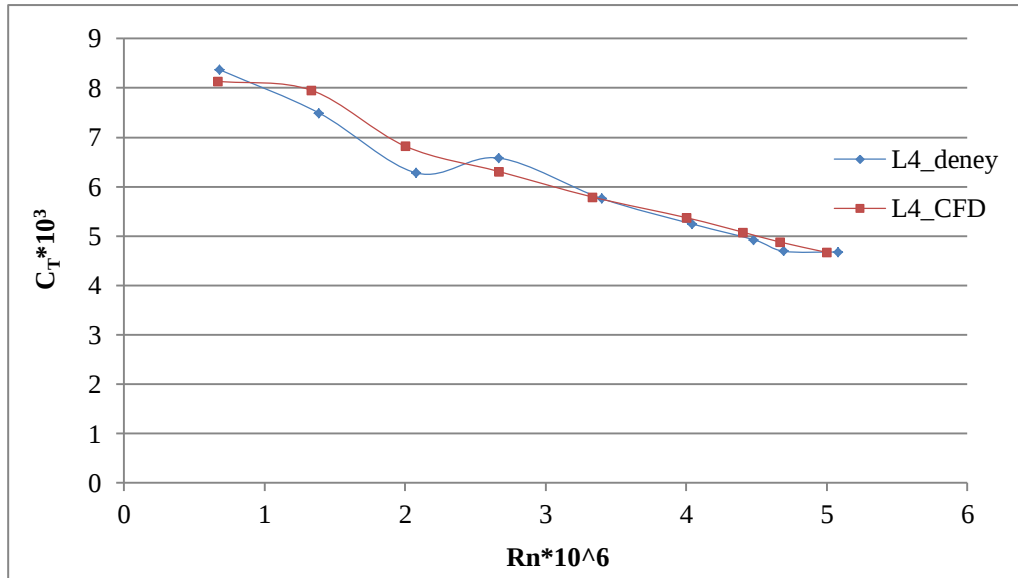
Şekil 7.24 : Levha 3 için C_F karşılaştırması.

Çizelge 7.16 : Levha 4'ün direnç değerlerinin karşılaştırması.

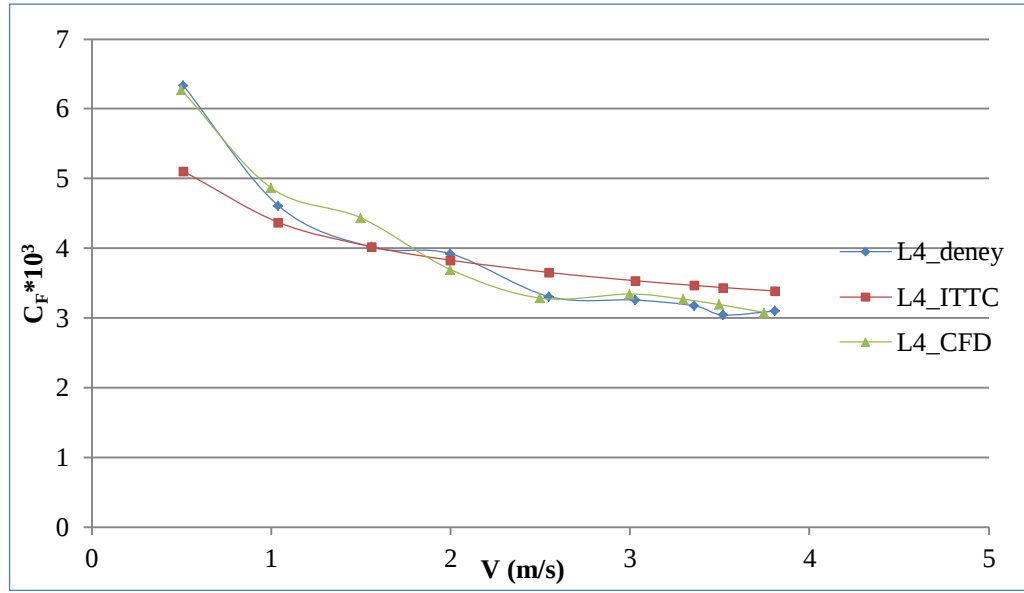
Levha 4	Hız m/s	Ölçülen direnç N	C_T *10 ³	Hız m/s	Hesaplanan direnç N	C_T *10 ³
1	0.51	1.42228	8.3667	0.50	1.3292	8.135
2	1.04	5.29511	7.4906	1.0	5.196	7.950
3	1.56	9.98479	6.277	1.50	10.028	6.819
4	2	17.2019	6.5800	2.0	16.488	6.306
5	2.55	24.46706	5.757	2.50	23.650	5.790
6	3.03	31.47275	5.2452	3.0	31.600	5.372
7	3.36	36.33541	4.9245	3.3	36.156	5.080
8	3.52	38.00755	4.6935	3.50	39.052	4.877
9	3.81	44.37898	4.6777	3.75	42.904	4.668



Şekil 7.25 : Levha 4'ün toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.



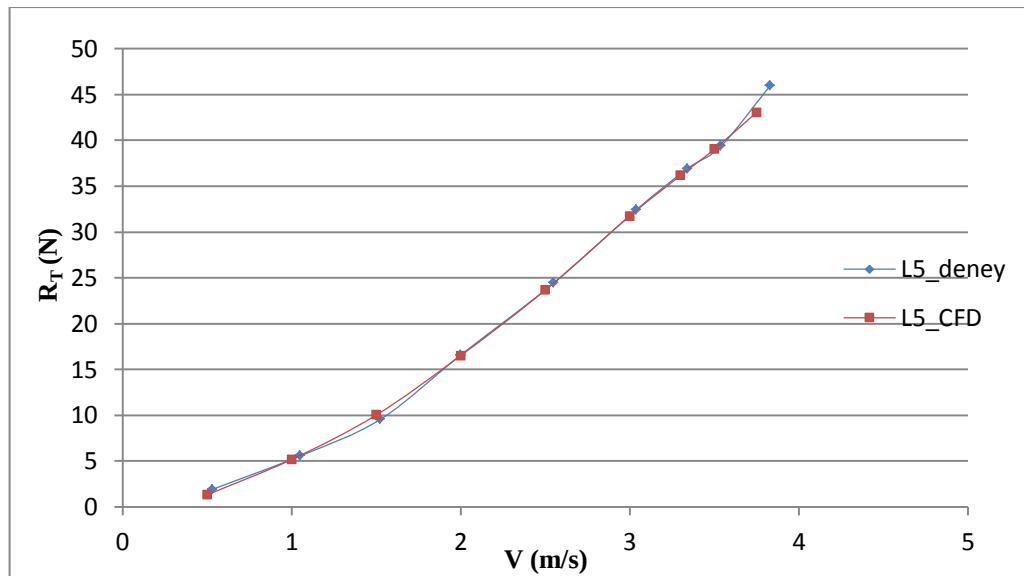
Şekil 7.26 : Levha 4'ün toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.



