



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**RÜZGAR TÜRBİN KANADI ÜZERİNDEKİ
AERODİNAMİK AKIŞA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Onur ERKAN
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Musa ÖZKAN**

**BİLECİK, 2020
Ref. No: 10339112**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**RÜZGAR TÜRBİN KANADI ÜZERİNDEKİ
AERODİNAMİK AKIŞA YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ
ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**Onur ERKAN
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Musa ÖZKAN**

BİLECİK, 2020



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
SEYH EDEBALI UNIVERSITY**

**Graduate School of Sciences
Department of Mechanical Engineering**

**INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SURFACE
ROUGHNESS ON AERODYNAMIC FLOW OVER A WIND
TURBINE BLADE**

**Onur ERKAN
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Asst. Prof. Dr. Musa OZKAN**

BİLECİK, 2020

TEŐEKKÖR

Bu tez çalıőmasının yazılmasında, yardımlarını ve görüşlerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Musa ÖZKAN'a katkı ve emekleri için teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışması ve tüm hayatım boyunca her zaman desteklerini hissettiğim sevgili annem, babam ve kardeşime sonsuz teşekkür ederim.

Son olarak çalıőmalarımnda ve yaşantımda beni sürekli motive eden hayat arkadaşım, sevgili eşime teşekkür ederim.

Onur ERKAN

11/ 05/ 2020

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

11/ 05/ 2020

Onur ERKAN

ÖZET

Bu tez çalışmasında rüzgar türbini kanat profillerinden olan NACA 63-415 kanat profili üzerindeki akış iki boyutlu olarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak modellenmiştir. İki boyutlu analizlerden yola çıkarak türbin performansının pürüzsüz ve pürüzlü kanat koşullarında incelenmesi bu çalışmanın ana amacını oluşturmuştur. Bu motivasyonla öncelikle pürüzsüz kanat yüzeyi için analizler yapılmış ve optimum hücum açısı belirlenmiştir. Pürüzsüz kanat üzerindeki akışın modellenmesi 10^5 ile 3×10^6 arasında 6 farklı Reynolds sayısında ve $0^\circ - 20^\circ$ hücum açısı aralığında yapılmıştır. Simülasyonlarda türbülanslı akış için, Spalart-Allmaras ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılmıştır. Pürüzsüz kanat için maksimum kaldırma/sürüklenme oranının meydana geldiği optimum hücum açısı aralığı $6^\circ - 8^\circ$ olarak belirlenmiştir. Pürüzlülüğün kanat aerodinamik performansına etkisini inceleyebilmek için optimum hücum açısı aralığında 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 ve 0.5 mm 5 farklı pürüzlülük yüksekliğinde çalışılmıştır. Pürüzlülük araştırmalarında TSST türbülans modeli kullanılmıştır. Optimum hücum açısını bulurken çalışılan Reynolds sayılarına ek olarak pürüzlülük incelemelerinde 2.5×10^5 'te de analizler gerçekleştirilmiştir. Numerik modellemenin sonucunda 10^5 Reynolds sayısında bu çalışmadaki tüm pürüzlülük yüksekliklerinin kanat aerodinamik performansını iyileştirdiği görülmüştür. Benzer şekilde 2.5×10^5 Reynolds sayısında da sadece 0.1 mm pürüzlülük yüksekliği kanat aerodinamik performansını olumlu etkilemiş, diğer pürüzlülük yüksekliklerinde ise negatif etki görülmüştür. Reynolds sayısı 5×10^5 ve üzerinde olduğunda ise bu tez kapsamında incelenen tüm pürüzlülük yüksekliklerinde kanat performansı üzerinde olumsuz etkiler meydana getirmiştir. Rüzgar türbinin performansına pürüzlülüğün etkisini görebilmek adına iki boyutlu elde edilen sonuçlar Kanat Elemanı Momentum Teorisi (KEMT) kullanılarak üç boyutlu hale getirilmiş ve türbin güç katsayısı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplar doğrultusunda 10^5 Reynolds sayısında güç katsayısında % 11'e varan artış görülürken, Reynolds sayısı arttıkça pürüzlülüğün türbin güç katsayısında %32'ye varan azalma ortaya çıkarabileceği sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar Enerjisi; HAD; Optimum Hücum Açısı; Pürüzlülük; Türbülans; KEMT.

ABSTRACT

In this study, two dimensional incompressible flow over the NACA 63-415 airfoil was modelled by Computational Fluid Dynamics (CFD) method. It was aimed to find out how smooth and rough surfaces affect wind turbine performance. Numerical simulations of smooth surface condition were carried out for 6 different Reynolds numbers $10^5 \leq Re \leq 3 \times 10^6$ and for angles of attack $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$. Spalart-Allmaras and SST k- ω turbulence models were used for solving turbulent flow. It is found out that the optimum angle of attack is between 6° and 8° . Then, the rough airfoil surface simulations were performed with roughness heights between 0.1 and 0.5 mm for the optimum angles of attack. The transition SST (TSST) turbulence model was used for the rough surface simulations. The analyses of rough conditions were carried out for 7 different Reynolds numbers by adding 2.5×10^5 . Results show that surface roughness can improve aerodynamic performance of the airfoil for $Re = 10^5$. Similarly, 0.1 mm roughness height enhanced aerodynamic performance for $Re = 2.5 \times 10^5$. However, airfoil performance decreased with increasing surface roughness height for $Re = 2.5 \times 10^5$. All surface roughness heights which were studied in this thesis negatively affected airfoil performance for the Reynolds number greater than 5×10^5 . Blade Element Momentum (BEM) Theory was used to determine wind turbine power coefficient under the smooth and rough surface conditions. Results showed that the wind turbine power coefficient increased approximately 11% with increasing roughness height for $Re = 10^5$. Otherwise, the power coefficient decreased about 32% depending on the roughness height for $5 \times 10^5 \leq Re \leq 3 \times 10^6$.

Key Words: Wind energy; CFD; Optimum Angle of Attack; Surface Roughness; Turbulence; BEM.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR	
BEYANNAME	
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİLLER DİZİNİ	v
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. RÜZGAR ENERJİSİ	3
2.1. Yenilenebilir Enerji	5
2.2. Rüzgar Enerjisi Tarihsel Gelişimi	6
2.3. Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi	8
2.4. Rüzgar Türbinleri	10
2.4.1. Dikey Eksenli Rüzgar Türbinleri	11
2.4.2. Yatay Eksenli Rüzgar Türbinleri	11
3. RÜZGAR TÜRBİNİ AERODİNAMİĞİ	13
3.1. Sürüklenme Katsayısı	14
3.2. Kaldırma Katsayısı	15
3.3. Kanat (Pala) Elemanı Momentum Teorisi	17
3.3.1. Rotor Diski Kavramı	17
3.3.2. Betz Limiti	19
3.3.3. Kanat Elemanı Teorisi	20
3.3.4. Kanat (Pala) Elemanı Momentum Teorisi	22
4. LİTERATÜR TARAMASI	25
4.1. Toz birikimi	25
4.2. Böcek birikimi	28
4.3. Buzlanma	29

4.4. Aşınma	31
4.5. Diğer Pürüzlülük Çalışmaları	32
5. NUMERİK ÇALIŞMALAR	37
5.1. Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi	37
5.2. Numerik Model	39
5.2.1. Hesaplama bölgesinin oluşturulması	40
5.2.2. Ağ yapısının oluşturulması	42
5.2.3. Akışın çözümlenmesi.....	44
5.2.3.1. Spalart-Allmaras türbülans modeli	45
5.2.3.2. SST k- ω türbülans modeli.....	46
5.2.3.3. TSST türbülans modeli	47
5.2.3.4. Sınır koşulları	48
6. BULGULAR	49
6.1. Ağ Bağımsızlık Testi	49
6.2. Sonuçların Doğrulanması	50
6.3. Optimum Hücüm Açısının Belirlenmesi.....	54
6.4. Pürüzlülük Uygulaması.....	61
6.5. Türbin Güç Katsayısı Hesabı.....	131
7. SONUÇLAR.....	134
KAYNAKLAR	136
ÖZ GEÇMİŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 2.1. Dünya üzerindeki rüzgar hareket yönleri	3
Şekil 2.2. Rüzgar hareketleri üzerinde Coriolis etkisi.....	4
Şekil 2.3. Dünya’da 2016 yılında enerji kaynakları kullanımı	5
Şekil 2.4. Dünya’da 2007-2017 yıllarında yenilenebilir enerji kullanımı.....	5
Şekil 2.5. Türkiye’de yenilenebilir enerji kurulu gücü gelişimi	6
Şekil 2.6. Vestas üretici firmasının V164 model 8 MW güce sahip ilk prototipi	7
Şekil 2.7. Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi.....	8
Şekil 2.8. Rüzgar enerjisi küresel kapasitesi ve yıllık artışı.....	8
Şekil 2.9. Rüzgar enerjisinin ülkere göre küresel kapasitesi ve yıllık artışı	9
Şekil 2.10. Türkiye’de yıllara göre rüzgar enerjisi kurulu gücü gelişimi	9
Şekil 2.11. Türkiye’de 100 m yükseklikteki rüzgar hızı haritası	10
Şekil 2.12. Türkiye’de 100 m yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu haritası	10
Şekil 2.13. Üç kanatlı YERT elemanları.....	12
Şekil 3.1. İki boyutlu kanat üzerindeki akım çizgilerinin şematik gösterimi.....	13
Şekil 3.2. İki boyutlu kanat üzerindeki aerodinamik kuvvetler	14
Şekil 3.3. Dönen silindir üzerinde akış	16
Şekil 3.4. Bir rotor diski üzerinde enerji çekişi	17
Şekil 3.5. Bir rüzgar türbini ve üzerindeki kanat elemanı.....	21
Şekil 3.6. Bir rüzgar türbin kanadı üzerine etki eden kuvvetler ve oluşan hızlar	21
Şekil 4.1. Toz birikiminin türbin çıkış gücüne etkisi.....	26
Şekil 4.3. Pürüzlülük konumunun C_L üzerindeki etkisi.....	27
Şekil 4.4. Buzlanmanın sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi.....	30
Şekil 4.5. Buzlanmanın rüzgar türbini performansı üzerindeki etkisi	30
Şekil 4.6. Pürüzlülük yüksekliğinin C_L ve C_D üzerindeki etkisi	33
Şekil 5.1. Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları.....	42
Şekil 5.2. Analizlerde kullanılan ağ yapısı	43
Şekil 6.1. Ağ bağımsızlık testi	49
Şekil 6.2. Abbott ve Doenhoff’a göre kaldırma katsayısının doğrulanması	50
Şekil 6.3. Vilalpando vd.’lerine göre kaldırma katsayısının doğrulanması	51
Şekil 6.4. Vilalpando vd.’lerine göre sürüklenme katsayısının doğrulanması.....	52
Şekil 6.5. Bak vd.’lerine göre $\alpha = 0^\circ$ için basınç katsayılarının doğrulanması	52
Şekil 6.6. Bak vd.’lerine göre $\alpha = 8^\circ$ için basınç katsayılarının doğrulanması	53

Şekil 6.7.	Bak ve Fuglsang'a göre $\alpha = 6^\circ$ 'de basınç katsayılarının doğrulanması	53
Şekil 6.8.	Spalart-Allmaras için kaldırma katsayısı değerleri	55
Şekil 6.9.	SST k- ω için kaldırma katsayısı değerleri	56
Şekil 6.10.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te elde edilen akım çizgileri	56
Şekil 6.11.	Spalart-Allmaras için sürüklenme katsayısı değerleri	57
Şekil 6.12.	SST k- ω için sürüklenme katsayısı değerleri	58
Şekil 6.13.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 5^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri.....	58
Şekil 6.14.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 7^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri.....	59
Şekil 6.15.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 10^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri	59
Şekil 6.16.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 14^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri	59
Şekil 6.17.	Spalart-Allmaras ve SST k- ω için tüm Re sayılarında C_L/C_D oranları.....	60
Şekil 6.18.	Spalart-Allmaras ve SST k- ω için optimum hücum açıları	61
Şekil 6.19.	$Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kaldırma katsayıları.....	62
Şekil 6.20.	$Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin sürüklenme katsayıları.....	63
Şekil 6.21.	$Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları	63
Şekil 6.22.	$Re = 10^5$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükteki akım çizgileri.....	64
Şekil 6.23.	$Re = 10^5$ için 0.2 mm ve 0.3 mm pürüzlülükteki akım çizgileri.....	65
Şekil 6.24.	$Re = 10^5$ için 0.4 mm ve 0.5 mm pürüzlülükteki akım çizgileri.....	66
Şekil 6.25.	$Re = 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.....	67
Şekil 6.26.	$Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları	68
Şekil 6.27.	$Re = 10^5$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları	69
Şekil 6.28.	$Re = 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları	70
Şekil 6.29.	$Re = 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları	71
Şekil 6.30.	$Re = 5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kaldırma katsayıları	72
Şekil 6.31.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin sürüklenme katsayıları	72
Şekil 6.32.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları	73
Şekil 6.33.	$Re = 5 \times 10^5$ için pürüzsüz yüzey üzerindeki akım çizgileri	74
Şekil 6.34.	$Re = 5 \times 10^5$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	74
Şekil 6.35.	$Re = 5 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	75
Şekil 6.36.	$Re = 5 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.....	76
Şekil 6.37.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü durumda kayma gerilmeleri.....	77
Şekil 6.38.	$Re = 5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları	78
Şekil 6.39.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları	79
Şekil 6.40.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları	80
Şekil 6.41.	$Re = 5 \times 10^5$ 'te 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları	81

Şekil 6.42. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri	82
Şekil 6.43. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri.....	83
Şekil 6.44. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları	83
Şekil 6.45. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz yüzey üzerinde oluşan akım çizgileri	84
Şekil 6.46. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te 0.1 mm pürüzlülük için oluşan akım çizgileri	84
Şekil 6.47. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükteki akım çizgileri	85
Şekil 6.48. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükteki akım çizgileri	86
Şekil 6.49. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri	87
Şekil 6.50. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları	88
Şekil 6.51. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımları	89
Şekil 6.52. $Re = 2.5 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.....	90
Şekil 6.53. $Re = 2.5 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.....	91
Şekil 6.54. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri.....	92
Şekil 6.55. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri	92
Şekil 6.56. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları	93
Şekil 6.57. $Re = 7 \times 10^5$ 'te pürüzsüz kanadın üst yüzeyinde oluşan akım çizgileri.....	93
Şekil 6.58. $Re = 7 \times 10^5$ 'te pürüzsüz kanadın alt yüzeyinde oluşan akım çizgileri	94
Şekil 6.59. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	94
Şekil 6.60. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	95
Şekil 6.61. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.....	96
Şekil 6.62. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri	97
Şekil 6.63. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.....	98
Şekil 6.64. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.....	99
Şekil 6.65. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları	100
Şekil 6.66. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları	101
Şekil 6.67. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kaldırma katsayıları.....	101
Şekil 6.68. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin sürüklenme katsayıları.....	102
Şekil 6.69. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları	102
Şekil 6.70. $Re = 10^6$ için pürüzsüz kanadın üst yüzeyinde oluşan akım çizgileri.....	103
Şekil 6.71. $Re = 10^6$ için pürüzsüz kanadın alt yüzeyinde oluşan akım çizgileri	103
Şekil 6.72. $Re = 10^6$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	104
Şekil 6.73. $Re = 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	105
Şekil 6.74. $Re = 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	106
Şekil 6.75. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.....	107
Şekil 6.76. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları	108

Şekil 6.77. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.....	109
Şekil 6.78. $Re = 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları	110
Şekil 6.79. $Re = 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları	111
Şekil 6.80. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri	112
Şekil 6.81. $Re = 1.6 \times 10^6$ 'da pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri	112
Şekil 6.82. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları	113
Şekil 6.83. $Re = 1.6 \times 10^6$ 'da pürüzsüz kanat üst yüzeyinde oluşan akım çizgileri.....	113
Şekil 6.84. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.....	114
Şekil 6.85. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	115
Şekil 6.86. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri	116
Şekil 6.87. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.....	117
Şekil 6.88. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları	118
Şekil 6.89. $Re = 1.6 \times 10^6$ 'da pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımı	119
Şekil 6.90. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.....	120
Şekil 6.91. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.....	121
Şekil 6.92. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri.....	122
Şekil 6.93. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri	122
Şekil 6.94. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları	123
Şekil 6.95. $Re = 3 \times 10^6$ 'da pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte akım çizgileri.....	124
Şekil 6.96. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.....	125
Şekil 6.97. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.....	125
Şekil 6.98. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri	126
Şekil 6.99. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları	127
Şekil 6.100. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.....	128
Şekil 6.101. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları	129
Şekil 6.102. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları	130
Şekil 6.103. Türbin güç katsayısının $\alpha = 6^\circ$ 'de pürüzlülük yüksekliği ile değişimi.....	132
Şekil 6.104. Türbin güç katsayısının $\alpha = 7^\circ$ 'de pürüzlülük yüksekliği ile değişimi.....	133
Şekil 6.105. Türbin güç katsayısının $\alpha = 8^\circ$ 'de pürüzlülük yüksekliği ile değişimi.....	133

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa No
Çizelge 2.1. Kanatlara göre türbinlerin karşılaştırılması	12
Çizelge 5.1. HAD analizlerinde çalışılan parametreler.....	38
Çizelge 5.2. NACA 63-415 kanat profilinin koordinat noktaları	41
Çizelge 5.3. Ağ yapısının özellikleri.....	43
Çizelge 6.1. Analizlerden elde edilen optimum hücum açısı ve C_L/C_D değerleri.....	61

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
a	: Eksenel akış indüksiyon faktörü
a'	: Teğetsel akış indüksiyon faktörü
A_D	: Kesit alan (m^2)
B	: Kanat sayısı
c	: Veter uzunluğu (m)
C_B	: Basınç katsayısı
C_D	: Sürükleme katsayısı
C_L	: Kaldırma katsayısı
C_P	: Güç katsayısı
d	: Çap (m)
D	: Sürükleme kuvveti (N)
D_ω	: Çapraz yayılım
F	: Bileşke kuvvet (N)
F_{itki}	: İtke kuvveti (N)
f_{v1}	: Viskoz sönümlenme fonksiyonu
G_k	: Türbülans kinetik enerjisinin terimi
G_v	: Türbülans viskozitesi üretim terimi
G_ω	: Spesifik yayılma oranı üretim terimi
h	: Pürüzlülük yüksekliği (mm)
k	: Türbülans kinetik enerjisi (m^2/s^2)
l	: Plaka uzunluğu (m)
L	: Kaldırma kuvveti (N)
L_{moment}	: Açısal momentum değişimi ($kg.m^2/s$)
M	: Moment ($N.m$)
p	: Basınç (Pa)
p_∞	: Serbet akış hava basıncı (Pa)
p_D^+	: Tahrik diski üzerinde gelen akıştaki hava basıncı (Pa)
p_D^-	: Tahrik diski üzerinden geçmiş akıştaki hava basıncı (Pa)
P	: Güç (W)

$P_{t\text{ürbin}}$: Türbin gücü (W)
P_{teorik}	: Teorik türbin gücü (W)
Q	: Tork ($N.m$)
r	: Bölgesel yarıçap (m)
R	: Yarıçap (m)
Re	: Reynolds sayısı
\tilde{Re}_θ	: Momentum kalınlığı Reynolds sayısı
$S_{\tilde{v}}, S_k, S_\omega$: Kullanıcı tanımlı kaynak terimi
u_τ	: Duvar sürtünme hızı (m/s)
u_i	: Hızın x bileşeni (m/s)
u_j	: Hızın y bileşeni (m/s)
V	: Akışkan hızı (m/s)
V_∞	: Hava hızı (m/s)
V_D	: Disk üzerinden geçen hava hızı (m/s)
V_W	: Atmosferik rejim hava hızı (m/s)
Y_k	: Türbülans kinetik enerjisi yayılımı
Y_ν	: Türbülans viskozitesi bozunum terimi
Y_ω	: Spesifik yayılma oranı yayılımı
W	: Bağlı rüzgar hızı (m/s)
x_i	: x yönü
x_j	: y yönü
x/c	: Boyutsuz kanat veter uzunluğu
y/c	: Boyutsuz kanat kalınlığı
y	: Duvardan olan dik uzaklık (m)
y^+	: Boyutsuz duvar dik uzaklığı
α	: Hücum açısı ($^\circ$)
α_{opt}	: Optimum hücum açısı ($^\circ$)
β	: Hatve (Büküm) açısı ($^\circ$)
ϕ	: Rüzgar geliş açısı ($^\circ$)
ρ	: Yoğunluk (kg/m^3)
Ω	: Açısal hız (rad/s)

μ	: Dinamik viskozite ($kg/m.s$)
μ_t	: Türbülans viskozitesi ($kg/m.s$)
τ	: Kayma gerilmesi (Pa)
$\tilde{\nu}$: Modifiye edilmiş türbülans viskozitesi ($kg/m.s$)
Γ	: Çizgi integrali
Γ_k, Γ_ω	: Etkin yayılma gücü
δr	: Diferansiyel eleman kalınlığı
λ	: Kanat uç hız oranı
σ	: Katılık
γ	: Aralıklılık
ω	: Spesifik yayılma oranı ($1/s$)
ε	: Türbülans yayılım oranı (m^2/s^3)
$-\rho \overline{u_i' u_j'}$: Reynolds gerilmeleri

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BEM	: Blade Element Momentum
DERT	: Dikey eksenli rüzgar türbini
DNS	: Direct Numerical Simulation
EERE	: Office of Energy Efficiency & Renewable Energy
ETKB	: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
HAD	: Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
IEA	: International Energy Agency
LES	: Large Eddy Simulation
MGM	: Meteoroloji Genel Müdürlüğü
NACA	: National Advisory Committee for Aeronautics
REN21	: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
SST	: Shear Stress Transport
TSST	: Transition Shear Stress Transport
YEGM	: Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü
YERT	: Yatay eksenli rüzgar türbini

1. GİRİŞ

Enerji, en küçükten en büyüğe canlı veya cansız varlıkların iş yapabilme kabiliyetlerini ifade etmektedir. Enerjinin birden fazla formu mevcuttur. Bu enerji formları potansiyel enerji, kinetik enerjisi, ısı enerjisi, elektrik enerjisi, ışık enerjisi, kimyasal enerji, nükleer enerji ve ses enerjisi olarak ifade edilebilir. Hayatın olmazsa olmazı enerji, dönüşebildiği bu çeşitleri sayesinde her ihtiyaca yönelik kullanılabilmiştir.

Bilim ve teknoloji 18. yüzyılda başlayan sanayi devrimi ile tırmanışa geçtiğinde enerjiye olan ihtiyaç da aynı oranda artışa geçmiştir. Dördüncü sanayi devrimi olarak da adlandırılan Endüstri 4.0 çağının yaşandığı günümüzde ise enerji ihtiyacı en tepe noktasına ulaşmıştır. Yaşanan tüm bu gelişimler geçmişten bu yana dünya üzerinde var olan enerji rekabetini daha da şiddetli hale getirmiştir. Çünkü başlangıçta gayet yeterli ve kullanışlı olan enerji kaynakları zaman içerisinde azalmıştır. Ayrıca enerjide yaşanan rekabetin yanı sıra çevre kirliliği ve iklim değişikliği gibi çok ciddi sorunlar da ortaya çıkmıştır.

Fosil yakıtlar olarak bilinen enerji kaynakları belirtildiği üzere giderek tükenmiş ve yerine aynı cins yakıtın yeniden gelmesi binlerce yıl aldığından günümüzde de hızla tükenmeye devam etmişlerdir. Buna ek olarak fosil yakıtların çok fazla kullanılması sonucunda sera gazı etkisi çıkmış ve bu da dünyanın sıcaklığının her geçen yıl artmasına sebep olmuştur. Tüm bu nedenlere bağlı olarak da küresel ısınmayla birlikte iklim değişikliği meydana gelmiş ve dünya yavaş yavaş kuraklık, deniz seviyelerinde yükselme, bazı türlerin neslinin tükenmesi gibi tehlikeler ile karşı karşıya kalmıştır. Ayrıca fosil yakıt kaynaklarının dünya üzerinde eşit dağılmamış olması bu kaynaklara sahip olmayan ülkelerin enerji açısından dışa bağımlı hale gelmelerine sebep olmuştur.

Belirtilen tüm bu sebepler ve daha birçoğu yenilenebilir enerjiyi son yılların gittikçe üstünde durulan bir konusu haline getirmiştir. Gerek küresel ısınmaya bir önlem olarak global çapta, gerekse enerjide dışa bağımlılığı azaltma açısından ülkesel çapta yenilenebilir enerji çok kullanışlı bir alternatif olmuştur. Bundan dolayı yenilenebilir enerji alanındaki bilimsel ve teknolojik gelişmeler ülkeler tarafından sıklıkla teşvik edilmiştir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan rüzgar enerjisi de sık sık gündeme alınan, çalışılan, geliştirilen ve ilerlemeye açık bir alan olmuştur. Rüzgar enerjisinden nasıl daha verimli yararlanılır sorusu halen daha tazeliğini koruyan ve üzerine

araştırmaların devam ettiği bir soru olarak görülmüştür. Özellikle rüzgar türbinlerinde performansı etkileyen kanat tasarımı, pürüzlülük, yer Őekilleri etkisi gibi konularda sıklıkla çalışılmıştır (Sagol vd., 2013). Bahsedilen parametreler içerisinde yüzey pürüzlülüğünün etkisi literatürde sıklıkla çalışılmış ve rüzgar türbin performansı üzerinde negatif etkisi olduğu raporlanmıştır (Li vd., 2010; Blasco vd., 2017). Ancak son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda doğru yüzey pürüzlülüğü kullanılması durumunda laminer akıştan türbülanslı akışa geçiş kontrol edilebilmiş ve buna bağlı olarak sürükleme kuvvetinde azalma sağlanabilmiştir (Zhang, 2018).

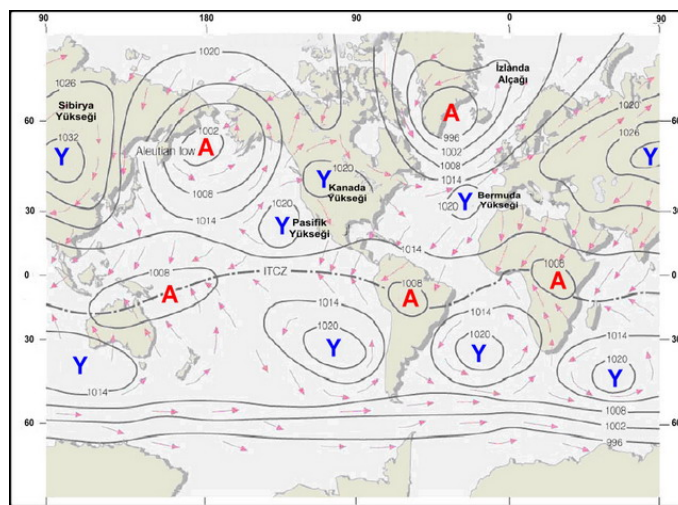
Bu tez çalışmasında da yüzey pürüzlülüğü bir pasif akış kontrol mekanizması olarak kullanılarak sürüklenmenin azaltılması amaçlanmıştır. Bu bağlamda, pürüzlülüğün rüzgar türbini performansına etkisi çeşitli çalışma koşullarında (rüzgar hızları ve hücum açıları) incelenmiştir. Rüzgar türbin kanadı üzerindeki akış Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) Yöntemi ile analiz edilmiştir. Kanat profili ve üzerinden geçen akış 2 boyutlu olarak modellenmiştir. Kanat yüzeyi önce pürüzsüz olarak çalışılmıştır. Daha sonra 5 farklı pürüzlülük yüksekliği için analizler yapılmıştır. Toplamda 7 farklı Reynolds sayısına karşılık gelen hız değerleri kullanılmıştır. Analizler $0^\circ - 20^\circ$ hücum açısı aralığında gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında Bölüm 2’de Rüzgar Enerjisi tarihsel gelişimi, Dünya ve Türkiye’deki yeri, rüzgar türbinleri gibi konulara değinilecektir. Bölüm 3’te rüzgar türbinlerinin aerodinamik teorisinden, Bölüm 4’te pürüzlülük ile alakalı literatür çalışmalarından bahsedilecektir. Bölüm 5’te bu tez kapsamında yapılan numerik çalışmaların ayrıntıları aktarılacaktır. Bölüm 6’da çalışmanın bulguları verilecektir. Bölüm 7’de ise tez çalışmasının genel sonuçlarından bahsedilecektir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ

Yeryüzündeki ısınma ve soğumanın eşit olmaması sıcaklık farkına yol açar. Havanın yoğunluğu sıcaklık ile ters orantılı olduğundan ısınan hava düşük yoğunluğa sahip olarak yükselir, soğuyan hava ise yüksek yoğunluk sebebiyle alçalır. Bu şekilde atmosferde bir hava dolaşımı meydana gelir. Yoğunluk farkının oluşturduğu basınç alanları sayesinde oluşan bu hava hareketlerine ise rüzgar denir. Rüzgar enerjisi ise, rüzgarı oluşturan hava akımının hareket enerjisini ifade etmektedir. Rüzgar enerjisinin yoğunluğu bölgelere göre farklılık gösterir. Bir bölgede rüzgar enerjisi santralinin kurulup kurulamayacağını denetlemek ve o bölgenin rüzgar enerjisi yoğunluğunu belirlemek için 2 parametrelili Weibull, Rayleigh, Burr, Gamma dağılımı gibi yöntemler kullanılır. Rüzgar enerjisinin farklı yoğunluklarda ortaya çıkması atmosfer içinde rüzgarı meydana getiren ve rüzgarın hızına etki eden kuvvetlerden kaynaklanır, bu kuvvetler; basınç gradyan kuvveti, Coriolis kuvveti, merkezkaç kuvveti, sürtünme kuvveti olarak sıralanabilir. Basınç gradyan kuvveti, havanın yoğunluk farkından meydana gelen ve havayı yüksek basınçtan alçak basınca doğru harekete geçiren kuvvettir. Coriolis kuvveti ise, dünyanın dönmesi sonucu oluşan sapıtıcı kuvveti olarak bilinmektedir.

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi yüksek basınç noktalarından alçak basınç noktalarına doğru rüzgar hareketleri gerçekleşmektedir. Rüzgar hareketine etki eden bir diğer kuvvet olan Coriolis kuvvetleri rüzgar yönünde sapmalar ortaya çıkarır. Coriolis kuvvetlerin oluşumu Dünya’nın dönme hareketiyle meydana gelmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.1. Dünya üzerindeki rüzgar hareket yönleri (MGM, 2020).



Şekil 2.2. Rüzgar hareketleri üzerinde Coriolis etkisi (Wikipedia, 2020b).

Çok eski dönemlerden bu yana kullanılan ve günümüz teknolojisinin gelişmesiyle daha yaygın hale gelen rüzgar enerjisinin birçok avantajının yanı sıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır.

Rüzgar enerjisinin avantajları:

- Yenilenebilir, temiz ve yerli bir enerji kaynağıdır, çevre dostudur.
- Tükenme ve zamanla fiyatının artma riski yoktur.
- Bakım ve işletme maliyetleri düşüktür.
- İşletmeye alınması kısa bir sürede gerçekleşebilir.
- Rüzgar enerji santralleri, güneş enerjisi gibi çok fazla arazi alanı kaplamaz.

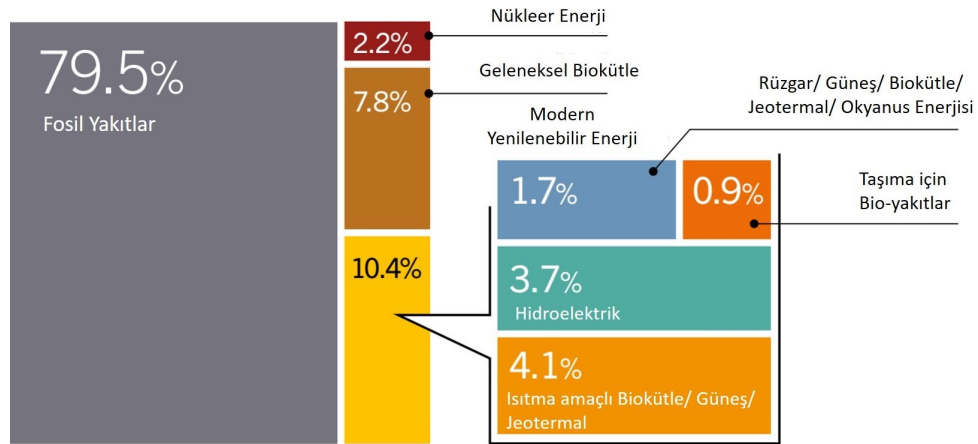
Rüzgar enerjisinin dezavantajları:

- Rüzgar santrali kurmak için en az bir yıl ölçüm yapılması gerekir.
- Rüzgar enerji santrallerinin yatırım maliyetleri yüksektir.
- Rüzgar türbinleri, göç eden kuşlar için ciddi sorunlara yol açmaktadır.
- Rüzgar santralleri cep telefonu ve TV sinyallerini bozabilmektedir.
- Rüzgar enerji santralleri gürültü yapmaktadır.
- Rüzgar enerjisi santralleri genellikle şehirlerden uzakta konumlandırılır bu da uzun elektrik iletim hatlarının yapılmasını gerektirir (EERE, 2019).

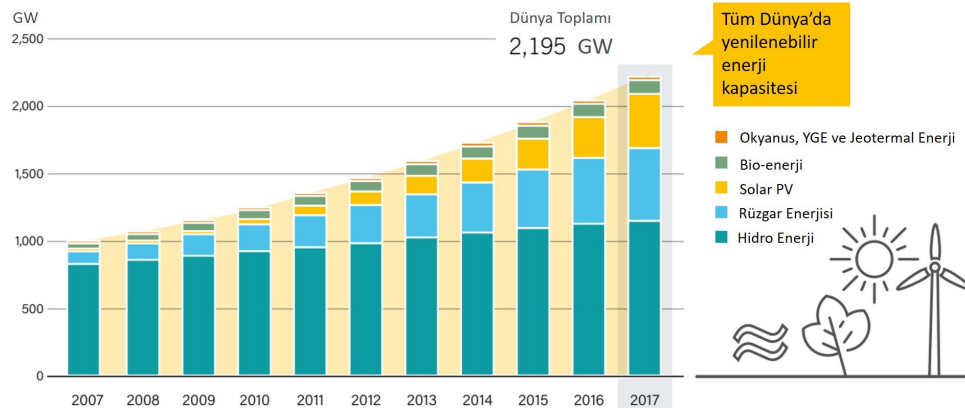
Rüzgar enerjisi tükenmeyen, daimi bir enerji kaynağı olduğundan yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde girmektedir. Bölüm 2.1’de yenilenebilir enerjiye ve diğer yenilenebilir enerji kaynaklarına kısaca değinilecektir.

2.1. Yenilenebilir Enerji

Yenilenebilir enerji, doğadaki kaynaklardan elde edilebilen ve doğa tarafından daimi olarak takviye edilen enerjiye denir. Bu kaynaklar güneş, rüzgar, dalga, jeotermal, hidro, biyokütle enerji kaynakları olarak sıralanabilir. Yenilenebilir enerji kaynakları tükenen fosil yakıtlara alternatif olarak son yıllarda kullanımı giderek artan enerji kaynaklarıdır. Şekil 2.3’de 2016 yılında tüm enerji kaynaklarının dünya çapında kullanımları verilmiştir. Şekil 2.4’te ise dünyada yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımındaki artış gösterilmiştir.



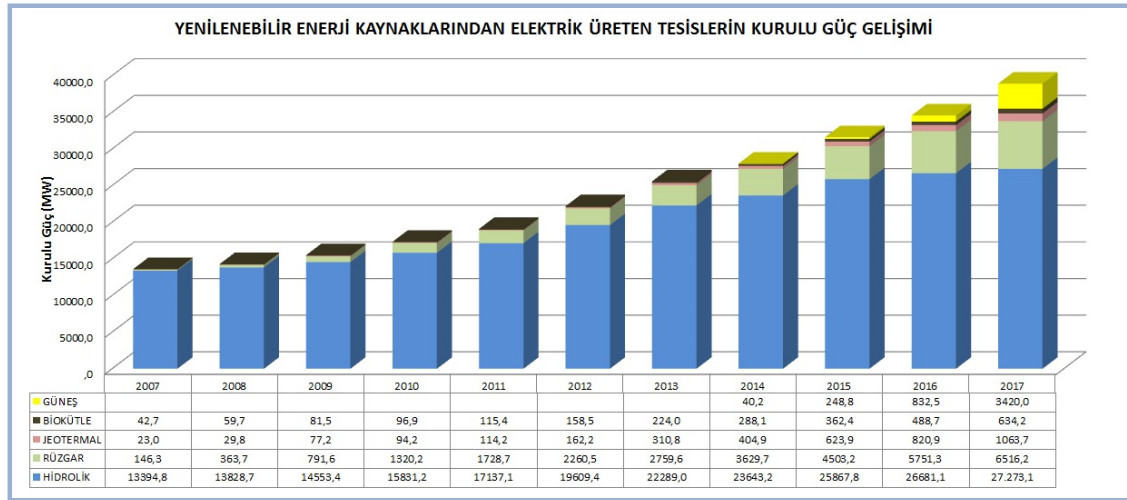
Şekil 2.3. Dünya’da 2016 yılında enerji kaynakları kullanımı (REN21, 2018).



Şekil 2.4. Dünya’da 2007-2017 yıllarında yenilenebilir enerji kullanımı (REN21, 2018).

Ülkemizde de son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim artmıştır, bu artışı gösteren Şekil 2.5’de Türkiye’de yenilenebilir enerji kurulu gücündeki gelişim verilmiştir. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5’te görüldüğü gibi, tüm yenilenebilir enerji kaynaklarından

üretilen güç son on yıldır hızla artmakla birlikte, rüzgar bu kaynaklar içerisinde yüzdesel olarak en fazla yükseliş gösteren enerji çeşididir.



Şekil 2.5. Türkiye’de yenilenebilir enerji kurulu gücü gelişimi (YEGM, 2019).

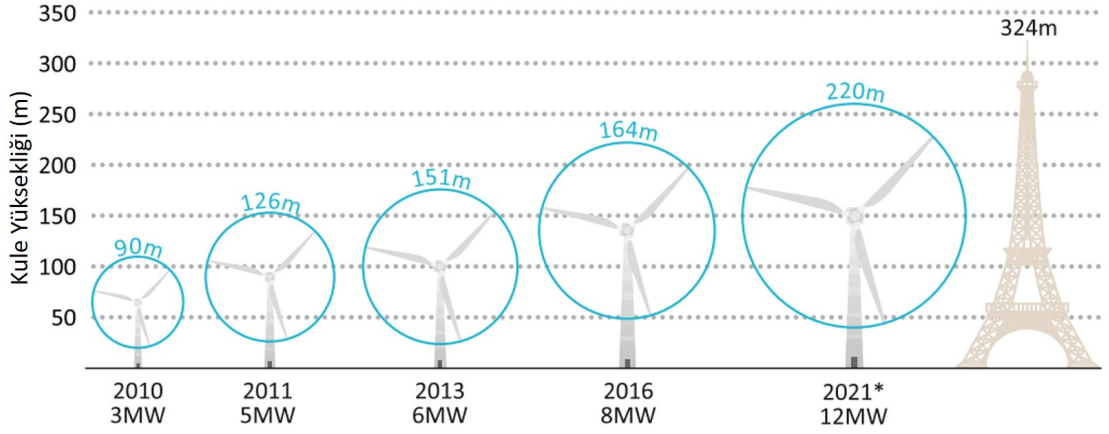
2.2. Rüzgar Enerjisi Tarihsel Gelişimi

İlk rüzgar türbinleri olan yel değirmenleri en az 3000 yıl öncesinden günümüze değin tahıl öğütme, su pompalama gibi amaçlar için kullanılmıştır. Aslında rüzgar enerjisinden faydalanma yelkenli gemiler ile birlikte daha da eski tarihlerde başlamıştır (Burton vd., 2011). Rüzgar türbinlerinden elektrik üretimi ile ilgili çalışmalar ise 19. yüzyılda Charles Francis Brush tarafından Amerika Birleşik Devletleri’nde yapılan 12 kW’lık rüzgar türbini inşası ve Danimarka’da aynı dönemde Poul la Cour tarafından yapılan araştırmalar ile başlamıştır (Çolak ve Demirtaş, 2008). Yıl 1941’e geldiğinde Amerika Birleşik Devletleri’nde 1250 kW Smith-Putnam rüzgar türbini inşa edilmiştir. Bu rüzgar türbini 53 m rotor çapına sahip, tamamıyla hatve kontrollü ve yükleri azaltmak için kanatçıklı olarak üretilmiştir (Burton vd., 2011). Ayrıca İngiltere’de 1931 yılında 100 kW ve 30 m çapında ve 1950’lerin başında 100 kW 24 m çapında rüzgar türbinlerinin inşa edildiği de bildirilmiştir (Golding ve Harris, 1976). Danimarka’da 200 kW gücünde 24 m çapında Gedser makinesi 1956’da kurulmuştur. Bu gelişmeye yakın bir tarihte 1963 yılında ise Electricite de France şirketi 35 m çapında 1.1 MW gücünde bir rüzgar türbinini test etmiştir. Bu ilerlemeleri takiben 1960’lı yıllarda fiberglas ve plastik içeren hafif kanatlara sahip iki kanatlı rüzgar türbini Ulrich Hutter tarafından Almanya’da inşa edilmiştir. Petrol fiyatlarında 1973 yılındaki ani artış sebebiyle çoğu devlet yenilenebilir

enerji kaynakları üzerine araştırmalara fon sağlamıştır. Bu destekler sayesinde Amerika Birleşik Devletleri'nde de 1975 yılında Mod-0 adıyla 38 m çapında 100 kW gücünde başlayan rüzgar türbin prototipi çalışmaları 1987 yılında Mod-5B ismiyle 97.5 m çapına ve 2.5 MW gücüne ulaşmıştır. Buna benzer alışmalar İngiltere, Almanya, İsviçre gibi ülkeler tarafından da uygulanmıştır. 1980'lerin ortasında California'da çok fazla sayıda 100 kW'tan az güce sahip rüzgar türbinleri devlet desteği ile inşa edilmiştir. Değişik tiplerde ve büyüklüklerde rüzgar türbinleri denenmesine rağmen nispeten daha kk rüzgar türbinlerinin daha kullanışlı olduğu kanatine varılmıştır. Çünkü kk boyutlu rüzgar türbinlerinin tamiri ve modifikasyonu daha kolay olmuştur. Bu tarz rüzgar türbinlerinden olan 3 kanatlı, akış ayrılması kontrollü ve sabit hızlı rüzgar türbinleri "Danish" rüzgar türbinleri olarak adlandırılmışlardır. Günümüzde Danish tip rüzgar türbinleri yaklaşık 10 MW'a kadar gücü üretecek kapasiteye ulaşmışlardır (şekil 2.6). Halen daha gelişmekte olan rüzgar türbinlerinin 2021 yılı itibariyle şekil 2.7'de belirtildiği gibi 12 MW güce ulaşacağı ngrlmştir.



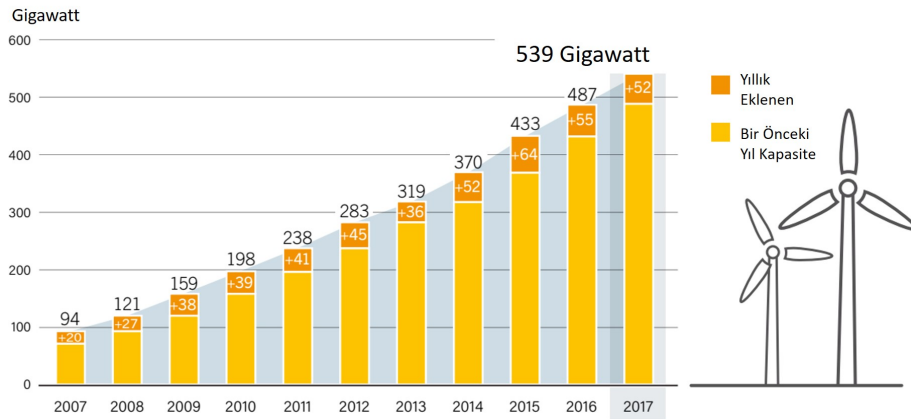
şekil 2.6. Vestas retici firmasının V164 model 8 MW (daha sonrasında 10 MW olarak geliştirilmiş) güce sahip ilk prototipi (Wikipedia, 2020a).



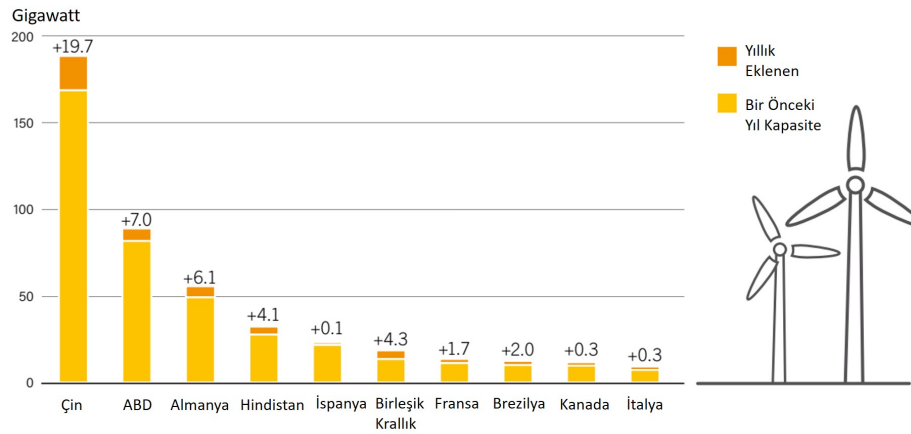
Şekil 2.7. Rüzgar türbinlerinin tarihsel gelişimi (International Energy Agency (IEA), 2018).

2.3. Dünya’da ve Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Dünyada en sık kullanılan enerji çeşidi olan elektrik enerjisi birincil enerji kaynaklarından üretilmektedir. Bu birincil enerji kaynaklarından en çok kullanılanları halen fosil yakıtlar olarak görülmektedir ancak yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı da son yıllarda artışa geçmiştir. Özellikle birçok avantaja sahip olan rüzgar enerjisine talep dünya çapında giderek artmıştır. Şekil 2.8 küresel ölçekte rüzgar enerjisine yönelimin son 10 yılda çok hızlı olarak arttığını ve 2017 yılına gelindiğinde rüzgar enerjisi kapasitesinin 539 GW olduğunu gösterirken, Küresel Rüzgar Enerjisi Kurulu tarafından bu değer 2019 yılı itibariyle 621 GW olduğu bildirilmiştir (Global Wind Energy Council, 2020). Ülkeler bazında bakıldığında ise Çin dünya çapında rüzgar enerjisi kapasitesi açısından yaklaşık 200 GW ile birinci sırada yer almıştır. Çin’i sırasıyla ABD, Almanya, Hindistan gibi ülkeler takip etmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8. Rüzgar enerjisi küresel kapasitesi ve yıllık artışı (REN21, 2018).



Şekil 2.9. Rüzgar enerjisinin ülkere göre küresel kapasitesi ve yıllık artışı (REN21, 2018).

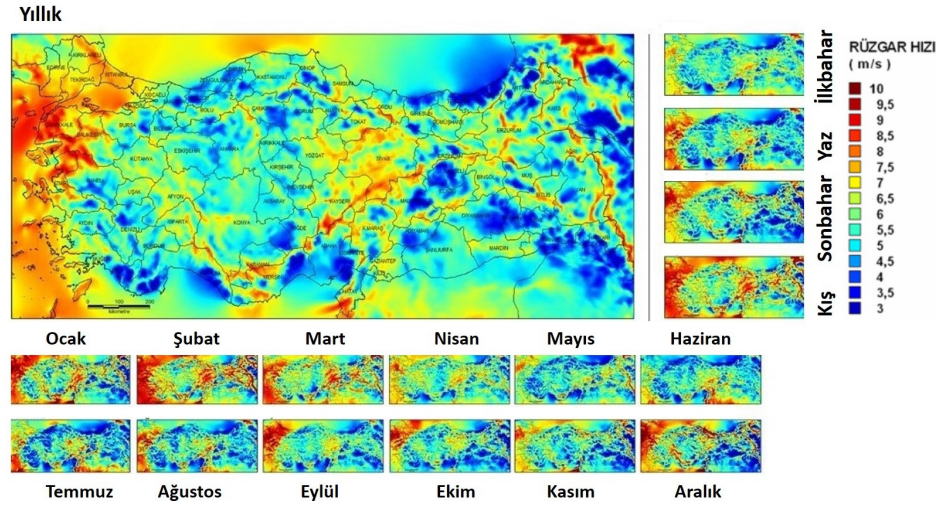
Türkiye’de rüzgar enerjisine yönelim 2009 yılında Elektrik Enerjisi Piyasası ve Arz Güvenliği Strateji Belgesi’nde, rüzgar enerjisi kurulu gücünün 2023 yılına kadar 20 GW’a ulaşması hedefinin bildirilmesiyle artışa geçmiştir (Karık vd., 2015). Şekil 2.10’da da özellikle 2009 yılından itibaren Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücündeki artış görülmektedir.



