İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜZEY KİRLİLİĞİNİN GEMİ DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yiğit Kemal DEMİREL

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜZEY KİRLİLİĞİNİN GEMİ DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yiğit Kemal DEMİREL
(508101024)

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Anabilim Dalı

Gemi İnşaatı ve Gemi Makineleri Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Metin TAYLAN

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 508101024 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Yiğit Kemal DEMİREL**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"YÜZEY KİRLİLİĞİNİN GEMİ DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Metin TAYLAN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Emin KORKUT** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Oya S. OKAY İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **03 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **04 Haziran 2012**

ÖNSÖZ

Öncelikle tez danışmanlığımı yürüten Hocam Sayın Prof. Dr. Metin TAYLAN'a teşekkürlerimi sunmak isterim. Fakültemizde araştırma görevlisi olarak göreve başladığım andan itibaren bana her konuda destek olduğu ve değerli tecrübelerini benimle paylaştığı için kendisine şükranlarımı sunarım.

Kısa bir zaman için tanıma fırsatım olsa da, başarıya ve çalışkanlığa verdiği önem ve karşılıksız destekle bana İTÜlü olmanın anlamını öğreten sayın Prof. Dr. Ali İhsan ALDOĞAN'ı rahmetle ve saygıyla anmak istiyorum.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana hem akademik hem de manevi olarak çok önemli katkılarda bulunan Fakültemiz değerli öğretim üyelerine ayrıca teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yüksek lisans tezimle ilgili teorik ve uygulamalı çalışmalarda bulunmak üzere İngiltere'de bulunan Strathclyde Üniversitesi'nde, Prof. Dr. Osman TURAN ile birlikte çalışma imkânına sahip oldum. Sayın Prof. Dr. Osman TURAN'a tüm yardım ve destekleri için teşekkür eder, saygılarımı sunarım. Ayrıca bu süre içerisinde benden desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Atilla İNCECİK'e de şükranlarımı sunmak isterim.

Yurt dışında bulunduğum süre içerisinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği konularındaki tecrübesini benimle paylaşmaktan çekinmeyen Sayın Dr. Mahdi KHORASANCHI'ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim ve Fakültemizdeki görev sürem boyunca yanımda olan ve tezimin hazırlanması sırasında, özellikle yurt dışında bulunduğum süre içerisinde yapmış olduğu yardımlar ve vermiş olduğu tüm desteklerden dolayı, meslektaşım ve dostum Arş. Gör. Tahsin TEZDOĞAN'a ayrıca teşekkürlerimi bildiririm. Kendisinin destek ve tecrübelerinin bu süreçte benim için çok değerli olduğunu belirtmek isterim.

Yurt dışında bulunduğum süre içerisinde yardımlarını benden esirgemeyen arkadaşım Arş. Gör. Onur USTA'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Son olarak da, sonsuz güvenleriyle bana her zaman destek veren aileme teşekkür eder, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Haziran 2012

Yiğit Kemal DEMİREL
(Gemi İnşaatı ve Gemi
Makineleri Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxv**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Kaynak Araştırması 3
2. *FOULING* VE *ANTIFOULING* BOYA TEKNOLOJİSİ **5**
2.1 Giriş 5
2.2 *Fouling* 5
2.2 *Fouling* ile Mücadele 9
2.3 *Antifouling* Boya Tipleri 11
2.3.1 Biyosit içeren *antifouling* boyalar 12
2.3.2 Biyosit içermeyen *antifouling* boyalar 14
2.3.3 Toksik olmayan boyalar 16
2.4 *Antifouling* Boyalar ile İlgili Yasal Düzenlemeler 16
3. GEMİ DİRENCİ **19**
3.1 Giriş 19
3.2 Gemi Direnci Detayları 20
3.2.1 Gemi direnci bileşenleri 21
3.3 Froude'un Sürtünme Direnci Üzerine Yaptığı Deneyler 22
3.3 İki Boyutlu Sürtünme Direnci Formülasyonları 24
3.5 Sürtünme Direnci Formülasyonlarının Geliştirilmesi 25
3.6 Çekme Tankı Konferanslarında Alınan Kararlar 26
3.7 Üç Boyutlu Viskoz Direnç Formülasyonları 28
3.8 Gemi Direnci Tahmin Yöntemleri 29
3.8.1 Geleneksel ve standart seriler metodu 31
3.8.2 Regresyon temelli metodlar 31
3.8.3 Model deneyleri 31
3.8.4 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) 34
3.9 Akış Modelleri 37
3.10 Hareketi Belirleyen Denklemler 39
4. YÜZEY KİRLİLİĞİNİN DİRENÇ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ **41**
4.1 Giriş 41
4.2 Pürüzlülük 42
4.2.1 Genlik parametreleri 43
4.2.2 Eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği 45

4.3 Türbülans Sınır Tabaka 47
4.3.1 Viskoz alt tabaka 53
4.3.2 Logaritmik hız değişim bölgesi 53
4.3.3 Dış tabaka 54
4.4 Yüzey Pürüzlülüğünün Türbülans Sınır Tabakaya Etkileri 56
4.5 Yüzey Pürüzlülüğünün Direnç Üzerine Etkisini İnceleyen Çalışmalar 59
4.6 Yüzey Kirliliğinin Direnç Üzerindeki Etkisini İnceleyen Çalışmalar 61
5. UYGULAMALAR 77
5.1 Giriş 77
5.2 Kabuller 78
5.2.1 Genel kabuller 78
5.2.2 Gemi direnci ile ilgili kabuller 78
5.3 Ön - İşleme Adımı 79
5.4 Çözüm Ağının Özellikleri 84
5.4.1 Yüzey ağı 85
5.4.2 Hacim ağı 86
5.5 Hesaplama Adımı 87
5.5.1 Uzay ve zamanın modellenmesi 89
5.5.2 Akışın ve türbülansın modellenmesi 89
5.6 Sonuçların Doğrulanması 91
5.6.1 Pürüzsüz plaka için bulunan sonuçlar 91
5.6.2 Pürüzlü plakalar için bulunan sonuçlar 93
5.7 Parametrik Çalışma 98
5.8 *Fouling* Durumları İçin Hesaplamalar 100
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 107
KAYNAKLAR 109
EKLER 115
ÖZGEÇMİŞ 145

KISALTMALAR

AF : Antifouling
AHR : Average Hull Roughness (Ortalama Tekne Yüzey Pürüzlülüğü)
ASTM : American Society for Testing and Materials
ATTC : American Towing Tank Conference (Amerikan Çekme Tankı Konferansı)
CAD : Computer-Aided Design (Bilgisayar Destekli Tasarım)
CDP : Controlled Depletion Polymer (Kontrollü Tüketimli Polimer)
CFD : Computational Fluid Dynamics (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği)
DES : Detached Eddy Simulations
FR : Foul-Release (*Fouling* Giderici Boya)
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
ICS&ISF : International Chamber of Shipping and International Shipping Federation
ICSTS : International Conference of Ship Tank Superintendents
IMO : International Maritime Organization (Uluslararası Denizcilik Örgütü)
ITTC : International Towing Tank Conference (Uluslararası Çekme Tankı Konferansı)
LES : Large Eddy Simulations (Büyük Anafor Simülasyonları)
MEPC : Marine Environment Protection Committee (Deniz Çevresi Koruma Komitesi)
NSTM : The Naval Ships' Manual
RANS : Reynolds Averaged Navier-Stokes (Reynolds-Ortalama Navier-Stokes)
RMS : Root Mean Square (Ortalama Karekök)
SNAME : The Society of Naval Architects & Marine Engineers
SPC : Self-Polishing Copolymer (Kendi Kendini Pürüzsüzleştiren Boya)
SST : Shear-Stress Transport
TBT : Tributyltin
VOC : Volatile Organic Compound

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 : *Antifouling* stratejilerinin tarihsel gelişimi 11
Çizelge 3.1 : Froude'un yüzey sürtünme katsayıları 23
Çizelge 3.2 : HMS Greyhound'a yapılan çekme deneylerinin sonuçları 23
Çizelge 4.1 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu 46
Çizelge 4.2 : Kempf pürüzlülük katsayıları (C_k). 59
Çizelge 4.3 : Deney sonucu bulunan sabitler..... 62
Çizelge 4.4 : Temiz ve kirli plakaların 2 knot hızındaki sürtünme direnci artışı 63
Çizelge 4.5 : Temiz ve kirli plakaların 9 knot hızındaki sürtünme direnci artışı 63
Çizelge 4.6 : Farklı yüzeyler için ortalama tekne pürüzlülük değerleri 67
Çizelge 4.7 : Sürtünme direnci katsayılarının karşılaştırılması. 67
Çizelge 4.8 : 287 gün sonunda *fouling* miktarı 69
Çizelge 4.9 : Temiz ve temizlenmiş durumlar için pürüzlülük istatistikleri..... 69
Çizelge 4.10 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 15 knot hızındaki toplam direnç değişimi tahmini..... 74
Çizelge 4.11 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 30 knot hızındaki toplam direnç değişimi tahmini.....74
Çizelge 4.12 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 15 knot hızındaki gerekli şaft gücü değişimi tahmini..... 75
Çizelge 4.13 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 30 knot hızındaki gerekli şaft gücü değişimi ve sabit şaft gücündeki hız azalması değişimi tahmini 75
Çizelge 5.1 : HAD ile bulunan pürüzsüz plaka sürtünme direnci katsayılarının Karman-Schoenherr formülü ve deney sonucuyla karşılaştırılması..... 92
Çizelge 5.2 : HAD ile bulunan 60 numara zımpara kağıdı ile kaplanmış plakanın sürtünme direnci katsayılarının deney sonucuyla karşılaştırılması..... 94
Çizelge 5.3 : HAD ile bulunan 220 numara zımpara kağıdı ile kaplanmış plakanın sürtünme direnci katsayılarının deney sonucuyla karşılaştırılması..... 95
Çizelge 5.4 : HAD ile bulunan TBT SPC ile boyanmış plakanın sürtünme direnci katsayılarının deney sonucuyla karşılaştırılması 97
Çizelge 5.5 : Doğrulama için HAD ile bulunan sürtünme direnci katsayısı değerleriyle deneylerde bulunan sürtünme direnci katsayısı değerlerinin karşılaştırılması 97
Çizelge 5.6 : Parametrik analiz sonucu bulunan farklı pürüzlülük değerlerine karşılık gelen sürtünme direnci katsayıları..... 99
Çizelge 5.7 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için bulunan sürtünme direnci katsayıları 100
Çizelge 5.8 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için sürtünme direnci katsayılarının yüzde olarak artışı..... 101
Çizelge 5.9 : Farklı *fouling* durumları için plaka üzerinde kaydedilen minimum ve maksimum yerel hız değerleri 103

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 : *Fouling*'e neden olan organizmaların sınıflandırılması 6
Şekil 2.2 : *Barnacles* ile kaplanmış gemi dibi. 6
Şekil 2.3 : *Fouling*'e maruz kalmış bir gemi 7
Şekil 2.4 : *Fouling*'in oluşum aşamaları 7
Şekil 2.5 : Farklı *antifouling* boyalarının zaman içerisinde artan pürüzlülük değerleri nedeniyle hızlı bir geminin zamana bağlı güç veya yakıt gereksinimindeki artış tahmini 15
Şekil 3.1 : Gemi direnci bileşenleri 22
Şekil 3.2 : Türbülanslı ve laminer akışlar için yüzey sürtünme eğrileri 25
Şekil 3.3 : Yüzey sürtünmesi eğrileri 28
Şekil 3.4 : Gemi direnci incelemesinde bilgi akış çevirimi 29
Şekil 3.5 : Gemi direnci tahmin yöntemleri ve örnekleri 30
Şekil 3.6 : Deney havuzu. 32
Şekil 3.7 : Model arabası. 32
Şekil 3.8 : Akışkanlar dinamiğinin 3 boyutu 35
Şekil 3.9 : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği algoritması 37
Şekil 3.10 : Sonlu kontrol hacminin 2 farklı yaklaşım 38
Şekil 3.11 : Sonsuz küçük akışkan elemanı için 2 farklı yaklaşım 39
Şekil 4.1 : Fiziksel pürüzlülüğün sınıflandırılması 42
Şekil 4.2 : Biyolojik pürüzlülüğün sınıflandırılması 43
Şekil 4.3 : Rt'nin temsili fiziksel gösterimi 44
Şekil 4.4 : Örnek ortalama pürüzlülük hesabı 45
Şekil 4.5 : Ortalama pürüzlülük ve ortalama karekök pürüzlülüğünün temsili gösterimi 45
Şekil 4.6 : Sınır tabaka kalınlığı δ ve hız profilinin değişimi 47
Şekil 4.7 : Düz bir plaka üzerinde oluşan türbülans sınır tabaka 48
Şekil 4.8 : Laminer ve türbülans sınır tabaka hız profilleri 49
Şekil 4.9 : Pürüzsüz ve pürüzlü düz plakalar üzerindeki türbülans sınır tabaka hız profilleri 49
Şekil 4.10 : Türbülans sınır tabakada duvar kanunu 52
Şekil 4.11 : Türbülans sınır tabaka hız profili 53
Şekil 4.12 : Pürüzlü ve pürüzsüz düz plakalar için türbülans sınır tabaka dış bölgede hız sapma kanunu 55
Şekil 4.13 : Türbülans sınır tabaka kesme gerilmeleri profili. 55
Şekil 4.14 : Pürüzlülüğün duvar kanununa etkisi 57
Şekil 4.15 : Pürüzlülük Reynold sayısındaki artışın hız profili üzerindeki etkileri 58
Şekil 4.16 : Pürüzlülük fonksiyonu ve pürüzlülük Reynolds sayısı arasındaki ilişki 58
Şekil 4.17 : Farklı pürüzlülük Reynolds sayılarının dış katmandaki etkileri 59
Şekil 4.18 : Test plakaları üzerindeki kuru *fouling* miktarı 62
Şekil 4.19 : 2 knot hızında, *fouling*'in sürtünme direnci üzerine etkisi 63
Şekil 4.20 : 9 knot hızında, *fouling*'in sürtünme direnci üzerine etkisi 64
Şekil 4.21 : Yudachi destroyerinin havuzlamadan sonra farklı hızlarla yapılan çekme deneylerindeki direnç değerleri 64
Şekil 4.22 : Yudachi direnç değerlerinin yüzde olarak artışı 65

Şekil 4.23 : Deneyde kullanılan plakanın boyutları 66
Şekil 4.24 : Farklı Reynolds sayıları için bulunan toplam direnç katsayıları 66
Şekil 4.25 : Farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci ve dalga direnci katsayıları 67
Şekil 4.26 : Deney düzeneği ve plaka 68
Şekil 4.27 : Temiz plakaların farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci katsayıları 70
Şekil 4.28 : 287 gün boyunca *fouling*'e maruz kalmış plakaların farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci katsayıları 70
Şekil 4.29 : Temizlenmiş plakaların farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci katsayıları 71
Şekil 4.30 : 12 knot hızında temiz, *fouling*'e maruz kalmış ve temizlenmiş durumlar için gemi boyutundaki (L=150m.) sürtünme direnci katsayısı artışı tahmini 71
Şekil 4.31 : Granville benzerlik kanunu prosedürü 72
Şekil 4.32 : $k_s = 30\mu m$ için farklı hızlardaki gerekli şaft gücü miktarları 73
Şekil 5.1 : Plakanın ana boyutları. 79
Şekil 5.2 : Sonlu kontrol hacminin boyutları. 80
Şekil 5.3 : Plaka ve kontrol hacminin profil görüntüsü. 80
Şekil 5.4 : Çözüm hacminin (domain) görüntüsü. 81
Şekil 5.5 : Çözüm hacminde a) giriş ve b) çıkış bölgeleri. 81
Şekil 5.6 : Çözüm hacminde a) dip ve b) serbest su yüzeyi. 82
Şekil 5.7 : Çözüm hacminde a) duvar ve b) simetri düzlemi. 82
Şekil 5.8 : Çözüm hacminde plaka. 83
Şekil 5.9 : Seçilen ağ (mesh) özellikleri. 83
Şekil 5.10 : Çözüm ağı. 84
Şekil 5.11 : Çözüm ağı içinde plakanın görüntüsü. 84
Şekil 5.12 : Düğüm noktası, yüzey ve hücre. 85
Şekil 5.13 : Surface remesher ile örülmüş bir yüzey ağı örneği 86
Şekil 5.14 : Trimmer hücreler ile örülen bir ağ örneği 87
Şekil 5.15 : Prism layer mesher seçeneği ile oluşturulmuş sınır tabaka temsili 87
Şekil 5.16 : Fizik bölümünde seçilen matematiksel modeller. 88
Şekil 5.17 : Yakın duvar modeli ve duvar fonksiyonu yaklaşımı 90
Şekil 5.18 : Pürüzsüz plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları. 91
Şekil 5.19 : Pürüzsüz plakanın sürtünme direnci iterasyonları. 92
Şekil 5.20 : Pürüzsüz plaka analiz artık sonuçları iterasyonları. 92
Şekil 5.21 : 60 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları 93
Şekil 5.22 : 60 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci iterasyonları 93
Şekil 5.23 : 60 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları 94
Şekil 5.24 : 220 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları 94
Şekil 5.25: 220 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci iterasyonları 95
Şekil 5.26 : 220 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları 95
Şekil 5.27 : TBT SPC ile boyanmış plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları. 96

Şekil 5.28 : TBT SPC ile boyanmış plakanın sürtünme direnci iterasyonları. 96
Şekil 5.29 : TBT SPC ile boyanmış plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları. ... 97
Şekil 5.30 : Doğrulama için HAD ile bulunan sürtünme direnci katsayısı değerleriyle deneylerde bulunan sürtünme direnci katsayısı değerlerinin karşılaştırılması 98
Şekil 5.31 : Parametrik analiz sonucu bulunan farklı pürüzlülük değerlerine karşılık gelen sürtünme direnci katsayıları 99
Şekil 5.32 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için bulunan sürtünme direnci katsayılarının pürüzlülük yüksekliğine göre değişimi 100
Şekil 5.33 : Pürüzsüz yüzey yerel akış hızları. 101
Şekil 5.34 : *Antifouling* boya uygulanmış yüzey yerel akış hızları. 101
Şekil 5.35 : Bozulmuş boya durumu veya hafif kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları 102
Şekil 5.36 : Ağır kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları..... 102
Şekil 5.37 : Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları..... 102
Şekil 5.38 : Orta kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları. 103
Şekil 5.39 : Ağır kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları..... 103
Şekil 5.40 : Global renk skalasına göre pürüzsüz yüzey yerel akış hızları..... 104
Şekil 5.41 : Global renk skalasına göre *antifouling* boya uygulanmış yüzey yerel akış hızları 104
Şekil 5.42 : Global renk skalasına göre bozulmuş boya durumu veya hafif kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları..... 104
Şekil 5.43 : Global renk skalasına göre ağır kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları 105
Şekil 5.44 : Global renk skalasına göre hafif kalkerli veya yosunlu *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları 105
Şekil 5.45 : Global renk skalasına göre orta kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları 105
Şekil 5.46 : Global renk skalasına göre ağır kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları 106
Şekil A.1 : Pürüzlülük değeri k=100 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……117
Şekil A.2 : Pürüzlülük değeri k=100 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……117
Şekil A.3 : Pürüzlülük değeri k=100 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……118
Şekil A.4 : Pürüzlülük değeri k= 150 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……118
Şekil A.5 : Pürüzlülük değeri k= 150 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……119
Şekil A.6 : Pürüzlülük değeri k= 150 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……119
Şekil A.7 : Pürüzlülük değeri k= 250 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……120
Şekil A.8 : Pürüzlülük değeri k= 250 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……120

Şekil A.9 : Pürüzlülük değeri k= 250 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……...121
Şekil A.10 : Pürüzlülük değeri k= 300 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..121
Şekil A.11 : Pürüzlülük değeri k= 300 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..122
Şekil A.12 : Pürüzlülük değeri k= 300 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..122
Şekil A.13 : Pürüzlülük değeri k= 350 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..123
Şekil A.14 : Pürüzlülük değeri k= 350 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..123
Şekil A.15 : Pürüzlülük değeri k= 350 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..124
Şekil A.16 : Pürüzlülük değeri k= 400 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..124
Şekil A.17 : Pürüzlülük değeri k= 400 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..125
Şekil A.18 : Pürüzlülük değeri k= 400 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..125
Şekil A.19 : Pürüzlülük değeri k= 450 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..126
Şekil A.20 : Pürüzlülük değeri k= 450 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..126
Şekil A.21 : Pürüzlülük değeri k= 450 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..127
Şekil A.22 : Pürüzlülük değeri k= 500 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..127
Şekil A.23 : Pürüzlülük değeri k= 500 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..128
Şekil A.24 : Pürüzlülük değeri k= 500 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..128
Şekil A.25 : Pürüzlülük değeri k= 550 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..129
Şekil A.26 : Pürüzlülük değeri k= 550 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..129
Şekil A.27 : Pürüzlülük değeri k= 550 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..130
Şekil A.28 : Pürüzlülük değeri k= 600 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..130
Şekil A.29 : Pürüzlülük değeri k = 600 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..131
Şekil A.30 : Pürüzlülük değeri k= 600 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..131
Şekil A.31 : Pürüzlülük değeri k = 650 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..132

Şekil A.32 : Pürüzlülük değeri k = 650 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..132
Şekil A.33 : Pürüzlülük değeri k = 650 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..133
Şekil A.34 : Pürüzlülük değeri k = 700 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..133
Şekil A.35 : Pürüzlülük değeri k = 700 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..134
Şekil A.36 : Pürüzlülük değeri k = 700 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..134
Şekil B.1 : Pürüzlülük değeri k = 30 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……135
Şekil B.2 : Pürüzlülük değeri k = 30 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……135
Şekil B.3 : Pürüzlülük değeri k = 30 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……136
Şekil B.4 : Pürüzlülük değeri k = 100 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……136
Şekil B.5 : Pürüzlülük değeri k = 100 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……137
Şekil B.6 : Pürüzlülük değeri k = 100 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……137
Şekil B.7 : Pürüzlülük değeri k = 300 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……138
Şekil B.8 : Pürüzlülük değeri k = 300 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……138
Şekil B.9 : Pürüzlülük değeri k = 300 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.....139
Şekil B.10 : Pürüzlülük değeri k = 1000 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..139
Şekil B.11 : Pürüzlülük değeri k = 1000 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..140
Şekil B.12 : Pürüzlülük değeri k = 1000 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..140
Şekil B.13 : Pürüzlülük değeri k = 3000 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……..141
Şekil B.14 : Pürüzlülük değeri k = 3000 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..141
Şekil B.15 : Pürüzlülük değeri k = 3000 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..142
Şekil B.16 : Pürüzlülük değeri k = 10000 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları……...142
Şekil B.17 : Pürüzlülük değeri k = 10000 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları……..143
Şekil B.18 : Pürüzlülük değeri k = 10000 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları……..143

SEMBOL LİSTESİ

C_A	: Korelasyon düzeltmesi
C_F	: Sürtünme direnci katsayısı
$C_{F,ITTC}$	: ITTC 1957 yöntemi ile bulunmuş sürtünme direnci katsayısı
C_{Fo}	: İki boyutlu levha sürtünme direnci katsayısı
C_k	: Pürüzlülük katsayısı
C_R	: Artık direnç katsayısı
C_T	: Toplam direnç katsayısı
C_V	: Viskoz direnç katsayısı
C_W	: Dalga direnci katsayısı
CO_2	: Karbondioksit
c_f	: Yerel sürtünme direnci katsayısı
D	: Çap
Fr	: Froude sayısı
f_x, f_y, f_z	: Birim parçacık üzerindeki kuvvet bileşenleri
k	: Form faktörü
k	: Pürüzlülük yüksekliği
k_s	: Eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği
k^+	: Pürüzlülük Reynolds sayısı
L	: Boy
L_m	: Model boyu
L_s	: Gemi boyu
NO_x	: Azotoksit
P_E	: Efektif güç
Ra	: Ortalama pürüzlülük yüksekliği
Re	: Reynolds sayısı
Re_o	: İki boyutlu levha Reynolds sayısı
R_F	: Sürtünme direnci
Rq	: Ortalama karekök pürüzlülük yüksekliği
R_R	: Artık direnç
R_T	: Toplam direnç
Rt	: Toplam pürüzlülük yüksekliği
Rt_{50}	: Ortalama pürüzlülük yüksekliği
Rz	: En yüksek 5 ve en alçak 5 çukur arsındaki ortalama pürüzlülük yüksekliği
S	: Islak yüzey alanı
SO_2	: Kükürtdioksit
U, V, W	: Sıvı hareketine ait hızın ortalama bileşenleri
u', v', w'	: Sıvı hareketine ait hızın çalkantı bileşenleri
U_e	: Sınır tabaka dış kenar hızı
U_m	: Model çekme hızı
U_s	: Gemi hızı
U_τ	: Sürtünme hızı
U_∞	: Serbest akış hızı

$\mathbf{U^+}$: Sınır tabakada boyutsuz hız
u, v, w : Sıvı hareketine ait hız bileşenleri
$\boldsymbol{V}$: Hız
$\vec{\boldsymbol{V}}$: Hız vektörü
V : Hacim
$\mathbf{V_c}$: Kritik hız
x, y, z : Kartezyen koordinatlar
$\mathbf{y^+}$: Sınır tabakada boyutsuz mesafe
$\Delta\mathbf{U^+}$: Pürüzlülük fonksiyonu
δ : Sınır tabaka kalınlığı
κ : von Karman sabiti
λ : Benzerlik oranı
μ : Dinamik viskozite
ρ : Özkütle
τ : Kesme gerilmesi
τ_w : Duvar kesme gerilmesi
ν : Kinematik viskozite

YÜZEY KİRLİLİĞİNİN GEMİ DİRENCİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Direnç, doğrudan gemi performansı ve yakıt tüketimini etkilediğinden, gemiler için çok önemli bir olgudur. Direncin fazla olması, bir geminin aynı yolu alması için daha fazla yakıt harcaması anlamına gelmektedir. Bu da verimliliği düşürmekte ve emisyonları artırmaktadır. Dolayısıyla, gemi direncini azaltma konusu gemi mühendisleri ve gemi sahipleri için çözülmesi gereken bir sorun olarak önemini korumaktadır. Özellikle son yıllarda uluslararası kuruluşlar tarafından çevre korunması ile ilgili getirilen kısıtlar, yakıt tüketimini bir başka deyişle, gemi direncini azaltma konusunu daha da önemli bir hale getirmektedir.

Gemi direnci temel olarak sürtünme direnci ve artık direnç olarak ikiye ayrılabilir. Özellikle normal ve düşük hızlarda seyreden ticaret gemileri için sürtünme direnci değerleri yaklaşık olarak toplam direncin %60-90'ı kadardır. Dolayısıyla sürtünme direncinin azaltılması, dünya üzerindeki deniz taşımacılığının kapasitesi düşünüldüğünde çok önemli bir konudur.

Direncin azaltılması, gemi dizaynının birbirleriyle çelişkili parametreleri arasında bir uzlaşma ile yapılması gerektiğinden bir hayli zordur. Direnci düşürmek adına gemi formunda yapılacak bir değişiklik, geminin stabilite, denizcilik gibi diğer özelliklerini de etkileyeceğinden dolayı, zorlu bir süreçtir. Bu konu ile ilgili çok çeşitli çalışmalar yapılmaktadır.

Sürtünme direncinin azaltılması için uygulanabilecek en etkin yol, tekne yüzey özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmalarıdır. Yüzeyin iyileştirilmesi, tekne yüzeyinde pürüzlülüğe yol açan fiziksel ve biyolojik pürüzlülük etkilerinin azaltılması anlamına gelmektedir. Fiziksel pürüzlülük özellikle geminin inşaası aşamasında alınacak tedbirlerle kolayca önlenebilmektedir. Fakat *fouling*'in, bir başka deyişle yüzey kirliliğinin, önlenmesi veya azaltılması bu kadar kolay değildir. Çünkü *fouling* gemi denizdeyken oluşur ve birçok etmene bağlıdır. Geminin denizde geçirdiği gün sayısı arttıkça *fouling* miktarı da artmakta ve böylece yüzey özellikleri bozulan geminin direnç değerleri çarpıcı biçimde artmaktadır.

Fouling'in önlenmesi veya azaltılması için kullanılan en etkili yöntem *antifouling* boyalardır. Bu boyalar çok çeşitli olup, salgıladıkları biyositlerle ve yüzey özellikleri sayesinde deniz canlılarının gemi yüzeyine yapışıp büyümesini engellemekte veya azaltmaktadır. TBT içeren *antifouling* boyalar hem düşük başlangıç pürüzlülük değerleri, hem etkili *antifouling* özellikleri hem de uzun süre bakım gerekmeden kullanılabilmesi sayesinde uzun yıllar boyunca tercih edilmişlerdir. Fakat yapılan araştırmalar sonucu TBT'nin deniz ortamında birçok olumsuz etkisi olduğu saptanmıştır. Dolayısıyla, IMO 1 Ocak 2003'den itibaren TBT bileşiklerinin yeni uygulamalarını, 1 Ocak 2008'den itibaren ise TBT içeren *antifouling* sistem bulundurulmasını yasaklamıştır.

2000'li yıllarda çevre dostu *antifouling* boya alternatifleri üzerine araştırmalar hızlı bir şekilde başlamış ve halen devam etmektedir. Bu süre zarfında çeşitli alternatifler bulunmuştur. Bu boyalar *fouling* ile mücadelede TBT içerikli boyalar kadar etkin olmasa da daha çevreci özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Fakat halen arzu edilen özellikleri taşıyan bir *antifouling* boyanın bulunduğu söylenemez. Geleceğin *antifouling* boyası düşük başlangıç sürtünmesine sahip, bir sonraki havuzlama operasyonuna kadar uzun süreli *fouling* önleme kabiliyetine sahip ve aynı zamanda toksik bileşikler içermeyen özellikte olmalıdır. Bu tür özellikleri içeren yeni boya uygulamalarının bulunması içinse, özellikle *fouling* olayının ve *antifouling* boyaların gemi direnci üzerine etki mekanizmalarının tam olarak anlaşılması gerekmektedir.

Bu nedenle, bu çalışmada *fouling*'in ve *antifouling* boyaların gemi direnci üzerine etkileri araştırılmış, etki mekanizmaları üzerinde durulmuş, yapılan çalışmalar ve kabuller incelenerek, bu çalışmalar ışığı altında, hesaplamalı akışkanlar dinamiği temelli bir yazılım (STAR-CCM+) kullanılarak sayısal bir araştırma yapılmıştır. Öncelikle *fouling* ve bununla mücadele yöntemleri tanıtılmış, bu yöntemler arasında en etkili olan *antifouling* boyalar üzerinde detaylı şekilde durulmuştur. Bu boyalar ile ilgili oluşturulan yasal düzenlemelere de değinilmiştir.

3. Bölümde genel gemi direnci teorisine değinilmiş, gemi direnci bileşenlerinden konu ile ilgili olan sürtünme direnci üzerinde durulmuş ve gemi sürtünme direnci ile ilgili yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca gemi direnci tahmin yöntemleri tanıtılmış, bu yöntemlerden özellikle model deneyleri ve bu çalışmada kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi üzerinde durulmuştur. Böylece bu tez kapsamında yapılan uygulamanın dayandığı temeller incelenmiştir.

Bir sonraki bölümde, *fouling*'in ve *antifouling* boyaların direnç üzerine etkileri incelenmiştir. Bu noktada *fouling*'in yüzey pürüzlülüğü olarak modellenmesine karar verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ile ilgili genel bilgiler ve uygulamada kullanılan pürüzlülük parametresi tanıtılmıştır. Yine *fouling*'in, yani pürüzlülüğün direnç üzerine etkilerini anlayabilmek için türbülans sınır tabaka kavramı irdelenmiştir. Türbülans sınır tabakanın özellikleri ve bölgeleri ayrıntılı olarak irdelenmiş, sonrasında ise pürüzlülüğün sınır tabaka üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu bölümde elde edilen bilgiler uygulama bölümünde çok önemli bir yer teşkil etmektedir. Sonrasında, *fouling*'in ve *antifouling* boyaların direnç üzerine etkilerini inceleyen çalışmalar üzerinde durulmuş, özellikle bu etkileri araştırmak için yapılan deneyler incelenmiştir.

Uygulama bölümünde STAR-CCM+ kullanılarak, düz bir plakanın deney havuzundaki çekme deneylerinin modellenmesi amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle STAR-CCM+ programı ve özellikleri tanıtılmış, ardından da uygulamada yapılan kabuller açıklanmıştır. Daha sonra, adım adım uygulamanın nasıl yapıldığı anlatılmıştır. Öncelikle programın ve modelin doğrulanması için programın verdiği sonuçlarla literatürde bulunan deney sonuçları karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür. Doğrulama sonrasında parametrik bir çalışma yapılmış ve farklı yüzey durumları için bu plakanın sürtünme direnci ve sürtünme direnç katsayısı değerleri bulunmuştur. Daha sonra ise NSTM'de belirtilen her bir *fouling* durumu için sürtünme direnci, sürtünme direnç katsayısı ve plaka üzerindeki yerel akış hızları bulunmuş, sürtünme direnç katsayısının bu *fouling* durumlarındaki değişimi yüzde olarak verilmiştir. Böylece, temel bir örnek üzerinden programın uygulaması gösterilmiş ve *fouling*'in nasıl modelleneceği üzerine çeşitli bilgiler verilmiştir.

Son bölümde ise bu tez kapsamında elde edilen genel sonuçlardan bahsedilmiş, genel bir değerlendirme yapılmış ve ileride yapılması gereken çalışmalarla ilgili önerilerde bulunulmuştur.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FOULING ON SHIP RESISTANCE

SUMMARY

Resistance is of great importance to ships since it affects ship performance and fuel consumption. The more resistance a ship has, the more fuel it consumes for the same range. This decreases the efficiency thus increases emissions. Therefore reducing the ship resistance is an aim to reach for both naval architects and ship owners. Especially in the last decades it becomes more important to reduce the fuel consumptions because of the restrictions and regulations entered into force by the international organisations about environmental issues.

Ship resistance can be broken into two parts; frictional resistance and residuary resistance. Especially for merchant ships which sail with normal or low velocity, frictional resistance can be 60-90% of the total resistance. Therefore reducing the ship frictional resistance is very important considering the volume of world trade by sea.

Ship design is a very difficult procedure since it is a compromise among the conflicting parameters. Reduction in ship resistance can be achieved by changing the design parameters. Nevertheless, changing a parameter to reduce the resistance may affect other properties of a ship such as stability or seakeeping.

The best way of reducing the frictional resistance is the treatment of hull surface in terms of improving surface condition due to physical and biological roughness. Physical roughness can be avoided or minimised by taking measures during the shipbuilding procedure easily. On the other hand, it is not easy to avoid fouling (biological roughness) since it occurs immediately as soon as a ship immerses, continues on her seaway and it depends on various parameters such as time spent in sea, surface condition, the salinity of the sea, etc... With ascending immersion time, the amount of fouling raises; ultimately, the frictional resistance increases dramatically.

The most effective way to avoid or minimise fouling is antifouling coatings. There are variety of types of antifouling coatings which prevent the settlement and growth of the marine species on the hull by means of releasing biocides or its own surface properties. The antifouling coatings containing TBT were highly preferred for years since they have low initial roughness and perfect antifouling properties, besides they do not need dry docking for a long time. However the research showed that TBT has a lot of negative effects on the environment. Hence IMO banned the applications of antifouling paints containing TBT by 2003 and the presence of TBT on ships by 2008.

The research on environmentally friendly antifouling coatings has been accelerated in 2000’s due to this legislation and some alternatives have already been found. Although they are not as effective as TBT containing coatings, they are more environmentally friendly than conventional TBT containing coatings. Nevertheless,

the desired antifouling coating has not been developed yet. The future antifouling coating must have initial frictional resistance, long term antifouling ability and no toxic compounds.

The effect of fouling and antifouling coatings on ship resistance should be studied and understood in details to develop such a paint system. Therefore, in this study, the effect of fouling and antifouling coatings on ship resistance was investigated, the previous studies and assumptions were investigated and some numerical applications were carried out by means of a CFD software (STAR-CCM+).

In the introduction part, the aim of this research was mentioned and literature review and some important studies were presented.

In Chapter 2, firstly fouling was introduced, fouling mechanism and fouling stages were revealed. Then prevention methods, strategies and history were addressed. Afterwards, antifouling methods were introduced briefly and antifouling coating types were mentioned in details as the most effective way of fouling prevention method. It is clearly seen that TBT containing coatings were the leading coating type because of its perfect antifouling properties. On the other hand it has negative effects on non-target living organisms, even on human by food chain. The legislations about these coatings were also introduced and the effect of legislation was addressed clearly.

In Chapter 3, ship resistance theory was mentioned, the details of ship resistance and the frictional resistance were explained in details, and furthermore, the studies on frictional resistance were examined. Two dimensional and three dimensional frictional resistance formulations and their developments were revealed clearly. It should be noted that frictional resistance is induced by the frictional forces around hull therefore the surface condition of a hull is the predominant factor which affects the frictional resistance.

The towing test conferences have been held for years to share the knowledge between naval architects and create some standards for the most effective ship resistance prediction method; namely towing tests and the applications. Hence, the history of these conferences and some remarkable results from these conferences were introduced briefly. Afterwards, ship resistance prediction methods were presented and compared with each other; especially model tests and CFD methods were expressed in details. Therefore, the fundamentals of the method used in the application part were introduced. No doubt model towing test is the most successful and widespread method to determine the resistance of a ship accurately, however CFD methods and computing capability have been improved as the most promising method to determine the ship resistance in the future. CFD softwares and methods can accelerate the preliminary design procedure and decrease the time spent in design spiral. Hence, extensive research has been devoted to CFD methods for decades.

In the chapter, fundamentals of CFD were introduced comprehensively. Besides, flow models used and governing equations to be solved in analysis procedure was revealed.

In the next chapter the effect of fouling and antifouling coatings on ship resistance was investigated. At this point, it was decided to model fouling as surface roughness. Therefore, general information about roughness was given and the related roughness measurement parameters were introduced. The roughness parameter used in the

application; namely equivalent sand roughness height, was introduced briefly, also a range of representative fouling and antifouling conditions and the corresponding equivalent sand roughness height values were given.

Furthermore, turbulent boundary layer and its properties were revealed since the flow around a hull is generally turbulent. The regions of turbulent boundary layer were defined and the laws in the turbulent boundary layer were presented. Moreover, the velocity profiles and formulations were invesitgated in each region. The effect of roughness on turbulent boundary layer was demonstrated. The findings of this part are very important for the application part since the modelling procedure and analysis were carried out tahnks to the knowledge based on these findings.

It is seen that, in case of a rough surface, significant reduction occurs in the logarithmic velocity profile while the velocity profile in the outer region remains the same. Thus it can be said that the outer region of the turbulent boundary layer is not affected by surface roughness; in other words, the velocity profile in the outer region is independent from surface roughness.

Afterwards, the studies carried out to investigate the effect of roughness, fouling and antifouling on ship resistance were given; especially the experiments were studied in more details. It should be noted that the towing tests of flat plates were used by various researchers to investigate this effect.

In the application part, it is aimed to conduct towing test simulations of a flat plate by means of STAR-CCM+. Firstly STAR-CCM+ and its features were introduced and the assumptions made in the application were clarified. It is obvious that some assupmtions must be made to model a physical phenomenon and these assumptions must satisfy and match the fundamentals of the phenomenon. For this reason, the basic fundamentals and the physics of the phenomenon must be understood very well before using any software.

The application procedure was explained step by step. Firstly, the pre-processing was achieved. It includes preparation of the geometry, defining the computational zone; generating meshes and cells, etc. Different types of surface and volume mesh properties were introduced and the selected mesh types were introduced with the selection reasons.

Then, computation procedure including the selection of the appropriate mathematical and physical models, numerical algorithms and boundary conditions for the analysis were revealed. It should be noted that although this phenomenon is unsteady, because of the fact that there is no free surface in the model and the same velocity is kept in the simulation, steady model was chosen. It does not affect the solution or accuracy because of the aforementioned reason, also it provides a faster analysis.

In the validation procedure, a towing test simulation of a flat plate, which has smooth and rough surfaces, similar to those given in literature, was conducted. The results were compared with the experiment results given in literature in order to validate the software and the model. It is clearly seen that there is consistency between these results.

After the validation procedure, a parametric study was carried out hence frictional resistance and frictional drag coefficient variations depending on the roughness conditions were found. This procedure was carried out for 16 different equivalent sand roughness heights.

Afterwards, frictional resistance, frictional drag coefficient and local flow velocity values on the flat plate were demonstrated for a range of representative coating and fouling conditions based on NSTM, also the increase in frictional drag coefficient for each specific condition were demonstrated in a comperative manner.

In the final chapter, the results obtained from the study were discussed and a general assessment was done. Also, further studies for the future were recommended.

1. GİRİŞ

Deniz araçları, su altı yüzeyi temiz ve pürüzsüz olduğunda daha az yakıt yakmakta ya da aynı miktar yakıtla daha fazla yol almaktadır. Dolayısıyla tekne yüzeyinin durumunu doğrudan etkileyen yüzey kirliliği deniz yolu taşımacılığı verimini etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Burada yüzey kirliliği olarak bahsedilen olay, tekne su altı yüzeyine yosun, midye ve yumuşakçalar gibi makro ve mikro boyuttaki çok çeşitli deniz canlılarının yapışması ve tutunması olayıdır. Bu olay literatürde *fouling* olarak anılmaktadır. Tez kapsamında bu olay ve bu olay sonucu oluşan tabaka bundan sonra *fouling* olarak anılacaktır.

Her yıl deniz yolu taşımacılığında yaklaşık olarak 300 milyon ton yakıt kullanıldığı ve bu miktarın zaman içinde daha da artacağı tahmin edilmektedir (IMO, 2009). Hiçbir önlem alınmaması ve yeni teknolojiler kullanılmaması durumunda 2020 yılına kadar, tüketilen yakıtlardan kaynaklanan gaz emisyonunun ise %38 ile %72 arasında artacağı tahmin edilmektedir (IMO, 2009).

Antifouling (AF) boya teknolojisi sayesinde tekne su altı yüzeyine deniz canlılarının yapışması belli bir oranda engellenmekte ve böylece su altı yüzeyi daha pürüzsüz hale gelmektedir. Bu teknoloji sayesinde yıllık olarak yakıtta 60 milyon $ tasarruf edildiği, karbondioksit ve sülfürdioksit emisyonunu sırasıyla 384 milyon ton ve 3,6 milyon ton azaldığı tahmin edilmektedir (IMO, 2009).

Antifouling boyaların birincil görevi, yüzey bozulmaları ve *fouling* sonucunda oluşan sürtünme direncinin artmasını sınırlamaktır. Tekne su altı yüzeyi tamamen pürüzsüz ve temiz olsa bile, bazı tekne tiplerinde sürtünme direnci toplam direncin %90'ı kadar olabilmektedir (Schultz, 2007). Bu yüzden bir teknenin yüzey durumu, geminin performansı açısından çok önemlidir.

1970'lerden beri *antifouling* boyalarda en çok tercih edilen biyosit tributyltin (TBT)'dir. TBT'nin toksik bir madde olması dolayısıyla, TBT içeren boyalar tekne yüzeyinde deniz canlılarının büyümesini engellemektedir. 3 yıllık işletim sonrasında tekne temizlenme işlemi gerekmesine rağmen, TBT içeren boyaların 60 aya kadar

yenilenme ihtiyacı göstermemesi ekonomik bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Tüm bu işlevsel özellikleri nedeniyle TBT içeren boyalar uzun bir süre boyunca tercih edilmişlerdir. Fakat 25 yıldır yapılan çeşitli araştırmalar sonucu toksik bir madde olan TBT'nin tekneye etkisi olmayan diğer deniz canlılarını da olumsuz olarak etkilediği ortaya çıkmıştır. Çevrede çok kalıcı olmasının yanı sıra TBT bileşikleri çok düşük konsantrasyonlarda bile deniz organizmalarına toksik etkiler gösterebilmekte ve insana kadar uzanan besin zincirine girerek organizmalarda artan seviyelerde birikebilmektedir (Okay, 2004).

1988 yılında Uluslarası Denizcilik Örgütü (IMO)'nün Deniz Çevresi Koruma Komitesi'nde (Marine Environment Protection Committee, MEPC) bu konu ile ilgili problem dile getirilmiş, Kasım 2001'de ise sonuç kararı yayınlanmıştır. Bu konvansiyona göre 1 Ocak 2003 tarihinden itibaren TBT bileşiklerinin yeni uygulamaları, 1 Ocak 2008 tarihinden itibaren ise gemilerde TBT içeren *antifouling* sistem bulundurulması yasaklanmıştır (IMO, 2001). Bu kararın alınmasından sonra TBT içermeyen ve en az TBT içeren boyalar kadar verimli yeni *antifouling* boya arayışları hızlanmış ve konu ile ilgili araştırmalar başlamıştır.

1990'ların ortasında *fouling* giderici (foul-release, FR) boyaların bulunmasından sonra, boya tipi seçiminin gemi direnci üzerinde çok etkili olduğu kanıtlanmıştır. Fakat, bir *antifouling* boyanın direnç performansından bahsederken en önemli şeyin boyanın uzun süreli *fouling* önleme kabiliyeti olduğu da unutulmamalıdır. Başka bir deyişle, geleceğin *antifouling* boyası, düşük başlangıç sürtünmesi ve bir sonraki havuzlama operasyonuna kadar uzun süreli *fouling* önleme kabiliyetine sahip olmalıdır. Bu tür özellikleri içeren yeni boya uygulamalarının bulunması içinse, özellikle *fouling* olayının ve *antifouling* boyaların gemi direnci üzerine etki mekanizmalarının tam olarak anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle, bu çalışmada *fouling*'in ve *antifouling* boyaların gemi direnci üzerine etkileri araştırılmış, etki mekanizmaları üzerinde durulmuş, yapılan çalışmalar ve kabuller incelenerek, bu çalışmalar ışığı altında ticari bir paket program kullanılarak sayısal bir araştırma yapılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Bu çalışmada *fouling*'in ve *antifouling* boyaların gemi direnci üzerindeki etkileri teorik olarak araştırılarak, bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD veya CFD)

programı (STAR-CCM+) ile bu etkileri inceleyen çeşitli sayısal analizlerin yapılması amaçlanmıştır. Bu analizlerin vermiş olduğu sonuçlar, deney sonuçları ile karşılaştırılarak HAD programlarının gemi direnci ve pürüzlülüğün dirence etkisi ile ilgili güvenirliği yönünden bir fikir sahibi olunması istenmiştir.

Genel olarak HAD programlarının temelinde kullanılan yöntemler ve teoriler hakkında temel bilgiler verilmesi, *fouling*'in dirence etkilerinin modellenmesi için kullanılan matematiksel, fiziksel ve sayısal modeller ile ilgili bilgiler verilmesi amaçlanan konulardan birisidir. Bilindiği gibi HAD yönteminde temel denklemler aynı olsa da fiziksel ve matematiksel modeller ve seçilen sınır şartları sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu modellerin ve sınır şartlarının seçimi kullanıcıya bırakılmıştır. Dolayısıyla, incelenen farklı konular için farklı modellemelere gidilmektedir. Bu çalışmada incelenen *fouling*'in gemi direncine etkisi ile ilgili olarak hangi modellerin seçileceği, literatür araştırması, çok sayıda analiz ve analiz sonuçlarının mevcut deney sonuçlarıyla doğrulanması ile kararlaştırılmıştır. Problemin doğru analiz edilmesi için hangi modellerin seçilmesi gerektiğinin bulunması da bu tezin amaçları arasındadır.

Uygulama bölümünde STAR-CCM+ programı kullanılarak, düz bir plakanın deney havuzundaki çekme deneyleri simülasyonu gerçekleştirilmiş ve farklı yüzey durumları için plakanın sürtünme direnci ve sürtünme direnç katsayısı değerleri bulunmuştur. Böylece, temel bir örnek üzerinden programın uygulaması gösterilmiş ve bu olayın nasıl modelleneceği üzerine çeşitli bilgiler verilmiştir.

Sonrasında ise, farklı pürüzlülük değerleri ve çeşitli *fouling* durumları için sürtünme direnci analizleri yapılarak *fouling*'in dirence ne ölçüde etkilediğinin araştırması sayısal olarak yapılmıştır.

1.2 Kaynak Araştırması

Bu çalışmanın konusu olan *fouling*'in ve *antifouling* boyaların gemi direnci ve performansı üzerine etkilerini doğrudan ve dolaylı olarak inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları 4. Bölümde başka bir konu başlığı altında ayrıntılarıyla anlatılmıştır.

Froude (1872, 1874) gemi direncinin sürtünme ve artık direnç olarak ikiye ayrıldığı kabulü ile plakalara etkiyen sürtünme direnci değerlerini bulmak için İngiltere Torquay'daki deney havuzunda bir takım deneyler yapmıştır. Bu deneyler sonucunda

çeşitli ampirik formüller bularak, farklı özelliklerdeki yüzeylerin farklı sürtünme direnci değerlerine sahip olduğunu fark etmiştir.

Fouling'in direnç üzerine etkisi ile ilgili ilk kapsamlı deney McEntee (1915) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada, çelik plakalar korozyon önleyici boyalarla boyandıktan sonra, küçük midyelerin yapışması için belli bir miktar denizde bırakılmış ve sonrasında bu plakalara çekme deneyleri yapılmıştır.

Kempf (1936) pürüzlülüğün sürtünme direnci üzerine etkisini açıklamak için bir pürüzlülük katsayısı, C_k, tanımlamıştır. Bu katsayı, farklı yüzeyler için farklı olarak tanımlanmış ve dubalarla yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilmiştir.

Fouling'in direnç üzerine etkilerini gösteren, çok kapsamlı olarak yapılmış deneylerden biri de Japon eski destroyeri Yudachi üzerinde yapılmıştır (Izubuchi, 1934). Bu eski destroyer 1931 yılında havuza alınmış, boyanmış ve pervanesi çıkarılmıştır. Havuzlama işleminden sonra *fouling*'in direnç üzerine etkilerini araştırmak üzere belirli aralıklarla çekme testlerine tabi tutulmuştur.

Candries (2001) TBT içermeyen kendi kendini parlatan (TBT free self-polishing copolymer) ve FR boyaların dirence etkisini inceleyen deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu deneyler kapsamında bir plaka, hem TBT içermeyen SPC hem de FR boyalarla boyanarak deney havuzunda çekilmiştir.

Schultz (2004) plaka deneyleri ile elde ettiği sonuçlarla, Granville (1958) benzerlik kanununu kullanarak, 150 m.'lik bir geminin 12 knot (6,2 m/s) hızındaki temiz, *fouling*'e maruz kalmış ve sonrasında temizlenmiş durumlar için sürtünme direnci katsayısı artışlarının tahmini yapmıştır. Bu çalışmada farklı *fouling* durumları için pürüzlülük fonksiyonları incelenmiştir. Ayrıca yapılan pürüzlülük ölçümlerini temel alarak bazı özel durumlar için eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği tanımlaması yapılmıştır.

Yine Schultz (2007) bir savaş gemisinin (FFG-7) çeşitli *fouling* durumlarında ve *antifouling* boya uygulamalarındaki direnç ve güç tahminlerini yapmıştır. Bu tahmini model direnç ölçümleri ve sınır tabaka benzerlik kanunu kullanarak yapmıştır.

Bu çalışmalar dışında, bu tezin konusunu oluşturan diğer bölümlerle ilgili de kaynak taraması yapılmış ve ilgili bölümlerde yeri geldikçe bu çalışmalardan bahsedilmiştir

2. *FOULING* VE *ANTIFOULING* BOYA TEKNOLOJİSİ

2.1 Giriş

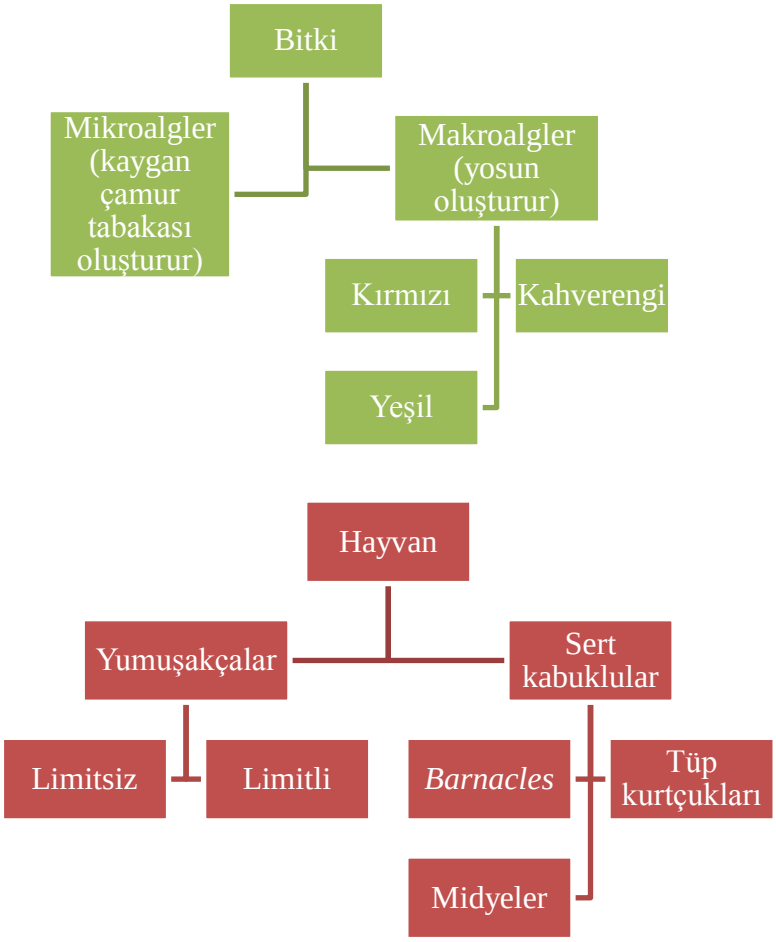
Fouling tekne yüzeyinde istenmeyen etkiler yaratmakta ve tekne sürtünme direncini ciddi biçimde artırmaktadır. Böylece verim bir hayli azaldığı gibi, fazla yakıt yakılmasından dolayı çevreye salınan zararlı bileşikler de artmaktadır.

Bu bölümde *fouling* ve *antifouling* teknolojisi temel olarak tanıtılmıştır. Öncelikle *fouling*'in oluşumu ve etkileri açıklanmış, ardından da günümüze kadar uygulanan *fouling* ile mücadele yolları irdelenmiştir. Daha sonra *fouling* ile mücadelede en etkin yol olan *antifouling* boyalar, özellikleriyle beraber karşılaştırılarak tanıtılmıştır. Son olarak da *antifouling* boyalar ile ilgili yasal düzenlemelerden bahsedilmiştir.

2.2 *Fouling*

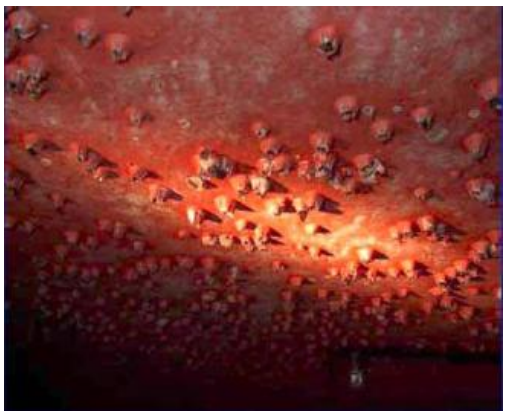
Yüzeyler üzerinde mikroorganizmaların, bitkilerin ve hayvanların birikmesi olayına *fouling* denir (Callow, 1996). Lewis'in (1998) tanımına göre denizlerde olan *fouling* su altına batmış ya da yarı batmış yüzeyler üzerinde organizma topluluklarının yerleşmesi ve büyümesi anlamına gelmektedir.

Denizler canlı çeşitliliği açısından çok zengindirler. Denizlerde yaşayan, canlı türü sayısının 2500'den daha fazla olduğu tahmin edilmektedir (Anderson ve diğ, 2003). *Fouling* miktarı esas olarak coğrafi bölgeye bağlıdır. Bu canlı türleri mikro ve makro organizmalar olmak üzere iki ana kategoriye ayrılabilir. Kaygan çamur tabakası veya alg, mikro *fouling*'e neden olan organizmalara örnek olarak verilebilir. *Barnacles*, tüp kurtçuklar ve midye gibi sert kabuklu türler ise makro organizmalara örnektirler. *Fouling*'e neden olan deniz organizmaları Şekil 2.1'deki gibi sınıflandırılabilir.



Şekil 2.1 : *Fouling*'e olan organizmaların sınıflandırılması (Atlar, 2008).

Sert kabuklu *barnacles* tutundukları yüzeylerdeki boya sistemine zarar vererek korozyona neden olmaktadırlar. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te *fouling*'e maruz kalmış tekneler görülmektedir.

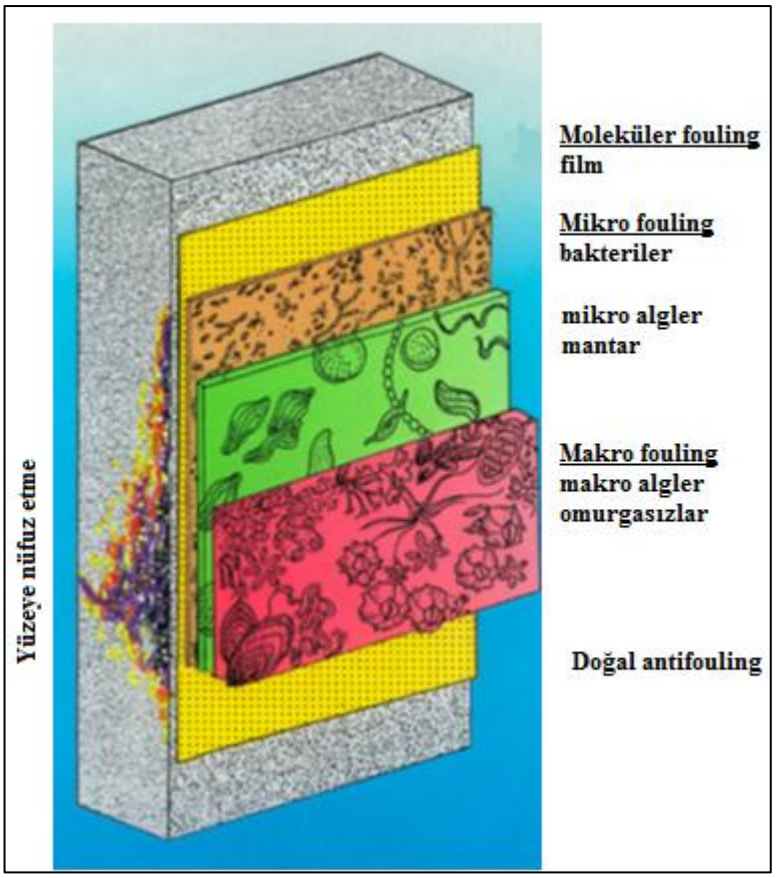


Şekil 2.2 : *Barnacles* ile kaplanmış gemi dibi (Atlar, 2008).