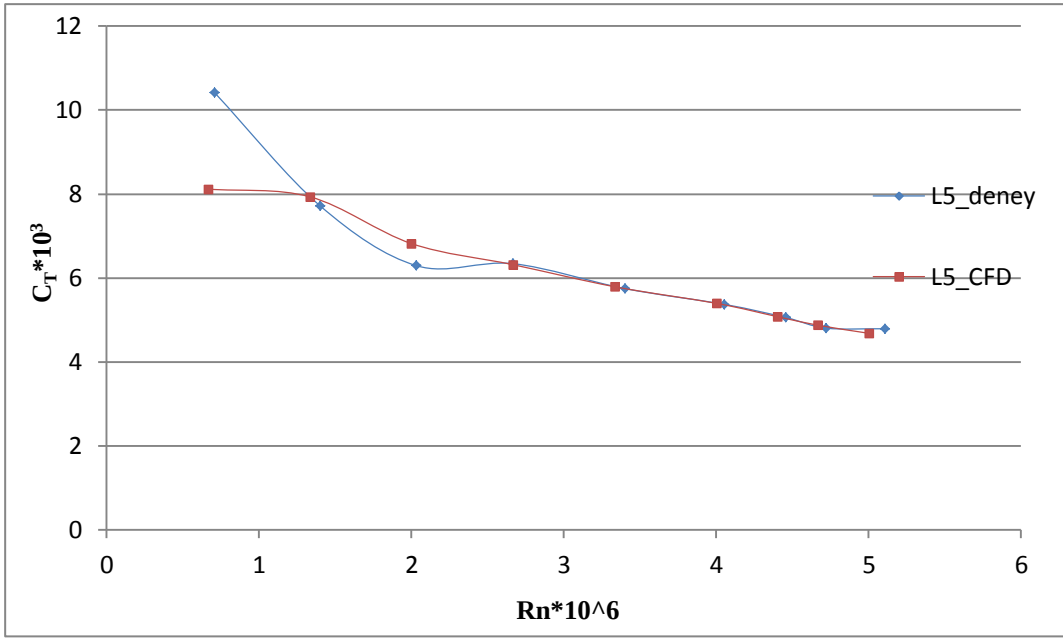
Şekil 7.27 : Levha 4 için C_F karşılaştırması.

Çizelge 7.17 : Levha 5'in direnç değerlerinin karşılaştırması.

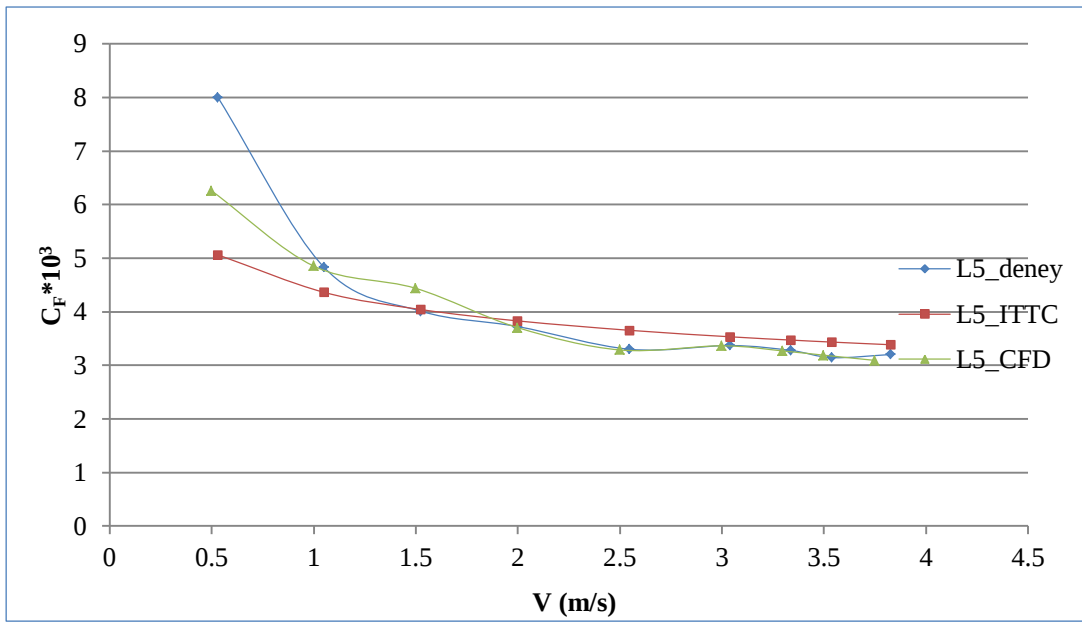
Levha 5	Hız	Ölçülen direnç	C_T *10 ³	Hız	Hesaplanan direnç	C_T *10 ³
	m/s	N		m/s	N	
1	0.53	1.912	10.419	0.50	1.326	8.117
2	1.05	5.562	7.7194	1.0	5.185	7.933
3	1.525	9.564	6.2928	1.50	10.027	6.819
4	2	16.571	6.3417	2.0	16.513	6.316
5	2.55	24.426	5.747	2.50	23.659	5.792
6	3.04	32.441	5.371	3.0	31.744	5.396
7	3.34	36.895	5.0604	3.3	36.155	5.079
8	3.54	39.367	4.8066	3.50	39.027	4.874
9	3.83	45.940	4.7919	3.75	43.044	4.683



Şekil 7.28 : Levha 5'in toplam direnç değerlerinin karşılaştırması.



Şekil 7.29 : Levha 5'in toplam direnç katsayısı değerlerinin karşılaştırması.



Şekil 7.30 : Levha 4 için C_F karşılaştırması.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada tekne yüzey pürüzlülüğünün sınır tabaka ve gemi direncine etkisi incelenmiştir. Çalışmaya başlanmadan önce 5 temel hedef tekne yüzey pürüzlülüğünün gemi direncine etkisi ile ilgili geniş bir literatür taraması yapmak, gemi direncinin bileşenlerini açıklamak, sınır tabaka teorisi ve tekne yüzey pürüzlülüğünün sınır tabaka üzerine etkisi hakkında bilgi vermek, yapılacak deneysel çalışma ile pürüzlülük artışının toplam direnç üzerindeki etkisini belirlemek, yapılacak CFD çalışması ile pürüzlülüğün toplam dirence olan etkisini belirlemek ve deneysel sonuçlara yaklaşık sonuçları bir de bilgisayar ortamında elde ederek karşılaştırma yapmak idi.

Giriş bölümünde verilen pürüzlülüğün sınır tabaka ve gemi direncine etkisi, konunun önemi, tarihsel gelişimi, pürüzlülük araştırması yapılan çalışmalar ile konunun geçmişten geleceğe önemi kavranmış, pürüzlülük ile direnç arasındaki bağıntı kavranmıştır.

İkinci bölümde gemi direncini oluşturan bileşenler anlatılmış, model deneyleri ile gemi direncini belirlemede kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Böylece, gemi direncini oluşturan bileşenlerin nasıl oluştuğu, nasıl yorumlanmaları gerektiği ve model deneyleri ile direnç bileşenlerinin nasıl elde edileceği anlaşılmıştır. İncelenen durumda viskoz etkiler vardır ve akış türbülanslıdır. Pürüzlülük sınır tabakaya etki etmektedir. Bu sebeple sınır tabaka kavramı incelenmiş, gemi yüzeyi etrafındaki 3 boyutlu sınır tabakanın davranışı ile türbülans ve türbülanslı sınır tabaka anlatılmıştır.

Dördüncü bölümde tekne ve pervane yüzey pürüzlülüğünün nasıl oluştuğu, pürüzlülüğün viskoz dirence etkisi, pürüzlülüğün en önemli kaynağı olan tekne yüzey kirlenmesinin önlenmesi için kullanılan antifouling boya çeşitleri, IMO'nun antifouling boya yasaklamaları ve pürüzlülük etkisinin ekonomik değerlendirmesi anlatılarak ileriki çalışmalarda yapılması düşünülen farklı antifouling boya türlerinin tekne yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla gemi direnci üzerine etkisi hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

Beşinci bölümde pürüzlülük geometrisini tanımlayan parametreler açıklanarak sadece pürüzlülük yüksekliğinin tekne yüzeyini tanımlamada yeterli olmadığı, yüzey doku parametrelerinin de bilinmesi gerektiği anlaşılmıştır. Ayrıca CFD çalışmasında hangi kesme uzunluğunda hangi pürüzlülük yüksekliği parametresinin kullanılması gerektiği hakkında bilgi sahibi olunmuştur.