Şekil 2.10. Türkiye’de yıllara göre rüzgar enerjisi kurulu gücü gelişimi (Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, 2019).

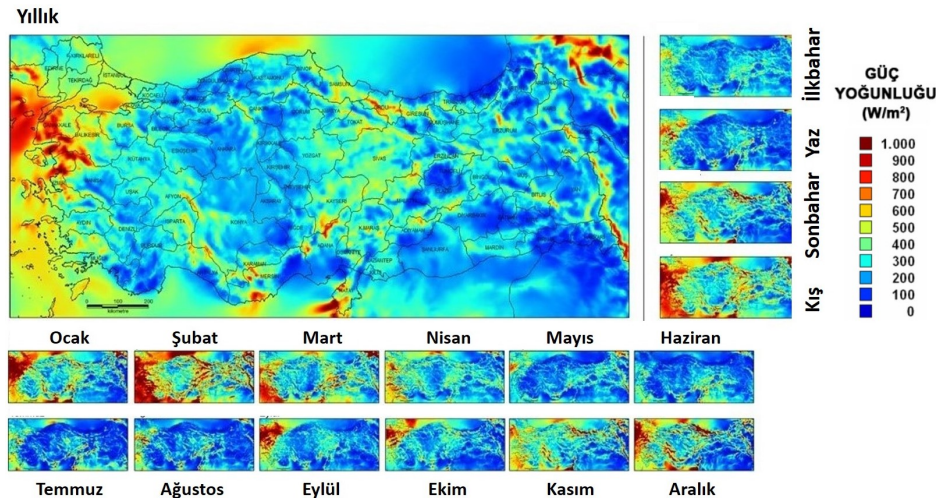
Türkiye rüzgar enerjisi potansiyeli açısından diğer ülkeler ile kıyaslandığında iyi bir konumdadır. Ülkemizde yeryüzünden 50 metre yüksekliğe çıkıldığında 7,5 m/s ve üzeri rüzgar hızının elde edilebildiği bölgelerde km^2 başına 5 MW gücünde rüzgar elektrik santrali inşa edilebileceği öngörülmüştür. Bu kabuller baz alınarak, Rüzgar Enerjisi Potansiyel Atlası (REPA) oluşturulmuştur. REPA orta-ölçekli sayısal hava tahmin modeli ve mikro-ölçekli rüzgar akış modeli vasıtasıyla ortaya çıkarılan, rüzgar kaynaklarının hakkında bilgileri içeren bir atlasır. Bu atlas gözününe alınarak Türkiye’de potansiyel rüzgar

enerjisinin 48.000 MW'a ulaşabileceği sonucuna varılmıştır. Bahsedilen bu miktardaki rüzgar enerjisinin elde edilebileceği alanın Türkiye yüz ölçümünün %1.30'una karşılık geldiği görülmüştür (ETKB, 2020).



Şekil 2.11. Türkiye'de 100 m yükseklikteki rüzgar hızı haritası (YEGM, 2019).

Şekil 2.11'de görüldüğü gibi Türkiye'nin Ege, Marmara ve Doğu Akdeniz bölgelerinde rüzgar hızları diğer kesimlere göre daha yüksektir. Bunun sonucu olarak da Şekil 2.12'deki gibi rüzgar enerjisi güç yoğunluğu bu bölgelerde daha yüksek seviyededir.



Şekil 2.12. Türkiye'de 100 m yükseklikteki rüzgar güç yoğunluğu haritası (YEGM, 2019).

2.4. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar türbinleri hava hareketinden elektrik enerjisi üretmek için kullanılan makinelerdir. Rüzgar türbinleri günümüze kadar çok çeşitli şekillerde tasarlanmış ve

üretmişlerdir. Bundan dolayı rüzgar türbinlerinde birçok sınıflandırma mevcuttur. Bu sınıflandırmalara dönme eksenlerine, devirlerine, güçlerine, kanat sayılarına, rüzgar etkisine, dişli özelliklerine ve kurulum konumlarına göre yapılan sınıflandırmalar örnek gösterilebilir (Elibüyük ve Üçgül, 2014). Rüzgar türbinleri güçlerine göre; < 40 kW ise küçük ölçekli, 40 kW - 1 MW arası ise orta ölçekli, > 1 MW ise büyük ölçekli olarak sınıflandırılmışlardır (Durak ve Özer, 2008). Türbinler rüzgarı alış yönlerine göre ise; rüzgarı önden alan ve rüzgarı arkadan alan türbinler olarak sınıflandırılmışlardır (Nurbay ve Çınar, 2005). Rüzgar türbinlerindeki en sık kullanılan sınıflandırma ise türbinin dönme ekseninin rüzgarın geliş yönüne göre konumunu ifade eden sınıflandırmadır. Bu kapsamda rüzgar türbinleri yatay eksenli, dikey eksenli ve eğik ekseli olmak üzere üç ana sınıfa ayrılmışlardır. Bu sınıflardan en yaygın olanları yatay eksenli ve dikey eksenli rüzgar türbinleridir. Ticari olarak ise daha yaygın olarak yatay eksenli rüzgar türbinleri kullanılmaktadır.

2.4.1. Dikey eksenli rüzgar türbinleri

Dikey eksenli rüzgar türbinleri, rotor milinin rüzgar yönüne dik ve düşey olarak yerleştirildiği türbinlerdir. Bu türbinlerin kanatları da düşeydir ve yerden türbinin en üst noktasına kadar uzanırlar. Türbinlerin üreteç ve vites kutusu toprak seviyesinde kurulabildiğinden kuleye gerek duyulmaz. Yere yakın olarak kurulduklarından düşük rüzgar hızlarında çalışmak zorundadırlar ve bu yüzden çok verimli değildirler. Dikey eksenli rüzgar türbinleri, Savonious, Darrieus, H-Darrieus rüzgar türbinleri gibi çeşitlere sahiptir.

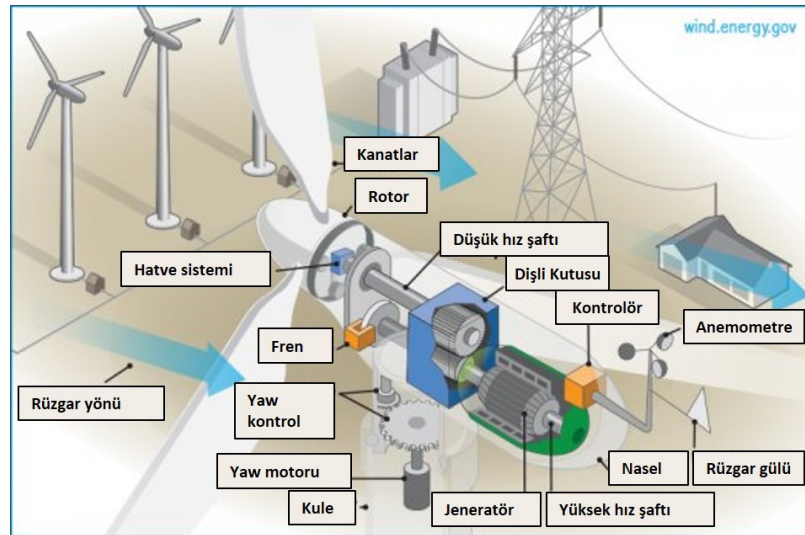
2.4.2. Yatay eksenli rüzgar türbinleri

Yatay eksenli rüzgar türbinleri, rotor milinin rüzgar yönüne paralel olarak yerleştirilmesinden dolayı dönme eksenlerinin rüzgar yönüne paralel olduğu türbinlerdir. Yatay eksenli rüzgar türbinleri; rüzgarı önden alan, rüzgarı arkadan alan, tek kanatlı, çift kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı rüzgar türbinleri olmak üzere beş farklı sınıf oluştururlar. Bu türbinlerden en yaygın kullanılanı üç kanatlı rüzgar türbinleridir. Çünkü üç kanatlı rüzgar türbinlerinde dönme momentinin dağılımı daha düzgündür, tek ve çift kanatlı türbinlerde bu dağılımın eşit olması, titreşimin azaltılması gibi durumlar için fazladan önlem almak gerekmektedir. Çizelge 2.1'de çeşitli türbinlerin karşılaştırılması yapılmıştır.

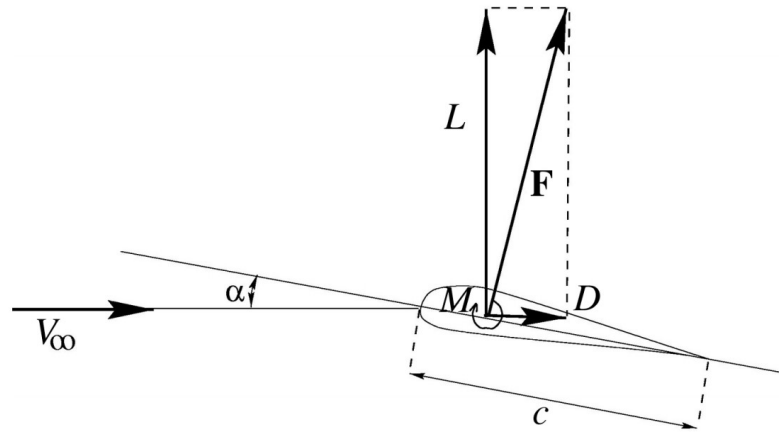
Çizelge 2.1. Kanatlara göre türbinlerin karşılaştırılması (Nurbay ve Çınar, 2005)

	YERT				DERT	
	Tek Kanatlı	2 Kanatlı	3 Kanatlı	Çok Kanatlı	Savonius	Darrierus
Maliyet	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük	Düşük
Çalışma Hızı	Yüksek	Düşük	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Kule İhtiyacı	Var	Var	Var	Var	Yok	Yok
Kullanım Amacı	Elektrik	Elektrik	Elektrik	Su Pompalama	Az Elektrik Su Pompalama	Az Elektrik Su Pompalama
Gürültü	Yüksek	Yüksek	Düşük	Çok Az	Çok Az	Çok Az

Bir yatay eksenli rüzgar türbini Şekil 2.13'te de gösterildiği üzere başlıca kule, kanatlar, nasel, rotor, sapma kontrol mekanizması, hatve kontrol mekanizması, frenler, anemometre, dişli kutusu, jeneratör, kontrolör, rüzgar gülü elemanlarından meydana gelmektedir.

**Şekil 2.13.** Üç kanatlı YERT elemanları (EERE, 2019).

ifade eder. M ise momenti ifade etmektedir ve genellikle momentin hesaplanacağı referans nokta kanadın eksen çizgisi üzerinde $0.4c$ 'de alınır (Hansen, 2015). Rüzgar türbinleri için çok önemli olan kaldırma ve sürüklenme katsayıları bir sonraki alt bölümde detaylı olarak ele alınacaktır.



Şekil 3.2. İki boyutlu kanat üzerindeki aerodinamik kuvvetler (Hansen, 2015).

3.1. Sürüklenme Katsayısı

Sürüklenme kuvveti, bir akışkan içine dalmış cisim üzerine akış yönüyle paralel olarak etki eden kuvveti ifade eder. Bir cisim üzerindeki çok yavaş olan bir akışta sürüklenme duvarda bağlı hareket olmamasından dolayı akışkan içerisindeki kayma gerilmeleri ve viskoz kuvvetlerle doğrudan ilişkilidir (Burton vd., 2011). Bahsedilen akış tipi Stokes akışı olarak adlandırılır ve Reynolds sayısının 1'den çok küçük yani atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetler yanında çok küçük olduğu akış rejimini ifade etmektedir (Kirby, 2010). Bu tarz bir akış türüyle ya $\rho, V, l(d)$ değerlerinin çok küçük olduğu durumlarda ya da μ değerinin çok büyük olduğu durumlarda karşılaşılır. Stokes sürüklenme kuvvetini sürünen akışlar için Navier-Stokes denkleminin yaklaşık ifadesinden yola çıkarak bir küre etrafındaki akışa uyarlanmış ve Eşitlik 3.1 elde edilmiştir. Burada μ akışkanın dinamik viskozitesini, V akışkan hızını, d ise kürenin çapını ifade etmektedir. 3π ise boyut analizi kullanılarak sürüklenme kuvveti ve $\rho, V, l(d)$ ifadelerinin arasında bağıntı kurma işleminden gelmektedir (Çengel ve Cimbala, 2012).

$$D = 3\pi\mu Vd \quad (3.1)$$

Eğer Stokes sürüklenme kuvveti (Eşitlik 3.1) tekrar düzenlenirse Eşitlik 3.2 elde edilir.

$$D = \left[24 \left(\frac{\mu}{\rho V d} \right) \right] \left(\frac{1}{2} \rho V^2 \right) \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) \quad (3.2)$$

Burada $(\mu/\rho V d)$ ifadesinin $1/Re$ olduğu görülmektedir. Reynolds sayısı yerine yazıldığında Eşitlik 3.2' de $24/Re$ ifadesi elde edilir ve bu da sürünme akışlarında akışkan cisim yüzeyine tamamen sarıldığından sürüklenme katsayısı C_D 'ye karşılık gelmektedir (Çengel ve Cimbala, 2012). Eşitlik 3.2' de $(\pi d^2/4)$ ifadesi ise kürenin kesit alanının (ön bakış alanı) vermektedir. Bu düzenlemeler sonucunda sürüklenme kuvveti Eşitlik 3.3'teki gibi bulunur.

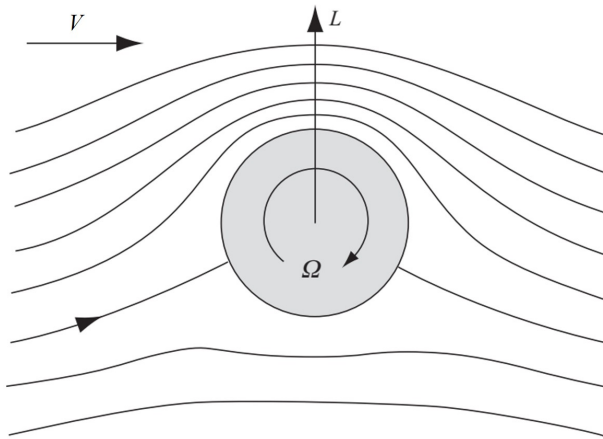
$$D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A_D \quad (3.3)$$

Eşitlik 3.3 tekrar düzenlenerek önemli bir aerodinamik ifade olan sürüklenme katsayısı C_D Eşitlik 3.4'teki gibi elde edilir.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times A_D} \quad (3.4)$$

3.2. Kaldırma Katsayısı

Kaldırma bir cisim üzerine gelen akış yönüne dik doğrultuda oluşan kuvvete denir. Kaldırma kuvveti durgun bir akışkan içerisinde dönen bir silindir üzerinde meydana gelebilir. Ayrıca silindir dönmüyor akışkan bir V hızıyla silindir üzerinden akıyorsa da kaldırma kuvveti oluşabilir. Şekil 3.3'teki gibi dönen bir silindirin üzerinden geçen hava akımının silindirin üst kısmında hızı artar ve statik basınç düşer. Silindirin alt kısmında ise hız azalır ve statik basınç artar. Aradaki basınç farkından kaynaklı olarak bir kaldırma kuvveti meydana gelir. Bu etki aynı zamanda Magnus etkisi olarak da isimlendirilmiştir. Magnus etkisine dönerek ilerleyen bir tenis topunun yükselişi gösterilebilir. Kaldırma kuvvetine sebep olan bu etki kanat profilleri üzerinde ise verilen kamburluklar ile elde edilebilir.



Şekil 3.3. Dönen silindir üzerinde akış (Burton vd., 2011).

Kaldırma kuvveti Kutta-Joukowski teoremi olarak bilinen bir teoremle Eşitlik 3.5'teki gibi ifade edilmiştir.

$$L = \rho (\Gamma \times V) \quad (3.5)$$

Burada Γ çizgi integrali olarak silindir etrafını çevreleyen hava akım çizgilerini yani dolanımı ifade eder ve bu integral Eşitlik 3.6'deki gibi tanımlanmıştır. Eşitlik 3.6'da v , s ile ifade edilen akım çizgilerine teğet olan hızı göstermektedir.

$$\Gamma = \int v ds \quad (3.6)$$

Dönen bir silindir etrafındaki dolanımlı akış kalın ve kambur kanat profilleri etrafındaki dolanımlı akışa dönüştürülür. Bu dönüşüm karmaşık bir değişken dönüştürme tekniği ile yapılır ve literatürde bazı kitapların bahsedilen dönüştürme işlemlerini detaylı olarak irdeledikleri görülmüştür (Ransford, 1995; Milne-Thomson, 1996). Bu dönüşümleri içeren teori kalın ve kambur kanatlar için potansiyel teori olarak adlandırılmıştır (White, 2011). Bu teoride yapılan çözümler sonucunda kaldırma katsayısı Eşitlik 3.7'de verilmiştir. Eşitlik 3.7'de görülen α hücum açısını ifade etmektedir. Kaldırma katsayısının bir diğer formülü ise Denklem 3.4'teki D sürüklenme kuvveti yerine kaldırma kuvveti (L), A_D kesit alanı yerine ise kanat açıklığı alanının yazılmasıyla elde edilir.

$$C_L = 2\pi \sin \alpha \quad (3.7)$$

3.3. Kanat (Pala) Elemanı Momentum Teorisi

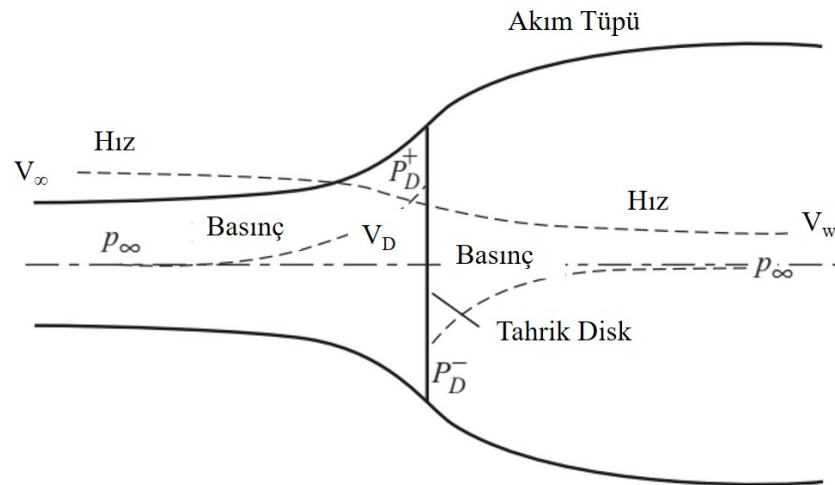
Kanat Elemanı Momentum Teorisi (Blade Element Momentum Theory) rüzgar türbin kanadı tasarımlarında sıkça başvurulan bir yöntemdir. Genel olarak bu teoremden bir kanat üzerine etki eden kuvvetlerin hücum açısı ile iki boyutlu olarak hesaplanabileceği öne sürülmüştür. Kanat profili üzerinde sadece iki boyutlu kesit alan dikkate alınarak kanat açıklığı yönündeki hız bileşenleri ihmal edilir. Bu, kanat tasarımı açısından oldukça faydalı ve hızlı sonuçlar elde etmeye sağlar.

Bu tez çalışmasında ise kanat elemanı momentum teorisi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinden elde edilen kaldırma ve sürüklenme katsayıları kullanılarak farklı pürüzlülük durumlarının türbin güç katsayısına nasıl bir etki yaptığını anlayabilmek için kullanılmıştır.

Kanat Elemanı Momentum Teorisi'ni açıklamadan önce alt bölümlerde sırasıyla bu konuyla alakalı rotor diski, momentum teorisi, güç katsayısı, Betz limiti gibi kavramlara değinilerek konu bütünlüğünü sağlamak amaçlanmıştır.

3.3.1. Rotor diski kavramı

Rüzgar türbinleri hava akımında bulunan kinetik enerjiden faydalanmaya yarayan makinelerdir. Bütün rüzgar türbinleri basınç farkından kaynaklanan kinetik enerjiyi kullanabilme mantığı ile çalışırlar. Rüzgar türbinlerinin kinetik enerjiyi nasıl çektikleri ise Şekil 3.4'te gösterilen Rotor Diski kavramı ile açıklanmıştır.



Şekil 3.4. Bir rotor diski üzerinde enerji çekişi (Burton vd., 2011).

Şekil 3.4'te görülen V_∞ havanın serbest akış hızını, V_D disk üzerinden geçen hava hızını, V_W ise diski geçip atmosferik rejime dönmüş olan hava hızını ifade eder. p_∞ ile gösterilen serbest akış hava basıncını, p_D^+ ve p_D^- sırasıyla diskin solunda ve sağındaki hava basınçlarını ifade etmektedir. Hava diski geçtikten sonra aynı atmosferik basınç değerine tekrar ulaşmak için kinetik enerjisinden harcar ve bu sebeple aynı atmosferik basınçta daha düşük bir hız meydana gelir. Dolayısıyla diskten önce ve sonra aynı akış şartları meydana gelse bile kinetik enerji farkı ortaya çıkar (Burton vd., 2011).

Disk üzerindeki akışın hızı V_D , serbest akış hızı V_∞ 'dan belli bir miktar az olur. Serbest akış hızı ile disk üzerindeki akış hızı arasındaki bağıntı Eşitlik 3.8'deki gibi gösterilmiştir. Burada a aksenal indüklenme faktörü veya iç akış faktörü olarak adlandırılır.

$$V_D = V_\infty(1 - a) \quad (3.8)$$

Disk üzerinden geçen havanın hızındaki değişim ile kütleli debinin çarpımı momentum değişim oranını verir. Bu da diskten kaynaklı basınç farkından meydana gelen kuvvete eşittir (Eşitlik 3.9).

$$(p_D^+ - p_D^-)A_d = (V_\infty - V_W)\rho A_D V_\infty(1 - a) \quad (3.9)$$

Bahsedilen basınç farklarını elde edebilmek için diskin sol ve sağ tarafına ayrı ayrı Bernoulli denklemi uygulanır. Bu denklemler sırasıyla şu şekilde elde edilir:

$$\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho V_D^2 + p_d^+ \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{2}\rho V_W^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho V_D^2 + p_d^- \quad (3.11)$$

Eşitlik 3.10 ve Eşitlik 3.11 birbirinden çıkarılırsa Eşitlik 3.9'daki basınç farkı ifadesi elde edilmiş olur (Eşitlik 3.12).

$$(p_D^+ - p_D^-) = \frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_W^2) \quad (3.12)$$

Elde edilen basınç farkı eşitliği Eşitlik 3.9'da yerine yazıldığında serbest akış hava hızı ile diskten sonra atmosferik şartlara geri dönen akış hızı arasındaki bağıntı (Eşitlik 3.13) ortaya çıkmış olur.

$$V_W = V_\infty(1 - 2a) \quad (3.13)$$

3.3.2. Betz limiti

Güç katsayısı C_P bir rüzgar türbininin performansını yansıtan en önemli boyutsuz sayıdır. Bu katsayının belirlenmesiyle farklı rüzgar türbinleri arasında kıyaslama yapılabilir. Bahsedilen güç katsayısı hangi türbin olursa olsun aşlamayacak bir limit ile sınırlandırılmıştır (Betz, 1966). Bu limit Alman aerodinamikçi Albert Betz tarafından bulunmuş ve Betz limiti olarak literatüre geçmiştir. Betz limitinin belirlenmesinde ilk olarak rotor diski üzerine etki eden net itki kuvvetinden yola çıkılır ve Eşitlik 3.12 yardımıyla Eşitlik 3.14 elde edilir.

$$F_{itki} = (p_D^+ - p_D^-)A_D = 2\rho A_D V_\infty^2 a(1 - a) \quad (3.14)$$

Bu kuvvet rotor diski üzerinde toplandığında rüzgardan çekilen birim zamanki enerji miktarı (P) Eşitlik 3.8 ve Eşitlik 3.14 yardımıyla Eşitlik 3.15'teki gibi elde edilir.

$$P = F_{itki}V_D = 2\rho A_D V_\infty^3 a(1 - a)^2 \quad (3.15)$$

Rotor diski yardımıyla elde edilen güç, Eşitlik 3.16'da verilen teorik olarak rüzgardan elde edilebilecek maksimum güce oranlandığında güç katsayısı olarak adlandırılan C_P Eşitlik 3.17'deki gibi elde edilir.

$$P_{teorik} = \frac{1}{2}\rho A_D V_\infty^3 \quad (3.16)$$

$$C_P = 4a(1 - a)^2 \quad (3.17)$$

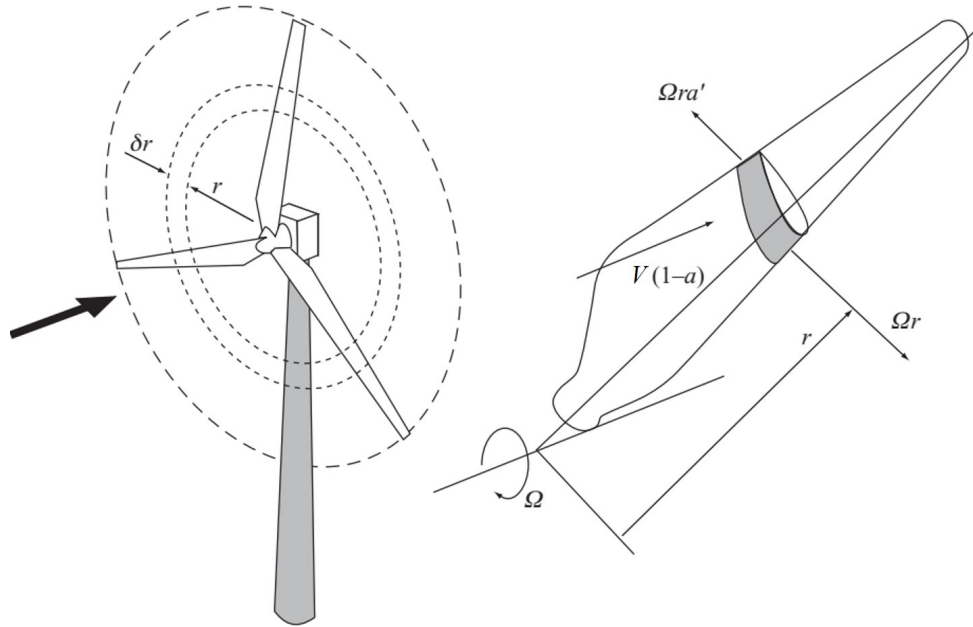
Elde edilen güç katsayısının teorik olarak maksimum olduğu nokta Betz limit olarak adlandırılmıştır.

Eşitlik 3.17 türev alınarak maksimum nokta elde edildiğinde C_p 'nin en fazla 0.593 olduğu görülmüştür. Şu ana kadar Betz limitini geçebilecek bir türbin tasarlanmamıştır çünkü Betz limiti tasarımıyla alakalı bir durum değil rüzgardan güç elde ederken oluşan akışın doğası gereği ortaya çıkmaktadır (Burton vd., 2011). Güç katsayısı ayrıca Eşitlik 3.18'deki gibi de ifade edilir.

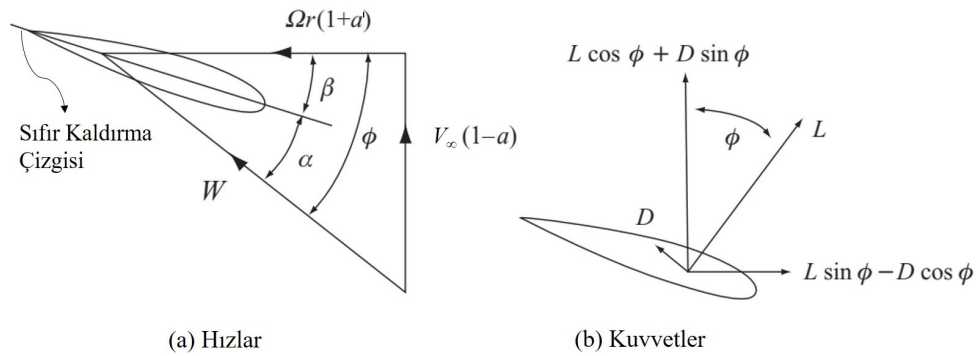
$$C_p = \frac{P_{turbin}}{P_{teorik}} \quad (3.18)$$

3.3.3. Kanat elemanı teorisi

Kaldırma ve sürüklenme kuvvetleri bir rüzgar türbini tarafından taranan alan içerisindeki bütün havanın açısal ve aksenal momentum değişimlerini etkiler. Daha sonra değinilecek olan *Kanat Elemanı Momentum Teorisi'nin* temelini oluşturan Kanat Elemanı Teorisi'nde de bahsedilen kuvvetlerin hesaplaması yapılır. Bu teoremden kuvvetlerin bileşke rüzgar hızından kaynaklanan hücum açısı kullanılarak iki boyutlu olarak hesaplanabileceği öne sürülmüştür ve bundan dolayı kanat açıklığı boyunca olan hız bileşenleri ihmal edilmiştir (Burton vd., 2011). Rüzgar türbin kanadı üzerindeki hız bileşenleri, akış etkileri ve rotorun dönüş hızı hücum açısını etkiler. Hücum açısı kanat profilinin eksen çizgisiyle rüzgar yönünün arasında kalan açıyı ifade eder. Bir kanat profilinin karakteristiği olan C_L ve C_D katsayılarının hücum açısıyla nasıl değiştiğinin bilinmesi de kanatlar üzerine etki eden kuvvetlerin doğru bir şekilde tespit edilmesini sağlar. Kanatlar üzerindeki kuvvetlerin doğru şekilde anlaşılabilirken kanat elemanı teorisini uygulamak için B kanatlı R yarıçaplı ve c veter uzunluğuna sahip bir rüzgar türbininin Ω açısal hızıyla döndüğü göz önüne alındığında Şekil 3.5'te koyu renkli gösterilen kanat elemanı üzerinde teğetsel hız (Ωr) ve teğetsel girdap hızının ($\Omega r a'$) bileşkeleri olan $\Omega r(1 + a')$ teğetsel hızı meydana gelir. Bileşke net teğetsel hız ve türbin üzerindeki rüzgar hızı göz önüne alındığında kanat elemanı üzerine Şekil 3.6'da görüldüğü gibi W bağlı rüzgar hızı etki eder. Bileşke bağlı rüzgar hızı Pisagor teoreminden Eşitlik 3.19'deki gibi elde edilir. Burada β disk düzlemi ile kanat profilinin sıfır kaldırma çizgisi arasında kalan açıyı yani hatve açısını, α ise hücum açısını ifade etmektedir. Hatve açısı ve veter uzunluğu türbin kanadında türbin göbeğinden kanat ucuna kadar değiştirilerek daha fazla güç elde edilmesi sağlanır (Hau, 2013).



Şekil 3.5. Bir rüzgar türbini ve üzerindeki kanat elemanı (Burton vd., 2011).



Şekil 3.6. Bir rüzgar türbin kanadı üzerine etki eden kuvvetler ve oluşan hızlar (Burton vd., 2011).

$$W = \sqrt{V_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+a')^2} \quad (3.19)$$

İki boyutlu olarak Şekil 3.6b'de gösterilen kanat elemanı üzerine etki eden kuvvetler ise W bağıl rüzgar hızına dik yönde oluşan L kaldırma kuvveti ve bağıl rüzgar hızına paralel oluşan D sürükleme kuvvetidir. Bu kuvvetlerin formülleri ise Eşitlik 3.20 ve 3.21'de verilmiştir.

$$\delta L = \frac{1}{2} \rho W^2 C_L c \delta r \quad (3.20)$$

$$\delta D = \frac{1}{2} \rho W^2 C_{Dc} \delta r \quad (3.21)$$

Bu kuvvetler altında Şekil 3.5'te δr kalınlığındaki bir alanda oluşacak aksenal itki ve tork sırasıyla Eşitlik 3.22 ve 3.23'te verildiği gibi elde edilir.

$$\delta F_{itki} = \delta L \cos \phi + \delta D \sin \phi = \frac{1}{2} \rho W^2 Bc (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \delta r \quad (3.22)$$

$$\delta Q = (\delta L \sin \phi - \delta D \cos \phi) r = \frac{1}{2} \rho W^2 Bcr (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) \delta r \quad (3.23)$$

3.3.4. Kanat Elemanı Momentum teorisi

Kanat tasarımlarında sıklıkla yararlanılan kanat elemanı momentum teorisinde temel varsayım olarak kanat elemanının kuvvetinin sadece o kanat elemanı üzerinden geçen hava akımındaki aksenal momentum değişimlerinden sorumlu olduğu kabul edilmiştir. Yani bitişik kanat elemanlarının üzerinden geçen hava akımının birbirinden etkilenmediği varsayılmıştır. Yapılan bu varsayım sadece aksenal akış indüksiyon faktörünün (a) radyal doğrultuda değişmediği durumlarda geçerli görülmüştür. Pratikte aksenal akış indüksiyon faktörü nadiren üniform dağılımdadır ancak fan diskleri boyunca akışın deneysel olarak incelendiği bir çalışmada radyal yönde bağımsızlığın kabul edilebilir seviyede düşük hata içerdiği bildirilmiştir (Lock vd., 1924). Bu kabul altında kanat elemanları üzerindeki aksenal itki kuvveti (Eşitlik 3.22) ve havadaki aksenal momentum değişim oranı (Eşitlik 3.14) birbirlerine eşitlenerek Eşitlik 3.24 elde edilir. Burada Eşitlik 3.14 içerisindeki alan ifadesi Şekil 3.5'teki diferansiyel halkanın alanı olarak $A_D = 2\pi r \delta r$ şeklinde yazılmıştır.

$$\frac{1}{2} \rho W^2 Bc (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) \delta r = 2\pi r \delta r \rho V_\infty^2 2a(1-a) \quad (3.24)$$

Ayrıca girdapların dönüş hareketinden kaynaklı olarak basınçta düşüş meydana gelir ve bu da dinamik olarak yük artışına sebep olur. Bundan dolayı kanat elemanına ek bir aksenal kuvvet etki eder. Bu kuvvet Eşitlik 3.25'teki gibi ifade edilir. Burada a' teğetsel akış indüksiyon faktörünü göstermektedir.

$$F_{Girdap} = \frac{1}{2} \rho (2a' \Omega r)^2 \delta r \quad (3.25)$$

Girdap etkilerini de içermesi için Eşitlik 3.25 Eşitlik 3.24'e dahil edilip gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Eşitlik 3.26 elde edilir. Burada λ uç hız oranını ifade etmektedir.

$$\frac{W^2}{V_\infty^2} B \frac{c}{R} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) = 8\pi \left(a(1-a) + \left(a' \lambda \frac{r}{R} \right)^2 \right) \frac{r}{R} \quad (3.26)$$

Benzer şekilde kanat üzerine etkileyen kuvvetlerden kaynaklanan aksenal tork (Eşitlik 3.23) ve Eşitlik 3.27'de verilen havadaki açısal momentum değişimi birbirine eşitlenip gerekli sadeleştirmeler yapıldığında Eşitlik 3.28 elde edilir.

$$L_{moment} = 4\pi\rho V_\infty (\Omega r) a' (1-a) r^2 \delta r \quad (3.27)$$

$$\frac{W^2}{V_\infty^2} B \frac{c}{R} (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) = 8\pi \lambda \left(\frac{r}{R} \right)^2 a' (1-a) \quad (3.28)$$

İşlemlerde sadelik açısından Eşitlik 3.29 ve 3.30 'daki gibi tanımlamalar yapılır.

$$C_x = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (3.29)$$

$$C_y = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (3.30)$$

Eksenal akış indüksiyon faktörü (a) ve teğetsel akış indüksiyon faktörünü (a') elde etmek için Eşitlik 3.26 ve 3.28'in iteratif olarak çözülmesi gerekir. Bu iteratif çözümlemeyi yaparken öncelikle Eşitlik 3.26 ve 3.28 tekar düzenlenerek Eşitlik 3.31 ve 3.32 elde edilir. Bunun ardından a ve a' değerleri 0 olarak atanır daha sonra $|a_{n+1} - a_n| < 0.001$ ve $|a'_{n+1} - a'_n| < 0.001$ olana kadar iterasyonlara devam edilir (Bakırcı ve Yılmaz, 2018). Burada σ katılık olarak tanımlanır ve toplam kanat alanının rotor diskinin alanına bölünmesiyle elde edilir (Eşitlik 3.33).

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma}{4 \sin^2 \phi} \left[C_x - \frac{\sigma}{4 \sin^2 \phi} C_y^2 \right] \quad (3.31)$$

$$\frac{a}{1+a'} = \frac{\sigma C_y}{4 \sin \phi \cos \phi} \quad (3.32)$$

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r} \quad (3.33)$$

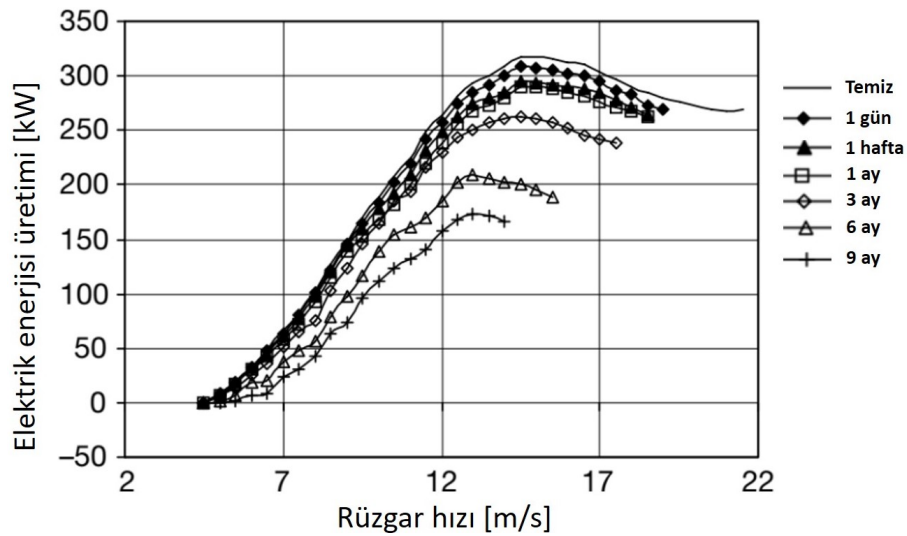
Kanat Elemanı Momentum Teorisi ile ilgili son olarak türbin kanatlarının sadece üniform devir yapıyorsa uygulanabileceği söylenebilir. Üniform devrin olmadığı durumlarda kanat elemanları arasında radyal etkileşim olacağından bu teori uygulanamaz. Türbinin üniform devirde olmadığı durum kanat uç hız oranının (λ) 3'ün altında olduğu zaman meydana gelir. Buradan da anlaşıldığı gibi kanat uç hız oranının 3 ve üzerinde olduğu durumlarda kanat elemanı momentum teorisinin uygulanmasının düşük hata payı içerdiği sonucuna varılmıştır (Burton vd., 2011).

4. LİTERATÜR TARAMASI

Rüzgar türbinleri son yıllarda oldukça fazla talep görmüştür. Temiz ve masrafsız enerji üretiminin vazgeçilmezi olan rüzgar türbinleri sağladıkları pek çok avantajın yanında, araştırılmaya devam edilen farklı sorunlara da sahip olmuşlardır. Karşılaşılan sorunlar rüzgar türbini tasarımları ile mümkün olduğunca en alt seviyeye indirilmeye çalışılmasına rağmen tasarım dışı faktörler problemlerin başını çekmiştir. En önemli problem kaynağı ise rüzgar türbinlerinin çalışma koşullarıdır. Rüzgar türbinleri oldukça soğuk tepelerden kum fırtınalarının meydana geldiği çöllere kadar pek çok çevresel koşulda kullanılmıştır. Bu da rüzgar türbin kanatlarındaki aerodinamik akışı bozan yüzey pürüzlülüğüne sebebiyet vermiştir. Pürüzlülük türbin kanatları üzerindeki akışı bozarak rüzgar türbininin ürettiği elektrik enerjisinin düşmesine sebep olmuştur. Rüzgar türbinlerinde meydana gelen pürüzlülük kaynaklarının çoğunluğunun çevresel kaynaklar olduğu görülmüştür. Bu kaynaklar buzlanma, aşınma, toz ve böcek birikimi olarak sınıflandırılmıştır (Sagol vd., 2013). Ayrıca sayılan kaynaklara ek olarak kanatların son yüzey işlemleri ve boyamanın da pürüzlülük sebebi olabileceği bildirilmiştir (Pechlivanoglou vd., 2010).

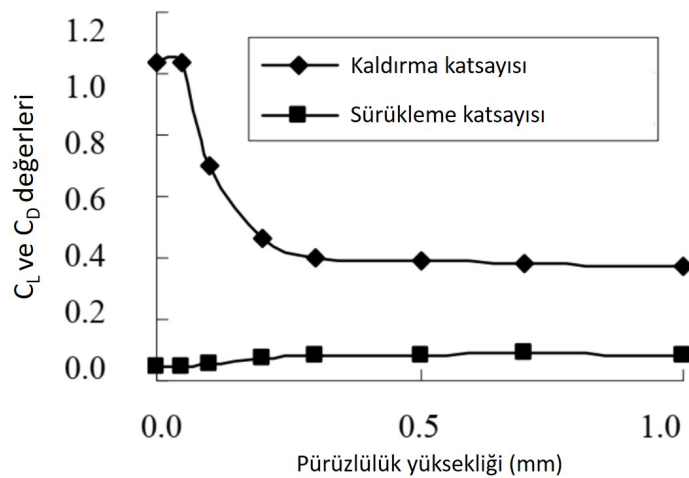
4.1. Toz Birikimi

Küçük toz, kir ve kum parçacıkları, rüzgar tarafından rüzgar türbini rotorunun yüksekliğine kadar taşınabilir. Bu parçacıklar türbin kanatlarına çarptıklarında veya buraya yapıştıklarında, yüzeyin pürüzsüzlüğü özellikle hücum kenarında bozulur. Tozdan kaynaklı pürüzlülük ile ilgili literatürde deneysel ve numerik çalışmalar mevcuttur. Khalfallah ve Koliub (2007) tarafından yapılan çalışmada araştırmacılar 300 kW'lık yatay eksenli rüzgar türbini üzerinde toz birikiminin etkisini çeşitli çalışma periyotlarında deneysel olarak incelemişler ve çalışmanın sonucunda toz parçacıklarının kanat profili boyunca özellikle de hücum kenarında biriktiğini gözlemlemişlerdir. Kanatlar temizken türbin üretebileceği en yüksek elektrik enerjisine ulaşmış ancak zaman geçtikçe toz birikimi sebebiyle Şekil 4.1'de görüldüğü gibi elektrik üretiminde azalma meydana gelmiştir. Araştırmacılar toz parçacıklarının çapının büyüdükçe türbin gücünde düşüşün devam ettiği ve 0.3 mm çapındaki toz parçacıklarının yaklaşık olarak %40 enerji kaybına neden olduğu sonucuna varmışlardır.



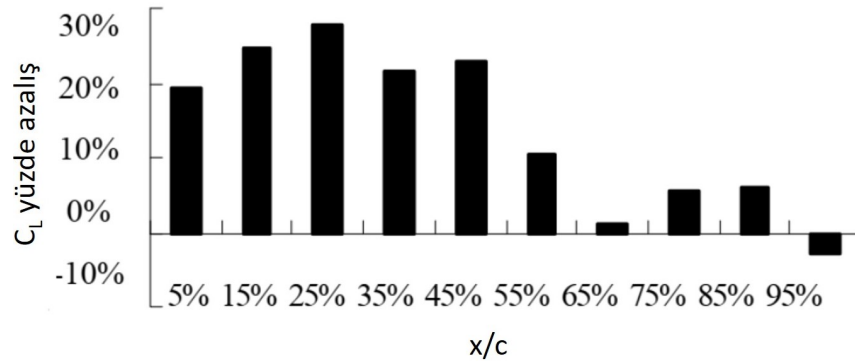
Şekil 4.1. Toz birikiminin türbin çıkış gücüne etkisi (Khalfallah ve Koliub, 2007).

Ren ve Ou (2009), NACA 63-430 kanat profili üzerindeki toz birikiminden kaynaklı pürüzlülüğü numerik çözüm yöntemini kullanarak incelemiştir. Kanadın hem pürüzlü hem de pürüzsüz olduğu durumlar için kanat üzerindeki iki boyutlu akış modellenmiştir. Modelin doğruluğu açısından pürüzsüz durum için analizler yapılmış ve deneysel veriler ile uyumlu olup olmadığı denetlenmiştir. Daha sonra farklı pürüzlülük yükseklikleri, farklı pürüzlülük alanları ve konumları için analizler yapılmıştır. Bu çalışmada da Şekil 4.2'de görüldüğü gibi kaldırma ve sürüklenme katsayılarının büyük ölçüde pürüzlülük yüksekliğinden etkilendikleri ancak bu katsayıların, bir noktadan sonra pürüzlülük yüksekliğine karşı duyarsız hale geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.2. Pürüzlülük yüksekliğinin C_L ve C_D üzerindeki etkisi (Ren ve Ou, 2009).

Ayrıca araştırmacılar Şekil 4.3'te verildiği gibi pürüzlülük konumunu da incelemişler ve hücum kenarı bölgesinin pürüzlülüğe karşı kuyruk kenarı bölümünden daha duyarlı olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 4.3. Pürüzlülük konumunun C_L üzerindeki etkisi (Ren ve Ou, 2009).

Salem vd. (2013), Sahra ölu koşullarında türbin kanatlarındaki toz birikimini numerik olarak modellemişlerdir. Çalışmada kanat profili olarak NACA 63-215 kanat profilini kullanmışlardır. Hem pürüzlü hem de pürüzsüz durumlarda kanat üzerindeki iki boyutlu sıkıştırılmaz viskoz akışı numerik olarak modellemişlerdir. Doğrulama amacı ile çalışmalarındaki pürüzlülük modelini Khalfallah ve Koliub (2007) tarafından yapılan deneysel çalışma ile kıyaslamışlardır. Çalışmanın sonucunda pürüzlülük yüksekliğinin yani toz birikiminin artmasına bağlı kaldırma katsayısında azalış, sürüklenme katsayısında ise artış olduğu bildirilmiştir. Aynı araştırma grubu farklı kanat profilleri üzerindeki toz birikimini inceledikleri bir çalışmalarında da tüm kanat profilleri için benzer olarak toz birikiminden kaynaklanan pürüzlülüğün kaldırma katsayısını azalttığı, sürüklenme katsayısını ise arttırdığı sonucuna varmışlardır (Diab vd., 2015).

Zidane vd. (2017), NACA 63-415 kanat profili üzerinde toz parçacıkları içeren hava akışını incelemişlerdir. Modelleme iki boyutlu sıkıştırılmaz akış olarak yapılmıştır. Hesaplama bölgesi 1 m veter uzunluğundaki kanat için 12.5 m yarıçaplı yarım daire ve 25 m yüksekliğinde, 20 m uzunluğunda dikdörtgen alandan oluşturulmuştur. Yani standartlaştırmak gerekirse veter uzunluğu c olan bir kanat profili için $12.5c$ yarıçaplı daire ve $25c$ yüksekliğindeki, $20c$ uzunluğundaki dikdörtgen alan kullanılmıştır. Akış içerisindeki kum parçacıklarının aerodinamik performansa etkilerini incelemek için Ayrık Faz Modeli (The Discrete Phase Model) yöntemi kullanılmıştır. Araştırmanın sonunda

kaldırma katsayısında kum fırtınaları gibi durumlarda %28'e kadar azalış olabileceği sonucuna varılmıştır.

Papadopoulou vd. (2020), toz birikimini numerik olarak incelemişlerdir. Çalışmada 4 farklı şehirden gerçek toz birikimi verilerini ele alarak numerik analizler yapılmıştır. Çalışma sonucunda 10 m/s'den düşük rüzgar hızları için pürüzlülüğün türbin gücünde önemli bir azalma yapmadığı fark edilmiş, ancak bu hızın üzerinde ciddi miktarda güç düşüşü olduğu görülmüştür.