Şekil 2.3 : *Fouling*'e maruz kalmış bir gemi (Url-1).

Fouling olayı 4 ana aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar Şekil 2.4'te görülmektedir (Candries, 2001).



Şekil 2.4 : *Fouling* oluşum aşamaları (Candries, 2001).

Fouling gemi denize girer girmez başlamaktadır. Tekne yüzeyi üzerinde hızlı bir şekilde suda çözünmüş olan organik maddeler ve polisakaritler, proteinler ve protein kırıntıları gibi moleküller birikir (Egan, 1987). Bu aşama *fouling*'in ilk aşamasıdır ve saniyeler içinde başlar, birkaç saat içinde *fouling* belli bir noktaya gelir ve sonraki aşamalar için uygun bir ortam oluşur. *Fouling* genellikle gemi hareketsizken yani çoğunlukla limandayken oluşur. *Fouling* problemi coğrafi bölgelere göre değişiklik gösterse de, daha çok tropik sularda kendini göstermektedir (Stevens, 1937). *Fouling*'in doğası sudaki hayvan ve bitki çeşitliliği, suyun tuzluluk oranı ve sıcaklığı, tekne yüzeyinin güneş ışığıyla teması, geminin limana girdiği mevsim ve limanda geçirdiği zamana bağlıdır (Candries, 2001).

İkinci aşamada bakteri ve tek hücreli canlılar bu tabaka üzerinde mikrobiyal bir film şeklinde birikmeye başlarlar. Bu tabakaya kaygan çamur tabakası denmektedir. Bu canlılar, makro *fouling*'e neden olan canlıların yapışmasına olanak sağlayacak bazı kimyasallar salgılarlar.

Mikrobik kolonilerin yapışkan salgılarının ve pürüzlülüklerinin varlığı, daha fazla organizmanın ve parçacığın yüzeye yerleşmesine olanak sağlar. Bunlar daha çok alg sporları, deniz mantarı ve protozoadır. Mikrobiyal filmden, çok hücreli birincil üreticiler, tüketiciler ve bakteriler gibi canlıları içeren daha karmaşık bir topluluk oluşumu *fouling*'in üçüncü aşaması olarak değerlendirilmektedir (Bertram, 2000).

Dördüncü aşama makro-alg ve deniz hayvanlarının yerleşmesi ve büyümesini içerir. Özellikle bu aşamada tekne yüzeyindeki *fouling* tekne direncini çok önemli ölçüde artırmakta ve gemi performansını düşürmektedir.

Fouling'in fazla yakıt tüketimi, hava kirliliği, işgalci türlerin taşınımı gibi doğaya yaptığı pek çok olumsuz etki vardır. Gemi üzerindeki çok az miktardaki *fouling* bile yakıt tüketiminde önemli artışlara neden olabilir. Örneğin 6 ay boyunca *fouling*'e maruz kalmış bir gemi üzerinde 150 kg/m^2 *fouling* oluşabilir. 40000 m^2 sualtı yüzeyi olan bir gemiyi ele aldığımızda bu değer 6000 ton gibi bir değere ulaşacaktır. Dolayısıyla geminin yakıt tüketiminde %50'ye varan artışlar olabilir (Champ, 1996). Yakıt tüketimindeki artış nedeniyle atmosfere salınan CO_2, SO_2, NO_x gazlarının seviyelerinde artış meydana gelir. Tüm dünyadaki salınımları düşünürsek bu durumda 22 milyon ton CO_2, ve 0.6 milyon ton SO_2'nin atmosfere girdiği tahmin edilmektedir (Champ, 1996). Ayrıca *fouling* nedeniyle işgalci türler kendi ekosistemi

olmayan bir ekosisteme taşınabilmektedir. İşgalci türler ekolojik ve ekonomik açıdan büyük tehlike oluşturabilirler. Transfer edildikleri bölgedeki ekonomik olarak önemli olan türlerin kaybolmasına, biyolojik çeşitliliğin azalmasına ve/veya çeşitli hastalıkların taşınmasına ve yayılmasına neden olabilirler (Okay, 2004).

2.2 *Fouling* ile Mücadele

18. yy. sonlarına kadar *fouling* ile mücadele için en efektif metod, gemilerin karaya çekilerek elle su altı yüzeylerinin temizlenmesi olmuştur. İlk olarak 1758 yılında HMS Alarm Fırkateyni üzerinde bakır kaplama kullanılarak *fouling* kontrolü için bir deney yapılmış ve deneyin başarılı olmasıyla birlikte, 1780 yılına kadar İngiliz Donanması'nda bakır kaplama, *fouling*'den korunma yöntemi olarak kullanılmıştır (Laidlaw, 1952). 19. yy.'da demir gemilerin üretimi ve bakırın demir üzerindeki korozif etkileri dolayısıyla bakır kaplama kullanılamaz olmuştur.

Bakır kaplamaya alternatif çinko, kurşun, nikel, galvanize demir kaplama ve ayrıca antimon, çinko ve kalay alaşımlarından kaplama denenmiştir (Callow, 1996). Sonraları çözüm olarak *antifouling* boyalar önerilmiş ve 1865'e kadar yalnızca İngiltere'de 300'den fazla *antifouling* boya patenti alınmış, fakat bunların neredeyse tamamı başarısız olmuştur (Hare, 1993).

Fouling önlemi olarak elektrik akımı, manyetik alan, ultrasonik ve optik yöntemler bile denenmiştir (Fischer ve diğ, 1984). Sonunda *fouling* kontrolündeki en etkin ve verimli yol olarak toksik *antifouling* boyalar bulunmuştur (Little ve DePalma, 1988). Bu boyaların avantajları kolay üretim, hızlı ve düşük maliyetli uygulama, zamana dayanım ve çok çeşitli yapısal formlara ve malzemelere uygulanabilirliğidir (AMOG Consulting, 2002).

Etkin *antifouling* biyosit arayışları sonraları da devam etmiştir. 1950'lerde bakırın yanı sıra cıva ve arsenik de *antifouling* boyalarda birincil biyosit olarak kullanılmıştır. Kullanım süresi 2 yıl gibi kısa bir süre olan bakır temelli boyaların kuru havuzlama sırasında tekneden tamamen çıkarılması ve teknenin yeniden boyanması gerekmekteydi. Bu da bakır temelli boyaların en büyük dezavantajlarından biriydi. Fakat daha sonra bu biyositler sağlık ve güvenlik nedenleriyle yasaklanmıştır (Fischer ve diğ, 1984). 1950'lerin ortalarında

organokalay (organotin) bileşimler bulundu ve mükemmel *antifouling* özellikleri sayesinde 1960'ların başlarından itibaren çok yaygın olarak ticarileşti (Evans, 1981).

TBT içeren kendi kendini parlatan (TBT SPC) boyalar böylece 1960'lardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Bu boya türü içinde organokalay bileşimler bulunuyordu. Bu organokalay bileşimler zararsız inorganik kalay formlarına indirgendikleri için önceleri çevreye zararsız oldukları düşünülüyordu (Evans ve Hill, 1983). Böylece 1970'lere gelindiğinde dünya sularında seyreden gemilerin çoğunda TBT kullanılmakta idi. Fakat 1970'lerin sonlarında, Alzieu ve diğ. (1980) Fransa'nın küçük liman ve marinaların yakınlarında yetiştirilen Pasifik istridyelerinin kabuklarında bozulmalar görüldüğünü belirtmişlerdir (AMOG Consulting, 2002'de atıfta bulunulduğu gibi). Bu istridyelerde yüksek miktarda kalay tespit edilmiştir ve var olan kabuk bozulmalarının sudaki düşük konsantrasyondaki tributyltin (TBT) nedeniyle olduğu doğrulanmıştır. Sonuç olarak 1982'de Fransa'da 25m'den küçük teknelerde TBT içerikli boyaların kullanılmasını yasaklayan bir yasa çıkmıştır. Japonya ve pek çok diğer ülkede 1990'da TBT kullanımı ve 1997'de de üretimi yasaklanmıştır. O zamandan beri dünya çapında TBT'nin deniz çevresine ve canlılarına olan toksik etkilerini inceleyen bir çok araştırma yapılmıştır (Champ ve Seligman, 1996).

Yapılan araştırmalar sonucu TBT'nin yarılanma ömrünün oldukça uzun olduğu belirlenmiştir (Haak, 1996). Bu yüzden TBT deniz organizmalarında birikmektedir. Yapılan araştırmalar deniz organizmalarında sudakine oranla 1000 kat daha fazla TBT olduğunu göstermiştir. Bu nedenle suda düşük konsantrasyonda olsa bile deniz organizmalarında birikim yüksek olmaktadır (Okay, 2004).

Bu süreç sonunda TBT'nin olumsuz etkileri nedeniyle IMO (2001) 1 Ocak 2003'den itibaren TBT bileşiklerinin yeni uygulamalarını, 1 Ocak 2008'den itibaren ise TBT içeren *antifouling* sistem bulundurulmasını yasaklamıştır.

2000'li yıllarda çevre dostu *antifouling* boya alternatifleri üzerine araştırmalar hızlı bir şekilde başlamış ve halen devam etmektedir. Bu süre zarfında çeşitli alternatifler bulunmuştur. Bu boyalar *fouling* ile mücadelede TBT içerikli boyalar kadar etkin olmasa da daha çevreci özellikleriyle ön plana çıkmaktadırlar. Her *antifouling* boyanın kendine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Çizelge 2.1'de *antifouling* yöntemlerle ile ilgili tarihi gelişimler görülmektedir.

Çizelge 2.1 : *Antifouling* stratejilerinin tarihsel gelişimi (Dafforn, Lewis ve Johnston, 2011).

Zaman aralığı	Önemli olaylar
1500-300 MÖ	Ahşap teknelerde kurşun ve bakır sacların kullanılması
1800-1900ler	Ağır metallerin (bakır, arsenik, cıva) boyaların içine katılması
1800ler-günümüz	Bakırın AF boyalarında kullanılmasına devam edilmesi
1960lar	Geleneksel TBT boyasının gelişimi
1974	İstiridye yetiştiricilerinin olağan dışı kabuk büyümesini rapor etmeleri
1977	İlk *fouling* giderici AF boya patenti
1980ler	Biyosit salma oranının kontrolüne olanak sağlayan TBT SPC boyasının gelişimi
1980ler	İstiridyelerdeki kabuk anormalliği ve *Nucella lapillus*'ta görülen imposeksin TBT ile ilişkilendirilmesi
1987-90	Fransa, İngiltere, ABD, Kanada, Avustralya, AB, Yeni Zelanda ve Japonya'da 25 m.'den küçük gemilerde TBT içeren boya kullanımının yasaklanması
1990lar-günümüz	Bakır salma oranı kısıtlamasının Danimarka'da uygulanması ve California, ABD'de gündeme alınması
2000ler	Çevre dostu AF alternatiflerine yönelik yapılan araştırmaların artması
2001	Uluslararası Denizcilik Örgütü'nün (IMO) AF boyalarından ve gemilerden TBT'yi ortadan kaldırmaya yönelik olarak AFS Konvansiyonu'nu kabul etmesi 2003- TBT'nin yeni uygulamalarının yasaklanması 2008- Aktif TBT varlığının yasaklanması
2008	IMO AFS Konvansiyonu'nun zorunlu hale getirilmesi

Fouling ile aktif bir şekilde mücadele edecek ve yüzey pürüzlülüğü açısından daha iyi, dolayısıyla daha az sürtünme direncine neden olacak, daha uzun süre kullanılabilecek, daha az bakım isteyen ve ayrıca doğaya zarar vermeycek *antifouling* boya arayışları ve araştırmaları devam etmektedir. En son çalışma olarak Avrupa Birliği, 7. Çerçeve Programı kapsamında bir araştırma projesi başlatmış olup, proje sonunda tüm bu özelliklere sahip yeni bir *antifouling* boyanın üretilmesini hedeflemektedir.

2.3 *Antifouling* Boya Tipleri

Fouling ile mücadelede en geleneksel yol *antifouling* boyalardır. *Antifouling* boyaların kullanım amacı, deniz organizmalarının su altı tekne yüzeyine

yapışmalarının ve yerleşmelerinin önlenmesi ve/veya azaltılmasıdır. Bu sayede gemi direnci azaltılarak yakıt ekonomisi sağlanmış olur. Ayrıca *antifouling* boyalar korozyon kontrolünde de kullanılır.

2.3.1 Biyosit içeren *antifouling* boyalar

Biyosit içeren boyalar, boya yüzeyinden salgıladıkları aktif ajanlar sayesinde *fouling*'i engeller ya da minimuma indirirler. Efektif bir uygulama olması açısından bu toksin etkenler sürekli devam eden ve organizmaların tutunmasını engelleyecek kadar yeterli bir şekilde salınırlar. Biyosit içeren *antifouling* boyaların ömrü, boyanın içerik ve biyosit salınım mekanizmasına bağlı olarak değişmektedir. Biyosit içeren efektif bir *antifouling* boyası hem geniş spektrumlu olmalı hem de boyanın kullanım ömrü boyunca devamlı olarak biyosit salınımı yapabilmelidir. Bu gruba giren *antifouling* boyaları geleneksel *antifouling* boyalar, TBT SPC, kontrollü tüketimli polimer (controlled depletion polymer, CDP), TBT içermeyen SPC ve Hibrit TBT içermeyen SPC olarak sayılabilir.

2.3.1.2 Geleneksel *antifouling* boya tipleri

Geleneksel *antifouling* boyaları boya matrisi veya bağlayıcısı boyunca fiziksel olarak dağılmış biyosit parçacıkları içerir. Boyalı yüzey suyla temas ettiğinde, deniz suyu boya filmine nüfuz ederek biyosite temas etmektedir. Bu da biyositin çözünmesine neden olmaktadır.

2.3.1.3 Kendi kendini parlatan boyalar (TBT SPC)

1970'lerin ortalarında organokalay copolymer boyaların ya da kendi kendini parlatan boyaların geliştirilmesiyle beraber *antifouling* teknolojisinde önemli bir ilerleme kaydedildi. Bu boyalar tributyltin (TBT) denen toksik bir madde içermektedir.

TBT SPC boyalar suyla temas ettiğinde, deniz suyu ile TBT arasında hızlı bir kimyasal reaksiyon oluşmakta ve bu reaksiyon yüzeyin bir kaç nanometre üstünde olmaktadır. SPC boyaların salınım mekanizması kontrollü kimyasal çözünme veya hidroliz şeklindedir (Taylan, 2010). TBT SPC boyaları *fouling*'e karşı güçlü önleyici özelliğe sahiptirler.

TBT SPC boyaların avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir (AMOG, 2002):

- 5 yıl veya daha fazla kullanım süresi

- Geleneksel *antifouling* boyaların aksine, kontrollü ve sabit biyosit salınımı
- Yeniden boyanabilmesi
- Aktif yüzeyin sürekli yenilenebilmesi
- Kendi kendini parlatması

Yakıt tasarrufu göz önüne alındığında çok önemli avantajlara sahip bu boya türü sıkça tercih edilmekteydi. Geleneksel boyalarla karşılaştırıldığında, SPC kullanımı kuru havuz zamanında %300 gelişme ve ayrıca yakıt, kuru havuz zamanı ve diğer masraflar göz önüne alındığında denizcilik endüstrisinde yıllık 2,5 milyar $'lık bir tasarruf sağlamaktadır (Milne, 1991). Bugün bu tür boyalar kullanılmamaktadır.

2.3.1.4 Kontrollü tüketimli polimerler (CDP)

Kalay içermeyen, çözünebilir *antifouling* boyalar 1980'lerin sonlarında ticari olarak yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu tür boyalar genellikle %50-60 civarında uçucu organik içerik içerir. Ayrıca biyosit salınım mekanizmasında reçine ya da türevleri kullanılır. CDP'lerde çözünme fiziksel olarak (difüzyon) gerçekleşmektedir. Boşluklu katman zamanla incelmekte ve yüzey pürüzlülüğü 75 mikrona kadar artmaktadır. 10 yıllık kullanım süresi sonunda sökülüp temizlenmesi gerekmektedir. Fakat kuru havuz süreleri kısa olan ve düşük *fouling* oranı olan bölgelerde kullanım için uygundur (Atlar, 2008).

2.3.1.5 TBT içermeyen SPC

Bu boyalar biyosit olarak TBT içermeyen fakat TBT SPC mekanizmasının kullanıldığı boyalardır. Bu boyalar bakır akrilat, çinko akrilat, silyl polimer gibi farklı polimer sistemleri temellidir. Genel olarak akrilik polimer içermektedirler. Örnek olarak International firmasının geliştirdiği yeni SPC gösterilebilir. Bu boya deniz suyu ile temas ettiğinde hidroliz veya akrilik polimer ile deniz suyu arasında geçekleşen iyon alışverişi reaksiyonu sonucu biyosit salınımı yapmaktadır. Böylece biyosit salınımı kontrollü olarak gerçekleşmektedir.

2.3.1.6 Hibrit TBT içermeyen SPC

TBT içermeyen SPC teknolojisi ile reçine temelli CDP teknolojisinin birleştirilmesi ile hidroliz ve hidrasyon arasında bir biyosit salınım mekanizmasına ulaşılmıştır. Yüksek miktarda VOC (Volatile Organic Compound) katı madde içermektedir.

Performans olarak da SPC ve CDP arasında almaktadır ve 3-5 yıl arasında kullanım süresi vardır.

2.3.2 Biyosit içermeyen *antifouling* boyalar

Son dönemde biyosit içermeyen ve toksik olmayan *antifouling* boya geliştirmek üzerine çeşitli araştırmalar mevcuttur. Yasal zorunluluklar ve çevre etkileri göz önüne alınarak çalışmalar hızlanmıştır. *Fouling* giderici (FR) boyalar bu özelliklere sahip bir boya türü olarak öne çıkmaktadır.

2.3.2.1 *Fouling* giderici boyalar (FR)

Bu tür boyalar yüzey özellikleri sayesinde deniz organizmalarının tekne yüzeyine yapışmasını engellemekte ya da azaltmaktadır. Bu boyaların amacı, yüzeye tutunacak organizmaların adhezyon (yapışma) kuvvetlerini azaltacak yüzey özellikleri elde ederek, organizmaların kendi ağırlığı ve gemi hareketi nedeniyle kendiliğinden tekne yüzeyinden ayrılmasını sağlamaktır. Bu özelliklere sahip birçok boya piyasada mevcuttur. İlk olarak 1990'ların ortalarında hızlı feribotlarda kullanılmışlardır. *Fouling* giderici boyalara örnek olarak düşük yüzey enerjili boyalar olarak da adlandırılan sentetik polimerler ve kopolimerler verilebilir. Son dönemde özellikle silikon polimerler, çeşitli avantajları nedeniyle öne çıkmaktadırlar.

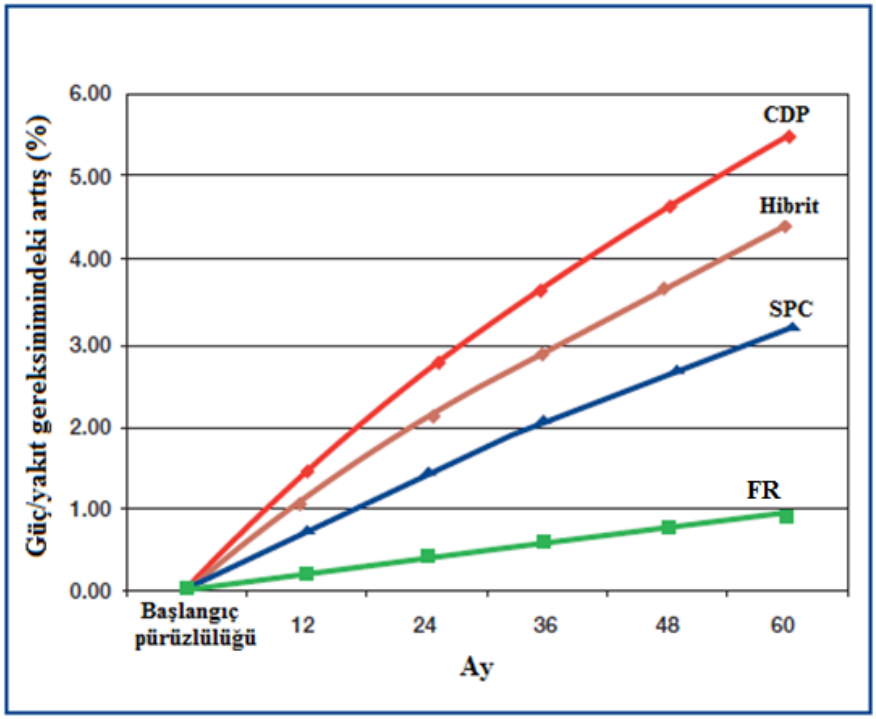
Anderson (1998) *fouling* giderici boyaların temel özellikleri ve yararlarını aşağıdaki gibi özetlemiştir.

- Biyosit içermez.
    - Denize biyosit salınımı yapmaz.
    - Kuru havuzlamada toksik atık olmaz.
    - Biyosit yönetmeliklerinden etkilenmez.
- Pürüzsüz yüzey sağlar.
    - Yüksek hız sağlar.
    - Minimum yakıt tüketimi sağlar.
- Uzun süreli *fouling* kontrolü sağlar.
    - Daha uzun servis süresi sağlar (5 yıl).
    - Daha az bakım masrafı
- Kimyasal olarak dayanıklıdır.
    - Yüzey pürüzsüz kalır.

- Bakımda sadece hasar görmüş kısım düzeltilir.

- Bakır içermez.
  - Standart *antifouling* boyalardan daha hafiftir.
  - Alüminyum üzerine kullanımı güvenlidir.
- Yüksek oranda katı madde içerir.
  - Düşük çözücü içerik vardır.
  - Çift boya sistemi vardır.

Günümüzde en çok kullanılan *antifouling* boyalar TBT içermeyen SPC, CDP, Hibrit TBT içermeyen SPC ve *fouling* giderici boyalardır. International firması kendi ürünleri olan *antifouling* boyaların gemi performansına etkisi ile ilgili bir araştırma yapmıştır. Şekil 2.5'te farklı türdeki *antifouling* boyaların zaman içerisindeki gemi güç/yakıt performansına etkisi görülmektedir.



Şekil 2.5 : Farklı *antifouling* boyalarının zaman içerisinde artan pürüzlülük değerleri nedeniyle hızlı bir geminin zamana bağlı güç veya yakıt gereksinimindeki artış tahmini (Url-2).

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi FR tipi boyalar zamana bağlı güç/yakıt gereksinimindeki artış yüzdesi diğer boyalara göre daha az olmakla beraber yüksek uygulama maliyeti ve bakım masrafları nedeniyle sektörde yaygın olarak kullanılmamaktadır (Url-2).

2.3.3 Toksik olmayan boyalar

SPC boyalarla aynı kimyasal ve teknolojik özellikleri kullanan, fakat biyosit içermeyen, SPC boyalar geliştirilmiştir. Bu toksik olmayan boyalarda kopolimer biyosit yerine toksik olmayan bir bileşik vardır. Hidroliz prosesi SPC ile aynıdır. Biyosit içermeyen boyaları üretmek için metakrilat ve özellikle üretilmiş çeşitli epoksiler kullanılmıştır. Bu boyaların amacı aktif, pürüzsüz bir yüzey oluşturarak, organizmaların tutunması için uygun olmayan koşullar yaratmaktır.

2.4 *Antifouling* Boyalar ile İlgili Yasal Düzenlemeler

TBT'nin deniz çevresi için olumsuz etkileri ilk olarak, 1970'lerin sonlarında Fransa'daki istridye çiftliklerinde yüksek miktarda istridye ölümleri yaşandığı ve istridye kabuklarındaki deformasyonlar görüldüğünde fark edilmeye başlanmıştır. Böylece 1982'de Fransa'da 25m'den küçük teknelerde TBT içerikli boyaların kullanılması yasaklanmıştır. Daha sonra TBT birikiminin bazı organizmalarda cinsiyet farklılaşmalarına (imposex) neden olduğu anlaşıldı. Bu olay sonrası İngiltere'de 1987'de, Amerika Birleşik Devletleri'nde 1988'de, Kanada'da 1989'da, Avustralya'da 1989'da ve Avrupa Birliği'nde 1989'da küçük teknelerde TBT kullanımı kısıtlaması getirildi (Champ, 2000). Buna rağmen ticari gemilerde TBT kullanılmaya devam edildi.

1988 yılında Uluslarası Denizcilik Örgütü (IMO)'nün Deniz Çevresi Koruma Komitesi'nde (Marine Environment Protection Committee, MEPC) bu konu ile ilgili problem dile getirilmiştir. Nihayet Kasım 2001'de sonuç kararı yayınlanmıştır. Bu konvansiyona göre 1 Ocak 2003 tarihinden itibaren TBT bileşiklerinin yeni uygulamalarını, 1 Ocak 2008 tarihinden itibaren ise TBT içeren *antifouling* sistem bulundurulması yasaklanmıştır (IMO, 2001).

Son düzenlenen IMO konvansiyonu, gemilerde kullanılan *antifouling* boyaların içinde TBT bulunmasını yasaklamakta ve *antifouling* sistemleri içinde bulunma riski bulunan diğer zararlı maddelerin de gelecekte olası kullanımını engellemektedir (IMO, 2001). Konvansiyona göre taraf ülkeler kendi bayraklarını taşıyan veya kendi bayrağını taşımayan ancak kendi otoriteleri altında çalışan gemilerde ve kendi limanlarına, terminallerine ve tersanelerine gelen gemilerde zararlı *antifouling* boyaların kullanımını yasaklayacak ve/veya kısıtlayacaklardır (Okay, 2004).

Bununla beraber Avrupa Birliği 1 Ocak 2003'ten itibaren Avrupa Birliği bayraklı gemilerde TBT kullanımı yasaklamış, Avustralya da Mart 2003'ten itibaren TBT içeren boyalar kullanan gemilerin sicil kayıtları iptal edilmiştir.

3. GEMİ DİRENCİ

3.1 Giriş

Bir geminin direnci doğrudan gemi performansı ve yakıt tüketimini etkilediğinden özellikle gemi sahipleri ve operatörleri açısından çok önemlidir. Dolayısıyla gemi direnci teorisi çok eski zamanlardan beri gemi inşaatı mühendisleri ve bilim adamları tarafından incelenmiştir. Özellikle gemi performansının model deneyleri vasıtasıyla tahmin edilmesi konusu üzerinde çokça durulmuştur. Bu konu ile ilgili çok çeşitli ve standart çalışmalar yapılmıştır (Taylor, 1943).

Bilindiği gibi gemi direnci genel olarak sürtünme direnci ve artık direnç olarak ikiye ayrılmakta, özellikle düşük hızlarda bu direncin büyük kısmı sürtünme direnci olmaktadır. Dolayısıyla gemi sürtünme direncinin azaltılması, uzun yıllardır araştırma konusu olmuştur ve olmaya devam etmektedir. Gemi direncinin azaltılması, daha dizayn aşamasındayken çok farklı parametreler arasında bir optimizasyon gerektirdiğinden her zaman zor bir iştir. Genelde tekne form optimizasyonu direnci azaltmak için kullanılacak bir yoldur. Bu konuyla ilgili model deneyleri ve çeşitli yazılımlar kullanılmaktadır. Gemi direncini düşürmek için kullanılabilecek diğer bir yöntem ise su altı formunu pürüzsüzleştirmektir. Bu da düşük sürtünme direnci oluşturacak ve tekneye deniz canlılarının yapışıp büyümesini engelleyecek *antifouling* boya uygulamaları sayesinde olacaktır. Bu yüzden *fouling*'in direnç üzerine olan etkilerini incelemekte ve bu etkileri en aza indirecek yöntemlerin geliştirilmesinde yarar vardır. Model deneyleri ve Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği gibi araçlar bu incelemelerde yöntem olarak kullanılabilir.

Bu bölümde genel olarak gemi direnci, bileşenleri ve gemi direnci tahmin yöntemleri üzerinde durulmuştur. Bu çalışmadaki uygulamalarda kullanılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yöntemi ile ilgili temel bilgiler verilerek, uygulamanın temeli anlatılmıştır.

3.2 Gemi Direnci Detayları

Gemi su içerisinde belirli bir V hızıyla hareket ettiğinde, tekne su altı yüzeyine, suyun oluşturduğu dinamik basınçlar da etki eder. Bu durum gemi etrafında mevcut statik basınç dağılımını değiştirir. Değişen bu basınç sistemi ile oluşan kuvvetlerin gemi genişliği doğrultusundaki bileşeni, simetriden dolayı sıfır olup baş-kıç doğrultusundaki bileşeni ise, geminin su içerisindeki hareketini engelleyen bir kuvvet şeklinde etki eder, Baykal ve Dikili (2002).

Gemi belirli bir hızda hareket ederken, viskozitenin etkisiyle su altı yüzeyinde, harekete zıt yönde yüzeye teğet kuvvetler meydana gelir. Bu kuvvetler, cisim yüzeyine dik ve teğet olmak üzere iki farklı bileşene ayrılabilir. Teğetsel bileşenler kesme kuvvetinden dolayı meydana gelir ve bu kuvvetlerin ıslak yüzey boyunca entegrasyonu ile sürtünme direnci elde edilir. Yüzeye dik olan kuvvetlerin hareket doğrultusundaki yatay bileşeni ise basınç direnci olarak adlandırılır. Dik ve teğet olarak ikiye ayrılan bu iki kuvvet beraberce geminin toplam direncini oluşturur. Kısacası toplam direnç kuvveti teğet sürtünme kuvvetleri ile dik basınç kuvvetlerinin gemi ilerleme yönündeki bileşenleri toplamının, ıslak yüzey boyunca entegrasyonu ile bulunabilir (Froude, 1872).

Cismin akışkan içerisindeki hareketi bir enerjiye ihtiyaç duyar. Bu sebepten dolayı, direnç tahminlerinde cisme etkiyen kuvvetler veya suda sarf edilen enerjiyi temel alan yöntemler incelenir. Böylelikle direnç problemi, akışkanın cisim üzerine etkisinin veya cismin akışkan üzerine etkisinin incelenmesi olarak basitçe tanımlanabilir.

Baykal ve Dikili'nin (2002) tanımına göre "belirli bir hızda giden bir geminin direnci, etrafındaki akışkan ortamlarının oluşturduğu ve hareket doğrultusuna ters yönde gemi üzerine etki ederek hareketini engelleyen kuvvete denir".

Gerçek yani viskoz akışkanlarda tamamen su içine dalmış bir cismin ya da denizaltının ileri yönde hareketi esnasında, serbest su yüzeyi etkisi olmadığından dalga direnci söz konusu olmaz. Ancak, akışkanın viskozitesinden dolayı yalnızca viskoz direnç oluşur. Gerçek bir akışkan içerisinde yüzmekte olan bir cisim veya gemide ise hem sürtünme direnci hem de artık direnç oluşur. Artık direnç, dalga direnci ile akışkan viskozitesiyle oluşan viskoz basınç direncinin toplamından

meydana gelir. Başka bir ifadeyle artık direnç, toplam dirençten sürtünme direncinin çıkarılmasıyla elde edilir.

Sürtünme direnci, gemi yüzeyi boyunca etkiyen su akışı tarafından oluşan sürtünme kuvvetlerinden meydana gelmektedir. Dolayısıyla sürtünme direnci, yüzey pürüzlülüğüne neden olan *fouling* ve *antifouling* boyadan etkilenmektedir. Çünkü bu etkenler doğrudan yüzey pürüzlülüğü ile ilgili olup, sürtünmeye etki etmektedirler.

3.2.1 Gemi direnci bileşenleri

Gemi direnci, bir geminin belli bir hızda sevk edilebilmesi için gereken kuvvet miktarıdır. Bu kuvveti yenerek geminin ilerlemesini sağlayan güce efektif güç denmektedir. Efektif güç denklem (3.1)'te gösterilmiştir.

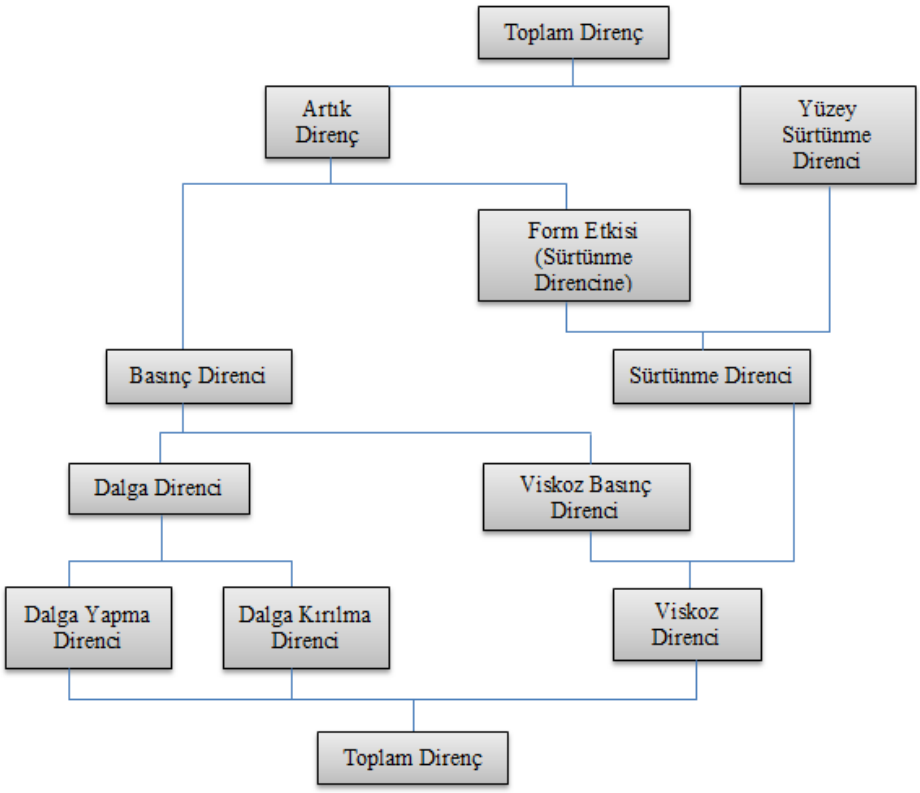
$$P_E = R_T V \tag{3.1}$$

Burada P_E efektif güç, R_T toplam direnç ve V gemi hızıdır. Toplam gemi direncinin, farklı nedenlerden dolayı oluşan ve birbirleriyle karmaşık şekilde bağlantılı olan farklı bileşenleri vardır. Basit bir yaklaşım olarak gemi direncini üçe ayırabiliriz:

1. Sürtünme direnci: Geminin viskoz akışkan içindeki hareketinden kaynaklanır. Sürtünme direnci, gemi ıslak yüzeyi üstündeki teğetsel gerilmelerin gemi hareket yönünde toplanması ile elde edilen direnç bileşenidir.
2. Artık direnç: Artık direnç, teknenin toplam direncinden sürtünme direncinin çıkarılması ile elde edilen bir niceliktir. Bu direnç bileşeni basit olarak dalga direnci ve anafor direnci olarak ikiye ayrılabilir.
3. Hava direnci: Geminin su üzerinde kalan bölümünün hareket sırasında hava ile etkileşimi nedeniyle oluşan dirençtir.

Bu yaklaşımla toplam gemi direnci, R_T, temel olarak sürtünme direnci R_F, ve artık direnç, R_R, olmak üzere ikiye ayrılabilir.

Daha önce de değinildiği gibi, direnç bileşenleri çok farklı şekilde ele alınıp sınıflandırılabilir. Bu çalışmada asıl olarak sürtünme direnci ele alınacağından dolayı direnç bileşenleri bu şekilde tanımlanmıştır. Carlton (2007) toplam gemi direncini sürtünme direnci ve artık direnç olarak ikiye ayırmış, bu direnç bileşenlerinin alt bileşenlerini ve birbirleriyle olan ilişkilerini detaylı olarak Şekil 3.1'devermiştir.



Şekil 3.1 : Gemi direnci bileşenleri (Carlton, 2007).

3.2.1.1 Sürtünme direnci

Sürtünme direnci gemi su altı yüzeyinin durumuna bağlı bir büyüklüktür. Yine de tekne su altı yüzeyi tamamen pürüzsüz ve temiz olsa bile, bazı tekne tiplerinde sürtünme direnci toplam direncin %90'ı kadar olabilmektedir (Schultz, 2007). Tekne su altı yüzeyinde hasar, korozyon ve *fouling* gibi herhangi bir pürüzlülük sürtünme direncini doğrudan artırmaktadır. Bu yüzden sürtünme direnci üzerine deneysel ve teorik birçok çalışma yapılmıştır.

3.3 Froude'un Sürtünme Direnci Üzerine Yaptığı Deneyler

Froude direncin sürtünme ve artık direnç olarak ikiye ayrıldığı kabulü ile plakalara etkiyen sürtünme direnci değerlerini bulmak için Torquay, İngiltere'deki deney hazvuzunda deneyler yapmıştır. Bu plakalar 0.61 m. (2 feet) ve 15.2 m. (50 feet) arasında değişmekteydi. Çekme hızları ise 0,5 m/s ile 4,1 m/s arasındaydı. Froude (1872, 1874) deneysel olarak plakaların sürtünme direncini ampirik olarak denklem (3.2) ile ifade etmiştir.

$$R_F = fSV^n \qquad \textbf{(3.2)}$$

Burada R_F sürtünme direnci (kN veya lb), S ıslak yüzey alanı (m^2 veya ft^2), V hız (m/s veya ft/s), f sürtünme direnci katsayısı ve n bir sabittir. f ve n değerleri yüzeyin uzunluğu ve karakterine bağlı olarak değişmektedir. Çizelge 3.1'de İngiliz birimleri için f ve n değerleri verilmiştir Froude (1872, 1874).

Çizelge 3.1 : Froude 'un yüzey sürtünme katsayıları (Lewis E. , 1988)

Yüzeyin yapısı	Yüzeyin uzunluğu (ft.)											
	2			8			20			50		
	f	n	k	f	n	k	f	n	k	f	n	k
Cila	0,00410	2,00	0,00390	0,0046	1,88	0,00374	0,00390	1,85	0,00337	0,00370	1,83	0,00335
Parafin	0,00425	1,95	0,00414	0,0036	1,94	0,00300	0,00318	1,93	0,00280	-	-	-
Patiska	0,01000	1,98	0,00830	0,0075	1,92	0,00600	0,00680	1,89	0,00570	0,00640	1,87	0,00570
İnce kum	0,00800	2,00	0,00690	0,0058	2,00	0,00450	0,00480	2,00	0,00384	0,00400	2,06	0,00330
Orta-taneli	0,00900	2,00	0,00730	0,0063	2,00	0,00490	0,00530	2,00	0,00460	0,00490	2,00	0,00460
İri kum	0,01000	2,00	0,00880	0,0071	2,00	0,00520	0,00590	2,00	0,00490	-	-	-

Bu sonuçları gemilerde kullanmak için yüzey sürtünme katsayılarının yüksek uzunluk ve hızlar için ekstrapole edilmesi gerekmektedir. Froude raporlarında ekstrapolasyon ile elde edilmiş değerleri paylaşmamıştır. Fakat Froude (1874) model ve gerçek gemi arasında ekstrapolasyon yapılacağını göstermek için, altı bakır kaplamalı, ahşap bir gemi olan HMS Greyhound üzerinde çekme deneyi yapmıştır. Çizelge 3.2'de bu deney sonucu bulunan değerler gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 : HMS Greyhound'a yapılan çekme deneylerinin sonuçları (Lewis E., 1988).

Hız V, ft/m	600	800	1000	1200
Direnç R_s, lb, (gemiden)	3100	5400	9900	19100
Direnç R_m, lb, (modelden)	2300	4500	8750	17500
Fark (%)	35	20	13	9
$(R_S/V^2)x10^2$ (gemi için)	0,86	0,84	0,99	1,33
$(R_m/V^2)x10^2$ (model için)	0,64	0,70	0,87	1,22
(R/V^2)'deki fark (%)	0,22	0,14	0,12	0,11

Burada R_s gemi direncini R_m ise model direncini temsil etmektedir. Çizelge 3.2'de görüldüğü üzere gemi direnci, modelden tahmin edilen dirence göre her hızda daha fazla olmuştur. Froude'a göre aradaki bu fark yüzey özelliklerinin temsil edilişinden kaynaklanıyordu.

3.3 İki Boyutlu Sürtünme Direnci Formülasyonları

Reynolds (1883) deneylerinde cam bir tüp boyunca su akımı yollamış, tüpün girişinin merkezine de ince bir boya tabakası koymuştur. Düşük hızlarda boya düzgün iplikler halinde paralel olarak hareket etmektedir. Reynolds'un kritik hız olarak tanımladığı belli bir hızda, V_c, boyanın önce düzgün iplik şekli bozulmaya başlamakta, daha sonra iyice karışmakta ve son olarak da tüm görüntüsü karışarak tüpe yayılmaktadır. Bu deneyde belli uzunluktaki bir tüpte akışkanın maruz kaldığı direnç, basınç yüksekliği kayıpları ölçülerek belirlenmiştir. Farklı çaplarda, D, borular kullanılmış ve kinematik viskozite, ν, su ısıtılarak değiştirilmiştir. Denklem (3.3)'te Reynolds'un (1883) bu deneylerin sonucunda bulduğu eşitlik gösterilmiştir.

$$V_c = 2000\nu / D \qquad \textbf{(3.3)}$$

Reynolds (1883)'un yaptığı deney, iki farklı direnç kuralı olan iki farklı akış rejimi olduğunu açıkça göstermiştir. Düşük VD/ν değerlerinde, boya iplikçikleri paralel olarak durumlarını korumuş, akışkan katmanlar halinde ve birbirlerine karışmadan ilerlemişlerdir. Böyle akımlara laminer akım denmektedir. Laminer akımda, göreceli olarak düşük direnç değerleri görülür. Reynolds sayısı, VD/ν, arttıkça laminer akım bozulur, akışkan karışır, dönme hareketi yapar ve direnç artar. Böyle akımlara türbülanslı akım denir.

Modern sürtünme direnci formülasyonlarında sürtünme direnci katsayısı C_F'in Reynolds sayısı Re'nin, VL/ν, bir fonksiyonu olduğu kabul edilir. Blasius (1908) düşük Reynolds sayısı değerlerinde plaka üzerindeki sınır tabakadaki akışın laminer olduğunu belirtmiş ve laminer akım içindeki bir plakanın toplam direncini bulmuştur. Böylece laminer akımlar için sürtünme direnci katsayısı, C_F, formülü bulundu. Denklem (3.4)'te bu formül görülmektedir.

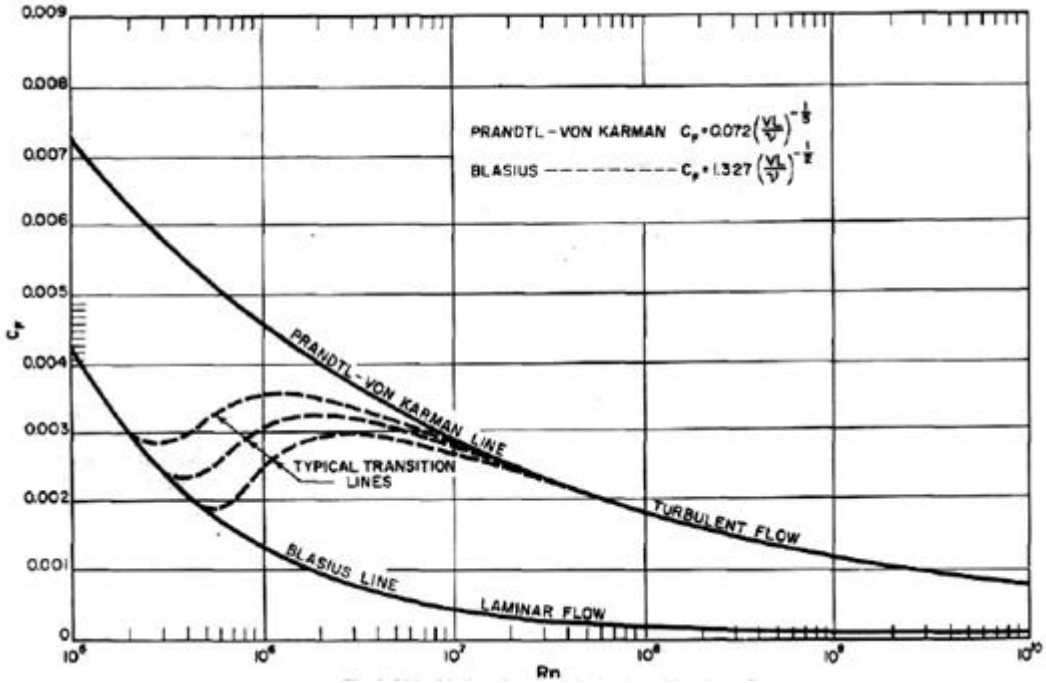
$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2}\rho S V^2} = 1{,}327(VL/\nu)^{-1/2} \qquad \textbf{(3.4)}$$

Prandtl (1921) ve von Karman (1921) ayrı ayrı türbülanslı akım için sürtünme direnci katsayısını yayınlamışlardır. Denklem (3.5)'te bu formül görülmektedir.

$$C_F = \frac{R_F}{\frac{1}{2}\rho S V^2} = 0,072(VL/\nu)^{-1/5} \qquad \textbf{(3.5)}$$

Bu denklem sınır tabaka karakteristiklerinin analitik ve deneysel olarak belirlenmesi temeline dayanıyordu. Ayrıca bu denklem elde edilirken Froude (1872) ve Gebers (1919) tarafından gerçekleştirilen deneylerden de yararlanılmıştır.

Şekil 3.2'te sürtünme direnci katsayılarını veren formüller birlikte çizilmiştir.



Şekil 3.2 : Türbülanslı ve laminer akışlar için yüzey sürtünme eğrileri. (Lewis E. , 1988).

3.5 Sürtünme Direnci Formülasyonlarının Geliştirilmesi

Amerika'da da Washington Model Deney Havuzu'nun kurulmasıyla birlikte çok çeşitli deneysel çalışmalar yapılmıştır (Lewis E. , 1988).

Schoenherr (1932) plaka testleriyle yapılan deney sonuçlarını toplayıp, Reynolds sayısı, Re, ile sürtünme direnç katsayısı, C_F, arasındaki ilişkiyi göstermiştir.

Schoenherr (1932) sonuçlarını Prandtl (1921) ve von Karman (1921)'ın teorik formülünü baz alarak incelemiştir. Denklem (3.6)'da bu formül görülmektedir.

$$\frac{A}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(\mathrm{Re}\, C_F) + M \qquad \textbf{(3.6)}$$

Schoenherr (1932) M değerini 0 ve A değerini 0,242 aldığında deney sonuçlarıyla uyum içinde olduğunu görmüştür. Böylece Karman - Schoenherr formülünü bulmuştur. Denklem (3.7)'de bu formül verilmiştir.

$$\frac{0,242}{\sqrt{C_F}} = \log_{10}(\mathrm{Re}\, C_F) \qquad \textbf{(3.7)}$$

Bu formül pürüzsüz yüzeyli gemiler için farklı Reynolds sayıları için uygun sonuçlar vermektedir.

3.6 Çekme Tankı Konferanslarında Alınan Kararlar

1930'lı yıllardan itibaren dünyanın çeşitli yerlerinde çekme tankı konferansları düzenlenmiş ve karşılaşılan problemler ve yöntemler üzerinde tartışmalar yapılmış, sonuç olarak bazı kararlar alınmıştır. Bu konferanslarda model çekme deneyleri için bazı standartlar kabul edilmiştir. Bu konferanslar Avrupa'da ICSTS (International Conference of Ship Tank Superintendents), Amerika'da ATTC (American Towing Tank Conference) olarak toplanan konferanslardır. 1957 yılında ICSTS, ITTC (International Towing Tank Conference) olarak yeniden isim almıştır. ITTC halen belli aralıklarla toplanmakta ve bu konferanslarda çeşitli konular tartışılmaktadır.

ICSTS 1935'de 15°C su sıcaklığını çekme deneylerini için standart olarak kabul etmiştir. Her 1°C artış için sürtünme direncinde %-0.43 düşüş öngörülmüştür. ATTC 1948 yılında model testi analizlerinin Schoenherr formülüne göre yapılması gerekliliğini ve efektif güç hesaplamalarında yeni ve pürüzsüz gemiler için +0,0004 bir düzeltme gerektiğini öngörüyordu (SNAME, 1948). Ayrıca Schoenherr formülü 1947 ATTC Yöntemi olarak adlandırılıyordu (ATTC, 1956).

ATTC'nin bahsettiği düzeltme kavramı aslında yüzey pürüzlülüğünün gemi sürtünme direnci üzerindeki etkilerini kapsamaktadır. Model deneyleri sonucu tahmin edilen gemi direnci değeri ile seyir tecrübesi ile elde edilen gerçek gemi direnç değeri arasındaki fark diğer bazı etkenlere de bağlıdır. Bu fark 1963'te ITTC

toplantısında "gemi-model korelasyon düzeltmesi" olarak adlandırılmış ve C_A sembolü ile gösterilmiştir (ITTC, 1963).

ATTC yöntemindeki bazı problemler nedeniyle komite yeni yöntemler araştırmıştır. Hughes (1952, 1954) plaka ve dubalar üzerinde birçok direnç deneyi yapmış ve denklem (3.8)'i elde etmiştir.

$$C_{F_O} = \frac{0,066}{\left(\log_{10} \mathrm{Re} - 2,03\right)^2} \qquad \textbf{(3.8)}$$

Burada C_{F_O} iki boyutlu levha sürtünme direnci katsayısını ifade etmektedir.

1957'de ITTC sürtünme direnci katsayısı için denklem (3.9) kabul edilmiştir. Bu denklem "ITTC 1957 model-gemi korelasyon yöntemi" olarak isimlendirilmiş ve bu problem için geçici bir pratik mühendislik çözümü olarak nitelendirilmiştir (ITTC, 1957). ITTC 1957 formülü denklem (3.9)'da gösterilmiştir.

$$C_F = \frac{0,075}{\left(\log_{10} \mathrm{Re} - 2\right)^2} \qquad \textbf{(3.9)}$$

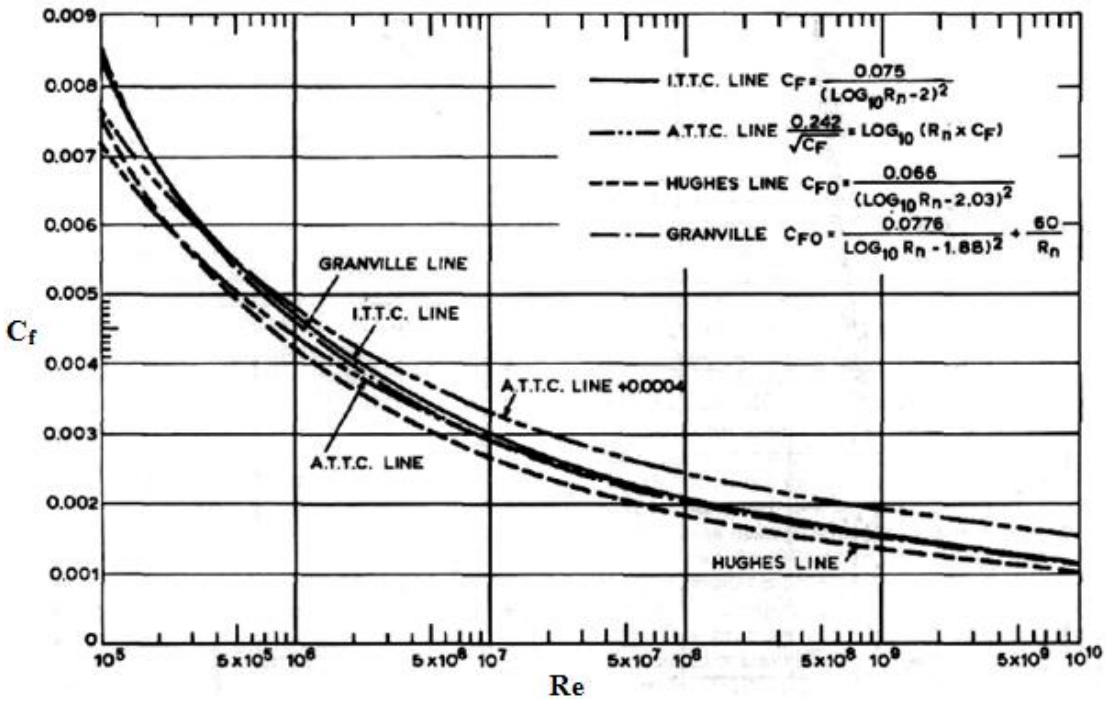
Bu denklem model-gemi korelasyon yöntemi olup, herhangi bir düz levhanın veya eğri yüzeyin sürtünme direncini temsil etmemektedir.

Granville (1977) 1957 ITTC gemi-model korelasyon yönteminin iki boyutlu düz bir plakanın türbülanslı akımdaki sürtünme direnci formülü olarak kullanılabileceğini göstermiştir. Temel varsayımlar ve sınır tabakadaki hız dağılımını da göz önüne alarak genel bir formül elde etmiştir. Bu formül denklem (3.10)'da görülmektedir.

$$C_{F_O} = \frac{a}{\left(\log_{10} \mathrm{Re} - b\right)^2} + \frac{c}{\mathrm{Re}} \qquad \textbf{(3.10)}$$

Burada a =0,0776, b =1,88 ve c =60'dır. Bu formül ITTC 1957 formülünün genelleştirilmiş biçimidir. ITTC 1957 formülünde a =0.075, b =2 ve c =0'dır.

Şekil 3.3'te 1957 ITTC, 1947 ATTC, Hughes ve Granville formülleri birlikte gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : Yüzey sürtünmesi eğrileri (Lewis E. , 1988).

3.7 Üç Boyutlu Viskoz Direnç Formülasyonları

Hughes modelden gemiye ekstrapolasyon için bir yöntem önermiştir (Lewis E. , 1988). Ona göre toplam model direnç katsayısı, C_{T_m} ,viskoz direnç katsayısı, C_{V_m} , ve dalga yapma direnci katsayısı, C_{WM_m} , olarak ikiye ayrılabilir. Düşük Froude sayısı değerlerinde C_{WM_m} değeri küçülmektedir. Dalga direncinin ihmal edilebileceği noktada toplam model direnci katsayısı eğrisi iki boyutlu sürtünme direnci katsayısı eğrisine paralel olmaktadır.

Form katsayısı denklem (3.11)'deki gibi tanımlanabilir.

$$1+k = \frac{C_{T_m}(\mathrm{Re}_O)}{C_{F_O}(\mathrm{Re}_O)} \qquad \textbf{(3.11)}$$

Burada C_{F_O} iki boyutlu levha sürtünme direnci katsayısı ve Re_O iki boyutlu levha Reynolds sayısıdır. Yani iki boyutlu levha ile model arasındaki şekil farkından dolayı oluşan direnç farkı form katsayısı ve form direnci kavramı ile açıklanmış olmaktadır. Bu kabullere göre herhangi bir Reynolds sayısı için denklem (3.12) önerilmektedir.

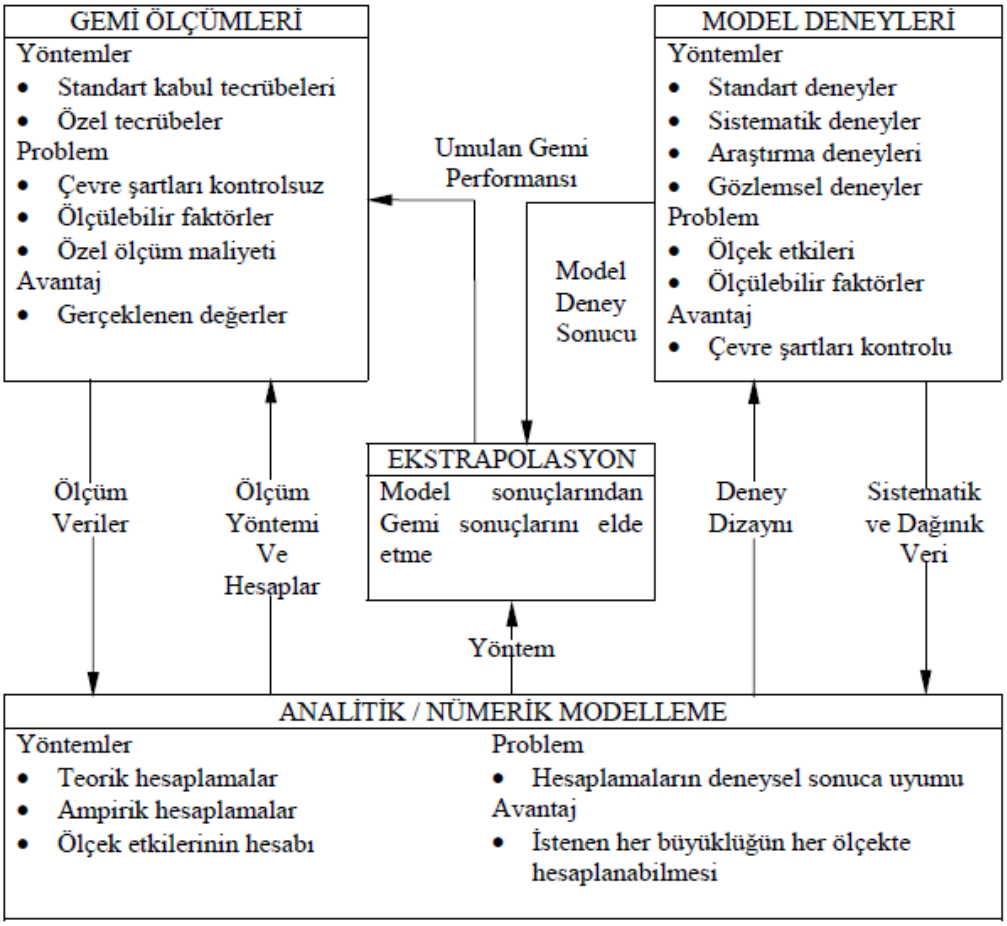
$$C_{V_m} = (1+k)C_{F_O} \qquad \textbf{(3.12)}$$

Burada k form faktörü olarak adlandırılır ve üç boyutlu form etkisini yansıtır. $(1+k)$ değeri Reynolds sayısına göre değişmez.