6. bölümde anlatılan direnç deneyleri ile pürüzlülüğün 5 farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip levhadaki etkisi ile ilgili yararlı ve ileriki çalışmalar adına önemli bilgiler vermiştir. Bununla birlikte; dalga direnci, su sıçraması (spray) gibi kaplin (coupling) etkileri sebebi ile direnç değerlerinin ölçümünde sonuçlara direct etki edecek bir takım faktörlerin olması kaçınılmazdır. Bu nedenle CFD analizleri ile deneylerde yaklaşık aynı hızlarda yakın sonuçlar bulunması önemlidir. Her iki çalışmada da, belirli hız ve Reynolds sayısı aralığında yüzey pürüzlülüğünün dirence önemli derecede etki ettiği belirlenmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde 1.5 m/s üzerindeki hızlarda deney sonuçları kullanılarak, CFD çalışması ile ve ITTC 1957 formülü ile yani üç farklı yöntem ile hesaplanan sürtünme direnci katsayısı değerleri birbirine çok yakın bulunmuştur. Bununla birlikte, 0.5 m/s ile 1 m/s civarındaki ITTC 1957 formülü ile hesaplanan ve CFD çalışması ile hesaplanan sürtünme direnci katsayıları birbirine nispeten yakın bulunmuş iken, bu ikisi ile deneysel çalışma sonuçları arasında fark yüzdesi yüksektir ve levhalar arasındaki farklılıklar fazladır. Bunun sebebinin direnç deneylerinde genel olarak düşük hızlarda bir takım faktörler etkisi ile hata oranının artması olduğu düşünülmektedir. ITTC 1957 formülü ile hesaplanan C_F değerleri ile deneysel yoldan hesaplanan C_F değerleri arasındaki farklar; 0.5 m/s civarındaki hızlarda %81 ile %3 arasında, 1 m/s civarındaki hızlarda %18 ile %4 arasında, 1.5 m/s civarındaki hızlarda %15 ile %0.1 arasında, 2 m/s civarındaki hızlarda %2 ile %0.9 arasında, 2.5 m/s civarındaki hızlarda %10 ile %5 arasında, 3 m/s civarındaki hızlarda %9 ile %4 arasında, 3.3 m/s civarındaki hızlarda %10 ile %5 arasında, 3.5 m/s civarındaki hızlarda %11 ile %6 arasında ve 3.75 m/s den yüksek hızlarda %9 ile %5 arasında değişmektedir. CFD çalışması ile hesaplanan C_F değerleri ile ITTC 1957 formülü ile hesaplanan C_F değerleri arasındaki fark; 0.5 m/s hızlarda %20-%21, 1 m/s hızlarda %10 ile %7 arasında, 1.5 m/s hızlarda %9, 2 m/s hızlarda %4-%3, 2.5 m/s hızlarda %10 ile %7 arasında, 3 m/s hızlarda %6 ile %4 arasında, 3.3 m/s

hızlarda %6, 3.5 m/s hızlarda %8 ile %6 arasında ve son olarak da 3.75 m/s hızlarda %10 ile %8 arasında bulunmuştur.

Çalışma sonucunda levhada yüzey pürüzlülüğünün dirence etkisinin CFD ile hesaplanan sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında büyük bir doğruluk yüzdesi bulunmuştur.

Deneysel çalışma sonuçları ile elde edilen sürtünme direnci katsayıları ile CFD çalışması ile elde edilen sürünme direnci katsayısı değerleri kıyaslandığında aynı hızlar için şu sonuçlar elde edilmiştir: 0.5 m/s hızlarda fark %48 ile %0.4 arasında, 1 m/s hızlarda fark %13 ile %2 arasında, 1.5 m/s hızlarda fark %20 ile %6 arasında, 2 m/s hızlarda fark %6 ile %0.5 arasında, 2.5 m/s hızlardaki fark %4 ile %0.5 arasında, 3 m/s hızlardaki fark %3 ile %1 arasında, 3.3 m/s ve 3.5 m/s hızlardaki fark %4 ile %0.5 arasında, 3.75 m/s hızlardaki fark %3 ile %1 arasında bulunmuştur.

Deneysel çalışmada ölçülen toplam direnç değerleri ile CFD çalışması ile hesaplanan toplam direnç değerleri kıyaslandığında, 0.5 m/s için fark %35 ile %3 arasında, 1 m/s için %9 ile %0.1 arasında, 1.5 m/s hız için %15 ile %2 arasında, 2 m/s hız için %4 ile %0.5 arasında ve 2.5 m/s ve üzeri hızlar için sonuçların %3 ile %0.1 arasında farklı olduğu hesaplanmıştır.

Levhaların ortalama pürüzlülük yüksekliği R_a parametresine göre toplam direnç değerleri incelendiğinde, çalışma öncesi de öngörüldüğü gibi levhalar arasında çok büyük direnç farklılıkları hesaplanmamıştır. Ancak, CFD hesaplarındaki direnç değerleri incelendiğinde, ortalama pürüzlülük yüksekliği diğerlerinden büyük olan levha 4'ün direnç değerlerinin diğer levhaların direnç değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir. CFD analizlerinde neredeyse tüm hızlarda en düşük direnç değerleri pürüzsüz levhada bulunmuştur. Pürüzsüz levha analizlerindeki direnç değerlerinin en düşük bulunması, pürüzlülüğün direnç üzerine etkisini açıkça ortaya koymaktadır.

Direnç deneylerinde de aynı hızlar için genele bakıldığında levha 4'teki direnç değerlerinin diğer levhalardan biraz daha yüksek olduğu hesaplanmıştır. Ancak tüm hızlarda herhangi bir levha için diğerlerinden daha yüksek dirence sahiptir gibi bir genelleme yapılamamakta, hızlara göre farklı levhaların dirençlerinin en yüksek ve en düşük olarak sıralandığı görülmektedir.

Pürüzlülük analizlerinde kesme uzunluğu (cut-off length) seçimi çok önemlidir. Bununla birlikte literatürde hangi kesme uzunluğundaki pürüzlülük değerlerinin

kullanılması gerektiği hususunda netlik bulunmamaktadır. Deney sonuçlarının yorumlanmasında ve CFD analizlerinde 2.5 mm kesme uzunluğundaki R_a değerinin kullanılması (yani mevcut kesme uzunluğu verileri içerisinde en yüksek olanının kullanılması) çalışmaya pürüzlülüğün dalgalılık (waviness) etkilerinin de mümkün olduğunca dahil edilmesi amacını taşımaktadır.

Pürüzlülük artışının özellikle yüksek mertebelerde, pürüzlülük yüksekliği fazla olan yüzeylerde gemi direncinde olumsuz sonuçlara neden olduğu bilinen bir gerçektir. Pürüzlülük yükseklikleri ile direnç arasında doğrudan bir ilişki olması beklense de, literatüre baktığımızda yüzey pürüzlülüğü ile direnç arasında doğrudan bilimsel bir bağıntı olduğunu savunan bir çalışma bulunmamaktadır. Bunun sebebi, dirençteki artışın pürüzlülüğün yanında başka parametreler ile de ilişkisi olmasıdır. Hem deney, hem de CFD çalışması sonuçları değerlendirildiğinde, bu mertebede pürüzlülük yüksekliği ile direnç arasında doğrusal bir bağıntı kurulamayacağı görülmektedir. Pürüzlülüğün ve pürüzlülük ölçümlerinin karmaşık yapısı konunun basit bir cevabı olmamasına neden olmaktadır. Aynı şekilde pürüzlülük ölçümlerinin yorumlanması da günümüzde cevap bulamamış sorulardandır.

Pürüzlü bir yüzey, tek bir pürüzlülük yüksekliği parametresi R_a ile tanımlanmamalı, pürüzlülük elemanlarının yoğunluk, şekil vb. en az bir parametresi daha (doku) bilinmesi gerekir. Schlichting'in kum tanesi pürüzlülük yüksekliği parametresi gibi birçok girişim olduysa da yüzey sürtünmesi ile pürüzlülük arasında ilişki kuran evrensel bir parametre bulunamamıştır. Bu nedenle, pürüzlülük etkilerinin incelenebilmesi için deney hala tek çözümdür.