4.2. Böcek Birikimi

Rüzgar türbinleri çalıştıkları esnada böceklerin kanat yüzeyine çarparak yapışması sonucu böcek birikiminden kaynaklı yüzey pürüzlülüğüne maruz kalırlar. Bu durum da rüzgar türbini kanadının aerodinamik yapısını bozduğundan rüzgar türbinlerinde önemli ölçüde güç düşüşüne sebep olabilir. Bu alanda Corten ve Veldkamp (2001) tarafından yapılan çalışmada araştırmacılar böceklerden kaynaklanan pürüzlülüğü deneysel olarak incelemişlerdir. Araştırmayı aynı rüzgar türbini tarlasında aynı rüzgar hızında türbinlerin neden farklı güç eğrileri oluşturduğunu bulma düşüncesi motive etmiştir. Araştırmacılar deneysel olarak test edilen birkaç hipotez ortaya atmışlardır. Bu hipotezlerin arasında olan böceklerin uçabileceği kadar düşük rüzgar hızlarında türbin kanatlarında böcek birikmesi olasılığı üzerinde özellikle durulmuştur. Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda düşük rüzgar hızlarında türbin gücünde çok fazla azalma olmadığı, ancak daha önceden böceklerle kirlenmiş kanatların yüksek rüzgar hızlarında yüzey pürüzlülüğünden etkilendiği ve türbin gücünde azalma meydana geldiği görülmüştür.

Rüzgar türbinlerinin, kanatlarda böcek kirliliği nedeniyle güç kayıplarını tahmin etmek için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımları veya ampirik modeller kullanılır. Bu modeller, kanat yüzeyinde böcek kirliliğinin miktarı ve konumu hakkında bilgi gerektirir. Bu da genellikle bilinemediğinden güç kaybı tahminleri güvenilir duruma düşebilmektedir. Bu bilinmezliği ortadan kaldırabilmek adına Wilcox ve White (2016) böcek birikimini tahmin etmek için bir bilgisayar simülasyonu geliştirmişler ve çeşitli türbin çalışma koşulları için böcek birikimlerini simüle etmek için kullanmışlardır. Daha sonra iki boyutlu kanat profili için kanat kalınlığı, hücum açısı ve böcek boyutunun etkileri incelenmiştir. Böcek kirliliği modeli, temsili bir 5 MW türbin modeline uygulanmış ve

saha gözlemiyle uyumlu olduğu, bu tekniğin gelecekte türbinlerdeki güç kayıplarını daha doğru tahmin etmek için kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.

4.3. Buzlanma

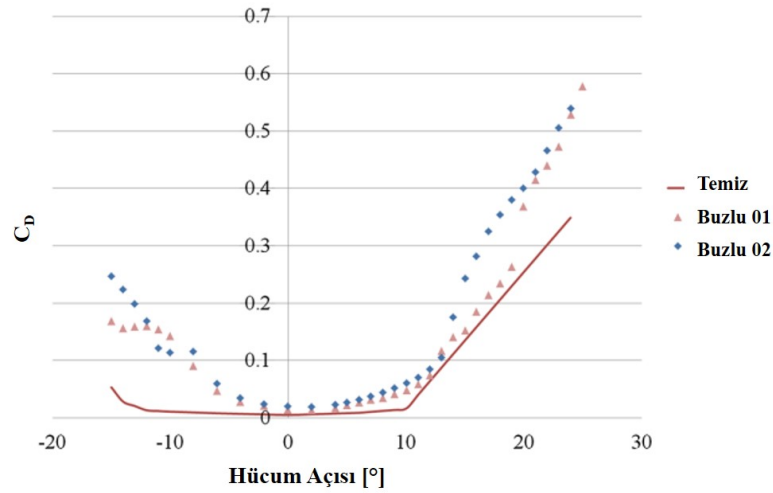
Rüzgar türbinlerinde özellikle hava sıcaklıklarının düşük olduğu kesimlerde sıklıkla karşılaşılan pürüzlülük kaynaklarından birisi de buzlanmadır. Buzlanma türbinler açısından ciddi güç kayıplarına neden olabilmektedir. Bu nedenle de araştırmacılar tarafından sık araştırılan konuların başında gelmiştir. Buzlanma ile ilgili yaptıkları çalışmalarında Hochart vd. (2008) buzlanmadan kaynaklanan pürüzlülüğü kapalı çevrim rüzgar tüneline NACA 63-415 kanat profili için deneysel olarak incelemiştir. Kanat üzerine uygulanan farklı buz profilleri ve kütlelerinin, kaldırma ve sürüklenme kuvvetlerine etkisi ölçülmüştür. Farklı buzlanma tiplerinin incelendiği çalışmada her buzlanma türünde kaldırma katsayısının azaldığı, sürüklenme katsayısının ise arttığı dolayısıyla türbin performansının düştüğü görülmüştür.

Villalpando vd. (2012), NACA 63-415 kanat profili üzerindeki akışı hem temiz hem de buzlanma durumunda farklı hücum açıları için numerik olarak incelemiştir. Ayrıca gerçeğe uygun meteorolojik koşullarda buzlandırma işlemi ile 20 cm veter uzunluğuna sahip alüminyum 63-415 kanat profili için deneysel incelemeler de yapmışlardır. Araştırmanın sonucunda buzlanmanın kaldırma katsayısını azaltan negatif basınçların oluşmasına neden olduğu sonucuna varmışlardır.

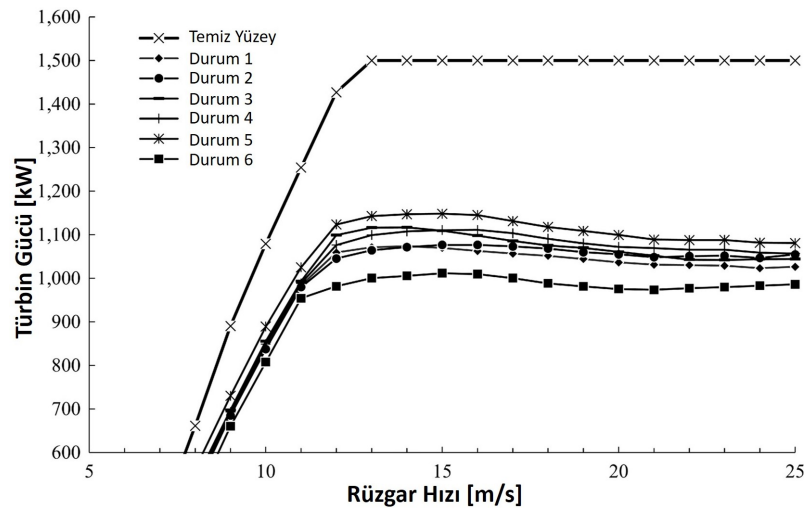
Etemaddar vd. (2014), NACA 64-618 kanat profilinin buzlanma durumundaki akışı numerik olarak incelemiş ve ayrıca rüzgar tüneli testleri ile numerik analiz sonuçları kıyaslamışlardır. Araştırmacılar öncelikle hücum açısı, bağıl rüzgar hızı, veter uzunluğu ve veter kalınlığı, gibi parametrelere göre oluşan buzlanma tiplerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri buzlanma tiplerini literatürdeki başka bir çalışmadan (Papadakis vd., 2003) yola çıkarak hücum kenarından itibaren ilk %25'lik kısma uygulamışlardır. Çalışmanın sonucunda sürüklenme katsayısının Şekil 4.4'te görüldüğü gibi buzlanma tipine bağlı olarak değiştiği ve hücum açısı pozitif veya negatif yönde arttığında yükseldiğini gözlemlemişlerdir.

Imran vd. (2016) tarafından yapılan bir çalışmada, rüzgar türbini kanatları üzerinde biriken buzun etkisiyle meydana gelen aerodinamik değişiklikler deneysel olarak

araştırılmıştır. 5 MW gücündeki bir türbinin aynı kanat profili 3 farklı buzlanma türlerinin etkisini incelemek için üretilmiştir. 3D yazıcıyla basılan modeller rüzgar tüneli içerisinde test edilmiştir. Kaldırma, sürüklenme ve moment katsayıları ölçülen deneysel verilerden hesaplanmıştır. Kanat eleman momentum (BEM-Blade Element Momentum) teorisine göre çalışan WT-Perf programı ile rüzgar türbininin performansı belirlenmiştir. Sonuçlar buzlu olan kanadın gücünün temiz kanadın gücünden daha az bir değere sahip olduğunu göstermiştir.



Şekil 4.4. Buzlanmanın sürüklenme katsayısı üzerindeki etkisi (Etemaddar vd., 2014).



Şekil 4.5. Buzlanmanın rüzgar türbini performansı üzerindeki etkisi (Blasco vd., 2017).

Blasco vd. (2017), farklı buzlanma tiplerinin türbin performansı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemiştir. Araştırmacılar çalışmalarında DU 93-W-210

kanadını kullanmışlardır. Elde ettikleri kanat modelini 45 dakika boyunca buzlanmaya maruz bırakmışlar ve altı farklı buzlanma tipi elde etmişlerdir. Daha sonra buzsuz ve buzlu kanat profillerini rüzgar tüneline deneysel olarak incelemişlerdir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi buzlanma sonucunda türbin gücünde azalma gözlemlenmiştir.

4.4. Aşınma

Rüzgar türbinlerinde karşılaşılan bir diğer pürüzlülük kaynağı da aşınmadır. Rüzgar türbinlerinde aşınma rüzgarın içinde taşıdığı çeşitli partiküller nedeniyle özellikle kanatların hücum kenarı olarak adlandırılan bölgede meydana gelmektedir. Bu sorun da türbin kanadının aerodinamik yapısını bozduğundan akışı etkilemektedir.

Aşınma ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Sareen vd. (2014), hücum kenarı üzerindeki aşınmanın etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Hücum kenarındaki erozyonun rüzgar türbini performansına etkisinin araştırıldığı deneyler ses altı rüzgar tüneline yapılmıştır. Kanat profili olarak DU-96-W-180 kullanılmıştır. Kanat profili üzerinde hücum kenarındaki aşınmanın hem tipi hem de aşınmanın şiddeti göz önüne alınarak 3 farklı tip aşınma modellenmiştir. Araştırmacılar sonuç olarak hücum kenarında meydana gelen aşınmanın şiddetine göre rüzgar türbininin enerji üretiminde yıllık %25'e varan düşüşlerin meydana gelebileceğini ifade etmişlerdir.

Bir başka deneysel çalışmada da araştırmacılar aşınma derinliğinin etkilerini incelemişlerdir. Farklı aşınma (pürüzlülük) türleri su jeti ile kesilerek ince yapışkanlı filmlere aktarılmıştır. Toplamda beş farklı pürüzlülük modeli kullanılmıştır. Testler açık çevrimli rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Biri %18 kalınlığında Vestas türbinine, diğeri %18 kalınlığında Risø türbinine ait iki kanat profili test edilmiştir. Sonuçlarda tüm aşınma türlerinin, kaldırma katsayısını azalttığı ve sürüklenme katsayısını artırdığı dolayısıyla her iki kanat profilinin performansını düşürdüğü görülmüştür (Gaudern, 2014).

Maniaci vd. (2016), gerçek bir rüzgar türbin kanadında meydana gelen aşınma değerlerini ölçerek bu değerleri deneylerde kullanmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları deneyler neticesinde aşırı derecede aşınmış bir rüzgar türbini kanadının, yıllık enerji üretimini % 5'in üzerinde azaltabileceği sonucuna varmışlardır.

4.5. Diğer Pürüzlülük Çalışmaları

Önceki başlıklar altında türbin kanatlarının yüzeyinde çeşitli nedenlerden kaynaklanan pürüzlülüklerden bahsedilmiştir. Ancak literatürde pürüzlülüğü bir nedene dayandırmadan kanat üzerine uygulayarak numerik veya deneysel çalışan başka araştırmalar da mevcuttur.

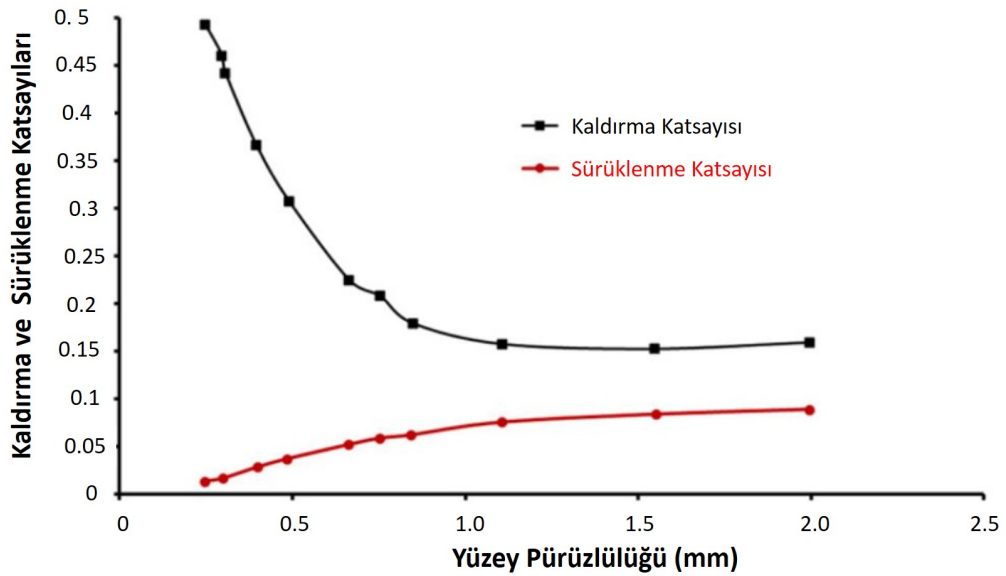
Timmer ve Van Rooij (2003), Delft Teknoloji Üniversitesi tarafından geliştirilen kanat profillerini hem numerik hem de deneysel olarak incelemiştir. DU-91-W2-250, DU-93-W-210, DU-95-W-180, DU-96-W-180, DU-97-W-300 olmak üzere beş farklı kanat profili kullanmışlardır. Pürüzlülük etkisini incelemek için zikzak şeklinde 0.35 mm yüksekliğinde pürüzlülük elemanı kanadın üstünde hücum kenarından %5 uzaklıkta olacak şekilde konumlandırılarak kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda maksimum kaldırma-sürüklenme katsayısı oranının hem pürüzsüz hem de pürüzlü durumda DU 96-W-180 kanat profilinde olduğu bildirilmiştir. Ayrıca araştırmacılar pürüzlülüğün uygulandığı kanatlarda daha düşük kaldırma-sürüklenme katsayısı oranının meydana geldiğini gözlemlemiştir.

Chakroun vd. (2004), yüzey pürüzlülüğünün büyüklüğünün ve kanat üzerindeki yerinin, kanadın aerodinamik özellikleri üzerine etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel NACA 0012 simetrik kanat profili kullanılmıştır. Yüzey yapısı pürüzsüzden başlanıp aşırı pürüzlü durumlar için incelenmiştir. Kaldırma, sürüklenme ve basınç katsayıları ölçülmüştür. Yapılan testlerden optimum kaldırma-sürüklenme katsayısı oranının pürüzsüz model için 42.93 olarak 4° hücum açısında, en düşük kaldırma-sürüklenme katsayısı oranının ise tel şeklinde olan pürüzlülük modeli için maksimum 6.11 olarak 8° hücum açısında gerçekleştiği görülmüştür. Araştırmacılar yüzey pürüzlülüğünün büyüklüğünün artmasıyla, sürüklenme katsayısının arttığını, kaldırma katsayısının ise azaldığını bildirmişlerdir. Bununla birlikte yüzey pürüzlülüğünün akış ayrılmasını geciktirdiği ve akış ayrılmasının gerçekleştiği hücum açısında kaldırma katsayısını arttırdığı sonucuna da varılmıştır.

Ferrer ve Munduate (2009), S814 kanadı üzerinde Xfoil 6.96 ve Fluent 12.0.3 Beta olmak üzere iki farklı paket program kullanarak numerik analiz çalışması yapmışlardır. Türbülanslı akış, SST k- ω türbülans modeli kullanılarak modellenmiştir. Pürüzlü uygulamalarda akışın tam olarak türbülanslı olduğu varsayılmıştır. Araştırmacılar her iki

paket programından elde ettikleri sonuçları deneysel veriler ile kıyasladıklarında mevcut sayısal programların pürüzlülüğü modellemede iyi olduğu ancak yüksek hücum açılarında hata paylarının yüksek olabileceği sonucuna varmışlardır.

Li vd. (2010), DU 95-W-180 kanadı üzerinde pürüzlülük boyutu ve yoğunluğunun etkisini numerik olarak inceledikleri çalışmalarında Şekil 4.6'da görüldüğü gibi kaldırma ve sürüklenme katsayılarının büyük ölçüde pürüzlülük yüksekliğinden etkilendiklerini ancak bu katsayıların, belli bir pürüzlülük yüksekliğinden sonra pürüzlülüğünden etkilenmediği sonucuna varmışlardır.



Şekil 4.6. Pürüzlülük yüksekliğinin C_L ve C_D üzerindeki etkisi (Li vd., 2010).

Soltani vd. (2011), yaptıkları çalışmalarında 660 kW'lık bir rüzgar türbini kanadının üzerindeki yayılı kirliliğin türbin performansına nasıl etki ettiğini deneysel olarak incelemişlerdir. Seçilen kanat profili temiz yüzey, zikzak pürüzlülük, şerit pürüzlülük ve yayılı pürüzlülük durumlarında test edilmiştir. Yayılı pürüzlülük 0.5 mm pürüzlülük yüksekliği olacak şekilde tüm üst yüzeye uygulanmıştır. Kirlilikten kaynaklı pürüzlülük gerçekte hücum kenarında kuyruk kenarına oranla 6 kat daha fazla olduğundan hücum kenarından kuyruk kenarına kadar pürüzlülük yoğunluğu National Renewable Energy Laboratory tarafından geliştirilen kirlenme modeline göre değiştirilmiştir. Sonuçlar kanat profili üzerindeki akışın kirliliğe çok duyarlı olduğunu ve maksimum kaldırma katsayısının %35'e kadar azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, yüzey pürüzlülüğünün pürüzsüz

duruma oranla daha yumuşak bir akış ayrılmasına neden olduğu dolayısıyla kaldırma katsayısı eğrisindeki düşüş trendinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. Zikzak şeklindeki pürüzlülük maksimum kaldırma katsayısının düşmesine en az etkiye sahip pürüzlülük olmuştur. Bunu sırasıyla şerit şeklindeki pürüzlülük ve yayılı pürüzlülük takip etmiştir. Buradan da yayılı pürüzlülüğün kaldırma katsayısını en fazla düşüren pürüzlülük tipi olduğu sonucu çıkmıştır.

Darbandi vd. (2014), numerik olarak rüzgar türbini kanadı yüzeyindeki pürüzlülüğü modellemişlerdir. Analizlerden elde edilen aerodinamik katsayıları kullanılarak rüzgar türbininin çıkış gücü hesaplanmıştır. Rüzgar türbini gücünü hesaplamak için BEM teorisi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, pürüzlü bir yüzeye sahip rüzgar türbininin, temiz bir kanat yüzeyine sahip eşdeğer bir rüzgar türbininden daha düşük kaldırma katsayısına sahip olacağını ve belirgin bir şekilde daha az güç üreteceğini göstermiştir. Hesaplamalar sonucunda pürüzlülük durumunda rüzgar türbininin ortalama yıllık enerji üretiminde yaklaşık olarak %25'lik bir düşüşle karşılaşılacağı görülmüştür.

Zhang vd. (2017), pürüzlülüğü inceledikleri çalışmalarında genellikle rüzgar türbin kanatlarının ana güç üretim bölgelerinde kullanılan S834 kanat profilini analiz etmişlerdir. Analizlerde SST k- ω türbülans modelini kullanarak, analizlerin sonucundan elde edilen kaldırma ve sürüklenme katsayılarını rüzgar tüneli testlerinden elde edilen değerler ile karşılaştırmışlardır. Kanat üzerindeki pürüzlülüğü zikzak şeklinde kullanmışlar ve konumunu alt ve üst yüzeylere hücum kenarından %2c ve %5c uzakta olacak şekilde yerleştirmişlerdir. Araştırmacılar kaldırma ve sürüklenme katsayılarının duyarsız olduğu pürüzlülük yüksekliği sınırını 0.5 mm olarak gözlemlemişlerdir.

Jafari vd. (2017), numerik olarak yaptıkları çalışmalarında kum taneciği olarak adlandırılan pürüzlülüğü kanadın sadece basınç yüzeyi, sadece vakum yüzeyi ve bu yüzlerin her ikisine aynı anda yayılı pürüzlülük olarak uygulamışlardır. Analizler açık kaynak kodlu OpenFOAM yazılımında SIMPLE algoritması ile çözülmüştür. Sonuçlar önceki çalışmaların tersine pürüzlülüğün, kanadın sadece basınç tarafına uygulanırsa kaldırma katsayısı açısından yararlı olabileceğini göstermiştir. Bu durumda, kaldırma katsayısında çalışmadaki diğer pürüzlülük durumlarına göre %8.62'ye varan yükselme görülmüştür. Basınç tarafına uygulanan pürüzlülük temiz kanat profiline göre kaldırma katsayısında % 1.2 artış sağlamasına rağmen türbinin güç katsayısındaki en yüksek değer pürüzsüz

durumda elde edilmiştir ve tüm pürüzlülük durumlarının türbin performansına etkisinin negatif olduğu bildirilmiştir.

Özçakmak vd. (2018), yüzey pürüzlülüğünün ve deneylerin yapıldığı rüzgar tünelineki iç akış türbülansının kanat üzerindeki akışın laminardan türbülansa geçişini nasıl etkilediğini deneysel olarak incelemişlerdir. Rüzgar tüneli içerisinde NACA 63-418 kanat profili kullanılarak deneyler yapılmıştır. Deneyler normal yatay eksenli bir rüzgar türbininin çalışma koşullarındaki Reynolds sayısı aralığında ($1.6 \times 10^6 - 6 \times 10^6$) yapılmıştır. Kanadın üst yüzeyinde hücum kenarının yakınına 90° açılı zikzak şeklinde ve tümsek şeklinde pürüzlülük uygulanmıştır. Analizlerin sonucunda farklı hücum açılarında hücum kenarı yüzey pürüzlülüğünün kritik yüksekliğinin, kanadın üstünde türbülansa geçişi geciktirebileceği görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğünün yüksekliği kritik seviyeden küçük olduğunda türbülanslı akışa geçiş Reynolds sayısı arttıkça daha öne gelerek hücum kenarına yaklaşmıştır. Deneylerden elde edilen verilere göre gelen hava akımı içerisindeki türbülans yoğunluğunun da, kanat üzerindeki akışın türbülansa geçtiği konuma önemli ölçüde etki ettiği görülmüştür.

Zhang (2018), farklı boyutlarda ve dağılım yoğunluğunda yayılmış yarım küre pürüzlülüğünün bir GA(W)-1 kanat profilinin performansı üzerindeki etkilerini incelemek için deneyler yapmışlardır. Çeşitli hücum açıları ve farklı Re sayıları altında yüzey basıncı ölçümü ve parçacık görüntüleme hız ölçümü (Particle Image Velocimeter- PIV) yapılmıştır. Pürüzlülük yüksekliği olarak iki farklı pürüzlülük yüksekliği 0.25 mm ve 0.5 mm kullanılmıştır. Hücum kenarı pürüzlülüğü uygulanan tüm durumlarda kaldırma katsayısında belirgin bir azalma meydana gelirken, sürüklenme katsayısında önemli ölçüde bir artış gözlemlenmiştir. Pürüzlülüğün dağılım şekli pürüzlülük yüksekliği ile kıyaslandığında pürüzlülüğün dağılım şeklinin kaldırma katsayısının düşmesinde daha önemli bir faktör olduğu bulunmuştur. Ayrıca, daha büyük pürüzlülüğün aerodinamik akış ayrılmasını ilerletirken, daha küçük pürüzlülüğün ise yüksek hücum açılarında akış ayrılmasını önleme eğiliminde olduğu görülmüştür. Ayrıca PIV sonuçları türbülanslı akışı, karışık dağılıma sahip pürüzlülük modelinin düzgün hizalı bir dağılıma sahip pürüzlülük modelinden daha fazla tetiklediğini göstermiştir. Sonuçlar, büyük eleman boyutlarına sahip yayılı hücum açısı pürüzlülüğünün özellikle aerodinamik performanslara negatif etki ettiğini göstermiştir. Ayrıca sonuçlar küçük eleman boyutlarına sahip pürüzlülük modelinin yüksek hücum

açılarındaki akış ayrılmasını azaltacak pasif bir kontrol mekanizması görevi görebileceğini göstermiştir.

Kruse vd. (2018), bir türbin kanadının hücum kenarına zikzak şeklinde pürüzlülük uygulamışlardır. Aerodinamik özelliklerdeki değişiklikleri değerlendirmek için iki boyutlu ve üç boyutlu numerik analizler ve rüzgar tüneli testleri yapılmıştır. Kanat profili olarak NACA 63-418 kullanılmıştır. Üç boyutlu numerik simülasyonlar çok fazla hesaplama süresi gerektirdiğinden, iki boyutlu simülasyonun yeterli bir doğruluk düzeyi sağlayıp sağlamadığı araştırılmıştır. Zikzak pürüzlülükler kanadın basınç tarafında $x/c = 0.1$ 'e, vakum tarafında ise $x/c = 0.02$ 'ye yerleştirilmiştir. Zikzak pürüzlülük elemanlarının yüksekliğinin 0.4 mm, genişliğinin 7 mm olduğu bildirilmiştir. Simülasyonlar rüzgar tüneli testleriyle karşılaştırılmış ve sonuçlarda genel olarak iyi bir uyuma görülmüştür. İki boyutlu ve üç boyutlu simülasyonlar arasındaki farklar, özellikle sürüklenme katsayısının üç boyutlu simülasyonlarda daha iyi tahmin edilmesinden kaynaklanmıştır. Ancak, daha düşük hesaplama süresi ve daha az ağ yapısı karmaşıklığı, iki boyutlu yapılan simülasyonların daha kullanışlı olduğunu göstermiştir. Sonuçlar, üç boyutlu analizler yerine iki boyutlu analizleri yapmanın yeterli olabileceğini göstermiştir.

5. NUMERİK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada bir rüzgar türbini kanadı etrafındaki akış Ansys Fluent programı kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada akışın iki boyutlu olduğu kabul edilmiştir. Ertafındaki akışın incelendiği kanat profili olarak Hochart vd. (2008) tarafından da belirtildiği gibi ticari rüzgar türbinlerinde sıklıkla tercih edilen NACA 63 serisi kanatlarından NACA 63-415 kanat profili kullanılmıştır. HAD çözümlerine başlamadan önce kanat profili koordinat noktalarına göre oluşturulmuştur. Hesaplama bölgesi de oluşturulduktan sonra hesaplama bölgesinin küçük ağ elemanlarına bölündüğü ayrıklaştırma işlemi yapılmıştır. Analiz sonuçlarının oluşturulan ağ yapısından bağımsız olup olmadığı ağ bağımsızlık testleri yapılarak incelenmiş ve nihai ağ yapısı elde edilmiştir. Bu işlemden sonra sınır koşulları tanımlanarak çözümlere geçilmiştir. Analizler rüzgar türbinlerinin çalışma koşullarında sıklıkla karşılaşılan ve literatürde genellikle çalışılan Reynolds sayısı aralığı olan $10^5 < Re < 3 \times 10^6$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda 6 farklı Reynolds sayısında çalışma yapılmıştır. Buna ek olarak analizler her bir Reynolds sayısında literatürde sıklıkla kullanılan $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ hücum açısı aralığı için gerçekleştirilmiştir. Çalışmada türbülanslı akışın modellenmesinde ilk olarak Spalart-Allmaras ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılmıştır. Bu türbülans modelleri kullanılarak pürüzsüz durumda kanat profilinin en yüksek kaldırma/sürükleme katsayıları oranını (C_L/C_D) verdiği hücum açısı aralığı belirlenmiştir. Daha sonra belirlenen optimum hücum açısı aralığında hem pürüzlü yüzey hem de pürüzsüz yüzey modellemeleri TSST türbülans modeli ile çözülmüştür. Analizlerde kullanılan parametreler toplu olarak Çizelge 5.1'de verilmiştir.

5.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği çağımızda gerek sanayi tarafından gerekse akademi tarafından sıklıkla başvurulan bir metottur. HAD yöntemi akışkanlar dinamiğindeki ana eşitliklerin çözümüne dayanır (Tu vd., 2020). Kullanılan denklemler akışkanın kütle sinin korunduğuna, momentumdaki değişim hızının akışkana etki eden toplam kuvvete eşit olduğuna (Newton'un ikinci yasası), enerjideki değişim hızının akışkana aktarılan ısı ve işin toplamına eşit olduğuna (Termodinamiğin birinci yasası) dayanan denklemlerdir. Belirtilen bu denklemler süreklilik, momentum korunumu

Çizelge 5.1. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizlerinde çalışılan parametreler.

Kanat Profili	NACA 63-415		
Reynolds Sayısı	Pürüzlülük Durumu	Hücum Açısı	Türbülans Modeli
10^5	Pürüzsüz	$0^\circ - 20^\circ$	Spalart-Allmaras, SST k- ω , TSST
	100 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	200 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	300 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	400 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	500 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
5×10^5	Pürüzsüz	$0^\circ - 20^\circ$	Spalart-Allmaras, SST k- ω , TSST
	100 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	200 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	300 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	400 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	500 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
7×10^5	Pürüzsüz	$0^\circ - 20^\circ$	Spalart-Allmaras SST k- ω , TSST
	100 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	200 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	300 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	400 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	500 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
10^6	Pürüzsüz	$0^\circ - 20^\circ$	Spalart-AllmarasSST k- ω , TSST
	100 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	200 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	300 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	400 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	500 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
1.6×10^6	Pürüzsüz	$0^\circ - 20^\circ$	Spalart-Allmaras SST k- ω , TSST
	100 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	200 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	300 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	400 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	500 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
3×10^6	Pürüzsüz	$0^\circ - 20^\circ$	Spalart-Allmaras SST k- ω , TSST
	100 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	200 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	300 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	400 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST
	500 μm	Optimum Hücum Açıları	TSST

(Navier-Stokes) ve enerjinin korunumu denklemleridir. HAD çözümlerinde bahsedilen bu ana denklemler geometriye ve sınır koşullarına göre çözümlenerek sonuçlar elde edilir.

Akışkanların olduğu her uygulamada ve araştırmada problemlerin çözümünde büyük katkı sağlayan HAD yöntemi problemin karmaşıklığı arttıkça elle çözülemeyecek duruma gelir. Bundan dolayı HAD analizi yapmak için çeşitli yazılımlar karmaşık problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. HAD analizi yazılımları temel denklemleri farklı yöntemler kullanarak ayrıklaştırır ve problemin çözümünü bu şekilde elde eder. Denklemlerin ayrıklaştırılmasında başlıca sonlu farklar yöntemi, sonlu elemanlar yöntemi ve sonlu hacimler yöntemi kullanılır. Bu yöntemlerle çözülen denklemler belli bir yakınsama kriterinin altındaki hata payına ulaştığında problemin çözümünü verirler. Bu yöntemler içinde HAD analizlerinde en çok kullanılanı sadece düzenli çözüm ağlarında değil aynı zamanda düzensiz ağ yapılarında da kolaylıkla çözüm elde edilmesini sağladığından sonlu hacimler yöntemidir ve HAD için geliştirilen ticari yazılımlar genellikle sonlu hacimler yöntemini baz alarak oluşturulur (Tu vd., 2020).

Sonlu hacimler yöntemi korunum denklemlerinin integral formunu doğrudan fiziksel uzayda ayrıklaştıran bir yöntemdir. Bu yöntem oluşturulan hesaplama bölgesini sonlu sayıda hacimsel elemanlara bölme mantığıyla çalışır. Elde edilen her kontrol hacminde özelliklerin tam korunumu ifade edilerek merkez noktada değişken değerleri hesaplanır. Kontrol hacmi yüzeylerindeki değerler ise merkezdeki değerden faydalanılarak interpolasyon yoluyla belirlenir. Hacim ve yüzey integrallerinin yaklaşık olarak elde edilebilmesi için 2. dereceden eşitliklerden yararlanır. Bu işlemler sonucunda komşu elemanların düğüm noktalarının değerlerini kapsayan cebirsel bir eşitlik elde edilir. Bu eşitlikler sayesinde problem çözümlenerek sonuçlar elde edilir.

5.2. Numerik Model

Çalışmada belirtildiği üzere rüzgar türbini kanat profili etrafındaki akış farklı Reynolds sayılarında ve hücum açılarında iki boyutlu olarak incelenmiştir. Akışın incelenmesine başlamadan önce ilk olarak fiziksel geometrinin oluşturulması gerekmektedir. Bundan dolayı kanat profili ve hesaplama bölgesinin oluşturulması yapılmıştır. Daha sonra elde edilen geometri ağ yapılarına bölünerek denklemlerin sonlu

hacimler yöntemi ile çözülebilecek hale gelmesi sağlanmıştır. Daha sonra sınır koşulları tanımlanarak sonuçlar elde edilmiştir.

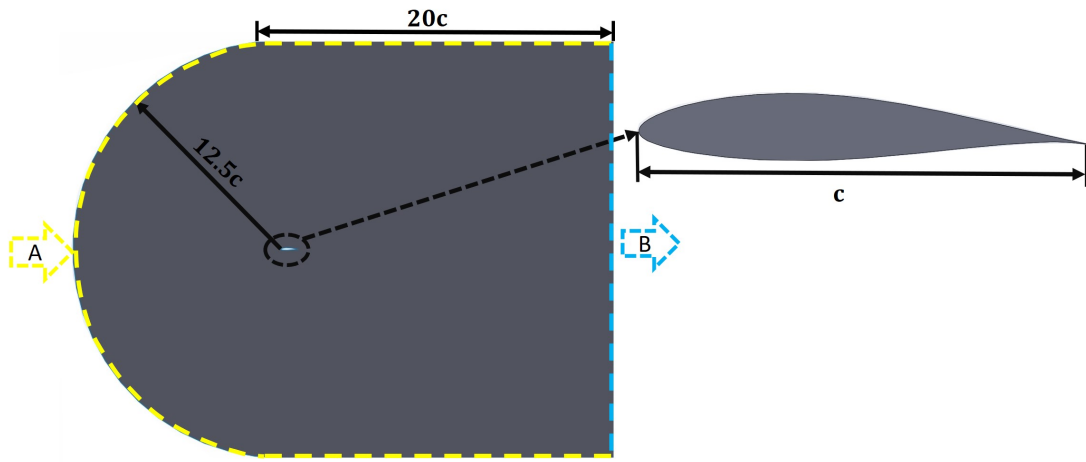
5.2.1. Hesaplama bölgesinin oluşturulması

Analizlere başlamadan önce hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Hesaplama bölgesini oluşturmaya seçilen kanat profilinden başlanmıştır. İyi bir rüzgar türbini tasarımı için ilk olarak iyi bir kanat profili belirlenmesi gerekmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan rüzgar türbinlerinin kanat bölümleri ya NACA kanat profilinden oluşmaktadır ya da NACA kanat profili araştırmalarından büyük ölçüde etkilenmiştir (Abbott ve Von Doenhoff, 2012). Bu kanat profillerinin son derece popüler olmasının ana sebebi Ulusal Havacılık Danışma Kurulu (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA) tarafından 1930'larda gerçekleştirilmiş yüksek kaliteli deneysel verilerin mevcut olmasıdır (Burton vd., 2011). NACA kanat profillerinin çeşitli serileri mevcuttur. Bu çalışmada ise NACA 6 serisi kanat profillerinden olan NACA 63-415 kanat profili kullanılmıştır. NACA 63-415 kanat profili akış ayrılması açısından iyi bir karakteristiğe sahip olduğu kanıtlanmış bundan dolayı küçük uçaklarda ve akış ayrılması kontrollü rüzgar türbinlerinde sıklıkla kullanılmıştır (Hansen, 2015). Kanat profilindeki isimlendirmede kullanılan sayıların her biri kanadın bir özelliğini ifade etmektedir. NACA 63-415 kanat profili için isimlendirmedeki sayılardan; birinci sayı kanadın serisini (6), ikinci sayı minimum basınç alanını veterin yüzdesinin on katı cinsinden gösterimini (3), üçüncü sayı tasarım kaldırma katsayısının on katını (4), dördüncü ve beşinci sayılar kanat profilinin maksimum kalınlığının veter uzunluğuna oranının yüzdesini ifade etmektedir. (15) (Abbott ve Von Doenhoff, 2012; Kuethe ve Chow, 1986).

Kanat profilinin oluşturulması için ilk olarak kanadın koordinatları elde edilmiştir. Çizelge 5.2'deki koordinat noktaları kullanılarak kanat profili oluşturulmuştur. Daha sonra kanat profilinin etrafındaki akış alanı oluşturulmuştur. Akış alanı oluşturulurken kanat profilinin serbest akışı etkilemeyeceği kadar büyük bir hesaplama bölgesi meydana getirilmiştir. Şekil 5.1'deki gibi kanadın veter uzunluğu c olmak üzere yarım dairenin yarıçapı $12.5c$, dikdörtgen uzunluğu $20c$ ve dikdörtgen yüksekliği $25c$ olacak şekilde iki boyutlu hesaplama bölgesi oluşturulmuştur. Bu yaklaşımı yaparken Zidane vd. (2017) tarafından yapılan çalışma baz alınmıştır.

Çizelge 5.2. NACA 63-415 kanat profilinin koordinat noktaları (Airfoil Tools, 2019).

Nokta Sırası	Koordinat		Nokta Sırası	Koordinat	
	x/c	y/c		x/c	y/c
1	0.0000	0.0000	27	0.0000	0.0000
2	0.0030	0.0129	28	0.0070	-0.0109
3	0.0053	0.0159	29	0.0098	-0.0131
4	0.0099	0.0207	30	0.0151	-0.0165
5	0.0220	0.0296	31	0.0280	-0.0222
6	0.0466	0.0426	32	0.0534	-0.0300
7	0.0715	0.0526	33	0.0785	-0.0357
8	0.0965	0.0608	34	0.1035	-0.0401
9	0.1467	0.0735	35	0.1533	-0.0466
10	0.1971	0.0828	36	0.2030	-0.0510
11	0.2475	0.0894	37	0.2525	-0.0536
12	0.2980	0.0936	38	0.3020	-0.0547
13	0.3485	0.0956	39	0.3515	-0.0544
14	0.3991	0.0953	40	0.4010	-0.0524
15	0.4496	0.0929	41	0.4505	-0.0491
16	0.5000	0.0887	42	0.5000	-0.0446
17	0.5504	0.0830	43	0.5496	-0.0392
18	0.6007	0.0760	44	0.5993	-0.0331
19	0.6509	0.0678	45	0.6491	-0.0266
20	0.7011	0.0588	46	0.6989	-0.0199
21	0.7511	0.0491	47	0.7489	-0.0133
22	0.8010	0.0390	48	0.7999	-0.0072
23	0.8509	0.0289	49	0.8492	-0.0019
24	0.9006	0.0188	50	0.8994	0.0018
25	0.9503	0.0093	51	0.9497	0.0033
26	1.0000	0.0000	52	1.0000	0.0000

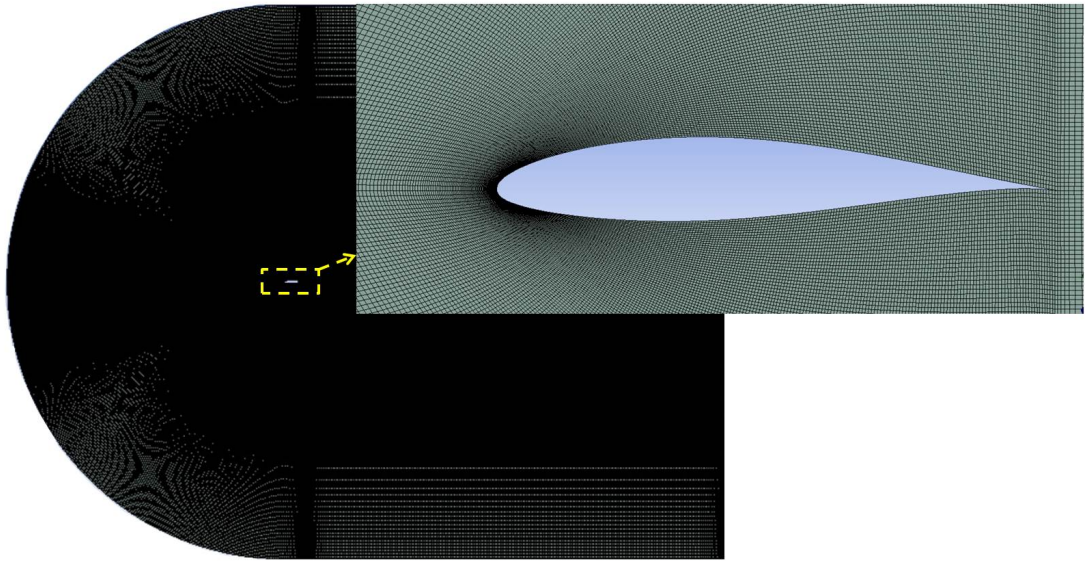


Şekil 5.1. Hesaplama bölgesi ve sınır koşulları.

5.2.2. Ağ yapısının oluşturulması

Hesaplama bölgesi oluşturulduktan sonra ağ yapısı oluşturma işlemine geçilmiştir. Ağ yapısı oluşturulması analizlerin yapılabilmesi için gerçekleştirilen bir ayrıklaştırma işlemidir. Ağ yapısı ana olarak dikdörtgensel elemanlar içeren düzgün dizilimli veya üçgensel elemanlar içeren dağınık dizilimli olabilir. Düzgün dizilimli ağ yapısı çözülecek denklem sayısını düşürdüğü için analiz sürelerini kısaltır. Bundan dolayı bu çalışmada ve buna benzer birçok çalışmada düzgün yapılı C-tipi ağ yapısı kullanılmıştır. Çalışmada kanat üzerinde oluşacak sınır tabakanın hassas bir şekilde çözümlenebilmesi ve kanadın arkasında oluşacak girdapların yakalanabilmesi için hem kanat etrafına hem de kuyruk arkasında kalan bölgeye daha ince ağ yapısı oluşturulmuştur. Ağ yapısı, sonraki bölümlerde değinilecek olan iteratif bir süreci ifade eden ağ bağımsızlık testlerine tabi tutulmuştur. Yapı sürekli değiştirilerek en uygunu elde edilmeye çalışılmıştır. Ağ bağımsızlık testleri sonucunda kullanılmasına karar verilen ağ elemanı yapısı Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Ağ yapısı oluşturulurken dikkat edilen bir husus da boyutsuz duvar dik uzaklık y^+ değeridir. Boyutsuz duvar dik uzaklığı Eşitlik 5.1’deki gibi ifade edilir. Burada y duvardan olan dik uzaklığı, ρ akışkan yoğunluğunu, μ dinamik viskoziteyi, u_τ ise duvar sürtünme hızını göstermektedir. Duvar sürtünme hızı $u_\tau = \sqrt{\tau/\rho}$ olarak da tanımlanabilir. Burada kayma gerilmesi $\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y}$ olarak ifade edilmektedir.

$$y^+ = \frac{y\rho u_\tau}{\mu} \quad (5.1)$$



Şekil 5.2. Analizlerde kullanılan ağ yapısı.

Şekil 5.2’de verilen ağ yapısı bahsedilen y^+ değerinin 1 ile 5 arasında kalmasına dikkat edilerek oluşturulmuştur. Boyutsuz duvardan olan dik uzaklık y^+ değerinin bu sınırlar arasında kalması literatürde de belirtildiği gibi sınır tabakanın hassas bir şekilde çözümlenmesini sağladığından analizlerde bu husus göz önüne alınmıştır (Salem vd., 2013). Sonuç olarak ileriki bölümde değinilecek olan ağ bağımsızlık testinden sonra kullanılmaya karar verilen ağ yapısının ana özellikleri Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Ağ yapısının özellikleri.

Ağ Elemanı Sayısı	Maksimum En-Boy Oranı	Maksimum Çarpıklık	Diklik Kalitesi	y^+
354501	17.43	0.55	0.987	3.83

Ağ yapısı özelliklerinde belirtilen maksimum en boy oranı ağ elemanının en uzun kenarının en kısa kenarına olan oranını ifade eder. Bu değer en ideali 1 olmasıdır. En boy oranı için tam olarak bir üst sınır olmamakla beraber yakınsama konusunda sıkıntı yaşanmadığı müddetçe 40’a kadar çıkabilmektedir. Bu çalışmada üretilen ağ yapısı için 17.43 değerindeki en boy oranı herhangi bir yakınsama sorunu ortaya çıkarmamıştır. Çarpıklık, ağ elemanı kalitesi ölçümü için dikkat edilmesi gereken diğer bir parametredir.

Çarpıklık bir ağ elemanının eğer üçgen ise eşkenar üçgene, eğer dörtgensel ise kare veya dikdörtgene ne kadar yakın olduğunun bir göstergesidir. Çarpıklık 0 ile 1 arasında değişir. Çarpıklığın 0 olması durumu en ideal durumu ifade eder 1 ise oluşturulan ağ elemanının kötü olduğunu gösterir. Literatürde 0.75'e kadar olan çarpıklık kabul edilebilir seviye olarak görülmüştür (ANSYS Inc., 2013). Bu çalışmadaki maksimum çarpıklık ise 0.55 olduğundan ağ yapısı çarpıklık bakımından kabul edilebilir sınırlar içerisinde. Diklik kalitesi komşu iki ağ elemanı arasındaki açının en ideal olan 90°'ye ne kadar yakın olduğunun göstergesidir. Bu değer 0 (en kötü) ile 1 (en iyi) arasında değişir. Bu çalışmada ağ yapısında ortalama diklik kalitesi 0.987 olarak ideale yakın bir şekilde elde edilmiştir. Oluşturulan ağ yapısındaki en düşük diklik kalitesi ise 0.63 olarak elde edilmiş ve bu değer de Alter (2004) tarafından belirtildiği gibi genellikle ayrıklaştırma işlemlerinde elde edilen ağ elemanlarının sahip olduğu diklik kalitesi aralığı 0.6-0.8'e denk geldiğinden kabul edilebilir seviyelerdedir.

5.2.3. Akışın çözümlenmesi

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra akışın çözümlenebilmesi için gerekli sınır koşullarının, akışkan özelliklerinin, akış tipinin, çözüm metotlarının seçilmesine geçilmiştir. Kanat üzerindeki akışı incelemek için sürekli rejim, iki boyutlu, viskoz ve sıkıştırılmaz akış göz önüne alınmıştır. HAD analizleri bu kabuller ışığı altında yürütücü denklemler olarak adlandırılan, sırasıyla Eşitlik 5.2 ve 5.3'te verilen momentum korunumunu ifade eden Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) ve süreklilik denklemlerini çözümlenmiştir. RANS ve süreklilik denklemleri düşük Reynolds sayılarında ($10^5 - 2.5 \times 10^5$) basınç tabanlı ayrık, yüksek Reynolds sayılarında ($5 \times 10^5 - 3 \times 10^6$) ise basınç tabanlı bağlaşıklık çözümlenme algoritmalarıyla analiz edilmiştir.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i' u_j'}) \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (5.3)$$

Burada ρ akışkanın ortalama yoğunluğunu, p ortalama basıncını, μ dinamik viskoziteyi, $(-\rho \overline{u_i' u_j'})$ Reynolds gerilmelerini ifade etmektedir. Bu çalışmada akış sürekli rejimde ve türbülanslı olarak göz önüne alınıp çözüleceğinden Navier-Stokes denklemleri yerini Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerine bırakmıştır. Bu denklem içerisindeki Reynolds gerilmelerinin iyi bir türbülans modellemesi için uygun şekilde ifade edilmeleri gerekir. Genellikle Reynolds gerilmelerinin ortalama hız gradyanı cinsinden ifade edildiği Boussinesq hipotezi yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır (Hinze, 1975). Reynolds gerilmeleri hız gradyanı cinsinden Eşitlik 5.4'teki gibi ifade edilirler.

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij} \quad (5.4)$$

Burada μ_t türbülans (girdap) viskozitesini, k ise türbülans kinetik enerjisini ifade eder ve Reynolds ortalamalı Navier-Stokes denklemlerinin çözülebilmesi için bu terimlerin ek taşınım denklemleri kullanılarak belirlenmesi gerekir. Bunun için de türbülans modelleri kullanılır. Türbülanslı akışın çözümlenmesi için Doğrudan Sayısal Simülasyon (Direct Numerical Simulation, DNS) ya da Büyük Girdap Simülasyonu (Large Eddy Simulation, LES) gibi yöntemler mevcuttur. Ancak DNS ve LES çözümlenmeleri yüksek işlemcili bilgisayarlar ve uzun çözüm süreleri gerektirdiğinden, türbülanslı çözmek yerine türbülanslı modellemek araştırmacılar tarafından sıklıkla çalışılmıştır. Türbülansın modellenmesinde akış içerisindeki türbülans girdaplarının yol açtığı artan karışım ve difüzyon oranlarını dikkate alacak matematiksel modeller kullanılmıştır (Çengel ve Cimbala, 2012). Bu çalışmada türbülanslı akışın çözümlenmesi için yürütücü denklemlerin yanı sıra Spalart-Allmaras, SST $k-\omega$ ve TSST türbülans modelleri kullanılmıştır. Çalışmada öncelikle optimum hücum açısı aralığını belirlemek için Spalart-Allmaras ve SST $k-\omega$ türbülans modelleri, daha sonra belirlenen optimum hücum açısı aralığında pürüzlülük etkilerini inceleyebilmek için TSST türbülans modeli kullanılmıştır.