3.8 Gemi Direnci Tahmin Yöntemleri

Gemi direncinin bir mühendislik problemi olarak tanımlanabilmesi için direncin oluşumu, bileşenleri ve bunları etkileyen faktörlerin belirlenebilmesi ve verilen bir form için belirlenen hız aralığı için deneysel ve/veya sayısal yöntemlerle hesaplanabilir olması gereklidir.

Teori, sayısal yöntemler, deneysel teknikler ve çeşitli araştırma imkânlarına rağmen günümüzde direnci etkileyen faktörlerin tümüyle değerlendirildiği ve ölçek probleminin çözüldüğü söylenemez. Şekil 3.4'te konunun gelişimi yönünden bilgi akışı ve etkileşimi şematik olarak gösterilmiştir (Url-3).

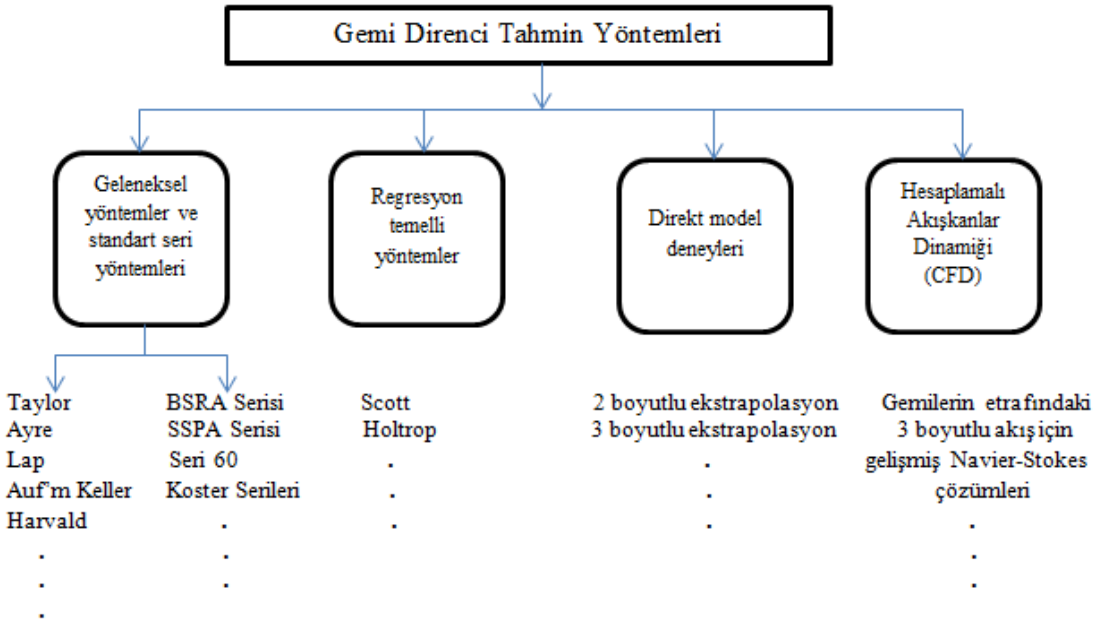


Şekil 3.4 : Gemi direnci incelemesinde bilgi akış çevirimi (Url-3).

Bir gemiyi istenen bir hızda sevk etmek için ne kadar güç gerektiği, doğrudan gemi üzerinden seyir tecrübesi ile belirlenebilir. Seyir tecrübesi sakin su koşullarında yapılmalıdır. Rüzgârın yönü ve gücü belirlenmeli ve etkileri ayrıca hesaplanmalıdır.

Bu yöntemde istenen değerler doğrudan bulunmaktadır. Gemi hâlihazırda inşa edildiği için, bulunan direnç değeri sadece bilgi amaçlıdır. Dolayısıyla bu yöntem bir tahminden öte doğrudan makina gücü belirlemeye yönelik geliştirilmiş bir yöntemdir.

Henüz dizayn aşamasındayken, bir geminin direncini tahmin etme yöntemleri çok çeşitlidir. Şekil 3.5'te bu yöntemler özetlenmiştir (Carlton, 2007).



Şekil 3.5 : Gemi direnci tahmin yöntemleri ve örnekleri (Carlton, 2007).

Bu yöntemler genel olarak geleneksel ve standart seriler metodları, regresyon temelli metodlar, model deneyleri ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD veya CFD) yaklaşımıdır.

Froude (1872) ilk olarak gerçek geminin artık direnç değerini bulmak için, bir gemi modelinin artık direnç değerinin, Newton Benzerlik Prensibine göre ölçeklendirilerek kullanılabileceğini fark etmiştir. Fakat sürtünme direnci bu şekilde ölçeklendirilememektedir. Bu yüzden Froude sürtünme direnci ile boy, yüzey alanı ve hız arasında ampirik olarak ilişki bulabilmek için plakalar üzerinde çalışmalar yapmıştır. Bu deneylerin bulgularına göre bir modelin sürtünme direnç tahmini de yapılabilmiştir. Model deneyi sonucunda bulunan toplam direnç değerinden, ampirik

formüllerle elde edilmiş olan modelin sürtünme direnci değeri çıkarıldığında modelin artık direnç değeri elde edilmektedir. Daha sonra elde edilen artık direnç değeri ölçeklendirilerek gerçek geminin artık direnç değeri elde edilebilir. Gerçek geminin sürtünme direnci de ampirik olarak elde edilmesiyle birlikte, bu iki değer toplanarak geminin toplam direnci bulunmaktadır. Model deneylerinde kullanılan temel mantık hala budur. Gemi direnci tahmin yöntemleri arasında model çekme deneyleri, hala en sağlıklı sonuçları veren yöntem olarak kullanılmaktadır.

Yine son yıllarda gelişen bir yöntem olmasına rağmen gelecek için umut vadeden bir başka yöntem de sayısal bir yöntem olan hesaplamalı akışkanlar dinamiğidir. Bu konu ile ilgili geliştirilen birçok ticari paket program mevcuttur. Bu yöntemde, hem üzerinde çalışılacak yapının hem de olayın doğasının ve fiziğinin doğru modellenmesi çok önemlidir. Günümüzde HAD yöntemleri bir ön fikir vermesi açısından kullanılmaktadır ve HAD sonuçları, deney sonuçlarıyla karşılaştırılmaktadır. Fakat bu konu üzerinde çok geniş araştırmalar mevcuttur ve kısa zamanda bu yöntemin çok daha yaygın olarak kullanılacağı düşünülmektedir.

3.8.1 Geleneksel ve standart seriler metodu

Bu metodlar genel olarak yapılan bir seri deney sonuçlarına göre geliştirilmişlerdir. Bu metodlara örnek olarak Taylor (1943) metodu, Ayre (1948) metodu, Auf ’m Keller (1973) metodu, Harvald (1978) metodu, standart seri metodları verilebilir.

3.8.2 Regresyon temelli metodlar

Gemi direncini tahmin etmek için gemi tipine göre çeşitli matematiksel yöntemler geliştirilmiştir. Örneğin deplasman tekneleri için, Andersen/Guldhammer metodu (Andersen ve Guldhammer, 1986), Holtrop&Mennen metodu (Holtrop ve Mennen, 1982), Fung metodu (Fung, 1991), Van Oortmerssen metodu (Oortmerssen, 1971), Digernes ve Chena metodu, Jin, Su ve Tan metodu (Jin ve diğ, 1980), Calisal metodu (Calisal ve McGreer, 1993), FAO (UN) metodu (Hayes ve Engval, 1969) kullanılabilir.

3.8.3 Model deneyleri

Model deneyleri, geminin geometrik bir benzeri olan, belirli bir ölçekteki modelinin bir model arabasına bağlanarak deney havuzunda çekilmesiyle yapılmaktadır. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7’te örnek bir deney havuzu ve model arabası sırasıyla gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Deney havuzu.



Şekil 3.7 : Model arabası.

Bir modelin toplam direnci, R_{T_m} , temel olarak ikiye ayrılır. Bunlar sürtünme direnci, R_{F_m} , ve artık direnç, R_{R_m} , 'tir. Bu bağıntı denklem (3.13)'de gösterilmiştir (Froude, 1872).

$$R_{T_m} = R_{F_m} + R_{R_m} \tag{3.13}$$

Denklem (3.13) dinamik basınç, $\frac{1}{2}\rho_m U_m^2$, ve model ıslak yüzey alanına, S_m, bölünerek boyutsuzlaştırılabilir. Burada ρ_m model deneyindeki akışkanın özkütlesi, U_m modeli çekme hızıdır. Bu boyutsuzlaştırma sonucunda denklem (3.14) elde edilir (Gilmer ve Johnson, 1982).

$$C_{T_m} = C_{F_m}(\mathrm{Re}_m) + C_{R_m}(Fr_m) \tag{3.14}$$

Modelin toplam direnç katsayısı, C_{T_m} , model sürtünme direnci katsayısı, C_{F_m} , ve model artık direnç katsayısının, C_{R_m} , toplamıdır. Model sürtünme direnci katsayısı model Reynolds sayısının, $\mathrm{Re}_m = U_m L_m \nu_m^{-1}$, bir fonksiyonu, model artık direnç katsayısı da model Froude sayısının, $Fr_m = U_m (gL_m)^{-1/2}$, bir fonksiyonudur. Burada L_m model boyu, ν_m model testinde kullanılan sıvının viskozitesi, g yerçekimi ivmesidir.

Model deneylerini kullanarak gerçek geminin direnç tahminini doğru şekilde yapabilmek için gemi ile model arasında dinamik benzerlik olmalıdır. Bunun için gemi ile modelin Froude sayısı ve Reynolds sayısının aynı olması gerekmektedir. Fakat uygulamada Reynolds sayılarını eşitlemek imkânsız olduğundan eksik dinamik benzerlik kullanılarak, denklem (3.15)'de görüldüğü gibi sadece Froude sayıları eşitlenir.

$$Fr_m = Fr_s \tag{3.15}$$

Bu ifade açık şekilde yazılırsa denklem (3.16) elde edilir.

$$\frac{U_m}{\sqrt{gL_m}} = \frac{U_s}{\sqrt{gL_s}} \tag{3.16}$$

Burada U_s gemi hızı, L_s ise gemi boyudur. Model deneyleri yapılırken, modelin hangi hızda çekileceği bulunurken denklem (3.16) kullanılır. Bu denklemden model hızı çekilirse denklem (3.17) elde edilir.

$$U_m = U_s \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = \frac{U_s}{\sqrt{\lambda}} \qquad \textbf{(3.17)}$$

Burada $\lambda = L_s / L_m$ benzerlik oranıdır.

Model deneylerinde her bir hızda modelin toplam direnç katsayısı, C_{T_m}, ölçülür. Model sürtünme direnci katsayısı, C_{F_m}, ITTC-1957 formülü, denklem (3.18) kullanılarak bulunur (Woo ve diğ. , 1983).

$$C_{F_m} = \frac{0.075}{\left(\log_{10} \mathrm{Re}_m - 2\right)^2} \qquad \textbf{(3.18)}$$

Daha sonra modelin artık direnç katsayısı denklem (3.14) kullanılarak bulunur. Modelin artık direnç katsayısıyla geminin artık direnç katsayısı Froude sayılarının eşitliği dolayısıyla aynı olduğundan, geminin artık direnç katsayısı da bulunmuş olur. Geminin sürtünme direnci katsayısı da denklem (3.18) kullanılarak bulunur. Fakat denklemde model Reynolds sayısı, Re_m**,** yerine gemi Reynolds sayısı, Re_s, kullanılır. Geminin toplam direnç katsayısı, C_{Ts}, Gilmer ve Johnson (1982) tarafından denklem (3.19) olarak verilmiştir.

$$C_{Ts} = C_{Fs} + C_{Rs} + C_A \qquad \textbf{(3.19)}$$

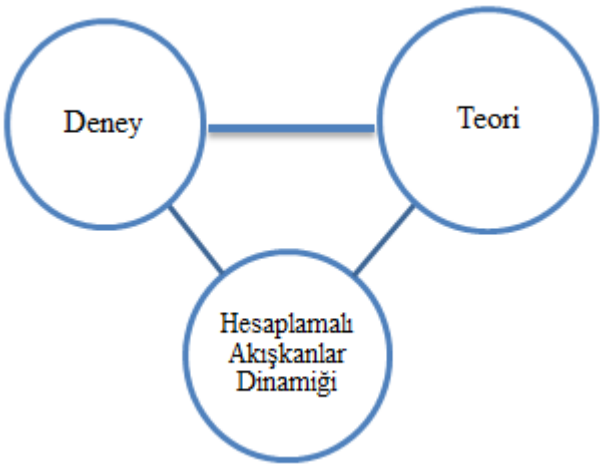
Burada C_A korelasyon düzeltmesi olup, pervane karakteristiklerinin ve izin ölçek etkileri, viskoz direnç üzerindeki 3 boyutluluk etkileri ve tekne pürüzlülük etkileri dolayısıyla oluşacak direnç farklılıklarını göze almak için kullanılmaktadır (Woo ve diğ., 1983).

3.8.4 Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) akış, ısı transferi, kimyasal reaksiyonlar gibi karmaşık sistemler ile ilgili sayısal çözümler sağlayan bir araçtır. Adından anlaşılacağı gibi HAD akışkanlar dinamiğinin bir uygulaması olup, analitik olarak çözülmesi imkânsız olan karmaşık fiziksel olayları yaklaşık doğru bir şekilde sayısal olarak çözmemize ve anlamamıza olanak sağlar. Bir başka deyişle HAD temel olarak

akışkan davranışının etkili olduğu problemlerin, sayısal metot ve algoritmalar ile bilgisayar üzerinde çözülerek analiz edildiği, akışkanlar mekaniğinin bir koludur.

HAD günümüzde üretim dizayn spiralinin azaltılması veya iyileştirilmesi için uzay, otomotiv, kimya, inşaat ve gemi inşaatı gibi birçok endüstri tarafından sıkça kullanılmaktadır. Ayrıca üniversiteler ve diğer araştırma kurumları tarafından da sıkça kullanılmaktadır. Daha önceleri akışkanlar dinamiği teori ve deney olmak üzere iki yaklaşımlıydı. Günümüzde ise hesaplama işlem gücünün artması ve güçlü bilgisayarlar sayesinde yeni bir üçüncü yaklaşım olarak HAD ortaya çıkmıştır. HAD, akışkanlar dinamiği teorileri ve deneyleriyle birlikte kullanılan ve bu iki yaklaşımın arasında bir yaklaşım sunmaktadır. Şekil 3.8'de akışkanlar dinamiğinin bu üç kolu görülmektedir.



Şekil 3.8 : Akışkanlar dinamiğinin 3 boyutu (Anderson J. D., 1995).

Akışkanlar kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerjinin korunumu denklemleriyle yönetilirler. Bu temel fiziksel prensipler integral veya diferansiyel denklemlerle ifade edilirler. HAD bu denklemlerde yer alan integral veya diferansiyel ifadelerini ayrıklaştırılmış cebrik denklemlere dönüştürme sanatıdır (Anderson J. D., 1995). Bu denklemler bilgisayarlar sayesinde çözülmekte ve ayrıklaştırılmış zaman noktasındaki sayısal değer bulunmaktadır. HAD'ın sonuç olarak ürettiği ürün, analitik çözümler sunan denklemler gibi kapalı formlar değil sayısal verilerdir.

HAD çözümleri binlerce, bazen milyonlarca iterasyonu kapsamaktadır. Bu işlemleri bilgisayar yardımı olmadan yapmak imkânsızdır. Dolayısıyla HAD çözümleri için yüksek hızlı dijital bilgisayarlar araç olarak kullanılmaktadır.

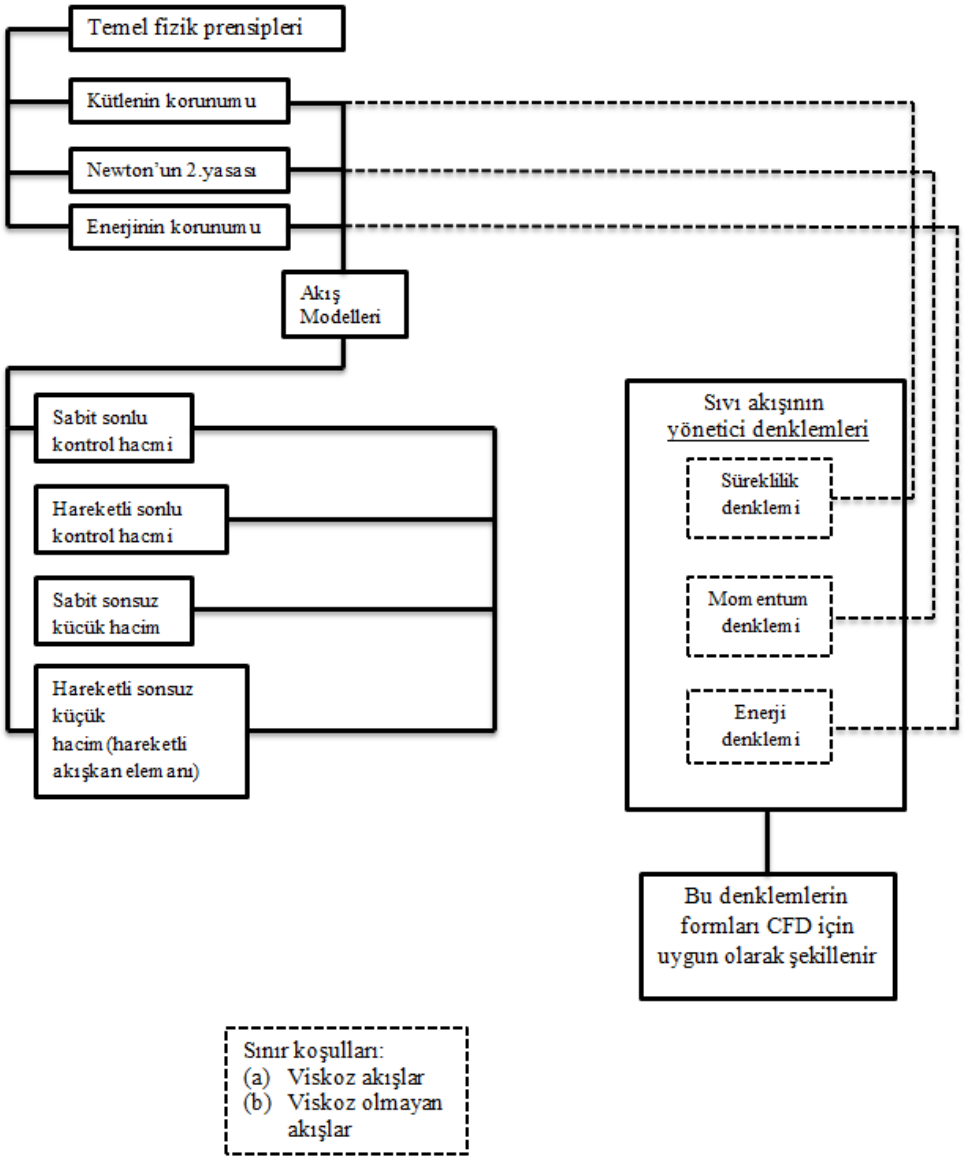
HAD simülasyonlarında izlenen adımlar, ön-işleme, hesaplama ve ard-işleme olarak ele alınabilir (Sezer-Uzol, 2009). Ön-işleme adımında, probleme uygun geometrinin hazırlanması, hesaplama alanının belirlenmesi, çözüm ağının oluşturulması ve hesaplama işlemi için uygun hale getirilmesi işlemleri vardır. Hesaplama adımında, olayın doğasına uygun matematiksel modellerin, sayısal algoritmaların ve sınır koşullarının seçilmesi sonrasında hesaplamalar yapılır. Ard-işleme adımında ise hesaplama adımında elde edilen çözümün analizi, yorumlanması, grafikleştirilmesi ve animasyonlarla görselleştirilmesi gibi işlemler yapılır.

3.8.4.1 Hesaplama adımı

HAD akışkanlar dinamiğinin yönetici denklemleri olan süreklilik denklemleri, momentum denklemleri ve enerji denklemlerini temel almaktadır. Bu denklemler 3 temel fiziksel prensibin matematiksel ifadesidir. Bu fiziksel prensipler şunlardır:

1. Kütlenin korunumu
2. Newton'un 2. Yasası
3. Enerjinin korunumu

Şekil 3.9'da hesaplama adımında yapılan işlemler görülmektedir.



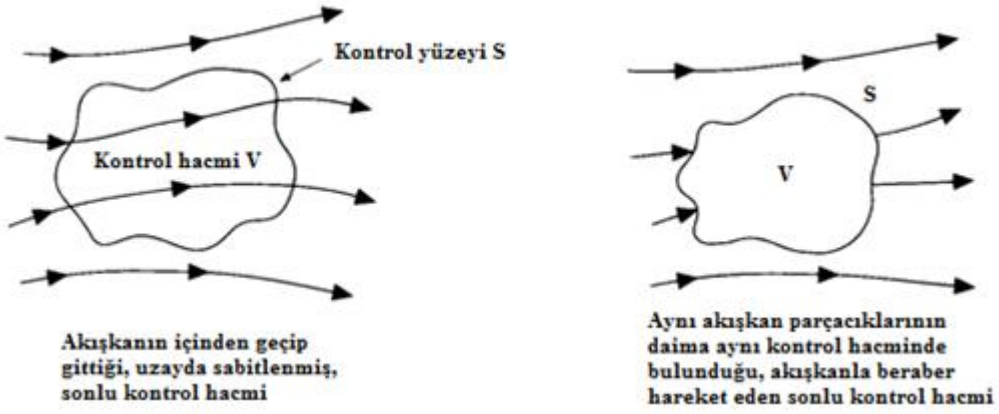
Şekil 3.9 : Hesaplamalı akışkanlar dinamiği algoritması (Anderson J. D., 1995).

3.9 Akış Modelleri

HAD çözümlerinde akışı modellemek çok önemlidir. Çünkü akışkan katı gibi her noktası aynı hızda ilerleyen rijit bir durumda değildir. Dolayısıyla akışkanı modellemek için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemler sonlu kontrol hacmi ve sonsuz küçük akışkan parçacığı yaklaşımıdır.

Sonlu kontrol hacmi yaklaşımında belli bir akış bölgesinde belli bir kontrol yüzeyi, S, tarafından sınırlanan belli bir kontrol hacmi, V, varsayımında bulunulur ve hesaplamalar bu sabit hacim için yapılır. Kontrol hacminin sabit veya akışkanla

beraber hareket ettiği kabulü yapılabilir. Şekil 3.10'da Sonlu kontrol hacmi yaklaşımının iki farklı durumu da görülmektedir.

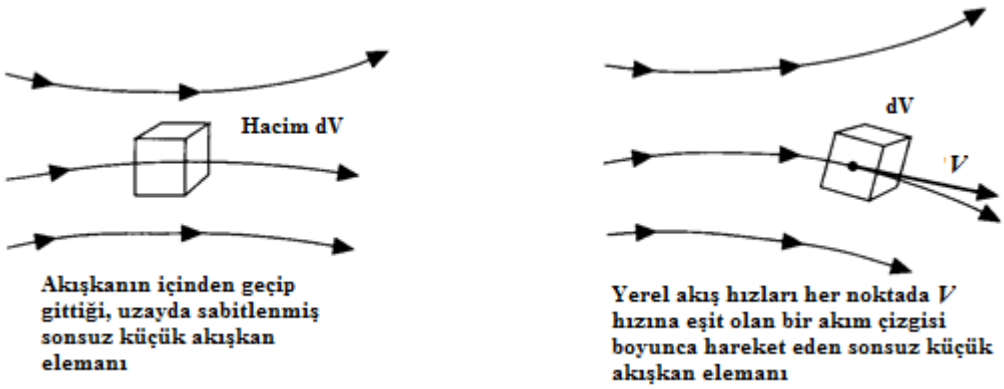


Şekil 3.10 : Sonlu kontrol hacmi için 2 farklı yaklaşım (Anderson J. D., 1995).

Kontrol hacminin sabit olduğu varsayımında kontrol hacmi içindeki akışkan devamlı değişmektedir. Hareketli kontrol hacmi varsayımında ise kontrol hacmi akışkanla beraber hareket ettiği için hep aynı akışkan parçaları kontrol hacmi içinde olacaktır. Her iki durumda da tüm akışkana bir seferde bakmaktansa belli bir bölge için inceleme ve hesaplama yapılmaktadır. Sonlu kontrol hacmine temel fiziksel prensipler uygulanarak elde edilen akış denklemleri integral formunda denklemlerdir. Bu temel denklemler dolaylı matematiksel manipülasyonlarla kısmi diferansiyel denklemlere dönüştürülebilir.

Uzayda sabit kontrol hacmi kabulü ile bulunan bu denklemlere temel denklemlerin korunum (conservation) formu denir. Hareketli kontrol hacmi kabulü ile bulunan denklemlere ise temel denklemlerin korunumsuz (nonconservation) formu denir.

Sonsuz küçük akışkan parçacığı yaklaşımında belli bir akış bölgesinde dV hacmine sahip sonsuz küçük bir akışkan parçacığı düşünülür. Bu parçacığın sabit veya akışkanla beraber hareket ettiği kabul edilebilebilir. Hareketli durumda bu parçacığın akım hattı boyunca akış hızına eşit bir $\vec{V}$ hız vektörüyle hareket ettiği varsayılır. Şekil 3.11'de bu iki durum görülmektedir.



Şekil 3.11 : Sonsuz küçük akışkan elemanı için 2 farklı yaklaşım (Anderson J. D., 1995).

Bu iki durumda da yine tüm akışkana bir seferde bakmaktansa sadece sonsuz küçük bir akışkan parçası için inceleme ve hesaplama yapılmaktadır. Sonsuz küçük akışkan parçasına temel fiziksel prensipler uygulanarak elde edilen akış denklemleri kısmi diferansiyel denklemlerdir. Aynı sonlu kontrol hacmi yaklaşımında olduğu gibi uzayda sabit sonsuz küçük akışkan parçası yaklaşımı için bulunan temel denklemlere korunum formunda denklemler, hareketli sonsuz küçük akışkan parçası yaklaşımı için bulunan temel denklemlere ise korunumsuz formda denklemler denmektedir. Bu kabuller için süreklilik, momentum ve enerji denklemleri elde edilebilebilir.

3.10 Hareketi Belirleyen Denklemler

Bu çalışmada uzayda sabit kontrol hacmi içindeki viskoz akış incelenmiştir. Dolayısıyla viskoz akışlar için korunumlu formda temel denklemler kullanılacaktır. Tüm bu kabuller altında, daimi olmayan, 3 boyutlu, sıkıştırılabilir, viskoz akışlar için korunumlu temel denklemler şunlardır:

Denklem (3.20)'de süreklilik denklemi görülmektedir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \vec{V}) = 0 \qquad \textbf{(3.20)}$$

Denklem (3.21), denklem (3.22) ve denklem (3.23)'de sırasıyla momentum denkleminin x, y, z bileşenleri görülmektedir.

x bileşeni:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t}+\nabla.(\rho u\vec{V})=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}+\rho f_x \qquad \textbf{(3.21)}$$

y bileşeni:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}+\nabla.(\rho v\vec{V})=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}+\rho f_y \qquad \textbf{(3.22)}$$

z bileşeni:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t}+\nabla.(\rho w\vec{V})=-\frac{\partial p}{\partial z}+\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}+\rho f_z \qquad \textbf{(3.23)}$$

(3.24)'te enerji denklemi görülmektedir.

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\right]+\nabla.\left[\rho\left(e+\frac{V^2}{2}\right)\vec{V}\right]=\rho\dot{q}+\frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right)\\&+\frac{\partial}{\partial z}\left(k\frac{\partial T}{\partial z}\right)-\frac{\partial(up)}{\partial x}-\frac{\partial(vp)}{\partial y}-\frac{\partial(wp)}{\partial z}+\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x}+\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y}+\frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z}\\&+\frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x}+\frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y}+\frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z}+\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x}+\frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y}+\frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z}+\rho\vec{f}.\vec{V}\end{aligned} \qquad \textbf{(3.24)}$$

4. YÜZEY KİRLİLİĞİNİN DİRENÇ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

4.1 Giriş

Denizlerde olan *fouling*, su altına batmış ya da yarı batmış yüzeyler üzerinde organizma topluluklarının yerleşmesi ve büyümesi anlamına gelmektedir (Lewis, 1998). Batık bir cisim üzerinde saatler içerisinde mikroskobik organizmalardan oluşan kaygan çamur tabakası oluşmaktadır (Steinberg ve diğ., 2002). Bu katman çeşitli biyokimyasal ipuçları salgılayarak, makroorganizmaların bu yüzey üzerine yapışıp yerleşmesini kolaylaştırmaktadırlar (Zobell ve Allen, 1935).

Fouling tekne yüzeyinde pürüzlülüğü, yani sürtünme direncini artırmakta, bu da dolaylı olarak yakıt tüketimini artırmaktadır (Kempf, 1937). ICS&ISF'in (2012) verilerine göre Dünya ticaretinin %90'ının deniz yoluyla yapıldığı göz önüne alındığında, *fouling* dolayısıyla oluşan fazladan yakıt tüketiminin sonuçlarının ne kadar önemli olduğu daha iyi anlaşılabilir.

Milne (1990) *fouling*'e karşı önlem alınmadığında yakıt tüketiminin %40 artışa neden olabileceğini tahmin etmektedir.

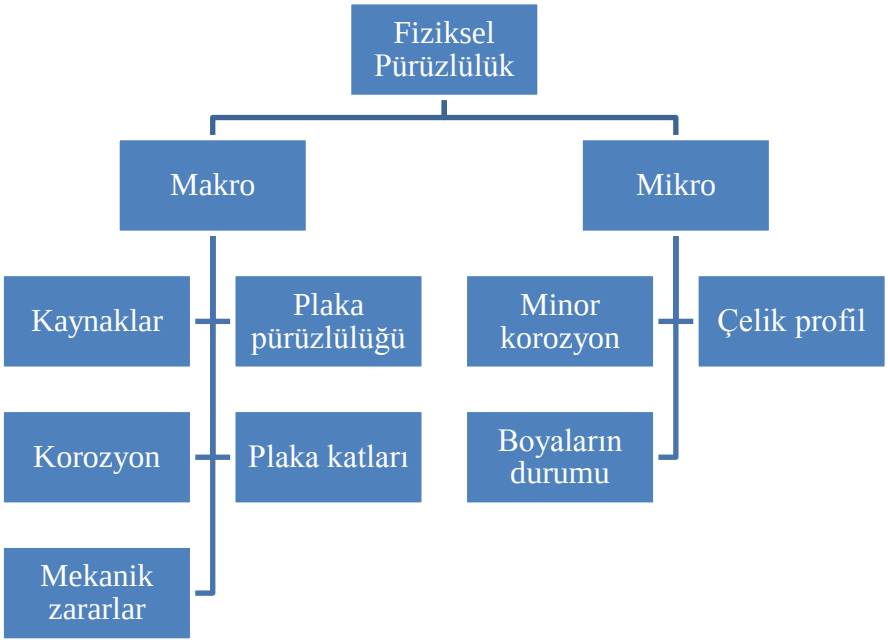
Tekne yüzeyinin durumu, gemi direnci üzerinde çok etkili olan bir faktördür. Hiç *fouling* olmasa bile sürtünme direnci toplam direncin %90'ı olabilmektedir (Kempf, 1937; Lackenby, 1962). Mikro organizmalardan dolayı oluşan direnç artışı %1-2 civarındayken, *barnacles*, tüp kurtçuklar ve midye gibi sert kabuklu türler kontrol altına alınmazlarsa gemi direncini %40'a kadar artırabilir (Taylan, 2010). Schultz (2007)'a göre kaygan çamur tabakası tek başına fazladan %21, ağır kalkerli *fouling* ile birlikte %86'ya kadar ek olarak güç gereksinimine neden olmaktadır. Bu güç gereksinimi artışı, *fouling*'in su altı yüzey pürüzlülüğünü artırması, dolayısıyla sürtünme direncini artırması nedeniyle gerçekleşmektedir. Dolayısıyla *fouling*'in sürtünme üzerine etkisi ve bu etkinin gemi direncine etkisi çoğu araştırmaya konu olmuştur.

Bu bölümde *fouling* oluşumunun ve *antifouling* boyaların pürüzlülük ve dolayısıyla gemi direnci üzerine etkileri incelenmiştir. Öncelikle *fouling* ve *antifouling* boyalar

nedeniyle oluşan pürüzlülük tanıtılmış ve pürüzlülüğü belirleyen parametreler üzerinde durulmuştur. Daha sonra pürüzlülüğün akışa etkisini anlayabilmek adına sınır tabaka teorisinden bahsedilmiş, ardından da bu çalışmanın kapsamında olduğundan dolayı türbülans sınır tabaka özellikleri ve pürüzlülüğün türbülans sınır tabakaya etkileri incelenmiştir. Son olarak, yüzey pürüzlülüğünün, *fouling*'in ve *antifouling* boyaların dirence etkisinin incelendiği bazı çalışmalar ve bu etkileri gözlemlemek için tasarlanan deney sistemleri incelenmiştir.

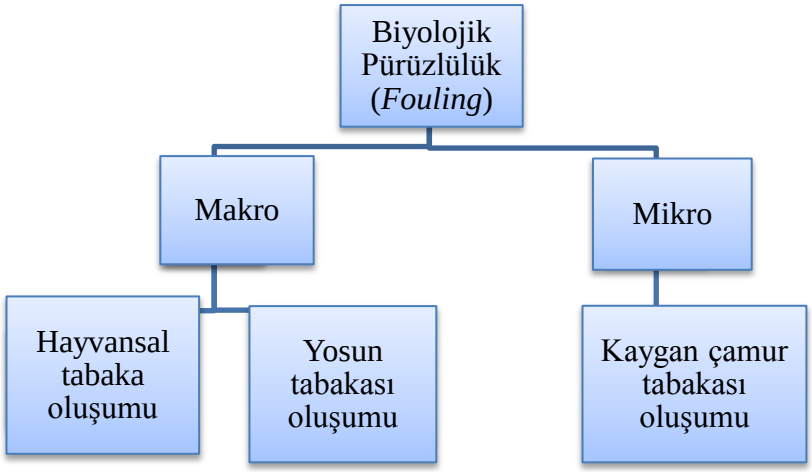
4.2 Pürüzlülük

Yüzey pürüzlülüğü kalıcı veya fiziksel ve geçici veya biyolojik olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2'de sırasıyla fiziksel ve biyolojik pürüzlülüğün sınıflandırılması görülmektedir (Url-2).



Şekil 4.1 : Fiziksel pürüzlülüğün sınıflandırılması (Url-2).

Kalıcı veya fiziksel pürüzlülük, tekne yüzeyindeki akımı bozan plaka deformasyonları, kaynak hataları, yalpa omurgası gibi süreksizlikler nedeniyle oluşur. Kalıcı pürüzlülük bu çalışmanın konusu değildir. Fakat kalıcı pürüzlülüklerin aksine, biyolojik pürüzlülük, tekne su altı yüzeyinin ortalama pürüzlülüğüne bağlıdır. Bu pürüzlülük de *fouling* nedeniyle oluşmakta ve çeşitli yöntemlerle engellenmekte ya da azaltılabilmektedir.



Şekil 4.2 : Biyolojik pürüzlülüğün sınıflandırılması (Url-2).

Yüzey pürüzlülüğü 3 boyutlu bir problem olmasına rağmen çoğu zaman sadece yükseklik parametresiyle değerlendirilir. Boyanmış gemi yüzeyi durumunda, yüzey topografyası birkaç mikrondan bir kaç metreye kadar değişen aralıkta dalga boylarından oluşmaktadır. Yüzey topografyası yüzey pürüzlülüğü, dalgalılık ve form hatası olarak üç şekilde sınıflandırılmıştır. Dalgalılık ve form hatası birlikte yapısal pürüzlülük olarak kabul edilmektedir (Lackenby, 1962). Perçinleme yerine kaynak teknolojisi kullanıldığından beri yapısal pürüzlülüğün etkisi bir hayli azalmıştır.

Ortalama tekne pürüzlülüğü, tekne yüzeylerinin karakterizasyonunda uluslararası olarak kabul edilen tek pürüzlülük parametresi olmuştur (ITTC, 1990). Fakat, aynı yükseklik veya genlik parametresine sahip iki yüzey, oldukça farklı dokulara sahip olabileceğinden, pürüzlülük kavramının tek bir pürüzlülük parametresi ile temsil edilmesinin yanlış olduğu fark edilmiştir. En azından dokuyu tanımlayan bir parametre daha olması gerekir.

Dolayısıyla genlik parametreleri ve doku parametreleri yüzey pürüzlülüğünü tanımlayan parametreler olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada genlik parametreleri ve genlik parametrelerine bağlı olarak tanımlanan eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği kullanılmıştır.

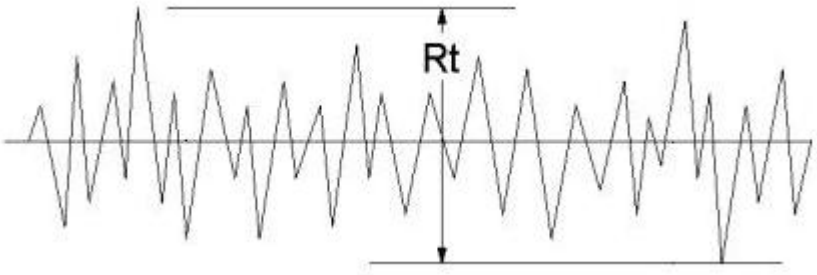
4.2.1 Genlik parametreleri

Bu parametreler özellikle pürüzlülüğün direnç üzerine etkisinin incelendiği çalışmalarda en çok kullanılan parametrelerdir. Bu parametrelerden uç değer

parametreleri ve ortalama parametreler genlik parametreleri bu çalışma kapsamındadır.

1- **Uç değer parametreleri**

a) Rt: Filtrelenmiş profildeki en yüksek tepe noktasıyla en aşağıdaki çukur arasında kalan mesafedir. Şekil 4.3 Rt'nin temsili gösterimini ifade etmektedir.



Şekil 4.3 : Rt'nin temsili fiziksel gösterimi (Url-4).

b) Rz: En yüksek 5 tepe noktası ile en aşağıdaki 5 çukur noktası arasındaki mesafelerin ortalamasıdır.

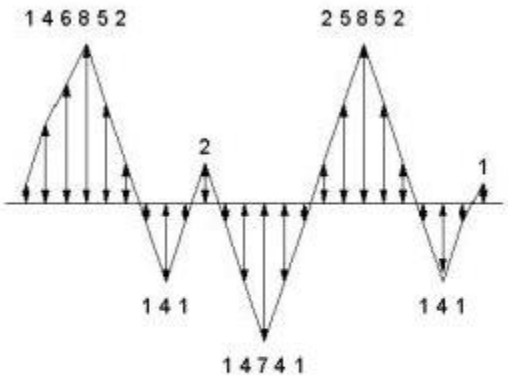
2- **Ortalama parametreler**

a) **Rq:** Ortalama karekök (RMS) pürüzlülüğüdür. Profilin tüm noktalarının değerlerinin ortalama kareköküdür. Başka bir deyişle, orta eksenin altında ve üstünde meydana gelen sapmaların geometrik ortalama değeridir. Ayrıca yüzey yapısı hakkında da bilgi verir. Rq teriminin formülasyonu denklem (4.1)'de gösterildiği gibidir (Url-5).

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l z^2(x)dx} \qquad \textbf{(4.1)}$$

Burada l ölçümü yapılan plakanın uzunluğu, z(x) pürüzlülük profilinin ordinatlarıdır.

b) **Ra veya Rt_{50}:** Ortalama pürüzlülüktür. Profilin tüm noktalarının mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Aritmetik ortalama pürüzlülük olarak da isimlendirilir. Şekil 4.4'de örnek ortalama pürüzlülük hesabı görülmektedir.



***Ra* = Ortalama (1, 4, 6, 8, 5, 2, 1, 4, 1, 2, 1, 4, 7, 4, 1, 2, 5, 8, 2, 1, 4, 1, 1)**

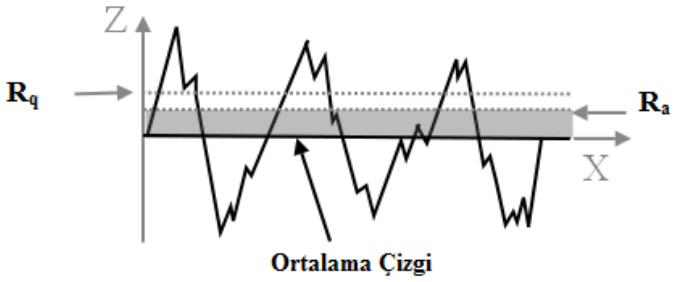
***Ra* = 3,26**

Şekil 4.4: Örnek ortalama pürüzlülük hesabı (Url-4).

Ortalama pürüzlülük hesabının matematiksel formülasyonu denklem (4.2)'de gösterilmiştir (Url-5).

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |z(x)|\,dx \qquad \textbf{(4.2)}$$

Şekil 4.5'de ortalama pürüzlülük ve ortalama karekök pürüzlülüğünün temsili gösterimi verilmiştir.



Şekil 4.5 : Ortalama pürüzlülük ve ortalama karekök pürüzlülüğünün temsili gösterimi (Url-5).

4.2.2 Eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği

Özellikle yüzeylerin pürüzlülük değerlerinin dirence etkileri incelenirken, pürüzlülük tanımlayan parametre olarak pürüzlülük yüksekliği, k, kullanılmaktadır. Zaman zaman da pürüzlülük yüksekliği yerine, eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği, k_s, kullanılmaktadır. Fakat k veya k_s parametrelerini daha önce belirtilmiş olan

pürüzlülük parametrelerine doğrudan bağlayan bir korelasyon bulunmamaktadır. Farklı yüzeylere göre farklı kabuller yapılmaktadır.

Fouling olayında ise *k* değerinin nasıl tanımlanacağına dair net bilgiler veren bir çalışma bulunmamaktadır. Bu konu, ilerideki çalışmalarda incelenebilir bir konu olarak öne çıkmaktadır. Şu an ise *fouling* dolayısıyla oluşan yüzey pürüzlülüğünün homojen olduğu kabulü ile genel geçer kabuller yapılmaktadır. Bu çalışmada da bu kabuller yapılmıştır.

Çizelge 4.1'de farklı *fouling* durumlarında eşdeğer kum tanesi pürüzlülük değerleri ile ilgili bilgiler görülmektedir.

Çizelge 4.1 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu (Schultz, 2007).

Durum tanımı	NSTM derecelendirmesi*	k_s (μm)	Rt_{50} (μm)
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	0	0	0
Antifouling boya uygulanmış yüzey	0	30	150
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	10 - 20	100	300
Ağır kaygan çamur tabakası	30	300	600
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	40 - 60	1000	1000
Orta kalkerli *fouling*	70 - 80	3000	3000

*NSTM (2002)

NSTM (The Naval Ships' Manual) derecelendirmesi America Birleşik Devletleri Donanması tarafından kullanılan NSTM (2002) temelli *fouling* indisidir. Eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği (k_s) ve ortalama pürüzlülük (Rt_{50}) değerleri Schultz (2004)'un ölçümlerine göre verilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü temel olarak akışın sınır tabaka özelliklerini etkilediği için dirence etki etmektedir.

Yeni gemilerin tekne pürüzlülük değerleri son yıllarda düşmeye başlamıştır (Townsin ve diğ., 1986). Yeni gemilerde ulaşılabilen en iyi pürüzlülük değeri 70 μm civarındadır. Yeni çelik plakaların ortalama pürüzlülük değerleri 40-60 μm civarındadır. Yeni gemilere uygulanan *antifouling* boyalar bu pürüzlülük değerini genellikle 95-125 μm arasına getirmektedir. TBT-SPC ile boyanmış gemilerde ilk 10 yıllık servis süresi boyunca lineer olarak yılda 20 μm kadar bir pürüzlülük artışı meydana gelmektedir (Townsin ve diğ., 1986).

Pürüzlülük hidrodinamik gürültü gibi diğer olumsuz etkilerinin yanı sıra gemilerde belirgin sürtünme direnci artışlarına neden olmaktadır. Tekne pürüzlülüğünün

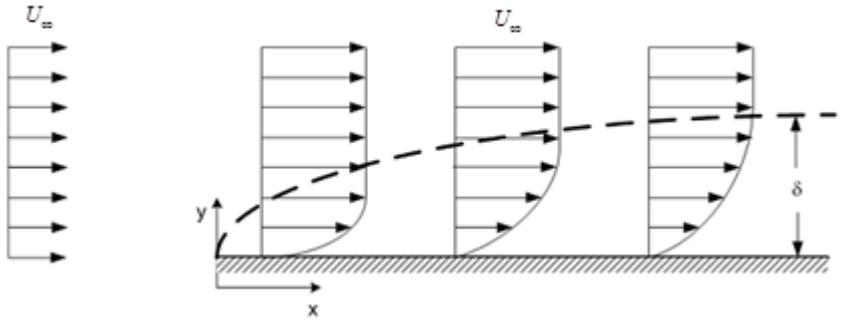
sürtünme direnci üzerine doğrudan etkisinin değerlendirilmesi, yüzey üzerindeki düzensiz pürüzlülüğün tam bir tanımının yapılamaması ve pürüzlülüğün sınır tabakadaki türbülans üretimi ve sürtünme üzerine etkilerinin tümüyle anlaşılamaması nedeniyle bir hayli zordur.

Yeni boyanmış ve 225 μm'den küçük pürüzlülük değerlerine sahip gemiler için, AHR'yi (Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü) tanımlayan parametre olarak Rt_{50}'nin kullanımı iyi bir direnç artış tahmini sağlamaktadır (Townsin ve Dey, 1990).

4.3 Türbülans Sınır Tabaka

Fouling ve yüzey pürüzlülüğünün gemi direnci üzerine etkisini açıklayabilmek için türbülans sınır tabaka içindeki hız profili karakteristiklerinin açıklanması gerekmektedir.

İlk olarak sınır tabaka kavramı 1904 yılında Prandtl tarafından kullanılmıştır (Schlichting, 1979). Bir cisim etrafındaki akışta, cisim yüzeyi üzerindeki teğetsel hız sıfır iken, bu cisimden belli bir miktar uzaklıkta ise hız serbest hız değerindedir ve bu iki nokta arasındaki tabakada bir hız gradyeni oluşmaktadır. Bu tabakaya sınır tabaka denmektedir. Şekil 4.6'da sınır tabakanın oluşumu görülmektedir.



Şekil 4.6: Sınır tabaka kalınlığı δ ve hız profilinin değişimi (Url-6).

Burada δ sınır tabaka kalınlığı U_∞ ise serbest akış hızıdır. Çok düşük viskozite değerlerine sahip akışkanlar için bile, sınır tabakadaki sürtünme kesme gerilmeleri, τ, oldukça büyük olmaktadır. Kesme gerilmesi denklem (4.3)'deki gibi ifade edilmektedir.

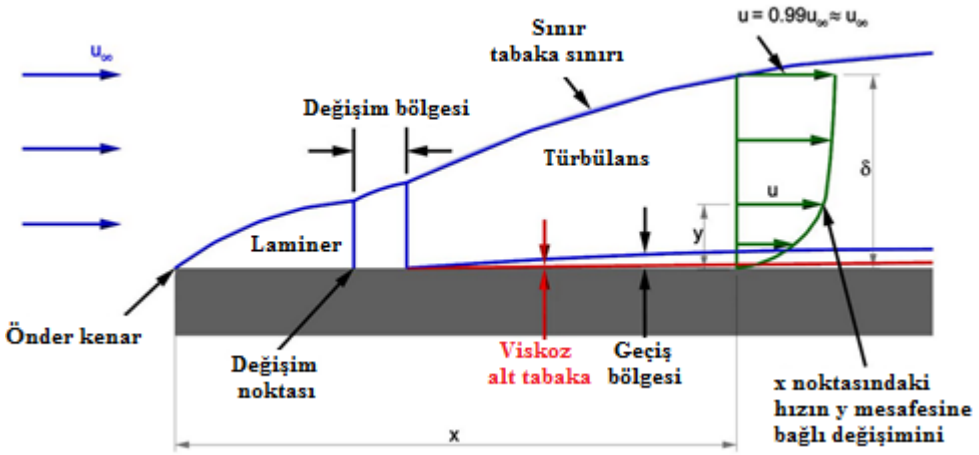
$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial y} \tag{4.3}$$

Burada μ dinamik viskozitedir. Sınır tabaka kalınlığı, δ, cismin boyuna ve durumuna göre değişmektedir. Pürüzsüz düz bir plakanın türbülans sınır tabaka kalınlığı Schlichting (1979) tarafından denklem (4.4)'de görüldüğü gibi önerilmiştir.

$$\delta(x) = 0,37 x \, \mathrm{Re}_x^{-0.2} \tag{4.4}$$

Burada x, sınır tabaka kalınlığı aranan noktanın önder kenardan uzaklığını ifade etmektedir.

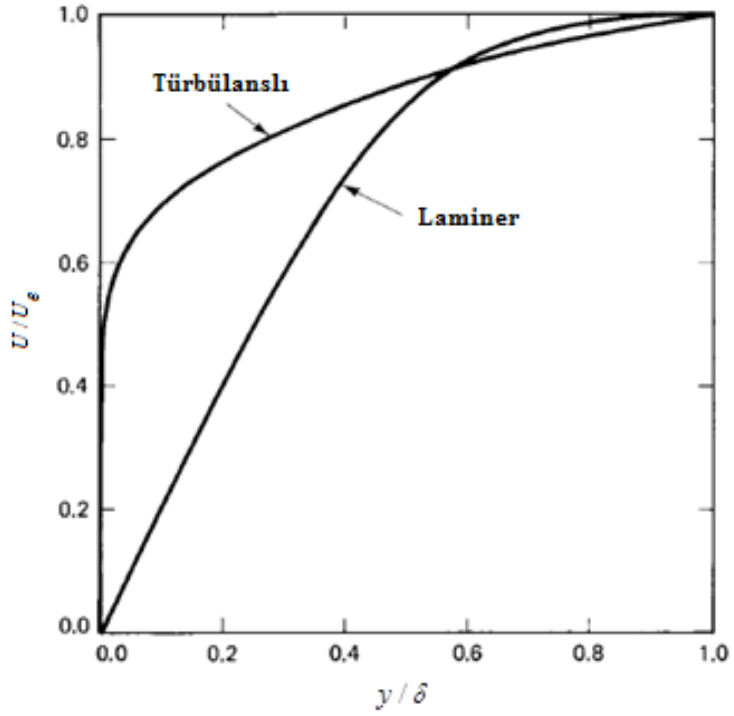
Başlangıçta sınır tabaka laminer olmakta, belli bir noktadan sonra ise dengesizlikler başlamakta ve sınır tabaka türbülanslı hale gelmektedir. Laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş genel olarak Reynolds sayısına bağlıdır. Bu geçiş süreci ayrıca yüzey pürüzlülüğü, basınç, serbest hız çalkantıları ve diğer faktörlere de bağlıdır (Candries, 2001). Pürüzsüz düz plakalarda bu geçiş yaklaşık olarak Re=10^6 değerine ulaştığında olmaktadır. Şekil 4.7'de düz bir plaka üzerinde oluşan sınır tabaka görülmektedir (Url-7).



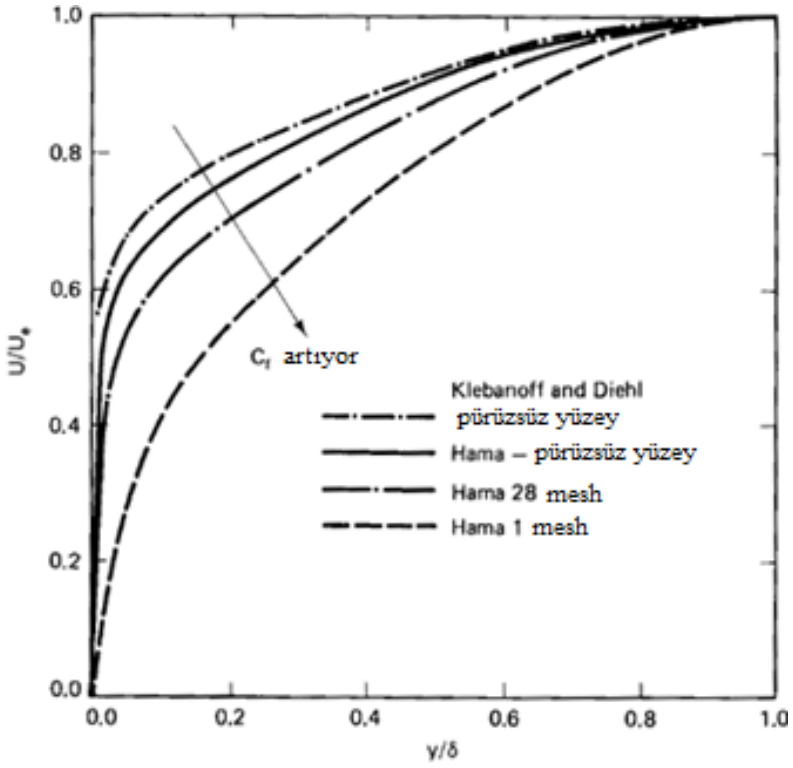
Şekil 4.7 : Düz bir plaka üzerinde oluşan türbülans sınır tabaka (Url-7).

Gemiler etrafındaki akış olayının temeli de türbülans sınır tabaka ile ilgilidir. Akışın türbülanslı duruma geçişi bir teknenin baş kısmında meydana gelmektedir. Akış yönünde belli bir noktadan sonra ise bu akım hatları tekneden uzaklaşmaya ve geri dönmeye başlar. Bu noktaya ayrılma noktası denir. Bu ayrılma noktası kıçta düşük basınç bölgesi yaratarak dirençte artış meydana getirmektedir.

Düz bir plaka üzerindeki laminer ve türbülanslı hız profilleri oldukça farklı olmaktadır. Şekil 4.8'de bu fark görülmektedir.



Şekil 4.8 : Laminer ve türbülans sınır tabaka hız profilleri (Schetz, 1993).



Şekil 4.9 : Pürüzsüz ve pürüzlü düz plakalar üzerindeki türbülans sınır tabaka hız profilleri (Schetz, 1993).

Laminer akışlarda, tüm düz plakalar için hız profilleri, akışkanın cinsi, Reynolds sayısı ve yüzeyin pürüzlülüğü gibi özelliklere bağlı olmaksızın aynı olmaktadır. Türbülanslı akışlarda ise Reynolds sayısı, pürüzlülük gibi özellikler hız profillerini tamamen değiştirmektedir. Şekil 4.9'da bu durum görülmektedir.

Bu çalışmada, simülasyonu yapılan deneylerde türbülanslı akış hâkim olduğundan dolayı türbülans sınır tabaka üzerinde durulacaktır.

Tamamen türbülanslı akışlarda hız ortalama ve çalkantı bileşeni olarak ikiye ayrılır. Bu durum 3 yöndeki hız için de geçerlidir ve buna Reynolds ayrışması denmektedir. Reynolds ayrışması denklem (4.5)'de görülmektedir.

$$\begin{aligned} u &= U + u' \\ \mathrm{v} &= V + \mathrm{v}' \\ w &= W + w' \end{aligned} \qquad \textbf{(4.5)}$$

Burada u , v, w sırasıyla hızın x, y, z yönündeki bileşeni, U , V , W sırasıyla ortalama hızın x, y, z yönündeki bileşeni ve u', v', w' sırasıyla çalkantı hızlarının x, y, z bileşenleridir.

Çalkalanmalar 3 boyutlu dönel hareketler olup, akışkanda karışmaya, momentum değişikliklerine ve artan kesme gerilmelerine neden olmaktadır.

Türbülans dolayısıyla ortalama hareket üzerinde oluşan karışmanın etkisi viskozite artışı gibi de düşünülebilir. Bu durumda toplam sınır tabaka kesme gerilmesi, τ , viskoz ve türbülans kesme gerilmeleri olarak ikiye ayrılabilir. Bu ayrılma denklem (4.6)'da görülmektedir.

Toplam kesme gerilmesi = viskoz kesme gerilmesi + türbülans kesme gerilmesi

$$\tau = \mu \frac{\partial U}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \qquad \textbf{(4.6)}$$

Burada $-\rho\overline{u'v'}$ terimi toplam kayma gerilmesine pozitif bir katkı yapar. Yakın-duvar türbülanslarında duvar kesme gerilmesi, τ_w, en önemli parametrelerden biridir. Duvar kesme gerilmesi yerel sürtünme direnci katsayısıyla doğrudan ilgilidir. Yerel sürtünme direnci katsayısı, c_f , denklem (4.7)'de görülmektedir.

$$c_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_e^{\,2}} \tag{4.7}$$

Burada U_e sınır tabaka dış kenar hızıdır. Ayrıca sürtünme hızı da, U_τ, duvar kesme gerilmesiyle, τ_w, doğrudan ilgili olup denklem(4.8)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$U_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} = \sqrt{\frac{c_f}{2}} U_e \tag{4.8}$$

Genel olarak türbülans sınır tabakanın iç ve dış tabaka olarak ikiye ayrıldığı düşünülebilir. Bu varsayım temel olarak viskoz kesme kuvvetlerinin ve türbülans kesme kuvvetlerinin baskın olduğu bölgeleri ayırmak üzerine yapılmaktadır. İç tabakada viskoz kesme kuvvetleri baskınken dış tabakada ise türbülans kesme kuvvetleri baskındır.

İç tabakadaki akış pürüzlülük gibi yüzey koşullarına karşı hassasken, dış tabakadaki akış ise genel olarak yüzey koşullarından etkilenmezler. Bu şekilde temel bir ayrım yapılmış olsa da türbülans sınır tabaka özellikleri bakımında birçok katmandan oluşur.

Bu bölgeler viskoz alt tabaka, logaritmik hız değişim bölgesi ve dış tabakadır. Şekil 4.10'da bu bölgeler ve Şekil 4.11'de bu bölgelerin hız profilleri görülmektedir.

İç tabaka viskoz alt tabaka ve logaritmik hız değişim bölgesini kapsar. Bu tabaka, türbülans sınır tabakanın en içteki %10-20'lik bölümünü kapsamasına rağmen hız değişimlerinin %70'i bu bölgede oluşmaktadır. Bu tabakada viskoz kesme gerilmeleri baskın olup, kesme gerilmesi, τ, duvardaki kesme gerilmesine, τ_w, eşittir. Bu tabakadaki yerel ortalama hız sadece duvar kesme gerilmesi, akışkan özkütlesi, ρ, kinematik viskozitesi, ν, ve duvardan mesafeye, y, bağlıdır. Akışkan hız dağılımı duvar kanunu adıyla bilinen formül ile tanımlanabilir. Bu formül denklem (4.9)'da görülmektedir.