Çalışma sonucunda pürüzlülüğün gemi direnci ve sınır tabaka üzerinde çok önemli bir rolü olduğu, pürüzlülük artışı ile gemi direncinin arttığı ancak çok küçük mertebeli pürüzlülüklerde pürüzlülük ile direnç arasında lineer bir bağıntı kurulamadığı belirlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Akinlade, O. G.** (December 2005). Effects of Surface Roughness on The Flow Characteristics in a Turbulent Boundary Layer, University of Saskatchewan, Department of Mechanical Engineering, Doctor of philosophy thesis.
- Aldoğan, A. İ.** (1977). Lineer olmayan dalga direnci teorisi ve uygulaması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı Fakültesi, Doktora tezi.
- Alexandrou A.** (2011). *Principles of Fluid Mechanics*, New Jersey: Prentice Hall.
- American Society of Mechanical Engineers (ASME)** (1998). Test Uncertainty Instruments and Apparatus, USA.
- American Towing Tank Conference** (1942). Tentative Roughness Allowance for 1942 For Use with the Schoenherr Friction Formula, Report R-56.
- Anderson, C., Atlar, M., Callow, M., Candries, M., Milne, A., Townsin, R.L.** (2003). The development of foul-release coatings for seagoing vessels, *Journal of Marine Design and Operations*, No.B4
- Atlar, M., Clover, E.J., Candries, M., Mutton, R.J., Anderson, C.D.** (2002). The effect of a foul release coating on propeller performance, *ENSUS* 2002, University of Newcastle Upon Tyne.
- Avcı, A.G.** (2011). İze Uyumlu Pervane Dizaynı ve Askeri Gemi Uygulaması, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- Barlas, B.** (1999). Gemi Etrafındaki Sınır Tabakanın İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, doktora tezi.
- Baykal, R., Dikili, A.C.** (2002). Gemilerin Direnci ve Makina Gücü, İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü.
- Bertram, V.** (2000). *Practical Ship Hydrodynamics*, Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford.
- Bowden, B.S., Davison, N.J.** (1974). Resistance increments due to hull roughness associated with form factor extrapolation methods, *Technical Memo* 380, National Maritime Institute.
- Candries, M.** (December 2000). Paint systems for the marine industry, , Notes to Complement the External Seminar on Antifouling, Department of Marine Technology, University of Newcastle-upon-Tyne.
- Candries, M., Atlar, M.** (2000). Considering the use of alternative antifouling: the advantages of foul-release systems, *Conference Proceedings, ENSUS* 2000, pp. 88-95.

- Candries, M.** (December 2001). Drag Boundary-Layer and Roughness Characteristics of Marine Surfaces Coated With Antifoulings, University of Newcastle-Upon-Tyne Department of Marine Technology, Doctor of philosophy thesis.
- Candries, M., Anderson, C.D., Atlar, M.** (2001). Foul release systems and drag. Consolidation of Technical Advances in the Protective and Marine Coatings Industry, *Proceedings of the PCE 2001 2001 Conference*, pp. 273-286, Antwerp.
- Carlton, J.S.** (2007). *Marine Propellers and Propulsion*, Second Edition, Butterworth-Heinemann.
- Colebrook, C.F., White, C.M.** (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London, A*, Vol. 161, pp. 367-381.
- Conn, J.F.C., Lackenby, H., Walker, W.P.,** (1953). Resistance experiments on the Lucy Ashton, *Trans INA*, Vol. 95, pp. 350-436.
- Dey, S.K.** (1989). Parametric representation of hull painted surfaces and the correlation with fluid drag, PhD thesis, Department of Marine Technology, University of Newcastle Upon Tyne.
- Faltinsen, O.M.** (2005). *Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles*, Cambridge University Press.
- Flack, K.A., Schultz, M.P., Connely, J.S.,** (2007). Examination of a critical roughness height for boundary layer similarity, *Physics of Fluids*, 19, 095104.
- Flack, K.A., Schultz, M.P.,** (2010). Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.132 / 041203, pp.1-10.
- Froude, W.** (1872). Experiments on the surface-friction experienced by a plane moving through water, *British Association for the Advancement of Science*, The Collected Papers from William Froude, Institution of Naval Architects, 1955, pp. 138-146.
- Froude, W.** (1874b). On the experiments with H.M.S. Greyhound, *Transactions of the Institution of Naval Architects*, Vol.15, pp.36-73.
- Gören, Ö.** (1990). Numerical study of wave resistance of wet transom stern-ships, University of British Columbia Department of Mechanical Engineering, Vancouver, B.C., Canada.
- Granville, P. S.** (1987). Three indirect methods for the drag characterization of arbitrarily rough surfaces on flat plates, *Journal of Ship Research*, Vol. 31, pp. 70-77.
- Grigson, C.W.B.** (1981). The drag coefficients of a range of ship surfaces, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 123, pp. 195-208.
- Grigson, C.W.B.** (1982). The drag coefficients of a range of ship surfaces II, *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects*, Vol. 123, pp. 183-198.

- Grigson, C.W.B.** (1992). Drag losses of new ships caused by hull finish, *Journal of Ship Research*, Vol. 36, pp. 182-196.
- Hama, F.R.** (1954). Boundary layer characteristics for smooth and rough surfaces, *Trans. SNAME*, Vol. 62, pp. 333-351.
- Harvald, S.A.** (1983). *Resistance and Propulsion of Ships*, John Wiley and Sons, New York.
- Herring, F.S.** (1980). Effectiveness of Waterborne Cleaning of Aircraft Carriers, S.N.A.M.E. Shipboard Energy Conservation Symposium, Session III-C, pp. 243-249.
- ITTC-Recommended Procedures and Guidelines 7.5-02-02-02** (2002). Testing and extrapolation methods resistance, Uncertainty analysis, example for resistance test.
- Kan, S., Shiba, H., Tsuchida, K., Yokoo, K.** (1958). Effect of Fouling of a ship's hull and propeller upon propulsive performance, *I.S.P.*, Vol. 5, No. 41
- Kafalı, K.** (1972). Gemi formunun statik ve dinamik esasları, cilt 2, İTÜ, Sayı 887, İstanbul.
- Khor, S.Y., Xiao, Q.** (2011). CFD simulations of the effects of fouling and antifouling, *Ocean Engineering*, Vol. 38, pp. 1065-1079.
- Lackenby, H.** (1962). Resistance of ships with special reference to skin friction and hull surface condition, The 34th Thomas Lowe Grey Lecture, Proceedings of the Institute of Mechanical Engineers, Vol. 176, pp. 981-1014.
- Larsson, L.** (1974). *Boundary Layers of Ships*, SSPA General Reports, Göteborg.
- Larsson, L.** (1985). Proceedings of the 2nd Int. Symp. On Ship Viscous Resistance, Göteborg.
- Medhurst, J.S.** (1989). The systematic measurement and correlation of the frictional resistance and topography of ship hull coatings, with particular reference to ablative antifoulings, Ph.D. Thesis, University of Newcastle-upon-Tyne, Newcastle, UK.
- Michell, J.H.** (1898). The wave resistance of a ship, *Philosophical Magazine*, Vol. 45, pp. 39-58.
- Mosaad, M.A.**, (1986). Marine propeller roughness penalties, PhD thesis, Department of Marine Technology, University of Newcastle Upon Tyne.
- Munk, T., Kane, D., Yebra, D.M.** (2009). The effects of corrosion and fouling on the performance of ocean-going vessels: a naval architectural perspective, *Woodhead Publishing in Materials*, Part 7, pp. 148-175.
- Musker, A.J.** (1977). Turbulent shear flows near irregularly rough surfaces with particular reference to ships' hulls, PhD thesis, University of Liverpool.
- Musker, A.J.** (1980-1981). Universal roughness functions for naturally occurring surfaces, *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 1, pp. 1-6.