5.2.3.1. Spalart-Allmaras türbülans modeli

Spalart Allmaras türbülans modeli kinematik girdap (türbülans) viskozitesi için tasarlanmış taşınım denklemini çözen bir denklemlerli türbülans modelidir. Diğer bir denklemlerli türbülans modellerinden farklı olarak aerodinamik akışlar için pratik ve daha

yüksek doğruluğa sahiptir. Dolayısıyla da özellikle havacılık ve uzay uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Bu türbülans modeli ters basınç gradyanlarına maruz kalan sınır tabaka çözümlerinde iyi sonuçlar vermektedir (Wilcox, 2006). Bu tarz sınır tabaka ayrılmalarına kanat profilleri üzerindeki akışlarda da genellikle rastlanmaktadır. Spalart-Allmaras türbülans modelinin çözdüğü taşınım denklemi $\tilde{\nu}$ olarak gösterilen bir değişkeni barındırır. Daha önce bahsedilen türbülans viskozitesi μ_t ile $\tilde{\nu}$ arasında Eşitlik 5.5'teki gibi bir ilişki vardır.

$$\mu_t = \rho \tilde{\nu} f_{v1} \quad (5.5)$$

Spalart-Allmaras türbülans modeli tek denklemlidir bir türbülans modeli olduğundan Eşitlik 5.4'teki k Reynolds gerilmelerinin tahmininde ihmal edilir. Bu durumda sürekli rejimde $\tilde{\nu}$ için taşınım denklemi Eşitlik 5.6'daki gibi olur.

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \tilde{\nu} u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ (\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right)^2 \right] - Y_v + S_{\tilde{\nu}} \quad (5.6)$$

Burada G_v türbülans viskozitesinin üretim terimini, Y_v türbülans viskozitesinin yıkım terimini, ν moleküler kinematik viskoziteyi, $S_{\tilde{\nu}}$ ise kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimini ifade eder ve $S_{\tilde{\nu}}$ girdabın büyüklüğüne bağlıdır. Bunlara ek olarak denkleminde varsayılan değerleri sırasıyla $\sigma_{\tilde{\nu}} = 2/3$ ve $C_{b2} = 0.622$ olan katsayılar da vardır (Spalart ve Allmaras, 1992).

5.2.3.2. SST k- ω türbülans modeli

SST k- ω türbülans modeli türbülans kinetik enerjisi (k) için bir, spesifik yayılma oranı (ω) için de bir olmak üzere toplamda iki taşınım denklemi çözen bir türbülans modelidir (Wilcox, 2006). SST k- ω türbülans modeli Menter (1994) tarafından ortaya atılan ve k- ϵ ile k- ω türbülans modellerini başarılı bir şekilde birleştiren bir türbülans modelidir. Bu birleşim türbülans modeline duvara yakın viskoz bölgede k- ω modelini, serbest akış bölgesinde ise k- ϵ modelini çözmeye olanağı tanır. SST k- ω türbülans modeli sınır tabakadaki ters basınç gradyanlarını ve akış ayrılmasını tahmin etmede standart k- ω türbülans modelinden daha etkilidir (Özkan vd., 2017). Bu türbülans modelinin sırasıyla k ve ω için çözdüğü taşınım denklemleri Eşitlik 5.7 ve 5.8'de verilmiştir. Burada G_k

türbülans kinetik enerjisinin (k) üretimini, G_ω spesifik yayılma oranının (ω) üretimini belirtir. Γ_k ve Γ_ω etkin yayılma gücünü, Y_k ve Y_ω ise sırasıyla k ve ω 'nın yayılmasını ifade eder. S_k ve S_ω kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimleridir. D_ω çapraz yayılımı belirtir. Eşitlik 5.7 ve 5.8'de görülen etkin yayılma gücü ifadeleri (Γ_k ve Γ_ω) yukarıda bahsedilen k- ϵ ile k- ω türbülans modellerinin arasındaki geçişi sağlayan terimlerdir ve bu iki türbülans modelinin harmanlanmasını sağlarlar (ANSYS Inc., 2013).

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5.8)$$

5.2.3.3. TSST türbülans modeli

TSST (Transition Shear Stress Transport) türbülans modeli SST k- ω türbülans modeline iki taşınım denkleminin daha eklenmesi temeline dayanır. Bu türbülans modeli deneysel korelasyonlar baz alınarak Langtry ve Menter (2009) tarafından geliştirilmiştir. Bahsedilen ek taşınım denklemlerinden birisi aralıklılık (γ) diğeri ise momentum kalınlığı Reynolds sayısı (\tilde{Re}_{θ_t}) cinsinden başlangıç kriteridir. Aralıklılık akışın titreşimli yani türbülanslı olup olmadığını gösteren bir değişkendir. Aralıklılık teriminin $\gamma = 1$ olması akışın türbülanslı, $\gamma = 0$ olması ise akışın laminar olduğunu ifade eder. Aralıklılık teriminin $0 < \gamma < 1$ arasında olması ise akışın laminardan türbülansa geçiş bölgesinde olduğunu gösterir. Aralıklılık ve momentum kalınlığı Reynolds sayısı (\tilde{Re}_{θ_t}) için taşınım denklemleri sırasıyla Eşitlik 5.9 ve 5.10'da verilmiştir. Denklemlerdeki katsayılar ve buraya kadar bahsedilmiş olan tüm türbülans modellerinin detaylarına çalışmanın sadeliği açısından burada değinilmemiştir ancak detaylı bilgi için ANSYS Inc. (2013) kaynağından yararlanılabilir.

$$\frac{\partial(\rho\gamma)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \gamma)}{\partial x_j} = P_{\gamma 1} - E_{\gamma 1} + P_{\gamma 2} - E_{\gamma 2} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\gamma} \right) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j} \right] \quad (5.9)$$

$$\frac{\partial(\rho \tilde{Re}_{\theta_t})}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \tilde{Re}_{\theta_t})}{\partial x_j} = P_{\theta_t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_{\theta_t} (\mu + \mu_t) \frac{\partial \tilde{Re}_{\theta_t}}{\partial x_j} \right] \quad (5.10)$$

5.2.3.4. Sınır koşulları

Çalışmada kullanılacak türbülans modelleri belirlendikten sonra akışkan seçimi yapılmıştır. Akışkan olarak seçilen havanın termofiziksel özellikleri için deniz seviyesindeki özellikler göz önüne alınarak $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.802 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$ olarak tanımlanmıştır. Daha sonra sınır koşulları uygulanmıştır. Şekil 5.1'de A ile gösterilen bölgeye Reynolds sayısı $10^5 - 3 \times 10^6$ aralığında olacak şekilde hava hızı tanımlanmıştır. Farklı hücum açılarındaki çalışabilmek için hava hızı tanımlanırken hızın yönü de x ve y bileşenleri cinsinden girilmiştir. Çalışmada hücum açısı (α) aralığı başlangıçta $0^\circ - 20^\circ$ olarak belirlenmiş daha sonra optimum hücum açısı aralığına odaklanılmıştır. Şekil 5.1'de B ile görülen bölgeye ise çıkış basıncı tanımlanmıştır. Serbest akış koşulları olduğu için B bölgesine atmosferik basınç anlamına gelen 0 Pa tanımlanmıştır. Son olarak kanadın yüzeyi sabit duvar olarak tanımlanmış ve pürüzsüz durumlarda yüzey pürüzsüzlüğü, pürüzlü durumlarda da $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$, $400 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ olmak üzere 5 farklı yayılı pürüzlülük oluşturulmuştur. Bu şartlar altında çalışma boyunca toplamda 312 analiz yapılmıştır.

Daha önce bahsedilen yürütücü denklemlerin sayısal olarak çözülebilmesi için ayrıklaştırılması gerekir. Farklı ayrıklaştırma yöntemleri olmakla beraber bu çalışmada türevlerin ayrıklaştırılması işlemlerinde "Hücre Tabanlı En Küçük Kareler (Least Squares Cell Based)" kullanılmıştır. Basınç değerlerinin interpolasyon metodu, momentum denkleminin katsayılarını kullanarak yüzeylerdeki basınç değerlerini interpolasyon yapan standart yöntem olarak seçilmiştir. Momentum ve taşınım denklemlerinin ayrıklaştırılması için ise İkinci Dereceden Upwind yöntemi kullanılmıştır.

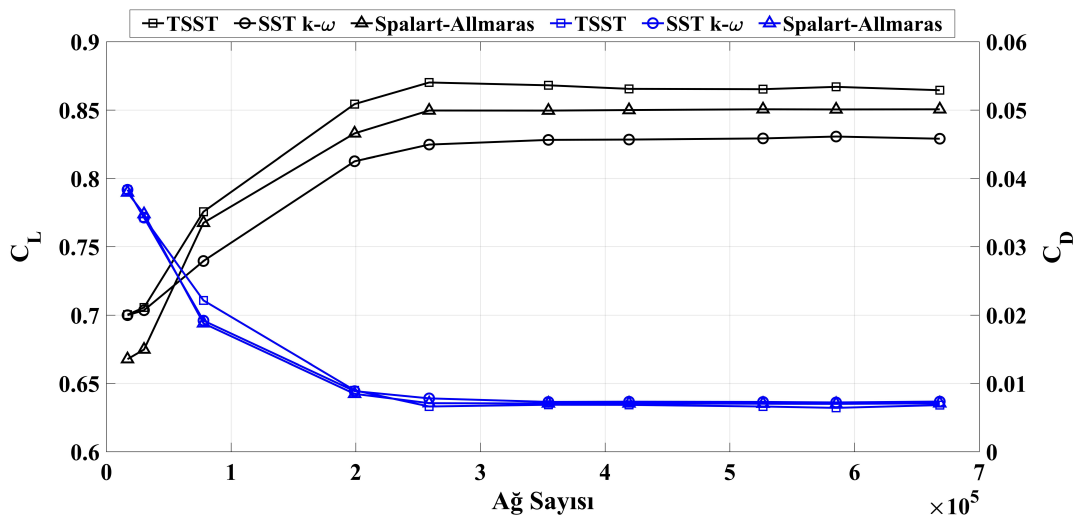
Analizlere başlamadan önce son olarak yapılan hesaplamanın hata payını gösteren yakınsama değerleri belirlenmiştir. Analizlerin yakınsadığını gösterecek hata payı değerleri bir alt sınır ile sınırlandırılmamıştır. Hata payının 10^{-3} altına düşmesi bu çalışmada yakınsama olarak kabul edilmiş ancak buna ek olarak çalışmanın en önemli çıktılarından kaldırma katsayısı (C_L) ve sürüklenme katsayısının da (C_D) iterasyonlar boyunca değişmemeye başladığı durum yakınsama kriteri olarak baz alınmıştır. Yakınsama kriterleri de belirlendikten sonra başlangıç değer ataması da yapılarak analizler çalıştırılmıştır.

6. BULGULAR

Bir numerik çalışmanın hata payı her zaman mevcuttur ancak bu hatayı en aza indirmek, sonuçların güvenilirliğini sağlamak için çoğunlukla ağ bağımsızlık testleri ve analiz sonuçlarının daha önce yapılmış başka çalışmalar ile kıyaslanması sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada da bulguların güvenilirliği açısından öncelikle ağ bağımsızlık testine daha sonra ise sonuçların literatürde bulunan veriler ile kıyaslama yapılmasına değinilecek ve çalışmanın nihai sonuçlarını vermeye bu işlemler sonrasında geçilecektir.

6.1. Ağ Bağımsızlık Testi

Ağ bağımsızlık testi, analizlerin oluşturulan ağ yapısına göre değişmediğini göstermek adına yapılan bir sına yöntemidir. Bu testte analiz edilecek model üzerinde farklı sayılarda elemana sahip ağ yapıları oluşturduktan sonra her bir ağ yapısından elde edilen sonuçlar kıyaslanır. Analiz sonuçlarının değişmemeye başladığı eleman sayısına ulaşıldığında bu yapının sonraki çözümlerde kullanılabileceği sonucuna varılır. Bu çalışmada ağ bağımsızlık testi pürüzsüz NACA 63-415 kanat profili üzerinde gerçekleştirilmiştir. Analizler 5×10^5 Reynolds sayısında ve 5° hücum açısında deniz seviyesindeki hava özellikleri göz önüne alınarak ($\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.802 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$) yapılmıştır. Testlerde Spalart-Allmaras, SST k- ω ve TSST türbülans modelleri kullanılmıştır.

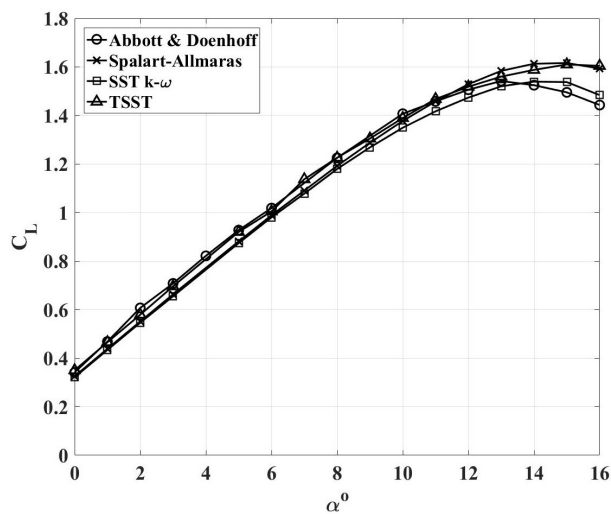


Şekil 6.1. Ağ bağımsızlık testi (siyah veriler kaldırma katsayısını, mavi veriler sürükleme katsayısını göstermektedir).

Yapılan ağ bağımsızlık testinde kıyaslama için göz önüne alınan parametre kaldırma ve sürüklenme katsayıları olmuştur. Analizlere öncelikle az sayıda elemana sahip ağ yapısı ile başlanmıştır. Daha sonra ağ yapısı iyileştirildikçe eleman sayısı da artmıştır. Sonuç olarak Şekil 6.1’de verildiği gibi ağ sayısı yaklaşık 250000’e ulaştığında kaldırma ve sürüklenme katsayılarının hemen hemen sabit kalmaya başladığı görülmüştür. Buradan yola çıkılarak analizlerde kullanılacak yaklaşık 250000 ve üzeri ağ sayısı ile elde edilecek sonuçların ağ yapısından bağımsız olacağı kanaatine varılmıştır. Yapılan ağ bağımsızlık testi sonucunda Şekil 5.2’de gösterilmiş olan 354501 adet elemana sahip ağ yapısının kullanılmasına karar verilmiştir.

6.2. Sonuçların Doğrulanması

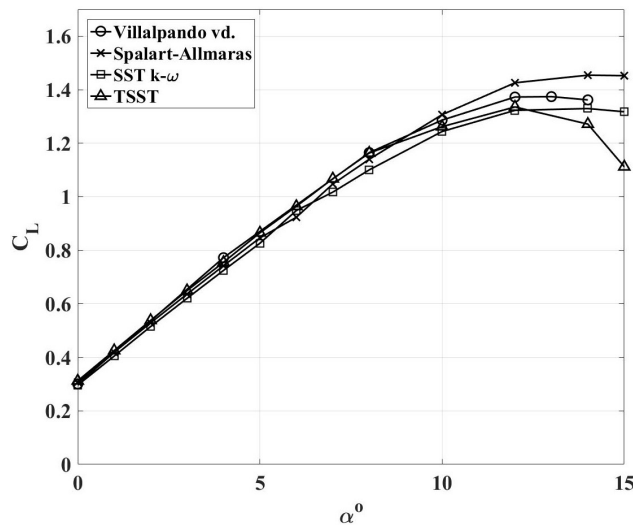
Çalışmanın sonuçlarının doğruluğu açısından analizlerden elde edilen veriler NACA 63-415 kanat profili için literatürde mevcut bulunan deneysel ve numerik çalışmaların sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. İlk olarak Abbott ve Von Doenhoff (2012) tarafından çeşitli hücum açılarında NACA 63-415 kanadı için $Re = 3 \times 10^6$ ’da gerçekleştirilen deneylerin kaldırma katsayısı değerleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Bu çalışmada aynı Reynolds sayısı için üç farklı türbülans modelinden elde edilen kaldırma katsayısı sonuçları ile yapılan kıyaslamadan Şekil 6.2’deki gibi üç türbülans modelinin de gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Ayrıca Şekil 6.2 dikkatli bir şekilde incelendiğinde yaklaşık $\alpha = 12^\circ$ ’ye kadar TSST türbülans modelinin Abbott ve Von Doenhoff tarafından bildirilen kaldırma katsayısı değerleri ile en tutarlı sonuçları veren türbülans modeli olduğu görülmüştür.



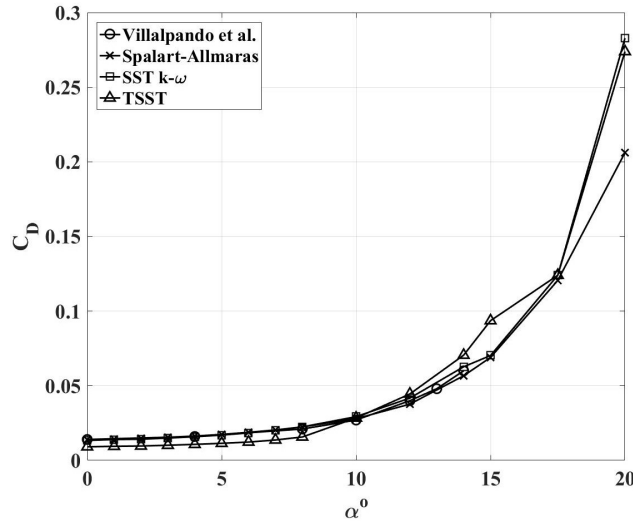
Şekil 6.2. Abbott ve Doenhoff'a göre kaldırma katsayısının doğrulanması.

Villalpando vd. (2012) tarafından yapılan numerik çalışmalar ile bu tez çalışmasındaki kaldırma ve sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması sırasıyla Şekil 6.3 ve 6.4'te verilmiştir. Villalpando vd. (2012) numerik analizlerinin bu çalışmadaki Reynolds sayısı 5×10^5 'teki numerik sonuçlarla karşılaştırması yapıldığında oldukça tutarlı grafikler elde edilmiştir. Şekil 6.3 incelendiğinde kaldırma katsayısı değerlerinin her üç türbülans modeliyle de uyuştuğu görülmekle beraber TSST modelinin yaklaşık $\alpha = 8^\circ$ 'ye kadar en uyumlu kaldırma katsayısı değerlerini verdiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra her üç türbülans modelinin yüksek hücum açılarında Villalpando vd.'nin sonuçlarından uzaklaştığı görülmüştür. Aynı koşullar altında sürüklenme katsayıları incelendiğinde de her üç türbülans modelinin Villalpando vd. tarafından bildirilmiş sürüklenme katsayısı değerleri ile genel olarak tutarlı olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak TSST türbülans modelinin diğer türbülans modellerinden ayrı olarak $\alpha = 10^\circ$ 'ye kadar daha düşük sürüklenme katsayısı değerleri tahmin ettiği görülmüştür.

Analizlerin sonuçlarının doğruluğunu irdelemek için ek olarak Bak vd. (2000) tarafından $Re = 1.6 \times 10^6$ 'da yapılmış olan rüzgar tüneli deneylerinden elde edilen basınç katsayıları $\alpha = 0^\circ$ ve $\alpha = 8^\circ$ hücum açılarında kıyaslanmıştır. Burada yatay eksen kanat profilinin boyutsuz olarak konumunu gösterirken dikey eksen C_B ise kanat yüzeyi boyunca basınç dağılım katsayısını ifade etmektedir. Bu karşılaştırmanın sonucunda da deneysel veriler ile bu tez çalışmasında her üç türbülans modelinden elde edilen verilerin oldukça tutarlı olduğu Şekil 6.5 ve 6.6'dan görülmüştür.

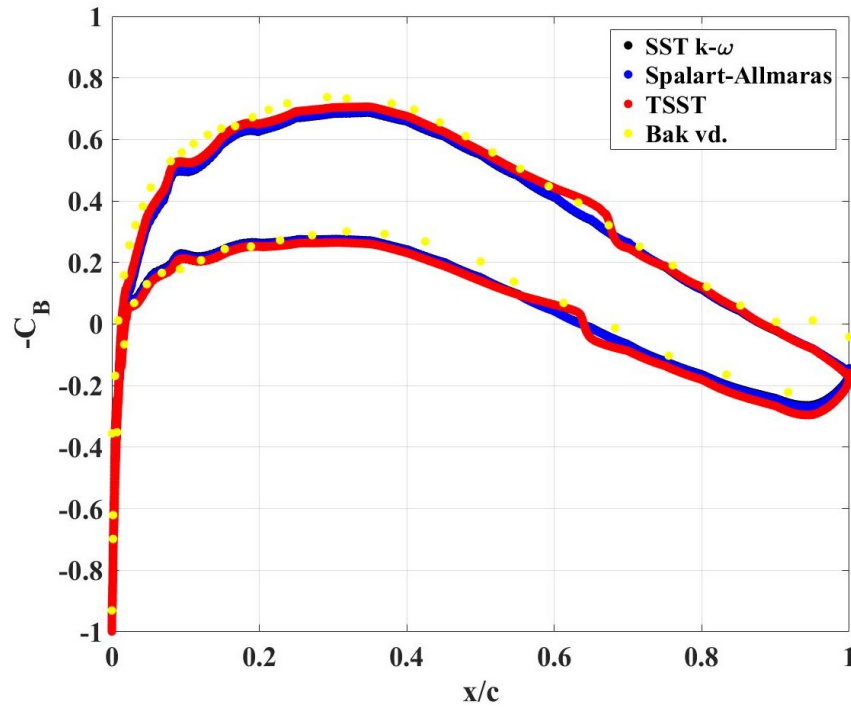


Şekil 6.3. Villalpando vd.'lerine göre kaldırma katsayısının doğrulanması.

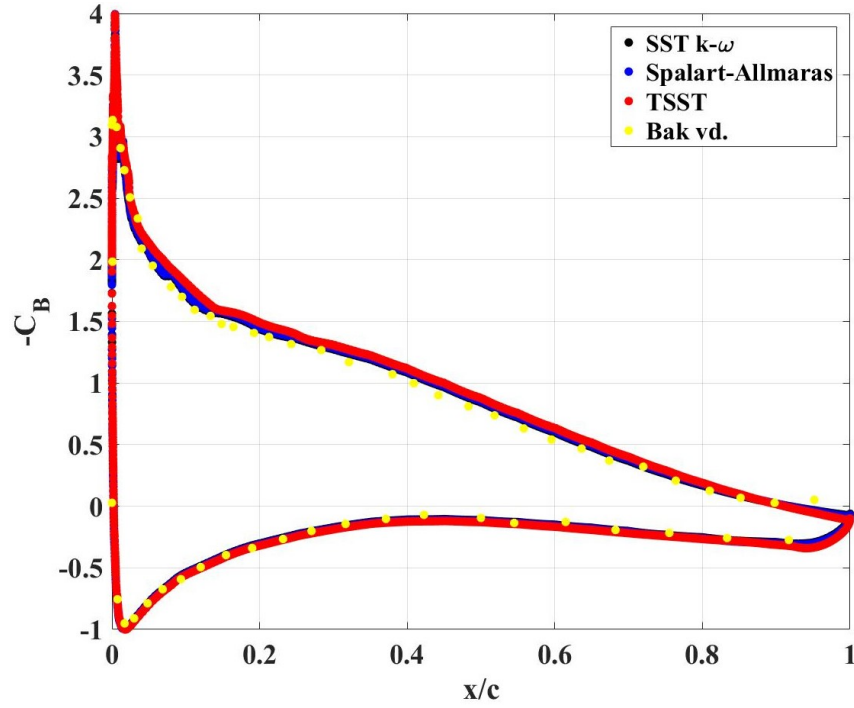


Şekil 6.4. Vılalpando vd.'lerine göre sürüklenme katsayısının doğrulanması.

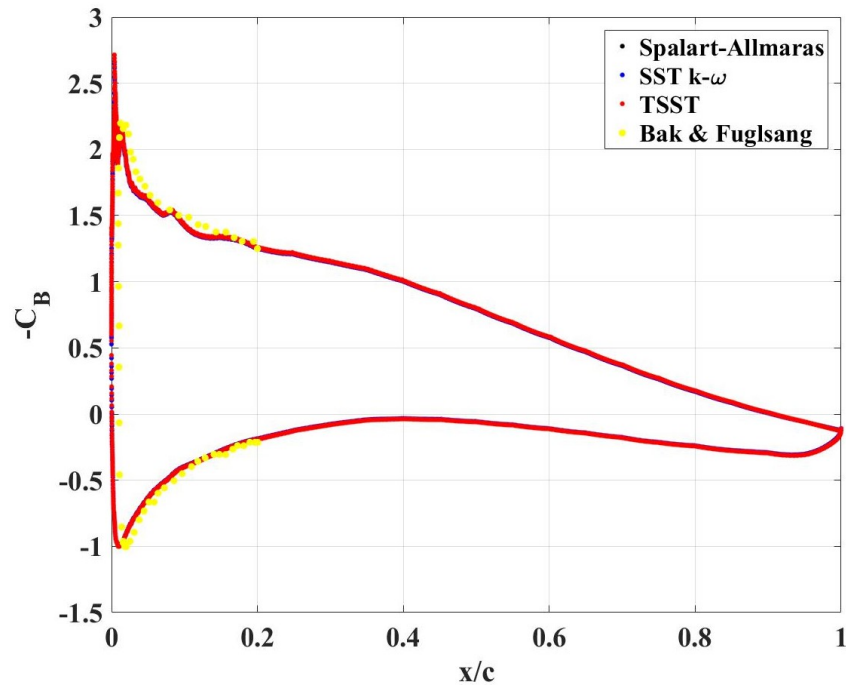
Bu kıyaslamadan başka son olarak aynı çalışma grubunun içerisindeki araştırmacılardan Bak ve Fuglsang (2002) tarafından $Re = 3 \times 10^6$ gerçekleştirilmiş olan numerik çalışmadan elde edilen basınç katsayısı değerleri ile de karşılaştırma yapılmış ve $\alpha = 6^\circ$ 'de üç türbülans modeli için de Şekil 6.7'te görüldüğü gibi basınç katsayılarının Bak ve Fuglsang (2002) tarafından bildirilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 6.5. Bak vd.'lerine göre $\alpha = 0^\circ$ için basınç katsayılarının doğrulanması.



Şekil 6.6. Bak vd.'lerine göre $\alpha = 8^\circ$ için basınç katsayılarının doğrulanması.



Şekil 6.7. Bak ve Fuglsang'a göre $\alpha = 6^\circ$ de basınç katsayılarının doğrulanması.

Yapılan numerik çalışmanın öncelikle ağ yapısından bağımsızlığı irdelenmiş daha sonrada birden fazla çalışma ile kıyaslayarak doğruluğu denetlenmiştir. Hem

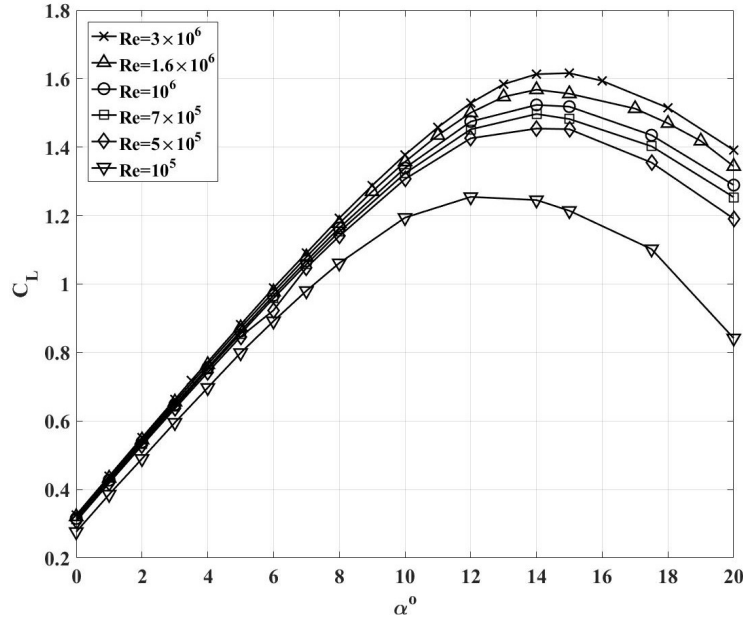
ağ bağımsızlık testleri hem de yapılan kıyaslamalar göz önüne alındığında oluşturulan modelin tutarlı sonuçlar vereceği kanaatine varılmıştır.

6.3. Optimum Hücüm Açısının Belirlenmesi

Rüzgar türbinlerinin performans çalışmalarında en sık karşılaşılan çıktılar kaldırma ve sürüklenme katsayılarıdır. Kaldırma katsayısı rüzgar türbinin dönmesini sağlarken, sürüklenme katsayısı ise kanatlara güç üretimini düşürecek bir kuvvet etki etmesine sebep olur. Bundan dolayı kaldırma ve sürüklenme katsayılarının irdelenmesi çok önemlidir. Rüzgar türbinlerindeki bu katsayıların üzerindeki en büyük etkilerden biri literatürde önemli bir yer tutan hücüm açısı parametresidir. Hücüm açısı (α) kanadın veter çizgisi ile rüzgar yönünün arasındaki açıyı ifade eder ve geçmiş çalışmalarda öneminden dolayı sıklıkla üzerinde durulmuştur. Yapılan araştırmalar neticesinde hücüm açısının belli bir değere kadar artmasıyla kaldırma katsayısının arttığı görülmüştür. Bununla beraber aynı şekilde sürüklenme katsayısının da arttığı bildirilmiştir. Bundan dolayı her iki katsayı da artarken hangi hücüm açısında maksimum kaldırma katsayısı minimum sürüklenme katsayısı meydana geleceği bir soru işareti olmuştur. Bu problemi gidermek adına önceki çalışmalarda kaldırma ve sürüklenme katsayılarının birbirine oranlanmasına (C_L/C_D) başvurulmuş ve bu oranın maksimum olduğu hücüm açısı belirlenerek optimum hücüm açısı olarak adlandırılmıştır. Yapılan bu çalışmada da öncelikle bir rüzgar türbini için hangi aralıkta en yüksek C_L/C_D oranın meydana geleceği araştırılmıştır. Optimum hücüm açısını (α_{opt}) belirlemek için 10^5 , 5×10^5 , 7×10^5 , 10^6 , 1.6×10^6 , 3×10^6 olmak üzere altı farklı Reynolds sayısı değerinde çalışılmıştır. Analizler $0^\circ - 20^\circ$ hücüm açısı aralığında pürüzsüz yüzeye sahip kanat profili için gerçekleştirilmiştir. Optimum hücüm açısını belirlemek için Spalart-Allmaras ve SST k- ω türbülans modelleri kullanılmıştır.

Kaldırma katsayısı Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılarak altı farklı Reynolds sayısı için incelendiğinde Şekil 6.8'deki gibi bu katsayının belli bir hücüm açısına kadar artarak daha sonra azalışa geçtiği görülmüştür. Reynolds sayısı 10^5 için kaldırma katsayısı $\alpha = 12^\circ$ olana kadar artmıştır ve bu noktada maksimum değeri olan $C_L = 1.255$ 'e ulaşmıştır. Kaldırma katsayısı $5 \times 10^5 \leq Re \leq 1.6 \times 10^6$ aralığında ise $\alpha = 14^\circ$ 'de sırasıyla maksimum 1.454, 1.497, 1.523 ve 1.568 değerlerine kadar çıkmıştır. Reynolds sayısı 3×10^6 olduğunda kaldırma katsayısının en fazla değeri $\alpha = 15^\circ$ 'de 1.616 olarak elde

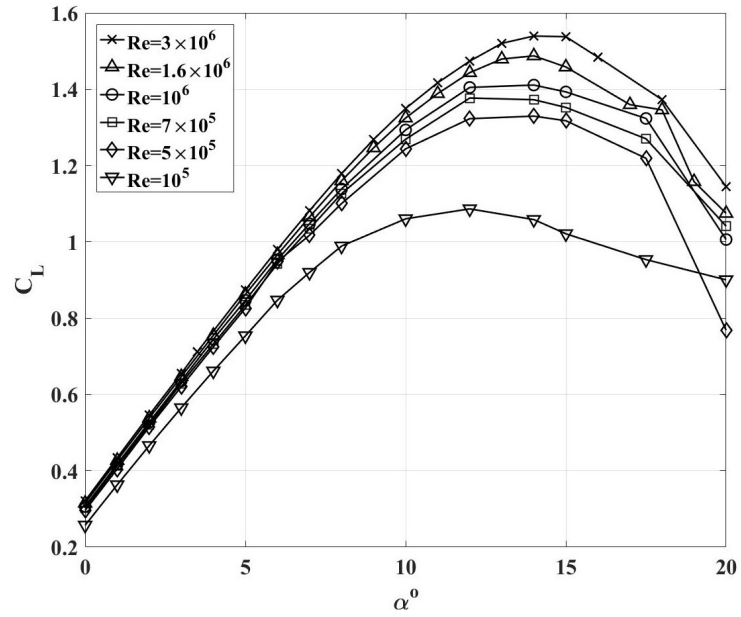
edilmiştir. Şekil 6.8’de kaldırma katsayısı değerlerinin bahsedilen hücum açılarına kadar artıp buradan sonra azalışa geçmesinin yanı sıra Reynolds sayısına bağlı olarak da değiştiği görülmüştür. Reynolds sayısının artmasıyla kaldırma katsayısı değerlerinde de yükselme meydana gelmiştir.



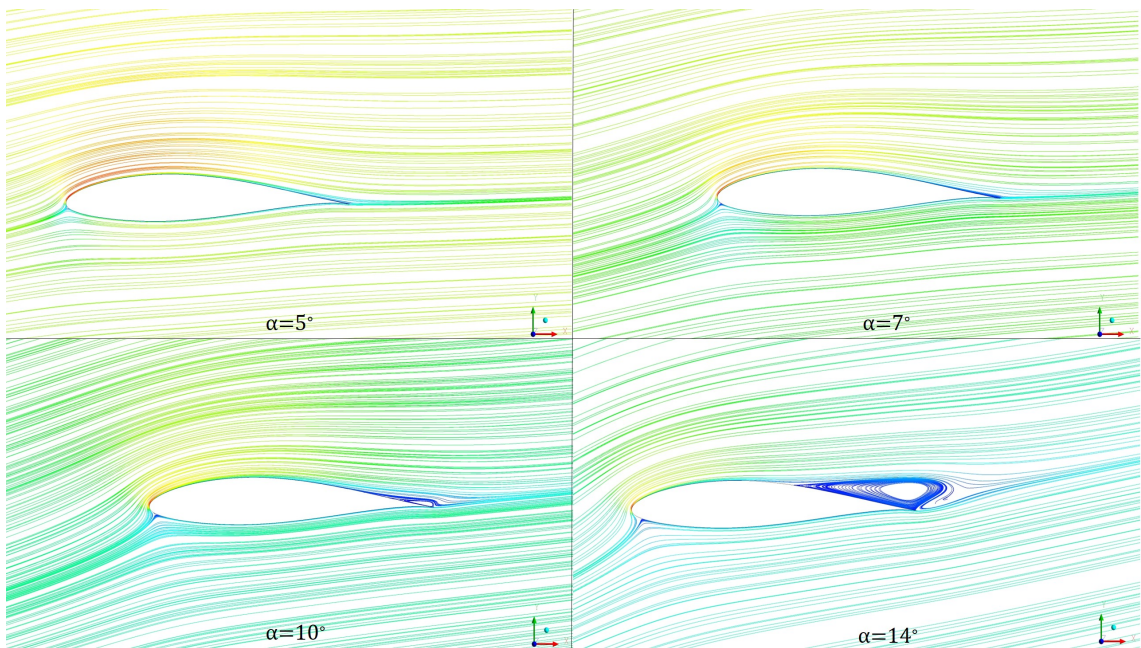
Şekil 6.8. Spalart-Allmaras için kaldırma katsayısı değerleri.

SST k- ω türbülans modeli kullanılarak elde edilen kaldırma katsayısı değerlerine bakıldığında Şekil 6.9’da da Spalart-Allmaras türbülans modelinden elde edilen Şekil 6.8’e benzer bir eğilim olduğu görülmüştür. Reynolds sayısı 10^5 için kaldırma katsayısının maksimum değeri 1.086 olarak $\alpha = 12^\circ$ ’de bulunmuştur. Aynı hücum açısı değerinde Reynolds sayısı 7×10^5 için kaldırma katsayısı en fazla 1.377 olarak elde edilmiştir. Geriye kalan 5×10^5 , 10^6 , 1.6×10^6 ve 3×10^6 Reynolds sayılarında maksimum kaldırma katsayıları sırasıyla 1.330, 1.411, 1.488, 1.539 olarak $\alpha = 14^\circ$ ’de ortaya çıkmıştır. Spalart-Allmaras türbülans modelinden farklı olarak SST k- ω türbülans modelinden elde edilen kaldırma katsayısı değerlerinin bir miktar daha az olduğu görülmüştür. Şekil 6.9 incelendiğinde de Reynolds sayısının artmasıyla kaldırma katsayısının arttığı sonucu çıkmıştır. Bununla beraber iki türbülans modelinden elde edilen grafiklerde tüm Reynolds sayıları için kaldırma katsayısı eğrilerinin yaklaşık olarak $6^\circ - 7^\circ$ ’ye kadar daha yüksek eğimle ilerledikleri daha sonra bu trendin yavaşlama eğilimi göstermeye başladığı fark edilmiştir. Bunun nedeninin akışın ayrılmaya başlaması olup olmadığını incelemek adına

örnek olarak 5×10^5 Reynolds sayısında SST k- ω türbülans modelinden elde edilen akım çizgileri Şekil 6.10'da verilmiştir. Şekil 6.10'a bakıldığında kaldırma katsayısındaki artışın daha düşük bir eğim ile seyretmeye geçtiği $\alpha = 7^\circ$ 'ye kadar herhangi bir akış ayrılmasının olmadığı ancak bu hücum açısından sonra $\alpha = 10^\circ$ 'da akışın tamamen koptuğu ve $\alpha = 14^\circ$ olduğunda ise çok büyük bir ayrılma kabarcığının meydana geldiği gözlemlenmiştir.



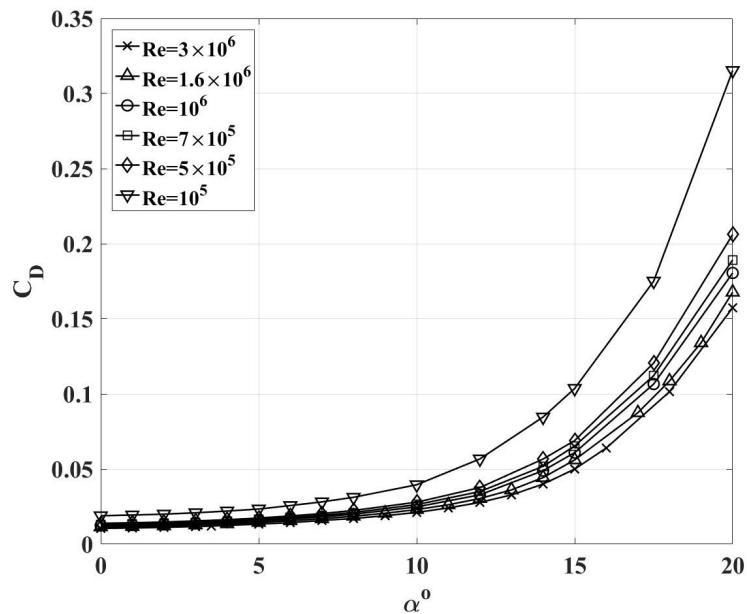
Şekil 6.9. SST k- ω için kaldırma katsayısı değerleri.



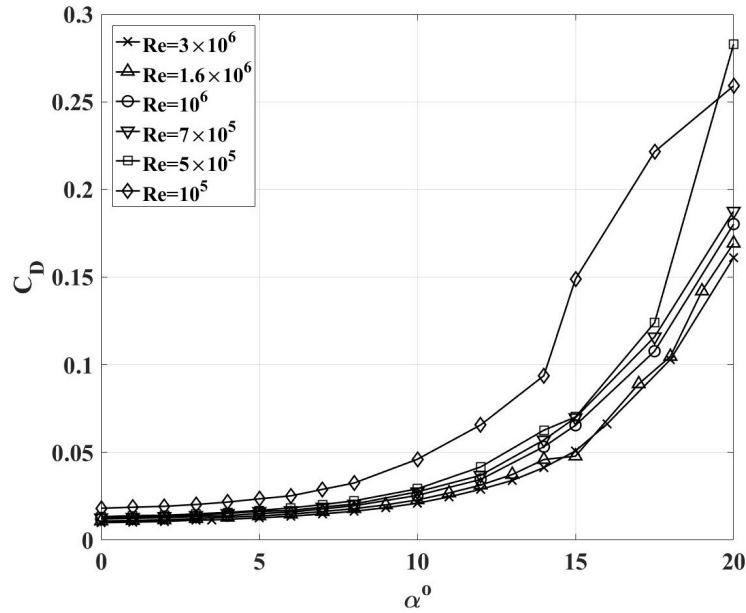
Şekil 6.10. $Re = 5 \times 10^5$ 'te elde edilen akım çizgileri.

Reynolds sayısına ve hücum açısına göre sürüklenme katsayıları Spalart-Allmaras türbülans modeli ile irdelendiğinde Şekil 6.11’de görüldüğü gibi hücum açısının artmasıyla sürüklenme katsayısının arttığı gözlemlenmiştir. Kaldırma katsayısından farklı olarak burada sürüklenme katsayısının devamlı bir artış içerisinde olduğu ve bu yükselişin özellikle kaldırma katsayısının azalmaya başladığı hücum açılarından sonra çok daha hızlı bir şekilde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak kaldırma katsayısının aksine Reynolds sayısı ile sürüklenme katsayısı ters orantılıdır ve Reynolds sayısı artarken sürüklenme katsayısı düşmüştür.

Spalart-Allmaras türbülans modelinden elde edilen sürüklenme katsayıları grafiğine benzer bir eğilim Şekil 6.12’de SST k- ω türbülans modeli için de görülmüştür. Burada da hücum açısının artmasıyla sürüklenme katsayısının arttığı ve devamlı bir artış içerisinde olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle kaldırma katsayısının azalmaya başladığı hücum açılarından sonra sürüklenme katsayısında Şekil 6.10 ’da gösterildiği gibi akış ayrılmasından kaynaklanan hızlı bir artış gerçekleştiği sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca Şekil 6.12’de de Reynolds sayısı yükselirken sürüklenme katsayısı azalmıştır.

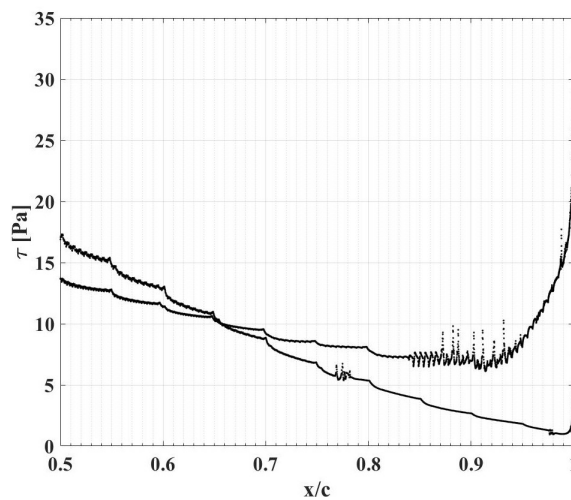


Şekil 6.11. Spalart-Allmaras için sürüklenme katsayısı değerleri.

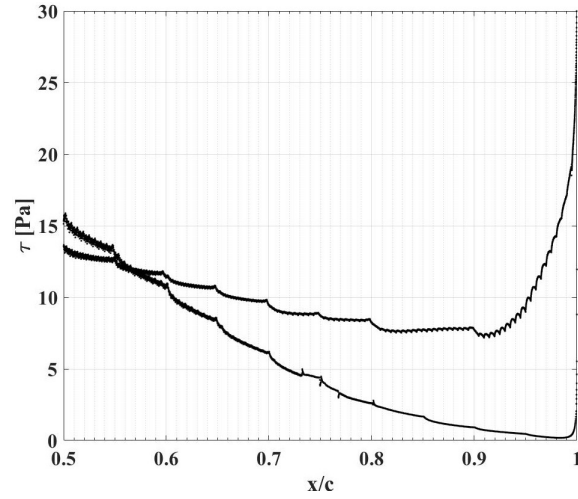


Şekil 6.12. SST k- ω için sürüklenme katsayısı değerleri.

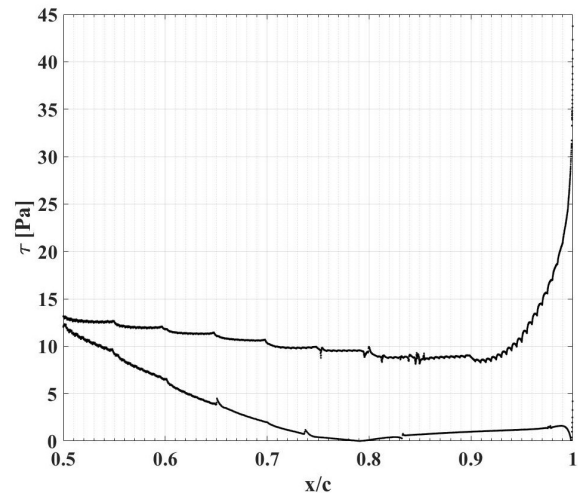
Şekil 6.10'da verilen akım çizgilerinden akışın tam olarak ayrıldığı noktayı saptamak zor olduğundan kanat yüzeyi üzerindeki kayma gerilmesi (τ) değerleri $\alpha = 5^\circ$, $\alpha = 7^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ ve $\alpha = 14^\circ$ için sırasıyla Şekil 6.13, 6.14, 6.15, 6.16'da verilmiştir. Bu grafiklere de bakıldığında kaldırma katsayısındaki artış hızını düşüren, sürüklenme katsayısında ise artış hızını yükselten akış ayrılması başlangıcı kanat yüzeyi üzerinde kayma gerilmesinin sıfır olduğu noktalarda yani $\alpha = 10^\circ$ için $x/c = 0.79$, $\alpha = 14^\circ$ için $x/c = 0.52$ 'de gerçekleşmiştir. $\alpha = 5^\circ$ ve $\alpha = 7^\circ$ 'de ise kayma gerilmesinin 0 Pa değerine düşmediği dolayısıyla akış ayrılmasının gerçekleşmediği görülmüştür.



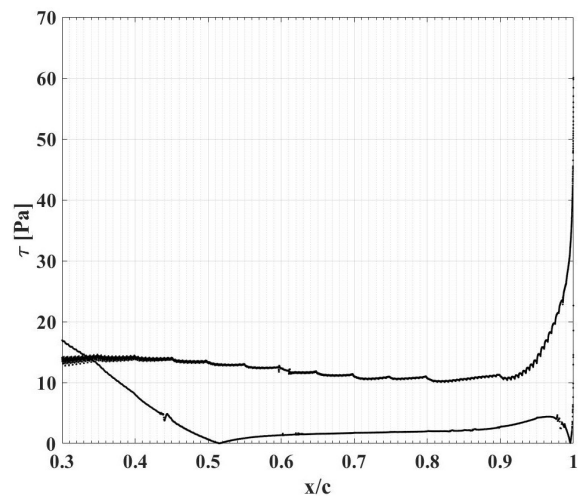
Şekil 6.13. $Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 5^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri.



Şekil 6.14. $Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 7^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri.