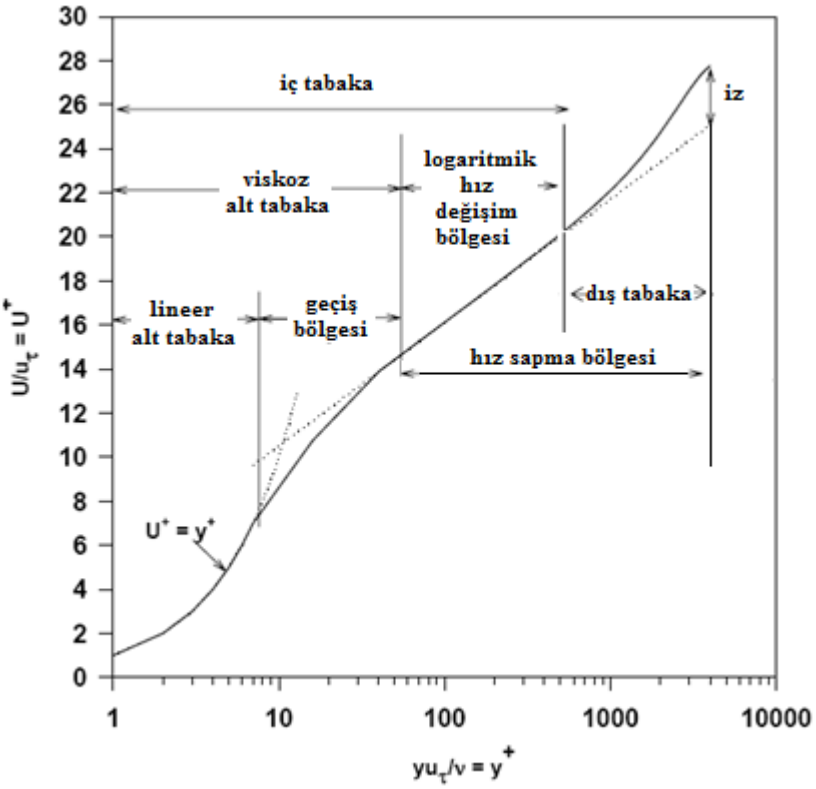
$$U^+ = f(y^+) \tag{4.9}$$

Buradaki y^+ terimi boyutsuz bir ifade olup, türbülans sınır tabakadaki bir noktanın, sınır tabakaya uzaklığını, y, tanımlamaya yarar. y^+ terimi denklem (4.10)'da görülmektedir.

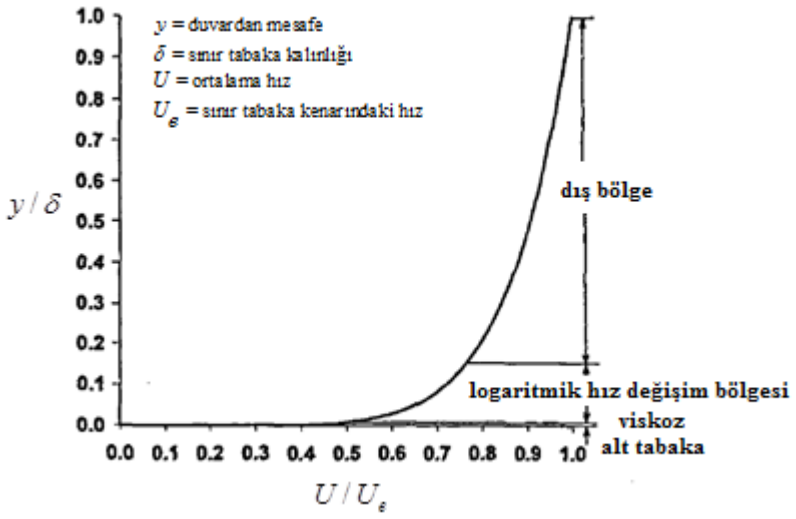
$$y^+ = \frac{yU_\tau}{\nu} \tag{4.10}$$

U^+ terimi de boyutsuz bir ifade olup ortalama hızın, sürtünme hızına bölünmesi ile elde edilir. U^+ terimi denklem (4.11) 'de görülmektedir.

$$U^+ = \frac{U}{U_\tau} \tag{4.11}$$



Şekil 4.10 : Türbülans sınır tabakada duvar kanunu (Schultz, 2007).



Şekil 4.11 : Türbülans sınır tabaka hız profili (Schultz, 2007).

4.3.1 Viskoz alt tabaka

Viskoz alt tabaka, lineer alt tabaka ve geçiş bölgesi olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Bu bölgede türbülans kesme kuvvetleri neredeyse sıfırdır ve bu bölgedeki önemli büyüklükler kinematik viskozite ve sürtünme hızıdır.

Lineer alt tabaka sınıra en yakın olan ince bir katmandır. Genel olarak en fazla $y^+= 7$ değerine kadar olan bölüm bu katmandır. Bu bölgede hız profili lineerdir. Hız profili eşitliği denklem (4.12)'de gösterilmiştir.

$$U^+ = y^+ \tag{4.12}$$

Lineer alt tabaka boyunca toplam kesme gerilmesi, τ , neredeyse sabit ve duvar kesme gerilmesine, τ_w, eşittir.

Geçiş bölgesi $7 < y^+ < 40$ aralığında yer almaktadır ve hız profili lineerliğini kaybetmektedir (Schultz ve Swain, 2000). En yüksek türbülans bu bölgede oluşmaktadır. Bu bölgede hem viskoz kesme gerilmeleri hem de türbülans kesme gerilmeleri önemlidir.

4.3.2 Logaritmik hız değişim bölgesi

Bu bölge Schultz ve Swain'e (2000) göre $40 < y^+$ ve $y/\delta < 0{,}15$ ve Candries'e (2001) göre $30 < y^+$ ve $y/\delta < 0{,}2$ olarak tanımlanmaktadır. Bu bölgede viskoz gerilmeler ihmal edilecek düzeyde olup türbülans kesme gerilmeleri baskındır. Bu

bölgede hızdaki çalkantılar dolayısıyla yüksek türbülans oluşmakta fakat toplam gerilme sabit kalmaktadır. Bu türbülans gerilmesi Reynolds gerilmesi olarak da adlandırılır. İç ve dış katman hız profilleri eşitlendiğinde, iki katmanın kesişim bölgesinde logaritmik bir hız profili oluşur ($\delta \gg y \gg \nu/U_\tau$). Bu duruma logaritmik hız değişim kanunu denir ve pürüzsüz yüzeyler için önerilmiştir. (Millikan, 1938). Akışın bu bölgesine logaritmik hız değişim bölgesi denir ve bölgedeki hız dağılımı denklem (4.13)'deki gibi olur.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa} \ln y^+ + B \qquad \textbf{(4.13)}$$

Burada κ von Karman sabiti, B ise pürüzsüz yüzey logaritmik hız değişim kanunu sabitidir. 1969'da Stanford Konferansı'nda $\kappa = 0,41$ ve $B = 5$ olarak kararlaştırılmıştır (Candries, 2001).

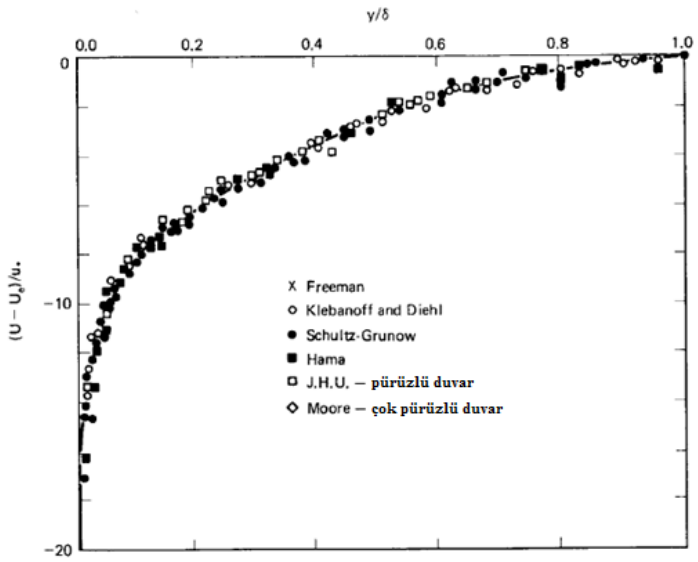
4.3.3 Dış tabaka

Dış tabaka $0,1 < y/\delta < 0,2$ olarak tanımlanmaktadır ve bu bölgede türbülans kesme gerilmeleri azalmaktadır. Reynolds sayısı benzerlik kanununa göre duvardan uzaktaki göreceli akışkan hareketleri akışkan viskozitesinden bağımsızdır (Yaglom, 1979).

Bu bölgede U_τ ile boyutsuzlaştırma yapılamamakta fakat hız profili $(U_e - U)/U_\tau$ ve y/δ ile orantılı olmaktadır. Bu durum duvar kesme gerilmesi nedeniyle oluşan duvardan y uzaklığındaki hız sapması olarak yorumlanabilir. Hız sapma kanunu denklem (4.14)'deki gibi yazılabilir.

$$\frac{U_e - U}{U_\tau} = g\left(\frac{y}{\delta}\right) \qquad \textbf{(4.14)}$$

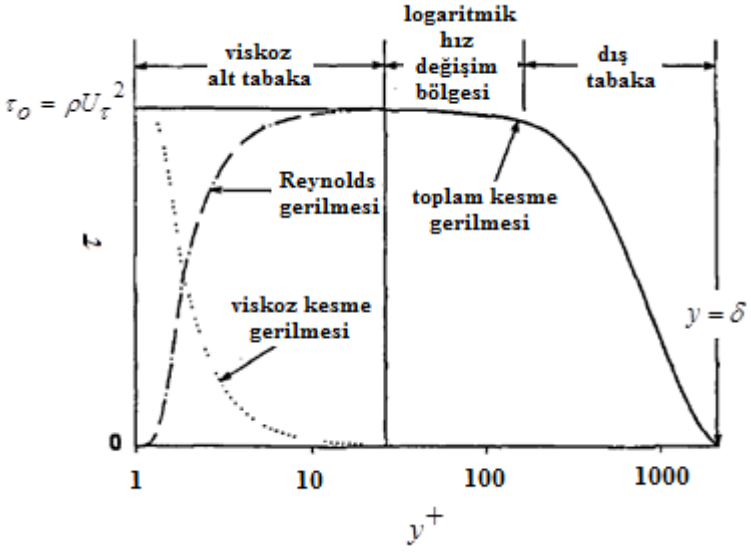
Burada U ortalama hız, U_e sınır tabaka dış kenar hızıdır. Ayrıca dış tabakada yüzey özelliklerinin etkisi olmadığından dolayı hız sapma kanunu pürüzlü yüzeyler için de geçerlidir. Şekil 4.12'de bu durum görülmektedir (Schetz, 1993).



Şekil 4.12 : Pürüzlü ve pürüzsüz düz plakalar için türbülans sınır tabaka dış bölgede hız sapma kanunu (Schetz, 1993).

Şekil 4.10'da yüksek y^+ değerlerinde hız profilinin logaritmik değişim kanunundan saptığı görülmektedir. Bu sapmaya iz denmektedir. Ayrıca dış tabakada toplam kesme gerilmesi sabit değildir ve sınır tabakanın kenarına yaklaştıkça sıfıra doğru iner.

Şekil 4.13'de türbülans sınır tabaka kesme gerilmeleri profili görülmektedir.



Şekil 4.13 : Türbülans sınır tabaka kesme gerilmeleri profili.

4.4 Yüzey Pürüzlülüğünün Türbülans Sınır Tabakaya Etkileri

Duvar pürüzlülüğü sınır tabakadaki türbülansı artırmakta bu da türbülans kesme gerilmelerinin ve duvar kesme gerilemelerinin artması anlamına gelmektedir.

Yüzey pürüzlülüğü çeşitli şekillerde tanımlanabilmektedir. Çoğu zaman bu pürüzlülük, pürüzlülük yüksekliği, *k*, ile ifade edilir. Yüzey pürüzlülüğünün duvar kesme gerilmelerine ve türbülans sınır tabakaya etkilerini açıklamak içinse pürüzlülük Reynolds sayısı, k^+, kullanılmaktadır. Bu parametre denklem (4.15)'de görülmektedir.

$$k^+ = \frac{kU_\tau}{\upsilon} \tag{4.15}$$

Yüzey pürüzlülüğünü tanımlamak için kullanılan başka bir parametre de eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliğidir ve k_s ile gösterilir. Bazı çalışmalarda pürüzlülük yüksekliği *k*, eşdeğer kum tanesi pürüzlülük yüksekliği k_s ile özdeş alınmaktadır. Örneğin Schultz ve Flack (2007) *k* ve k_s'i özdeş olarak kabul etmiş ve pürüzlülük Reynolds sayısını k_s^+ olarak denklem (4.16)'daki gibi almışlardır.

$$k_s^+ = \frac{k_s U_\tau}{\upsilon} \tag{4.16}$$

$k^+ < 5$ olduğunda bu duruma hidrodinamik pürüzsüz rejim denir ve pürüzlülük elemanları lineer alt tabaka kalacak kadar küçüktürler. Bu durumda yüzey sürtünmesi pürüzsüz yüzeyin sürtünmesine eşit olmakta ve yakın - duvar kesme gerilmelerinde viskoz bileşen baskın olmaktadır.

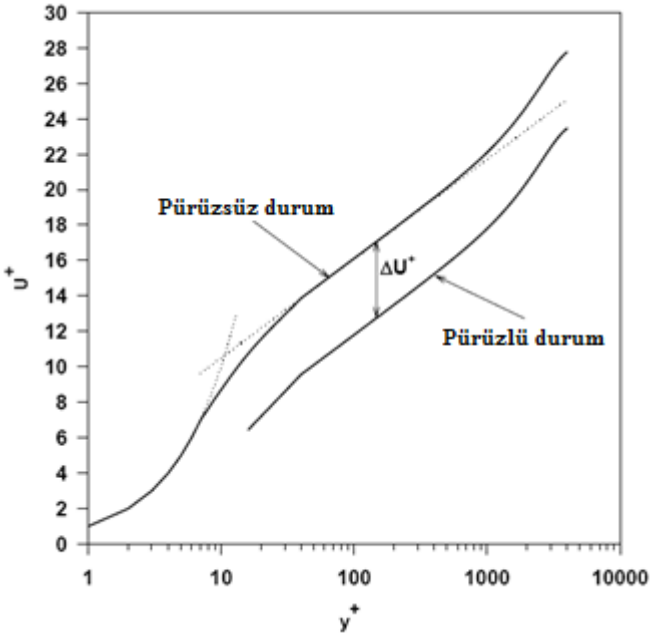
$5 < k^+ < 70$ olduğunda bu duruma ara akış rejimi denir ve yüzey sürtünmesi pürüzsüz yüzey sürtünmesine göre daha fazladır. Yakın - duvar kesme gerilmeleri viskoz ve türbülans kesme gerilmelerinden oluşmaktadır.

$k^+ > 70$ olduğunda bu duruma tam pürüzlü rejim denir ve lineer alt tabaka tamamıyla yok olmuştur. Bu durumda yakın - duvar kesme gerilmelerinde türbülans bileşeni baskındır.

İç bölgedeki duvar kanunu pürüzlü durumda değişmektedir. Bu durumdaki hız profili denklem (4.17) 'de gösterilmiştir (Schubauer ve Tchen, 1961).

$$\frac{U}{U_\tau} = f\left(\frac{yU_\tau}{\nu}, \frac{kU_\tau}{\nu}\right)$$
$$U^+ = f\left(y^+, k^+\right) \qquad \textbf{(4.17)}$$

Pürüzlülüğün etkileri ortalama hız profilinden de görülebilir. Pürüzlülük, iç bölgede momentum kayıplarına neden olur ve bu etki logaritmik değişim profilinde aşağı doğru bir yer değiştirme olarak görülür. Bu azalmaya pürüzlülük fonksiyonu denir ve ΔU^+ sembolüyle gösterilir. Şekil 4.14'de pürüzlülük fonksiyonu görülmektedir (Schultz ve Swain, 2000).



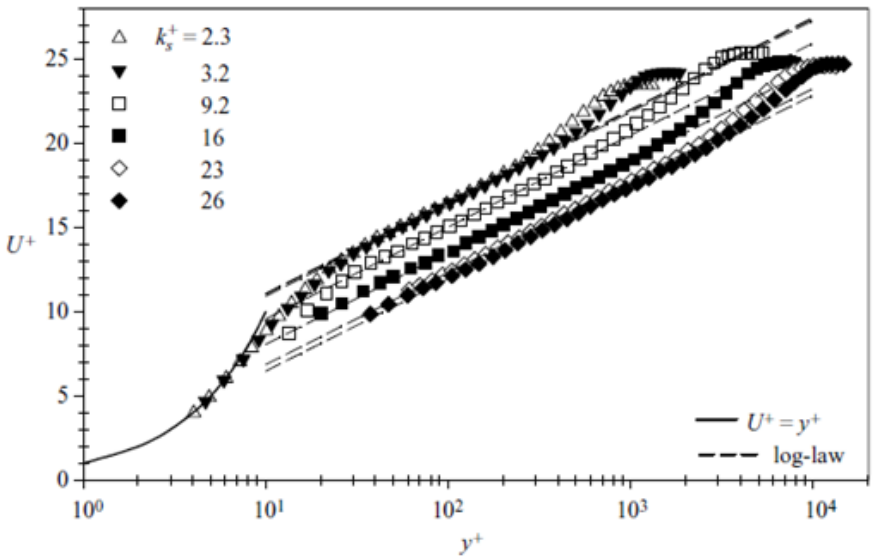
Şekil 4.14 : Pürüzlülüğün duvar kanununa etkisi (Schultz ve Swain, 2000).

Pürüzlülük fonksiyonunun logaritmik değişen hız profiline etkisi denklem (4.18)'de görülmektedir.

$$U^+ = \frac{1}{\kappa}\ln(y^+) + B - \Delta U^+(k^+) \qquad \textbf{(4.18)}$$

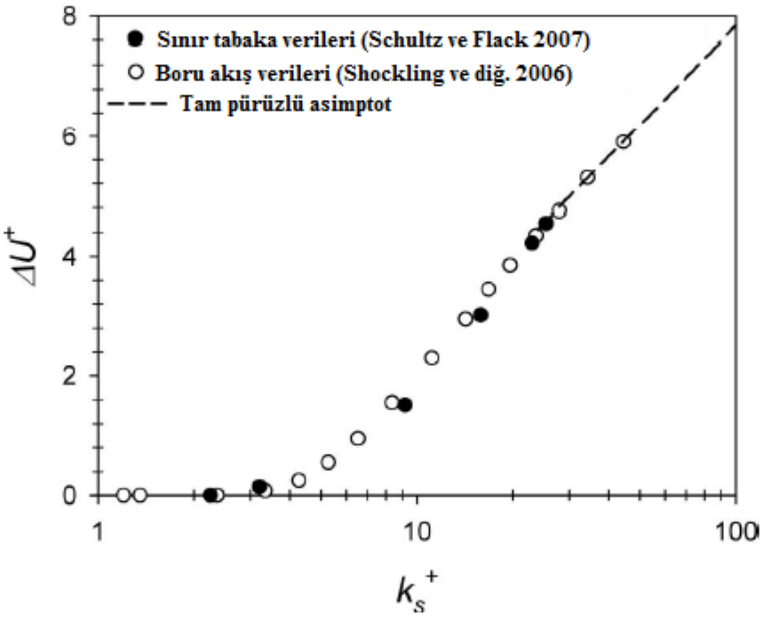
Bu denklemde κ = von Karman sabiti = 0,41, B = pürüzsüz duvar logaritmik hız değişim kesişimi = 5 ve ΔU^+ = pürüzlülük fonksiyonu, k^+ pürüzlülük Reynold sayısıdır. Yüzey pürüzlülüğü logaritmik hız değişim profilinde aşağı doğru bir harekete neden olur. Bu da doğrudan yüzey sürtünme direncini artırmaktadır.

Şekil 4.15'de pürüzlülük Reynold sayısındaki artışın hız profili üzerindeki etkileri görülmektedir (Schultz ve Flack, 2007).



Şekil 4.15 : Pürüzlülük Reynold sayısındaki artışın hız profili üzerindeki etkileri (Schultz ve Flack, 2007).

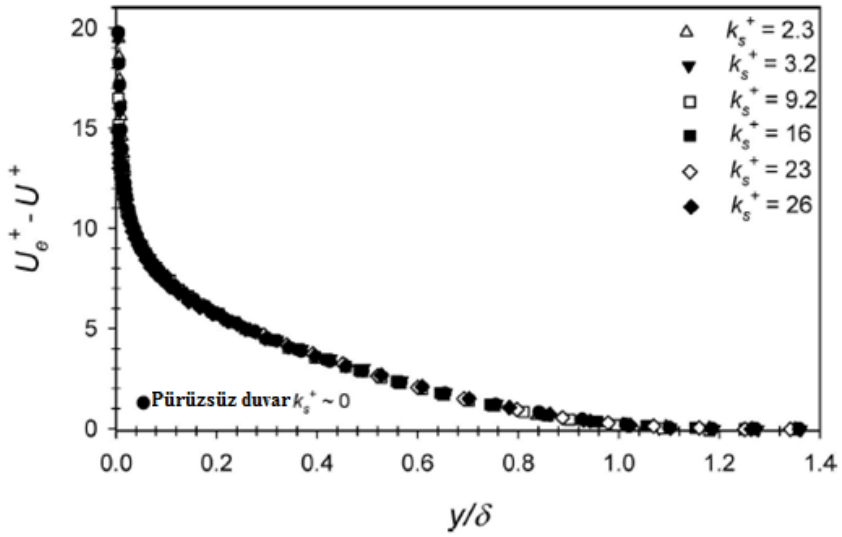
Şekil 4.16'da pürüzlülük fonksiyonu ve pürüzlülük Reynold sayısı arasındaki ilişki görülmektedir (Schultz ve Flack, 2007).



Şekil 4.16 : Pürüzlülük fonksiyonu ve pürüzlülük Reynolds sayısı arasındaki ilişki (Schultz ve Flack, 2007).

Genelde türbülans sınır tabakanın dış katmanının pürüzlülükten etkilenmediği düşünülür. Bu yüzden hız sapma kanunu pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler için

geçerlidir. Şekil 4.17'de dış katman ölçeklendirmesi yapılan ortalama hız profilleri görülmektedir.



Şekil 4.17 : Farklı pürüzlülük Reynolds sayılarının dış katmandaki etkileri (Schultz ve Flack, 2007).

4.5 Yüzey Pürüzlülüğünün Direnç Üzerine Etkisini İnceleyen Çalışmalar

Pürüzlülüğün sürtünme direncine etkisini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. Froude (1872,1874) yaptığı plaka testlerinde farklı pürüzlülükteki levhaları çekmiştir. Kempf (1936) pürüzlülüğün sürtünme direnci üzerine etkisini açıklamak için bir pürüzlülük katsayısı, C_k, tanımlamıştır. Bu katsayısının değerleri 76,8096 m.'lik (252 feet) dubalarla yapılan çekme deneyleri sonucunda elde edilmiştir. Çizelge 2.1'de bu değerler gösterilmiştir (Anon., 1952).

Çizelge 4.2 : Kempf pürüzlülük katsayıları (C_k).

Yüzey	C_k
1. Yeni boyanmış düz, pürüzsüz çelik levha- perçinsiz, sapsız, bantsız. Ortalama pürüzlülük yaklaşık 0,012 inç (0,3048 mm)	$0{,}10 \times 10^{-3}$
2. 1. durum ile aynı; fakat 0,79 inç yüksekliğindeki saplar her 16,4 feet arayla yerleştirilmiştir	$0{,}40 \times 10^{-3}$
3. Eski bakır kaplı tekne	$0{,}75 \times 10^{-3}$
4. Normal koşullar altında yeni boyanmış yeni tekne -perçin, sap ve bantlı bir durumda	$0{,}75 \times 10^{-3}$
5. 22 yıllık bir servisin ardından 4. durumdaki gibi normal bir tekne -yeni boyanmış; fakat barındırdığı pastan dolayı pürüzlü	$0{,}75 \times 10^{-3}$
6. 0,0394 inç (1 mm) çaplı kum taneleri içeren düz yüzey -kum taneleri alanın yaklaşık %100'ünü kapsamakta	$1{,}00 \times 10^{-3}$
7. 0,118 ile 0,157 inç yüksekliğinde kaya midyesi (*barnacles*) içeren düz yüzey- midyeler alanın yaklaşık %25'ini kapsamakta	$3{,}00 \times 10^{-3}$

Verilen C_k değerleri doğrudan pürüzsüz yüzey sürtünme direnci katsayısı C_F ile toplanarak pürüzlü yüzey için yeni bir sürtünme direnci katsayısı olarak değerlendirilmiştir. Bu yaklaşıma göre sürtünme direnci formülü denklem (4.19)'da verilmiştir.

$$R_f = \frac{1}{2}\rho(C_F + C_k)SV^2 \qquad \textbf{(4.19)}$$

Pürüzlülük ile direnç arasında korelasyon sağlayan çeşitli yaklaşımlar mevcuttur. ITTC yaklaşımı model deneyleriyle gemi seyir tecrübesi ölçümleri arasındaki farkları göz önüne alan bir korelasyon düzeltmesi, C_A, belirlemek üzerinedir. C_A pürüzlülüğün ekstrapolasyonunu da kapsamaktadır. Önceleri C_A Schoenherr (1932)'nin deneyleri temel alınarak 0,0004 olarak belirlenmiştir. Daha sonra Bowden ve Davison (1974) formülü ile tanımlanmıştır. Bu formül denklem (4.20)'de gösterilmiştir.

$$C_A 10^3 = 105(AHR/L)^{1/3} - 0,64 \qquad \textbf{(4.20)}$$

Burada AHR ortalama tekne yüzey pürüzlülüğü ve L gemi boyudur. Bu formül 1978'de ITTC tarafından 400m.'den küçük, pürüzlülüğü 200 μm'nin altında olan, sınırlı yükleme koşulundaki gemiler için uygun bulunmuştur. Bu formül ITTC ekstrapolasyon metodu ile birlikte kullanılır. Bu metod denklem (4.21)'de gösterilmiştir.

$$C_V = (1+k)C_{F,ITTC} + C_A \qquad \textbf{(4.21)}$$

Burada C_V viskoz direnç, $(1+k)$ tekne form faktörü ve $C_{F,ITTC}$ gemi boyunda ve gemi ıslak yüzey alanına sahip iki boyutlu bir levhanın ITTC 1957 yöntemi ile bulunmuş sürtünme direnci katsayısıdır.

Bundan başka Townsin ve diğ. (1984) yüzey pürüzlülüğü nedeniyle oluşan direnç artışı, ΔC_F, için denklem (4.22)'yi önermişlerdir.

$$10^3 \Delta C_F = 44\left[(AHR/L)^{1/3} - 10(\mathrm{Re})^{-1/3}\right] + 0,125 \qquad \textbf{(4.22)}$$

Townsin ve diğ. (1986) yüzey pürüzlülüğünün azaltılması sayesinde elde edilecek güç kazancı için denklem (4.23)'ü önermişlerdir.

$$\Delta P / P(\%) = A(k_2^{1/3} - k_1^{1/3}) \qquad \textbf{(4.23)}$$

Burada k_1 ve k_2 sırasıyla temizleme işleminden önceki ve sonraki ortalama pürüzlülük değerleri olup A ise tek pervaneli gemiler için 2,5 olarak verilmiş bir sabittir. Bu formül Townsin ve diğ. (1986) tarafından 1976-1986 yılları arasında Birleşik Krallık 'da kullanılan gemilerdeki, pürüzlülük azaltılması sayesinde oluşan yakıt tasarrufunu belirlemek için kullanılmış ve sonuç olarak yılda 30 milyon £ civarında bir tasarruf sağlandığı bulunmuştur.

4.6 Yüzey Kirliliğinin Direnç Üzerindeki Etkisini İnceleyen Çalışmalar

Fouling'in direnç üzerine etkisi ile ilgili ilk kapsamlı deney McEntee (1915) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada 10 feet boyunda (3,048 m.) ve 2 feet genişliğinde (0,6096 m.) çelik plakalar korozyon engelleyen boyalarla boyandıktan sonra, küçük midyelerin yapışması için belli bir miktar denizde bırakılmıştır. Daha sonra bu plakalar Amerika Birleşik Devletleri Deney Model Havuzu'nda 2 ile 9 knot arasında çeşitli hızlarda çekilerek farklı yüzey koşullarında sürtünme direncinin nasıl değiştiği belirlenmeye çalışılmıştır. Her ay bir plaka denizden çıkarılmış ve direnç deneyi yapılmıştır. Daha sonra bu plakalar temizlenmiş, tekrar boyanmış ve bu durumda tekrar direnç deneyi yapılarak, temiz yüzeye sahipken ne kadar dirence sahip olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma sonucu *fouling*'e maruz kalmış bir plakanın temiz bir plakaya göre yılda 4 kata kadar artan bir sürtünme direncine sahip olduğu belirlenmiştir.

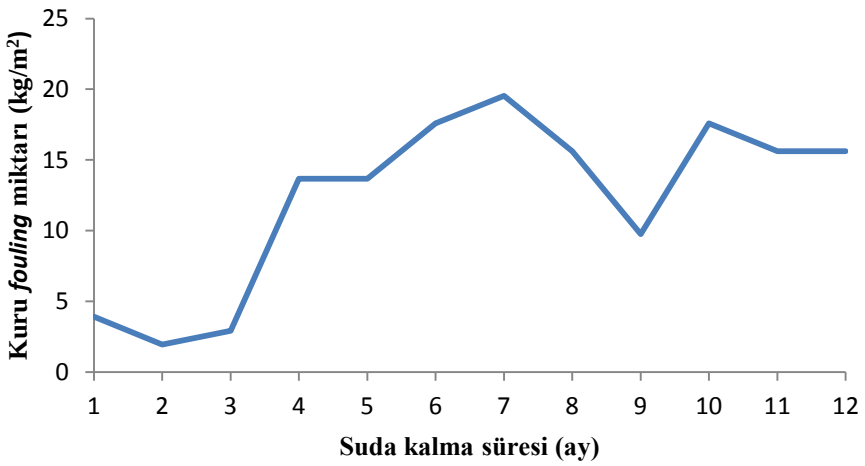
Çizelge 4.3'de bu deney sonucu elde edilen sabitler gösterilmiştir. f sabitinin *fouling* dolayısıyla neredeyse 3 katına çıktığı, n sabitinin ise 1,9'dan 2 civarına çıktığı görülmektedir.

Şekil 4.18'de bu deneydeki sonuçlara göre kuru *fouling* miktarının zamana bağlı olarak değişimi görülmektedir (Taylan, 2010).

Çizelge 4.3 : Deney sonucu bulunan sabitler (McEntee, 1915).

Suda kalma süresi (ay)	f		n		Kuru fouling miktarı (kg/m2)
	temiz	kirli	temiz	kirli	
1	0,0107	0,0114	1,869	1,994	3,91
2	0,0100	0,0128	1,918	1,928	1,95
3	0,0100	0,0167	1,937	2,029	2,93
4	0,0119	0,0239	1,855	2,002	13,67
5	0,0108	0,0255	1,874	2,003	13,67
6	0,0095	0,0252	1,938	1,988	17,58
7	0,0108	0,0275	1,880	2,000	19,53
8	0,0101	0,0267	1,912	2,000	15,62
9	0,0108	0,0275	1,869	1,967	9,76
10	0,0090	0,0285	1,848	2,015	17,58
11	0,0096	0,0273	1,914	2,055	15,62
12	0,0095	0,0292	1,924	2,035	15,62

Taylan (2010) bu sabitleri kullanarak, Froude (1872, 1874) sürtünme direnci yaklaşımına göre, McEntee'nin (1915) deneyindeki maksimum ve minimum hızlar olan 2 knot ve 9 knot hızları için sürtünme direnci değerlerini denklem (3.2) ile hesaplamış, temiz ve *fouling*'e maruz kalmış (kirli) durumlardaki direnç farklarını ortaya koymuştur. Bu sonuçlar Çizelge 4.4 ve Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.18 : Test plakaları üzerindeki kuru *fouling* miktarı (Taylan, 2010).

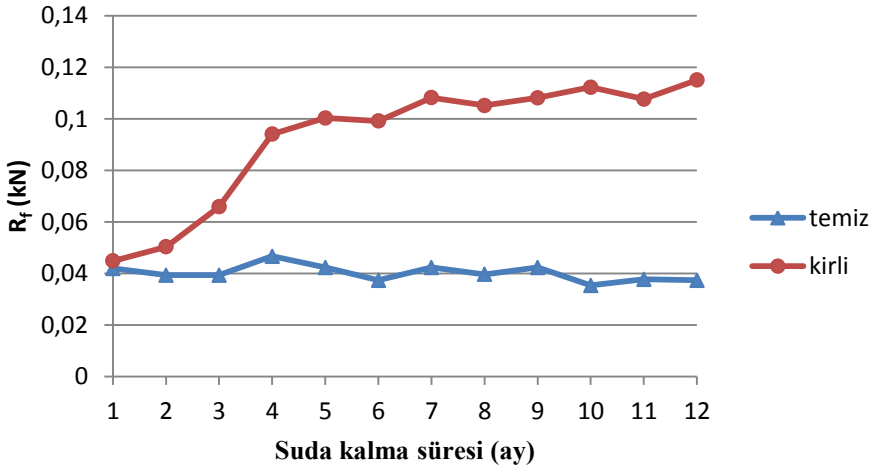
Çizelge 4.4 : Temiz ve kirli plakaların 2 knot hızındaki sürtünme direnci artışı (Taylan, 2010).

R_F (kN) (hız: 2 knot)		Direnç
temiz	kirli	artışı (%)
0,0419	0,0448	107
0,0393	0,0503	128
0,0393	0,0658	167
0,0466	0,0940	202
0,0423	0,1003	237
0,0373	0,0991	266
0,0423	0,1082	256
0,0396	0,1051	265
0,0423	0,1081	255
0,0353	0,1122	318
0,0377	0,1076	286
0,0373	0,1150	308

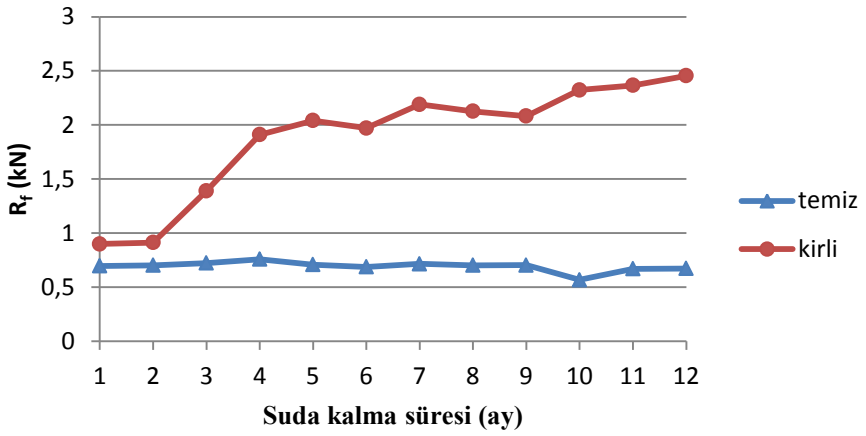
Çizelge 4.5 : Temiz ve kirli plakaların 9 knot hızındaki sürtünme direnci artışı (Taylan, 2010).

R_F (kN) (hız: 9 knot)		Direnç
temiz	kirli	artışı (%)
0,6973	0,8998	129
0,7025	0,9131	130
0,7233	1,3908	192
0,7591	1,9097	252
0,7092	2,0407	288
0,6882	1,9708	286
0,7158	2,1906	306
0,7031	2,1269	303
0,7038	2,0826	296
0,5680	2,3231	409
0,6703	2,366	353
0,6736	2,4542	364

Şekil 4.19 ve Şekil 4.20'de sonuçlar kirli ve temiz durumların karşılaştırılması amacıyla grafik olarak verilmiştir.

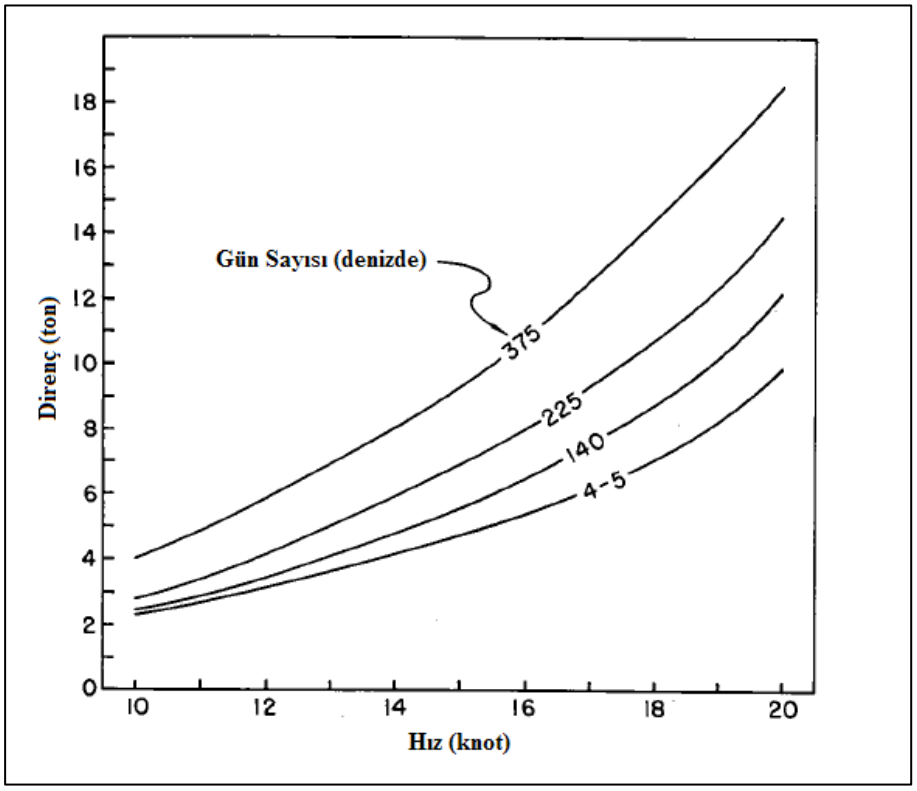


Şekil 4.19 : 2 knot hızında, *fouling'in* sürtünme direnci üzerine etkisi (Taylan, 2010).



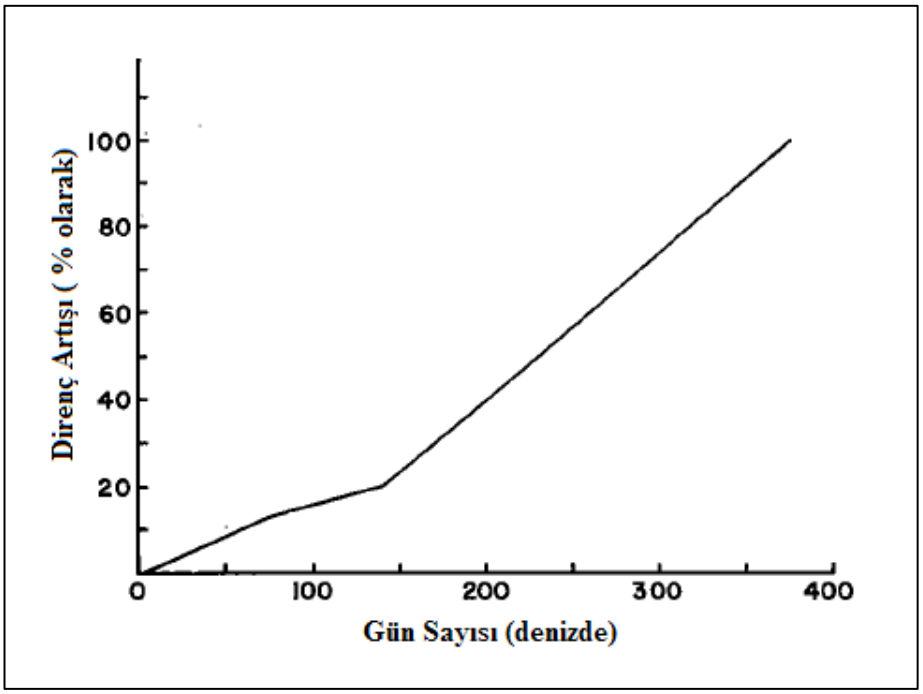
Şekil 4.20 : 9 knot hızında, *fouling'in* sürtünme direnci üzerine etkisi (Taylan, 2010).

Fouling'in direnç üzerindeki etkisini gösteren, kapsamlı deneylerden biri de Japon eski destroyeri Yudachi kullanılarak yapılmıştır (Izubuchi, 1934). Bu eski destroyer 1931 yılında havuza alınmış, boyanmış ve pervanesi çıkarılmıştır. Havuzlama işleminden sonra *fouling'in* direnç üzerindeki etkisini araştırmak üzere belirli aralıklarla çekme testlerine tabi tutulmuştur. Şekil 4.21'de Yudachi'nin deney sonuçları görülmektedir.



Şekil 4.21 : Yudachi destroyerinin havuzlamadan sonra farklı hızlarla yapılan çekme deneylerindeki direnç değerleri (Izubuchi, 1934).

Şekil 4.22'de farklı süreler sonunda yapılan deneylerde bu destroyerin 16 knot hızındaki direnç artışı yüzde olarak verilmiştir. 375 gün sonra toplam direnç iki katına çıkmaktadır.

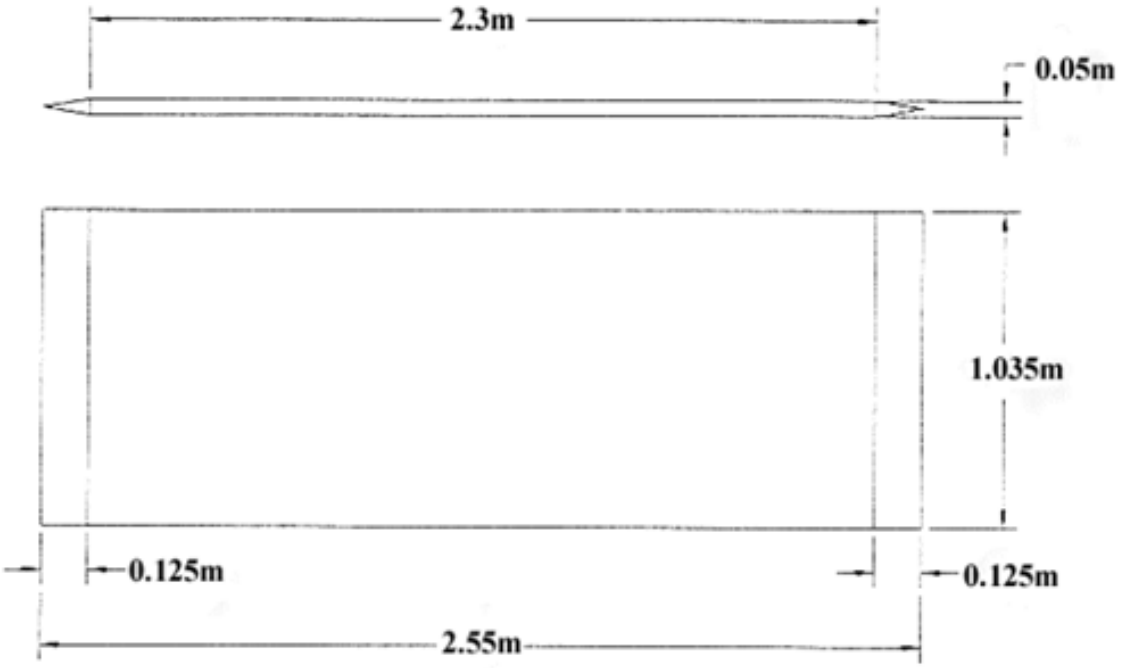


Şekil 4.22 : Yudachi direnç değerlerinin yüzde olarak artışı (Izubuchi, 1934).

Fouling ve *antifouling* boyalar, yüzey pürüzlülüğünü etkilediği, yüzey pürüzlülüğünün de esas olarak sürtünme direncine etkidiği ve artık dirence neredeyse hiç etki etmediğinden dolayı, plakalar üzerinde çok çeşitli deney ve çalışmalar yapılmıştır. Düz plakalarda dalga direnci değeri çok azdır ve sürtünme direnci toplam direncin neredeyse tamamını oluşturur. Dolayısıyla yüzey koşullarının sürtünme direncine etkisi incelenirken düz plakaların seçilmesi çok uygundur.

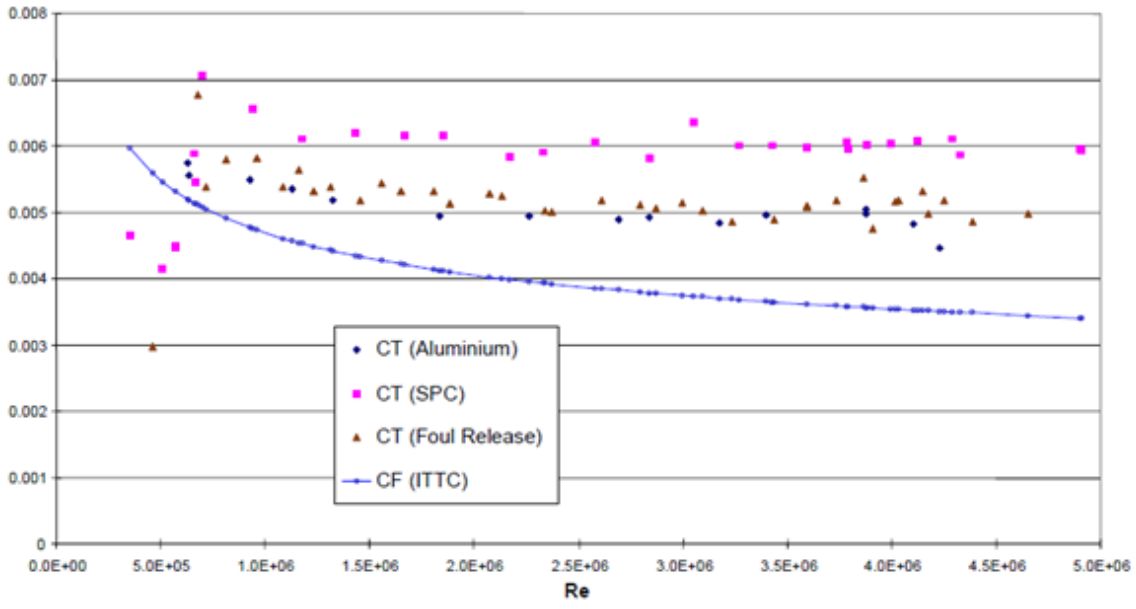
Candries (2001) TBT içermeyen SPC ve FR boyaların dirence etkisini inceleyen deneysel çalışmalar yapmıştır. Bu deneyler kapsamında bir plaka, hem TBT içermeyen SPC hem de FR boyalarla boyanarak deney havuzunda çekilmiştir.

Şekil 4.23'de deneyleri yapılan alüminyum plakanın özellikleri görülmektedir.



Şekil 4.23 : Deneyde kullanılan plakanın boyutları (Candries, 2001).

Bu plaka 40 m. uzunluğunda, 3,75m. genişliğinde ve 1,2 m. derinliğindeki University of Newcastle – upon – Tyne deney havuzunda çekilmiştir. Deneyler sırasında bu plakanın fribordu 65mm. ve ıslak yüzey alanı 5,08 m^2 olarak sabit tutulmuştur. Bu plaka boyanmamış olarak, TBT içermeyen SPC ve FR boyalarla boyanarak hızı maksimum 2 m/s olacak şekilde çeşitli hızlarda çekilmiş ve bu 3 durum için toplam direnç katsayıları elde edilmiştir. Şekil 4.24'te bulunan sonuçlar gösterilmiştir.



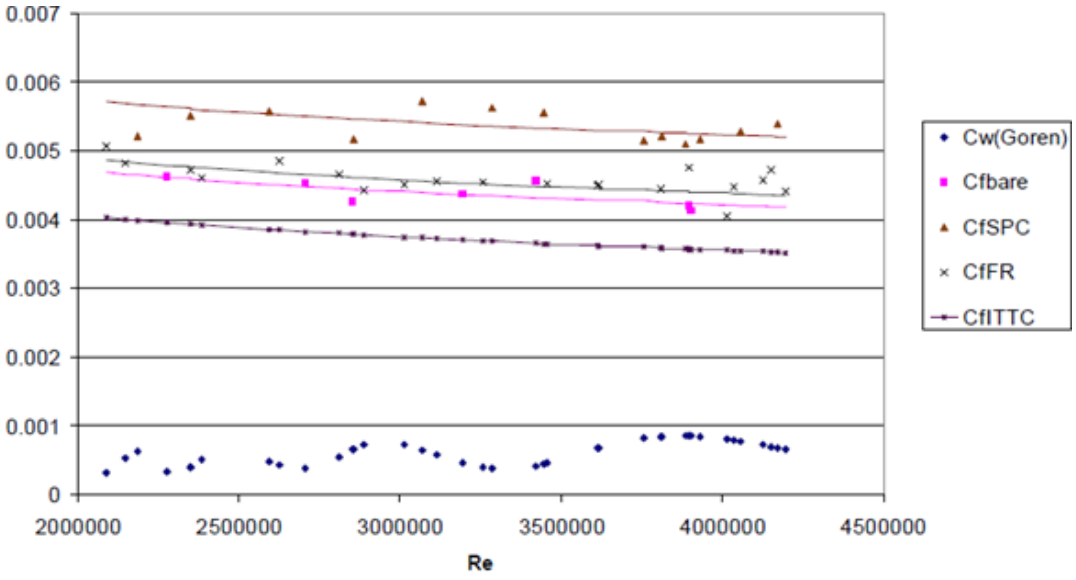
Şekil 4.24 : Farklı Reynolds sayıları için bulunan toplam direnç katsayıları (Candries, 2001).

Çizelge 4.6'da deneyleri yapılan bu plakaların ölçülen pürüzlülük değerleri görülmektedir.

Çizelge 4.6: Farklı yüzeyler için ortalama tekne pürüzlülük değerleri (Candries, 2001).

Yüzey	Ortalama pürüzlülük (μm)
Alüminyum	17
Korozyon engelleyen boya	48
SPC Boya 1	61
SPC Boya 2	75
FR	44

Bulunan toplam direnç katsayılarından, hesaplamalı yöntemlerle bulunan dalga direnci katsayıları çıkarılmış ve böylece sürtünme direnci katsayıları elde edilmiştir. Şekil 4.25'de bulunan değerler görülmektedir.



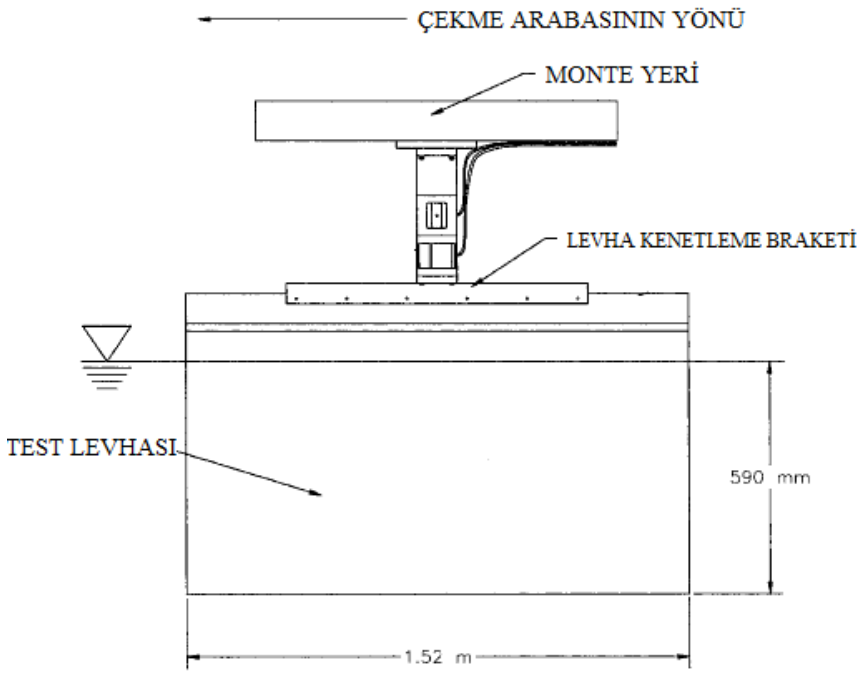
Şekil 4.25 : Farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci ve dalga direnci katsayıları (Candries, 2001).

Alüminyum plaka pürüzsüz olarak kabul edilip, bulunan sürtünme direnci değerleri karşılaştırılmış ve sonuçlar Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7 : Sürtünme direnci katsayılarının karşılaştırılması (Candries, 2001).

Re	C_F (tekne)	C_F (SPC)	Artış (%)	C_F (FR)	Artış (%)	C_F (ITTC)	Artış (%)
2,3E+06	0,004628	0,005504	18,94	0,004725	2,10	0,003942	-14,81
2,9E+06	0,004266	0,005157	20,90	0,004422	3,65	0,003779	-11,41
3,2E+06	0,00438	0,005624	28,41	0,004544	3,75	0,003695	-15,63
3,4E+06	0,004553	0,005563	22,19	0,004518	-0,76	0,003652	-19,77
3,9E+06	0,004125	0,005168	25,28	0,004047	-1,89	0,003558	-13,74

Schultz (2004) yaptığı deneysel bir çalışmada temiz, *fouling*'e maruz kalmış ve sonrasında temizlenmiş plakaların sürtünme direnci değerlerini karşılaşmıştır. Bu çalışmada düz plakalar deney havuzunda çeşitli Reynolds sayılarında çekilerek hidrodinamik değerlendirmeler yapılmıştır. Plakaları çekme hızları 2 m/s ve 3,8 m/s'dir ve deneyler tatlı suda gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.26'da deney düzeneği ve plaka görülmektedir.



Şekil 4.26 : Deney düzeneği ve plaka (Schultz, 2004).

Deneyde kullanılan plakalar 304 paslanmaz çelik olup, boyu 1,52 m., genişliği 0,76 m. ve kalınlığı 3,2 mm. 'dir. Önder kenarı ve izler kenarı 1,6 mm yarıçapında kavisli şekildedir. Bu plakalara farklı *antifouling* boyalar uygulanarak, temiz, *fouling*'e maruz kalmış, ve *fouling* temizlenmiş durumlar olmak üzere üç farklı durum için çekme deneyleri yapılmıştır. Temiz durumdaki plakalara *antifouling* boyalar sürülmüştür. Daha sonra bu plakalar 287 gün denizde *fouling*'e maruz bırakılmıştır. Sonrasında bu *fouling* tabakası temizlenmiştir. Bu durumlar için ayrı ayrı çekme deneyleri yapılmıştır. Bunlardan başka 3 tane de kontrol yüzeyi alınmış ve deneylere katılmışlardır. Bu kontrol yüzeyleri, 60 ve 220 numara zımpara kağıdı ile kaplanmış plakalar ve cilalanmış bir pürüzsüz plakadır. Bu kontrol yüzeyleri denize bırakılmamış dolayısıyla *fouling*'e maruz kalmamışlardır.

Denizde kalan plakalarda 287 gün sonunda farklı boyalar üzerinde farklı miktarda *fouling* tabakası birikmiştir. Biriken *fouling* miktarları ASTM 5623 (1994) standartlarına uygun olarak belirlenmiştir. Çizelge 4.8'de bu miktarlar görülmektedir.

Çizelge 4.8 : 287 gün sonunda *fouling* miktarı. (Schultz, 2004).

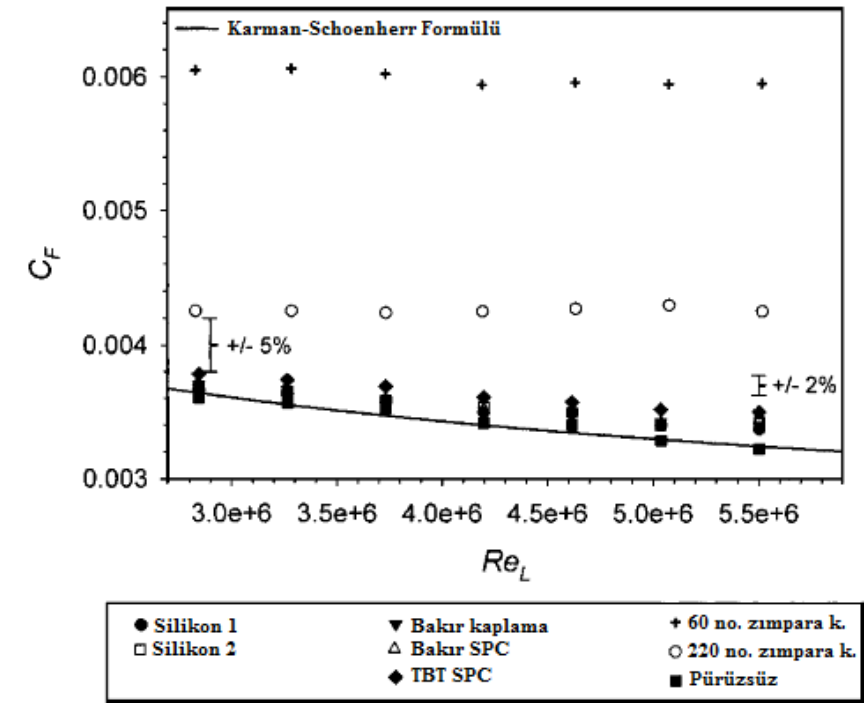
Test yüzeyi	Toplam *fouling* miktarı (%)	Kaygan çamur tabakası (%)	Hidroid (%)	Barnacles (%)	*Fouling* tanımı
Silikon 1	75	10	5	60	Düzgün barnacles yapışması (~ 6mm yüksekliğinde)
Silikon 2	95	15	5	75	Düzgün barnacles yapışması (~ 7mm yüksekliğinde)
Bakır kaplama	76	75	0	1	Yoğun kaygan çamur Tabakası ve münferit barnacles yapışması (~ 5mm yüksekliğinde)
Bakır SPC	73	65	3	4	Orta yoğun kaygan çamur tabakası ve münferit barnacles yapışması (~ 5mm yüksekliğinde)
TBT SPC	70	70	0	0	Hafif kaygan çamur tabakası yapışması (~ 5mm yüksekliğinde)

Burada bulunan sonuçlar ASTM D3623'e göre ifade edilmiştir Bu plakalar hidrodinamik deneylerden sonra naylon fırçalarla temizlenmiştir. Temiz ve *fouling*'e maruz kaldıktan sonra temizlenen bu plakaların pürüzlülük istatistikleri ölçülmüş ve Çizelge 4.9'de verilmiştir.