- Nikuradse, J.** (1933). Laws of flow in rough pipes, and rough surfaces, NACA Technical Memorandum 1292.
- Schlichting, H.** (1979). Boundary Layer Theory, 7th ed., Mc-Graw Hill, Newyork.
- Schneekluth, H.** (1988). Hydromechanik zum Schiffsentwurf, 2. Auflage, Koehlers Verlagsgesellschaft MbH, Herford.
- Schoenherr, K.E.,** (1932). Resistances of Flat Surfaces Moving Trough a Fluid, *Transactions of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*, Vol. 40, pp. 279-312.
- Schultz, M. P.,** (2002). The relationship between frictional resistance and roughness for surfaces smoothed by sanding, *American Society Of Mechanical Engineers*, Vol.124, pp. 492-499.
- Schultz, M.P.,** (2004). Frictional Resistance of Antifouling Coating Systems, *Journal of Fluids Engineering*, Vol.125, pp. 1039-1047.
- Schultz, M. P., Flack, K.A., Shade, J.E.** (2004). The effect of surface roughness on hydrodynamic drag and turbulence. *USNA Trident Scholar project report no 327*.
- Schultz, M. P.,** (2007). Effects of coating roughness and biofouling and biofouling on ship resistance and powering, *Biofouling*, 23(5), pp. 331-341.
- Schultz, M.P., Flack, K.A.** (2007). The rough-wall turbulent boundary layer from the hydrodynamically smooth to fully rough regime, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 580, pp. 381-405.
- Schultz, M.P., Flack, K.A.** (2009). Turbulent boundary layers on a systematically varied rough wall, *Physics of Fluids*, 21, 015104.
- Schultz, M.P., Bendict, J.A., Holm, E.R., Hertel, W.M.** (2011). Economic impact of biofouling on a naval surface ship, *Biofouling*, Vol. 27, No. 1, pp. 87-98.
- Star-Ccm+ User Guide,** (2011). Version 6.04.014
- Stout, K. J.** (2000). Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions, Penton Press.
- Taylan, M., Gören, Ö., Söylemez, M., Korkut, E., Takinacı, A.C., Danışman, D.B., Menteş, A., Ünal, B., Özbulut, M., Karayel, H.B., Avcı, G.** (2010). Roughness Measurements and Drag Tests of Aluminium Panels, Ata Nutku Ship Testing Laboratory, Report No:2010-PPG-P01, ITU, Istanbul.
- Thomas, T. R.** (1999). Rough Surfaces, Second Edition, Imperial College Press.
- Townsin, R.L., Byrne, D., Svensen, T.E. and Milne, A.** (1986). Fuel Economy due to Improvements in Ships Hull Surface Condition 1976-1986, *International Shipbuilding Progress*, Vol. 33, pp. 127-130.
- Townsin, R.L., Dey, S.K.,** (1990). The correlation of roughness drag with surface characteristics, *Proceedings of the RINA International Workshop on Marine Roughness and Drag*, London, UK, Paper 9.
- Townsin, R.L.,** (2003). The Ship Hull Fouling Penalty, *Biofouling*, Vol. 19, pp. 9-15.

- Ünsalan, D.** (1992). The effects of hull and propeller roughness and fouling on ship performance. Istanbul Technical University Institute of Science and Technology Ph.D Thesis.
- Volino, R. J., Schultz, M. P., Flack K. A.** (2009). Turbulence structure in a boundary layer with two-dimensional roughness, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 635, pp.75-101.
- Waigh, D.R., Kind, R.J.** (1998). Improved aerodynamic characterization of regular three-dimensional roughness, , *AIAA Journal*, Vol. 36, Issue 6, pp. 1117-1119.
- Willsher, J.** (t.y.) The effect of biocide free foul release systems on vessel performance, *International Paint Ltd.*, London.
- Url-1** <<http://www.gidb.itu.edu.tr/staff/odabasi/gmg/WEEK6.PDF>>, alındığı tarih: 15.11.2011.
- Url2**<<http://www.yildiz.edu.tr/fcelik/dersler/gemidirenci/PDF/5%20Model%20Denyleri.pdf>>, alındığı tarih: 20.11.2011
- Url3**<<http://personalpages.manchester.ac.uk/staff/david.d.apsley/lectures/turbbl/regions.pdf>>, alındığı tarih: 23.02.2012.
- Url-4** <<http://www.international-marine.com>>, alındığı tarih: 15.11.2011
- Url-5** <<http://w3.balikesir.edu.tr/~ay/lectures/ot/yuzey.puruzlulugu.pdf>>, alındığı tarih 10.01.2012
- Url-6** <<http://www.gidb.itu.edu.tr/atanutku.html>>, alındığı tarih: 09.03.2012

EKLER

EK : A Direnç Deneylerinde Belirsizlik Analizi

Deneyisel çalışmaların ardından belirsizlik analizi yapılmasındaki amaç, hata payını belirlemek ve daha iyi sonuçlar alabilmek için yorum yapmaktır. İyi bir belirsizlik analizi ile, hata kaynakları ve bu hataların test sonuçlarına etkisi belirlenir, ölçüm sonuçlarının birlikte değerlendirilmesi ve seçimi kolaylaşır, uygun ölçüm aletinin ve prosedürün seçimi kolaylaşır, hatalı karar verme riski azalır, değerler arasındaki uyum görülür. (ASME, 1988).

Yöntem, deney sonuçlarının %95 güven seviyesinde belirsizliğinin tahmini için kurulmuştur. Test sonuçlarındaki belirsizlik rastlantısal hatalar (random errors) ve sistematik hatalardan (bias errors) kaynaklanmaktadır. Belirsizlik analizi sonucunda rastlantısal hata ve sistematik hatanın toplamı olan toplam hata belirlenir.

%95 güven seviyesindeki belirsizlik aşağıdaki formül ile verilir:

$$U_i = \sqrt{(B_i)^2 + (P_i)^2} \quad (A.1)$$

Burada U_i belirsizlik, B_i sistematik hata, P_i rastlantısal hatadır.

Güvenilir sonuçlara ulaşabilmek için deneylerin 3 farklı hız için 5 set tekrarlanması önerilmektedir. (ITTC, 2002). Çalışmanın bu kısmında alüminyum levha direnç deneyi için sistematik, rastlantısal hatalar ve toplam belirsizlik için tahmin yapılmıştır. Bu çalışmada levha 4'ün 2 farklı hız için 5 set tekrarlanmış deney sonuçları kullanılmıştır. Levha 4'ün seçilmesinin nedeni ortalama pürüzlülük yüksekliği diğerlerinden çok az daha yüksek olması sebebi ile genel olarak en yüksek direnç değerlerinin bu levhada bulunmasıdır. 2.5 m/s ve 3 m/s hızlar için belirsizlik analizi yapılmıştır. Bu hızların seçilme nedeni ise deney sonuçları ile CFD sonuçlarının bu iki hızda birbirine çok yakın bulunmasıdır.

Test dizaynı

Deneylerde hız, o hızdaki levhaya etkiyen toplam direnç ve su sıcaklığı ölçülerek Froude sayısı, Reynolds sayısı, toplam direnç katsayısı, sürtünme direnci katsayısı (ITTC 1957), artık direnç katsayısı, toplam direnç, sürtünme direnci, artık direnç hesaplanmıştır.

Toplam belirsizlik

Daha önce de verildiği gibi direnç deneylerinde toplam belirsizlik, karekök içinde sistematik ve rastlantısal hataların toplamıdır.