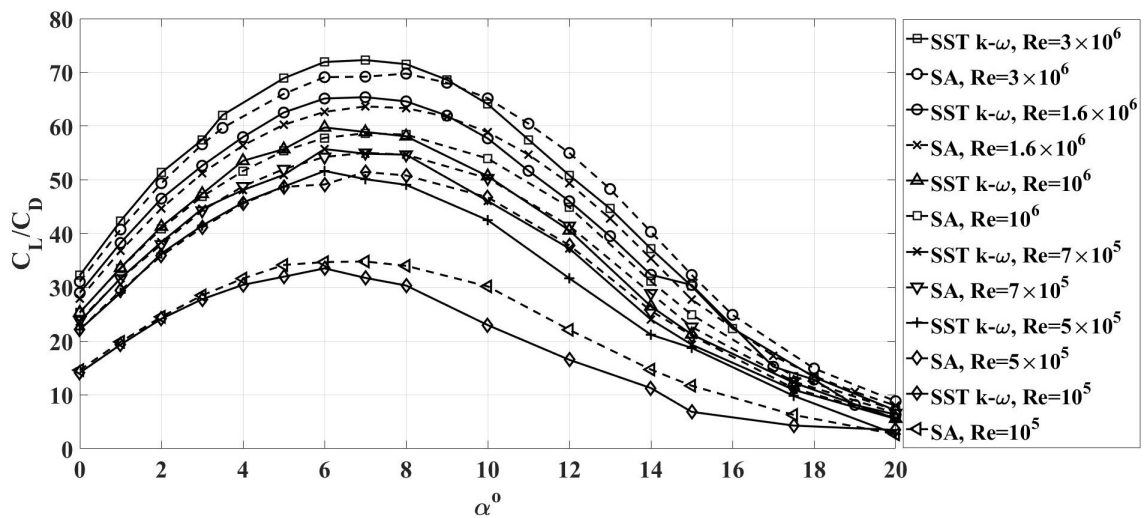


Şekil 6.15. $Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 10^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri.

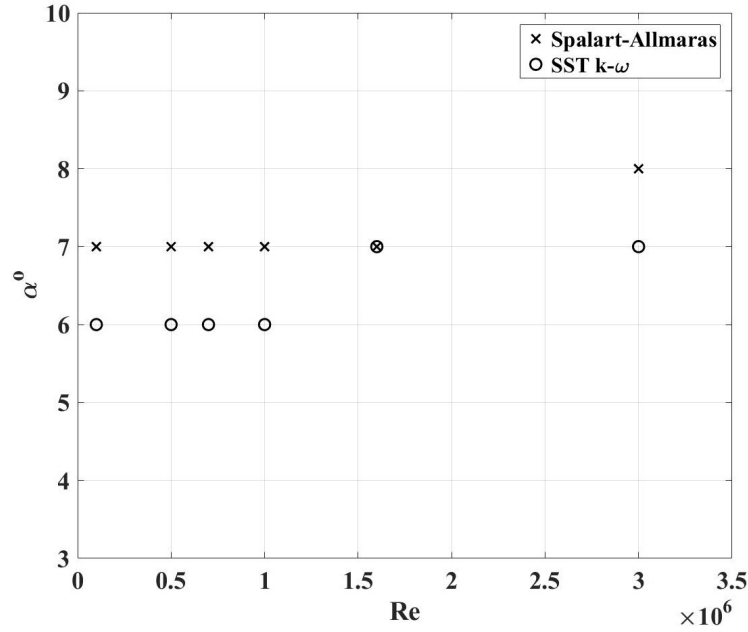


Şekil 6.16. $Re = 5 \times 10^5$ 'te $\alpha = 14^\circ$ için elde edilen kayma gerilmesi değerleri.

Her iki türbülans modeli ile kaldırma ve sürüklenme katsayıları elde edildikten sonra bu iki katsayının oranlanmasıyla en yüksek kaldırma/sürüklenme oranını veren optimum hücum açısının bulunması işlemine geçilmiştir. İki türbülans modeli için de tüm Reynolds sayılarında elde edilen kaldırma/sürüklenme oranı grafiği Şekil 6.17’de verilmiştir. Kaldırma/sürüklenme oranının en yüksek değeri iki türbülans modelinde de 6° ile 8° arasında meydana gelmiştir. Her Reynolds sayısı ve türbülans modeli için optimum hücum açısı ve bu açığa karşılık gelen kaldırma/sürüklenme oranı Çizelge 6.1 ifade edilmiştir. Bu tablo ışığında oluşturulan Şekil 6.18 incelendiğinde optimum hücum açısının Reynolds sayısı ve türbülans modeline göre farklılık gösterdiği, Spalart-Allmaras türbülans modeli için $Re \leq 1.6 \times 10^6$ şartlarında optimum hücum açısının $\alpha_{opt} = 7^\circ$, $Re = 3 \times 10^6$ şartlarında $\alpha_{opt} = 8^\circ$ olduğu, SST k- ω türbülans modeli için $Re \leq 10^6$ şartlarında optimum hücum açısının $\alpha_{opt} = 6^\circ$, $1.6 \times 10^6 \leq Re \leq 3 \times 10^6$ şartlarında $\alpha_{opt} = 7^\circ$ olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmanın bu sonucundan yola çıkılarak optimum hücum açısı aralığına ($6^\circ - 8^\circ$) pürüzlülük uygulanmasına karar verilmiştir.



Şekil 6.17. Spalart-Allmaras ve SST k- ω için tüm Re sayılarında C_L/C_D oranları.



Şekil 6.18. Spalart-Allmaras ve SST k- ω türbülans modelleri için optimum hücum açıları.

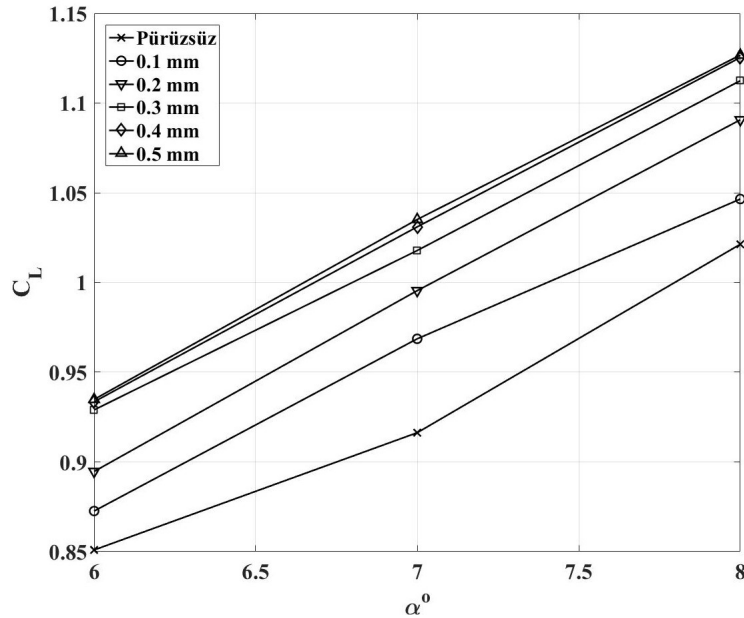
Çizelge 6.1. Analizlerden elde edilen optimum hücum açısı ve C_L/C_D değerleri.

Türbülans Modelleri	Spalart-Allmaras		SST k- ω		
	Reynolds Sayısı	α_{opt}^o	C_L/C_D	α_{opt}^o	C_L/C_D
	10^5	7	34.82458	6	33.5471
	5×10^5	7	51.46931	6	51.65398
	7×10^5	7	55.03627	6	55.7305
	10^6	7	58.67676	6	59.75211
	1.6×10^6	7	63.66683	7	65.38453
	3×10^6	8	69.7676	7	72.29193

6.4. Pürüzlülük Uygulaması

Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu yüzey pürüzlülüğün rüzgar türbinleri performansına olumsuz yönde etki ettiğini raporlamışlardır. Ancak bazı araştırmalarda pürüzlülüğün pasif kontrol mekanizması gibi kullanılarak türbin performansına olumlu yönde de etki edebileceği bildirilmiştir (Zhang, 2018). Pürüzlülük rüzgar türbinlerinde karşılaşılan çok temel bir durum olduğundan bu çalışmanın motivasyonu pürüzlülüğün türbin performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi olmuştur.

Bu motivasyon çerçevesinde bir önceki bölümde belirlenen optimum hücum açısı aralığında ($6^\circ - 7^\circ - 8^\circ$) analizler gerçekleştirilmiştir. Reynolds sayısı aralığı pürüzsüz durumda incelendiği şekliyle kullanılmıştır. Ancak ek olarak $Re = 2.5 \times 10^5$ için de çalışma yapılmıştır. Pürüzlü modellerin analizinde laminardan türbülanslı akışa geçiş bölgesini çözebilen TSST türbülans modeli kullanılmıştır. Bu türbülans modelinin pürüzlülük korelasyonu aktif hale getirildikten sonra sırasıyla 0.1 mm , 0.2 mm , 0.3 mm , 0.4 mm ve 0.5 mm yüksekliğe sahip yayılı pürüzlülük durumları kanat yüzeyi boyunca modellenmiştir. Ayrıca pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin türbin performansı üzerinde nasıl etki ettiğini kıyaslayabilmek için TSST türbülans modeliyle sadece optimum hücum açısı aralığında pürüzsüz yüzey çözümleri de yapılmıştır.

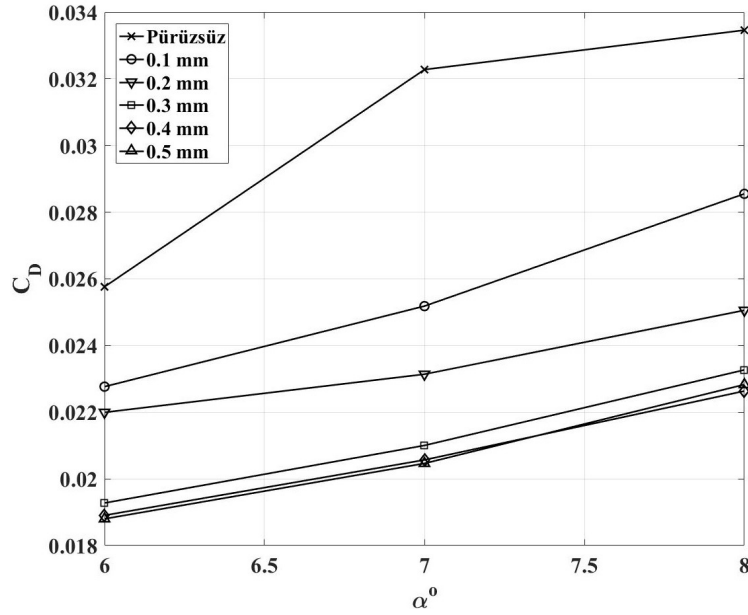


Şekil 6.19. $Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kaldırma katsayıları.

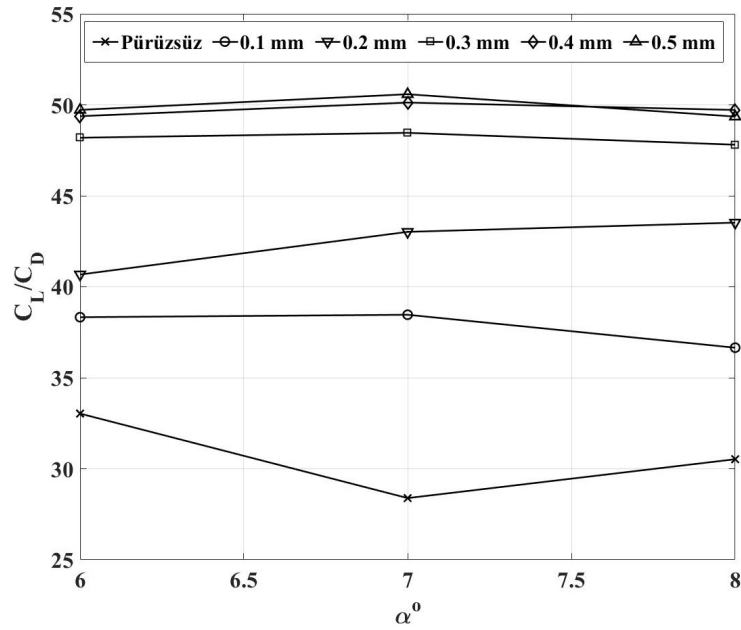
Kaldırma katsayısı literatürde çoğunlukla belirtildiği gibi pürüzlükten olumsuz etkilenmiştir. Bu tez kapsamında $Re = 10^5$ 'te yapılan analizlerde Şekil 6.19 kaldırma katsayısı grafiği incelendiğinde kaldırma katsayısının pürüzlülük yüksekliği ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. Pürüzlülük yüksekliği arttıkça kaldırma katsayısı yükselmiştir.

Sürükleme katsayısı ise $Re = 10^5$ için Şekil 6.20'de gösterildiği gibi pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla azalmıştır. Ayrıca burada dikat çeken bir diğer nokta da sürükleme katsayısı değerlerinin özellikle 0.3 mm , 0.4 mm ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliklerinde birbirlerine yaklaştığının görülmesidir. Bu ifade benzer olarak Şekil 6.19'da verilen

kaldırma katsayısı grafiği için de geçerlidir. Buradan da Ren ve Ou (2009) ile Li vd. (2010) tarafından bildirildiği gibi pürüzlülüğün belli bir yükseklik değerine ulaşmasından sonra kaldırma ve sürüklenme katsayıları üzerinde çok fazla etkisinin olmadığı sonucu çıkarılabilir.



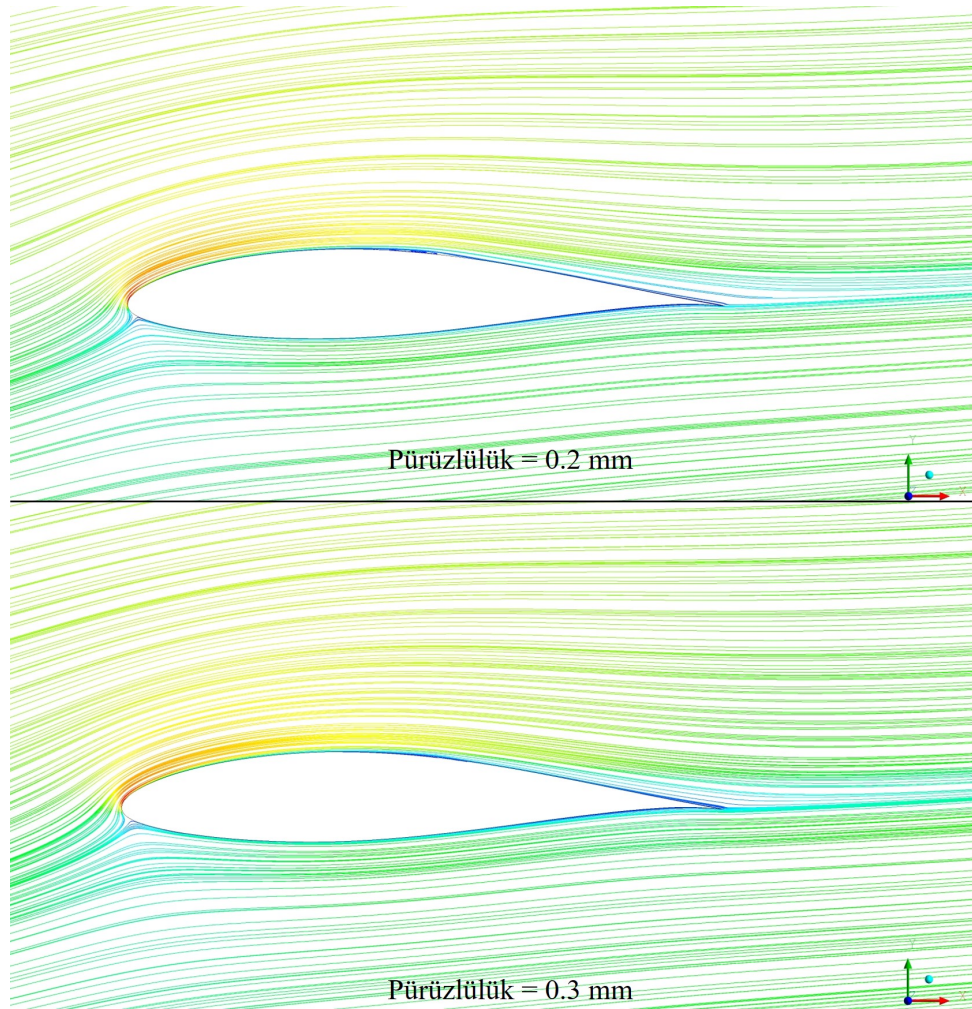
Şekil 6.20. $Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin sürüklenme katsayıları.



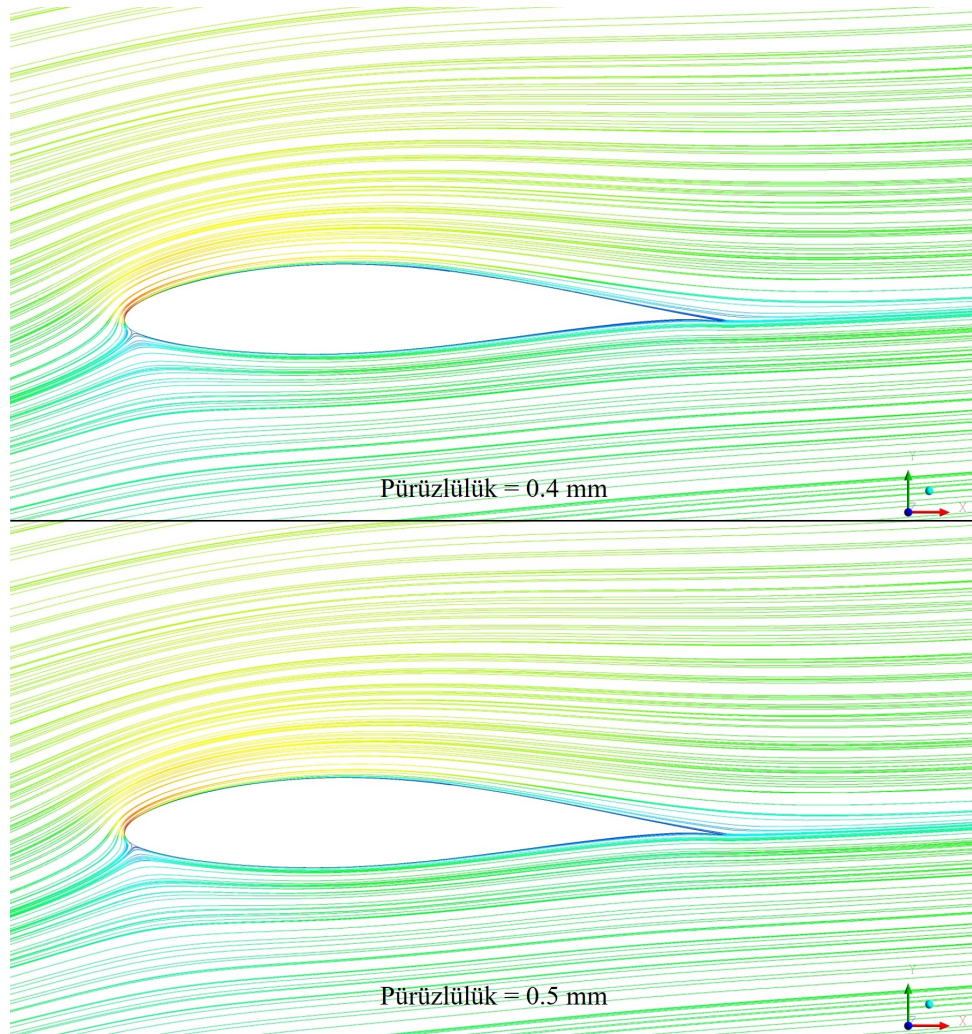
Şekil 6.21. $Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları.

Kanat yüzeyi pürüzsüz olduğunda $\alpha = 8^\circ$ ve $Re = 10^5$ için Şekil 6.22’de görüldüğü gibi akışın kanat üzerinden ayrıldığı gözlemlenmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.1 mm olduğunda ise akış ayrılmasının biraz daha geciktiği ve daha küçük bir ayrılma kabarcığı meydana geldiği görülmüştür.

Kanat yüzeyinin 0.2 mm pürüzlü olması durumunda bir önceki pürüzlülük değerine oranla akış ayrılması artık gözle çok zor görülecek şekilde meydana gelmiş ve ayrılma kabarcığı yok denebilecek kadar küçük bir şekilde oluşmuştur. Pürüzlülüğün 0.3 mm olması halinde ise kanat yüzeyinden akışın ayrıldığı gözlenmemiştir. Şekil 6.24’teki akım çizgilerine bakıldığında ise hem 0.4 mm hem de 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğinde akışın kanat yüzeyinden ayrılmadığı ve gözle görünür şekilde kanat yüzeyine bağlı kaldığı sonucuna varılmıştır.

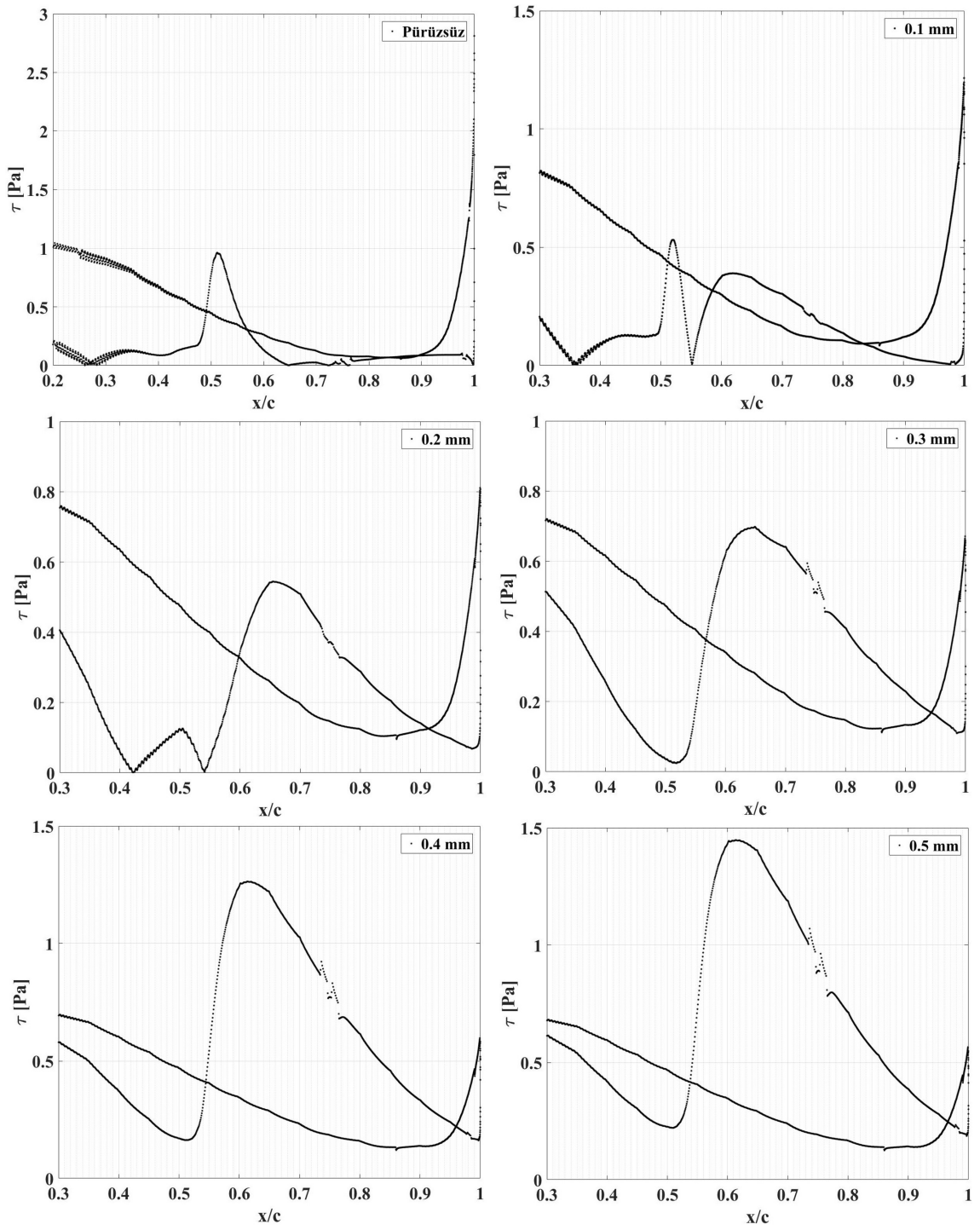


Şekil 6.23. $Re = 10^5$ için 0.2 mm ve 0.3 mm pürüzlülükteki akım çizgileri.

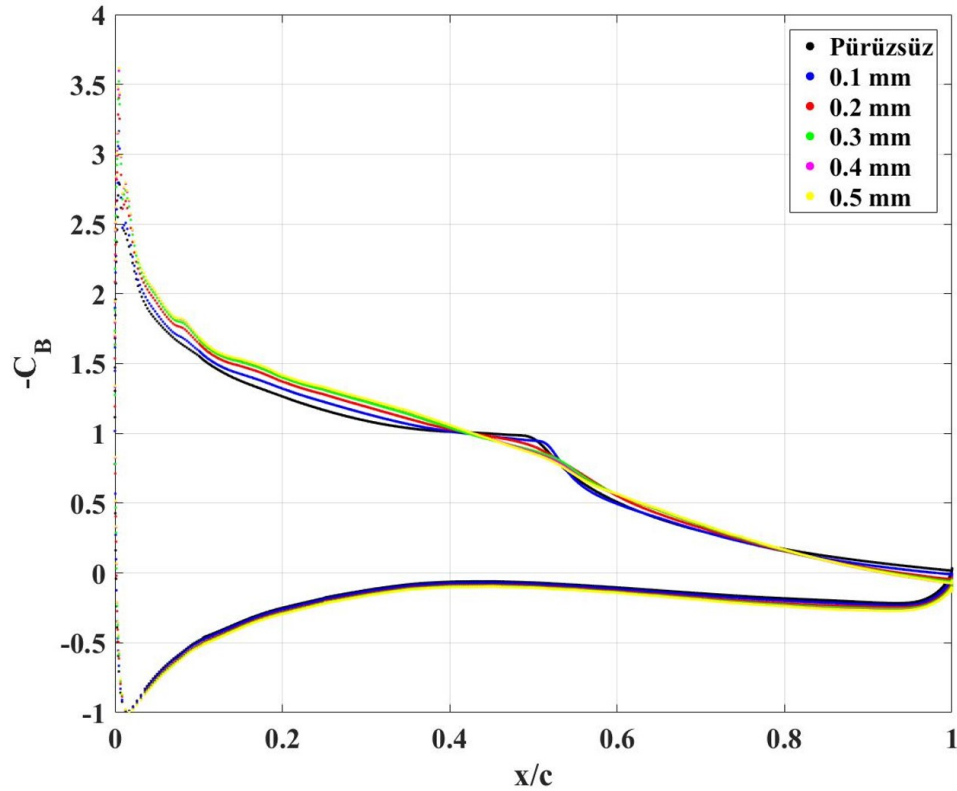


Şekil 6.24. $Re = 10^5$ için 0.4 mm ve 0.5 mm pürüzlülükteki akım çizgileri.

Kayma gerilmesi değerleri daha öncede bahsedildiği gibi akışın kanat yüzeyinden tam olarak ayrıldığı noktayı tayin edebilmek adına faydalı olduğundan Şekil 6.25 incelenmiştir. Akışın pürüzsüz durumda $x/c = 0.26$ 'da, 0.1 mm pürüzlülük uygulanması halinde $x/c = 0.36$ 'da, 0.2 mm pürüzlülük uygulanması halinde $x/c = 0.42$ 'de ayrıldığı yani pürüzlülük ile akış ayrılmasının geciktirilebildiği görülmüştür. Pürüzlülük yüksekliği 0.3, 0.4 ve 0.5 mm olduğunda ise akışta ayrılma meydana gelmediği sonucuna varılmıştır.

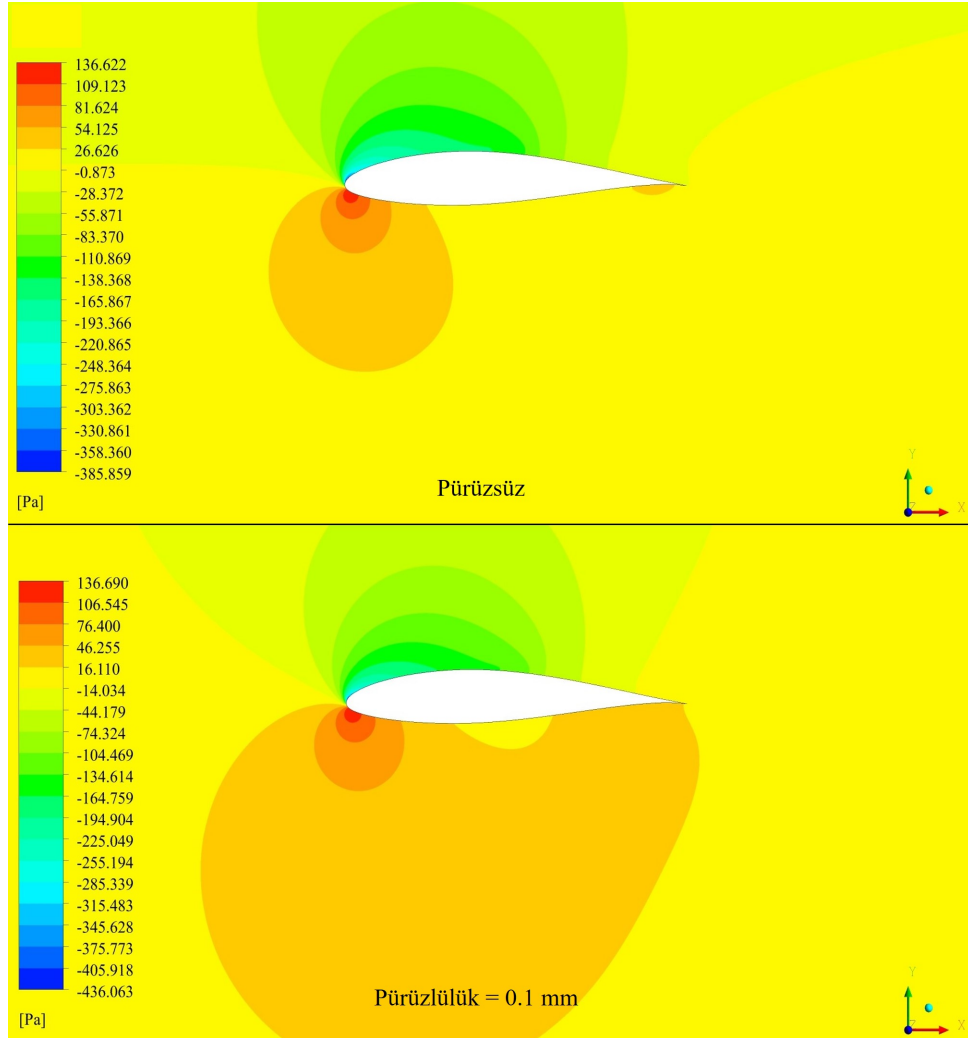


Şekil 6.25. $Re = 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.



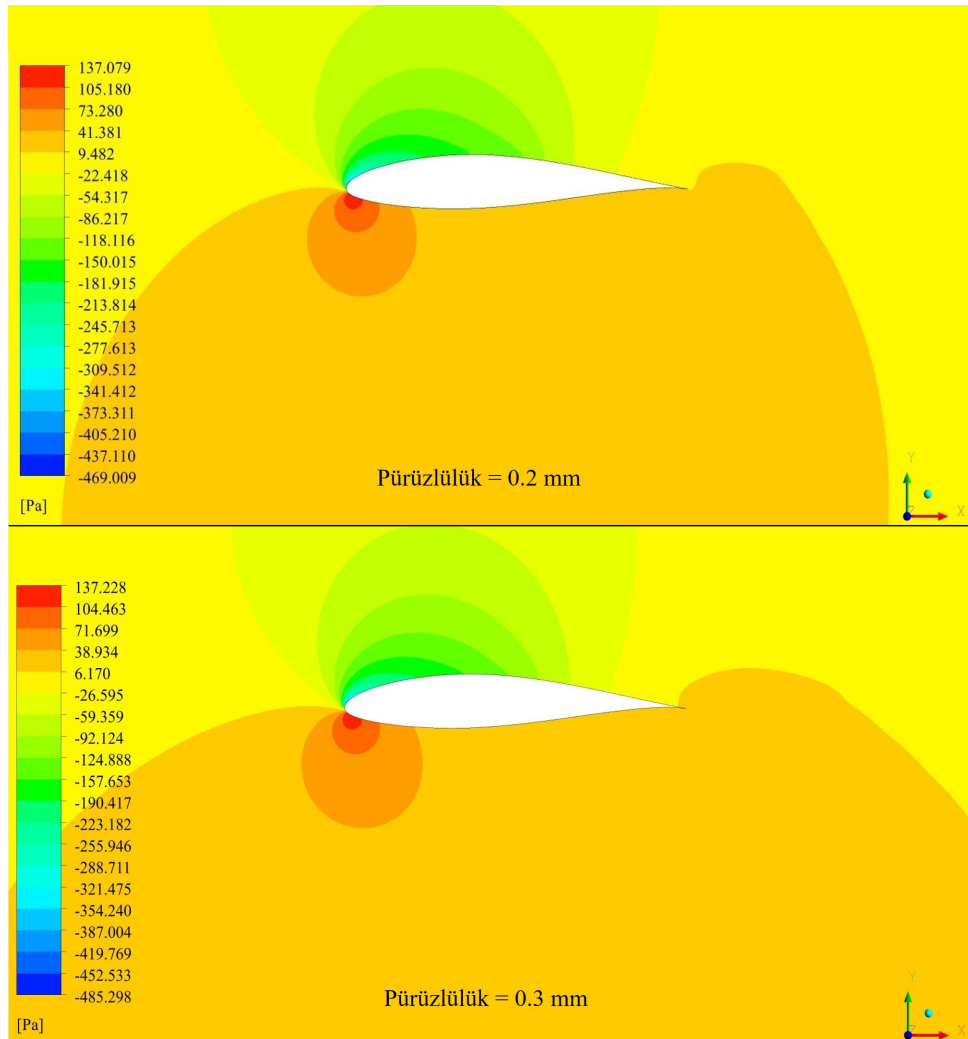
Şekil 6.26. $Re = 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.

Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda basınç katsayıları Şekil 6.26'da verilmiştir. Şekil 6.26 incelendiğinde kanadın basınç tarafı olarak adlandırılan alt yüzeyinde ($0 \leq C_B \leq 1$) pürüzlülük uygulanması herhangi bir değişiklik oluşturmamış ve genel olarak tüm durumlar için bu bölgede basınç katsayıları eşit çıkmıştır. Pürüzlülük uygulaması en fazla kanadın üst yüzeyindeki vakum (veya emme) tarafında ($-4 \leq C_B \leq 0$) etki göstermiştir. Pürüzsüz durumda vakum tarafında en yüksek basınç katsayısı değerlerinin elde edildiği Şekil 6.26'dan anlaşılmaktadır. Buna bağlı olarak kanadın basınç ve vakum bölgeleri arasındaki basınç farkı daha az olmuş dolayısıyla pürüzsüz durumda Şekil 6.19'da ifade edildiği gibi kaldırma katsayısı pürüzlülük uygulamalarına göre daha düşük çıkmıştır. Ayrıca burada dikkat edilirse akış ayrılmasının meydana geldiği bölgenin yakınında (yaklaşık olarak $0.4 \leq x/c \leq 0.5$ civarı) oluşan ayrılma kabarcıklarının etkisiyle basınçta dalgalanma oluşmuştur. Ek olarak daha önce de bahsedilene benzer şekilde pürüzlülüğün 0.3, 0.4 ve 0.5 mm olması halinde basınç katsayısı değerlerinin de birbirine çok yakın gerçekleştiği sonucuna varılmıştır.



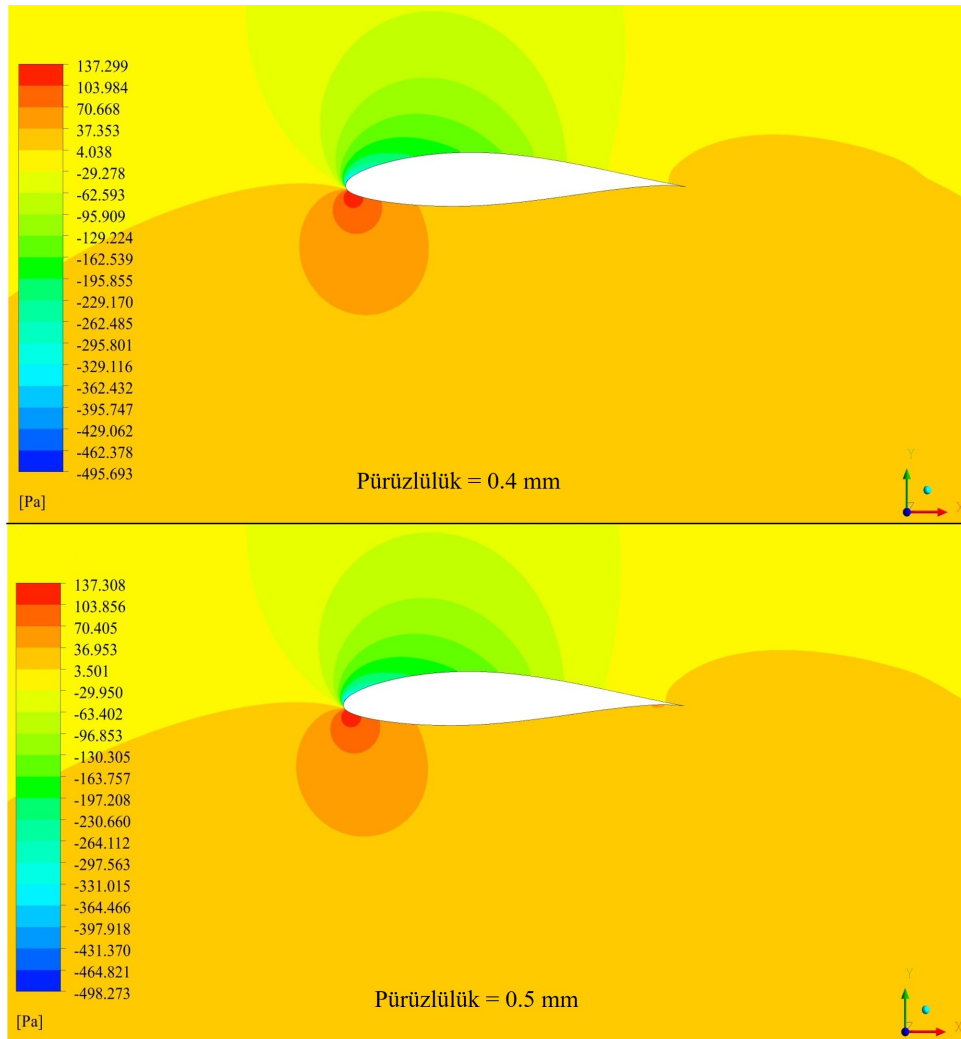
Şekil 6.27. $Re = 10^5$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları.

Pürüzsüz durumda $Re = 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de basınç dağılımına Şekil 6.27'de bakıldığında vakum bölgesinde basıncın özellikle hücum kenarına yakın yerlerde -385 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek 26 Pa civarlarına ulaştığı görülmüştür. Kanadın basınç tarafında (kanat alt yüzeyi) kaldırmayı sağlayan yüksek basınç bölgesi meydana gelmiştir. Kanadın hücum kenarında havanın hızın sıfıra geldiği durma noktasında ise basınç 136 Pa'a kadar çıkmıştır. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında ise Şekil 6.27'de görüldüğü gibi vakum bölgesinde basıncın -436 Pa'a kadar düştüğü gözlenmiştir. Kanadın basınç bölgesinde ise pürüzsüz duruma göre basınç dağılımında yaklaşık 20 Pa artış olmuştur.



Şekil 6.28. $Re = 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları.

$Re = 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.28'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda vakum tarafında hücum kenarına yakın bölgede basıncın -469 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık 10 Pa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Aynı pürüzlülük yüksekliğinde basınç tarafında ortalama 73 Pa basınç dağılımı oluşmuştur. Durma noktasında ise basınç 137 Pa'a kadar çıkmıştır. Benzer bir basınç dağılımı 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğinde de meydana gelmiştir. Burada da basınç bölgesinde yaklaşık 72 Pa basınç elde edilmiş, durma noktasında 137 Pa basınç ortaya çıkmıştır. Vakum bölgesinde ise basınç -485 Pa'a kadar düşmüştür. Pürüzsüz duruma göre kanadın alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkı artmıştır.

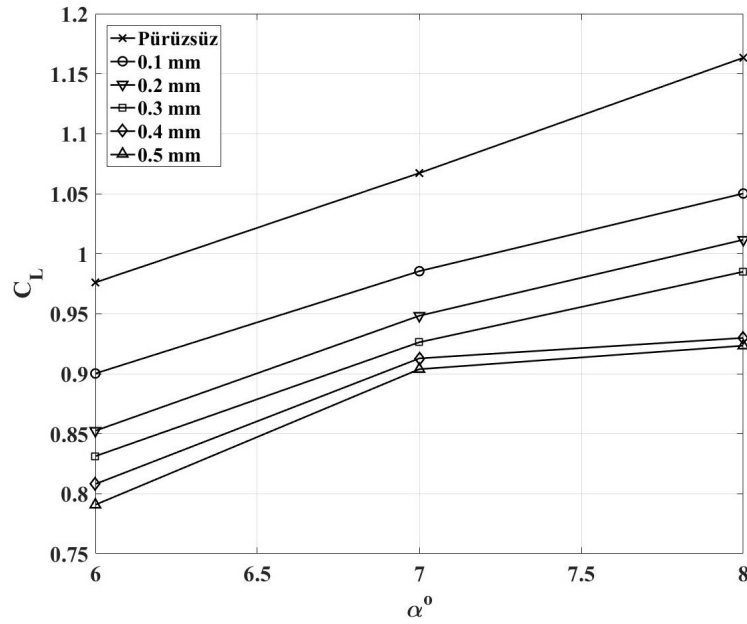


Şekil 6.29. $Re = 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları.

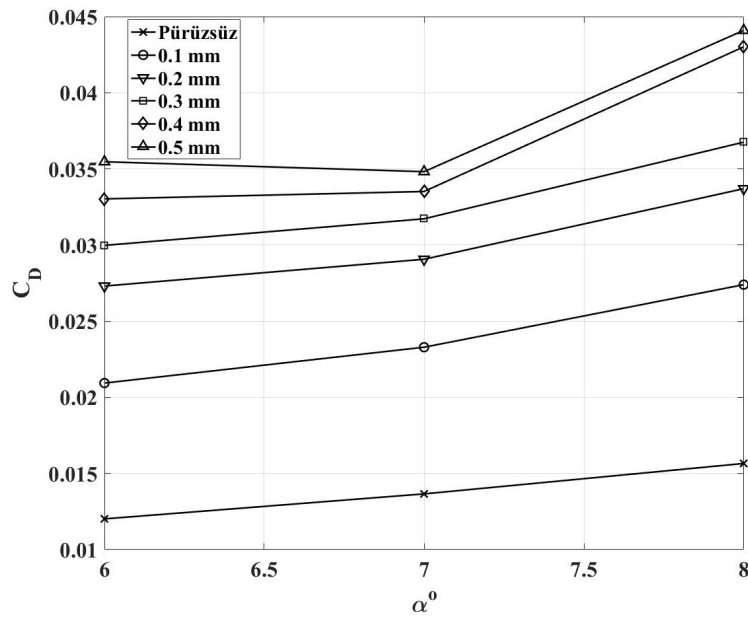
$Re = 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.29'da verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 ve 0.5 mm'de birbirine oldukça benzer basınç dağılımları elde edilmiştir. Her iki pürüzlülük yüksekliğinde de vakum bölgesinde hücum kenarına yakın kısımlarda basıncın yaklaşık -496 ile -498 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık 4 Pa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca iki Pürüzlülük yüksekliğinde de basınç tarafında ortalama 37 Pa basınç dağılımı oluşmuştur.

Kaldırma katsayısı üzerinde pürüzlülüğün etkisi Reynolds sayısının 5×10^5 'e çıkarılması halinde $Re = 10^5$ şartlarından farklılık göstermiştir. Şekil 6.30'da belirtildiği gibi kaldırma katsayısı pürüzlülük yüksekliği ile ters orantılı davranmıştır. Reynolds sayısının 10^5 olması durumunda pürüzlülük boyutu arttıkça yükselen kaldırma katsayısı

değerleri Reynolds sayısı 5×10^5 olduğunda ise azalmıştır. Pürüzsüz duruma göre 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında kaldırma katsayında % 9.7'ye, 0.2 mm pürüzlülük uygulandığında % 13'e, 0.3 mm pürüzlülük uygulandığında % 15.3'e, 0.4 mm pürüzlülük uygulandığında % 20'ye, 0.5 mm pürüzlülük uygulandığında ise % 20.6'ya varan azalma meydana gelmiştir.



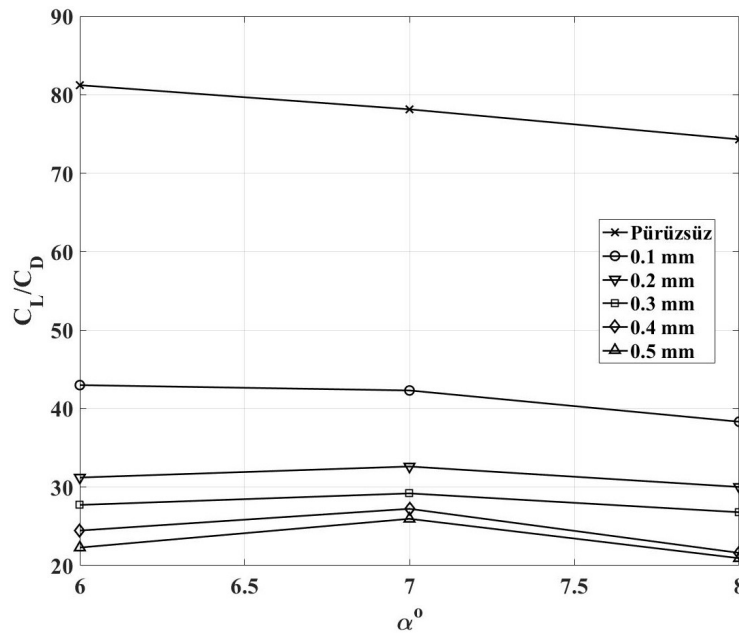
Şekil 6.30. $Re = 5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kaldırma katsayıları.



Şekil 6.31. $Re = 5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin sürüklenme katsayıları.

Sürüklenme katsayısı ise $Re = 5 \times 10^5$ için Şekil 6.31’de gösterildiği gibi pürüzlülük boyutunun artmasıyla yükselmiştir. Pürüzsüz duruma göre 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında sürüklenme katsayısında % 74.5’e, 0.2 mm pürüzlülük uygulandığında % 115’e, 0.3 mm pürüzlülük uygulandığında % 134’e, 0.4 mm pürüzlülük uygulandığında % 174’e, 0.5 mm pürüzlülük uygulandığında ise % 180’e varan artış olmuştur. Buradan da anlaşıldığı üzere pürüzlülüğün kaldırma katsayısından çok sürüklenme katsayısına etki ettiği sonucuna varılmıştır.

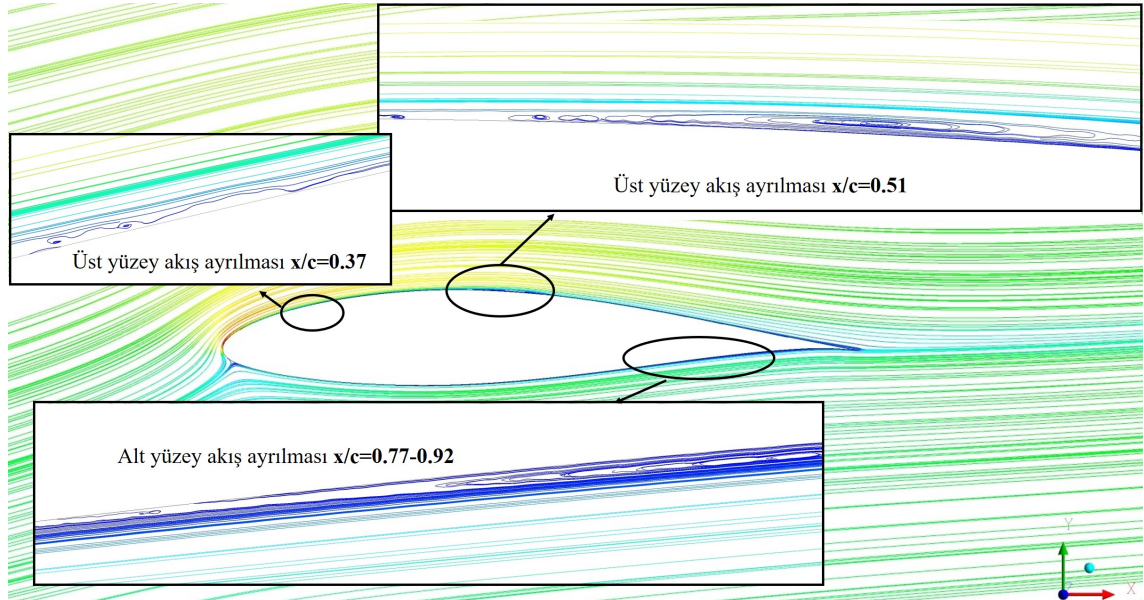
Kaldırma ve sürüklenme katsayılarının oranları ise $Re = 5 \times 10^5$ ’te pürüzsüz ve pürüzlü durumlar için hücum açısına bağlı olarak Şekil 6.32’de verilmiştir. Kaldırma katsayısının pürüzlülük boyutu arttıkça azalması ve sürüklenme katsayısının pürüzlülük boyutu arttıkça yükselmesi sonucunda kaldırma/sürüklenme oranlarında da belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Ayrıca $Re = 10^5$ ’teki sonuçlara benzer olarak 0.3 mm - 0.5 mm arasında kaldırma/sürüklenme oranlarının özellikle $\alpha = 7^\circ$ ’de birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür.