Çizelge 4.9 : Temiz ve temizlenmiş durumlar için pürüzlülük istatistikleri (Schultz, 2004).

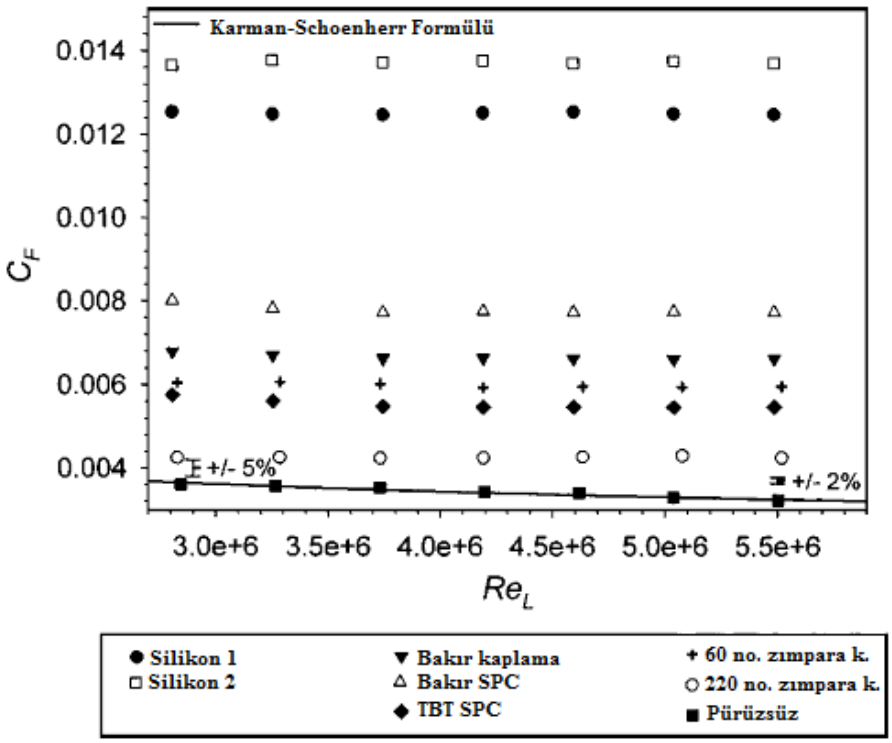
Test yüzeyi	*Fouling*'e maruz kalmadan önce			*Fouling* sonrası temizlenmiş		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rt (μm)
Silikon 1	12±2	14±2	66±7	10±2	13±2	76±11
Silikon 2	14±2	17±2	85±8	19±1	23±1	142±21
Bakır kaplama	13±1	16±1	83±6	11±1	14±1	77±5
Bakır SPC	15±1	18±1	97±10	18±2	23±2	112±5
TBT SPC	20±1	24±1	129±9	22±2	27±2	135±7
60 no. zımpara kağıdı	126±5	160±7	983±89	-	-	-
220 no. zımpara kağıdı	30±2	38±2	275±17	-	-	-
Pürüzsüz	<1	<1	<1	-	-	-

Şekil 4.27'de temiz, henüz *fouling*'e maruz kalmamış plakalar üzerinde yapılan çekme deneylerine göre bulunan sürtünme direnci katsayıları görülmektedir.



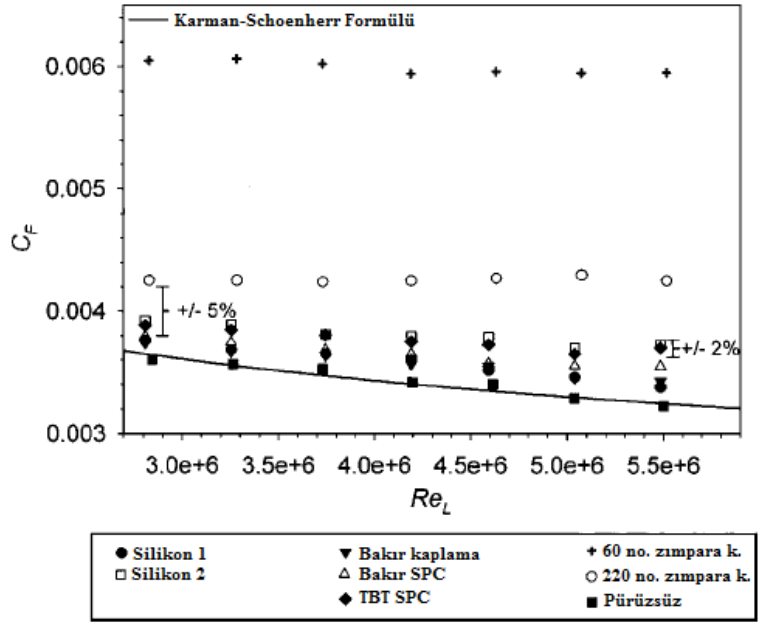
Şekil 4.27 : Temiz plakaların farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci katsayıları (Schultz, 2004).

Burada karşılaştırma yapmak için Karman-Schoenherr (1932) yöntemi ile bulunan eğri de çizilmiştir. Şekil 4.28'de *fouling*'e maruz kalmış plakalar üzerinde yapılan sürtünme direnci testlerinin sonuçları gösterilmektedir.



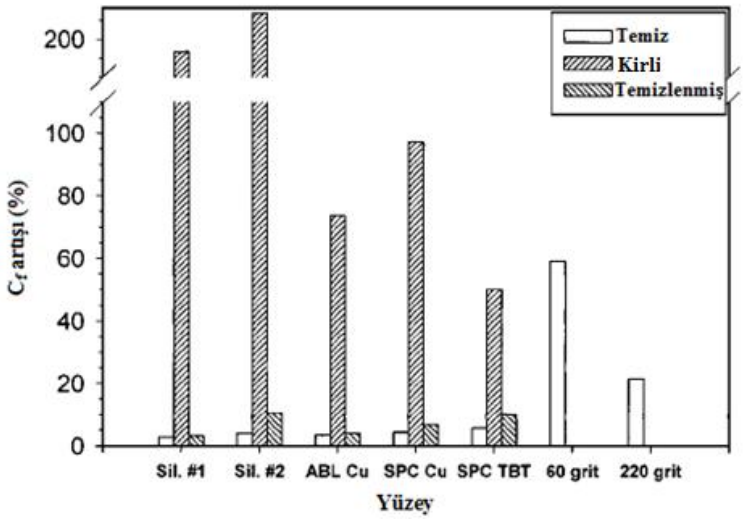
Şekil 4.28 : 287 gün boyunca *fouling*'e maruz kalmış plakaların farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci katsayıları (Schultz, 2004).

Şekil 4.29'da *fouling*'e maruz kaldıktan sonra temizlenen plakalar üzerinde yapılan sürtünme direnci deneylerinin sonuçları gösterilmektedir.



Şekil 4.29 : Temizlenmiş plakaların farklı Reynolds sayıları için bulunan sürtünme direnci katsayıları (Schultz, 2004).

Schultz (2004) plaka deneyleri ile elde ettiği sonuçlarla, Granville (1958) benzerlik kanununu kullanarak, 150 m.'lik bir geminin 12 knot (6,2 m/s) hızındaki temiz, *fouling*'e maruz kalmış ve sonrasında temizlenmiş durumlar için sürtünme direnci katsayısı artışlarının tahmini yapmıştır. Şekil 4.30'da bu sonuçlar görülmektedir.



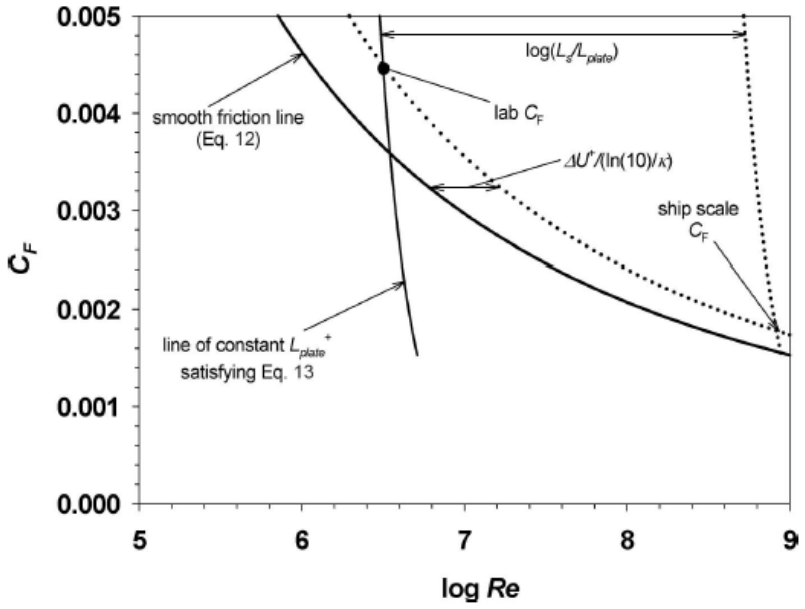
Şekil 4.30 : 12 knot hızında temiz, *fouling*'emaruz kalmış ve temizlenmiş durumlar için gemi boyutundaki (L=150m.) sürtünme direnci katsayısı artışı tahmini (Schultz, 2004).

Schultz (2007) bir savaş gemisinin (FFG-7) çeşitli *fouling* durumlarında ve *antifouling* boya uygulamalarındaki direnç ve güç tahminlerini yapmıştır. Bu tahmini model direnç ölçümleri ve sınır tabaka benzerlik kanunu kullanarak yapmıştır. Bu çalışmada tekne pürüzlülüğü C_A korelasyon düzeltmesinden ayrı olarak, ΔC_{Fs} olarak ele almıştır. Dolayısıyla toplam gemi direnci katsayısını denklem (4.24)'deki gibi kabul etmiştir.

$$C_{Ts} = C_{Rs} + C_{Fs} + C_A + \Delta C_{Fs} \tag{4.24}$$

Bu tahmini yaparken Granville (1958, 1987)'in bulduğu pürüzsüz ve pürüzlü yüzeyler arasındaki benzerlik kanunundan yararlanmıştır. Korelasyon düzeltmesi C_A Gilmer ve Johnson (1982)'ın önerdiği gibi 0,0004 alınmıştır.

Şekil 4.31'de Granville benzerlik kanunu prosedürü gösterilmektedir.



Şekil 4.31: Granville benzerlik kanunu prosedürü (Schultz, 2007).

Bu tahminde ilk adım, pürüzsüz bir plakanın sürtünme direnci katsayısının log(Re)'nin fonksiyonu olarak çizilmesidir. Bu değerleri bulmak için Karman-Schoenherr (Schoenherr, 1932) yöntemi yani denklem (3.7) kullanılır.

İkinci olarak, pürüzlü plakanın, çekme deneyi sonucu bulunmuş sürtünme direnci katsayısı değeri log(Re) değerine karşılık gelecek şekilde işaretlenir. Bu nokta iki eğrinin kesişimine denk gelir. İlki çizilen pürüzsüz plaka sürtünme direnci katsayısı

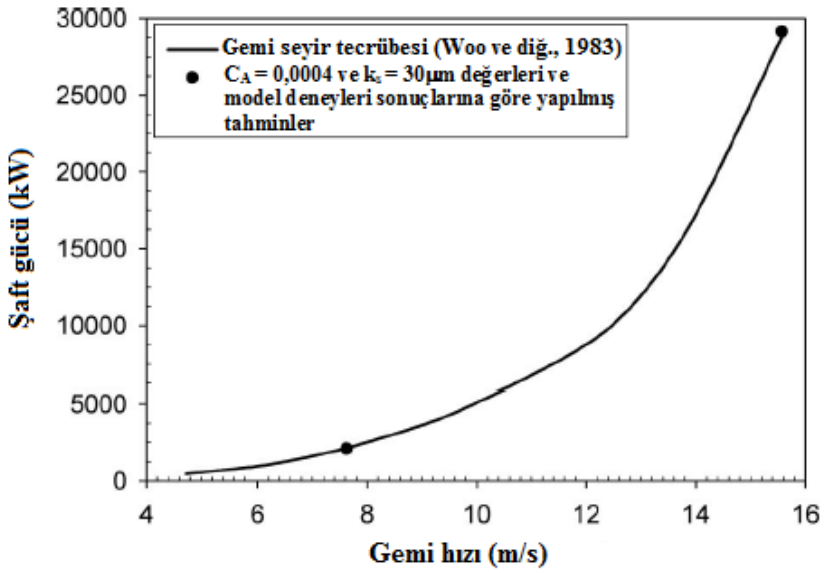
eğrisinin $\Delta U^{+}\kappa\left[\ln(10)\right]^{-1}$ kadar pozitif log(Re) yönünde ötelenmesi ile elde edilen eğri, ikincisi ise denklem(4.25)'i sağlayan $L_{plaka}{}^{+} = L_{plaka}U_{\tau}v^{-1}$ sabitinin eğrisidir.

$$\mathrm{Re} = \frac{L_{plaka}{}^{+}}{\sqrt{\frac{C_F}{2}\left(1-\frac{1}{\kappa}\sqrt{\frac{C_F}{2}}\right)}} \qquad \textbf{(4.25)}$$

Sonra $L_{plaka}{}^{+} = L_{plaka}U_{\tau}v^{-1}$ eğrisi $\log(L_s / L_{plaka})$ kadar pozitif log(Re) yönünde ötelenir. Bu eğri ile, ötelenmiş pürüzsüz plakanın sürtünme direnci katsayısı eğrisinin kesişim noktası geminin sürtünme direnci katsayısı C_{Fs}'i verir. Pürüzlülük nedeniyle sürtünme direnci katsayısındaki artış, ΔC_{Fs}, C_{Fs} ile pürüzsüz plaka için bulunan sürtünme direnci katsayısı değerinin farkıdır.

Schultz (2007) bu çalışmasında FFG-7 için *fouling* ve *antifouling* boyaların pürüzlülüklerinin güç gereksinimine etkisini göstermiştir. Bu çalışmayı yaparken Woo ve diğ. (1983)'nin çalışmasında verilen FFG-7'nin seyir tecrübesi ve model deneyi sonuçlarından yararlanmış ve karşılaştırmalar yapmıştır.

Bu çalışmada kullanılan pürüzlülük değerleri Çizelge 4.1'de verilmişti (Schultz, 2004).



Şekil 4.32 : $k_s = 30\mu m$ için farklı hızlardaki gerekli şaft gücü miktarları (Schultz, 2007).

Yapılan tahminler FFG-7 için servis hızı ve maksimum hızı olan 15 knot (7,7 m/s) ve 30 knot (15,4 m/s) değerleri için yapılmıştır. Şekil 4.32'de bu tahminlerin Woo ve diğ. (1983)'nin yaptıkları seyir tecrübesi sonuçlarıyla karşılaştırılması görülmektedir.

Çizelge 2.10 ve Çizelge 4.11'de belirtilen iki hız değeri için yapılan toplam direnç değişimi tahminleri görülmektedir.

Çizelge 4.10 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 15 knot hızındaki toplam direnç değişimi tahmini (Schultz, 2007).

Durum tanımı	ΔR_T (kN) (V=7,7 m/s)	$\%\Delta R_T$ (V=7,7 m/s)
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	-	-
Antifouling boya uygulanmış yüzey	4,6	2
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	23	11
Ağır kaygan çamur tabakası	41	20
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	69	34
Orta kalkerli *fouling*	105	52
Ağır kalkerli *fouling*	162	80

Çizelge 4.11 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 30 knot hızındaki toplam direnç değişimi tahmini (Schultz, 2007).

Durum tanımı	ΔR_T (kN) (V=15,4 m/s)	$\%\Delta R_T$ (V=15,4 m/s)
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	-	-
Antifouling boya uygulanmış yüzey	46	4
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	118	10
Ağır kaygan çamur tabakası	192	16
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	305	25
Orta kalkerli *fouling*	447	36
Ağır kalkerli *fouling*	677	55

Ayrıca gerekli şaft gücündeki değişim tahmini de yapılmıştır. Çizelge 4.12'de 15 knot (7,7 m/s) için yapılan tahmin sonuçları görülmektedir.

Bu tahminde *fouling* dolayısıyla teknede oluşan pürüzlülük etkisinin yanı sıra pervanede oluşan pürüzlülük de göz önüne alınmıştır.

Çizelge 4.12 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 15 knot hızındaki gerekli şaft gücü değişimi tahmini (Schultz, 2007).

Durum tanımı	ΔSP(kW) (V=7,7 m/s)	%ΔSP (V=7,7 m/s)
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	-	-
Antifouling boya uygulanmış yüzey	50	2
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	250	11
Ağır kaygan çamur tabakası	458	21
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	781	35
Orta kalkerli *fouling*	1200	54
Ağır kalkerli *fouling*	1908	86

Çizelge 4.13'de 30 knot (15,4 m/s) için yapılmış gerekli şaft gücündeki değişim tahmini görülmektedir.

Çizelge 4.13 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için FFG-7 gemisinin 30 knot hızındaki gerekli şaft gücü değişimi ve sabit şaft gücündeki hız azalması değişimi tahmini (Schultz, 2007).

Durum tanımı	ΔSP(kW) (V=15,4 m/s)	%ΔSP (V=15,4 m/s)	%Hız azalması SP=2,7X104 kW
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	-	-	-
Antifouling boya uygulanmış yüzey	1004	4	0,9
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	2618	10	2,7
Ağır kaygan çamur tabakası	4311	16	4
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	6934	26	5,8
Orta kalkerli *fouling*	10329	38	7,5
Ağır kalkerli *fouling*	16043	59	10,7

5. UYGULAMALAR

5.1 Giriş

Bu bölüm *fouling* ve *antifouling* boyaların gemi sürtünme direncine etkilerini görebilmek için bir HAD programı olan STAR-CCM+ kullanılarak yapılan çeşitli uygulamaları kapsamaktadır. STAR-CCM+ çok geniş mühendislik problemlerinin simüle edilip çözülebildiği entegre bir pakettir. STAR-CCM+ sadece bir CFD programı olmaktan öte akış, ısı transferi ve gerilme gibi mühendislik problemlerinin çözülebildiği bir paket programdır (CD-ADAPCO, 2011). Bu uygulamalarda yapılan kabuller ve fiziksel olayın modellenmesi için seçilen modeller bölümde ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Fouling olayı ve *antifouling* boyalar zaman içerisinde gemi yüzeyinin pürüzlülüğünü artırmakta, bu da gemi sürtünme direncinde artışlara neden olmaktadır. Bu etkileri görebilmek için uygulamalar yapılmış, bu uygulamalar daha önce yapılmış olan deneylerle karşılaştırılmıştır. Böylece programın ve önerilen modelleme yöntemlerinin güvenilirliği de sorgulanmış ve kanıtlanmış olmaktadır.

Bu çalışmadaki uygulamalar, Schultz'un (2004) çalışmasında söz ettiği deney setinin simülasyonları şeklinde gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonlarda bu deney modellenmeye çalışılmış ve bu deneyin sonuçları ile doğrulama yapılmıştır.

Yapılan doğrulamanın ardından farklı pürüzlülük değerlerinin gemi sürtünme direncine nasıl etki ettiğinin görülmesi için sistematik bir analiz yapılmış ve bu parametrik çalışmanın sonuçları grafik ve çizelge olarak gösterilmiştir.

Son olarak doğrulaması yapılan modeller ve kabuller kullanılarak NSTM (2002)'de yer alan bir dizi temsili *fouling* durumu için ilgili plakanın sürtünme direnci ve sürtünme direnci katsayısı değerleri bulunmuş, sonuçlar grafik olarak verilmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca her bir durum için sürtünme direnci katsayısındaki artışlar yüzde olarak verilmiş ve her bir durum için plaka üzerinde kaydedilen yerel akış hızlarındaki değişim de gösterilmiştir.

Özet olarak uygulama bölümünde, düz ve ince bir plakanın deney havuzundaki çekme testi sümülasyonları gerçekleştirilmiş ve farklı pürüzlülük değerlerindeki sürtünme direnci değerleri bulunmuştur.

5.2 Kabuller

Uygulama bölümüne gerçekleştirilen simülasyonlarda gerçek olayı modelleyebilmek için bazı kabuller yapılmıştır.

5.2.1 Genel kabuller

Fiziksel olayın gerçeğe yakın olarak temsil edilebilmesi için çözüm ağı genişliği ve derinliği olarak temsili deney havuzunun genişliği ve derinliği boyutlarında seçilmiştir. Bu boyutlar belirlenirken, analizin karşılaştırıldığı deneyin yapıldığı deney havuzunun boyutları temel alınmıştır. Ayrıca analizi yapılan plakanın boyutları da ilgili deneyde kullanılan plakanın boyutları temel alınarak belirlenmiştir. Çözüm için sonlu kontrol hacminin uzayda sabit olduğu ve akışkanın bu sonlu hacim içinden geçtiği kabulu yapılmıştır. Akışkan olarak sabit özkütledeki su seçilmiştir. *Fouling* nedeniyle oluşan pürüzlülüğün düzgün, rijit ve homojen olarak dağıldığı ve türbülans sınır tabaka kalınlığına etkimediği kabul edilmiştir.

5.2.2 Gemi direnci ile ilgili kabuller

Gemi sürtünme direncinin kendisiyle aynı boyda ve aynı ıslak alana sahip düz bir plakanın sürtünme direncine eşit olduğunu göz önüne alırsak, pürüzlülüğün gemi sürtünme direncine etkilerini görmek için pürüzlülüğün çok ince, düz bir plakanın sürtünme direncine etkilerini araştırmak yerinde olacaktır.

Toplam gemi direnci daha önce de belirtildiği gibi sürtünme direnci ve artık direncin toplamı veya viskoz direnç ve dalga direncinin toplamıdır.

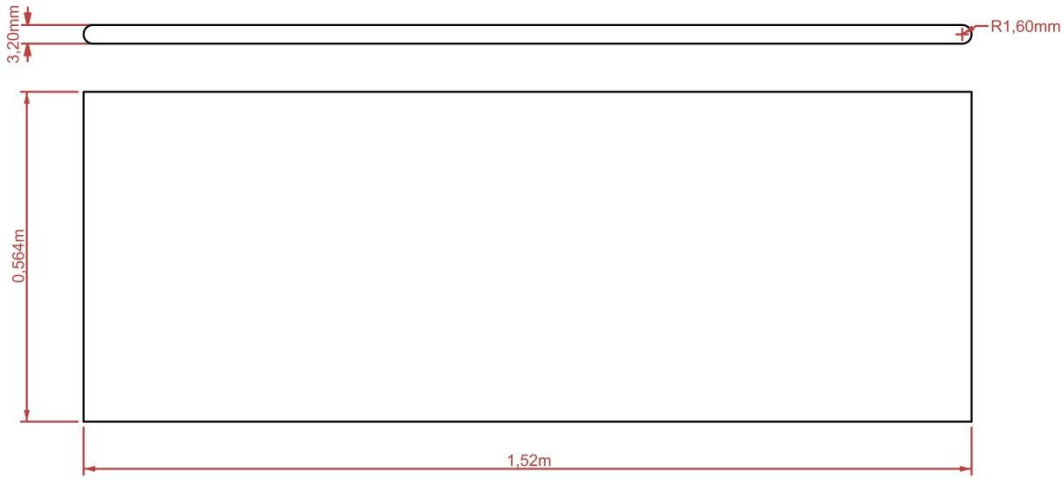
Denizaltı örneğinde olduğu gibi bir cisim tamamen suyun altında ise yani serbest yüzey ile bir etkileşimi yoksa dalga direnci olmayacak dolayısıyla sadece viskoz direnci olacaktır. Viskoz direnç de sürtünme direncinin bir fonksiyonu olarak ifade edilebilmektedir. Bu durum denklem (3.12)'de verilmişti. Buradaki k değeri gemi formu ile ilgilidir. Eğer gemi yerine düz, yani form özellikleri olmayan, çok ince bir plaka seçilirse k değeri ihmal edilebilir bir değerde olacaktır. Dolayısıyla tamamen

batmış düz bir plakanın toplam direnç değeri aslında o plakanın sürtünme direncine eşit olacaktır.

5.3 Ön - İşleme Adımı

Bu adımda probleme uygun geometrinin hazırlanması, hesaplama alanının belirlenmesi, çözüm ağının oluşturulması ve hesaplama işlemi için uygun hale getirilmesi işlemleri vardır.

Öncelikle analizi yapılacak plakanın oluşturulması gerekmektedir. Bu plaka 1,52 m. uzunluğunda, 0,564 m. genişliğinde ve 3,2 mm. kalınlığında seçilmiştir. Ayrıca plakanın önder ve izler kenarları 1,6 mm. yarıçapında yuvarlatılmıştır. Plakanın ıslak yüzey alanı 1,72634395 m^2'dir. Şekil 5.1'de plakanın ana boyutları görülmektedir.



Şekil 5.1 : Plakanın ana boyutları.

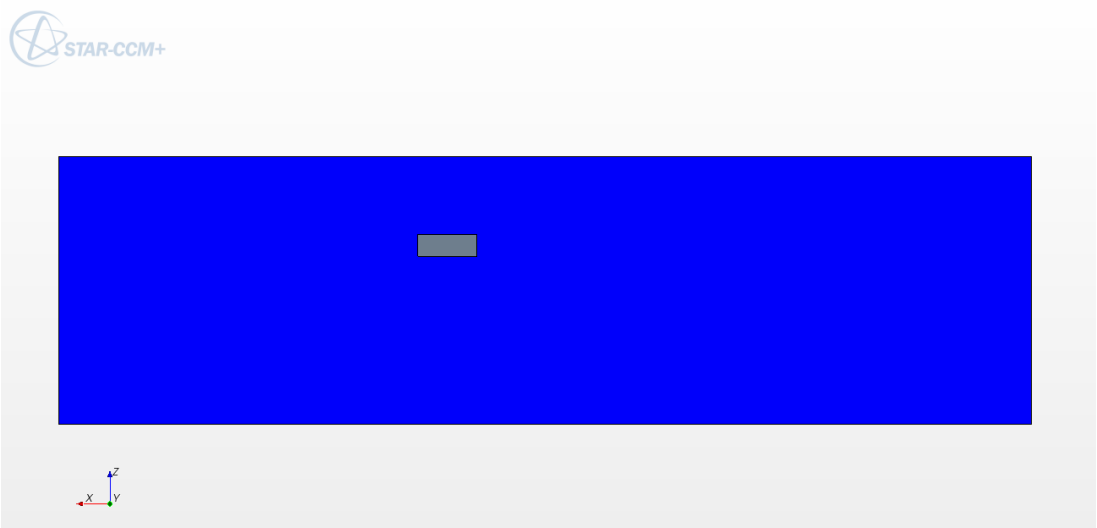
Bu plakanın uygun geometride oluşturulması işlemi STAR-CCM+'ın kendi CAD modülünde hazırlanabileceği gibi herhangi bir CAD programıyla da hazırlanıp STAR-CCM+ ortamına alınabilmektedir.

Daha sonra bu plaka için çözüm ağı oluşturulması işlemi vardır. Çözüm ağının oluşturulabilmesi için önce çözümün yapılacağı hacmin tanımlanması gerekmektedir. Bu hacim daha önce sonlu kontrol hacmi olarak anılan hacimdir. Bu hacim, ilgili deneyin yapıldığı deney havuzu boyutları temel alınarak hazırlanmıştır. Sonlu kontrol hacminin boyutları Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2 : Sonlu kontrol hacminin boyutları.

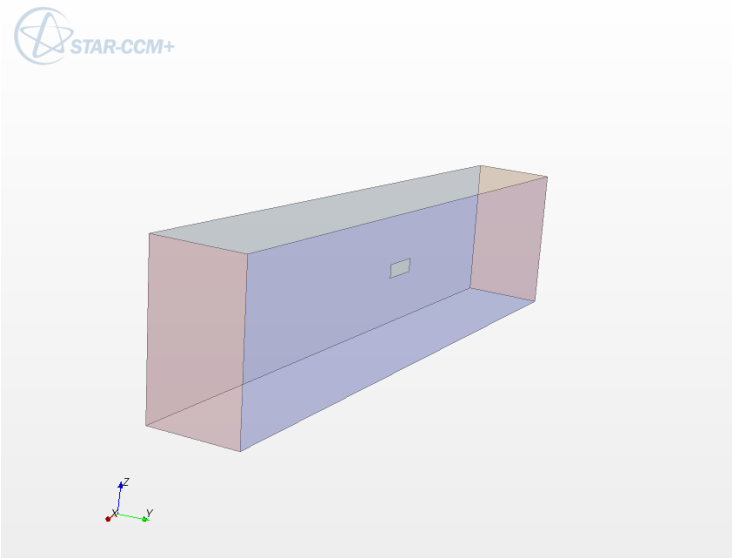
Bu sonlu kontrol hacminin boyu 25 m. seçilmiştir. Bu boyut daha da artırılarak bir çok analiz yapılmış fakat boyutu daha fazla artırmanın sonuçlar üzerinde bir etkisi olmadığı görülmüştür. Şekil 5.3'te plaka ve kontrol hacminin profil görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 5.3 : Plaka ve kontrol hacminin profil görüntüsü.

Daha sonra bu kontrol hacmi ile plaka entegre hale getirilerek geometri kısmından dışarı alınmaktadır. Bu şekilde iki farklı geometrinin entegre edilmesi ile çözüm hacmi (domain) elde edilmektedir. Bu uygulamada geometrinin simetrik olmasından dolayı, çözüm hacmi oluşturulurken, plaka ve deney havuzunun yarısı ele alınmıştır. Bu işlem, fiziksel olarak bir değişiklik yaratmamakta ve çözüm için oluşturulan hacmin ve hücre sayısının yarıya inmesini sağlamaktadır. Böylece işlem hızı artmakta ve zaman anlamında daha ucuz bir analiz süreci elde edilmektedir.

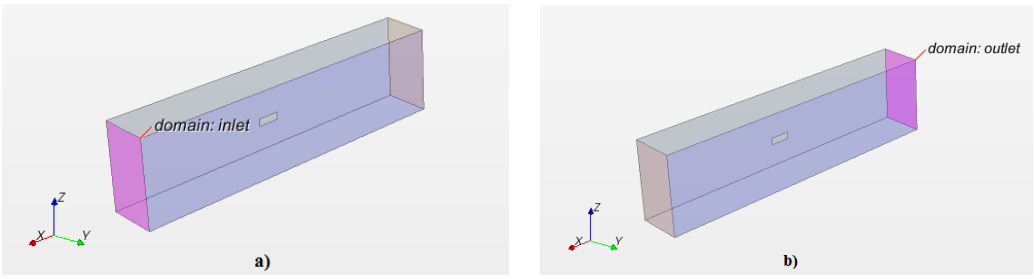
Şekil 5.4'te çözüm hacminin 3 boyutlu hali gösterilmektedir.



Şekil 5.4 : Çözüm hacminin (domain) görüntüsü.

Bu çözüm hacminde plakanın ve sonlu hacmin sabit durduğu ve hacmin içinden bir akışın x yönünden geldiği varsayılmaktadır. y yönü genişlik, z yönü de derinliği temsil etmektedir. Yani gerçek deneylerde olduğu gibi plakanın x yönünde çekilmesi yerine, bu simülasyonda plaka sabittir ve akış –x yönünde gerçekleşmektedir.

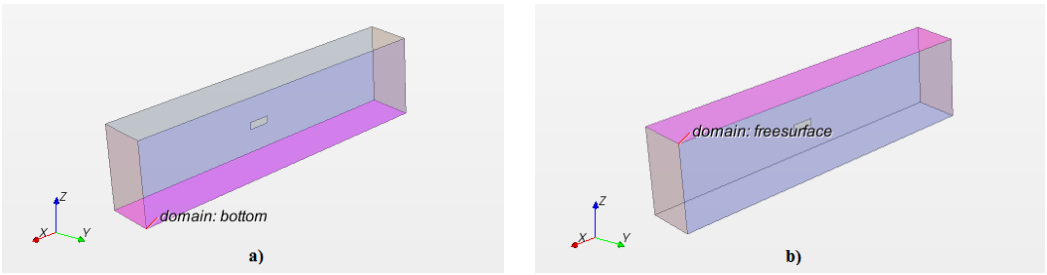
Oluşturulan çözüm hacmi sınır koşullarına göre çeşitli bölgelere ayrılarak her bir bölgenin sınır koşulları ayarlanmaktadır. Suyun sonlu hacme girdiği bölge "inlet" olarak isimlendirilmiş, sınır koşulu olarak giriş bölgesi seçilmiş ve akış hızı ayarlanmıştır. Aynı şekilde suyun sonlu hacimden çıktığı bölge de "outlet" olarak isimlendirilmiş ve sınır koşulu olarak da çıkış bölgesi olarak ayarlanmıştır. Şekil 5.5'te bu iki bölge gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : Çözüm hacminde a) giriş ve b) çıkış bölgeleri.

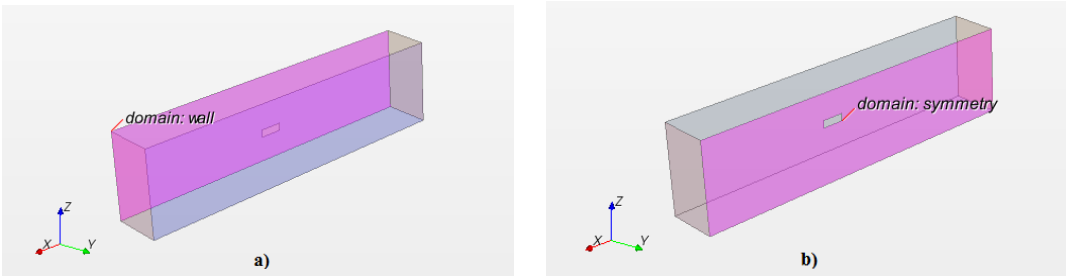
Sonlu hacmin dibi deney havuzunun dibi olacak şekilde ayarlandığı için "bottom" olarak isimlendirilmiş ve sınır koşulu olarak duvar üzerindeki teğetsel hız sıfır seçilmiştir. Serbest su yüzeyi ise "freesurface" olarak isimlendirilmiş ve sınır koşulu olarak kayma durumu yani teğetsel hızın sıfır olmaması seçilmiştir. Çünkü serbest su

yüzeyi ile akışkan arasında bir hız gradyeni oluşmayacaktır. Şekil 5.6'da bu iki bölge görülmektedir.



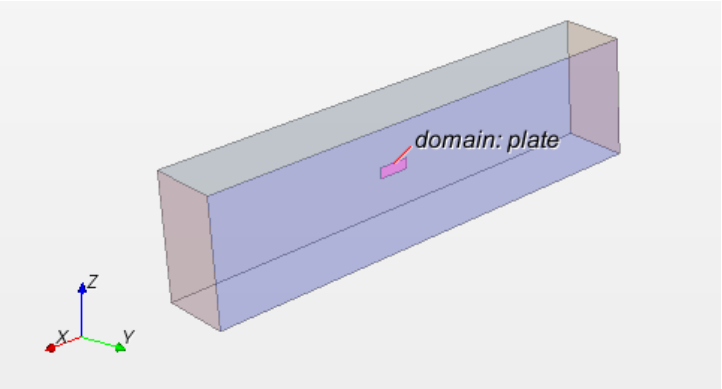
Şekil 5.6 : Çözüm hacminde a) dip ve b) serbest su yüzeyi.

Sonlu hacmin duvarı "wall" olarak isimlendirilmiş ve deney havuzunun duvarlarını temsil ettiği için sınır koşulu olarak duvar üzerindeki teğetsel hız sıfır seçilmiştir. Ayrıca oluşturulan çözüm ağının bir simetriğinin de diğer tarafta olduğunu belirtmek üzere, çözüm ağının simetri düzlemi "symmetry" olarak isimlendirilmiş ve sınır koşulu olarak da simetri düzlemi seçilmiştir. Şekil 5.7'de bu iki bölge görülmektedir.



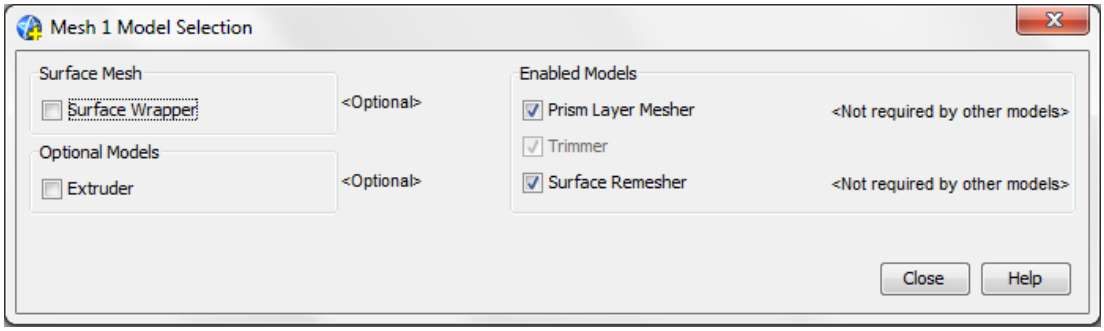
Şekil 5.7 : Çözüm hacminde a) duvar ve b) simetri düzlemi.

Plaka "plate" olarak isimlendirilmiş ve sınır koşulu olarak duvar üzerindeki teğetsel hız sıfır seçilmiştir. Çünkü daha önce de belirtildiği gibi plaka katı bir cisimdir ve su ile arasında bir hız gradyeni oluşacaktır. Bu uygulamada sırasıyla plakanın pürüzsüz ve çeşitli pürüzlülük değerlerindeki direnci bulunacağından, plakanın pürüzlülük değerleri her bir analiz öncesinde sırasıyla değiştirilmiştir. Şekil 5.8'de plakanın konumu görülmektedir.



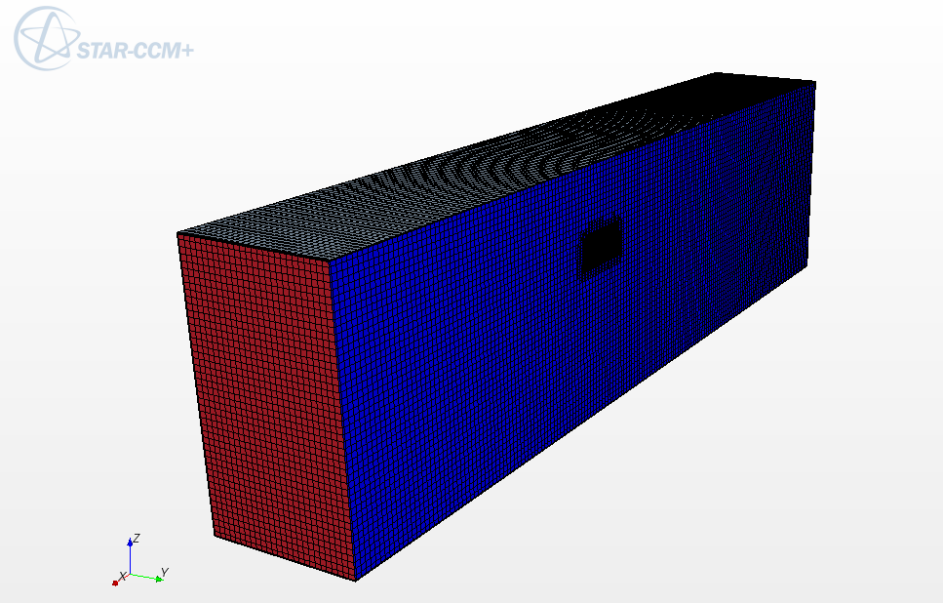
Şekil 5.8 : Çözüm hacminde plaka.

Bundan sonraki adım çözüm ağının oluşturulmasıdır. Yani bu sonlu kontrol hacmini çok daha küçük çeşitli şekillerde ağlara ayırma işlemidir. Bu işlem yapılırken olayın fiziksel özellikleri göz önünde tutulmalıdır. Seçilecek ağ (mesh) özellikleri hem geometriye uygun hem de sınır tabaka özelliklerine uygun olmalıdır. Ağ olarak plaka yakınlarındaki olayların yakalanabilmesi için "surface remesher" ve "trimmer mesher" seçilmiş, özellik olarak da "prism layer mesher" seçilmiştir. Şekil 5.9'da seçilen ağ özellikleri görülmektedir.



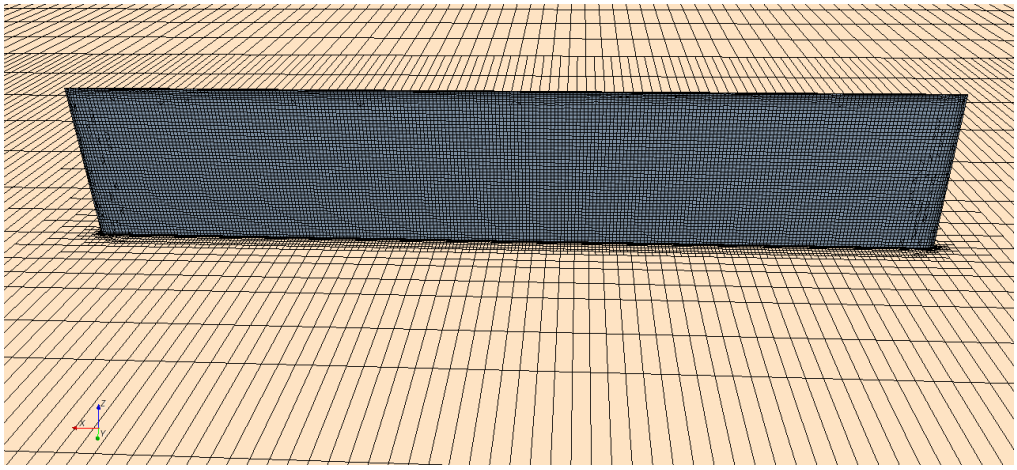
Şekil 5.9 : Seçilen ağ (mesh) özellikleri.

Dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan birisi de sürtünme direnci özelliklerini inceleyeceğimiz plakanın dışarıdaki sıvı hacmine göre daha sık ve düzgün bir şekilde ağ ile örmektir. Tüm kontrol hacmini aynı sıklıkta ağ ile örmek doğruluk adına bir şey kazandırmayacak aksine zaman anlamında pahalı bir işleme neden olmaktadır. Dolayısıyla sıvı hacmi daha kaba şekilde örülürken, plaka çok sık şekilde örülmüştür. Burada dikkat edilmesi gereken başka bir olay da kaba ağdan çok sık ağa geçişlerden kaçınmaktır. Bu da plaka çevresine kademeli olarak başka küçük hacimler tanımlayıp bu bölgeleri kademeli olarak örmek ile mümkündür. Şekil 5.10'da ağ ile örme işlemi bittikten sonra çözüm ağının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.10 : Çözüm ağı.

Plakanın ve ağ özelliklerinin daha net görünmesi için plakanın ortasından bir düzlem geçirilerek Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



Şekil 5.11 : Çözüm ağı içinde plakanın görüntüsü.

Böylece ön-işleme adımı tamamlanmış olmaktadır.

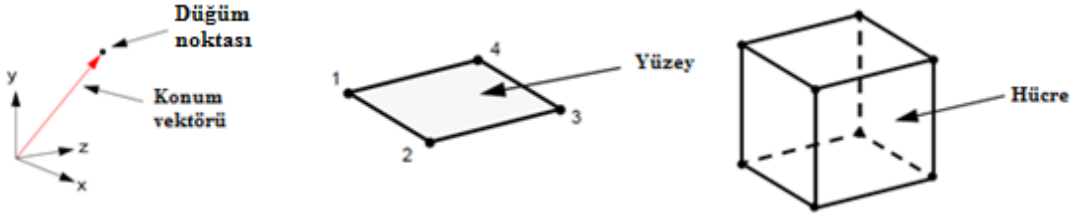
5.4 Çözüm Ağının Özellikleri

Daha önce de bahsedildiği gibi akışkan akışını yöneten diferansiyel denklemler genellikle analitik olarak çözülemezler. Bu yüzden akış çözüm hacmi daha küçük alt hacimlere bölünür ve ayrıklaştırılmış yönetici denklemler, her bir alt hacim için çözülür. Burada bahsedilen küçük alt hacimler ağlardır ve bu ağlar altıyüzlü veya

dörtyüzlü 3 boyutlu hücrelerdir. Bunlara hacim ağı denmektedir. Yüzeyler için de dörtgen veya üçgen 2 boyutlu ağlar mevcuttur ve bunlara da yüzey ağı denmektedir.

Bir simülasyondaki çözüm ağı, problemin çözüleceği hacmi tanımlamak için kullanılır. Çözüm ağı dediğimiz yapı birçok ağdan meydana gelmektedir. Ağları tanımlamak için düğüm noktaları (vertices), yüzeyler (faces) ve hücreler (cells) kullanılır.

Düğüm noktası (vertex) bir konum vektörü tarafından tanımlanan bir noktadır. Bir yüzeyi (face) tanımlamak için bir çok düğüm noktası kullanılabilir. Bir yüzey düzenli düğüm noktalarından oluşmaktadır. 3 veya 4 yüzey ile 3 boyutlu bir hücre tanımlanabilmektedir. Yüzeyler her zaman basit poligonlar şeklinde olmalıdır. Bir hücre, kapalı bir hacim tanımlayan düzenli yüzeylerden oluşmaktadır. Şekil 5.12'de bu üç eleman görülmektedir (CD-ADAPCO, 2011).



Şekil 5.12 : Düğüm noktası, yüzey ve hücre.

5.4.1 Yüzey ağı

Adından da anlaşılacağı üzere yüzeyi daha küçük ağlara ayrıştırma işlemi yüzey ağları ile yapılır. Örme işleminin ilk basamağı yüzey ağlarını oluşturmaktır. Daha sonra yüzey ağlarından hareketle hacim ağları oluşturulmaktadır. Örneğin bir geometri oluşturulup, örme işlemine başlamadan önce, yapılan seçimlerin ve örme özelliklerinin geometriye uygun olup olmadığı yüzey ağı oluşturularak kolayca görülmektedir.

STAR-CCM+ çok çeşitli yüzey ağı özelliklerine sahiptir. Bu çalışmadaki probleme uygun olarak surface remesher modeli seçilmiştir. yüksek yüzey doğruluğu gereken kapalı yüzeyler için surface remesher önerilmiştir (CD-ADAPCO, 2011).

Surface remesher ile mevcut yüzey üçgen yüzeylere bölünerek, yüzey kalitesi artırılmakta ve hacim ağı için optimizasyon yapılmaktadır. Hacim ağı oluşturulurken geometriye uygun hedef boyutlar verilerek geometrinin tam olarak yakalanması

sağlanmaktadır. Şekil 5.13'te surface remesher ile örülmüş yüzey ağı örneği görülmektedir.



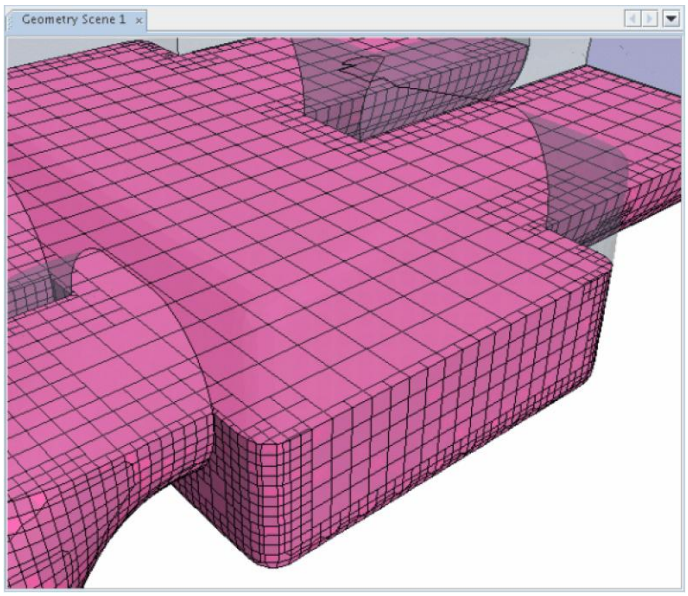
Şekil 5.13 : Surface remesher ile örülmüş bir yüzey ağı örneği (CD-ADAPCO, 2011).

5.4.2 Hacim ağı

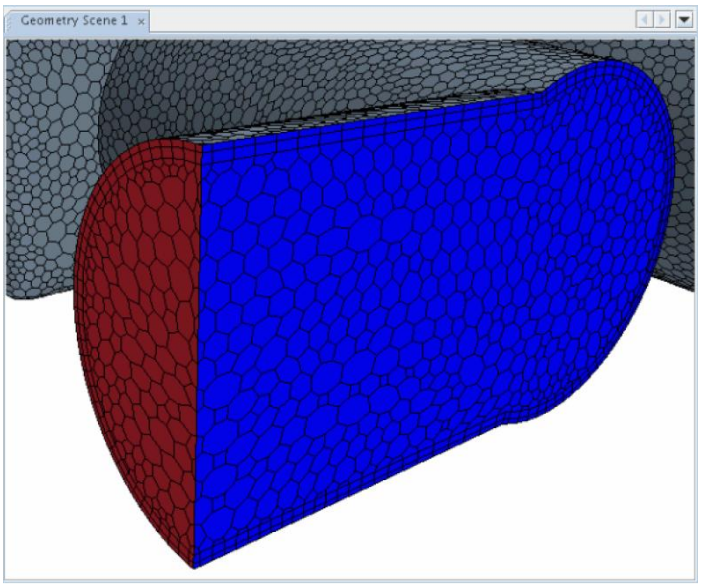
Çözüm hacmini küçük alt hacimlere bölme işlemi hacim ağları ile yapılır. STAR-CCM+ bir çok hacim seçeneği sunsa da problemimize en uygun model olarak trimmer seçilmiş ve prism layer mesher özelliği seçilmiştir.

Trimmer hücrelerin kullanımı özellikle karmaşık şekillerde bile güçlü ve etkili çözümler sağlamaktadır. Minimum hücre yamukluğu, otomatik eğrilik ve yaklaşım düzeltmesi gibi farklı örme özelliklerinin tek seçenekte toplandığı bir örme modeli olarak öne çıkmaktadır. Özellikle köşeli ve karmaşık geometrilerde sınır bölgelerinde sunduğu kesme/traşlama özelliği nedeniyle seçilmiştir. Hücre boyutları minimum ve hedef değerler tanımlanarak belirlenebilir. Böylece geometri yakalanırken öncelikle belirlenen hedef değerler ile hücreler oluşturulmaya çalışılmakta, bu boyuttaki hücrelerin oluşturulamadığı durumlarda ise belirlenen minimum boyutlarda hücreler oluşturulmaktadır. Şekil 5.14'te trimmer hücreler ile oluşturulmuş bir ağ örneği görülmektedir.

Prism layer mesh seçeneği akış simülasyonlarında duvara yakın bölgelerde bir tabaka şeklinde özel hücreler oluşturarak sınır tabaka özelliği oluşturulmasında kullanılır. Böylelikle akış modellemesi fiziksel olarak doğru bir şekilde yapılmış olmaktadır. Prism layer mesh sayesinde oluşturulan sınır tabakanın özellikleri akışın fiziğine göre değiştirilebilmektedir. Şekil 5.15'te prism layer mesher ile oluşturulmuş bir ağ örneği görülmektedir.



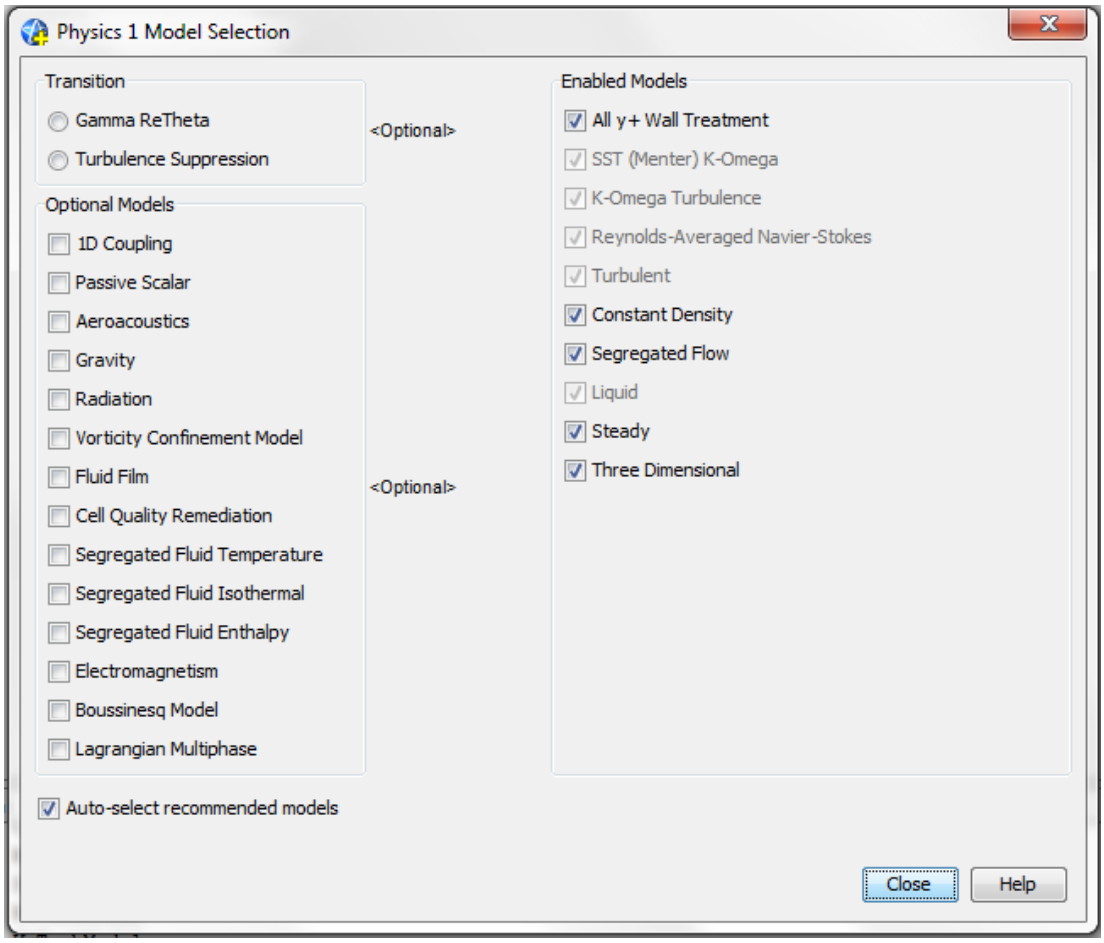
Şekil 5.14 : Trimmer hücreler ile örülen bir ağ örneği (CD-ADAPCO, 2011).



Şekil 5.15 : Prism layer mesher seçeneği ile oluşturulmuş sınır tabaka temsili (CD-ADAPCO, 2011).

5.5 Hesaplama Adımı

Hesaplama adımında, olayın doğasına uygun matematiksel modellerin, sayısal algoritmaların ve sınır koşullarının seçilmesi sonrasında hesaplamalar yapılır. Şekil 5.16'da seçilen matematiksel modeller ve algoritmalar görülmektedir.



Şekil 5.16 : Fizik bölümünde seçilen matematiksel modeller.

Bu modeller şöyle sıralanabilir:

- 3 boyutluluk
- Daimi akış
- Sıvı
- Ayrık akış
- Sabit özkütle
- Türbülanslı akış
    - Reynold Ortalama Navier-Stokes
        - K-Omega Türbülans modeli
            - SST (Menter) K-Omega
    - Tüm y^+ duvar iyileştirme

5.5.1 Uzay ve zamanın modellenmesi

Uzay modellemesi, simülasyonu yapılan olayın ve buna uygun mesh yapısının modellenmesidir. Bu çalışmada incelenen olay 3 boyutlu olduğundan mesh özellikleri de hacimsel mesh seçilecektir. Dolayısıyla seçenek olarak 3 boyutluluk seçilmiştir.

Zamanın modellenmesi iterasyonları kontrol eden çözücülerin belirlenmesine yarar. İncelenen fiziksel olaya en uygun model daimi olmayan akış modelidir. Bu yaklaşımda her bir fiziksel zaman adımı kendi içinde de iterasyonlar yaparak yakınsamayı hızlandırır. Simülasyonlarda zaman adımı plakanın boyuna ve akış hızına bağlı olarak seçilmiştir. Dolayısıyla farklı Re değerlerinde farklı zaman adımı seçmek gerekmektedir. Ayrıca iç iterasyon sayısı olarak da 5 seçilmesi uygun görülmüştür. Gerçek olayın modellenmesinde daimi olmayan akış modeli uygun olsa da, bu uygulamada serbest su yüzeyi ile plaka arasında etkileşim olmadığından ve belli bir hız değerindeki direnç değerleri bulunmak istendiğinden dolayı daimi model seçilebilir. Uygulama iki modelle de çözülmüş fakat belirtilen nedenler dolayısıyla iki çözüm arasında bir fark olmadığı görülmüştür. Dolayısıyla, zaman olarak daha ucuz olan daimi modelin seçilmesinde bu uygulama özelinde fayda görülmüştür.

5.5.2 Akışın ve türbülansın modellenmesi

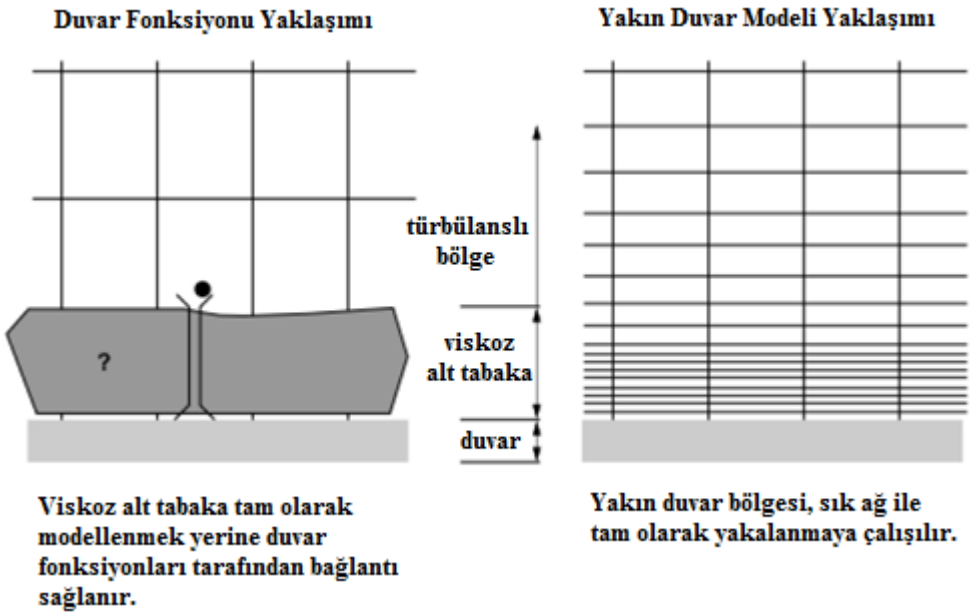
STAR-CCM+ bir çok akış modeli sunmaktadır. Fakat sıkıştırılamaz veya yarı sıkıştırılabilir ve sabit özkütleli akışkanlar için en uygun akış modeli ayrık akış (Segregated Flow)'tır. Momentum ve süreklilik denklemleri arasındaki bağlantı ilk hesaplama – düzeltilmiş hesaplama yaklaşımıyla sağlanır (Izaguirre-Alza, Pérez-Rojas, & Núñez-Basáñez, 2010)

Olaydaki akışımız türbülanslı olduğundan dolayı viskoz rejim seçeneklerinden türbülanslı akış seçilir. Türbülanslı akış modelleri arasında büyük anafor simülasyonları (Large Eddy Simulations, LES), Reynolds-ortalama Navier-Stokes çözümleri (Reynolds Averaged Navier-Stokes, RANS) ve hibrit metodlar (Detached Eddy Simulations, DES) mevcuttur. Bu modeller arasından RANS seçilmiştir.