Froude sayısı, Reynolds sayısı, toplam direnç katsayısı, sürtünme direnci katsayısı için sistematik hatalar:

$$(B_{Fn})^2 = \left(\frac{\partial Fn}{\partial V} B_V \right)^2 + \left(\frac{\partial Fn}{\partial g} B_g \right)^2 + \left(\frac{\partial Fn}{\partial L} B_L \right)^2 \quad (A.2)$$

$$(B_{Re})^2 = \left(\frac{\partial Re}{\partial V} B_V \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial L} B_L \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \nu} B_\nu \right)^2 \quad (A.3)$$

$$(B_{C_T})^2 = \left(\frac{\partial C_T}{\partial R_T} B_{R_T} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial \rho} B_\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial S} B_S \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial V} B_V \right)^2 \quad (A.4)$$

$$(B_{C_F})^2 = \left(\frac{\partial C_F}{\partial Re} B_{Re} \right)^2 \quad (A.5)$$

Rastlantısal hata tek bir deney ya da birden fazla sayıda deney için belirlense de standart sapmanın rastlantısal hataları içermesi için birden fazla sayıda test içermelidir. Eğer testlerin tekrarlanması mümkün değilse deneyleri yapan kişi rastlantısal hata için bir değer tahmininde bulunmalıdır.

Rastlantısal hatanın ortalaması $P(M)$ olarak tanımlanmıştır.

Rastlantısal hatanın çoklu test için ortalaması: (ITTC, 2002).

$$P(M) = \frac{K SDev}{\sqrt{M}} \quad (A.6)$$

Burada M test sayısı, SDev standart sapmadır. K=2 alınır.

A.1 Rastlantısal Hata

Rastlantısal hata hesaplanırken levha 4'ün 2.5 m/s ve 3 m/s civarındaki hızlarındaki 5'er adet direnç deneyi kullanılmıştır. Deneylerin 5 tekrar sonucunda ortalama değerleri, standart sapmaları hesaplanmıştır.

Direnç viskoziteye bağlı olduğundan ölçülen direnç değerleri aynı sıcaklıkta olacak şekilde düzeltilmelidir. Çalışmada direnç değerleri ortalama sıcaklık 15°C alınarak düzeltilmiştir. Bunun dışında yerçekimi ivmesi 9.81 m/s², suyun 15°C'de yoğunluğu 999.3305 kg/m³ alınmıştır. Alüminyum levha için hesaplamada kullanılan değerler:

Çizelge A.1 : Alüminyum levhanın boyut özellikleri.

Dikeyler arası boy	Lpp	1.5	m
Su hattı boyu	Lwl	1.5	m
Tam boy	Loa	1.5	m
Genişlik	B	0.05	m
Draft	T	0.41	m
Islak alan	S	1.3081	m ²
Su hattı alanı	Awp	0.071325	m ²
Deplasman hacmi	∇	0.029243	m ³
Blok katsayısı	$C_B = \nabla / L_{pp} B T$	0.951	
Su hattı narinlik katsayısı	$C_{wp} = A_{wp} / L_{pp} B$	0.951	
Islak alan katsayısı	$C_s = S / \sqrt{\nabla * L}$	6.24572	
Yerçekimi ivmesi	g	9.81	m/s ²
Su yoğunluğu	ρ	999.3305	kg/m ³
Su sıcaklığı (ortalama)	t	15	°C

Çizelge A.2 : 2.50 m/s hız için Belirsizlik analizi verileri.

Deney no		R _x (N)	V(m/s)	Sıcaklık	C _T *10 ³	C _{T'} *10 ³	C _R *10 ³
1	levha4	24.467	2.55	15.5	5.7572	6.1831	2.4596
2	levha4	24.764	2.54	17	5.8730	6.2064	2.4868
3	levha4	24.594	2.5	15	6.0209	6.2586	2.5437
4	levha4	24.693	2.52	15	5.9495	6.2347	2.5175
5	levha4	24.759	2.53	15	5.9184	6.2181	2.5033
Ortalama:		24.655	2.528				

$$SDev_{CT} = 0.032972, SDev_{CR} = 0.036583$$

Çizelge A.3 : 3.00 m/s hız için Belirsizlik analizi verileri.

Deney no		R_x (N)	V (m/s)	Sıcaklık	C_T * 10^3	C_T' * 10^3	C_R * 10^3
1	levha4	31.472	3.03	15.5	5.24520	5.58832	1.98803
2	levha4	31.844	3.07	17	5.16968	5.54970	1.95202
3	levha4	32.332	3.05	15	5.31796	5.56886	1.98834
4	levha4	32.103	3.05	15	5.28030	5.56952	1.98261
5	levha4	32.042	3.05	15	5.27026	5.57051	1.98176
	Ortalama:	31.958	3.05				

$SDev_{CT}=0.015784, SDev_{CR}=0.017477$

Yukarıdaki çizelgelerde 15°C'deki toplam direnç katsayısı C_T'

$$C_T' = C_R + C_F^{15der} (1 + k) \quad (A.7)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır.

5 deneyin sonuçları kullanılarak toplam direnç katsayısı ve artık direnç katsayısının rastlantısal hataları şöyle hesaplanmıştır:

$$P_{CT} = K SDev_{CT} / \sqrt{M} \quad (A.8)$$

$$P_{CR} = K SDev_{CR} / \sqrt{M} \quad (A.9)$$

Direnç katsayısı değerleri $*10^3$ alındığından, rastlantısal hatalar $*10^{-3}$ şeklinde alınmalıdır.

$$2.5 \text{ m/s hızdaki Rastlantısal hata} = P_{CT} = 2 * 0.032972 / \sqrt{5} * 10^{-3} = 2.949 * 10^{-5}$$

$$P_{CR} = 2 * 0.036583 / \sqrt{5} * 10^{-3} = 3.272 * 10^{-5}$$

$$3.00 \text{ m/s hızdaki Rastlantısal hata} = P_{CT} = 2 * 0.015784 / \sqrt{5} * 10^{-3} = 1.411 * 10^{-5}$$

$$P_{CR} = 2 * 0.017477 / \sqrt{5} * 10^{-3} = 1.563 * 10^{-5}$$

A.2 Sistemik Hata

Sistemik hata; kalibrasyon, veri indirgeme, veri toplama ve kavramsal önyargı kategorilerine ayrılır. Toplam sistemik hata bileşenlerinin kareleri toplamının kareköküdür.

A.2.1 Alüminyum levha modellerinin boyu

Model boyunun sistematik hatasının model geometrisindeki üretim hatalarından dolayı bütün koordinatlarda ± 0.5 mm olacağı tahmini yapılabilir. Bu sebeple model boyunun sistematik hatası $B_L = 1$ mm alınmıştır.

A.2.2 Islak alan

Model ıslak alanının sistematik hatası model üretim hatasından dolayı olacaktır.

Uygulamada; boy, draft ve genişlik değerlerinde tüm koordinatlarda 0.5 mm hata kabulü ile $(L+1, B+1, T+0.5)$ levha için sabit narinlik katsayısındaki, boyutlardaki değişikliği göz önüne alarak hesaplanan deplasman $\{\Delta' = (L + 1) * (B + 1) * (T + 0.5) * C_B\}$ ile normal boyutlar göz önüne alınarak hesaplanmış deplasman (Δ) arasındaki fark $(\Delta' - \Delta)$ hesaplanmıştır. (Δ') ve $(L + 1)$ mm değerleri kullanılarak oluşan ıslak yüzey alanı (S') aşağıdaki formül ile sabit ıslak alan katsayısında hesap edilmiştir:

$$C_S = \frac{S'}{\sqrt{V(L + 1)}} \quad (A.10)$$

$C_S = 6.24572$ hesaplanmıştır.

$(S' - S)$ ıslak alan farkı hesaplanmış, 1 kg'da $1/A_{wp}$ kadar draft farkı olacağından,

$(\Delta' - \Delta)$ kg'da $\Delta T = (\Delta' - \Delta) / A_{wp} = 8.987 * 10^{-3}$ kadar draft farkı hesap

edilmiştir. Buradan $\Delta T * 2 * L_{wl}$ çarpımı ıslak yüzey alanındaki azalmayı ΔS verir.

$$\Delta S = 0.026961$$

$$\Delta = 0.029243, \Delta' = 0.029884, \Delta' - \Delta = 0.000641$$

$$S = 1.3081, S' = 1.3228, S' - S = 0.0147 \text{ m}^2$$

Böylece, ıslak alan farkı $(S' - S)$ ile ıslak alan azalması ΔS arasındaki fark ıslak alanın sistematik hatasını B_S verir.

$$B_S = 0.012261 \text{ m}^2 \text{ hesaplanmıştır.}$$

A.2.3 Sıcaklık, yoğunluk ve kinematik viskozite

Kullanılan termometre dolayısıyla sıcaklık ölçümü sistematik hatası, ortalama sıcaklık olan 15°C nin % 2 sine karşılık gelen $B_t^0=0.3$ derecedir.