Şekil 6.32. $Re = 5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kaldırma/sürüklenme oranları.

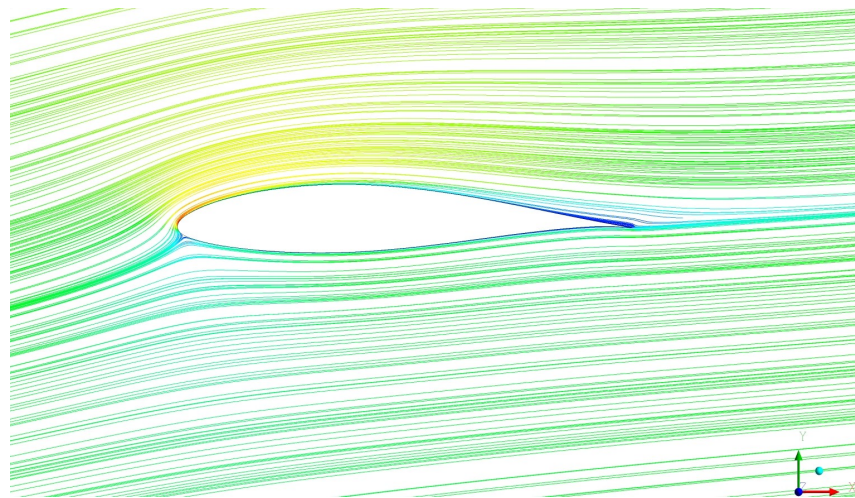
Pürüzsüz yüzeye sahip kanadın üzerinde Reynolds sayısı 5×10^5 ’e eşit olduğunda ortaya çıkan akım çizgileri Şekil 6.33’te verilmiştir. Kanat yüzeyinde akış hem alt hem de üst yüzeyden olmak üzere birkaç farklı noktadan kopmuştur. Bu ayrılma bölgelerinin gözle görülmesi gayet zor olduğundan akış ayrılma yerleri Şekil 6.37’de verilen kayma

gerilmesi grafikleri ile tayin edilmiştir. Akışın pürüzsüz durumda üst yüzeyden $x/c = 0.37$ ve $x/c = 0.51$ 'de, alt yüzeyde ise $x/c = 0.77 - 0.92$ bölgesinde ayrıldığı belirlenmiştir.



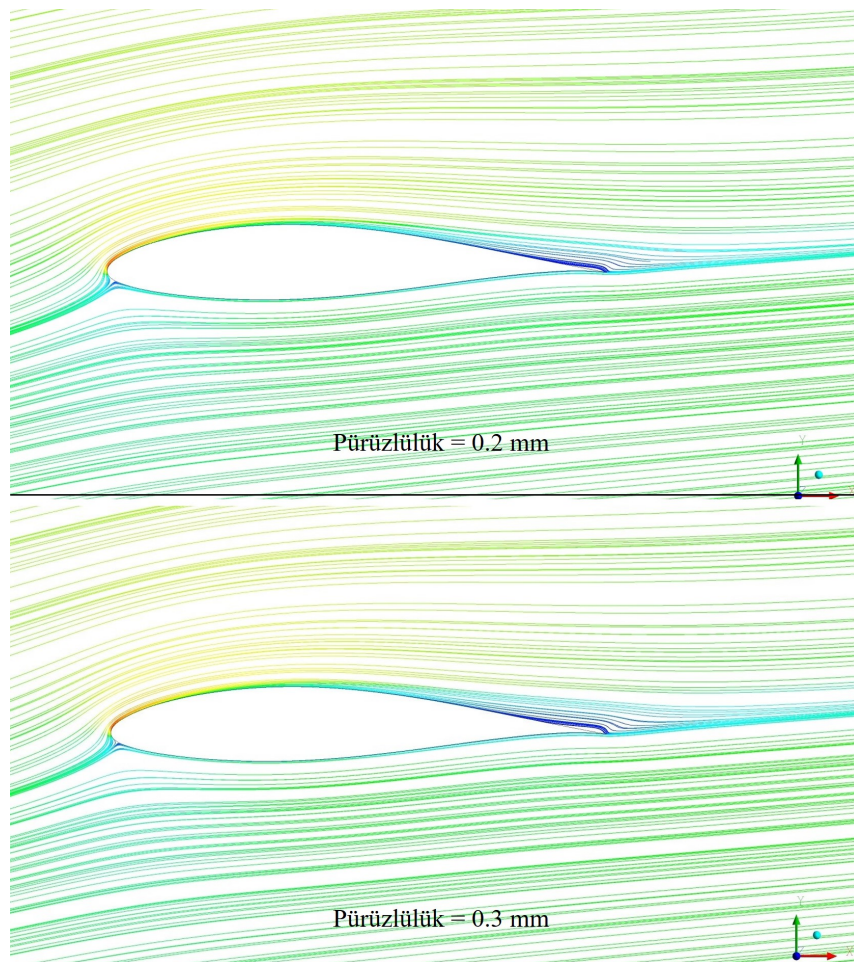
Şekil 6.33. $Re = 5 \times 10^5$ için pürüzsüz yüzey üzerindeki akım çizgileri.

Kanat yüzeyinde Reynolds sayısı 5×10^5 şartlarında 0.1 mm pürüzlülük uygulanması halinde Şekil 6.34'teki akım çizgileri oluşmuştur. Bu akım çizgileri ve Şekil 6.37 göz önüne alındığında 0.1 mm pürüzlülük boyutunda kayma gerilmesinin değeri $x/c = 0.98$ 'de sıfıra çok yaklaşmış ancak ayrılma gerçekleşmemiştir



Şekil 6.34. $Re = 5 \times 10^5$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

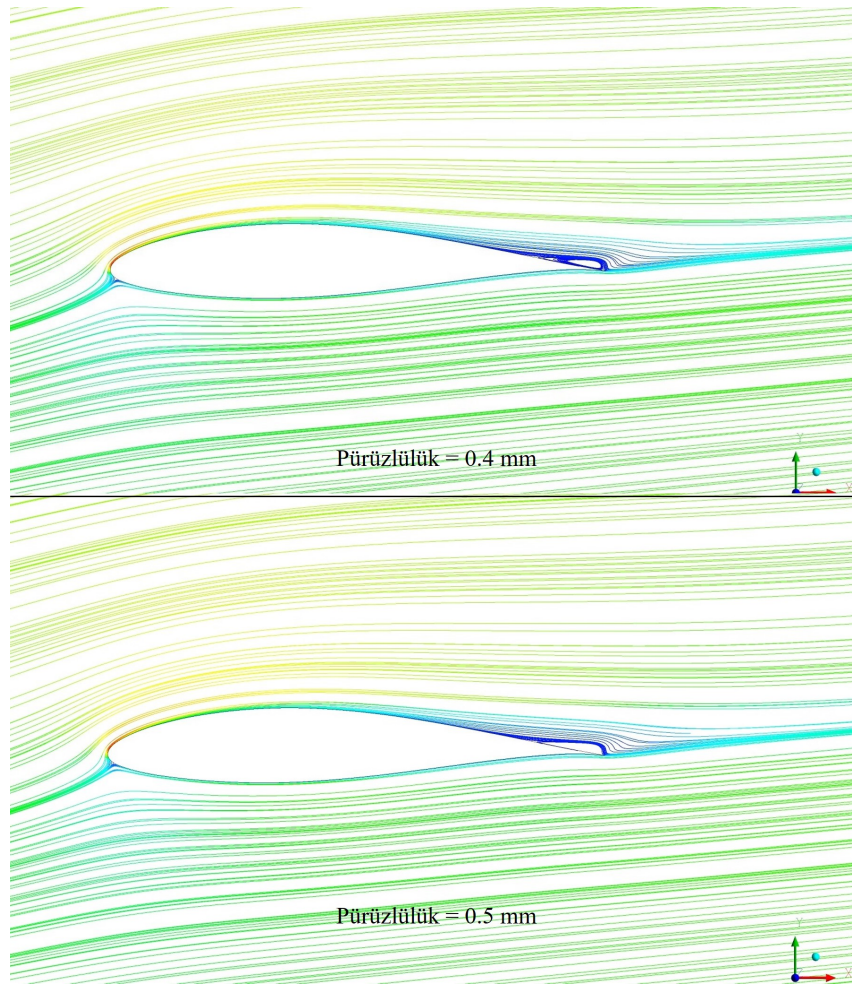
Pürüzlülük yüksekliğinin 0.2 mm olması halinde $Re = 5 \times 10^5$ koşullarında $\alpha = 8^\circ$ hücum açısıyla gelen hava akımı kanat üzerinde Şekil 6.35'teki gibi akım çizgilerinin oluşmasına sebep olmuştur. Şekil 6.35'te 0.2 mm için verilen akım çizgilerinden de anlaşıldığı üzere bu pürüzlülük değerinde akışta kuyruk kısmına yakın bölgede ayrılma kabarcığının meydana gelmeye başladığı görülmüştür. Şekil 6.37 de incelendiğinde 0.2 mm pürüzlülük yüksekliğinde akışın tam olarak $x/c = 0.93$ 'te ayrıldığı sonucuna varılmıştır. Benzer olarak 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğinde kanadın kuyruk kısmına doğru akış ayrılması gerçekleşmiş ve Şekil 6.37'de $x/c = 0.90$ 'da kayma gerilmesi değerinin 0 Pa 'a düştüğü gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 6.35'te 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğinde ortaya çıkan ayrılma kabarcığının 0.2 mm boyutlarına sahip pürüzlülüğe göre daha büyük olduğu görülmüştür.



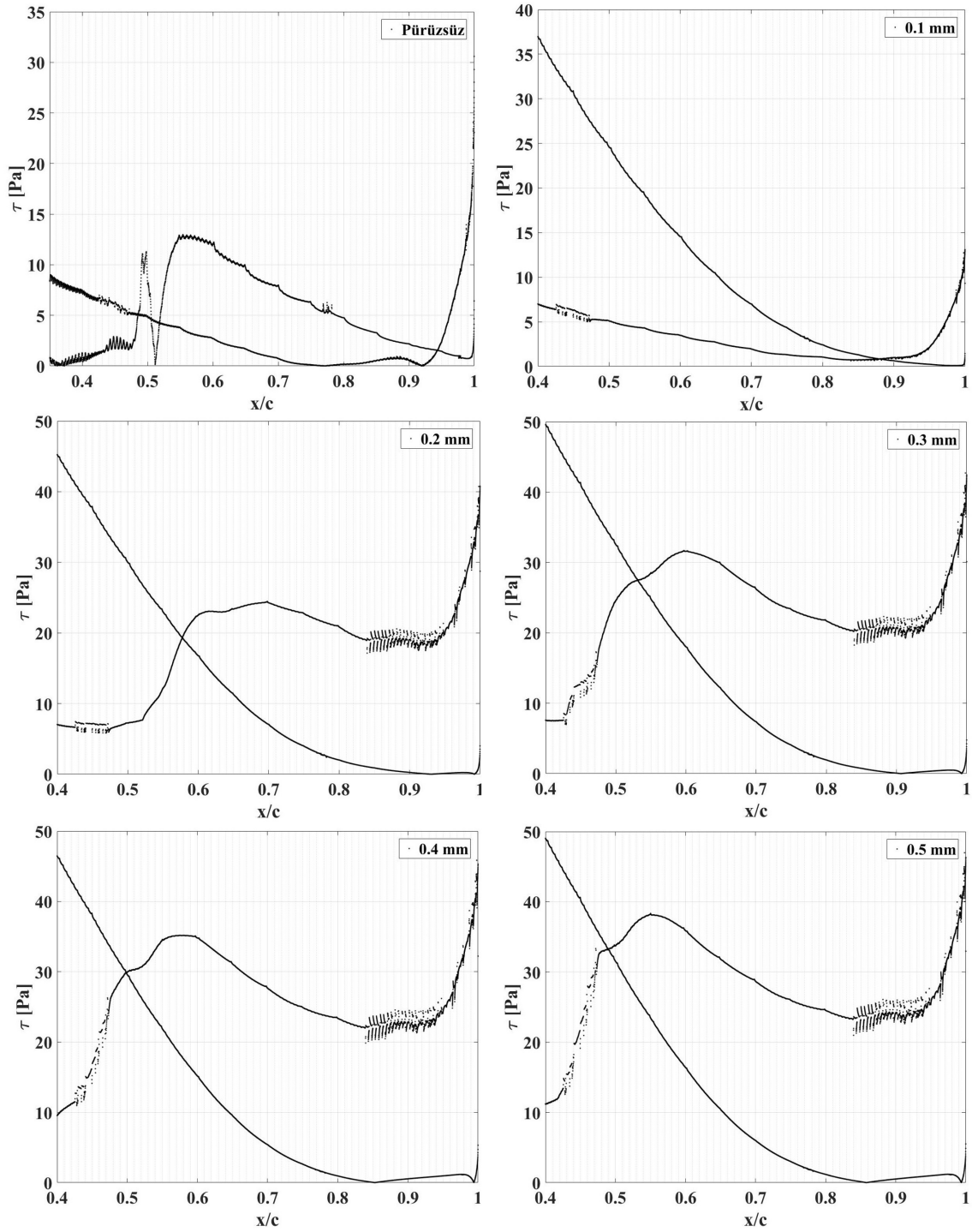
Şekil 6.35. $Re = 5 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

Kanadın üzerine 0.4 mm pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.36'da verilen akım çizgilerinde ayrılma kabarcıkları gayet net görülebilecek kadar büyümüştür. Kanadın kuyruk kısmına yakın bölgede gerçekleşen bu ayrılmanın tam konumu Şekil 6.37'den $x/c = 0.85$ olarak elde edilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.5 mm olduğunda da akış ayrılması $x/c = 0.85$ konumunda gerçekleşmiş ancak farklı olarak daha büyük bir ayrılma kabarcığı oluşmuştur.

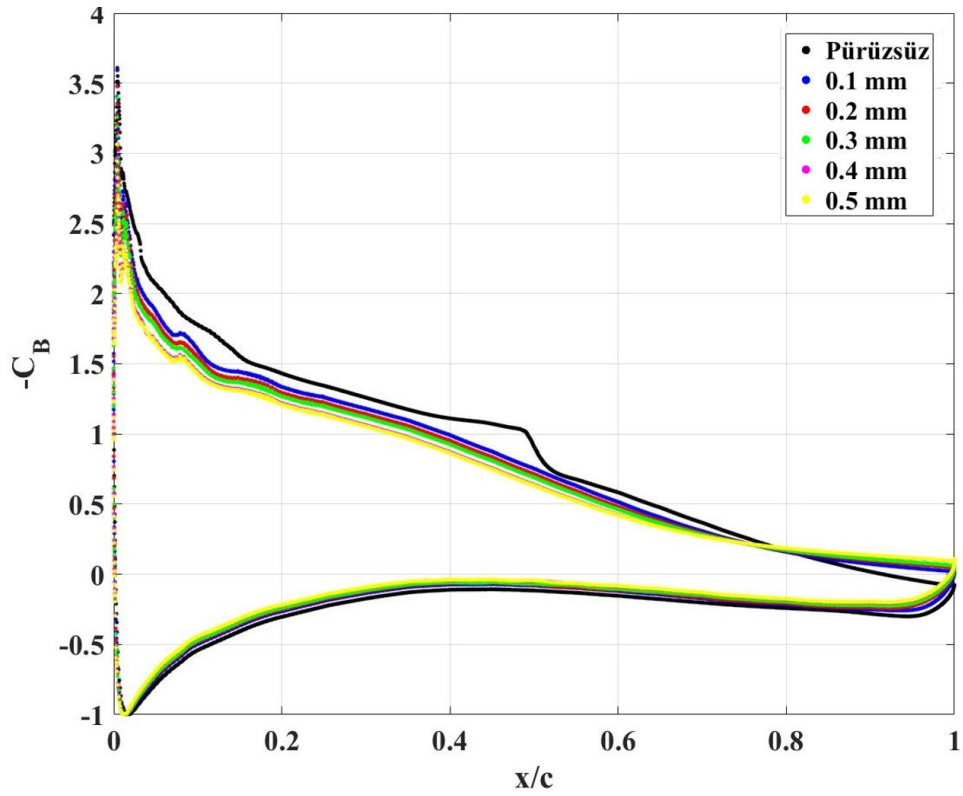
Reynolds sayısının 5×10^5 olduğu durumda $\alpha = 8^\circ$ için pürüzlülük uygulanmasının pürüzsüz duruma göre akış ayrılmasını geciktirdiği görülmüştür. Ancak diğer taraftan ayrılma kabarcıklarının boyutları büyümüştür.



Şekil 6.36. $Re = 5 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

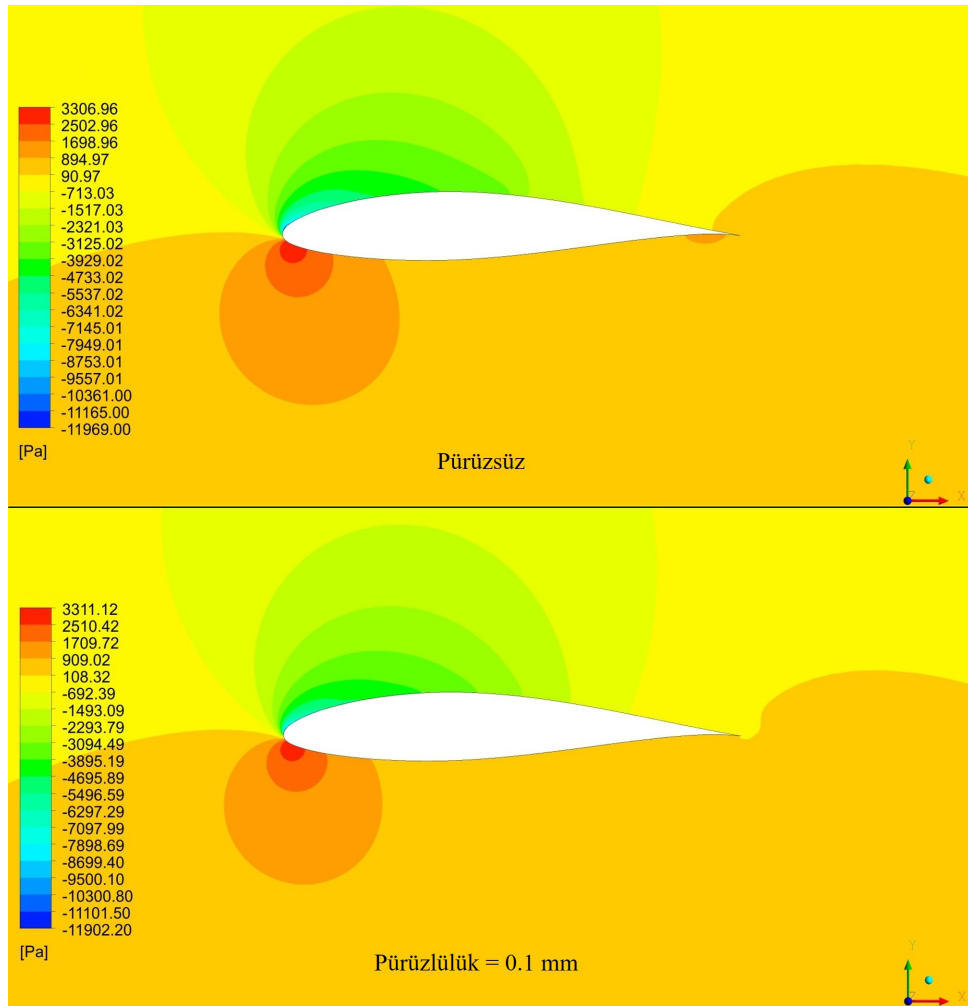


Şekil 6.37. $Re = 5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve pürüzlü durumda kayma gerilmeleri.



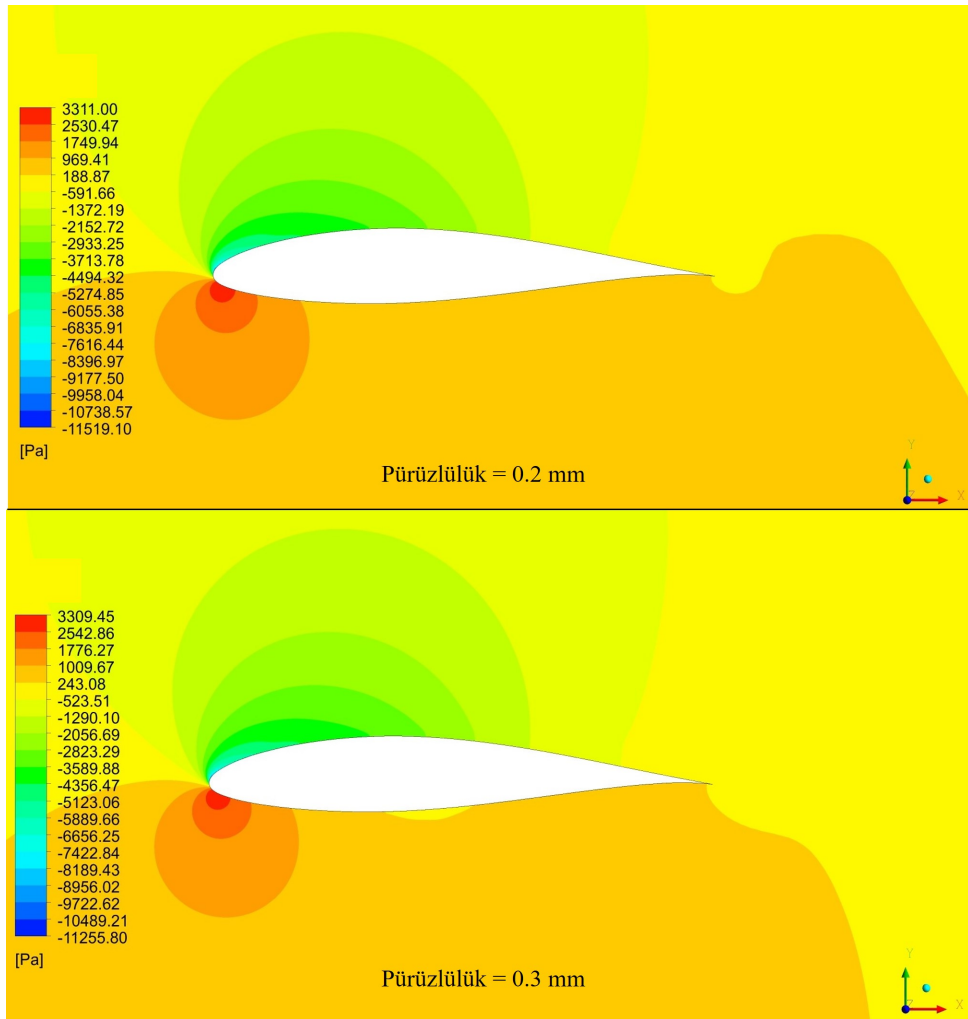
Şekil 6.38. $Re = 5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.

Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda basınç katsayıları Şekil 6.38'de verilmiştir. Şekil 6.38 incelendiğinde pürüzlülük uygulanması durumunda kanadın alt yüzeyinde basınç katsayılarının bir miktar azaldığı özellikle kuyruk kenarına doğru bu azalmanın daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Pürüzlülük uygulaması en fazla kanadın üst yüzeyindeki vakum tarafında etki göstermiştir. Pürüzsüz durumda vakum tarafında en düşük basınç katsayısı değerleri elde edilmiş özellikle pürüzsüz durumda akış ayrılmasının gerçekleştiği $x/c = 0.51$ civarında basınç katsayısında dalgalanma olmuştur. Pürüzlü durumların her birinde pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla kanadın basınç ve vakum bölgeleri arasındaki basınç farkı daha az olmuş dolayısıyla pürüzlülük yüksekliği arttıkça Şekil 6.30'da ifade edildiği gibi kaldırma katsayısı azalmıştır.



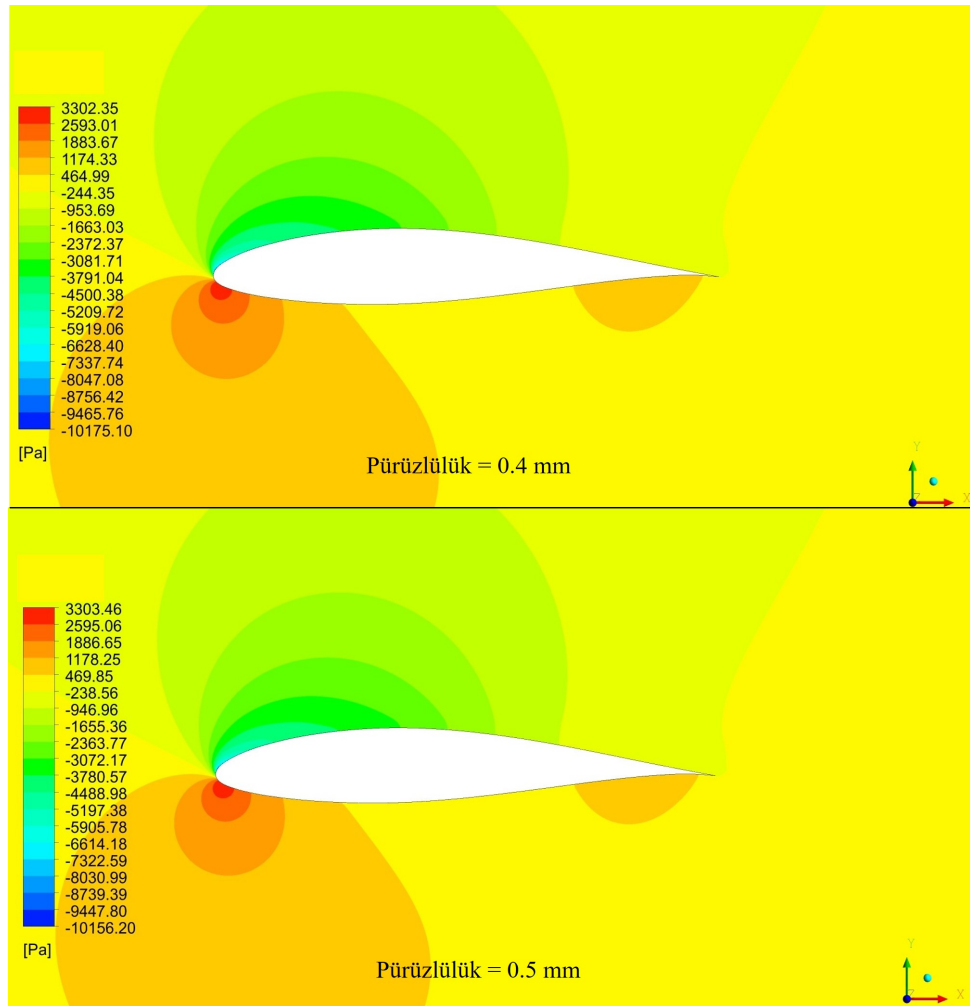
Şekil 6.39. $Re = 5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları.

Pürüzsüz durumda $Re = 5 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de basınç dağılımına Şekil 6.39'da bakıldığında pürüzsüz durumda vakum bölgesinde basıncın özellikle hücum kenarına yakın yerlerde -11969 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek 90 Pa civarlarına ulaştığı ve vakum tarafında bu iki değer arasında basınç dağılımı gerçekleştiği görülmüştür. Kanadın basınç tarafında ise 894 Pa ortalama basınç oluşmuştur. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında ise Şekil 6.39'da görüldüğü gibi vakum bölgesinde basıncın -11902 Pa ile 108 Pa arasında dağılım sergilediği gözlenmiştir. Kanadın basınç bölgesinde ise pürüzsüz duruma benzer şekilde 909 Pa civarında basınç dağılımı gerçekleşmiştir.



Şekil 6.40. $Re = 5 \times 10^5$ 'te 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları.

$Re = 5 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.40'ta verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda vakum tarafında basıncın -11519 Pa ile 188 Pa arasında dağılım sergilemiştir. Aynı pürüzlülük yüksekliğinde basınç tarafında ortalama 969 Pa basınç dağılımı oluşmuştur. Durma noktasında ise basınç 3311 Pa'a kadar çıkmıştır. Pürüzlülük yüksekliği 0.3 mm iken basınç bölgesinde yaklaşık 1009 Pa basınç elde edilmiş, noktasında ise 3309 Pa basınç ortaya çıkmıştır. Vakum bölgesinde basınç dağılımı -11255 Pa ile 243 Pa arasında meydana gelmiştir.



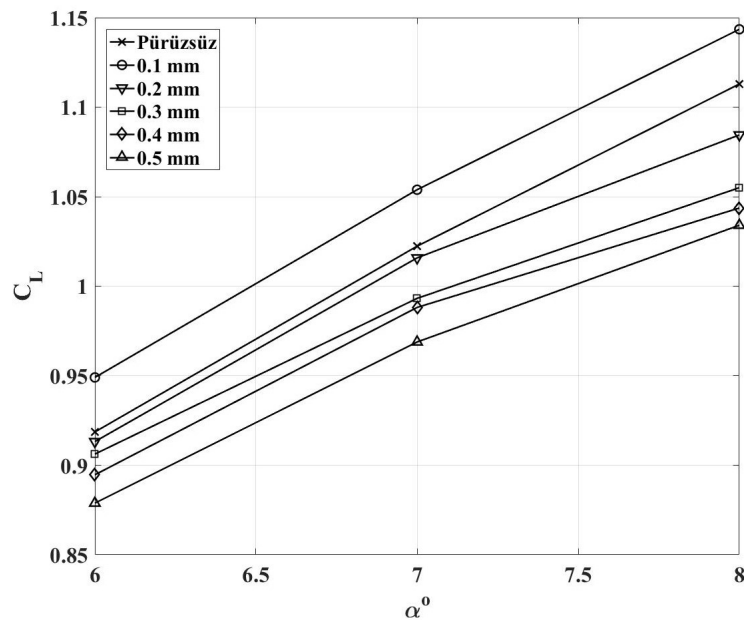
Şekil 6.41. $Re = 5 \times 10^5$ 'te 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükteki basınç dağılımları.

$Re = 5 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.41'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 ve 0.5 mm'de Reynolds sayısının 10^5 'e eşit olduğu haldeki gibi birbirine oldukça benzer basınç dağılımları elde edilmiştir. Her iki pürüzlülük yüksekliğinde de vakum bölgesinde hücum kenarına yakın kısımlarda basıncın yaklaşık -10156 ile -10175 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık 465-469 Pa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca iki pürüzlülük yüksekliğinde de basınç tarafında hücum kenarına yakın bölgede ve kuyruk kenarında 1174-1178 Pa basınç dağılımı oluşurken bu ikisi arasında kalan bölgede 465-469 Pa basınç alanı meydana gelmiştir.

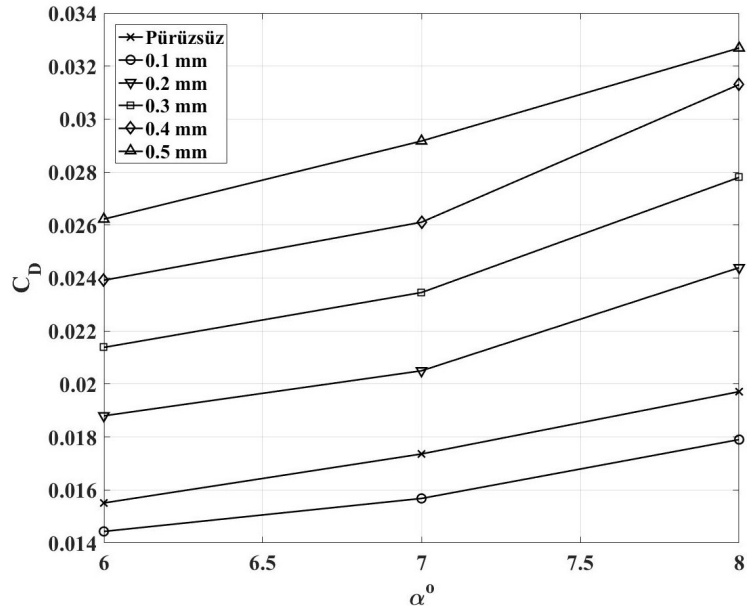
Pürüzlülük uygulaması $Re = 10^5$ için olumlu yönde etki yapmıştır. Ancak Reynolds sayısı 5×10^5 'e yükseldiğinde pürüzlülüğün negatif etkileri ortaya çıkmıştır. Reynolds sayısının 10^5 ile 5×10^5 arasında olması durumunda pürüzlülüğün ne gibi bir etki

yapacağını görmek için optimum hücum açısı belirlerken kullanılmayan sadece pürüzlülük uygulamasında çalışılan $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te analizler gerçekleştirilmiştir.

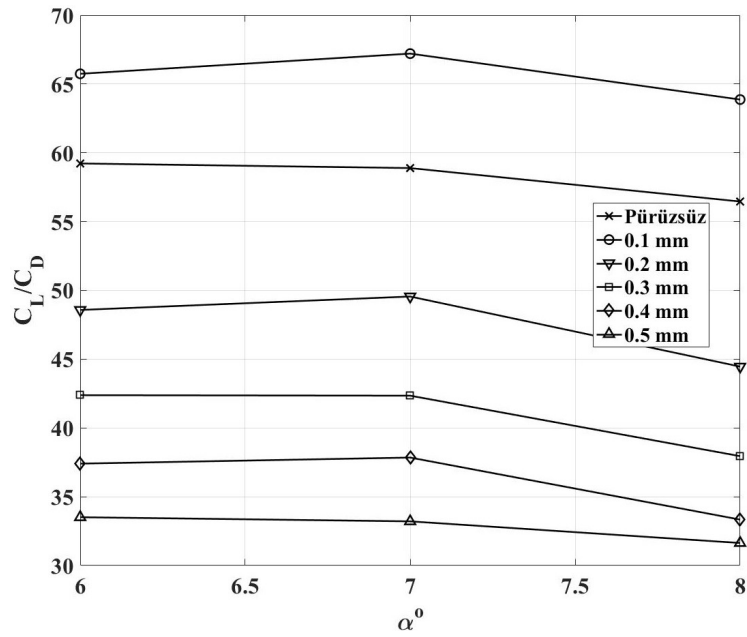
Şekil 6.42'nin incelenmesi pürüzlülüğün boyutuna bağlı olarak pozitif ve negatif etki ettiğini göstermiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.1 mm olarak uygulandığında Reynolds sayısının 10^5 'e eşit olduğu duruma benzer şekilde kaldırma katsayısı pürüzsüz yüzeye göre daha yüksek elde edilmiştir. Ancak pürüzlülük yüksekliğinin 0.2 mm ve üzeri durumları için kaldırma katsayısı pürüzsüz yüzeyden elde edilen değerlerden daha düşük olmuştur. Şekil 6.43'e bakıldığında sürüklenme katsayısının 0.1 mm pürüzlülükte en düşük değerlerinde olduğu görülmüştür. Sürüklenme katsayısı değerleri pürüzlülük 0.2 mm ve üzeri durumlarda pürüzsüz yüzeyden daha yüksek seviyelerde ortaya çıkmıştır. Kaldırma/sürüklenme oranları ise Şekil 6.44'te verildiği gibi pürüzlülük 0.1 mm için pürüzsüz durumdan daha yüksek olmuştur. Bunun dışındaki pürüzlülükler $Re = 5 \times 10^5$ şartlarına benzer şekilde kanat performansını negatif yönde etkilemiş ve pürüzsüz durumdan daha düşük kaldırma/sürüklenme oranı değerleri elde edilmiştir.



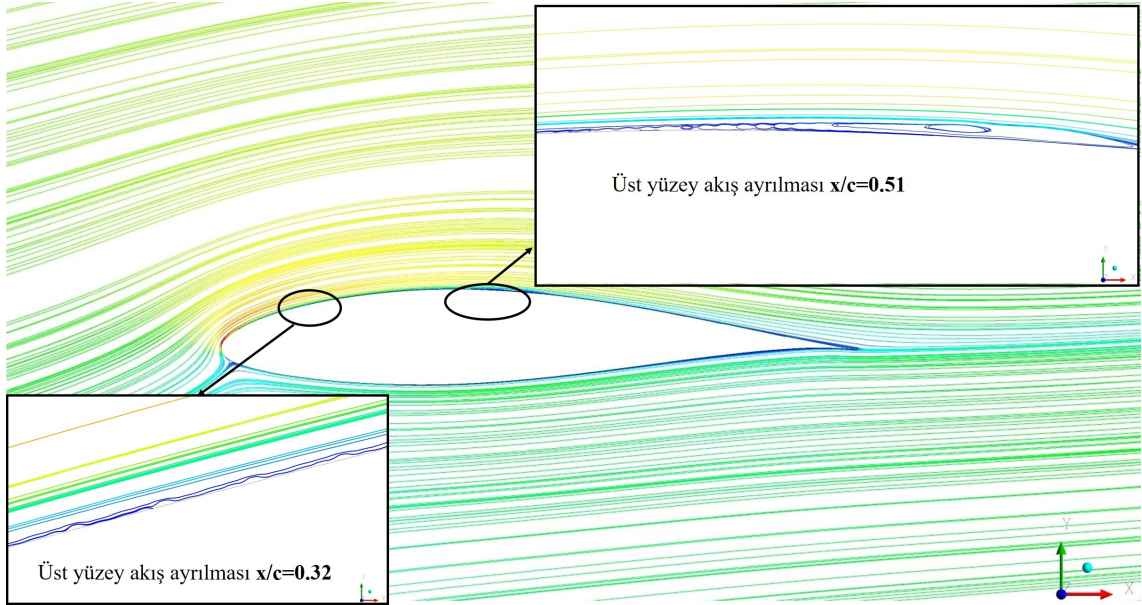
Şekil 6.42. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri.



Şekil 6.43. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri.

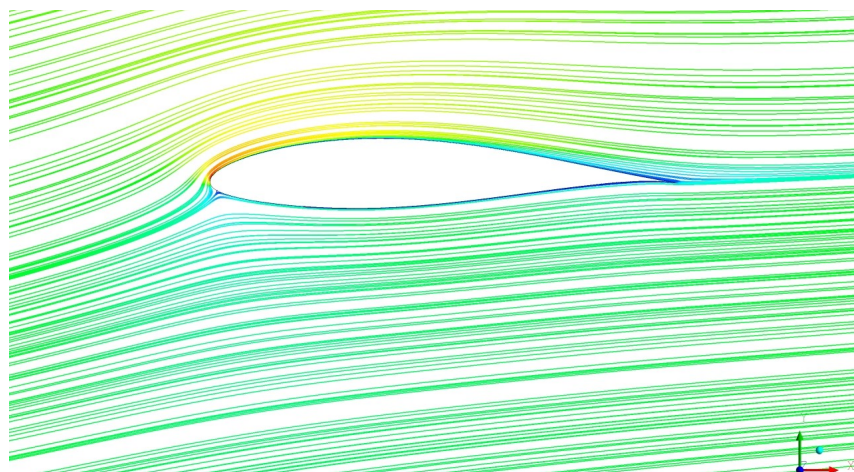


Şekil 6.44. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları.



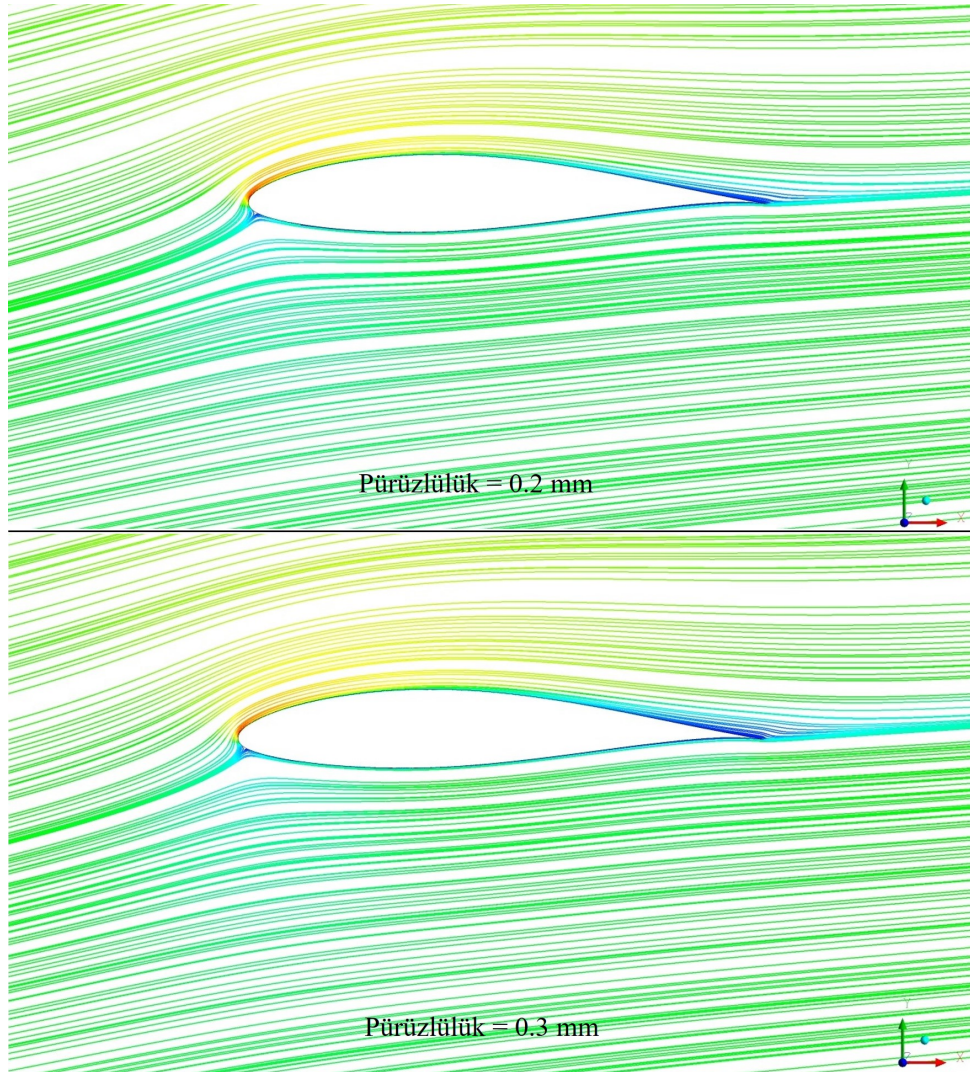
Şekil 6.45. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz yüzey üzerinde oluşan akım çizgileri.

Reynolds sayısı 2.5×10^5 için pürüzsüz kanat yüzeyi üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 6.45'te verilmiştir. Görüldüğü gibi pürüzsüz yüzey üzerinde $x/c = 0.32$ ve $x/c = 0.51$ olmak üzere iki farklı bölgede akış ayrılması gerçekleşmiştir. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulanması halinde ise Şekil 6.46'daki akım çizgileri oluşmuştur. Bu akım çizgileri ve Şekil 6.49 göz önüne alındığında 0.1 mm pürüzlülük yüksekliğinde akış ayrılmasının gerçekleşmediği görülmüştür. Yani pürüzlülük burada akışın yüzeye bağlanmasında rol oynamıştır.



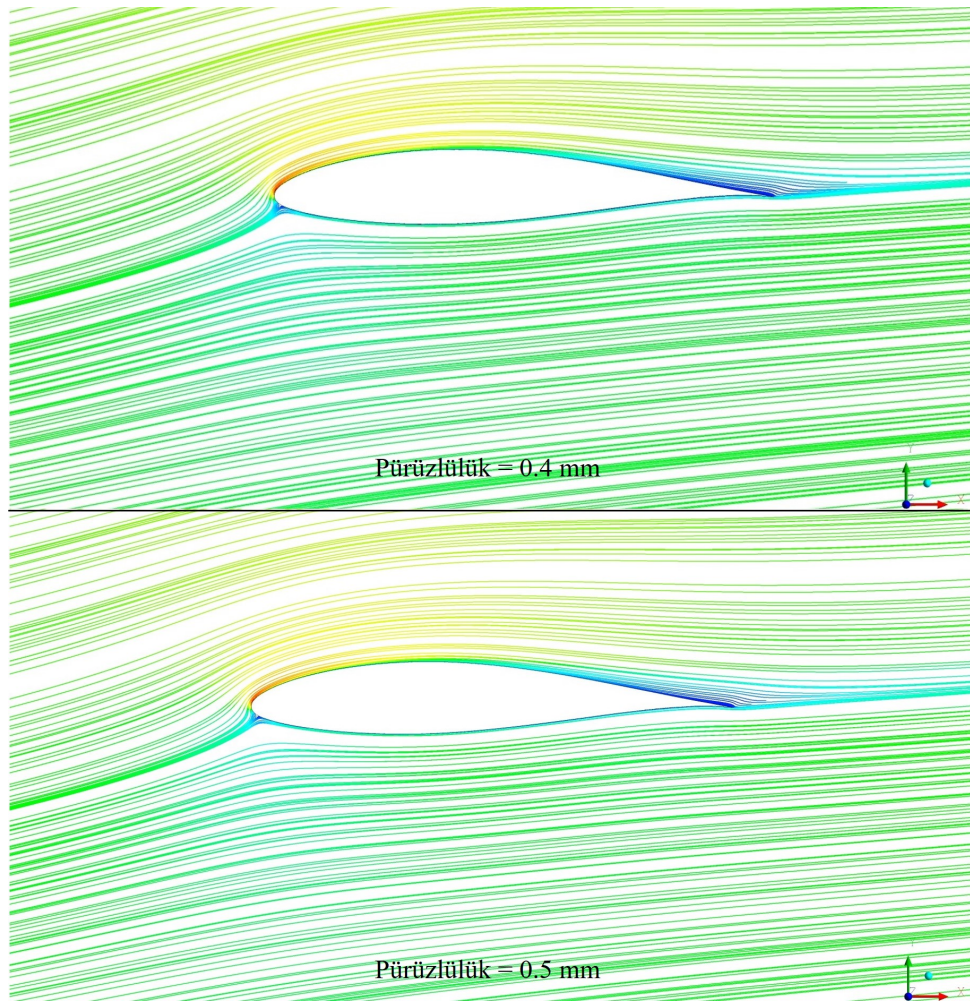
Şekil 6.46. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te 0.1 mm pürüzlülük için oluşan akım çizgileri.

Pürüzlülük yüksekliğinin 0.2 ve 0.3 *mm* olması Şekil 6.47'deki akım çizgilerinin meydana gelmesine sebep olmuştur. Şekil 6.47'de 0.2 *mm* için verilen akım çizgilerinden ve Şekil 6.49'dan anlaşıldığı üzere bu pürüzlülük değerinde akışta herhangi bir ayrılma kabarcığı meydana gelmemiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.3 *mm* için akım çizgileri ve Şekil 6.49 incelendiğinde kanat üzerindeki akışta ayrılma gözlemlenmemiştir. Buradan da 0.1 *mm* pürüzlülük yüksekliği ile aynı olarak akışın kanat yüzeyine pürüzlülük sayesinde tutunduğu anlaşılmaktadır. Ancak akış ayrılması olmamasına rağmen 0.2 ve 0.3 *mm* pürüzlülük yüksekliklerinde Şekil 6.42 ve 6.43'te görüldüğü gibi kaldırma katsayısı pürüzsüz duruma göre daha düşük, sürükleme katsayısı ise pürüzsüz duruma göre daha yüksek çıkmıştır.