Yüksek y^+ duvar iyileştirmesi klasik duvar-fonksiyonu yaklaşımıdır. Duvar kesme gerilmesi, türbülans üretimi ve türbülans dağılımı türbülans sınır tabaka teorisine göre ele alınır.

Düşük y^+ duvar iyileştirmesi y^+ değeri çok düşükken yani viskoz alt tabaka tam olarak yakalandığında kullanılır.

Tüm y^+ duvar iyileştirmesi ise bu iki modelin hibrit bir uygulamasıdır. y^+ değeri düşükken düşük y^+ duvar iyileştirmesi, yüksekken ise yüksek y^+ duvar iyileştirmesi özelliklerini kullanır. Şekil 5.17'de yakın duvar modeli ve duvar fonksiyonu yaklaşımı gösterilmiştir.



Şekil 5.17 : Yakın duvar modeli ve duvar fonksiyonu yaklaşımı (ANSYS, 2011).

Bu çalışmada türbülansın modellenmesinde SST K-Omega modeli kullanılmıştır. SST K-Omega modelinin diğer modellere göre bu problemin doğasına daha uygun olduğu düşünülmektedir. Bu model K-Omega türbülans modellerinin alt seçeneği olarak sunulmaktadır.

K-Omega türbülans modeli 2 denklemli bir türbülans modelidir. Bu modelde, türbülans kinetik enerji K ve spesifik yayılım (dissipation) oranı olarak ifade edilen ω kullanılır.

K-Omega modelinin ayrıntıları, Wilcox (1998) tarafından irdelenmiş ve diğer türbülans modelleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalarda modelin özellikle K-

Epsilon türbülans modeline olan üstünlükleri dikkat çekicidir. Özellikle ters basınç gradyenleri altında sınır tabakayı modelleme açısından K-Epsilon modeline göre avantaja sahip olduğu belirtilmiştir (Wilcox, 1998).

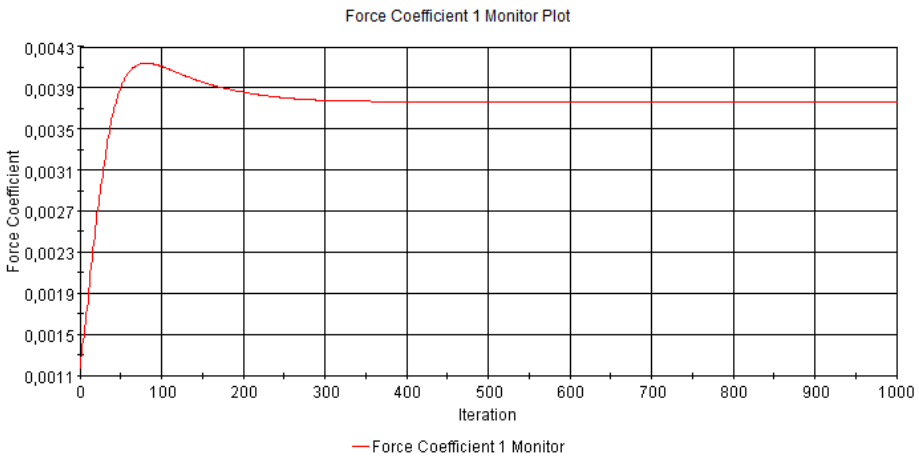
K-Epsilon modelindeki problemleri farkeden ve *e* taşınım denklemi yerine *w* taşınım denkleminin kullanılması gerektiğini farkeden Menter (1994), SST K-Omega modelini önermiştir. Bu model denklemi standart K-Omega modeline benzemekte, farklı olarak bir terim içermektedir. Bu terimin eklenmesiyle *w* taşınım denklemi K-Epsilon modeline benzer sonuçlar vermektedir. Bu model sayesinde duvardan uzak bölgelerde K-Epsilon, duvara yakın bölgelerde ise K-Omega modeli yaklaşımı yapılmaktadır.

5.6 Sonuçların Doğrulanması

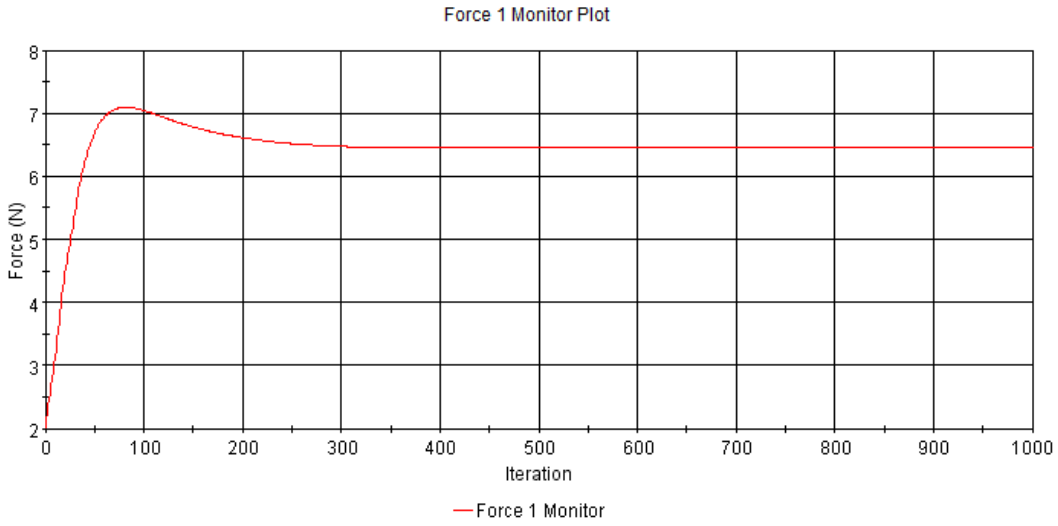
Parametrik analizlere başlamadan önce, programın ve seçilen modellerin doğrulanması gerekmektedir. Bunun için plakanın pürüzsüz, 60 numara zımpara kağıdı ile kaplı, 220 numara zımpara kağıdı ile kaplı ve TBT SPC ile boyanmış durumları için STAR-CCM+ kullanılarak yapılmış çekme deneyleri simülasyonları sonuçları ile Schultz (2004)'un kullandığı deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu hesaplamalar $Re = 2{,}8X10^6$ değerinde gerçekleştirilmiştir.

5.6.1 Pürüzsüz plaka için bulunan sonuçlar

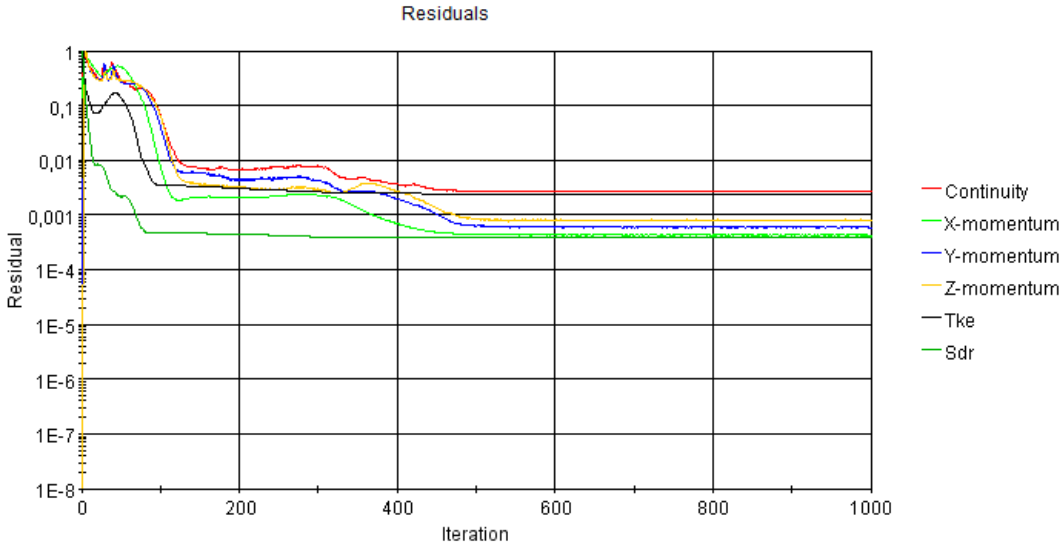
Pürüzsüz plakanın çekme deneyinin STAR-CCM+ programı ile gerçekleştirilen simülasyonları sonucu bulunan sürtünme direnci katsayısı, sürtünme direnci ve analiz artık sonuçları sırasıyla Şekil 5.18, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de görülmektedir.



Şekil 5.18 : Pürüzsüz plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



Şekil 5.19 : Pürüzsüz plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



Şekil 5.20 : Pürüzsüz plaka analiz artık sonuçları iterasyonları.

Pürüzsüz durum için plakanın sürtünme direnci 0,0037645 olarak elde edilmiştir. Deneyde bulunan sonuçlar Karman-Schoenherr formülüne %1 oranında yakın bulunmuştur. Çizelge 5.1'de sonuçların karşılaştırılması görülmektedir.

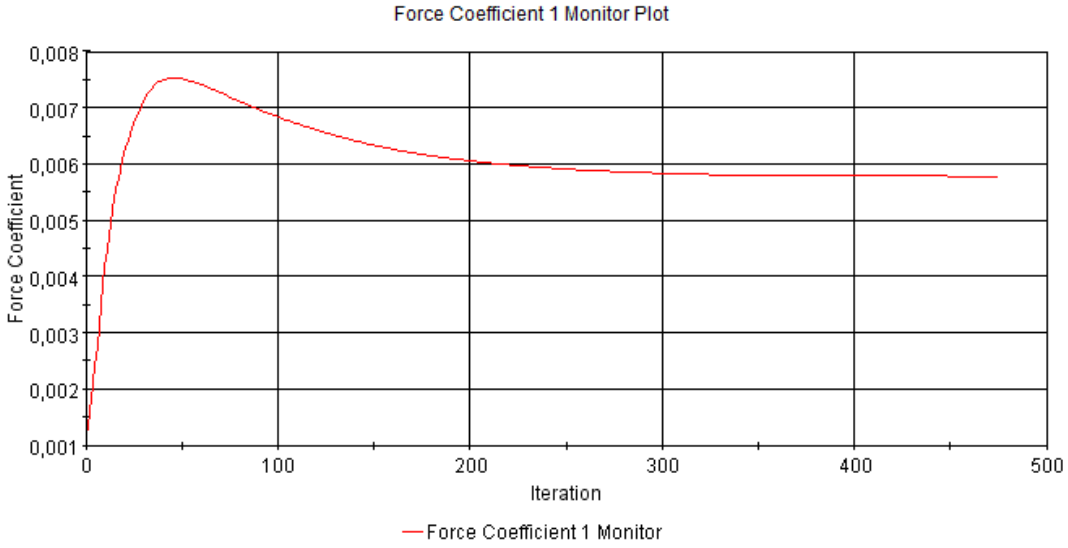
Çizelge 5.1 : HAD ile bulunan pürüzsüz plaka sürtünme direnci katsayılarının Karman-Schoenherr formülü ve deney sonucuyla karşılaştırılması.

	Re = 2,8 X 106 (Pürüzsüz)				
	HAD	Karman-Schoenherr	Fark (%)	Deney	Fark (%)
C_F	0,0037645	0,003645	3,278463649	~0,003608	4,33758315

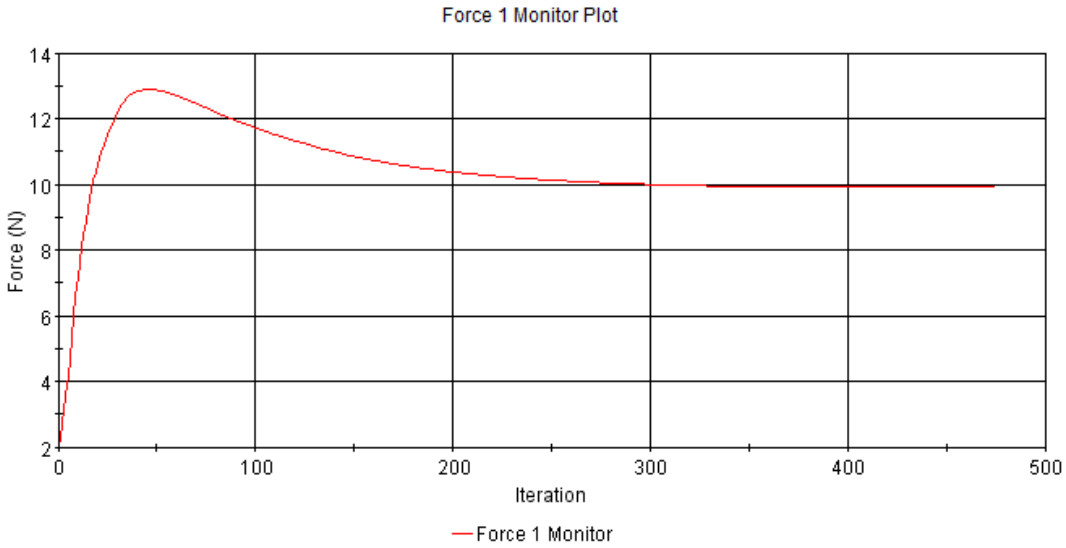
5.6.2 Pürüzlü plakalar için bulunan sonuçlar

Doğrulama için, farklı pürüzlülük değerlerine sahip 3 plakanın analizi yapılmıştır.

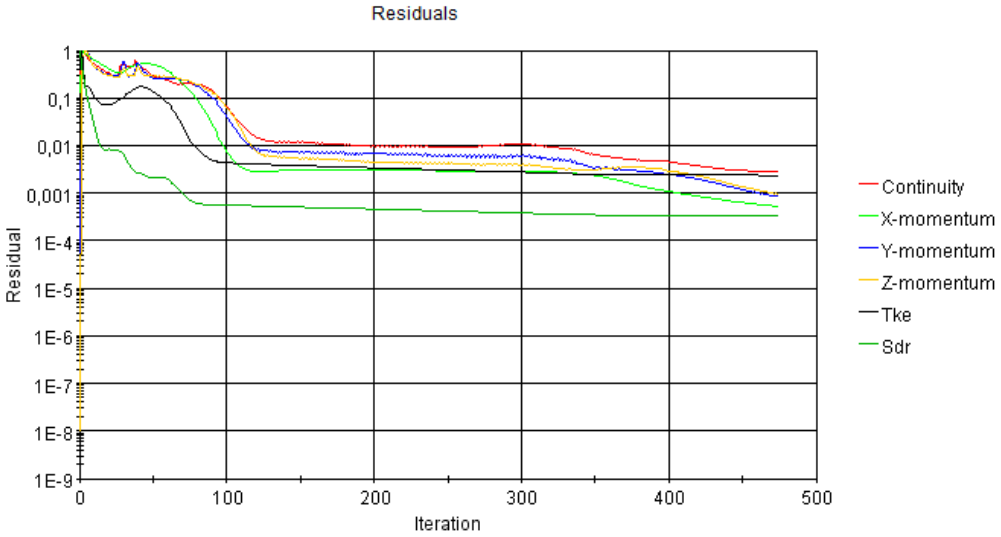
İlk olarak 60 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plaka seçilmiş ve Schultz'un (2004) önerdiği gibi pürüzlülük yüksekliği olarak $k = 0{,}75R_t$ değeri seçilmiştir. Analiz sonucu bulunan sürtünme direnci katsayısı, sürtünme direnci ve analiz artık sonuçları sırasıyla Şekil 5.21, Şekil 5.22 ve Şekil 5.23'te görülmektedir.



Şekil 5.21 : 60 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



Şekil 5.22 : 60 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



Şekil 5.23 : 60 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.

Bu durum için plakanın sürtünme direnci 0,0057804 olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.2'de deneyde bulunan sonuç ile analiz arasındaki ilişki gösterilmiştir.

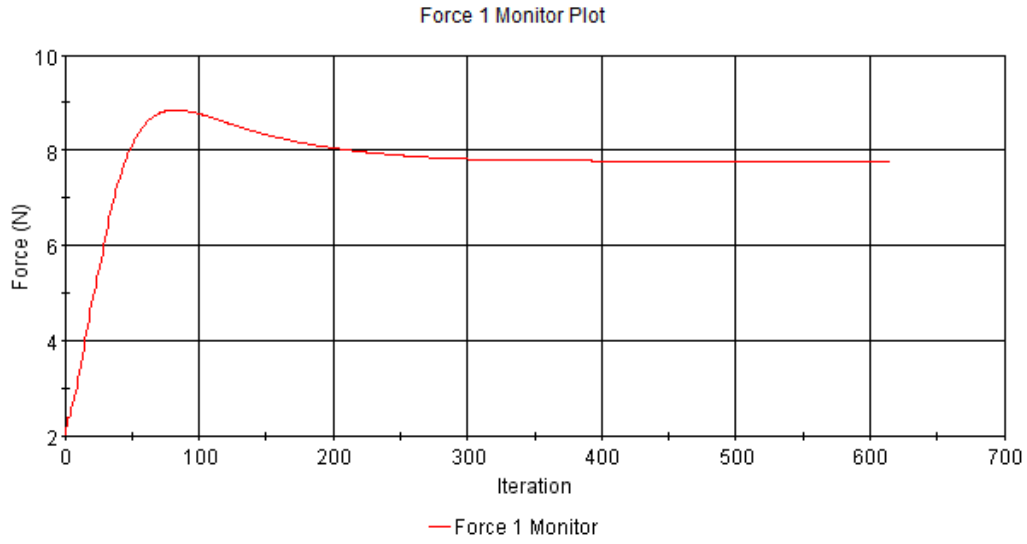
Çizelge 5.2 : HAD ile bulunan 60 numara zımpara kağıdı ile kaplanmış plakanın sürtünme direnci katsayılarının deney sonucuyla karşılaştırılması.

Re = 2,8 X 106 (k = 8,04E-4 m.)			
	HAD	Deney	Fark (%)
C_F	0,00578	~0,00603	4,139303

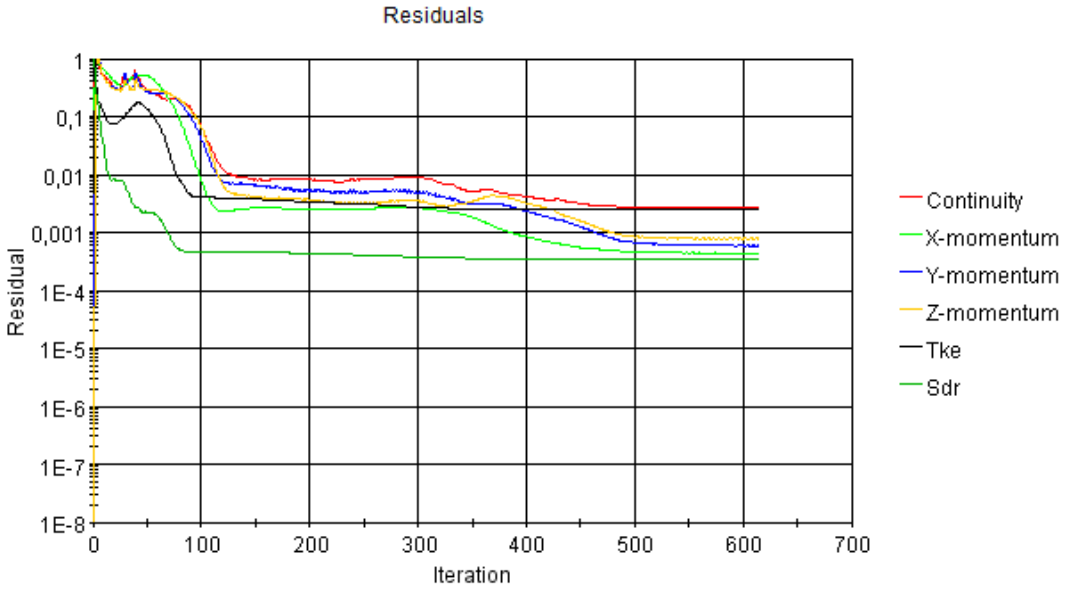
İkinci olarak 220 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plaka seçilmiş ve Schultz'un (2004) önerdiği gibi pürüzlülük yüksekliği olarak $k = 0,75R_t$ değeri seçilmiştir. Analiz sonucu bulunan sürtünme direnci katsayısı, sürtünme direnci ve analiz artık sonuçları sırasıyla Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da görülmektedir.



Şekil 5.24 : 220 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



Şekil 5.25: 220 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



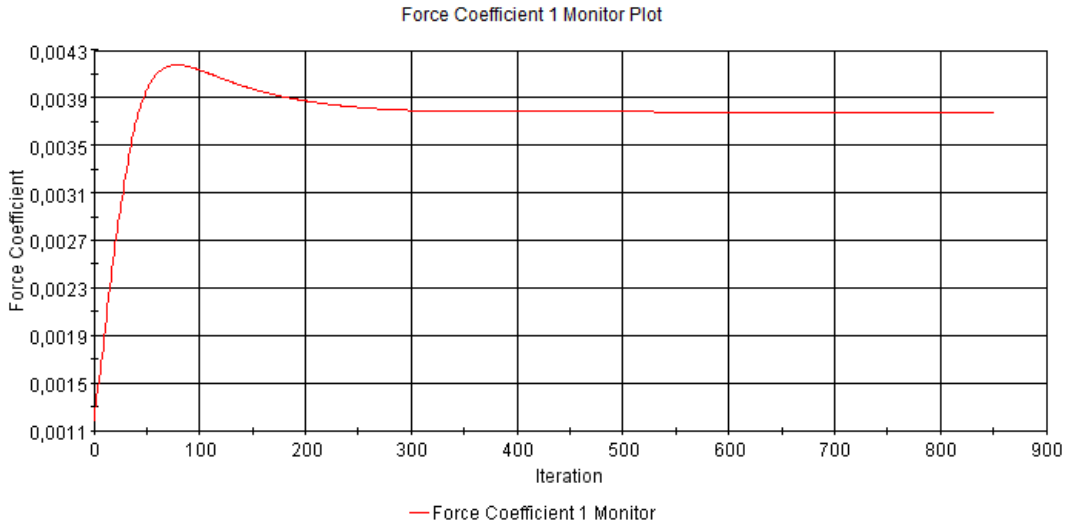
Şekil 5.26 : 220 numara zımpara kağıdı ile sarılmış plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.

Bu durum için plakanın sürtünme direnci 0,00453 olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.3'de deneyde bulunan sonuç ile analiz arasındaki ilişki gösterilmiştir.

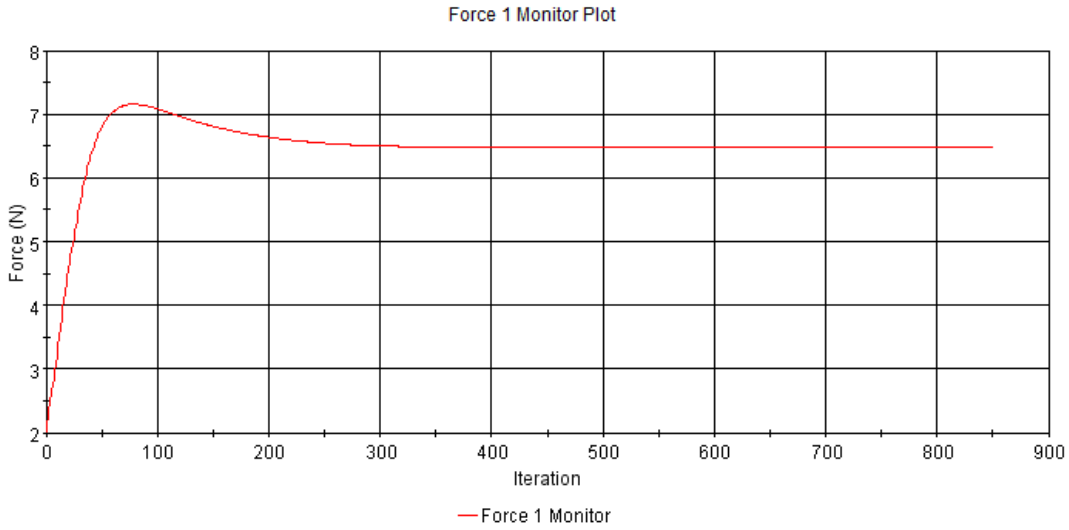
Çizelge 5.3 : HAD ile bulunan 220 numara zımpara kağıdı ile kaplanmış plakanın sürtünme direnci katsayılarının deney sonucuyla karşılaştırılması.

Re = 2,8 X 106 (k = 1,9E-4 m.)			
	HAD	Deney	Fark (%)
C_F	0,00453	~0,00425	6,588235

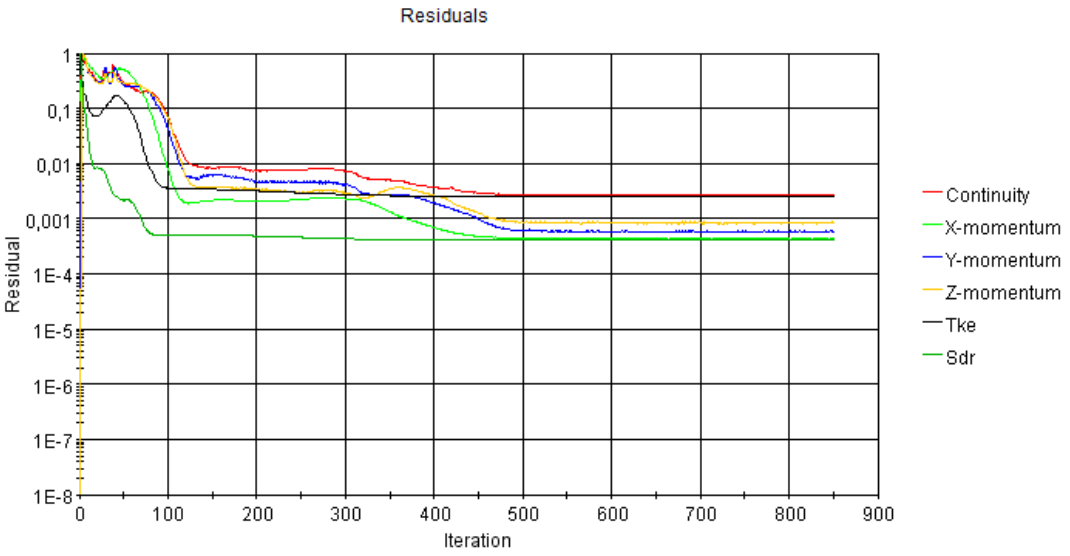
Üçüncü olarak TBT SPC ile boyanmış bir plaka seçilmiş ve Schultz'un (2004) önerdiği gibi pürüzlülük yüksekliği olarak k = 0,17R_a değeri seçilmiştir. Analiz sonucu bulunan sürtünme direnci katsayısı, sürtünme direnci ve analiz artık sonuçları sırasıyla Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'da görülmektedir.



Şekil 5.27 : TBT SPC ile boyanmış plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



Şekil 5.28 : TBT SPC ile boyanmış plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



Şekil 5.29 : TBT SPC ile boyanmış plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.

Bu durum için plakanın sürtünme direnci 0,0037645 olarak elde edilmiştir. Çizelge 5.4'de deneyde bulunan sonuç ile analiz arasındaki ilişki gösterilmiştir.

Çizelge 5.4 : HAD ile bulunan TBT SPC ile boyanmış plakanın sürtünme direnci katsayılarının deney sonucuyla karşılaştırılması.

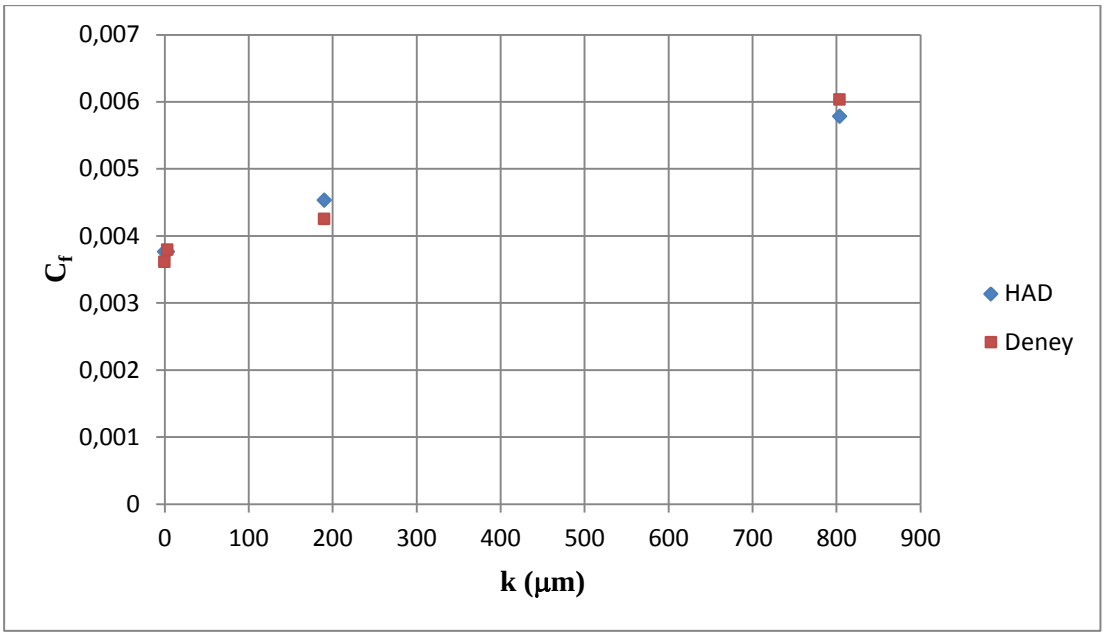
Re = 2,8 X 106 (k = 3,4E-6m.)			
	HAD	Deney	Fark (%)
C_F	0,0037645	~0,00379	0,672823

Doğrulama için kullanılan deney sonuçları ve HAD ile bulunan değerler Çizelge 5.5'de özetlenmiştir.

Çizelge 5.5 : Doğrulama için HAD ile bulunan sürtünme direnci katsayısı değerleriyle deneylerde bulunan sürtünme direnci katsayısı değerlerinin karşılaştırılması.

Pürüzlülük yüksekliği, k (μm)	C_F (Deney)	C_F (HAD)	Fark (%)
0	~0,003608	0,0037645	4,33758
3,4	~0,00379	0,0037645	0,67282
190	~0,00425	0,00453	6,58824
804	~0,00603	0,0057804	4,13930

HAD ile bulunan sonuçların deney sonuçlarıyla karşılaştırılması Şekil 5.30'da gösterilmiştir.



Şekil 5.30 : Doğrulama için HAD ile bulunan sürtünme direnci katsayısı değerleriyle deneylerde bulunan sürtünme direnci katsayısı değerlerinin karşılaştırılması.

Ayrıca gerçekleştirilen deneyde %5 oranında belirsizlik olduğu belirtilmiştir (Schultz, 2004). Dolayısıyla program ile deney arasındaki fark kabul edilebilir bir fark olarak yorumlanabilir. Böylece HAD yönteminin ve analiz için önerilen modellerin uygun olduğu görülmüştür.

Doğrulama işleminin ardından parametrik analizler yapılmış ve değişen pürüzlülük yüksekliği değerlerinin sürtünme direnci katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

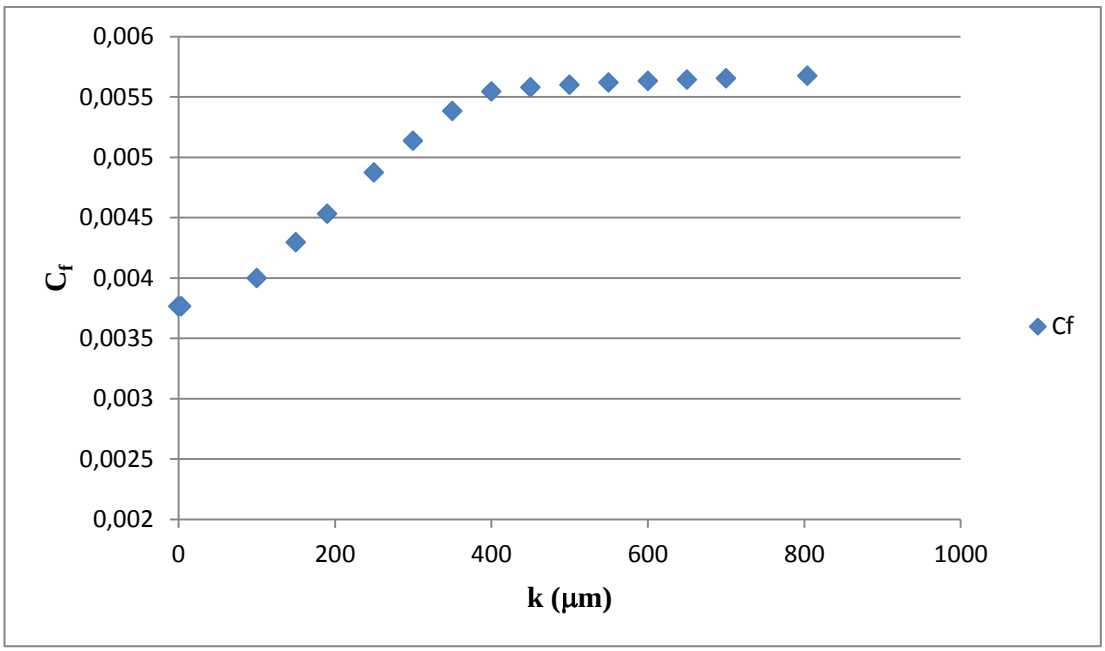
5.7 Parametrik Çalışma

Programın ve seçilen modelleme yöntemlerinin doğrulanması ardından, pürüzlülük yüksekliğinin sürtünme direnci katsayısı üzerindeki etkilerini görmek için diğer tüm parametreler sabit tutularak pürüzlülük yükseklikleri kademeli olarak değiştirilmiş ve her bir durum için sürtünme direnci katsayıları bulunmuştur. Çizelge 5.6'da bulunan sonuçlargörülmektedir.

Çizelge 5.6 : Parametrik analiz sonucu bulunan farklı pürüzlülük değerlerine karşılık gelen sürtünme direnci katsayıları.

Pürüzlülük yüksekliği, k (μm)	C_F (HAD)
0	0,0037645
3,4	0,0037645
100	0,0039991
150	0,0042958
190	0,0045300
250	0,0048718
300	0,0051354
350	0,0053809
400	0,0055434
450	0,0055780
500	0,0056004
550	0,0056175
600	0,0056312
650	0,0056425
700	0,0056519
804	0,0057804

Bulunan sonuçlar grafikleştirilmiş ve Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



Şekil 5.31 : Parametrik analiz sonucu bulunan farklı pürüzlülük değerlerine karşılık gelen sürtünme direnci katsayıları.

Şekil 5.31'de görüldüğü üzere 400 μm pürüzlülük yüksekliği değerine kadar sürtünme direnç katsayısı hızlı bir şekilde artmakta, bu değerden sonra da artış devam etmekte fakat bu artış daha yavaş bir şekilde olmaktadır.

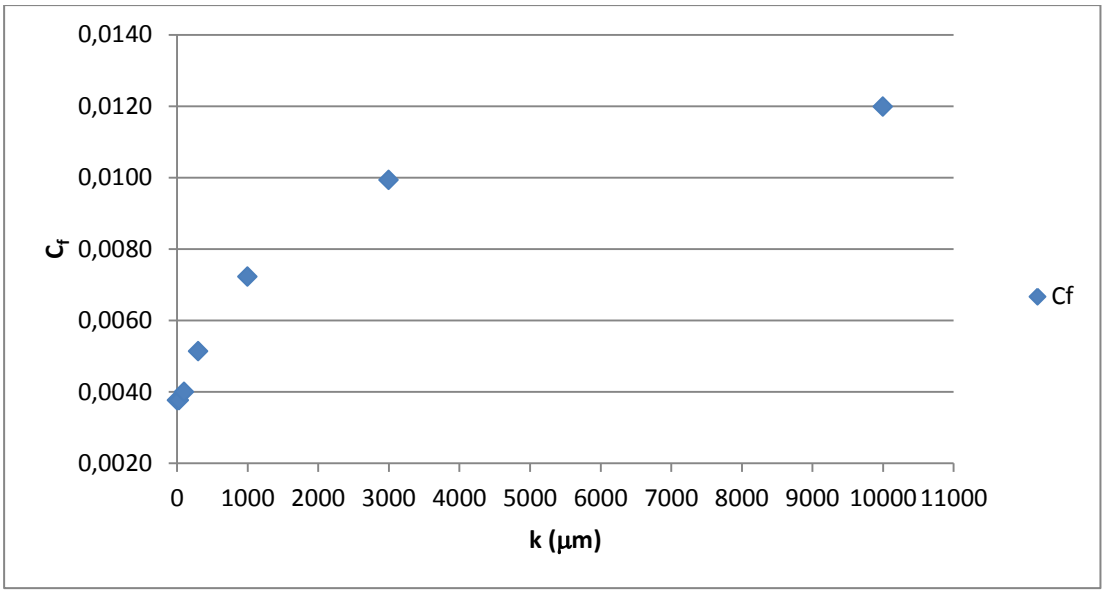
5.8 *Fouling* Durumları İçin Hesaplamalar

Fouling olayının sürtünme direnci katsayısına etkisini görebilmek için, daha önce kullanılan ve doğrulaması yapılan modelde, çeşitli *fouling* durumlarında oluşan pürüzlülük değerleri kullanılarak her bir durum için plaka sürtünme direnci değerleri bulunmuştur. Bu analiz yapılırken kullanılan değerler Schultz'un (2007) çalışmasında kullandığı değerlerdir. İlgili *fouling* durumları ve değerler Çizelge 4.1'de verilmişti.

Yapılan analiz sonucu bulunan sonuçlar Çizelge 5.7 ve Şekil 5.32'de gösterilmiş olup, belirtilen *fouling* durumlarındaki sürtünme direnci katsayılarının yüzde olarak artışı Çizelge 5.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.7 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için bulunan sürtünme direnci katsayıları.

Durum tanımı	NSTM derecelendirmesi	k_s (μm)	C_F (HAD)
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	0	0	0,003764500
Antifouling boya uygulanmış yüzey	0	30	0,003764501
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	10 - 20	100	0,003999121
Ağır kaygan çamur tabakası	30	300	0,005135393
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	40 - 60	1000	0,007225248
Orta kalkerli *fouling*	70 - 80	3000	0,009927651
Ağır kalkerli *fouling*	90 - 100	10000	0,011983819

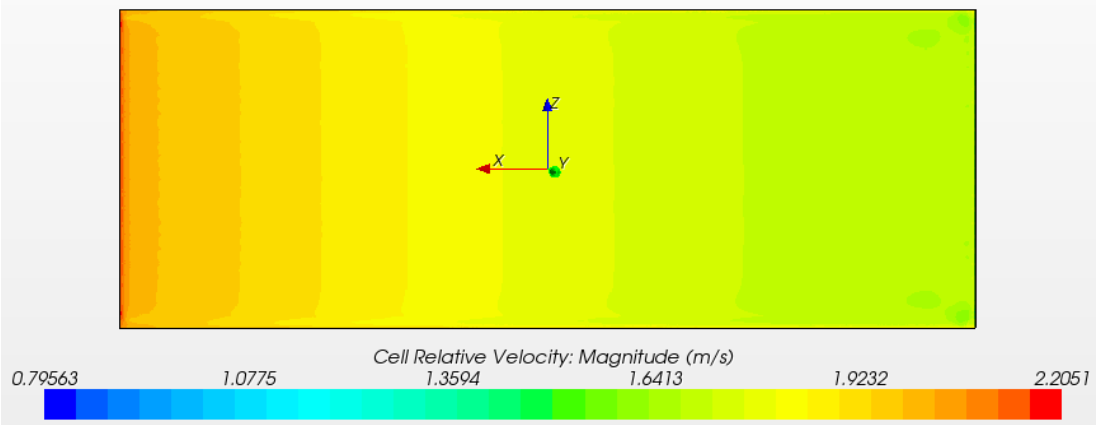


Şekil 5.32 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için bulunan sürtünme direnci katsayılarının pürüzlülük yüksekliğine göre değişimi.

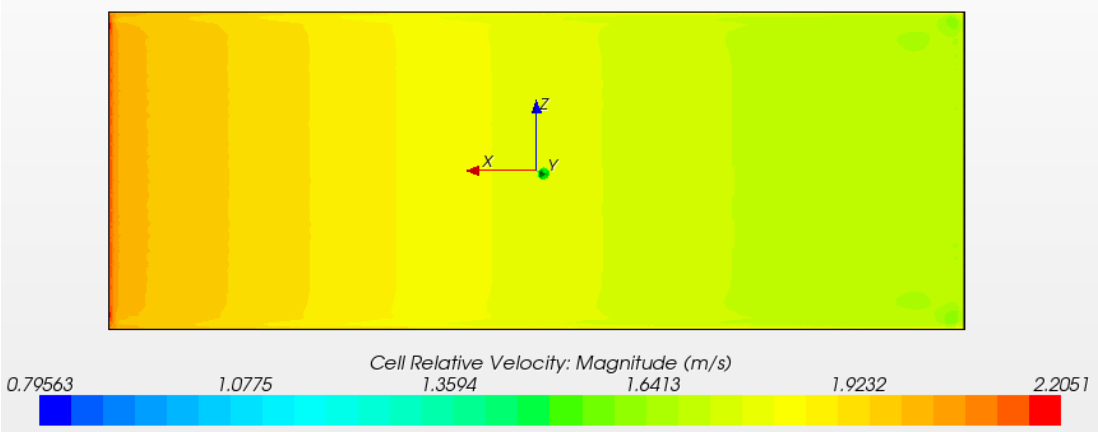
Çizelge 5.8 : Bir dizi temsili boya ve *fouling* durumu için sürtünme direnci katsayılarının yüzde olarak artışı.

Durum tanımı	$\%\Delta C_F$ (Re=2,8E+06)
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	-
Antifouling boya uygulanmış yüzey	0,000026564
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	6,23246115
Ağır kaygan çamur tabakası	36,4163368
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	91,9311462
Orta kalkerli *fouling*	163,717652
Ağır kalkerli *fouling*	218,337601

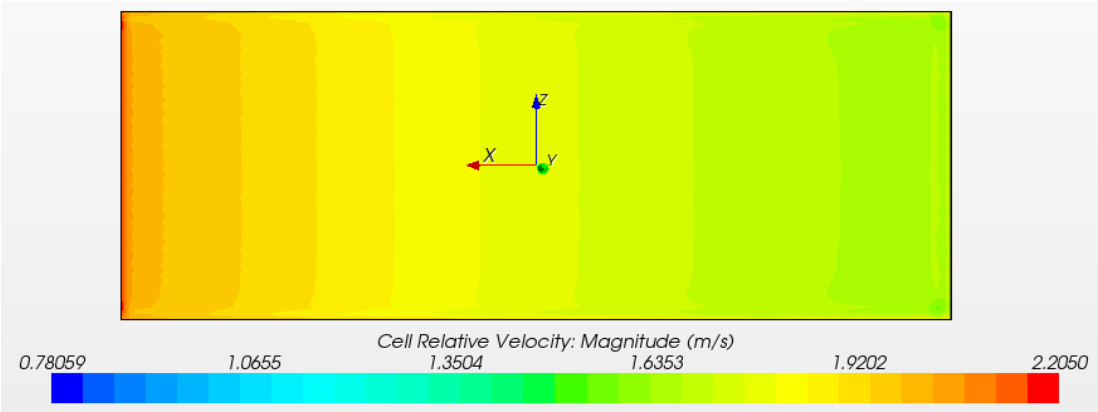
Ayrıca her bir *fouling* durumu için plaka üzerindeki yerel akış hızları bulunmuş ve Şekil 5.33'dan Şekil 5.39'a kadar bu akış hızları gösterilmiştir. Her bir durum için farklı minimum ve maksimum yerel akış hızları şekillerde açıkça görülmektedir. Ayrıca şekillerdeki renkler hız değişimini daha iyi görmek için ayarlanmış bir göstergedir ve her bir durum için farklı anlamlar taşımaktadır. Dolayısıyla her bir şekil kendi içinde değerlendirilmelidir.



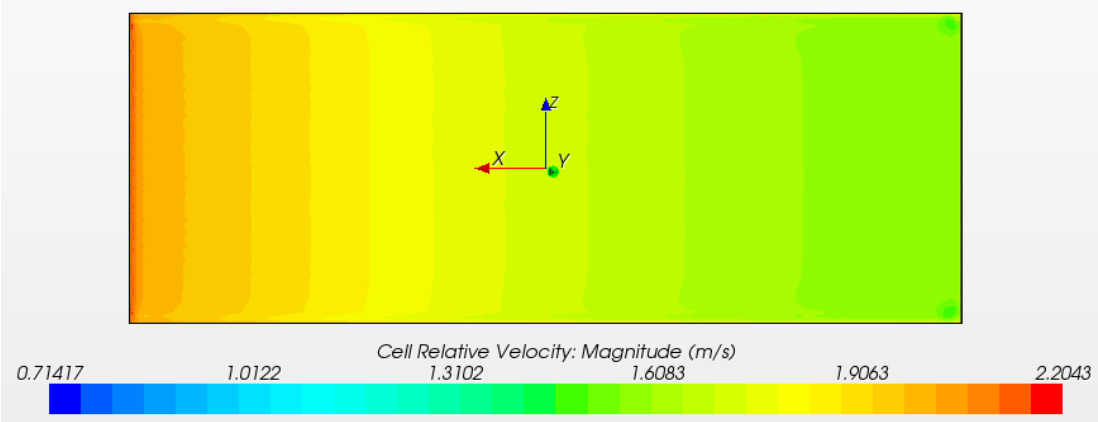
Şekil 5.33 : Pürüzsüz yüzey yerel akış hızları.



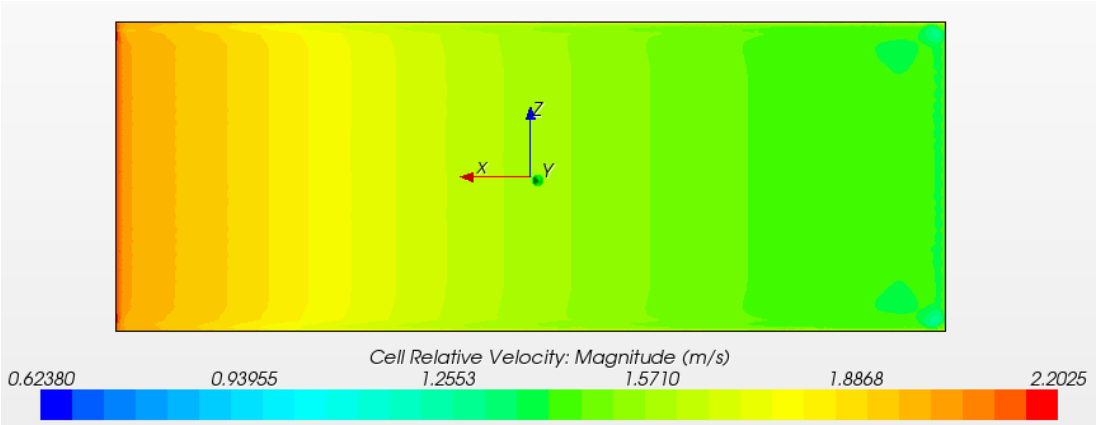
Şekil 5.34 : *Antifouling* boya uygulanmış yüzey yerel akış hızları.



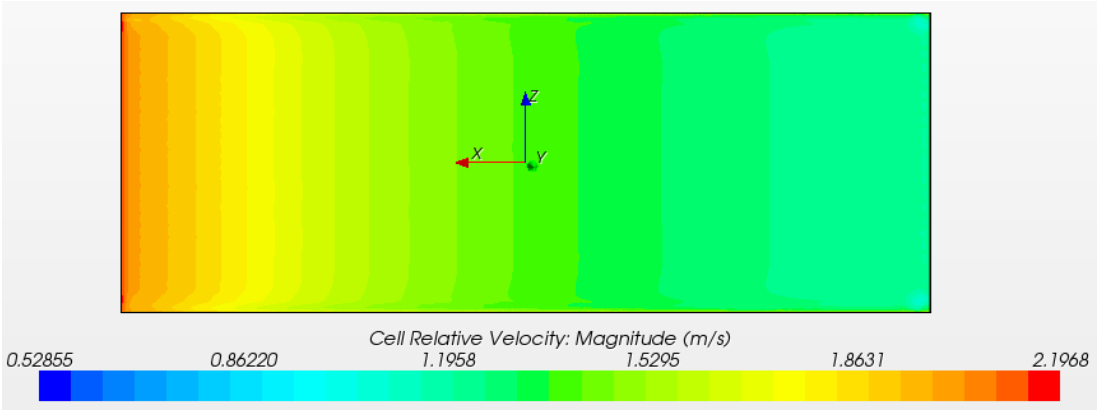
Şekil 5.35 : Bozulmuş boya durumu veya hafif kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları.



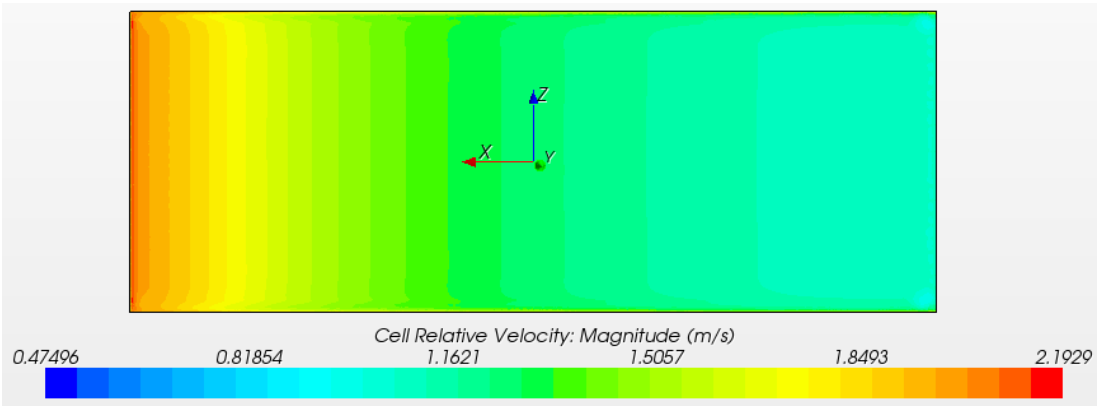
Şekil 5.36 : Ağır kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları.



Şekil 5.37 : Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları.



Şekil 5.38 : Orta kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları.



Şekil 5.39 : Ağır kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları.

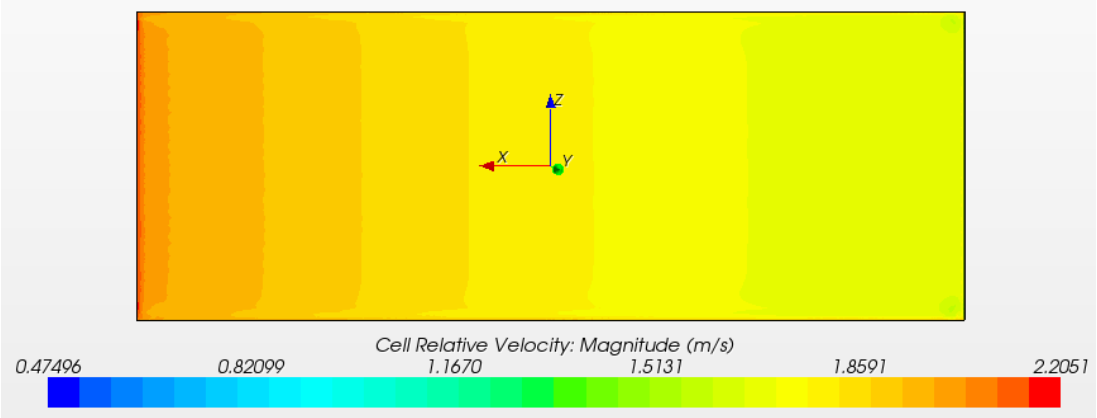
Şekillerden de görüleceği üzere, *fouling* durumları arttıkça hız profili düşmektedir. Her bir *fouling* durumu için plaka üzerinde oluşan minimum ve maksimum yerel akış hızları çizelgede gösterilmiştir.

Çizelge 5.9 : Farklı *fouling* durumları için plaka üzerinde kaydedilen minimum ve maksimum yerel hız değerleri.

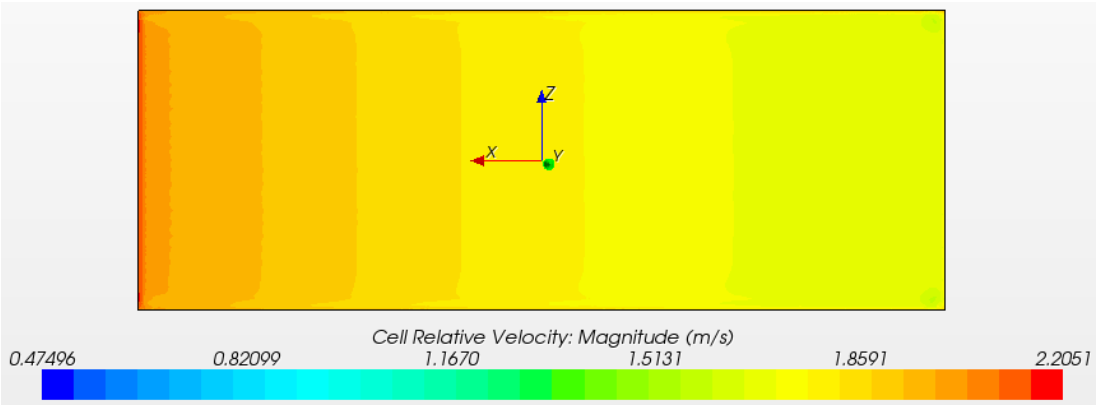
Durum tanımı	Minimum yerel hız (m/s)	Maksimum yerel hız (m/s)
Hidrodinamik pürüzsüz yüzey	0,79563	2,2051
Antifouling boya uygulanmış yüzey	0,79563	2,2051
Bozulmuş boya veya hafif kaygan çamur tabakası	0,78059	2,205
Ağır kaygan çamur tabakası	0,71417	2,2043
Hafif kalkerli veya yosunlu *fouling*	0,6238	2,2025
Orta kalkerli *fouling*	0,52855	2,1968
Ağır kalkerli *fouling*	0,47496	2,1929

Farklı *fouling* durumları için yüzeylerin yerel akış hızlarını birbirleriyle karşılaştırmak için tüm durumlar için global bir renk skalası seçilerek, yerel akış hızlarının *fouling* durumuna bağlı olarak değişimleri gözlenebilir. Minimum hız değeri olarak tüm durumlardaki minimum yerel hız ve maksimum değer olarak da

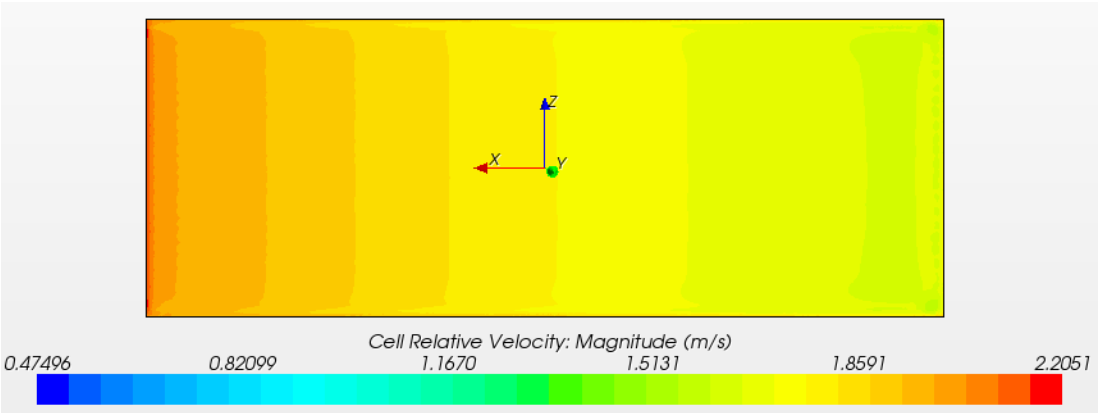
tüm durumlardaki maksimum hız seçilerek bu karşılaştırma yapılabilir. Dolayısıyla minimum hız olarak 0,47469 m/s ve maksimum hız olarak 2,2051 m/s seçilmiştir. Şekil 5.40'tan Şekil 5.46'ya kadar global renk skalası ile yerel hızlardaki değişimlerin karşılaştırılması görülmektedir.



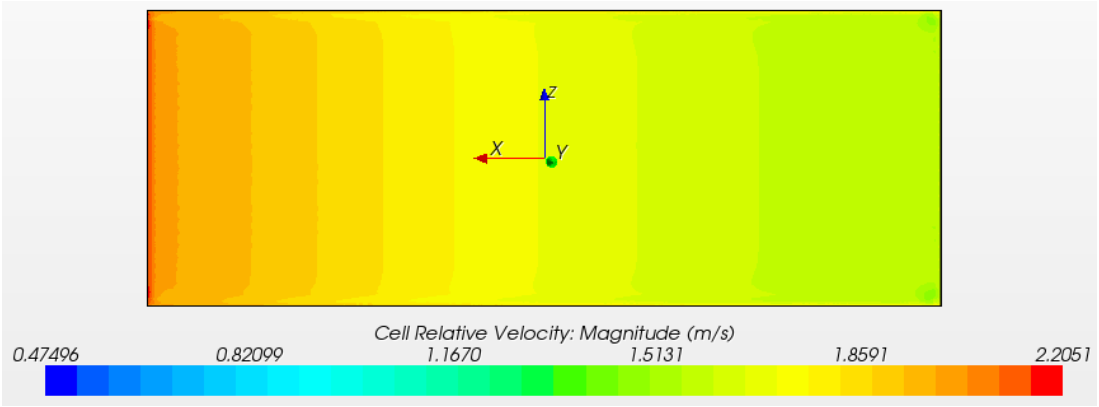
Şekil 5.40 : Global renk skalasına göre pürüzsüz yüzey yerel akış hızları.