Yoğunluk

Sıcaklık ile su yoğunluğu arasındaki bağıntı yerçekiminin $g=9.81 \text{ kg/m}^3$ olduğu durum için ilgili tablolardan bakılmıştır.

Su sıcaklığına bağlı olarak $B_{\rho 1}$ hesap edilir.

$$\rho = 1000.1 + 0.552t - 0.0077t^2 + 0.00004t^3 \quad (\text{A.11})$$

$$B_{\rho 1} = \left| \frac{\partial \rho}{\partial t} \right| B_t \quad (\text{A.12})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 1 \ 0.0552 - 0.0154t + 0.000120t^2 \ 1 = 0.1488$$

$$B_{\rho 1} = \left| \frac{\partial \rho}{\partial t} \right| B_t = 0.04464 \text{ hesaplanmıştır.}$$

Veri indirgeme:

Sıcaklığın yoğunluğa bağlı denklemini hesaplanırken verilerin eğriye uyumundan kaynaklanan hatadır. $B_{\rho 2} = 2 * SEE = 2*0.04729=0.09458$

Kavramsal:

Denklemden bulunan suyun sıcaklığına bağlı su yoğunluğu ile hesaplarda kullanılan su yoğunluğu arasındaki farktan kaynaklanır. $B_{\rho 3} = 1000-999.345=0.655$

$$B_{\rho} = \sqrt{(B_{\rho 1})^2 + (B_{\rho 2})^2 + (B_{\rho 3})^2} = \sqrt{(0.04464)^2 + (0.09458)^2 + (0.655)^2} = 0.6663 \text{ kg/m}^3$$

Yoğunluktan kaynaklanan sistematik hata $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ değerinin %0.066'sına karşılık gelmektedir.

Tatlı su için kinematik viskozite

$$\nu = ((0.585 * 10^{-3} (t - 12) - 0.003361) * (t - 12) + 1.2350) * 10^{-6} \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial \nu}{\partial t} = (0.00117t - 0.04765) * 10^{-6}$$

Su sıcaklığına bağlı olarak $t = 15^\circ\text{C}$ ve $B_t = 0.3$ alınarak B_{v1} hesaplanır.

$$B_{v1} = \left| \frac{\partial v}{\partial t^0} \right| B_{t^0} \quad (\text{A.14})$$

$$B_{v1} = 1.50557 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

$$B_{v2} = -4.15 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2 \text{ (ITTC, 2002).}$$

$$B_v = \sqrt{(B_{v1})^2 + (B_{v2})^2} = 1.50557 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}^2$$

A.2.4 Model hızı

$$V = c\pi D / 8000 \Delta t \quad (\text{A.15})$$

Puls sayımı

Kalibrasyon:

Puls sayısı için optik kodlayıcı, üretici tarafından ± 1 pulsa ayarlanmıştır. Böylelikle kalibrasyonla ilgili puls sayımının sistematik hatası:

$$B_{c1} = 1 \text{ puls } (10V/2^{12}=0.00224V) \text{ olur.}$$

Veri Toplama:

İlgili veri toplama dönüşümünde, hız verisinin dönüştürücüler tarafından bilgisayara aktarılırken ortaya çıkan sistematik hatadır. $B_{c2} = B_{c3} = 1.5 \text{ puls}(10V/2^{12}=0.00366V)$

$$\text{Toplam sistematik hata : } B_c = \sqrt{(B_{c1})^2 + (B_{c2})^2 + (B_{c3})^2} \quad (\text{A.16})$$

$$B_c = \sqrt{(1)^2 + (1.5)^2 + (1.5)^2} = 2.34520 \text{ puls bulunmuştur.}$$

Deney arabası tekerlek çapı (D)

Deney arabasının tekerlek çapı kumpasla ölçülür ve kumpas için hata tahmini $B_D=0.0001 \text{ m}$ kabul edilmiştir.

Zaman aralığı

Kalibrasyon:

Zaman ölçümündeki sistematik hata osiloskopun saat hızına bağlıdır ve $B_{\Delta T} = 0.00001025$ saniye olarak alınmıştır.

Hızlardaki toplam sistematik hata:

$$B_V = \left(\left(\frac{\partial V}{\partial c} B_c \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial D} B_D \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial \Delta T} B_{\Delta T} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (A.17)$$

Ortalama hızlar olan 2.528 m/s ve 3.05 m/s için $c=11138.4$, $D=0.381$ m ve $\Delta T=0.1$ s alınmıştır. (ITTC, 2002). Buna göre kısmi türevler şöyle alınır:

$$\frac{\partial V}{\partial c} = \frac{\pi D}{8000 \Delta T} = 0.00150$$

$$\frac{\partial V}{\partial D} = \frac{c \pi}{8000 \Delta T} = 4.4705$$

$$\frac{\partial V}{\partial \Delta T} = \frac{c \pi D}{8000} \left(-\frac{1}{\Delta T^2} \right) = -17.0327$$

Toplam sistematik hata 7.16 eşitliği kullanılarak hesaplanır:

$$B_V = ((0.00150 * 2.34520)^2 + (4.4705 * 0.0001)^2 + (17.0327 * 0.00001025)^2)^{(1/2)}$$

$$B_V = 0.003550$$

Böylece hızdan kaynaklanan toplam sistematik hata $B_V = 0.003550$ m/s dir. Bu hata 2.528 m/s ortalama hızda % 0.14, 3.05 m/s ortalama hızda %0.11 sistematik hata olduğu anlamına gelmektedir.

A.2.5 Direnç

Kalibrasyon:

Bölüm 6.5'te direnç deneyleri öncesi kalibrasyon işlemi anlatılmış, çizelge 6.6'da tek bileşenli dinamometre kalibrasyonu değerleri verilmiştir.

$$B_{Rx1} = \text{ortalama toplam direnç } (R_x) * \text{ağırlıkların hassasiyeti} \quad (A.18)$$

$$2.50 \text{ m/s hız için } B_{Rx1} = 24.655 * 0.00005 = 0.0012327 \text{ N}$$

$$3.00 \text{ m/s hız için } B_{Rx1} = 31.958 * 0.00005 = 0.0015979 \text{ N}$$

Veri toplama:

Bölüm 6.5'teki kalibrasyon verileri kullanılarak aşağıdaki formül yardımı ile

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - (aX_i + b))^2}{N - 2}} \quad (A.19)$$

SEE= 0.04729 hesaplanmıştır.

$$2 \text{ m/s ve } 3 \text{ m/s hız için } B_{Rx2} = 0.4729 * 2 = 0.09458 \text{ N}$$

Üçüncü kalibrasyon hatası $B_{Rx3} = R_x - (\cos 0.25^\circ R_x)$ formülü ile hesaplanır.

$$2.50 \text{ m/s hız için } B_{Rx3} = 0.000234 \text{ N}$$

$$3.00 \text{ m/s hız için } B_{Rx3} = 0.000304 \text{ N}$$

Dördüncü kalibrasyon hatası B_{Rx4} bölüm 6.5'te verilen şekil 6.4 R35-I dinamometresinin kalibrasyon grafiğindeki eğim ile hesaplanır. Her iki hız için aynıdır.

$$B_{Rx4} = 39.583 * \frac{20}{2^{12}} = 0.19327 \text{ N}$$

Veri azaltımı:

$B_{Rx5} = R_x - (\cos 0.72^\circ R_x)$ formülü ile hesaplanır.