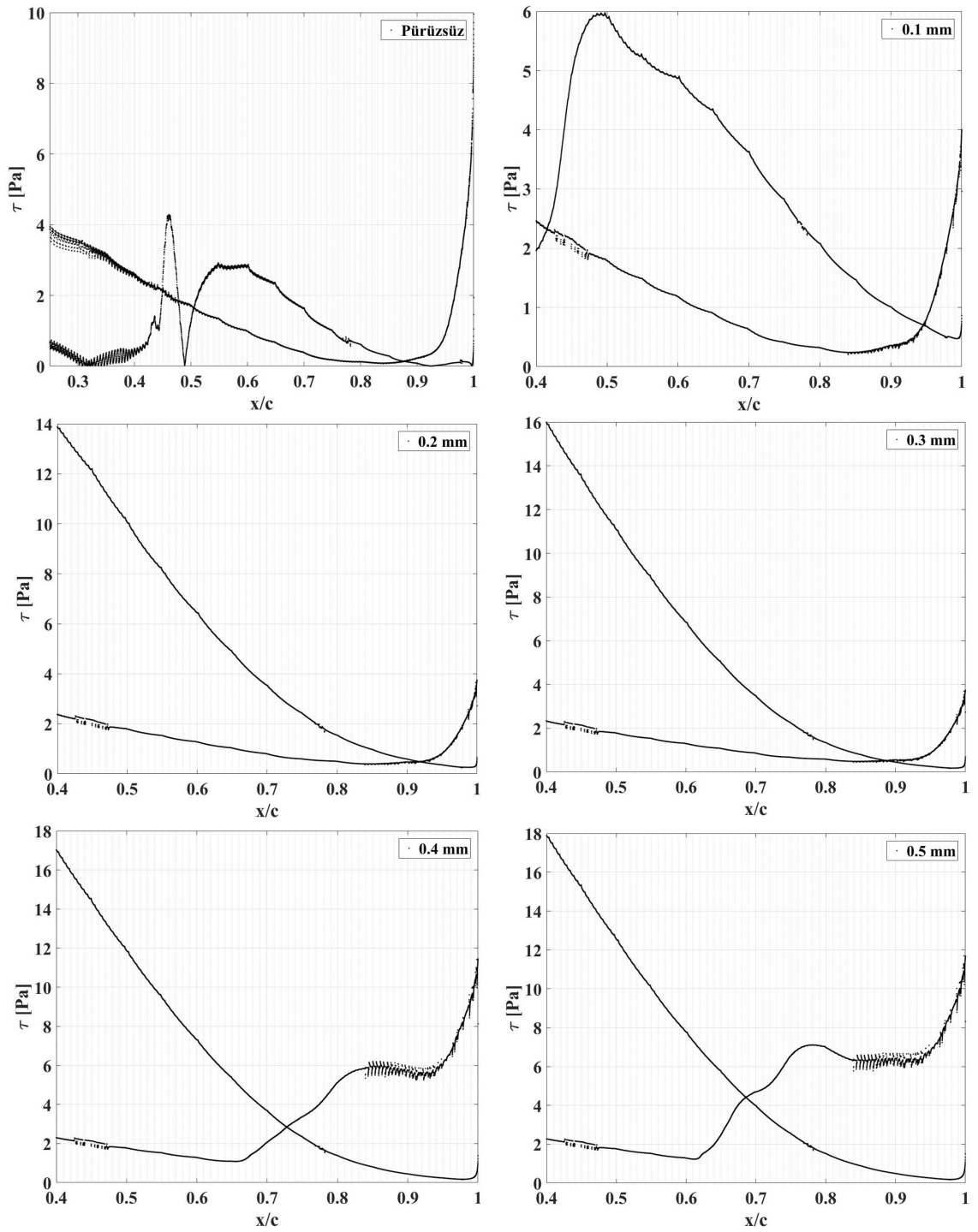


Şekil 6.47. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te 0.2 ve 0.3 *mm* pürüzlülükteki akım çizgileri.

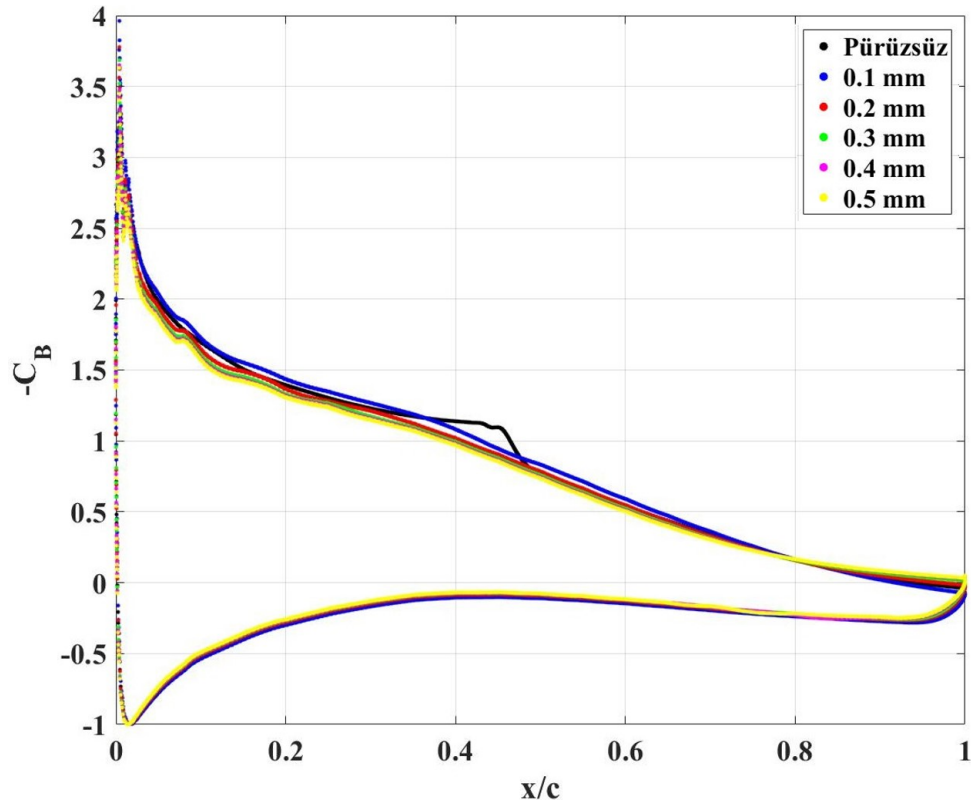
Kanadın üzerine 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.48’de verilen akım çizgileri birbirine çok benzer şekilde oluşmuş ve ayrılma kabarcığı her iki pürüzlülük yüksekliğinde de meydana gelmemiştir. Şekil 6.49’da da kayma gerilmesi değerinin bu iki pürüzlülük değeri için de sıfıra düşmediği görülmüştür. Ayrıca 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük değerlerinde olduğu gibi bu pürüzlülük yüksekliklerinde de akışın yüzeye tutunması sağlanmasına rağmen kaldırma katsayısında düşüş sürüklenme katsayısında artış ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.48. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükteki akım çizgileri.

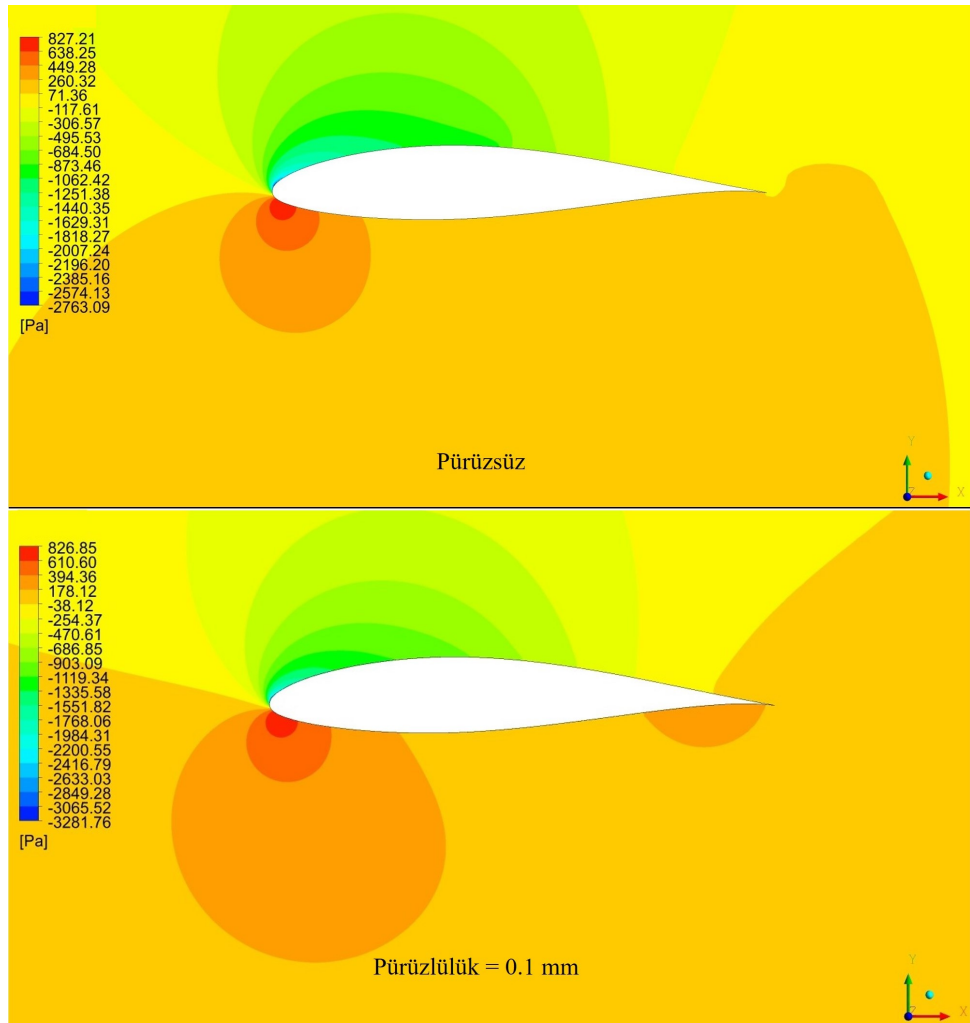


Şekil 6.49. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.



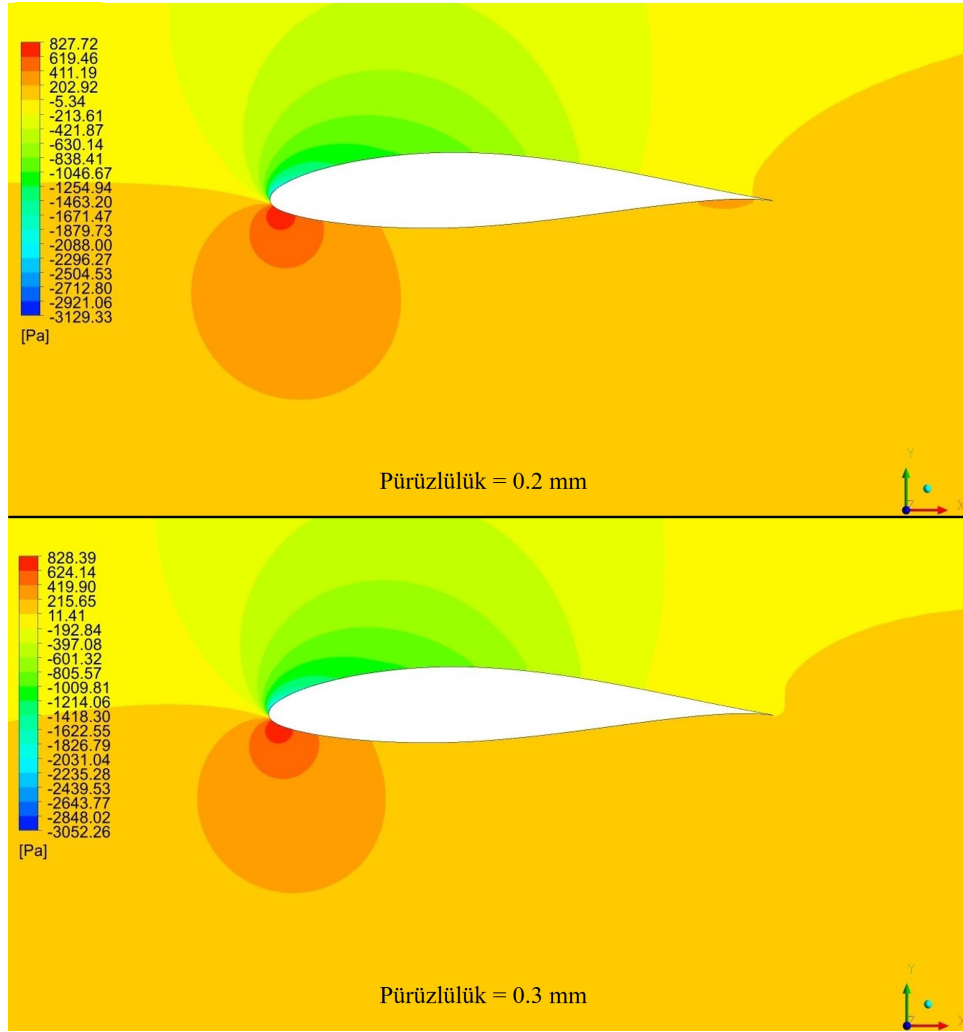
Şekil 6.50. $Re = 2.5 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.

Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda $Re = 2.5 \times 10^5$ için basınç katsayıları Şekil 6.50'de verilmiştir. Şekil 6.50'de pürüzlülük uygulanması durumunda kanadın alt yüzeyinde basınç katsayılarının bir miktar azaldığı gözlemlenmiştir. Pürüzlülük uygulaması $Re = 5 \times 10^5$ 'te olduğu gibi $Re = 2.5 \times 10^5$ için de en fazla kanadın üst yüzeyindeki vakum tarafında etki göstermiştir. Pürüzlülüğün 0.1 mm olması durumunda vakum tarafında en düşük basınç katsayısı değerleri elde edilmiştir. Diğer pürüzlülük yüksekliklerinde ise vakum tarafındaki basınç katsayısı değerleri pürüzsüz duruma göre daha yüksek çıkmıştır. Buna bağlı olarak kanadın basınç ve vakum bölgeleri arasındaki basınç farkı daha az olmuştur. Alt ve üst yüzey arasındaki basınç farkının azalması kanat üzerinde akış ayrılması olmasada 0.2-0.5 mm pürüzlülük yüksekliklerinde kaldırma katsayısının daha düşük seviyelerde olmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 6.51. $Re = 2.5 \times 10^5$ 'te pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

Pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlü durumda $Re = 2.5 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de basınç dağılımı Şekil 6.51'de verilmiştir. Pürüzsüz durumda vakum bölgesinde basınç en düşük -2763 Pa'a kadar inmiştir. Kuyruk kenarına doğru ise basınç yaklaşık 71 Pa'a yükselmiştir. Pürüzsüz halde kanadın basınç bölgesinde 260 Pa ortalama basınç oluşmuştur. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.51'de görüldüğü gibi vakum bölgesinde -3281 Pa ile -38 Pa arasında basınç dağılımı gerçekleşmiştir. Kanadın basınç bölgesinde ortalama 178 Pa basınç dağılımı olmuştur. Basınç dağılımlarından da görüldüğü gibi 0.1 mm pürüzlülük yüksekliğinde pürüzsüz duruma göre kanat alt ve üst yüzeyleri arasında daha fazla basınç farkı meydana gelmiştir.

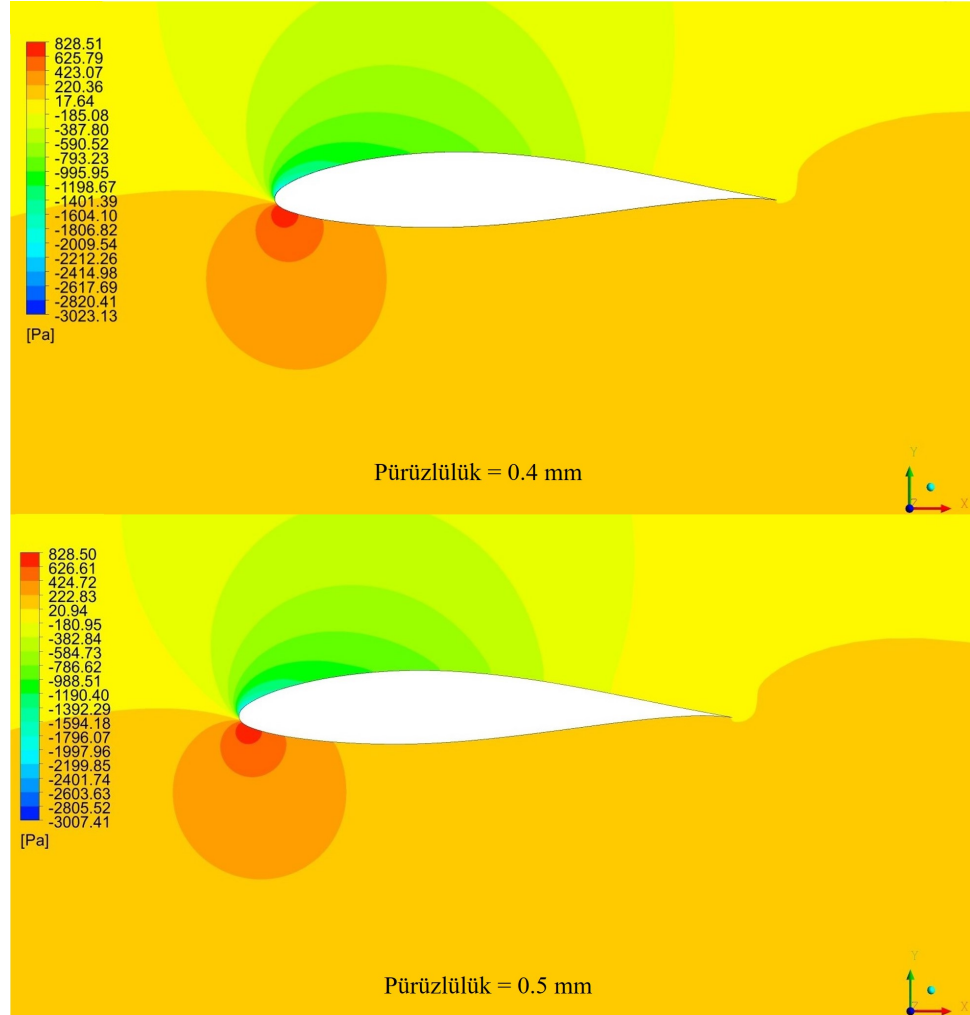


Şekil 6.52. $Re = 2.5 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

$Re = 2.5 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.52'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda vakum tarafında -3129 Pa ile -5.34 Pa arasında basınç dağılımı gerçekleşmiştir. Basınç tarafında ise ortalama 202 Pa basınç dağılımı meydana gelmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.3 mm için basınç bölgesinde yaklaşık 215 Pa basınç elde edilmiş, vakum bölgesinde ise basınç dağılımı -3052 ile 11 Pa aralığında oluşmuştur.

$Re = 2.5 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.53'te verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 ve 0.5 mm'de benzer basınç dağılımları elde edilmiştir. Her iki pürüzlülük yüksekliğinde de vakum bölgesinde hücum kenarı yakınlarında basıncın yaklaşık -3023 ile -3007 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık 20 Pa'a kadar arttığı

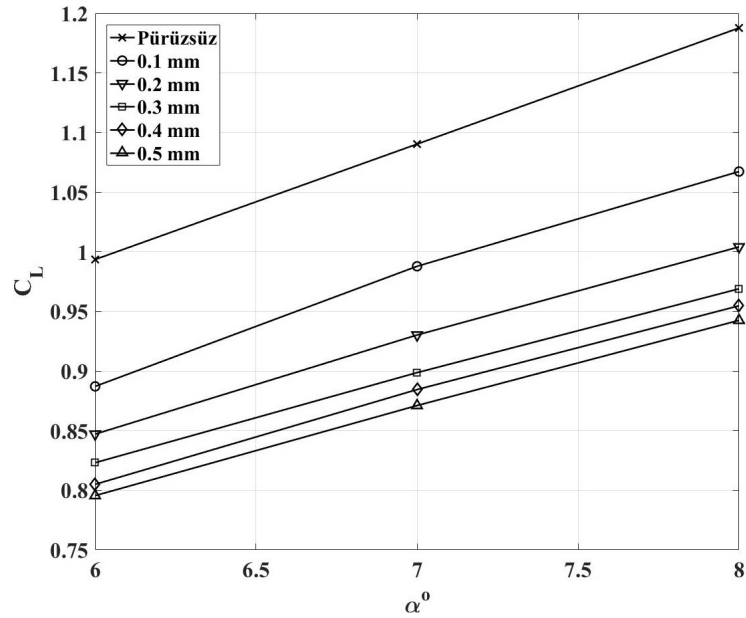
gözlemlenmiştir. Ayrıca iki pürüzlülük yüksekliğinde de basınç tarafında ortalama 220 Pa basınç alanı meydana gelmiştir.



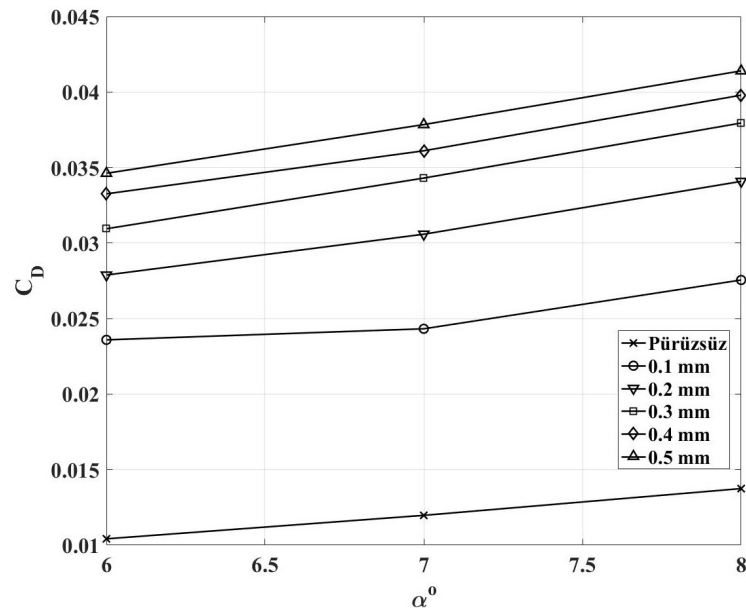
Şekil 6.53. $Re = 2.5 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

Reynolds sayısının 7×10^5 olması halinde ortaya çıkan kaldırma katsayısı-hücum açısı grafiği Şekil 6.54'te verilmiştir. Pürüzlülük eklenmesi durumunda kaldırma katsayısında pürüzsüz duruma göre çok belirgin bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla kaldırma katsayısı giderek azalmıştır. Pürüzlülük yükseklikleri kendi içlerinde kıyaslandıklarında da 0.3, 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük değerlerinde kaldırma katsayılarının birbirlerine yaklaştığı görülmüştür. Şekil 6.55'e bakıldığında sürükleme katsayısının pürüzlülük yüksekliğinin artmasına bağlı olarak yükseldiği görülmüştür. Kaldırma/sürükleme oranları Şekil 6.56'da verildiği gibi pürüzsüz durumdan daha düşük seviyede olmuştur. Pürüzlülük yüksekliğinin artması sonucunda hem

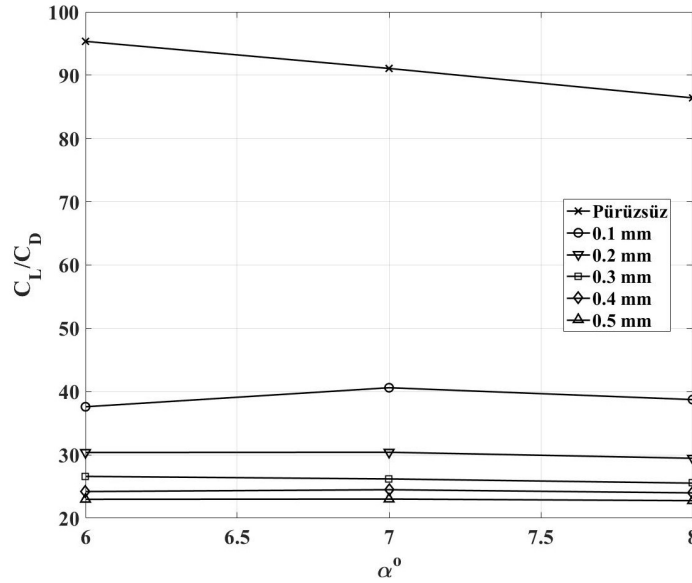
kaldırma katsayısındaki azalış hem de sürüklenme katsayısındaki artış kaldırma/sürüklenme oranlarınının pürüzsüz duruma göre ciddi şekilde düşmesine sebep olmuştur.



Şekil 6.54. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri.

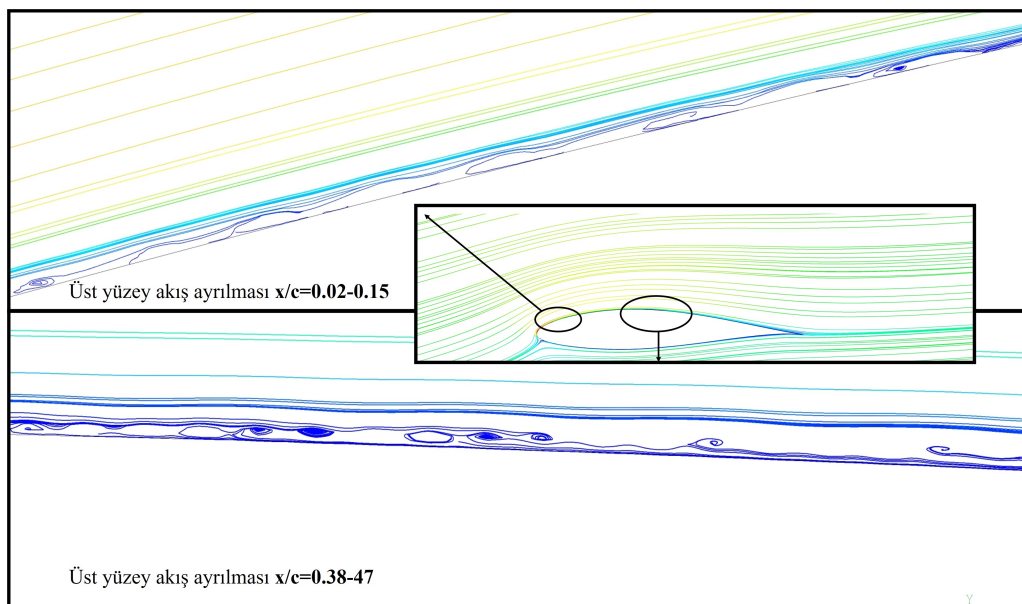


Şekil 6.55. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri.



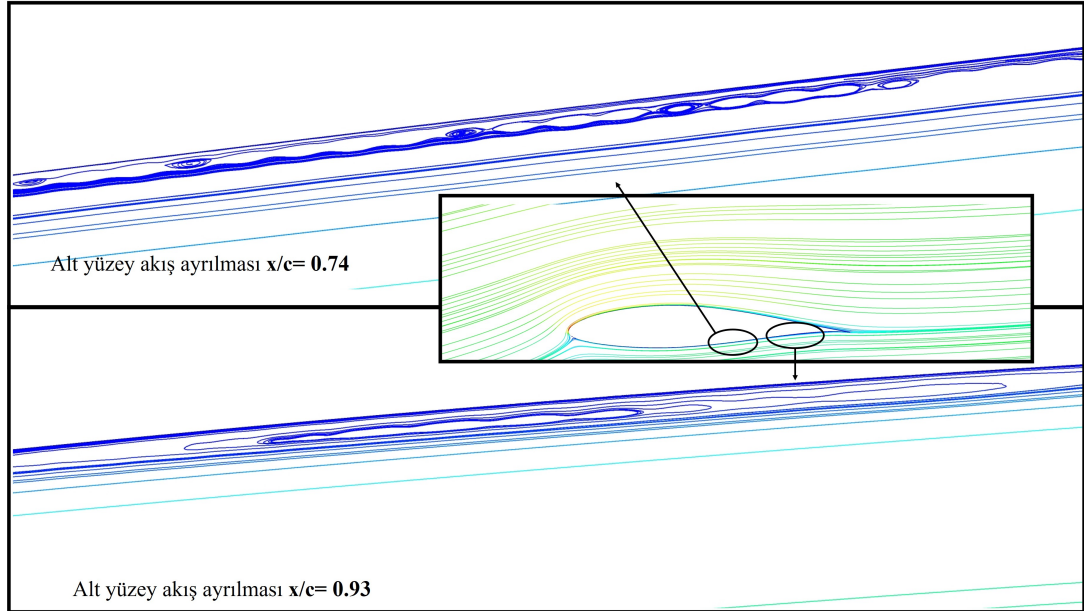
Şekil 6.56. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları.

Reynolds sayısı 7×10^5 için pürüzsüz kanadın üst yüzeyi üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 6.57'de verilmiştir. Şekil 6.62'den yola çıkarak pürüzsüz kanadın üst yüzeyinde $x/c = 0.02 - 0.15$ arasında kayma gerilmesinde 0 Pa'a yakın dalgalanmalar oluşmuştur. Bu bölge yakından incelendiğinde ise kanat yüzeyinde Şekil 6.57'de verilen küçük girdapların ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca kayma gerilmesi grafiğinde $x/c = 0.38$ ve $x/c = 0.47$ bölgesinde de akışın ayrıldığı görülmüş bu bölge de yakından incelendiğinde Şekil 6.57'de verilen girdaplar fark edilmiştir.



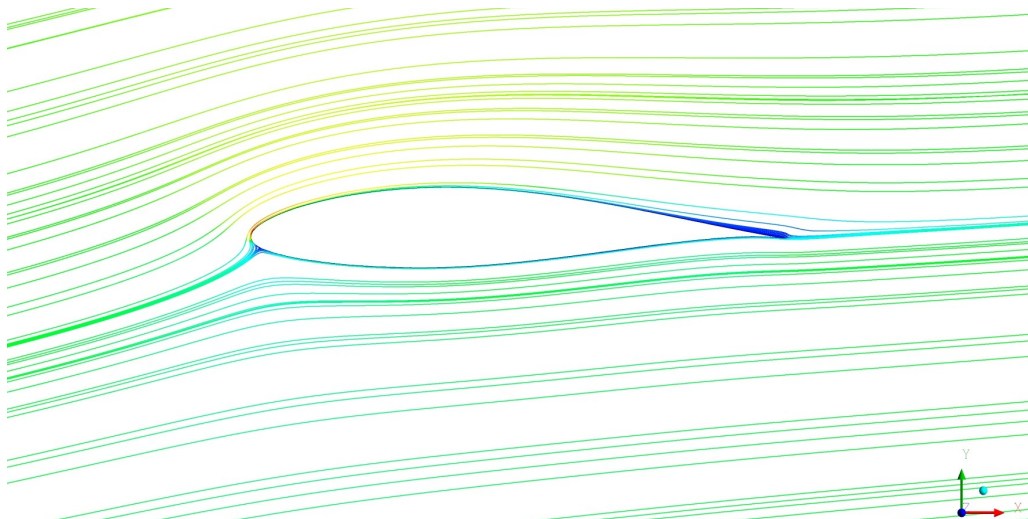
Şekil 6.57. $Re = 7 \times 10^5$ 'te pürüzsüz kanadın üst yüzeyinde oluşan akım çizgileri.

Kanatın alt yüzeyinde de akış ayrılmalarının olduğu bölgeler Şekil 6.62'den $x/c = 0.74$ ve $x/c = 0.93$ olarak belirlenmiştir. Bu bölgeler Şekil 6.58'de gösterilmiştir.



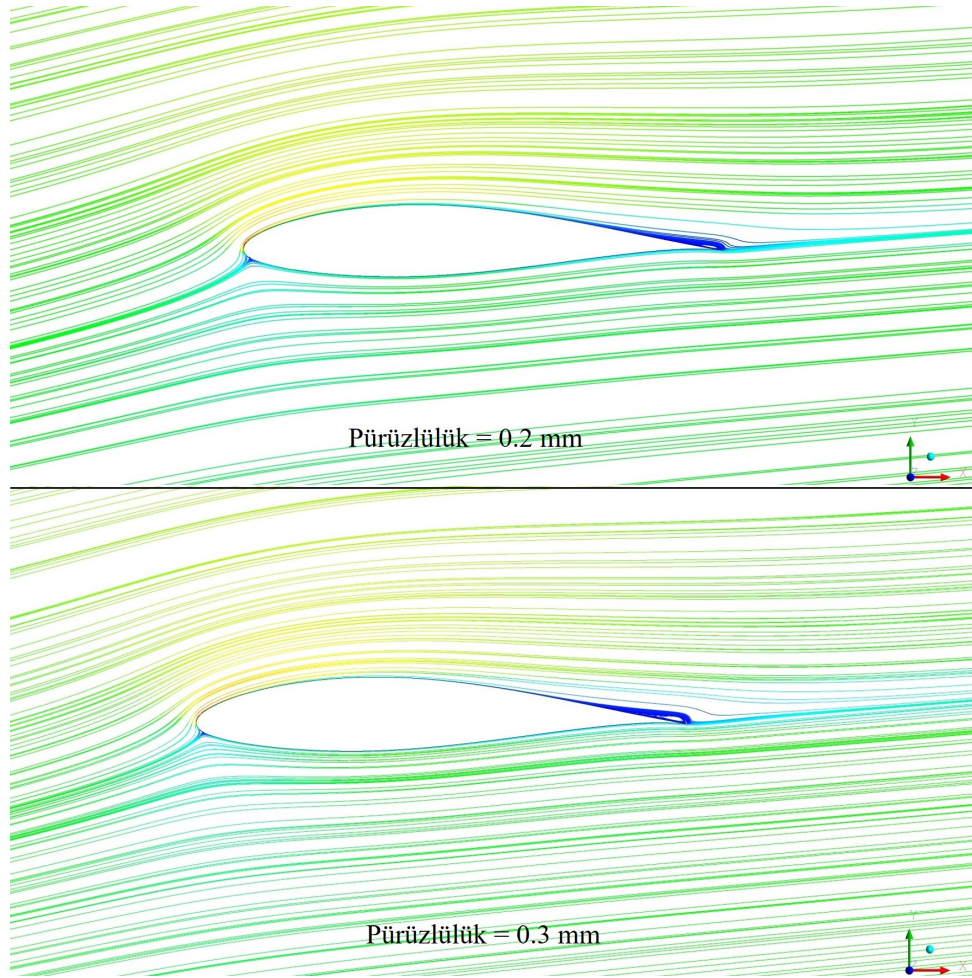
Şekil 6.58. $Re = 7 \times 10^5$ 'te pürüzsüz kanadın alt yüzeyinde oluşan akım çizgileri.

Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulanması halinde ise Şekil 6.59'daki akım çizgileri oluşmuştur. Bu akım çizgileri ve Şekil 6.62 göz önüne alındığında 0.1 mm pürüzlülük yüksekliğinde kayma gerilmesi değerlerinin kuyruk kenarına doğru 0 Pa 'a çok yaklaşmış olmasına rağmen akış ayrılmasının gerçekleşmediği görülmüştür. Yani 0.1 mm pürüzlülük bu Reynolds sayısında da akışın yüzeye bağlanmasında rol oynamıştır.



Şekil 6.59. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

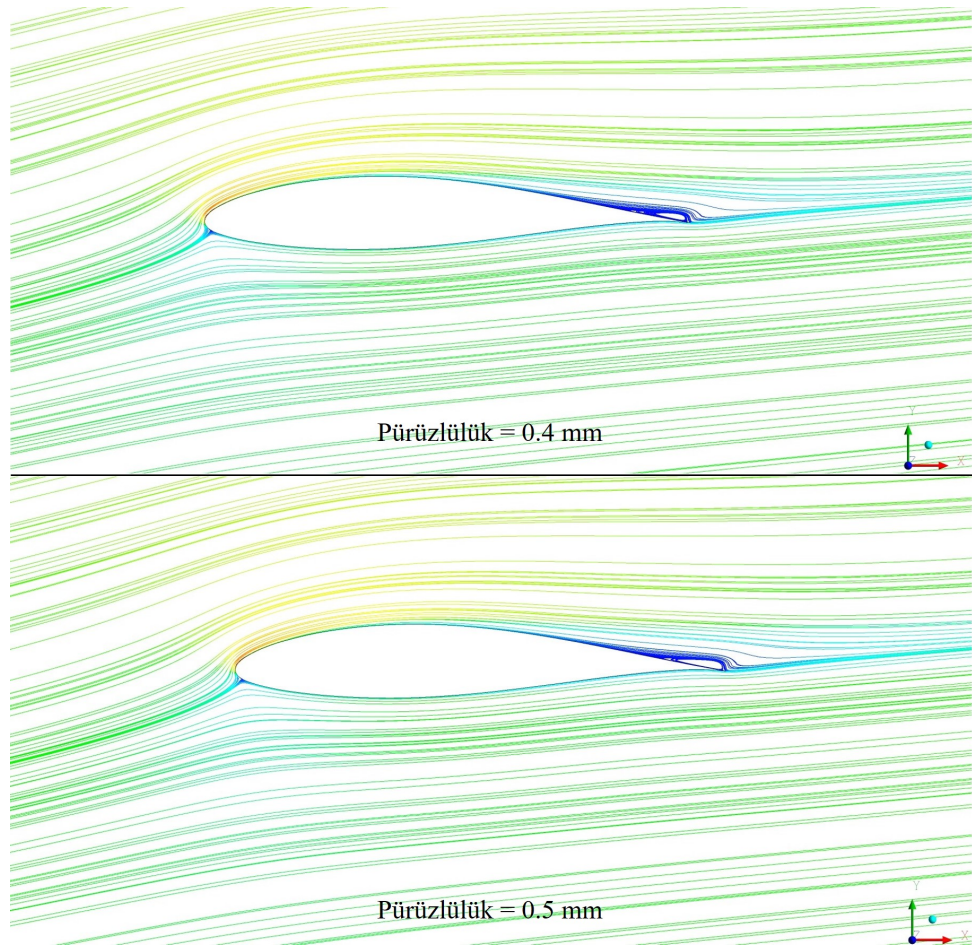
Pürüzlülük yüksekliğinin 0.2 mm olması Şekil 6.60'ta verilen akım çizgilerini meydana getirmiştir. Şekil 6.60'ta 0.2 mm için olan akım çizgileri ve Şekil 6.62'den anlaşıldığı gibi kanat üzerinde akış $x/c = 0.9$ 'da ayrılmıştır. Pürüzlülük 0.3 mm olarak uygulandığında ise Şekil 6.60 ve 6.62'den akışın $x/c = 0.86$ 'da 0.2 mm pürüzlülüğe göre daha büyük bir ayrılma kabarcığı ile kanat üzerinden ayrıldığı gözlemlenmiştir.



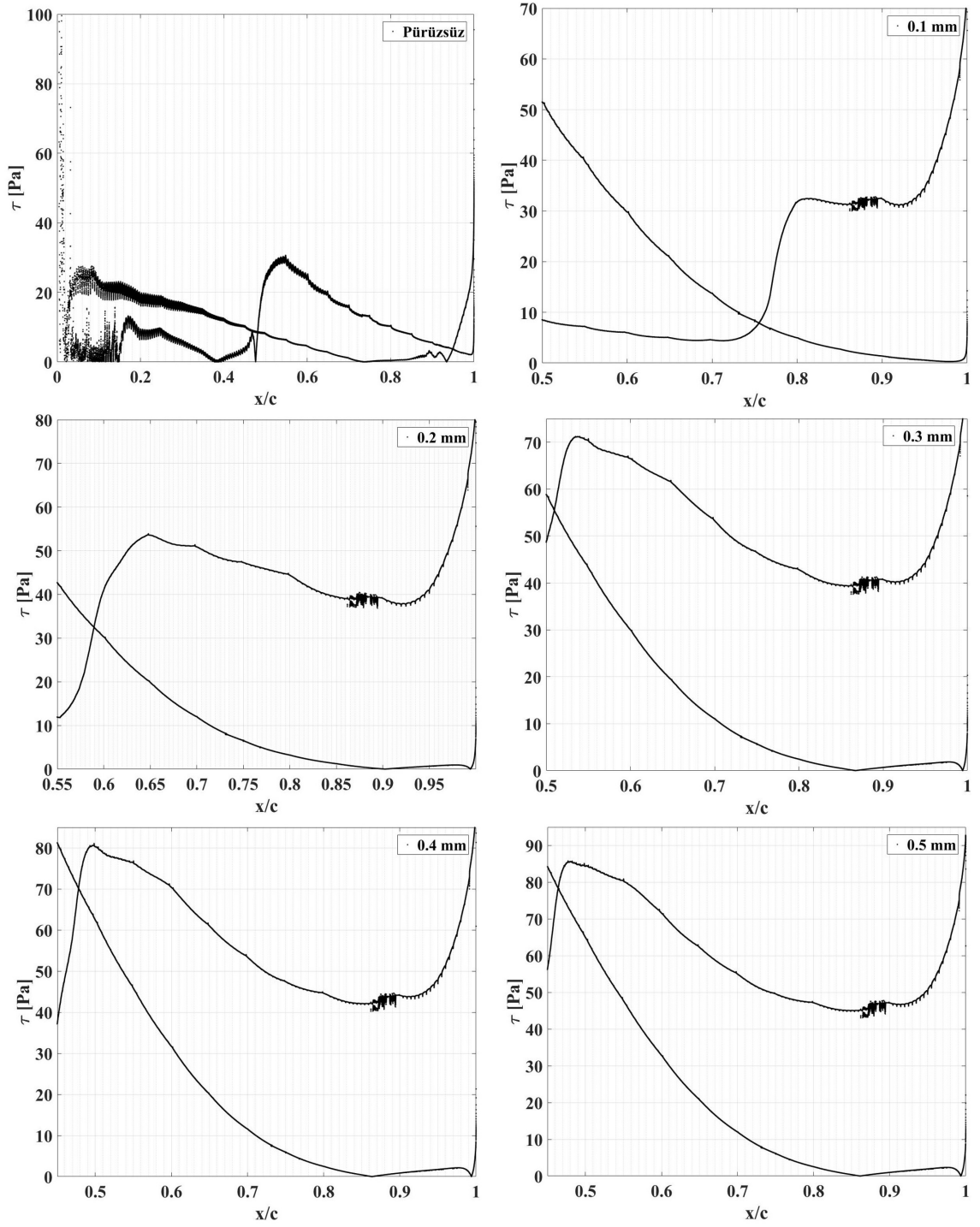
Şekil 6.60. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

Kanat yüzeyine 0.4 ve 0.5 mm yüksekliklerinde pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.61'de verilen akım çizgileri oluşmuştur. Pürüzlülük yüksekliğinin 0.4 mm olduğu durumda kanadın kuyruk kenarında ayrılma kabarcığı görülmüştür. Akışın bu durumda tam olarak ayrıldığı nokta Şekil 6.62'den 0.3 mm pürüzlülük hali ile aynı değerde $x/c = 0.86$ olarak belirlenmiştir. Bahsedilen bu iki pürüzlülük durumu arasındaki fark ise ayrılma kabarcıklarının büyüklüğünden kaynaklanmış 0.4 mm pürüzlülük yüksekliğinde daha büyük bir ayrılma kabarcığı ortaya çıkmıştır. Pürüzlülük boyutu 0.5 mm olduğunda

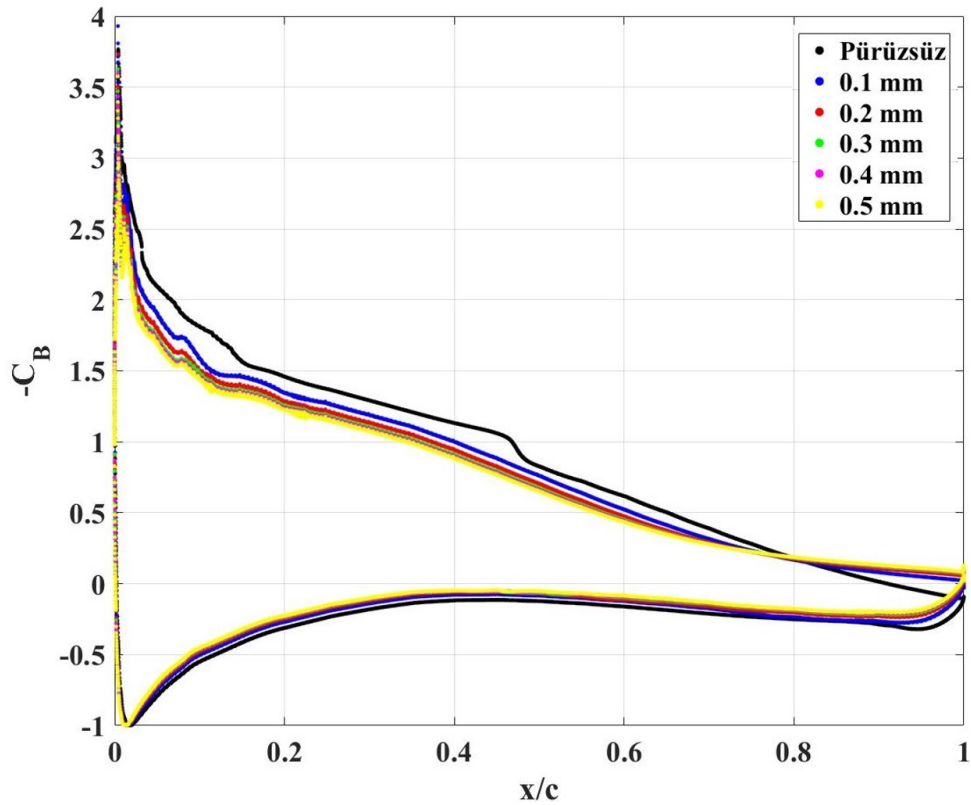
da akışın $x/c = 0.86$ 'da ayrıldığı belirlenmiştir. Yine burada diğer iki pürüzlülük yüksekliğinden tek fark ayrılma kabarcığının daha büyük olmasıdır. Kanat yüzeyine 0.3, 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük uygulanması sonucunda Şekil 6.54 ve 6.55'te kaldırma ve sürüklenme katsayılarının birbirine yakın çıkması gibi akış ayrılmaları da aynı noktadan gerçekleşmiştir.



Şekil 6.61. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

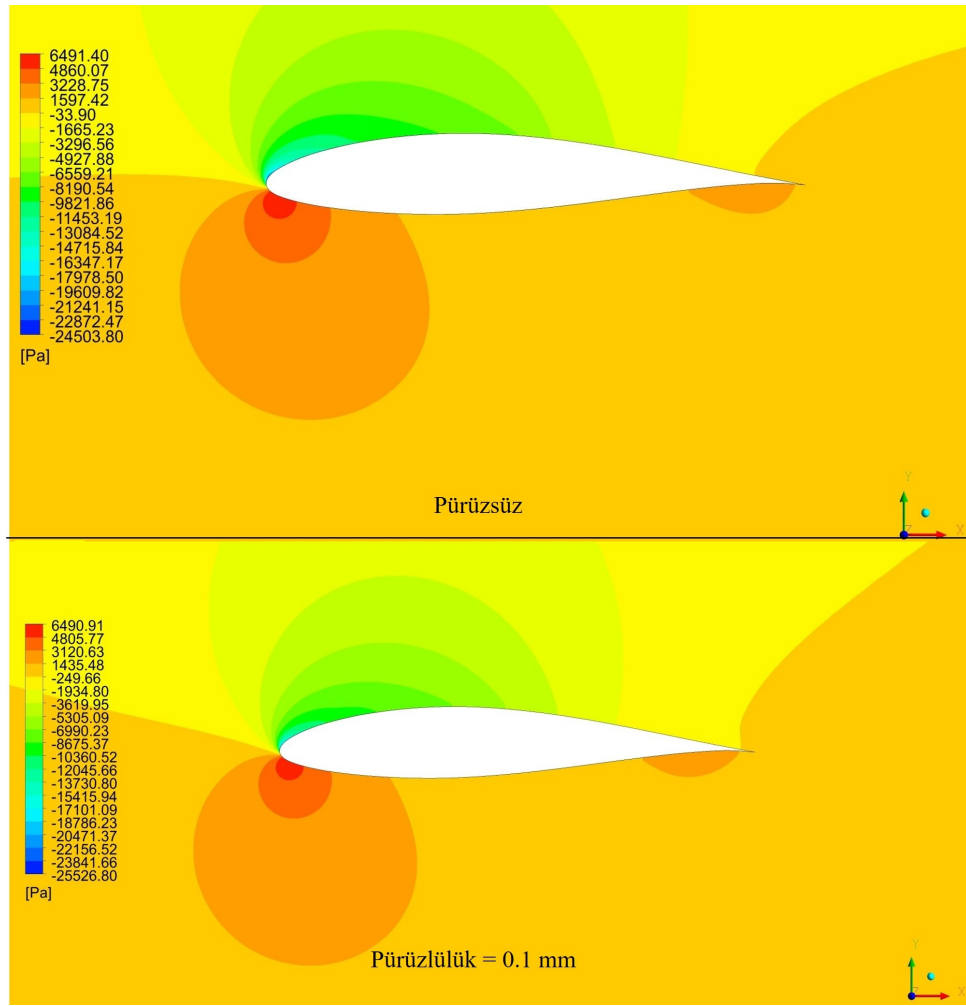


Şekil 6.62. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmesi değerleri.