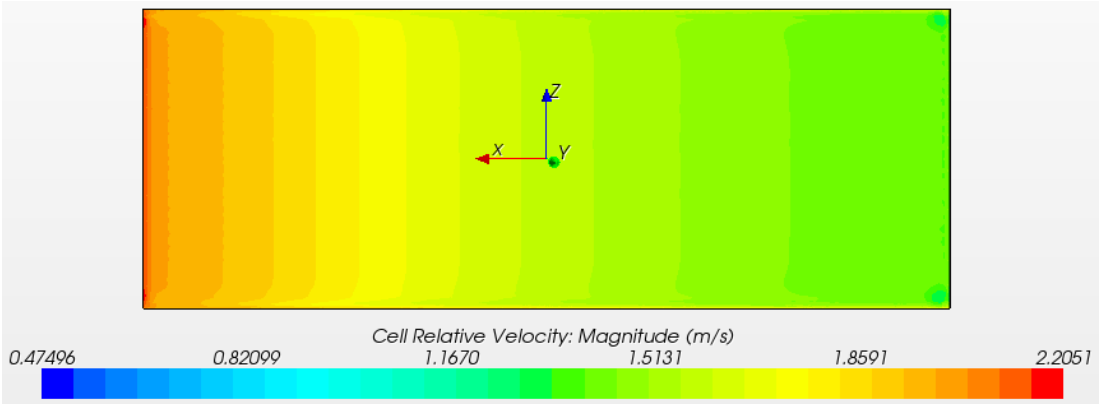
Şekil 5.41 : Global renk skalasına göre *antifouling* boya uygulanmış yüzey yerel akış hızları.



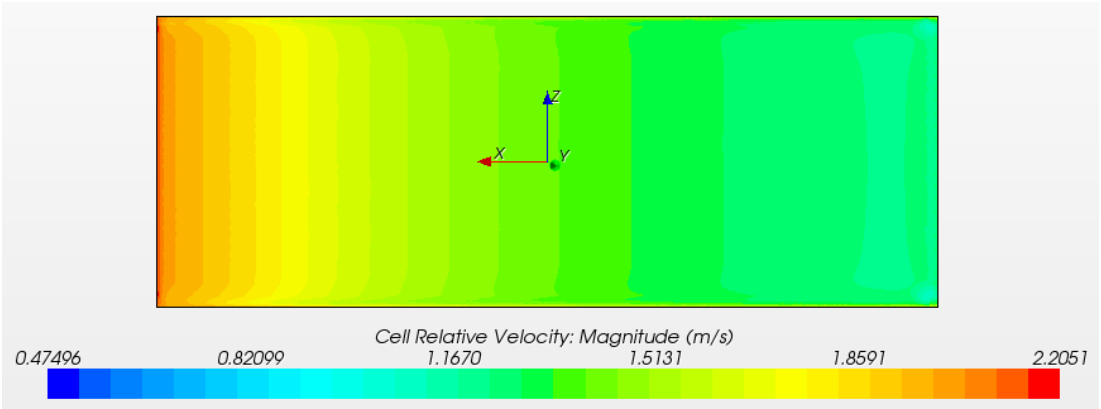
Şekil 5.42 : Global renk skalasına göre bozulmuş boya durumu veya hafif kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları.



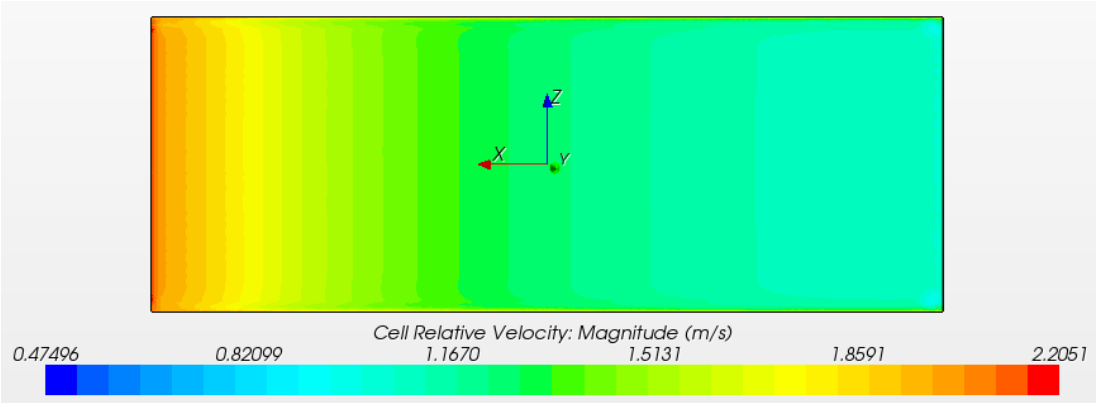
Şekil 5.43 : Global renk skalasına göre ağır kaygan çamur tabakası oluşumu durumunda yüzey yerel akış hızları.



Şekil 5.44 : Global renk skalasına göre hafif kalkerli veya yosunlu *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları.



Şekil 5.45 : Global renk skalasına göre orta kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları.



Şekil 5.46 : Global renk skalasına göre ağır kalkerli *fouling* durumunda yüzey yerel akış hızları.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada genel olarak *fouling*'in ve *antifouling* boyaların gemi direnci üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu inceleme önce teorik olarak yapılmış, sonrasında ise HAD temelli bir bilgisayar programı kullanılarak sayısal olarak yapılmıştır. İnceleme ile bulunan sonuçlar, daha önce yapılmış olan deneylerle karşılaştırılmış ve sonuçların birbirleriyle tutarlı olduğu görülmüştür. Böylece konu ile ilgili önerilen modelin doğrulaması yapılmıştır. Bu doğrulama işleminden sonra ise çeşitli pürüzlülük durumu ve NSTM (2002)'de belirtilen farklı *fouling* durumları için sürtünme direnci değerleri ve sürtünme direnç katsayısı değerleri bulunmuş, farklı durumlardaki sürtünme direnç katsayısı değerlerindeki artış yüzde olarak verilmiştir.

Grafik ve çizelgelerden de görüleceği üzere, *fouling* gemi sürtünme direncini, dolayısıyla toplam direnci ve yakıt tüketimini önemli şekilde artırmaktadır. Ağır kalkerli *fouling* olarak tanımlanan en şiddetli *fouling* durumundaki plaka sürtünme direnç katsayısı değeri, pürüzsüz plaka sürtünme direnci katsayısına göre neredeyse %218 artmıştır. *Fouling* yüzünden hem verim düşümekte hem de fazla yakıt tüketiminden kaynaklanan salınımlar nedeniyle doğa olumsuz şekilde etkilenmektedir. Bu sonuçlar göz önüne alındığında *fouling*'in azaltılması konusu gelecekte üzerine çalışılması gereken önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Fouling ve *antifouling* boyaların, yani pürüzlülüğün sürtünme direncine etki etme mekanizması, pürüzlülüğün sınır tabakaya olan etkisi ile açıklanabilir. Özellikle türbülanslı akışlarda, pürüzülülüğün, pürüzsüz yüzeyler üzerinde görülen sınır tabaka özelliklerini ve sınır tabaka hız profillerini etkilediği görülmüştür. Pürüzlülük nedeniyle türbülans sınır tabaka hız profilinde bir düşme meydana gelmekte ve bu düşme pürüzlülük fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Bu hız azalması karşımıza fiziksel olarak direncin artması olarak çıkmaktadır. Uygulamalar sonucu her bir *fouling* durumu için plaka üzerindeki yerel akış hızları bulunmuş ve plaka üzerindeki hız dağılımları da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Yine ağır kalkerli *fouling* olarak tanımlanan en şiddetli *fouling* durumundaki plaka üzeirndeki minimum yerel hız değeri, pürüzsüz plaka üzerinde görülen minimum yerel hız değerine göre neredeyse

%40 azalmıştır. Bu azalmayı matematiksel olarak modellemek için literatürde ve bu çalışmada pürüzlülük yüksekliği olarak adlandırılan bir nicelik kullanılmaktadır. Fakat gerçekte böyle bir modelleme yeterli olmayıp, diğer parametrelerin etkisi de hesaba katılmalıdır. Çünkü aynı pürüzlülük yüksekliğindeki farklı dokulara sahip yüzeyler, akış ve direnç özellikleri bakımından farklılık gösterebilirler. Dolayısıyla gelecekte, *fouling*'in modellenmesinde pürüzlülük yüksekliğinden başka parametrelerin de kullanılması gerektiği açıktır.

Bu tez kapsamında, *fouling* ve *antifouling* boyaların yüzey üzerinde oluşturduğu pürüzlülük dolayısıyla gemi direncindeki artış incelenmiştir. Bir başka deyişle *fouling* ve *antifouling* boyaların etkileri homojen dağılmış pürüzlülük olarak modellenmiştir. Bu modelleme şekli şuan için kullanılan ve geçerli bir yöntem olmasına rağmen gerçekte, özellikle *fouling* olayı, homojen olmamakta, geminin farklı bölgeleri farklı şekillerde *fouling*'e maruz kalmaktadır. Dolayısıyla *fouling* olayının modellenmesinde farklı yollar incelenmeli ve bulunmalıdır.

Ayrıca *fouling*'in, gemide oluştuğu yer bakımından da farklı etkilere sahip olduğu açıktır. Sözgelimi gemi başına yakın bir bölgede oluşan *fouling* tüm akışı etkileyip dirençte büyük artışlara neden olabilir. Dolayısıyla *fouling*'in gemi üzerindeki konumunun etkileri de gerçekçi koşullar yaratılarak incelenmelidir.

KAYNAKLAR

AMOG Consulting (2002). Hull fouling as a vector for the translocation of marine organisms, phase 3, the significance of the prospective ban on tributyltin antifouling paints on the introduction & translocation of marine pests in Australia. *Report* **2**. Alındığı tarih: 03.01.2012, adres:http://www.daff.gov.au/__data/assets/pdf_file/0012/6042/rep15 phase3full.pdf

Andersen P., ve Guldhammer H.E. (1986). A computer-oriented power prediction procedure. *Proceedings CADMO 86.*

Anderson, C.D. (1998). TBT and TBT-free antifouling paints - efficiency and track record. In, Marine Environmental Regulation: The Cost to the Shipping Industry. IBC UK Conferences Limited, London, UK.

Anderson,C., Atlar, M., Callow, M., Candries, M., Milne, A., Townsin, R.L. (2003). The development of foul-release coatings for seagoing vessels. *Proceeding of the Institute of Marine Engineering, Science and Technology (IMarEST) Part B: Journal of Marine Design and Operations*; Volume **4**, 11-23.

Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications.* McGraw Hill.

Anon. (1952). Marine fouling and its prevention. Chapter 2. Annapolis, MD: US Naval Institute.

ANSYS (2011). *FLUENT Theory Guide,* Release **14**.

Antizar-Ladislao, B. (2008). Environmental levels, toxicity and human exposure to tributyltin (TBT)-contaminated marine environment: a review. *Environ. Int.* **34**, 292–308.

ASTM D3623 (1994). Standard test method for testing antifouling panels in shallow submergence, American Society for Testing and Materials, Vol. **6.02**.

Atlar, M. (2008). An update on marine antifoulings, *25th ITTC Group Discussions 3 – Global Warming and Impact on ITTC Activities*, Fukuoka, Japan.

ATTC (1956). Transactions of the 11th General Meeting of the ATTC, Washington, D. C., p.28, *TMB Report* **1099**.

Auf 'm Keller, W.H. (1973). Extended diagrams for determining the resistance and required power for single-crew ships . *ISP*,Vol.**20** .

Ayre, A.L. (1948). Approximating EHP – revision of data given in papers of 1927 *Tranactions of NECIES*.

Baykal, R., ve Dikili, A. C. (2002). *Gemilerin Direnci ve Makina Gücü,* İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, Maslak-İstanbul.

Bertram, V. (2000). Past, present and prospects of antifouling. *32nd WEGEMT School on Marine Coatings*, pp. 85-97. Plymouth, UK,.

Blasius, H. (1908). Grenzschichten in Flüssigkeiten mit kleiner Reibung , Zeitschrift für Mathematik und Physik **56**:1-37. *Engl. Translation in NACA-TM-1256.*

Bowden, B.S ve Davison, N.J. (1974). Resistance increments due to hull roughness associated with form factor extrapolation methods. *Technical Memo* **380**, National Maritime Institute.

Calisal, S.M. ve McGreer, D. (1993). A resistance study on a systematic series of law L/B vessels. *Marine Technology* **30**, 4.

Callow, M.E. (1996). Ship-fouling : the problem and methods. *Biodeterioration Abstracts* **10**, 411-421.

Candries, M. (2001). *Drag, boundary-layer and roughness characteristics of marine surfaces coated with antifoulings* (doktora tezi). Department of Marine Technology, University of Newcastle-upon-Tyne, UK.

Carlton, J.S. (2007). *Marine Propellers and Propulsion.* Oxford, UK: Butterworth-Heinemann.

CD-ADAPCO (2011). *User Guide STAR-CCM+*, Version **6.04.014**.

Champ, M.A. (2000). A review of organotin regulatory strategies, pending actions, related costs and benefits. *Sci. Total Environ.* **258**, 21–71.

Champ, M.A. ve Seligman, P.F. (1996). *Organotins: Environmental Fate and Effects.* Chapman & Hall, London, UK.

Dafforn, K.A., Lewis, J.A., Johnston, E.L. (2011). Antifouling strategies: History and regulation, ecological impacts and mitigation. *Marine Pollution Bulletin* **62**., 453-465.

Egan, B. (1987). Marine microbial adhesion and its consequences. In: Microbes in the Sea, M.A. Sleigh (Ed.), Ellis Horwood Ltd.

Evans, C.J. and Hill, R. (1983). Organotin-based antifouling systems. Reviews on Silicon, Germanium, Tin and Lead Compounds 7, 57-125.

Evans, L. (1981). Marine algae and fouling: A review, with particular reference to ship-fouling. *Bot. Mar.* **24**, 167-171.

Fischer, E.C., Castelli, V.J., Rodgers, S.D. and Bleile, H.R. (1984). Technology for control of marine biofouling: A review. In, Costlow, J.D. and R. C. Tipper, R.C. (eds.) Marine Biodeterioration: An Interdisciplinary Approach. *Naval Institute Press*: Annapolis, Md., 261-299.

Froude, W. (1872). Experiments on the surface-friction experienced by a plane moving through water. *Brit. Assoc. Rep.* xlii, 118-124

Froude, W. (1874). Report to the Lords Commissioners of the Admiralty on Experiments for the Determination of the Frictional Resistance of Water on a Surface Under Various Conditions. Report of the British Association for the Advancement of Science.

Fung, S.C. (1991). A resistance and powering prediction for transom stern hull forms during early stage ship design. *SNAME Transactions,* **99**.

Gebers, F. (1919). Das Aehnlichkeitsgesetz bei im Wasser geradlinig fortbewegter Platten, Schiffbau, Vol. **22**.

Gillmer T.C. ve Johnson B. (1982). *Introduction to naval architecture.* Annapolis, MD: US Naval Institute.

Granville, P.S. (1958). The frictional resistance and turbulent boundary layer of rough surfaces. *Journal Ship Res.* **2**: 52–74.

Granville, P.S. (1987). Three indirect methods for the drag characterization of arbitrarily rough surfaces on flat plates. *Journal Ship Re.s* **31**: 70 – 77.

Haak, P.W. (1996). Antifouling Systems, current status and developments. In: The Present Status of TBT-Copolymer Antifouling Paints, *Proceedings of the International Symposium on Antifouling Paints for Ocean-going Vessels*, The Hague.

Hare, C.H. (1993). Anatomy of paint: Anti-fouling coatings. *J. Prot. Coating. Lining*., **10 (2)**. 83-89.

Harvald, S. (1978). Estimation of power of ships. *ISP* ., Vol **25** , No: 283.

Hayes, J.G. ve Engvall, L.O. (1969). Computer-Aided Studies of Fishing Boat Hull Resistance. *Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Fisheries Technical Paper*, 87.

Holtrop, J. ve Mennen, G.G.J. (1982). An approximate power prediction method. *International Shipbuilding Progress* **329**, 166-170.

Hughes, G. (1952). Frictional resistance of smooth plane surfaces in turbulent flow. *Trans. Inst. Naval Archit*., Vol. **94**.

Hughes, G. (1954). Friction and form resistance in turbulent flow and a proposed formulation for use in model and ship correlation, *Trans. Inst. Naval Archit.*, Vol. **96**.

ICS&ISF (2012). Overview of the international shipping industry. International Chamber of Shipping and International Shipping Federation, Web publication, Alındığı tarih: 30.01.2012, adres: http://www.marisec.org/shippingfacts/keyfacts/.

IMO (2001). Adoption of the final act of the conference and any instruments, recommendations and resolutions resulting from the work of the conference: International Convention on the Control of Harmful Anti-Fouling Systems on Ships.

IMO (2009). International Shipping and World Trade Facts and Figures 2009, *Maritime Knowledge Centre*. London.

ITTC (1957). Proceedings of the 8th ITTC, Madrid, Spain, published by *Canal de Experiencias Hidrodinamicas*, El Pardo, Madrid.

ITTC (1963). Proceedings of the 10th ITTC, London, England, published by the *National Physical Laboratory*, England.

ITTC (1990). *Hull Roughness, Report of the ITTC Performance Committee,* 19th ITTC.

Izaguirre-Alza, P., Pérez-Rojas, L., ve Núñez-Basáñez, J. (2010). Drag reduction through special paints coated on the hull. *International Conference on Ship Drag Reduction SMOOTH-SHIPS.* Istanbul, Turkey.

Izubuchi, T. (1934). Increase in Hull Resistance Through Shipbottom Fouling. Zosen Kiokai, **55**. In Japanese (Translation by Lt. C. M. Spinks, U.S.N.R., on file Research Branch, Bureau of Ships).

Jin, P., Su, B. ve Tan, Z. (1980). A Parametric Study on High-Speed Round Bilge Displacement Hulls. *BSRA No*. **54**, 541.

Kármán, v. (1921). Über laminare und turbulente reibung. *ZAMM*, **1**: 233–252, 1921. CWTK 2, 70-97.

Kempf, G. (1936). A study of ship performance in smooth and rough water. *Trans. Soc. Nav. Arch. and Mar. Eng.,* **44**, 195-227.

Kempf, G. (1937). On the Effect of Roughness on the Resistance of Ships. *Trans. Institution of Naval Architects* **79**, 109–119.

Lackenby, H. (1962). Resistance of ships, with special reference to skin friction and hull surface condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, **176**, 981–1014.

Laidlaw, F.B. (1952). The history of the prevention of fouling. *In, Woods Holes Oceanographic Institution, Marine Fouling and its Prevention.* United States Naval Institute, Annapolis, MD, 211-223.

Lewis, E. (1988). *Principles of Naval Architecture Second Revision,* Volume **2** *Resistance, Propulsion and Vibration.* Jersey City, NJ: The Society of Naval Architects & Marine Engineers.

Lewis, J.A. (1998). Marine biofouling and its prevention on underwater surfaces. *Mater. Forum* **22**, 41–61.

Little, B.J. ve DePalma, J.R. (1988). Marine biofouling. *Treat. Mater. Sci. Technol.* **28**, 89-119.

McEntee, W. (1915). Variation of frictional resistance of ships with condition of wetted surface. *Trans. Soc. Nav. Arch. and Mar. Eng*, **23**, 37-42.

Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence modeling for engineering applications, *AIAA Journal* **32 (8)**, 1598-1605.

Millikan, C.M. (1938). A critical discussion of turbulent flows in channels and circular tubes. *Proc. 5th Int. Congr. Appl. Mechanics*, Cambridge, MA., 386 – 392.

Milne, A. (1990). Roughness and drag from the marine paint chemist's viewpoint. *Marine Roughness and Drag Workshop*. London.

Milne, A. (1991). Ablation and after: the law and the profits. In, Polymers in a Marine Environment. *Institute of Marine Engineers*, London, UK. 139-144.

NSTM (2002). Naval ships' technical manual. Waterbourne underwater hull cleaning of Navy ships. Publication # S9086-CQ-STM-010/CH-081R4. Naval Sea Systems Command. p.31.

Okay, O.S. (2004). Antifouling içeren gemi boyalarının uluslararası kurallar çerçevesinde kirletici etkilerinin incelenmesi. *Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu.*

Oortmerssen, P. V. (1971). A power prediction method and its application to small ships. *International Shipbuilding Progress*, 18, 207.

Prandtl, L. (1921). Bemerkungen über die Entstehung der Turbulenz. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik* (ZAMM), 1:431–436.

Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels. *Philos. Trans. R. Soc.* **174**: 935–82.

Schetz, J.A. (1993). *Boundary Layer Analysis.* New Jersey, Prentice-Hall Inc.

Schlichting, H. (1979). *Boundary-Layer Theory. 7th Edition.* New York: McGraw-Hill.

Schoenherr, K.E. (1932). Resistances of flat surfaces moving through a fluid. *Trans SNAME* **40**: 279–313.

Schubauer, G.B. ve Tchen, C.M. (1961). *Turbulent flow*. New Jersey, USA: Princeton University Press.

Schultz, M.P. (2004). Frictional resistance of antifouling coating systems. *ASME J. Fluids Eng.* **126**: 1039–1047.

Schultz, M.P. (2007). Effects of coating roughness and biofouling on ship resistance and powering. *Biofouling*, **23 (5)**: 331–341.

Schultz, M.P. ve Flack, K.A. (2007). The rough-wall turbulent boundary layer from the hydraulically smooth to the fully rough regime. *Journal Fluid Mech.* 580: 381–405.

Schultz, M.P. ve Swain, G.W. (2000). The influence of biofilms on skin friction drag. *Biofouling* **15**: 129–139.

Sezer-Uzol, N. (2009). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile üç-boyutlu karmaşık akış problemlerinin yüksek başarımlı hesaplamaları, *BAŞARIM'09, 1. Ulusal Yüksek Başarım ve Grid Konferansı*, ODTÜ-KKM, Ankara, 15-18 Nisan 2009.

SNAME (1948). Uniform procedure for the calculation of frictional resistance, etc., SNAME Bulletin 1-2; replaced by Bulletin 1-25, (SNAME (1964)).

Steinberg, P.D., Nys, R. D., Kjelleberg, S. (2002). Chemical cues for surface colonization. *Journal of Chem. Ecol.* 28, 1935–1951.

Stevens, S.A. (1937). The increase in frictional resistance due to the action of water on bottom paint. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, Vol. **49**, 585-588.

Taylan, M. (2010). An overview: effect of roughness and coatings on ship resistance. *International Conference on Ship Drag Reduction SMOOTH-SHIPS.* Istanbul, Turkey.

Taylor, D.W. (1943). *The Speed and Power of Ships*. Third edition. Washington: US Govt. Printing Office.

Townsin, R.L, ve Dey, S.K. (1990). The correlation of roughness drag with surface characteristics. *Marine Roughness and Drag Workshop*, London.

Townsin, R.L., Byrne, D., Svensen, T.E., Milne, A. (1986). Fuel economy due to improvements in ship hull roughness 1976-1986. *International Shipbuilding Progress*, Vol. **33**, 127-130.

Townsin, R.L., Medhurst, J.S., Hamlin, N.A., Sedat, B.S. (1984). Progress in calculating the resistance of ships with homogenous or distributed roughness. *N.E.C.I.E.S. Century Conference on Marine Propulsion*.

Url-1 < http://www.scotland.gov.uk/Publications/2008/04/03093608/17 >, alındığı tarih: 30.04.2012.

Url-2 < http://www.international-marine.com/Literature/HRPC_Folder_Paper.pdf >, alındığı tarih : 12.02.2012.

Url-3 < http://www.gidb.itu.edu.tr/staff/odabasi/gmg/WEEK6.PDF >, alındığı tarih: 25.01.2012.

Url-4 < http://www.digitalmetrology.com/SurfaceFinishIn3Steps.htm >,

alındığı tarih: 20.03.2012

Url-5 < http://www.rubert.co.uk/Ra.htm >, alındığı tarih : 22.03.2012

Url-6 < http://www-scf.usc.edu/~tchklovs/Proposal.htm >, alındığı tarih: 15.02.2012

Url-7 < http://www.cortana.com/Drag_Description.htm >, alındığı tarih: 17.02.2012

Wilcox, D.C. (1998). *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd edition, DCW Industries, Inc.

Woo, E.L., Karafiath, G., Borda, G. (1983). Ship-model correlation of powering performance on USS Oliver Hazard Perry, FFG-7 class. *Marine Technology* **20**: 35–52.

Yaglom, A.M. (1979). Similarity laws for constant-pressure and pressure-gradient turbulent wall flows. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. **11**, 505-540.

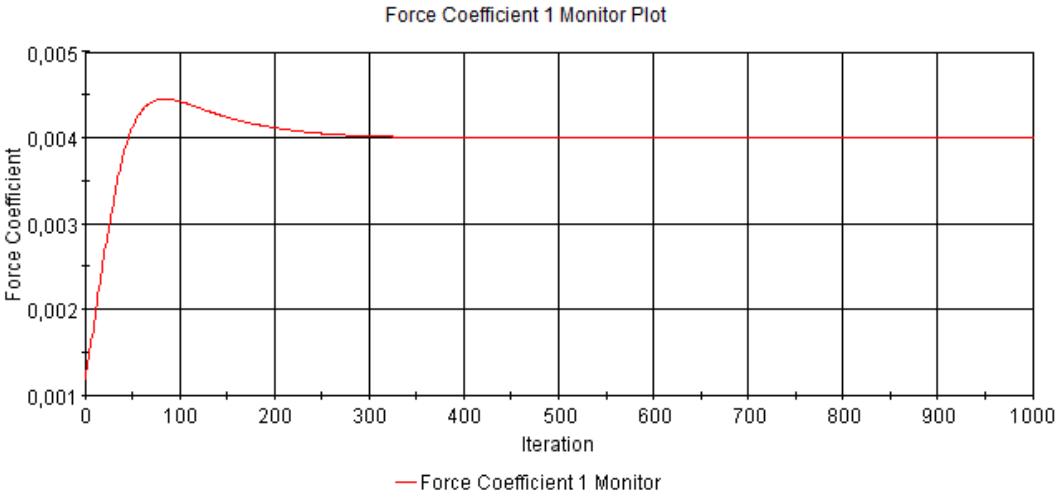
Zobell, C.E., Allen, E.C. (1935). The significance of marine bacteria in the fouling of submerged surfaces. *Journal of Bacteriol. Virol.* **29**, 239–251.

EKLER

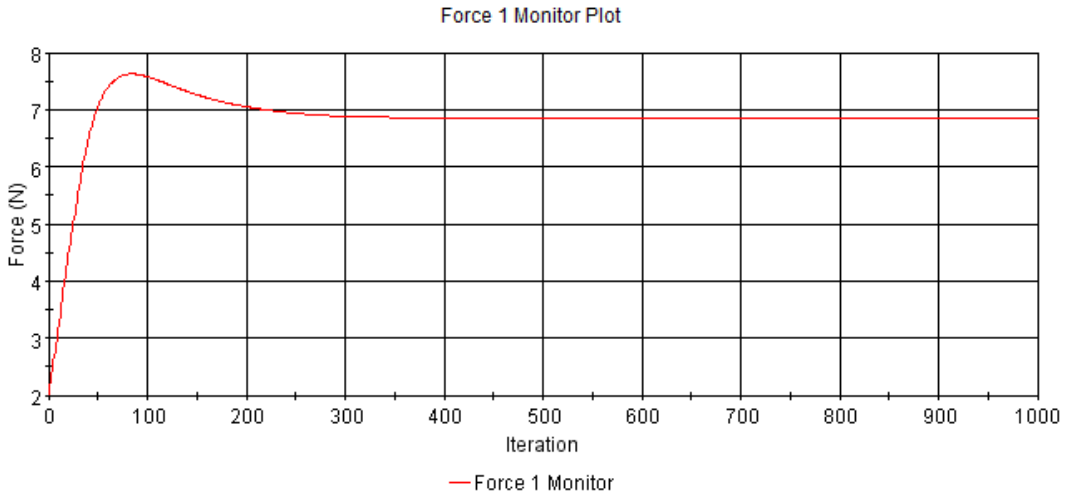
EK A : Parametrik çalışma iterasyon grafikleri

EK B : *Fouling* durumları için iterasyon grafikleri

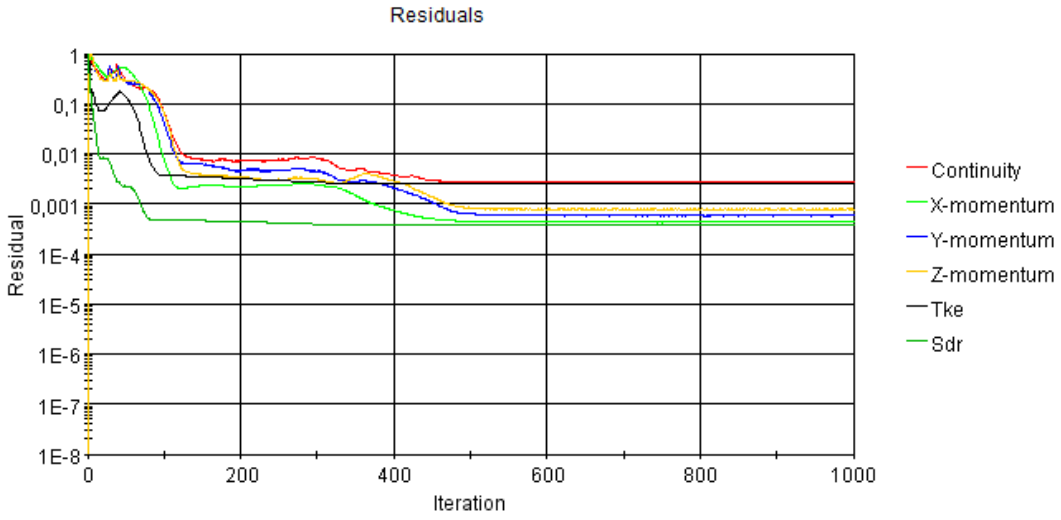
EK A



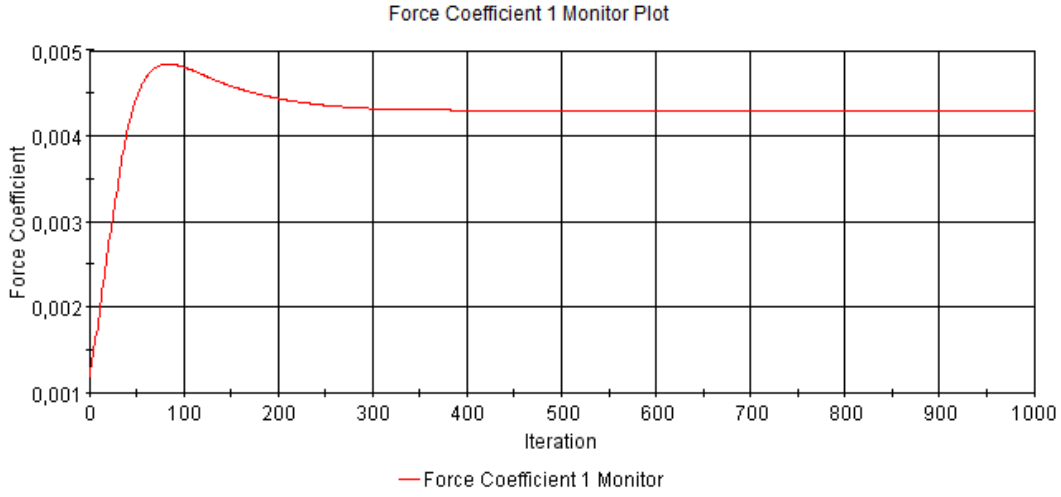
Şekil A. 1 : Pürüzlülük değeri k=100 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



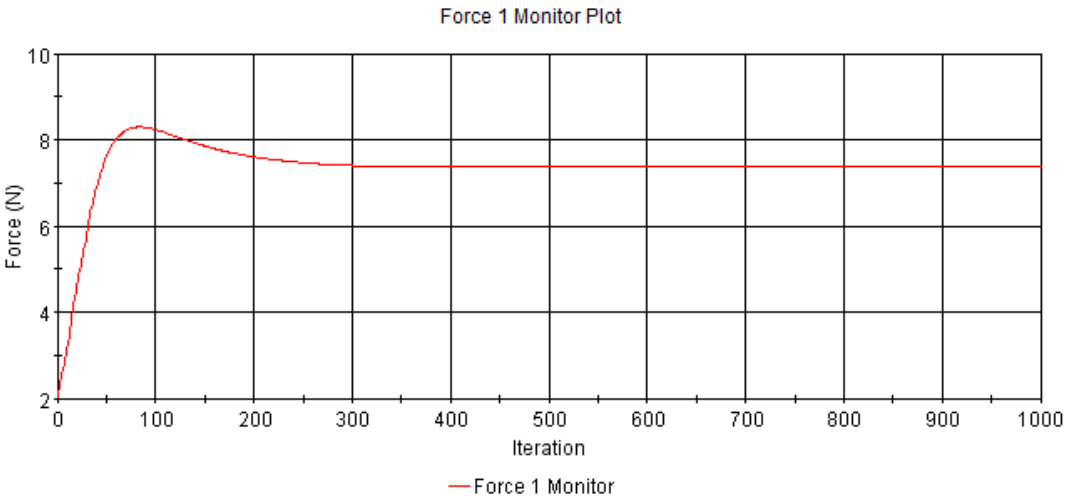
Şekil A. 2 : Pürüzlülük değeri k=100 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



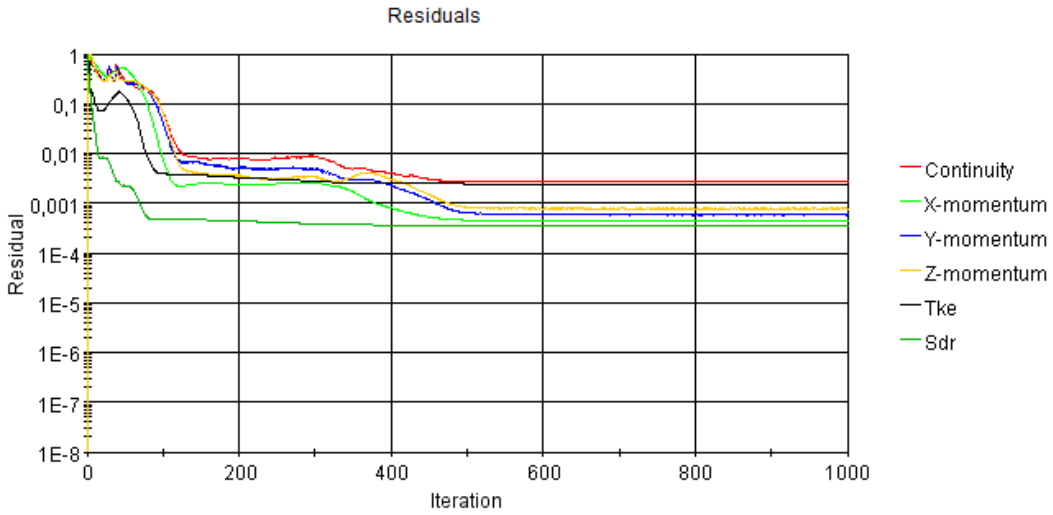
Şekil A. 3 : Pürüzlülük değeri k=100 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



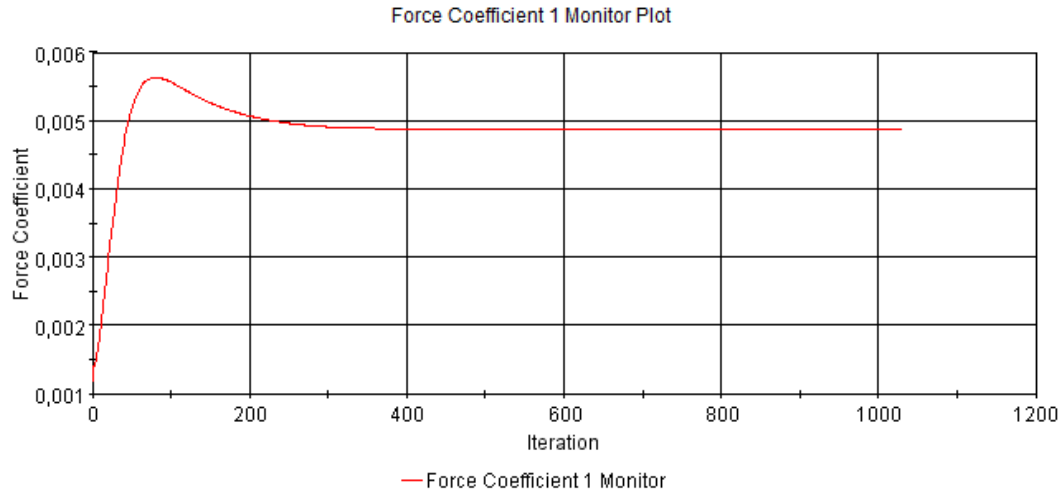
Şekil A. 4 : Pürüzlülük değeri k= 150 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



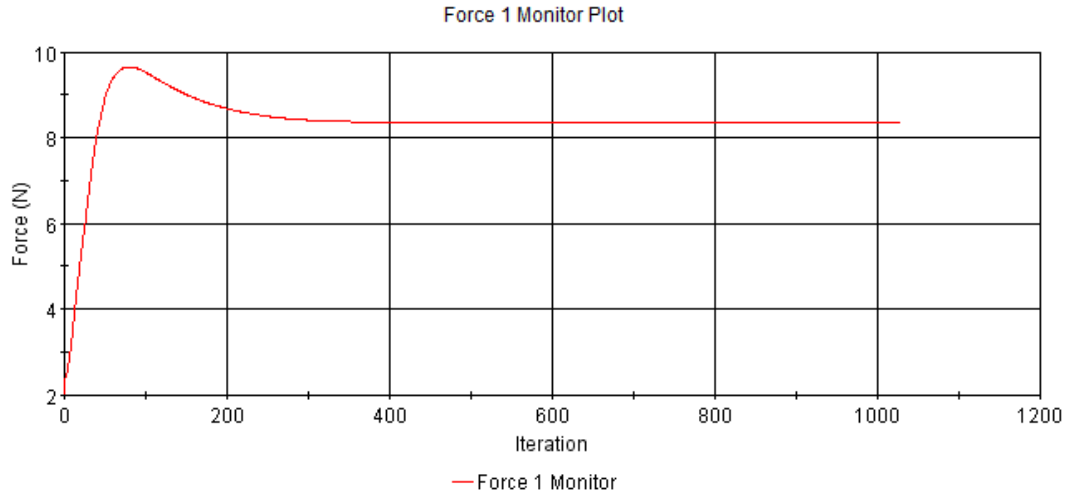
Şekil A. 5 : Pürüzlülük değeri k= 150 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



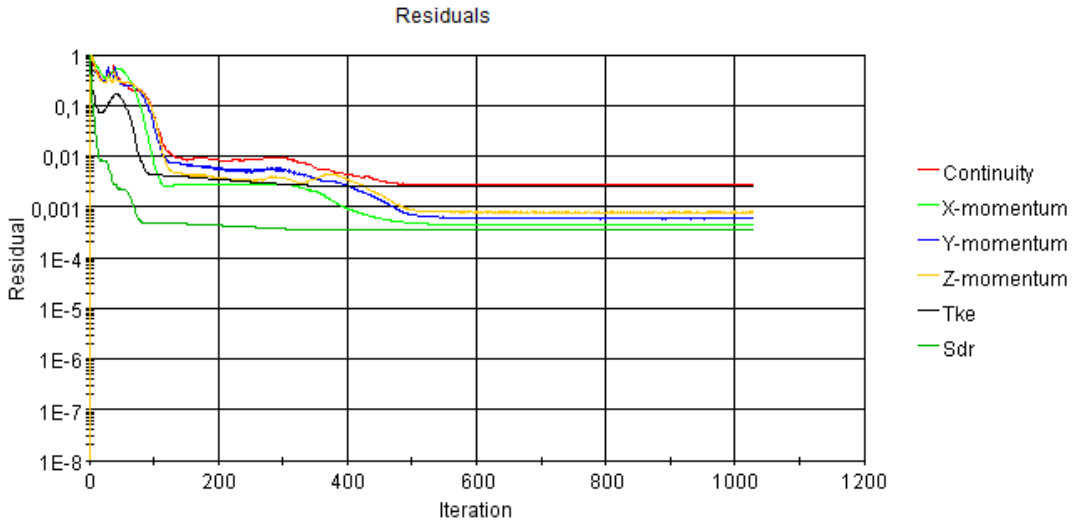
Şekil A. 6 : Pürüzlülük değeri k= 150 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



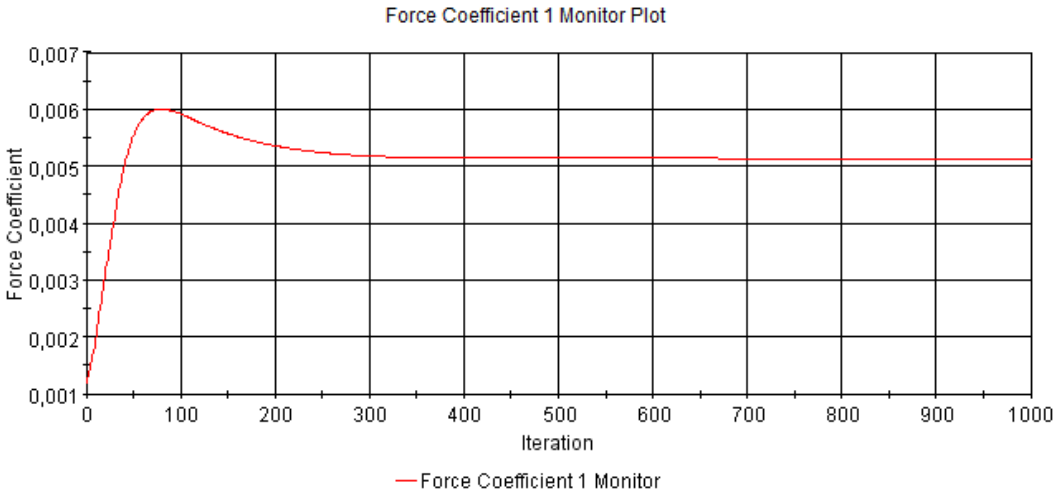
Şekil A. 7 : Pürüzlülük değeri k= 250 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



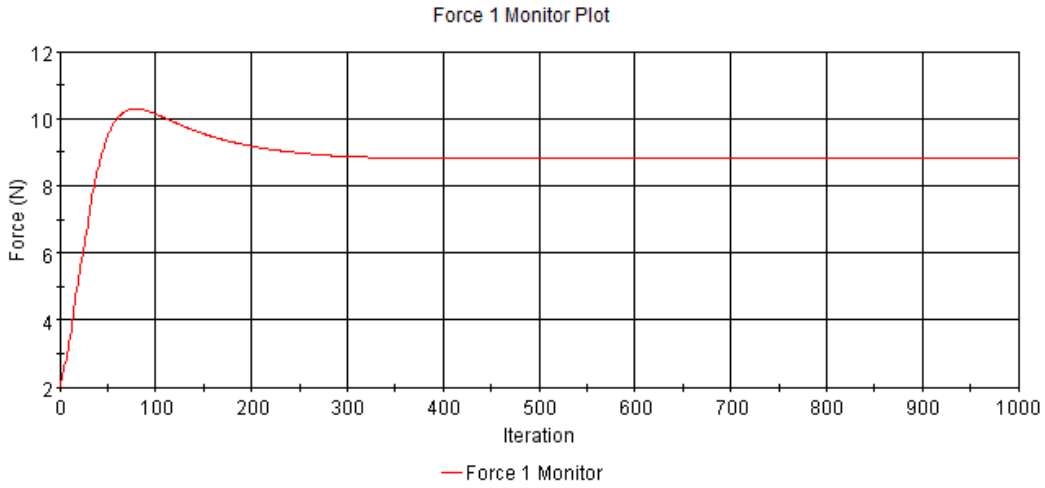
Şekil A. 8 : Pürüzlülük değeri k= 250 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



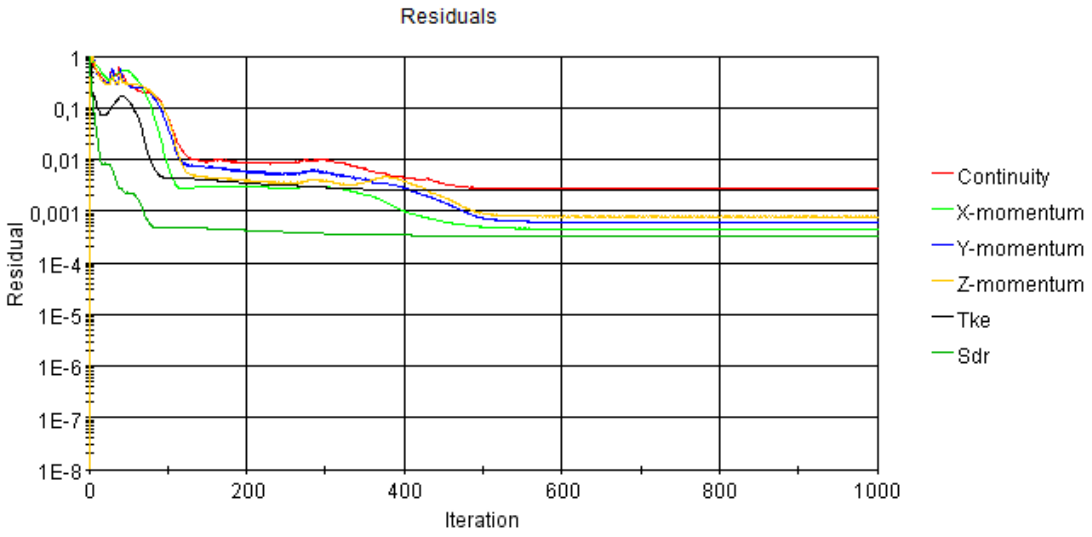
Şekil A. 9 : Pürüzlülük değeri k= 250 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



Şekil A. 10 : Pürüzlülük değeri k= 300 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



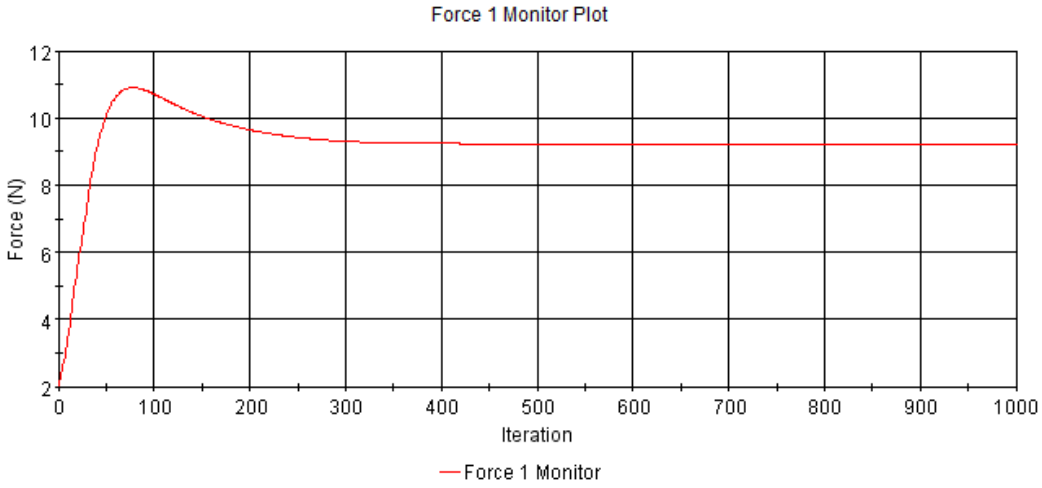
Şekil A. 11 : Pürüzlülük değeri k= 300 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



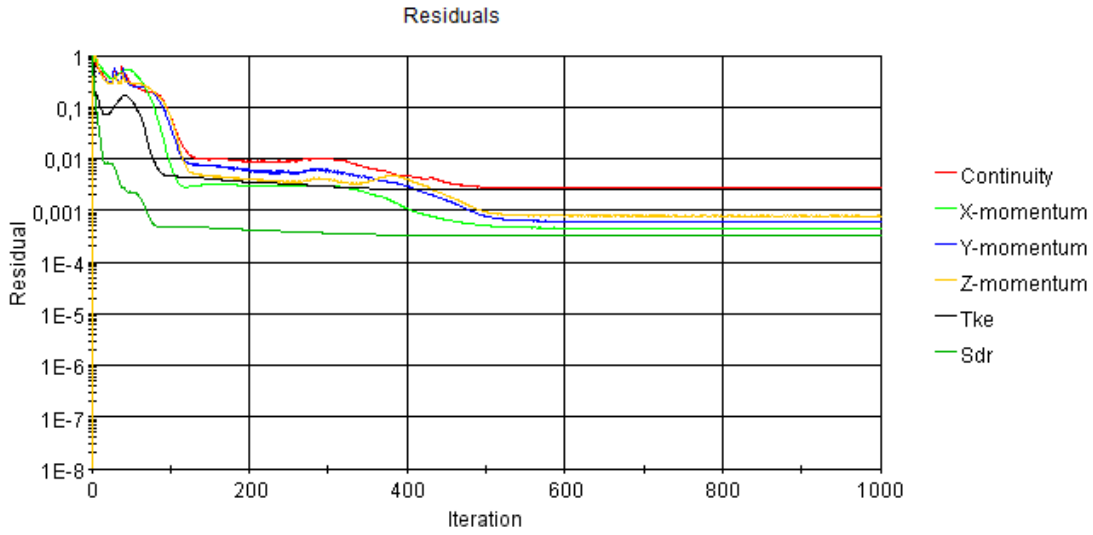
Şekil A. 12 : Pürüzlülük değeri k= 300 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



Şekil A. 13 : Pürüzlülük değeri k= 350 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



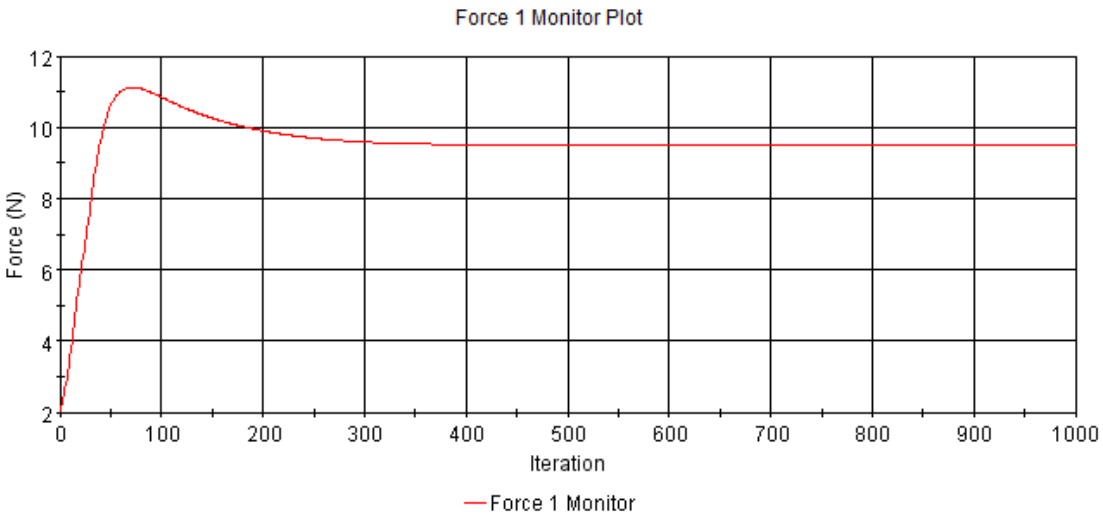
Şekil A. 14 : Pürüzlülük değeri k= 350 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



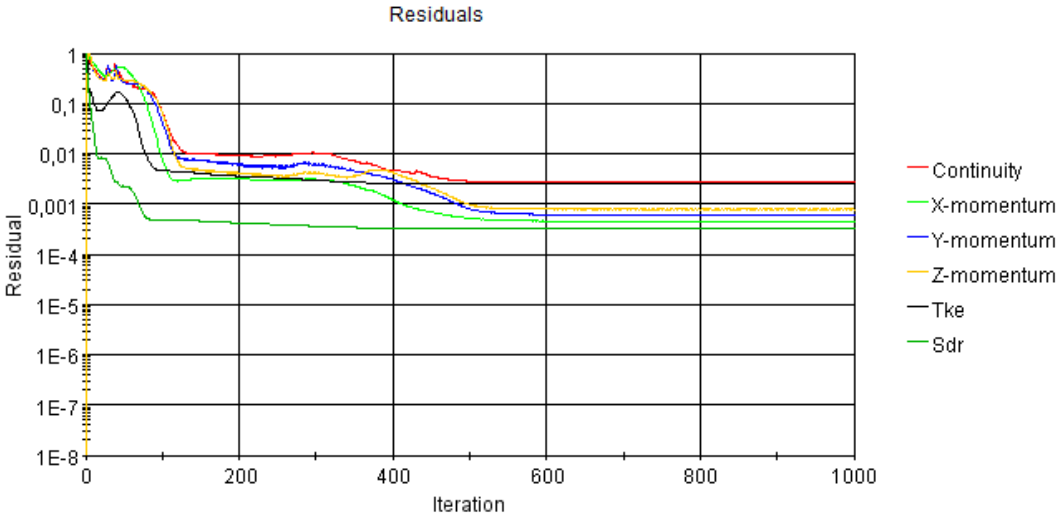
Şekil A. 15 : Pürüzlülük değeri k= 350 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



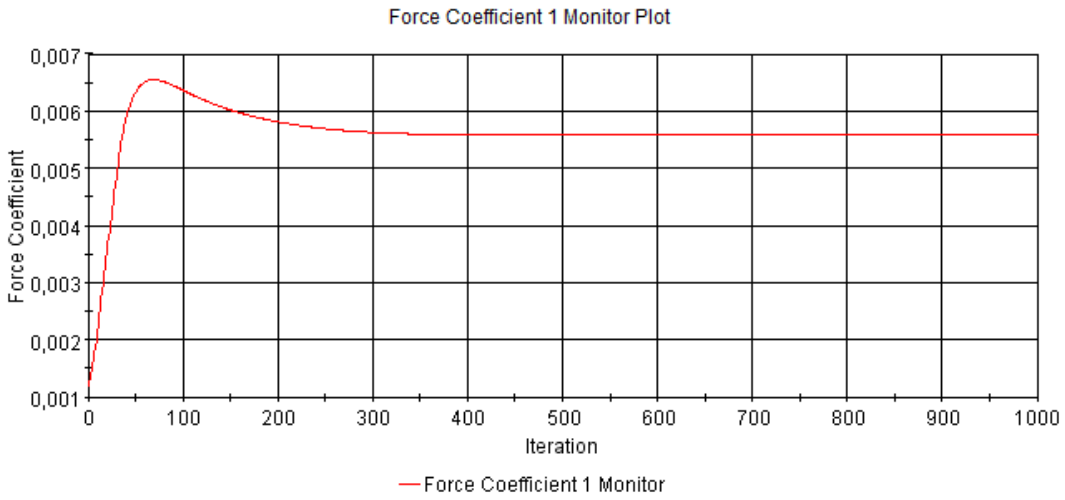
Şekil A. 16 : Pürüzlülük değeri k= 400 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



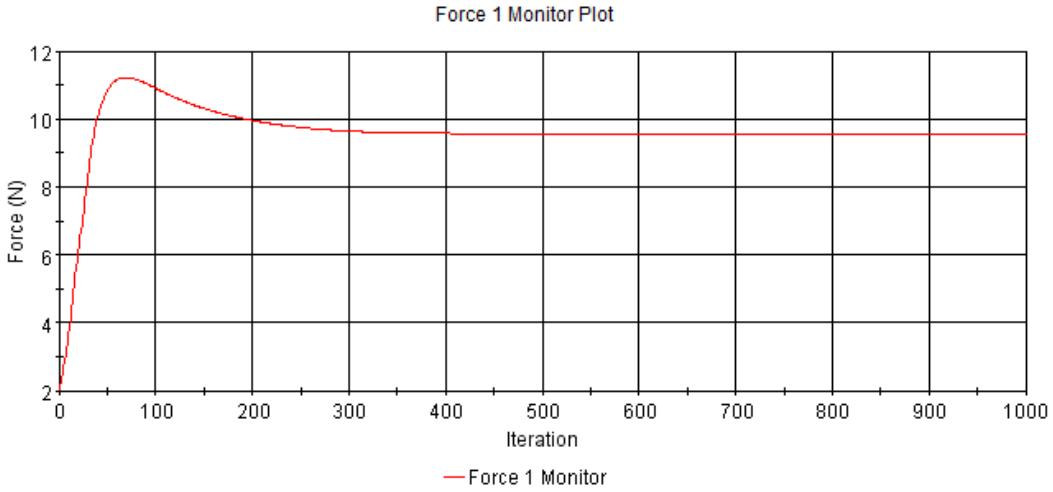
Şekil A. 17 : Pürüzlülük değeri k= 400 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



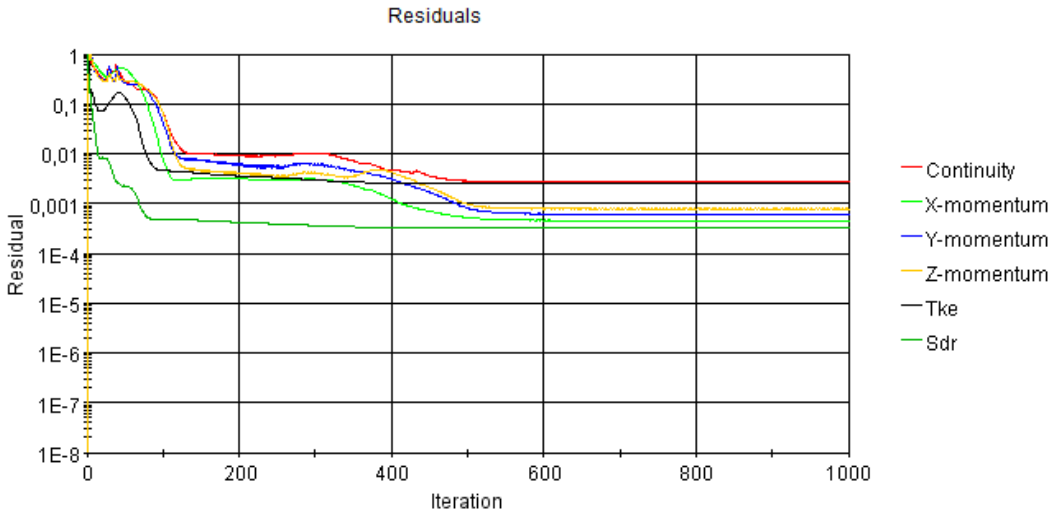
Şekil A. 18 : Pürüzlülük değeri k= 400 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