$$2.50 \text{ m/s hız için } B_{Rx5} = 0.001946 \text{ N}$$

$$3.00 \text{ m/s hız için } B_{Rx5} = 0.002523 \text{ N}$$

2.5 m/s hız için dirençteki toplam sistematik hata:

$$B_{Rx} = \sqrt{(0.0012327)^2 + (0.09458)^2 + (0.000234)^2 + (0.19327)^2 + (0.001946)^2}$$

$$B_{Rx} = 0.215 \text{ N}$$

0.215 N, 24.6665 N direnç değerinde %0.871 hataya karşılık gelmektedir.

3.00 m/s hız için dirençteki toplam sistematik hata:

$$B_{Rx} = \sqrt{(0.0015979)^2 + (0.09458)^2 + (0.000304)^2 + (0.19327)^2 + (0.002523)^2}$$

$$B_{Rx} = 0.215 \text{ N}$$

0.215 N, 31.958 N direnç değerinde %0.672 hataya karşılık gelmektedir.

A.2.6 Sürtünme direnci katsayısı

Sürtünme direnci katsayısının sistematik hatası ITTC 1957 formülüne göre hesaplanmıştır:

$$(B_{CF})^2 = \left(\frac{\partial C_F}{\partial Rn} B_{Rn} \right)^2 = \left(\frac{\partial C_F}{\partial L} B_L \right)^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial V} B_V \right)^2 + \left(\frac{\partial C_F}{\partial \nu} B_\nu \right)^2 \quad (\text{A.20})$$

$$\frac{\partial C_F}{\partial L} = 0.075 \left(\frac{2}{\left(\log \frac{VL}{v} - 2 \right)^3} \right) \left(\frac{1}{L \ln 10} \right)$$

$$\frac{\partial C_F}{\partial V} = 0.075 \left(\frac{2}{\left(\log \frac{VL}{v} - 2 \right)^3} \right) \left(\frac{1}{V \ln 10} \right)$$

$$\frac{\partial C_F}{\partial v} = 0.075 \left(\frac{2}{\left(\log \frac{VL}{v} - 2 \right)^3} \right) \left(\frac{1}{v \ln 10} \right)$$

$$2.5 \text{ m/s hız için } \frac{\partial C_F}{\partial L} = -0.00046961, \quad \frac{\partial C_F}{\partial V} = -0.00027865, \quad \frac{\partial C_F}{\partial v} = 618.233$$

$$B_{CF} = 9.3721 * 10^{-6}$$

$$3.00 \text{ m/s için } \frac{\partial C_F}{\partial L} = -0.0004451, \quad \frac{\partial C_F}{\partial V} = -0.0002189, \quad \frac{\partial C_F}{\partial v} = 585.968$$

$$B_{CF} = 8.8675 * 10^{-6}$$

A.2.7 Form faktörü

Form faktörünün $(1+k)=1.20$ sistematik hatası B_{1+k} k'nın %10'u yani 0.020 alınmıştır.

A.3 Toplam Direnç Ölçümü

Toplam direncin ölçüm analizleri Labview programı ile yapıldı. Programda her bir hız için en az 10-12 saniye kayıt alındı. Programdan verilerin analiz edilmesi sebebi ile olabilecek hata toleransı $\pm \% 0.1$ olarak alınmıştır.

A.3.1 Toplam sistematik hata – Toplam direnç katsayısı

Toplam direnç katsayısı, direnç deneylerinde $C_T^m = \frac{R_x^{Tm}}{0.5 \rho S V^2}$ eşitliği kullanılarak her deney için hesaplanmıştır.

Direnç deneylerindeki sistematik hata ıslak yüzey alanı, ölçülen dirençlerin ortalaması, suyun yoğunluğu ve model hızı kullanılarak hesap edilmiştir:

$$B_{CT}^2 = \left(\frac{\partial C_T}{\partial S} B_S \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial V} B_V \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial R_x} B_{R_x} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_T}{\partial \rho} B_\rho \right)^2 \quad (A.21)$$

2.50 m/s hız için;

$$\frac{\partial C_T}{\partial S} = \frac{R_x}{0.5\rho V^2} \left(-\frac{1}{S^2} \right) = -0.004509$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial V} = \frac{R_x}{0.5\rho S} \left(-\frac{2}{V^3} \right) = -0.004666$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial R_x} = \frac{1}{0.5\rho V^2 S} = 0.0002392$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial \rho} = \frac{R_x}{0.5V^2 S} \left(-\frac{2}{\rho^2} \right) = 5.8995 * 10^{-6}$$

$$B_{CT} = 7.744 * 10^{-5}$$

3.00 m/s hız için;

$$\frac{\partial C_T}{\partial S} = \frac{R_x}{0.5\rho V^2} \left(-\frac{1}{S^2} \right) = -0.004015$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial V} = \frac{R_x}{0.5\rho S} \left(-\frac{2}{V^3} \right) = -0.0034444$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial R_x} = \frac{1}{0.5\rho V^2 S} = 0.0001643$$

$$\frac{\partial C_T}{\partial \rho} = \frac{R_x}{0.5V^2 S} \left(-\frac{2}{\rho^2} \right) = 5.2526 * 10^{-6}$$

$$B_{CT} = 6.194 * 10^{-5}$$

A.3.2 Toplam sistematik hata – Artık direnç katsayısı

Artık direnç katsayısı daha önce verildiği üzere $C_R = C_T - (1 + k)C_F$ eşitliği ile hesaplanır.

Artık direnç katsayısının sistematik hatası aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır:

$$(B_{CR})^2 = \left(\frac{\partial C_R}{\partial C_T} B_{CT} \right)^2 + \left(\frac{\partial C_R}{\partial k} B_k \right)^2 + \left(\frac{\partial C_R}{\partial C_F} B_{CF} \right)^2 \quad (A.22)$$

$$\frac{\partial C_R}{\partial C_T} = 1$$

$$\frac{\partial C_R}{\partial k} = -C_F = -3.6582$$

$$\frac{\partial C_R}{\partial C_F} = -(1 + k) = -1.2$$

2.50 m/s hız için $(B_{CR}) = 7.825 * 10^{-5}$

3.00 m/s hız için $(B_{CR}) = 6.284 * 10^{-5}$

A.4 Toplam Belirsizlikler

$$(U_{C_i})^2 = (B_{C_i})^2 + (P_{C_i})^2$$

2.5 m/s hız için $(U_{C_T}) = \left(\sqrt{(7.744 * 10^{-5})^2 + (2.949 * 10^{-5})^2} \right) = 8.286 * 10^{-5}$

$8.286 * 10^{-5}$ değeri, ortalama $C_T=0.005904$ değerinde %1.40 hataya karşılık gelmektedir.

$$(U_{C_R}) = \left(\sqrt{(7.825 * 10^{-5})^2 + (3.272 * 10^{-5})^2} \right) = 8.481 * 10^{-5}$$

$8.481 * 10^{-5}$ değeri, ortalama $C_R=0.002502$ değerinde %3.38 hataya karşılık gelmektedir.

3.00 m/s hız için $U_{C_T} = \sqrt{(6.194 * 10^{-5})^2 + (1.411 * 10^{-5})^2} = 6.352 * 10^{-5}$

$6.352 * 10^{-5}$ değeri, ortalama $C_T=0.005257$ değerinde %1.20 hataya karşılık gelmektedir.

$$U_{C_R} = \sqrt{(6.284 * 10^{-5})^2 + (1.563 * 10^{-5})^2} = 6.476 * 10^{-5}$$

$6.476 * 10^{-5}$ değeri, ortalama $C_R=0.001978$ değerinde %3.27 hataya karşılık gelmektedir.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Onur Usta

Doğum Yeri ve Tarihi: Bakırköy 18.02.1987

Adres: İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi,
34469, Maslak, İstanbul

E-Posta: onurusta@itu.edu.tr

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi- Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği
Bölümü