Şekil A. 19 : Pürüzlülük değeri k= 450 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



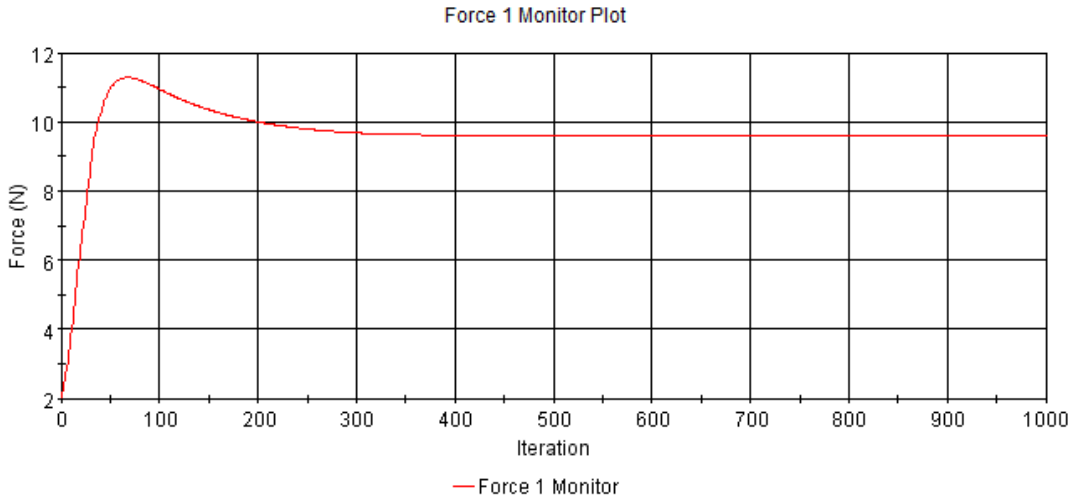
Şekil A. 20 : Pürüzlülük değeri k= 450 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



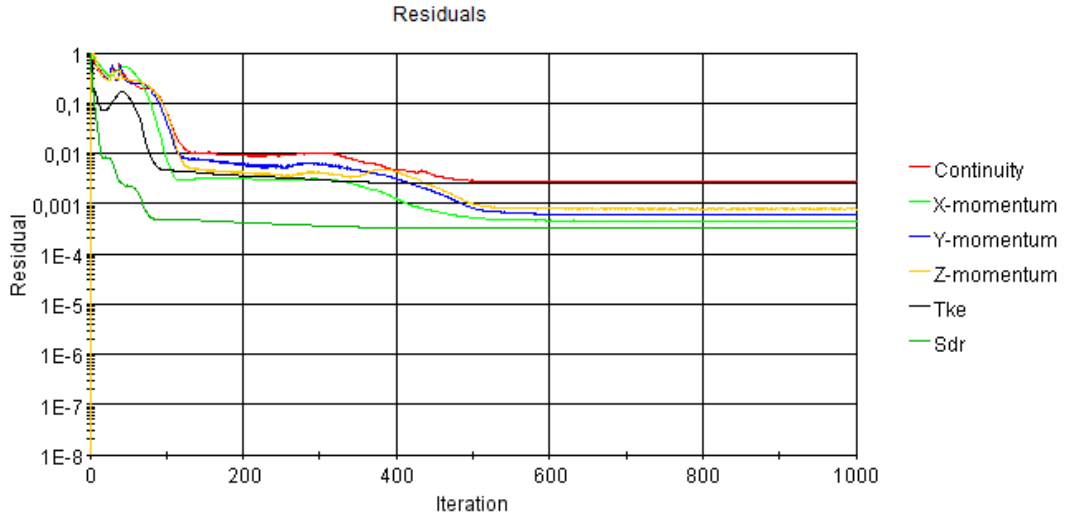
Şekil A. 21 : Pürüzlülük değeri k= 450 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



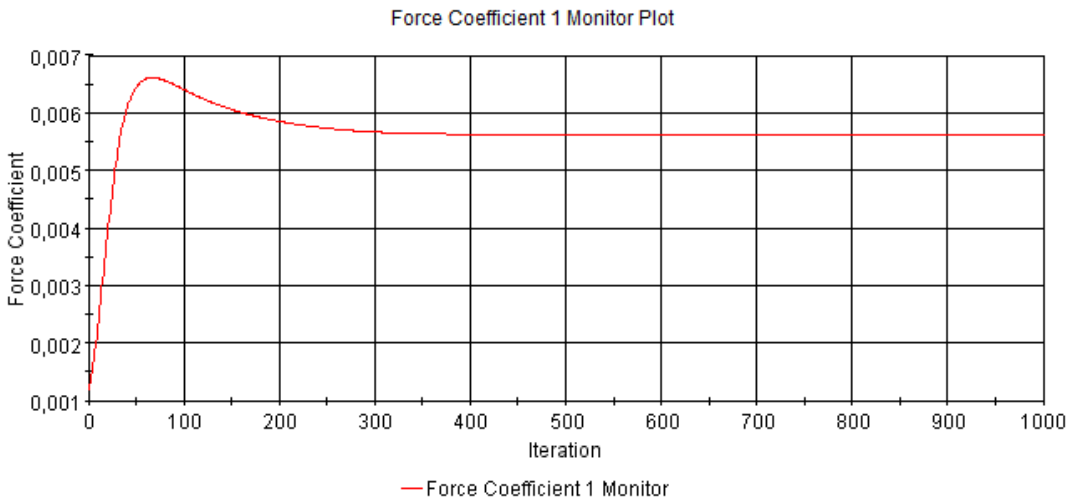
Şekil A. 22 : Pürüzlülük değeri k= 500 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



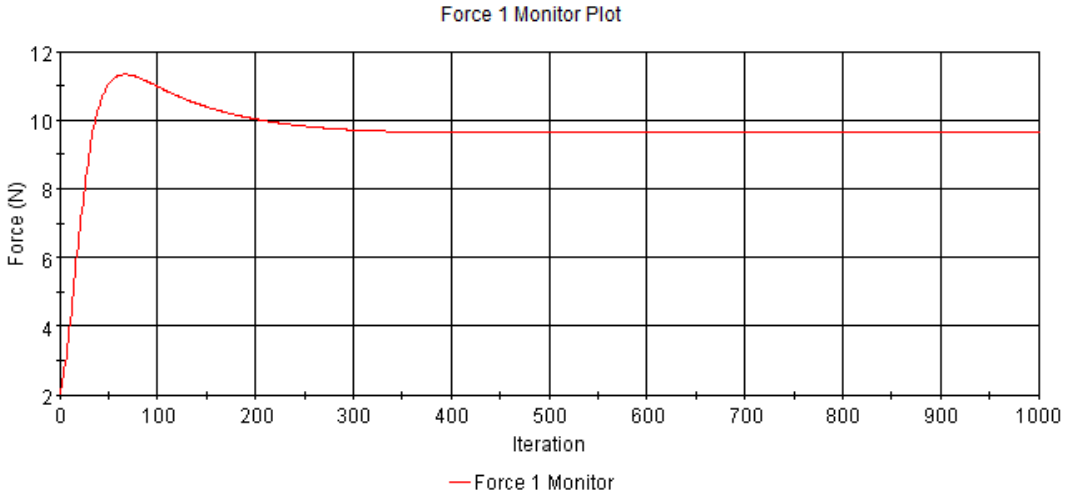
Şekil A. 23 : Pürüzlülük değeri k= 500 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



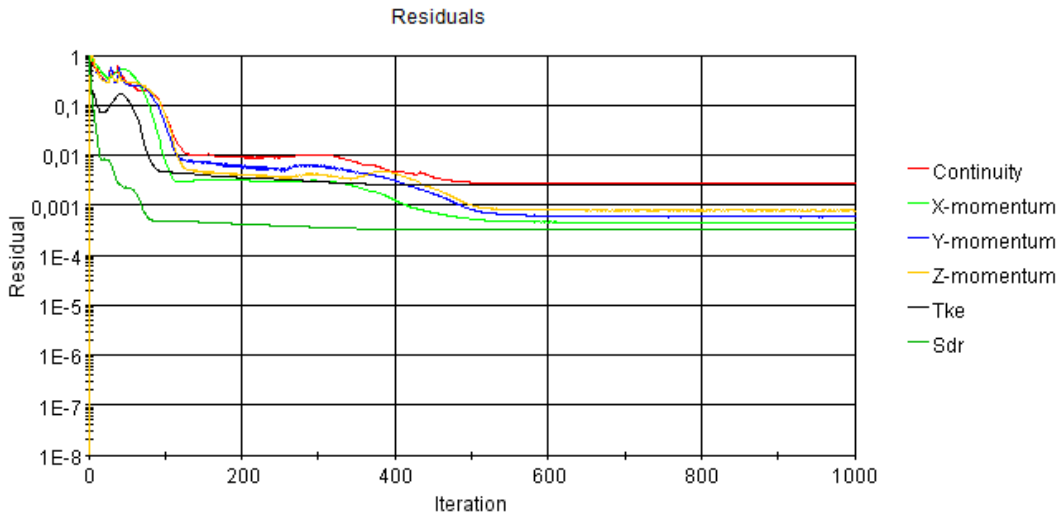
Şekil A. 24 : Pürüzlülük değeri k= 500 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



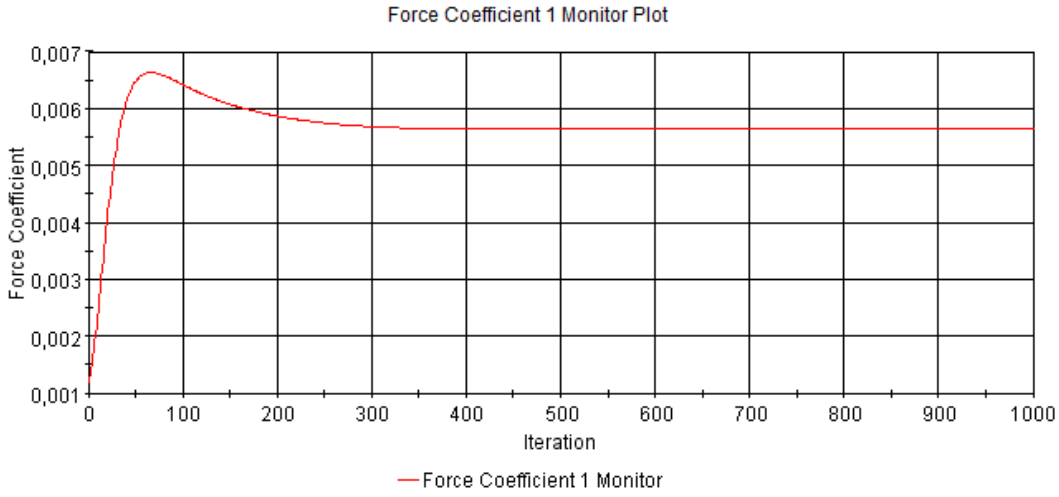
Şekil A. 25 : Pürüzlülük değeri k= 550 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



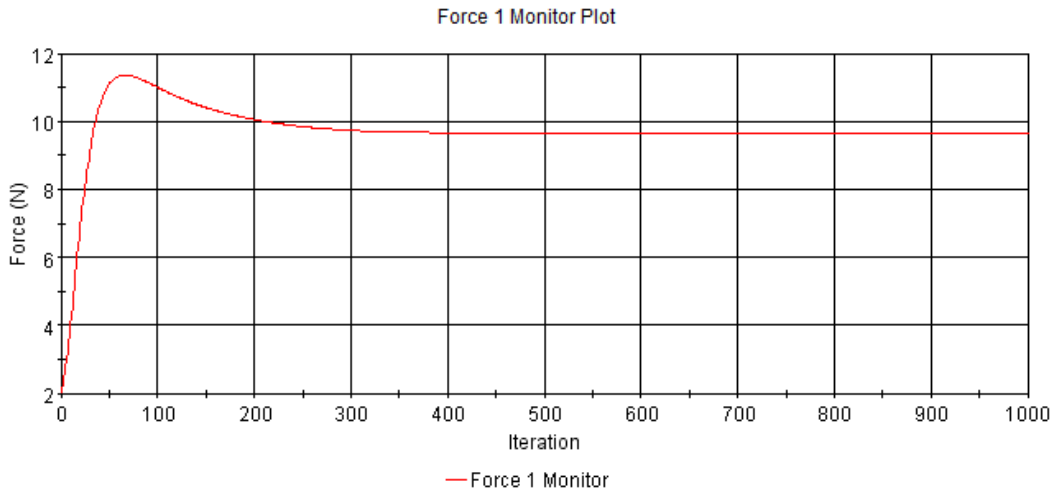
Şekil A. 26 : Pürüzlülük değeri k= 550 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



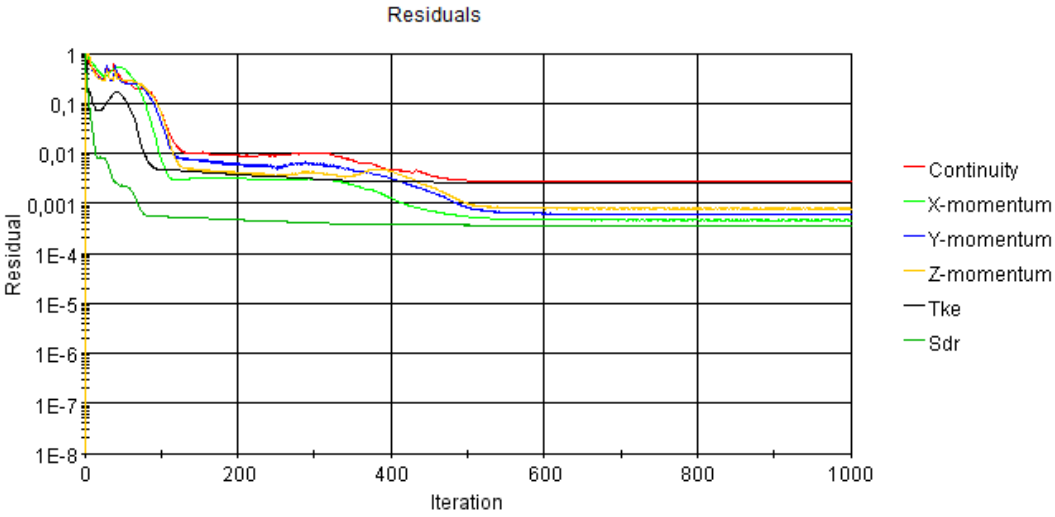
Şekil A. 27 : Pürüzlülük değeri k= 550 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



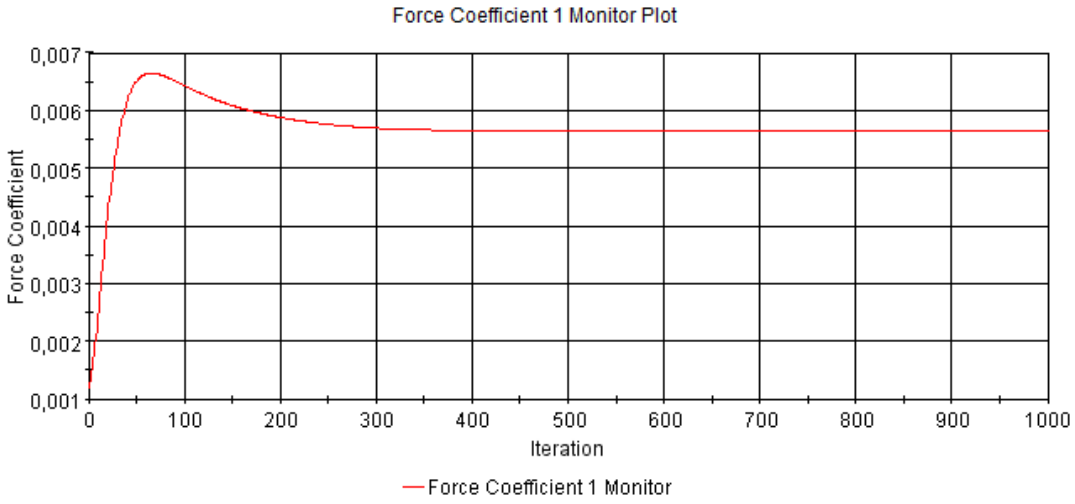
Şekil A. 28 : Pürüzlülük değeri k= 600 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



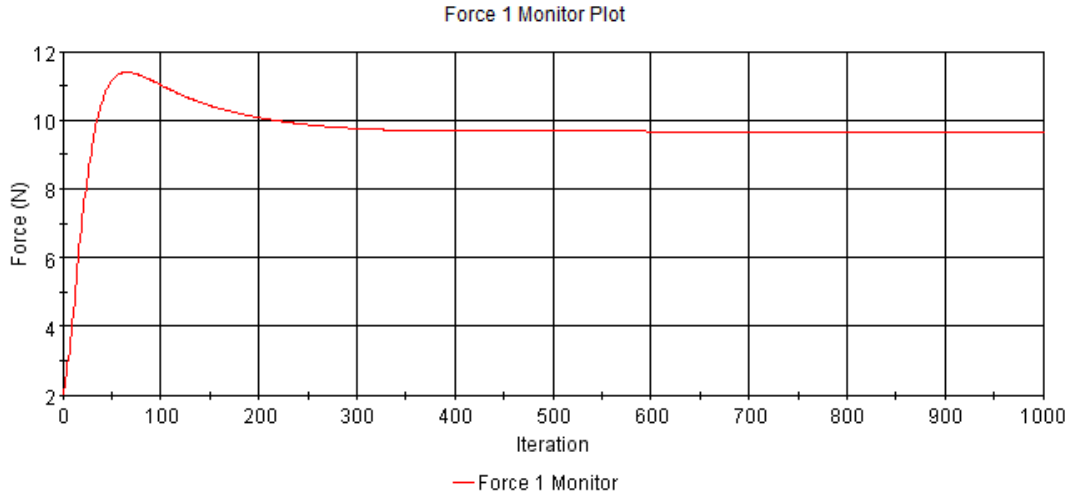
Şekil A. 29 : Pürüzlülük değeri k = 600 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



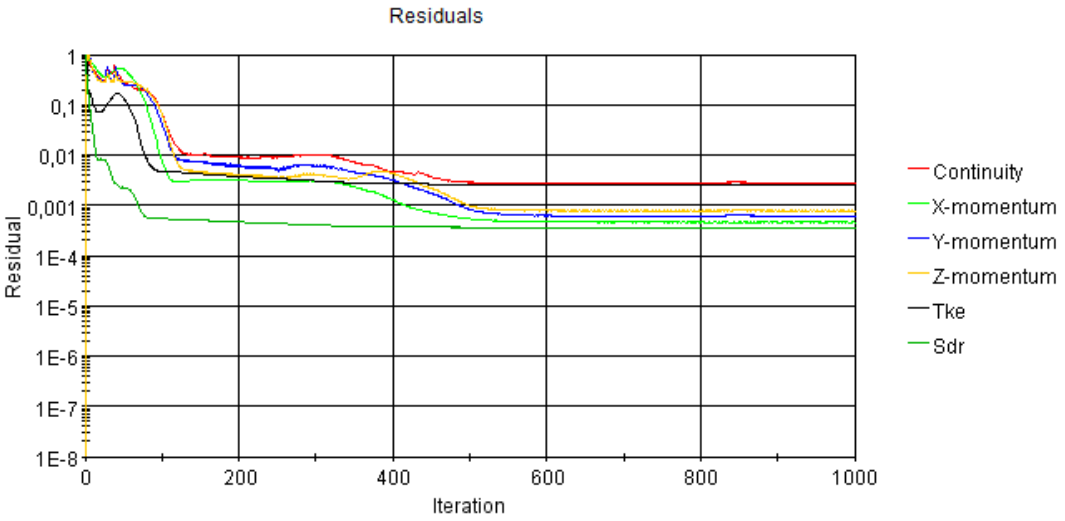
Şekil A. 30 : Pürüzlülük değeri k= 600 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



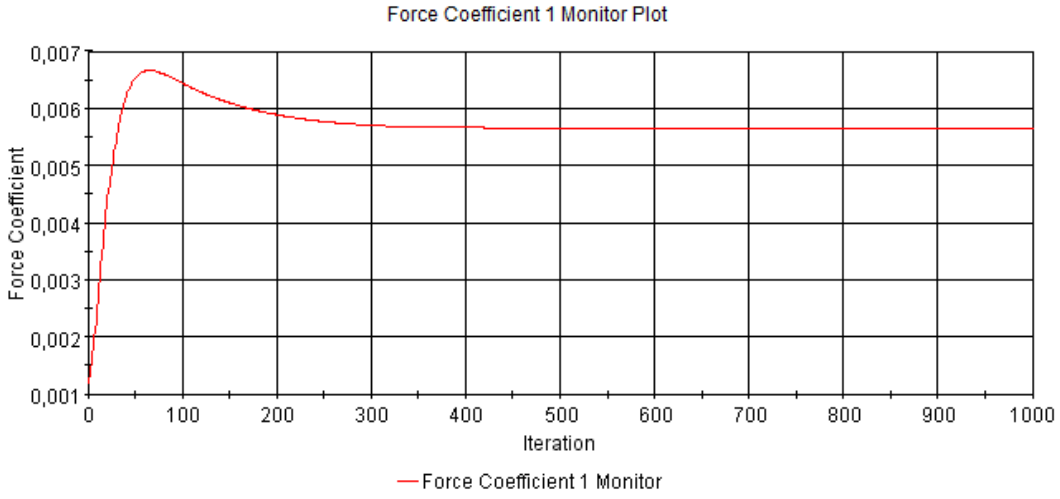
Şekil A. 31 : Pürüzlülük değeri k = 650 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



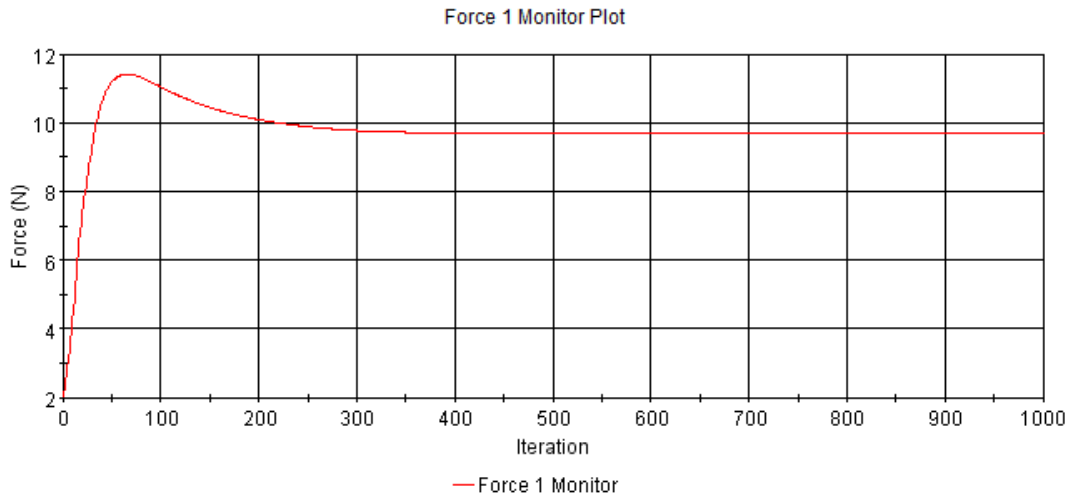
Şekil A. 32 : Pürüzlülük değeri k = 650 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



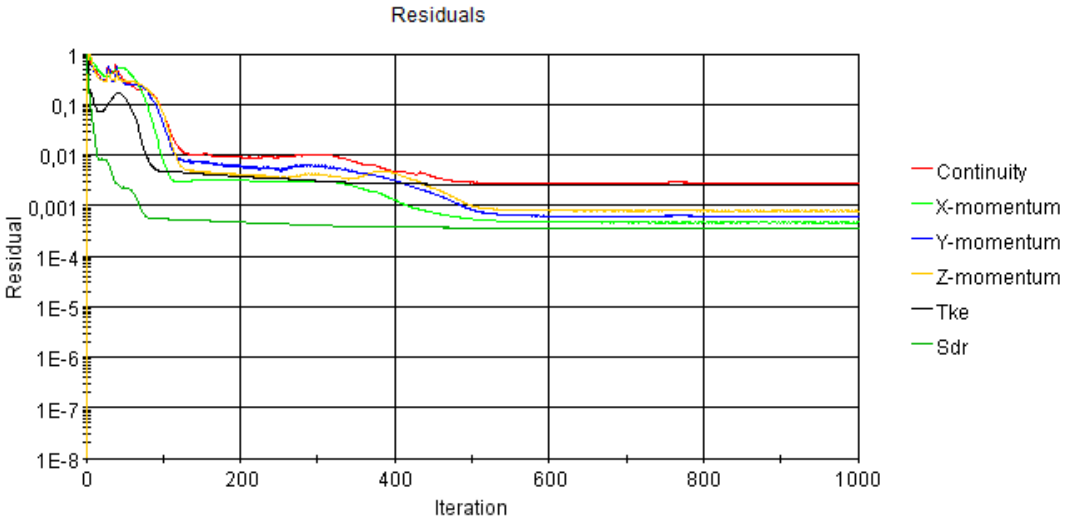
Şekil A. 33 : Pürüzlülük değeri k = 650 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



Şekil A. 34 : Pürüzlülük değeri k = 700 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.

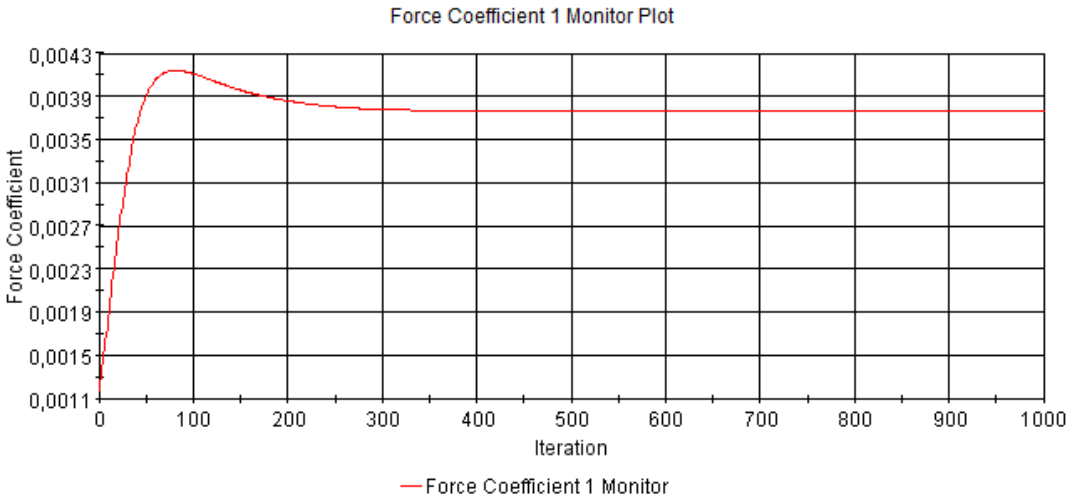


Şekil A. 35 : Pürüzlülük değeri k = 700 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.

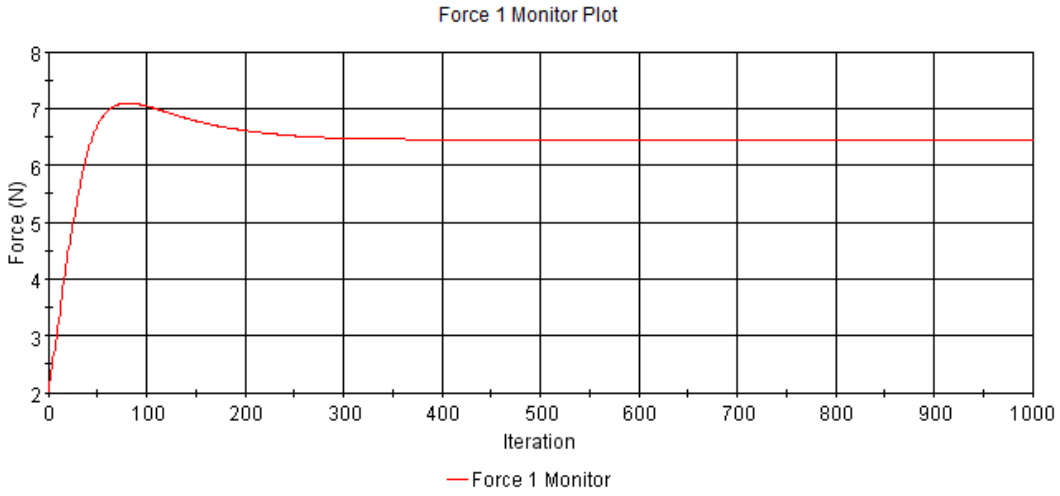


Şekil A. 36 : Pürüzlülük değeri k = 700 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.

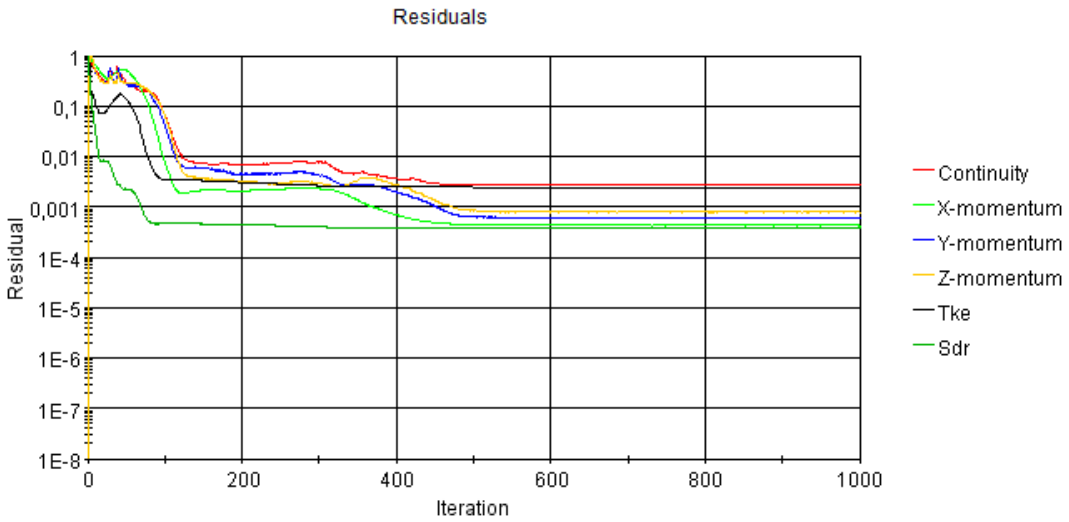
EK B



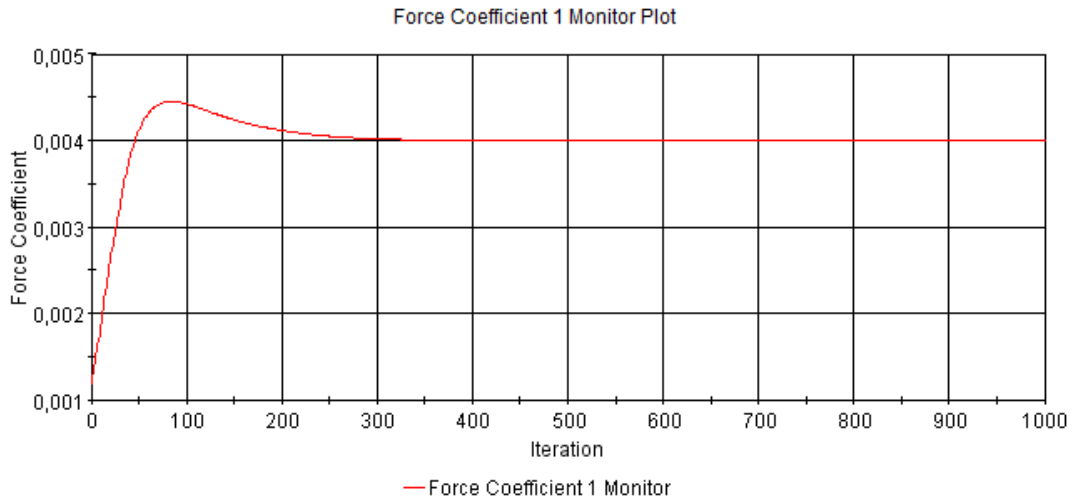
Şekil B. 1 : Pürüzlülük değeri k = 30 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



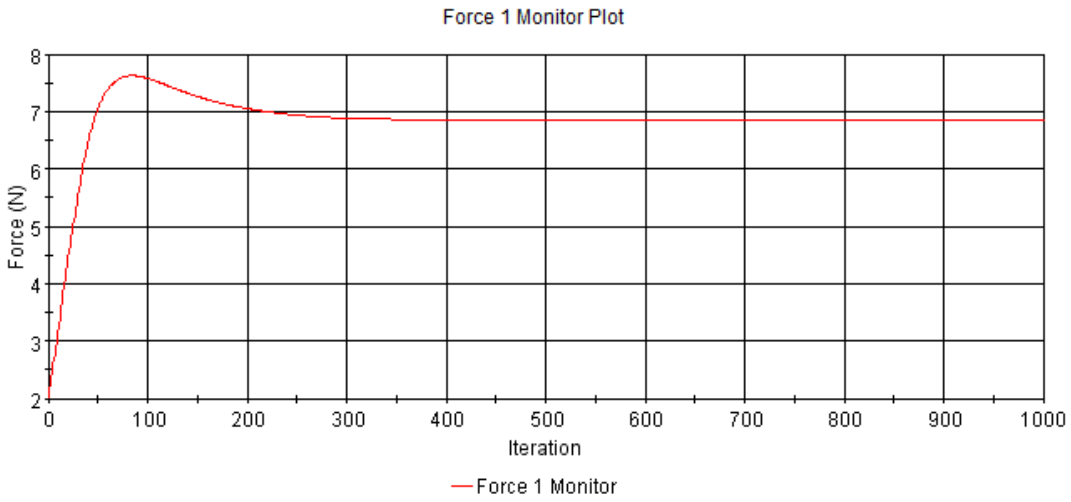
Şekil B. 2 : Pürüzlülük değeri k = 30 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



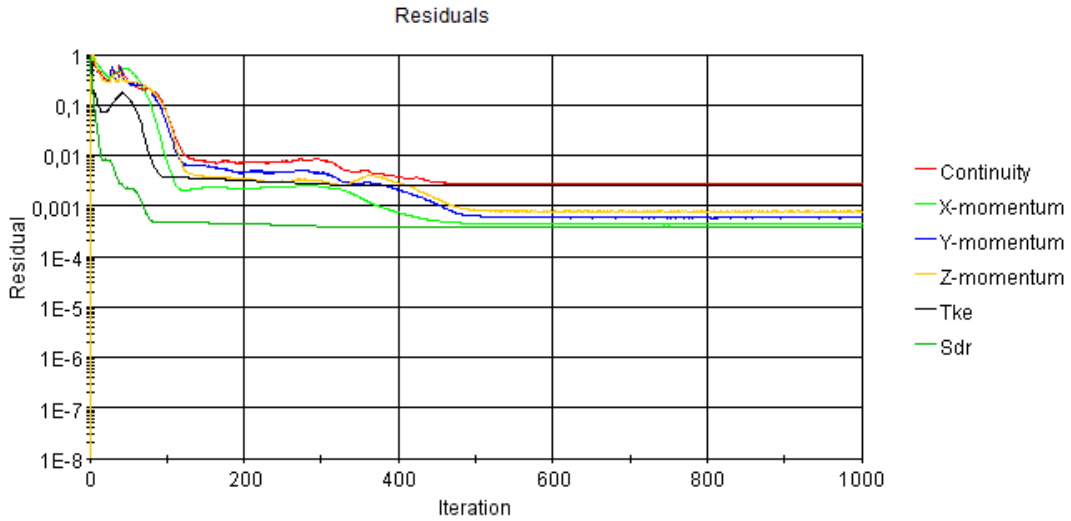
Şekil B. 3 : Pürüzlülük değeri k = 30 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



Şekil B. 4 : Pürüzlülük değeri k = 100 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



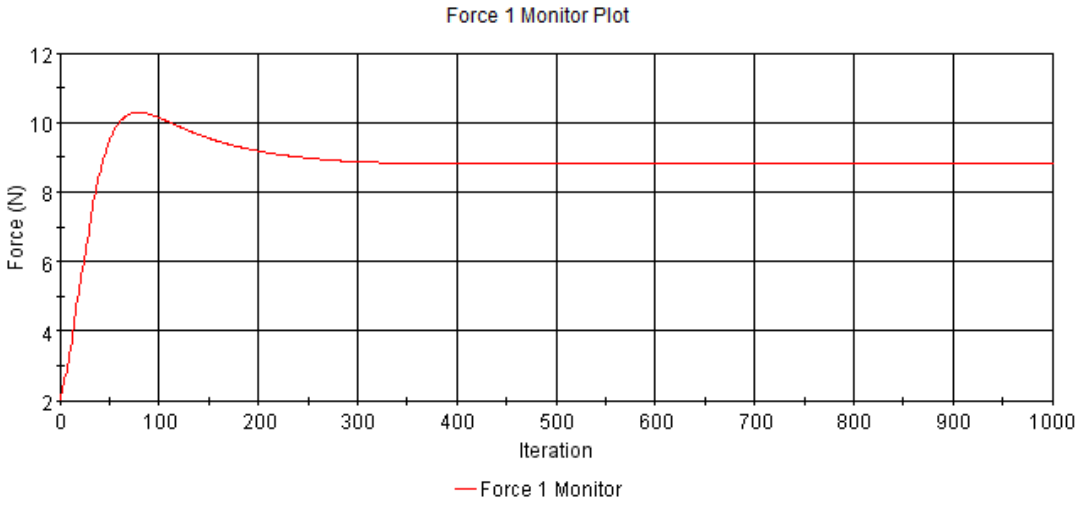
Şekil B. 5 : Pürüzlülük değeri k = 100 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



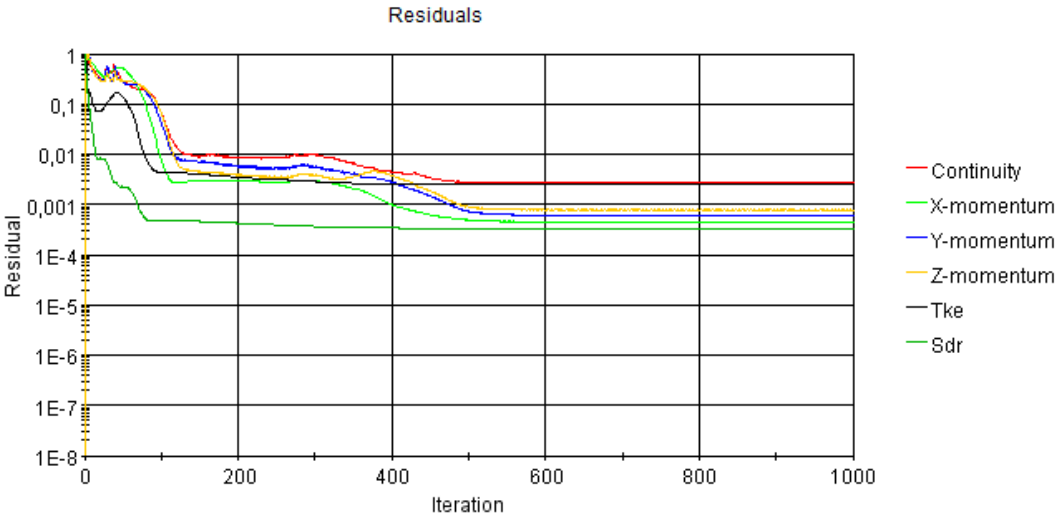
Şekil B. 6 : Pürüzlülük değeri k = 100 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



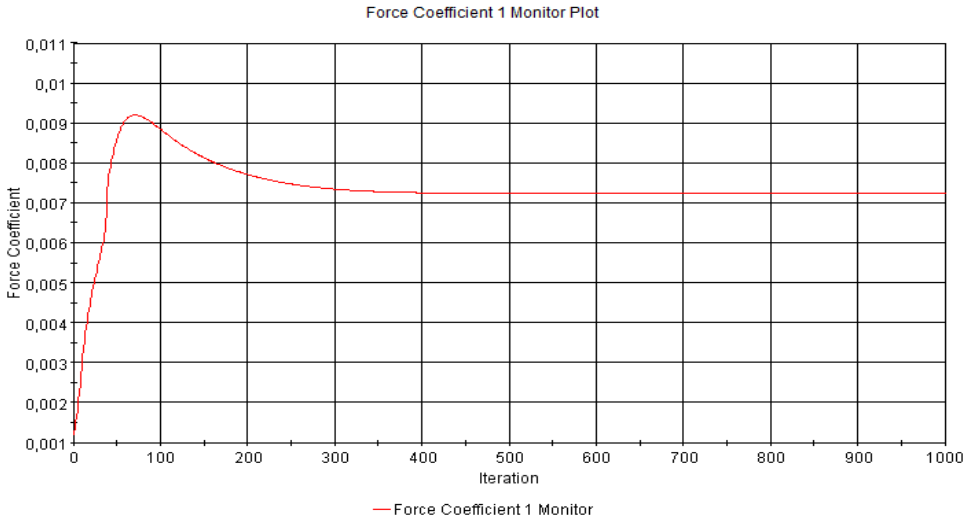
Şekil B. 7 : Pürüzlülük değeri k = 300 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



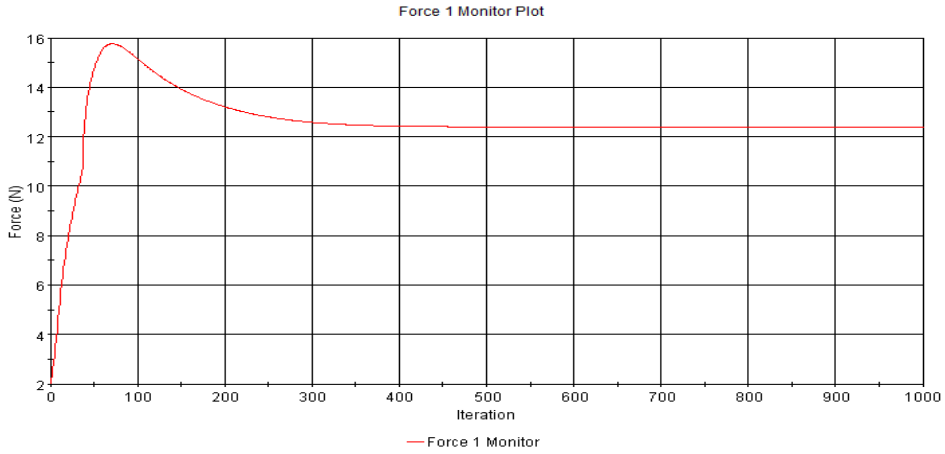
Şekil B. 8 : Pürüzlülük değeri k = 300 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



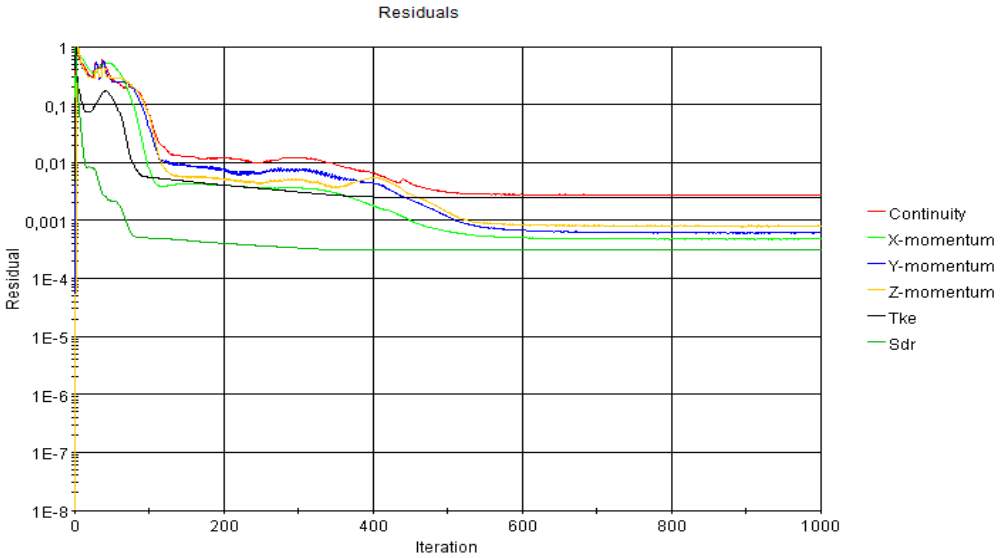
Şekil B. 9 : Pürüzlülük değeri k = 300 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



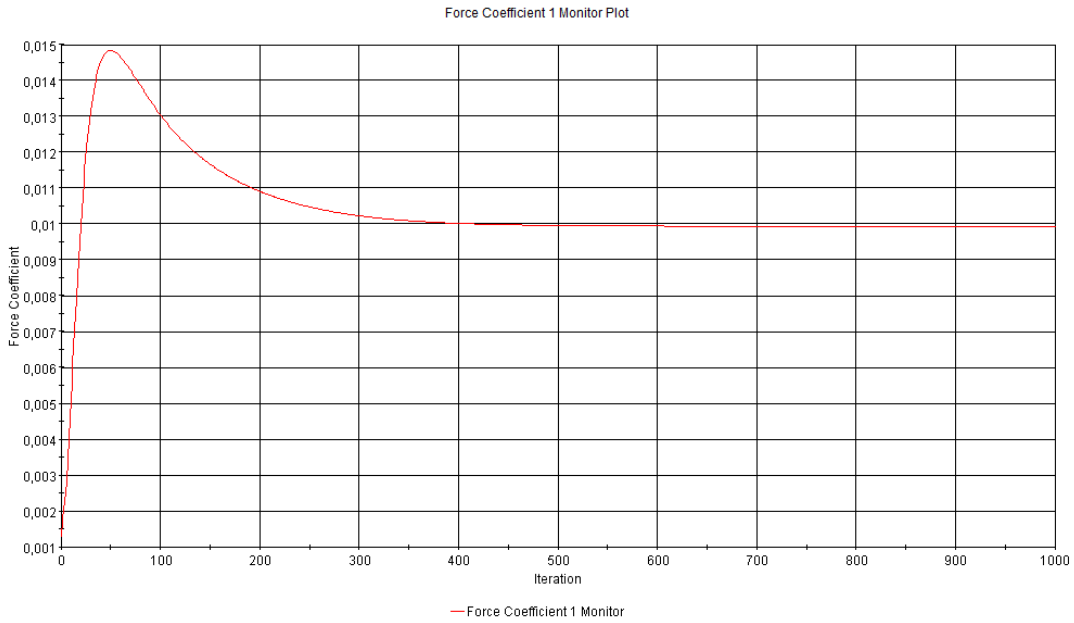
Şekil B. 10 : Pürüzlülük değeri k = 1000 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



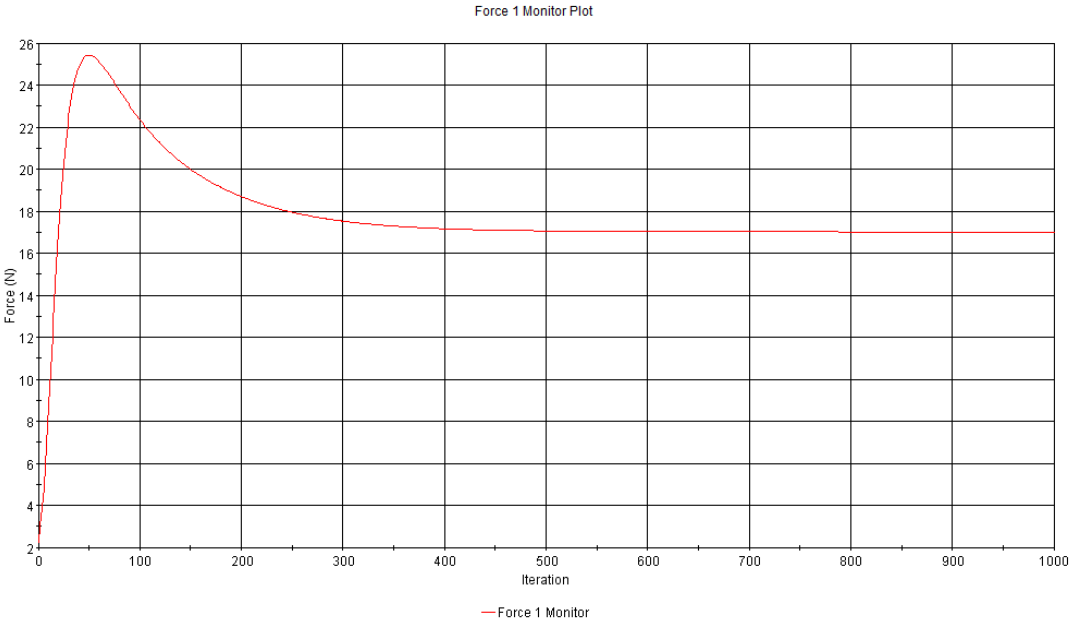
Şekil B. 11 : Pürüzlülük değeri k = 1000 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



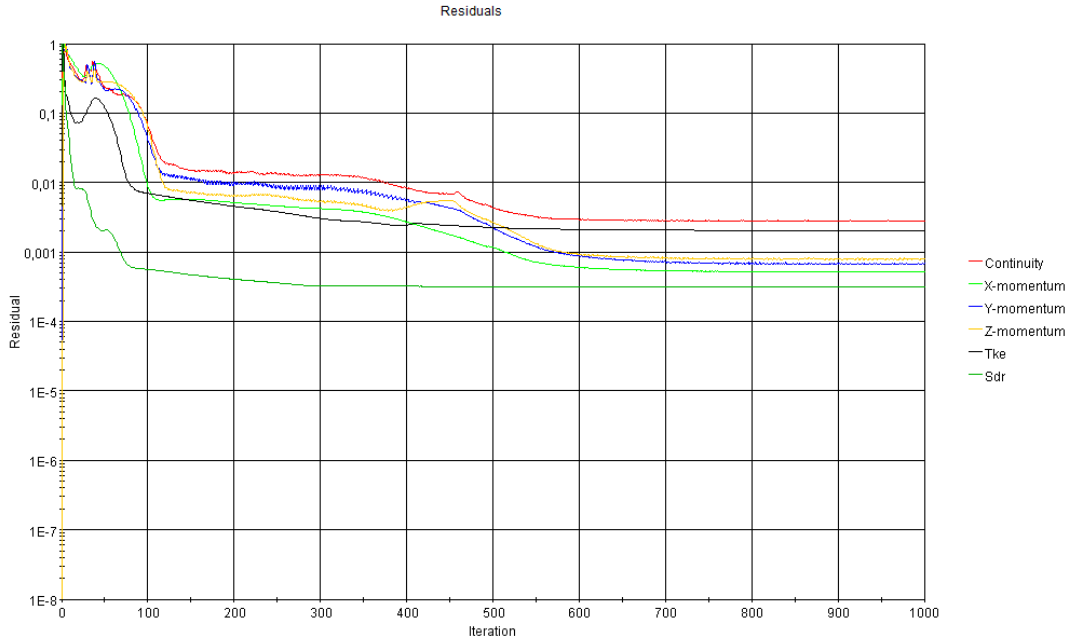
Şekil B. 12 : Pürüzlülük değeri k = 1000 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



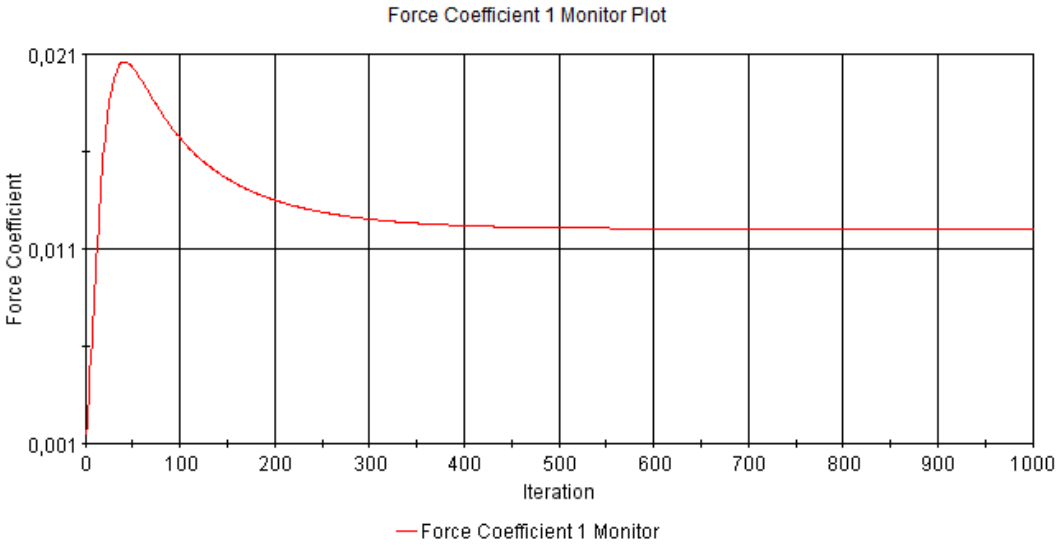
Şekil B. 13 : Pürüzlülük değeri k = 3000 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



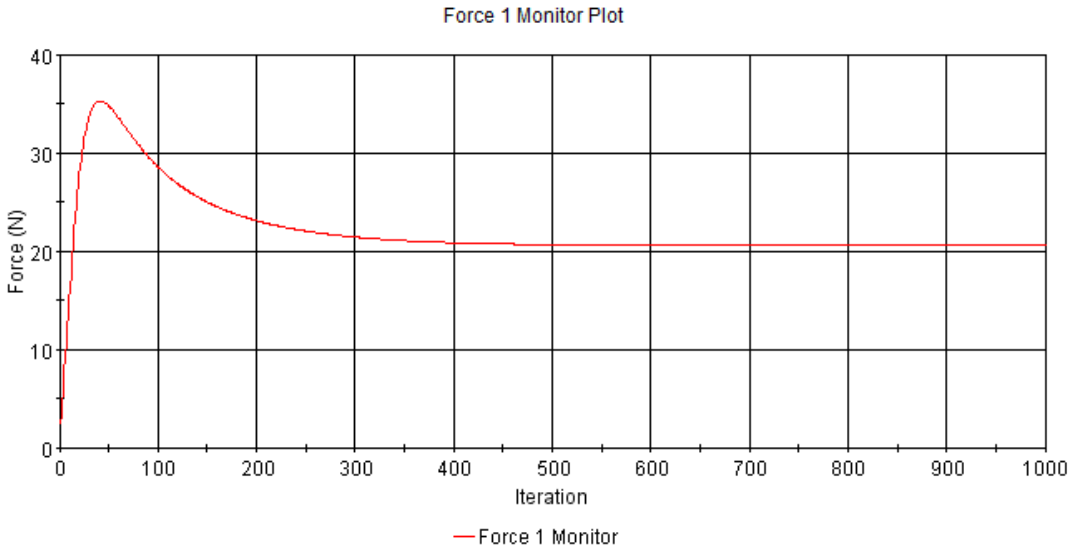
Şekil B. 14 : Pürüzlülük değeri k = 3000 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



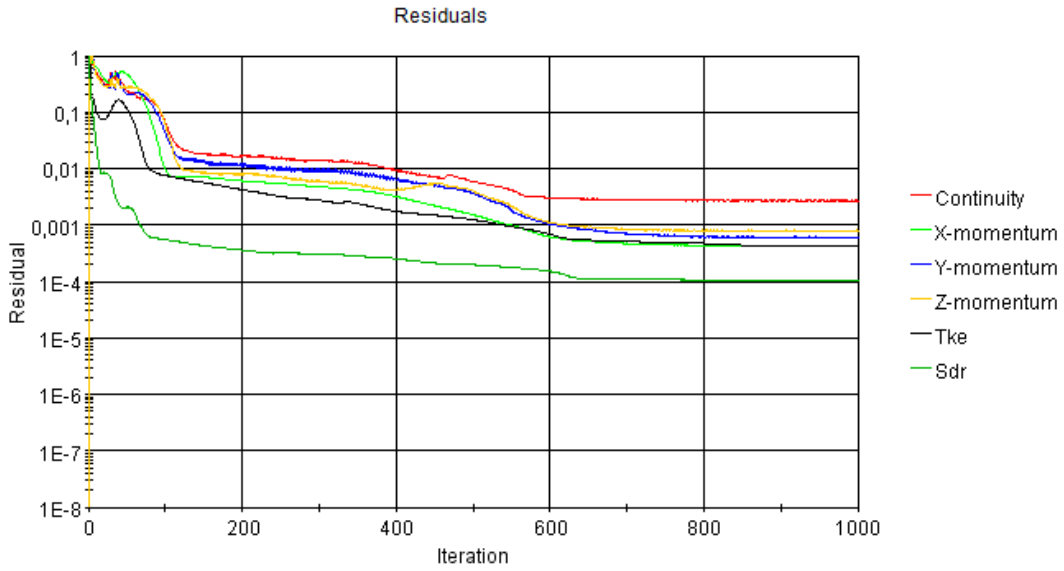
Şekil B. 15 : Pürüzlülük değeri k = 3000 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.



Şekil B. 16 : Pürüzlülük değeri k = 10000 μm olan plakanın sürtünme direnci katsayısı iterasyonları.



Şekil B. 17 : Pürüzlülük değeri k = 10000 μm olan plakanın sürtünme direnci iterasyonları.



Şekil B. 18 : Pürüzlülük değeri k = 10000 μm olan plakanın analiz artık sonuçları iterasyonları.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Yiğit Kemal DEMİREL

Doğum Yeri ve Tarihi: Osmaneli - 21.06.1986

Adres: İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi, İTÜ Ayazağa Yerleşkesi, 34469 Maslak / İSTANBUL

E-Posta: yigitkemaldemirel@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi

Yayın Listesi:

- Demirel, Y.K. ve Taylan, M., 2011. Experimental Determination of the Effect of Catamaran Characteristics on Roll Motion and Stability. *INT-NAM 2011, International Symposium on Naval Architecture and Maritime,* Istanbul/TURKEY.