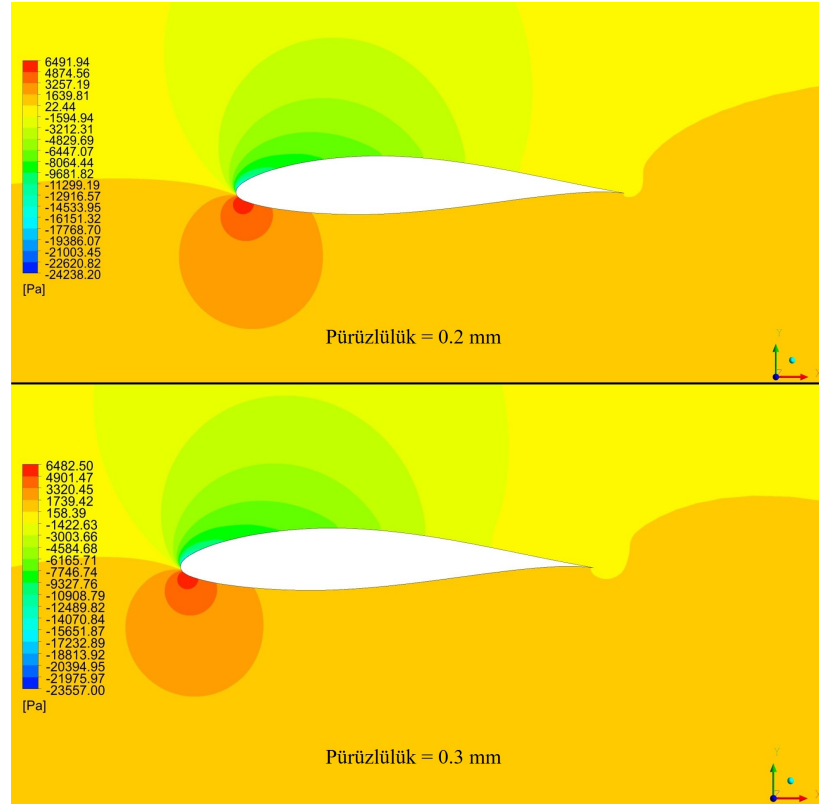
Şekil 6.63. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.

Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda $Re = 7 \times 10^5$ için basınç katsayıları Şekil 6.63'te verilmiştir. Pürüzlülük uygulanması durumunda kanadın alt yüzeyinde basınç katsayılarının bir miktar azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalış pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla doğru orantılı olarak devam etmiştir. Pürüzlülük boyutları 0.2-0.5 mm arasındayken kanat alt yüzeyinde kuyruk kenarında negatif basınç katsayısı değerleri yani vakum durumu ortaya çıkmıştır. Pürüzsüz yüzey ile pürüzlü yüzeylerde oluşan basınç katsayısı değerleri arasında fark gözle görülecek derecede artmıştır. Önceki Reynolds sayılarından elde edilen basınç katsayısı grafikleri Şekil 6.26, 6.38 ve 6.50 ile Şekil 6.63 kıyaslandığında Reynolds sayısı arttıkça pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler arasındaki basınç katsayısı farkının daha belirgin derecede olduğu görülmüştür. Alt ve üst yüzey arasındaki basınç farkının pürüzlülük ile azalması 0.1-0.5 mm pürüzlülük yüksekliklerinde kaldırma katsayısının daha düşük olmasına sebebiyet vermiştir.



Şekil 6.64. $Re = 7 \times 10^5$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

Pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlü durumda $Re = 7 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de basınç dağılımı Şekil 6.64'te verilmiştir. Pürüzsüz durumda vakum bölgesinde basınç en düşük -24500 Pa'a kadar inmiştir. Kuyruk kenarına doğru ise basınç yaklaşık -34 Pa'a yükselmiş, tam kuyruk kenarında ise 1597 Pa basınç alanı oluşmuştur. Pürüzsüz halde kanadın basınç bölgesinde ise 6491 Pa'a varan basınç değerleri elde edilmiştir. Hücum kenarı ile kuyruk kenarı arasında kalan bölgede ortalama 1597 Pa basınç meydana gelmiş kuyruk kısmında ise basınç 3228 Pa'a kadar çıkmıştır. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında ise Şekil 6.64'te görüldüğü gibi vakum bölgesinde -25526 Pa ile -249 Pa arasında basınç dağılımı gerçekleşmiştir. Kanadın tam kuyruk kenarında basınç yükselerek 1435 Pa olmuştur. Kanadın basınç bölgesinde ortalama 1435 Pa basınç dağılımı gerçekleşmiştir. Bununla beraber hücum kenarında basınç 6490 Pa'a kadar yükselirken, kuyruk kenarında 3120 Pa olmuştur.

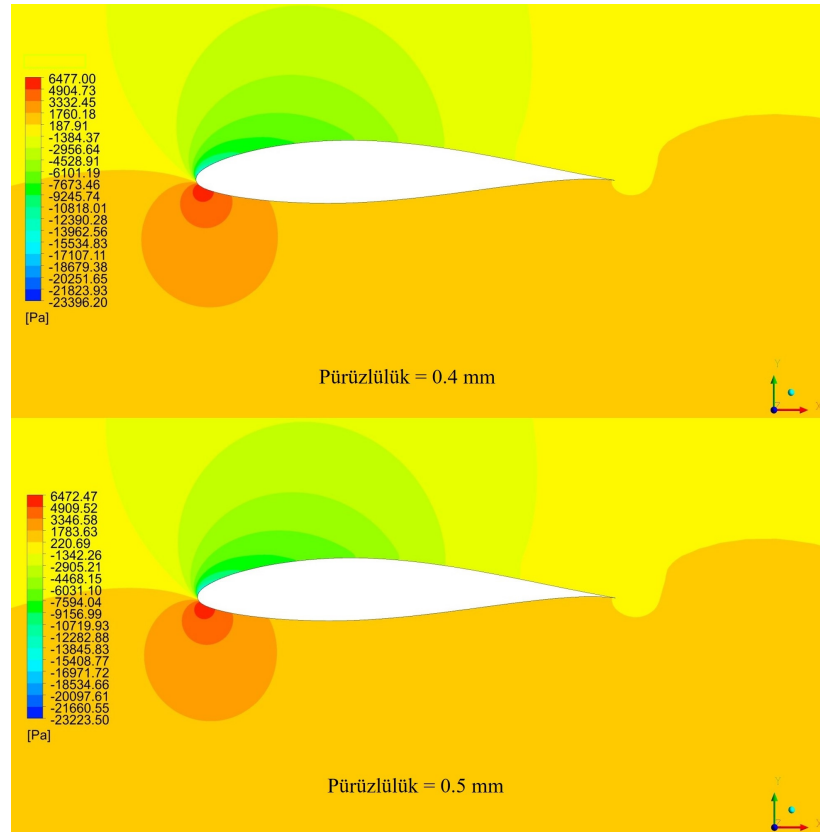


Şekil 6.65. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

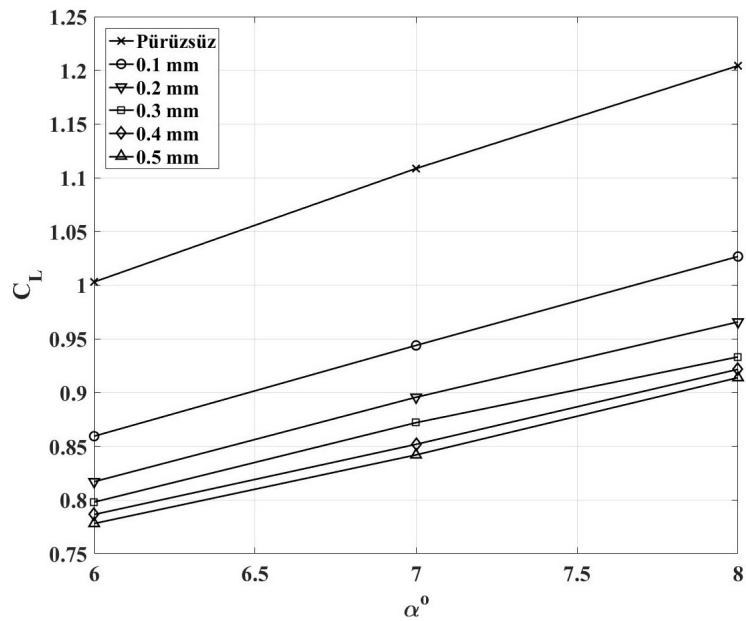
$Re = 7 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.65'te verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda vakum tarafında basınç -24238 Pa ile 22 Pa arasında dağılım göstermiştir. Basınç tarafında ise ortalama 1639 Pa basınç dağılımı meydana gelmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.3 mm iken basınç bölgesinde yaklaşık 1739 Pa basınç elde edilmiş, vakum bölgesinde ise basınç dağılımı -23557 ile 158 Pa aralığında oluşmuştur.

$Re = 7 \times 10^5$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.66'da verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 ve 0.5 mm'de basınç dağılımları birbirlerine oldukça benzer elde edilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 mm için vakum bölgesinde hücum kenarı yakınlarında basıncın yaklaşık -23396 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık 187 Pa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Basınç tarafında hücum kenarında basınç 6477 Pa'a kadar çıkarken, ortalama olarak 1760 Pa basınç alanı meydana gelmiştir. Kuyruk kenarında ise basıncın 187 Pa düştüğü bir bölge oluşmuştur. Pürüzlülük yüksekliği 0.5 mm olduğunda ise vakum tarafında hücum kenarı civarında -23223 Pa'a kadar basınç düşüşü meydana gelmiş kuyruk kenarına doğru

yaklaşık 220 Pa basınç ortaya çıkmıştır. Kanadın alt yüzeyinde durma noktasında basınç 6472 Pa'a ulaşmıştır. Kuyruk kenarında ise basınç 220 Pa'a düşmüştür.

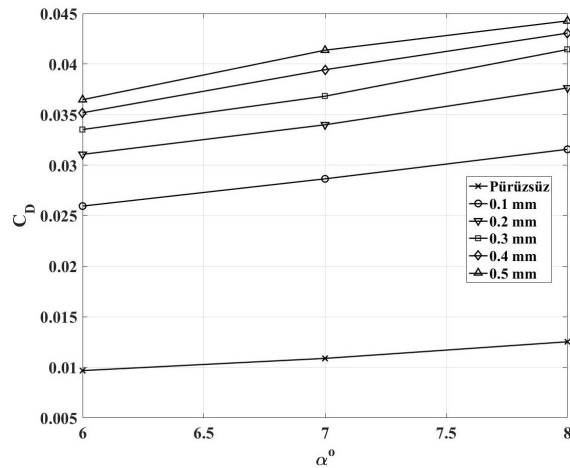


Şekil 6.66. $Re = 7 \times 10^5$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

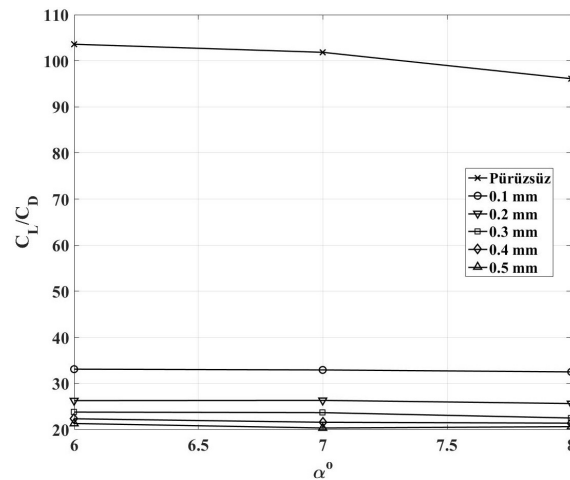


Şekil 6.67. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kaldırma katsayıları.

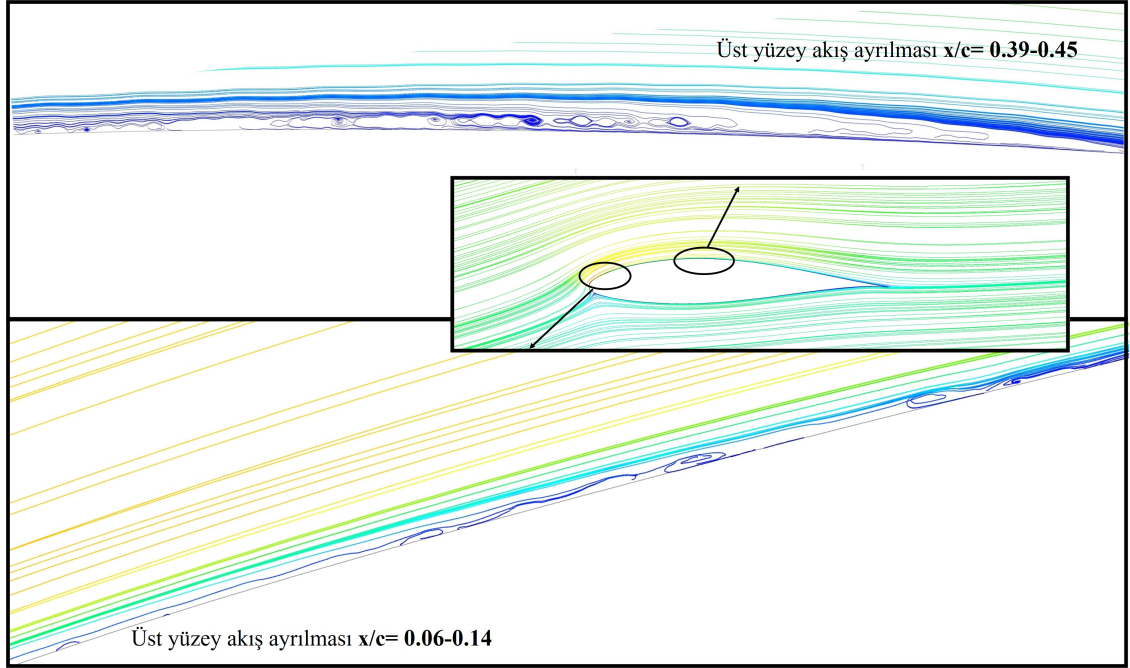
Reynolds sayısının 10^6 olması halinde ortaya çıkan kaldırma katsayısı-hücum açısı grafiği Şekil 6.67’de verilmiştir. Pürüzlü kanat yüzeyi için elde edilen kaldırma katsayılarında pürüzsüz duruma göre ciddi bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla kaldırma katsayısı azalmıştır. Pürüzlülük yükseklikleri 0.3, 0.4 ve 0.5 mm olduğunda kaldırma katsayılarının birbirlerine oldukça yakın değerler aldığı görülmüştür. Şekil 6.68’de ise sürüklenme katsayısının pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla yükseldiği gözlemlenmiştir. Kaldırma/sürüklenme oranlarının Şekil 6.69’da verildiği gibi pürüzsüz duruma kıyasla çok daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür. Ayrıca Reynolds sayısı 10^6 için kaldırma/sürüklenme oranı değerleri arasındaki fark şu ana kadar bahsedilen Reynolds sayıları arasında en yüksek değerde olmuştur.



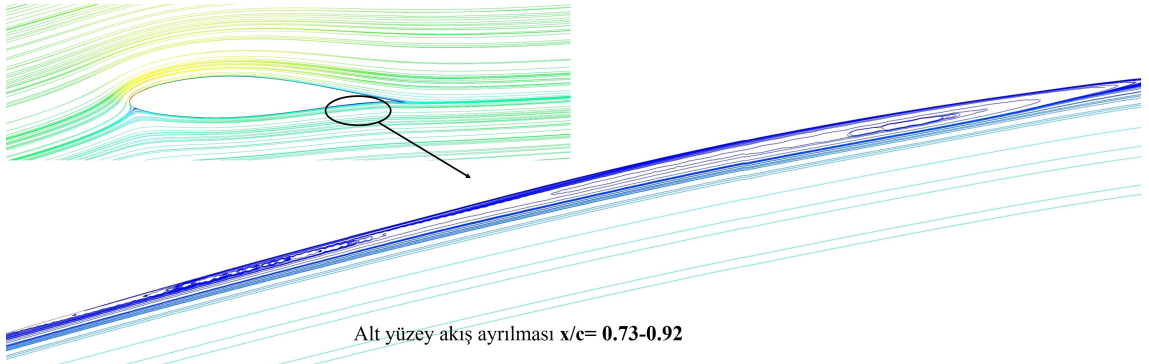
Şekil 6.68. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin sürüklenme katsayıları.



Şekil 6.69. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları.



Şekil 6.70. $Re = 10^6$ için pürüzsüz kanadın üst yüzeyinde oluşan akım çizgileri.

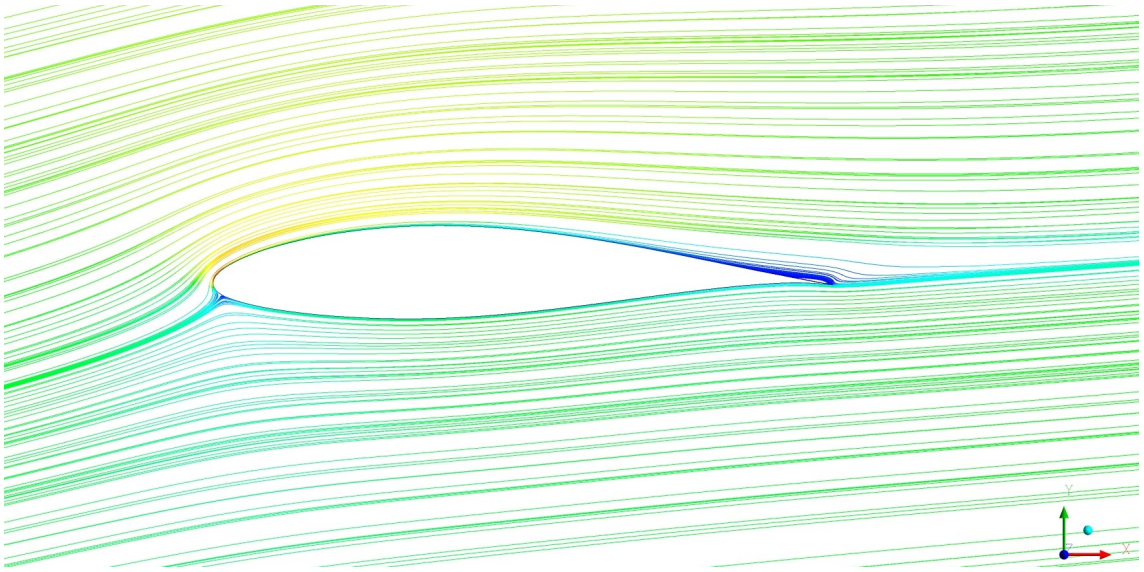


Şekil 6.71. $Re = 10^6$ için pürüzsüz kanadın alt yüzeyinde oluşan akım çizgileri.

Reynolds sayısı 10^6 'da pürüzsüz kanadın üst yüzeyi üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 6.70'te verilmiştir. Şekil 6.75 incelendiğinde pürüzsüz kanadın üst yüzeyinde $x/c = 0.06 - 0.14$ arasında kayma gerilmesinde daha önceki Reynolds sayılarında da karşılaşılan dalgalanmalar belirlenmiştir. Bu alanlar yakından incelendiğinde kanat üst yüzeyinde $x/c = 0.06 - 0.14$ arasında Şekil 6.70'te görülen akış ayrılmaları tespit edilmiştir. Bununla beraber kayma gerilmesi grafiğinde $x/c = 0.39$ ve $x/c = 0.45$ bölgesinde de akışın ayrıldığı görülmüştür. Kanat yüzeyinde bu aralık da incelendiğinde Şekil 6.70'de görülen girdaplar fark edilmiştir. Şekil 6.75'e bakıldığında kanadın alt yüzeyinde de kuyruk kenarına yakın alanda akış ayrılmalarının olduğu bölgeler görülmüştür. Akışın alt yüzeyden koptuğu bölge

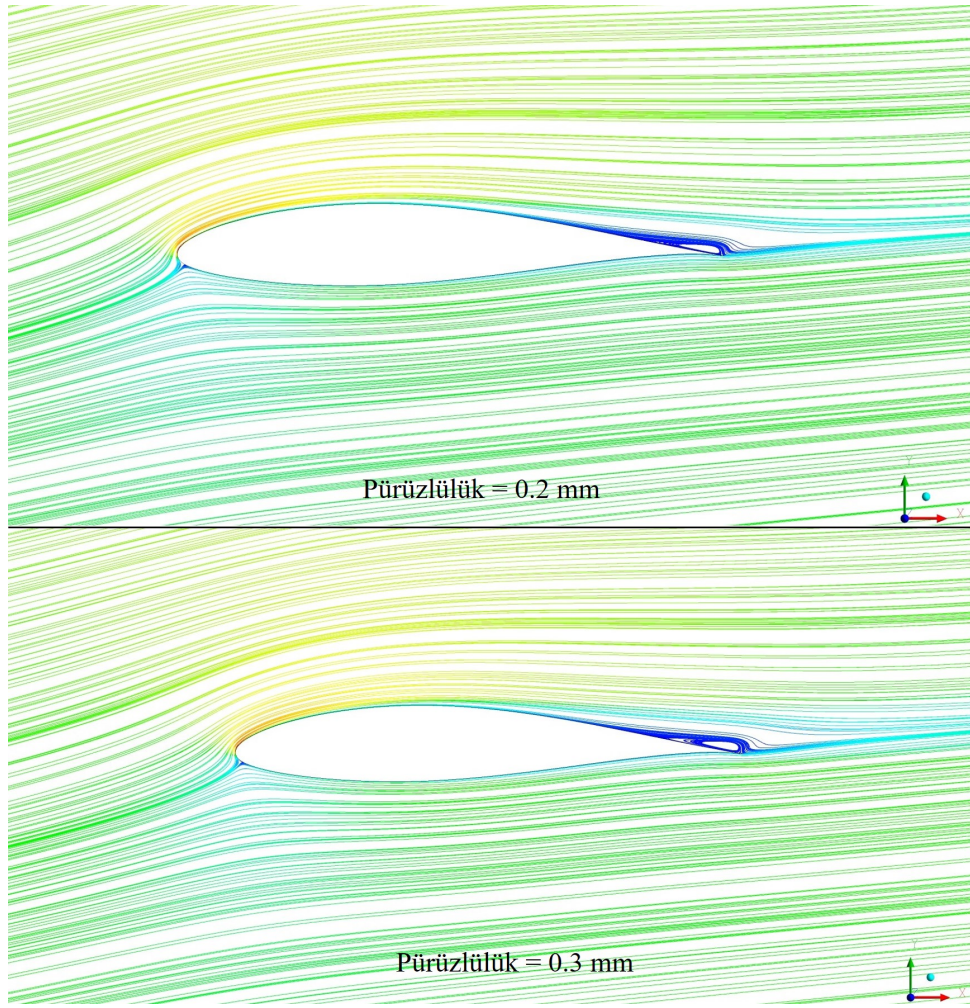
$x/c = 0.73$ ile $x/c = 0.92$ arasında tespit edilmiştir. Bu akış ayrılma alanı Şekil 6.71’de gösterilmiştir.

Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.72’deki akım çizgileri oluşmuştur. Şekil 6.72 dikkatlice incelendiğinde kuyruk kenarında kanadın üst yüzeyinde küçük bir ayrılma kabarcığının olduğu ortaya çıkmıştır. Şekil 6.75 de göz önüne alındığında 0.1 mm pürüzlülük yüksekliğinde $x/c = 0.92$ ’de kayma gerilmesi değeri 0 Pa ’a düşmüş, dolayısıyla akış ayrılması bu noktada gerçekleşmiştir.



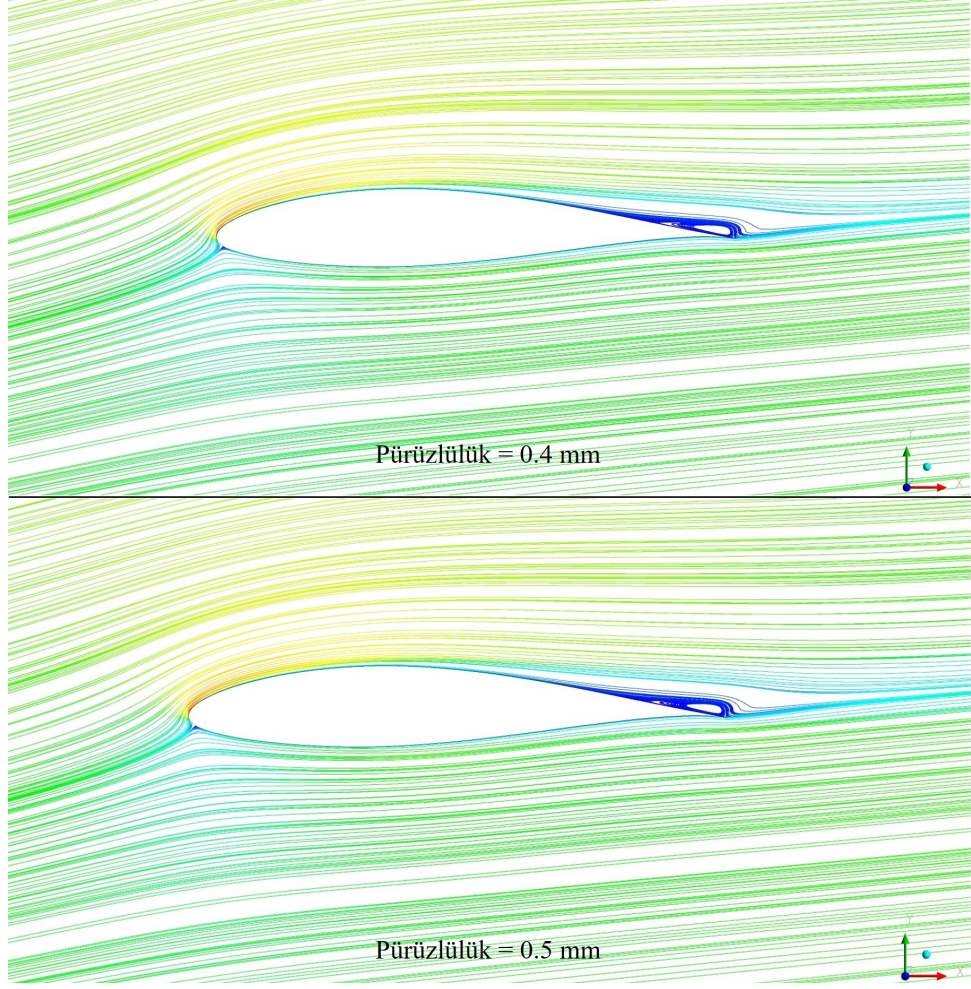
Şekil 6.72. $Re = 10^6$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

Pürüzlülük boyutu 0.2 mm ’de Şekil 6.73’te görüldüğü gibi vakum bölgesinde kuyruk kenarında 0.1 mm pürüzlülük yüksekliğine kıyasla daha büyük bir ayrılma kabarcığı görülmüştür. Şekil 6.75’ten akışın kanat üzerinden tam olarak $x/c = 0.85$ ’ten ayrıldığı belirlenmiştir. Pürüzlülük 0.3 mm olarak uygulandığında ise Şekil 6.73 ve 6.75’e bakılarak akışın $x/c = 0.83$ ’te 0.2 mm pürüzlülüğe göre daha büyük bir ayrılma kabarcığı ile kanat üzerinden ayrıldığı sonucuna varılmıştır.

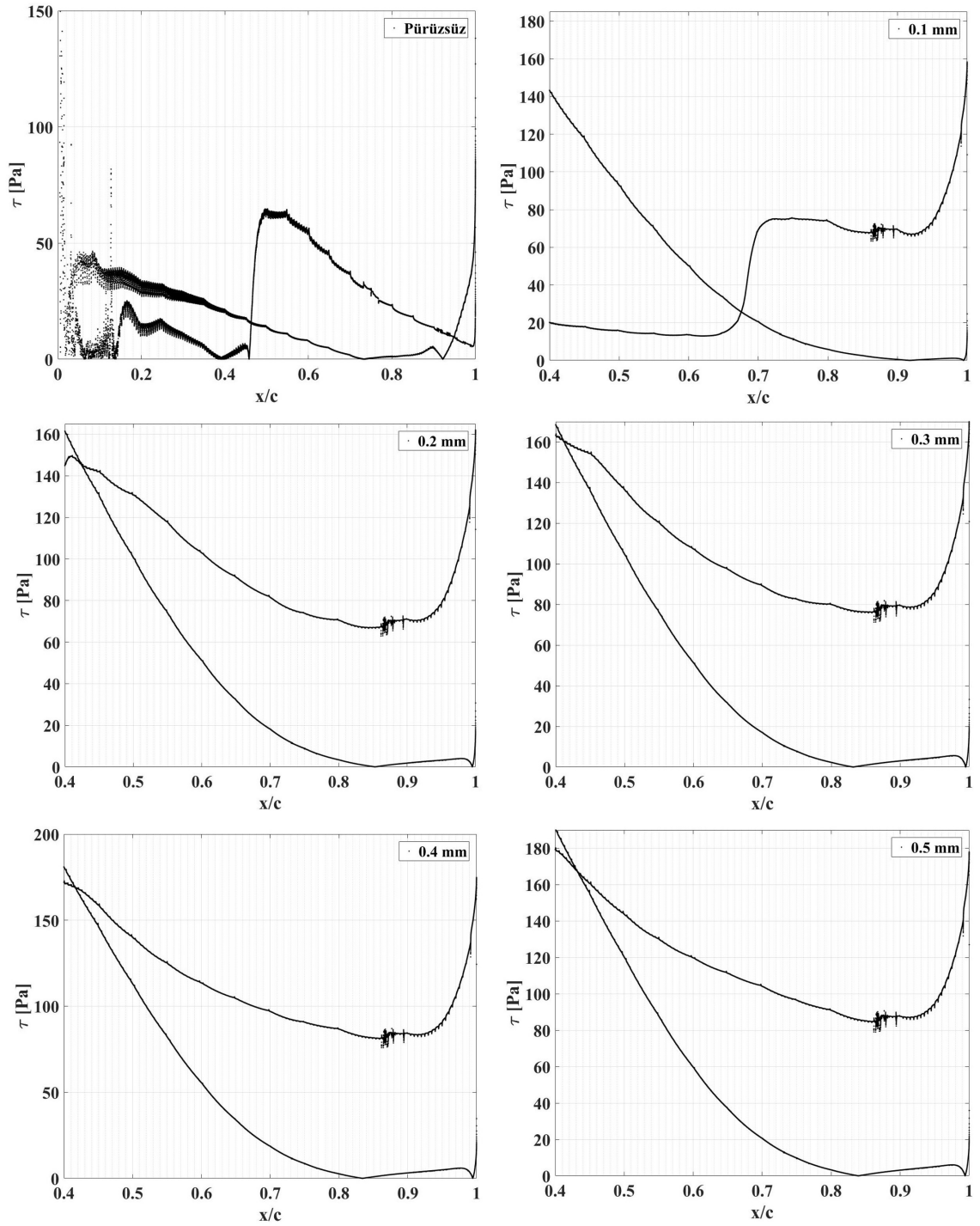


Şekil 6.73. $Re = 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

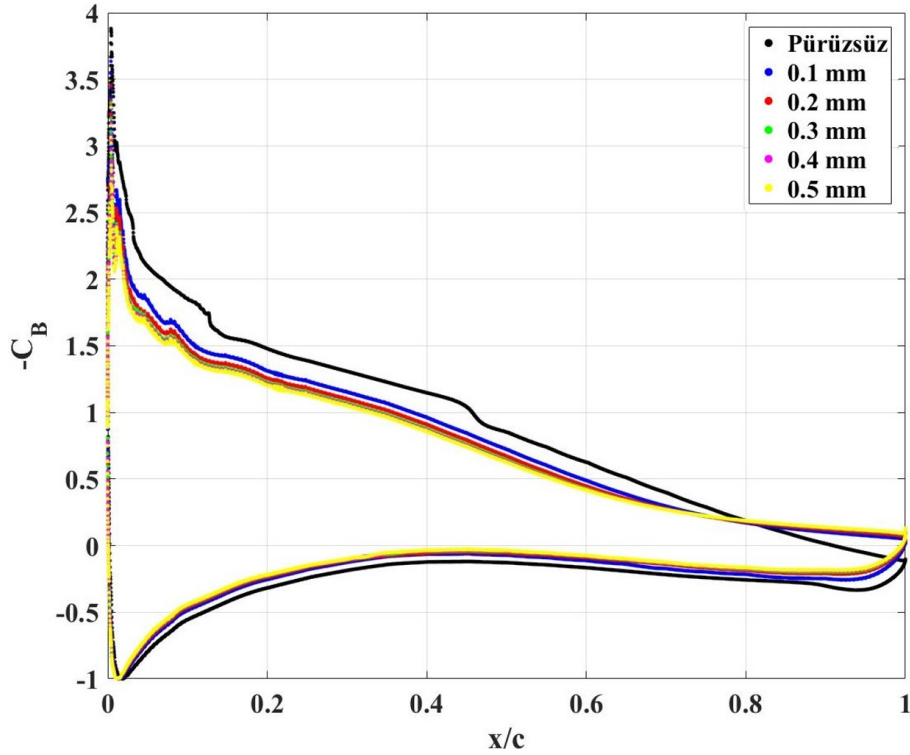
Kanat yüzeyine 0.4 ve 0.5 mm yüksekliklerinde pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.74'te verilen akım çizgileri oluşmuştur. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 mm için Şekil 6.74'te görülen ayrılma kabarcığının Şekil 6.75 incelendiğinde kanadın kuyruk kenarına yakın bölgede $x/c = 0.83$ 'te oluşmaya başladığı belirlenmiştir. Akışın ayrıldığı nokta 0.4 mm pürüzlülük boyutu için 0.3 mm pürüzlülük hali ile aynı değeri almıştır. Ayrıca bahsedilen bu iki pürüzlülük durumu için de ayrılma kabarcıklarının büyüklükleri hemen hemen aynı olmuştur. Pürüzlülük boyutu 0.5 mm olduğunda ise akışın 0.3 ve 0.4 mm pürüzlülük boyutlarındaki ayrılma konumuna çok yakın olarak $x/c = 0.84$ 'te koptuğu belirlenmiştir. Yine burada diğer iki pürüzlülük yüksekliğinde oluşan ayrılma kabarcıklarının büyüklüklerine çok yakın boyutlarda bir ayrılma kabarcığı meydana gelmiştir.



Şekil 6.74. $Re = 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

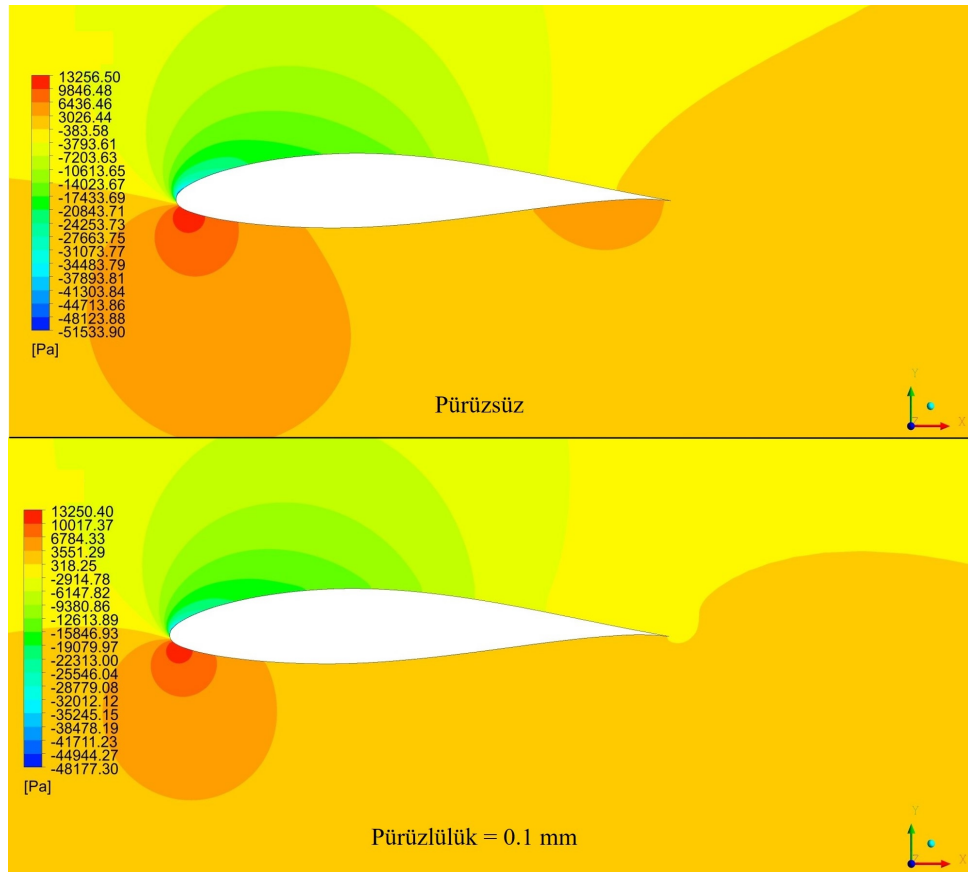


Şekil 6.75. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.



Şekil 6.76. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.

Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda $Re = 10^6$ için basınç katsayıları Şekil 6.76'da verilmiştir. Şu ana kadar bahsedilen Reynolds sayılarında basınç katsayılarına bakıldığında alt yüzey basınç katsayılarında pürüzsüz ve pürüzlü durumlar için çok fazla bir fark olmadığı asıl farkın kanat üst yüzeyindeki basınç katsayılarına ortaya çıktığı belirlenmiştir. Ancak Şekil 6.76 incelendiğinde ise pürüzlülük uygulamanın önceki Reynolds sayılarından farklı olarak alt yüzeydeki basınç katsayıları arasındaki farkın da artmasına sebep olduğu görülmüştür. Pürüzlülük yüksekliği arttıkça kanat alt yüzeyi için basınç katsayıları azalmıştır. Bütün pürüzlülük boyutlarında kanadın alt yüzeyinde kuyruk kenarında negatif basınç katsayılarının oluştuğu bu Reynolds sayısında da görülmüştür. Kanadın hücum kenarında en düşük basınç katsayısı değerleri pürüzsüz durumda elde edilmiştir. Pürüzlülük halinde ise hücum kenarında en düşük basınç katsayısı 0.1 mm için oluşmuş pürüzlülük yüksekliği arttıkça basınç katsayısı da artmıştır. Dolayısıyla alt ve üst yüzey arasında basınç farkı azalmıştır. Vakum bölgesinde pürüzsüz ve pürüzlü durumlar için basınç katsayıları kuyruk kenarında $x/c = 0.8$ 'de hemen hemen eşit olmuşlardır. Bu noktadan sonra pürüzsüz yüzey basınç katsayısı değerleri artışına devam ederken pürüzlü yüzey basınç katsayılarının sabit kalma eğiliminde oldukları görülmüştür.

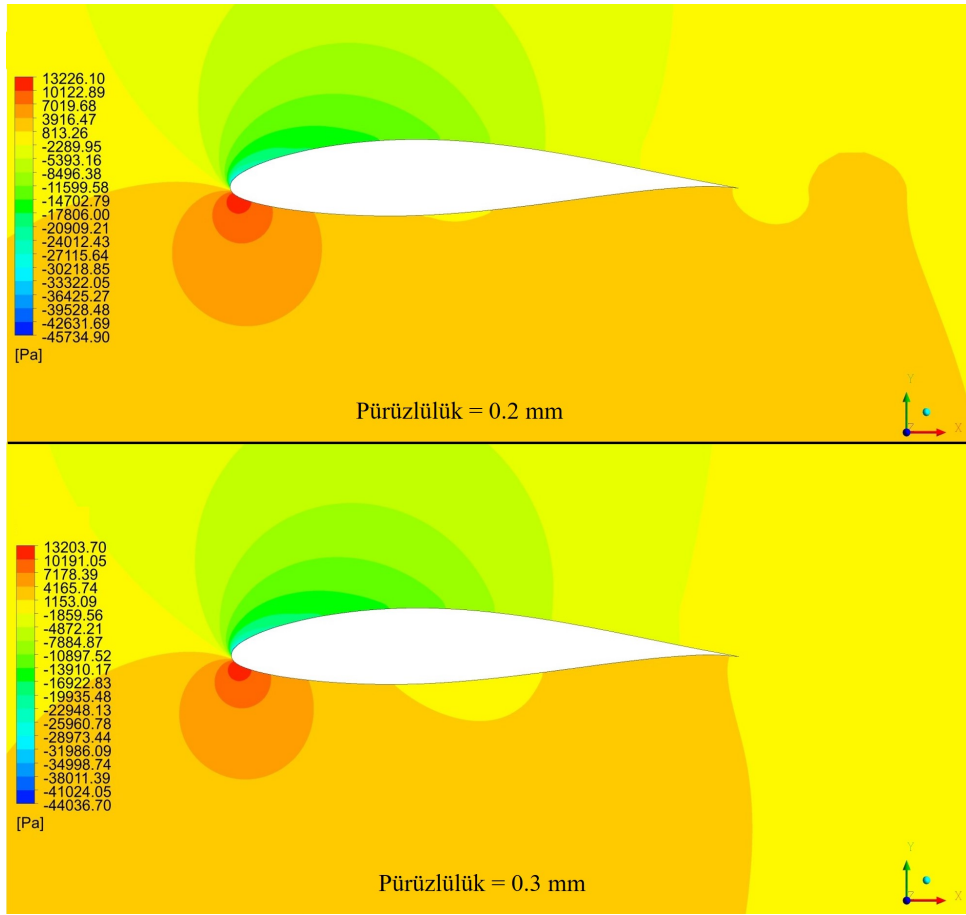


Şekil 6.77. $Re = 10^6$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

Pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlü durumda $Re = 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de basınç dağılımı Şekil 6.77'de verilmiştir. Pürüzsüz durumda vakum bölgesinde basınç en düşük -51533 Pa'a kadar inmiştir. Kuyruk kenarına doğru ise basınç yaklaşık -383 Pa'a yükselmiş, kuyruk kenarına gelindiğinde ise 3026 Pa basınç elde edilmiştir. Pürüzsüz yüzey için basınç bölgesinde durma noktasında basıncın 13256 Pa olduğu, kuyruk kenarında ise 6436 Pa basınç meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu iki bölge arasında ise ortalama 3026 basınç alanı ortaya çıkmıştır. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında ise Şekil 6.77'de görüldüğü gibi vakum bölgesinde -48177 Pa ile 318 Pa arasında basınç dağılımı olmuştur. Basınç bölgesinde ise ortalama 3551 Pa basınç dağılımı gerçekleşmiştir. Bununla beraber durma noktasında basıncın 13250 Pa'a kadar çıktığı görülmüştür.

$Re = 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.78'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda vakum tarafında basınç -45734 Pa ile 813 Pa arasında dağılım göstermiştir. Basınç tarafında durma noktasında 13226 Pa olurken, ortalama 3916 Pa basınç alanı meydana gelmiştir.

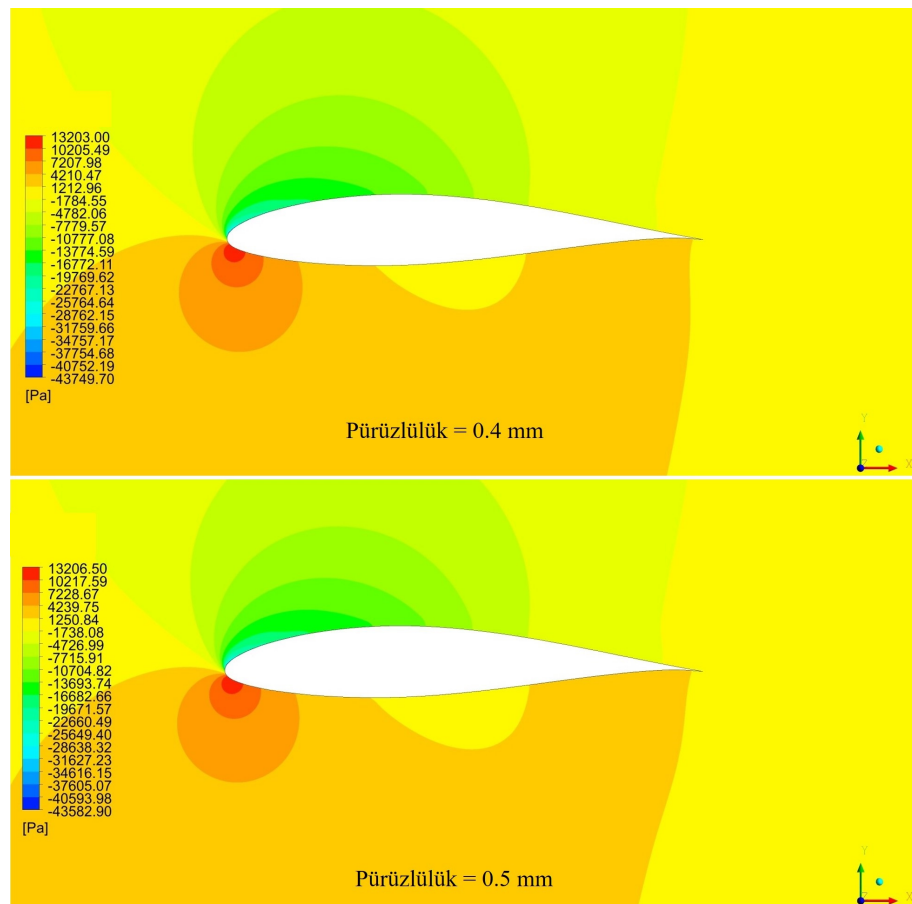
Kanadın orta bölgesinde 813 Pa'a kadar bir basınç düşüşü gerçekleşmiştir. Benzer şekilde tam kuyruk bölgesinde basıncın 813 Pa'a düştüğü gözlemlenmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.3 mm için vakum tarafında basınç -44036 Pa ile 1153 Pa arasında dağılım göstermiştir. Basınç tarafında durma noktasında 13203 Pa elde edilmiştir. Basınç bölgesinde ortalama 4165 Pa basınç dağılımı olmuştur. Orta bölgede ise basınç 1153 Pa'a kadar düşmüştür. Kuyruk bölgesinde de basıncın 1153 Pa'a düştüğü görülmüştür.



Şekil 6.78. $Re = 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

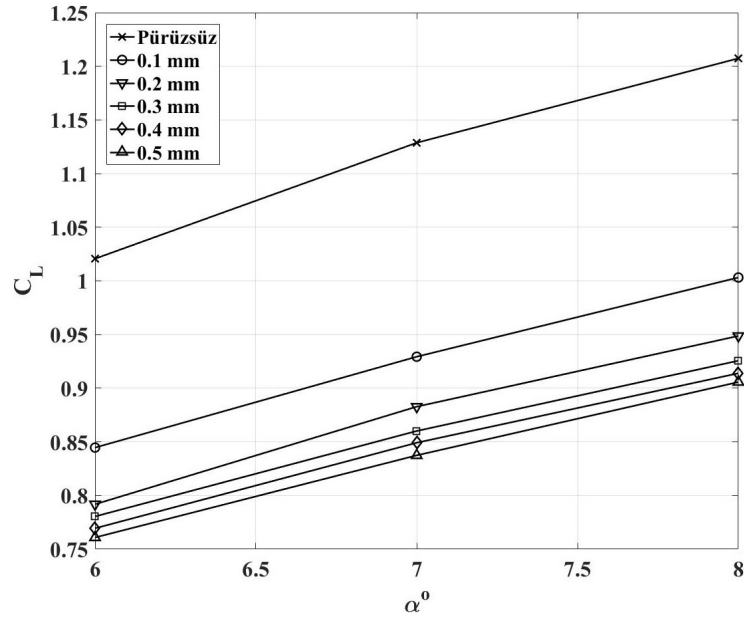
$Re = 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.79'da verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 ve 0.5 mm'de basınç dağılımları hemen hemen aynı olmuştur. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 mm için vakum bölgesinde hücum kenarı yakınlığında basıncın yaklaşık -43749 Pa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık 1212 Pa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Alt yüzey tarafında durma noktasında basınç 13203 Pa'a kadar çıkmıştır. Basınç tarafında orta bölgede basıncın 1212 Pa'a düştüğü bir alan oluşmuştur. Durma noktası ile bu düşük basınç

alanının dışında kalan bölgelerde 4210 Pa basınç meydana gelmiştir. Kuyruk kenarında ise basıncın tekrar 1212 Pa'a düştüğü gözlemlenmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.5 mm olduğunda ise vakum tarafında hücum kenarı civarında -43582 Pa'a kadar basınç düşüşü meydana gelmiş kuyruk kenarına doğru yaklaşık 1250 Pa basınç ortaya çıkmıştır. Kanadın alt yüzeyinde durma noktasında basınç 13206 Pa'a ulaşmış orta noktada ise yine düşük basınç alanı 1250 Pa olarak ortaya çıkmış bunların dışında ortalama 4239 Pa basınç dağılımı olmuştur. Kuyruk kenarında ise basınç yeniden 1250 Pa'a düşmüştür.



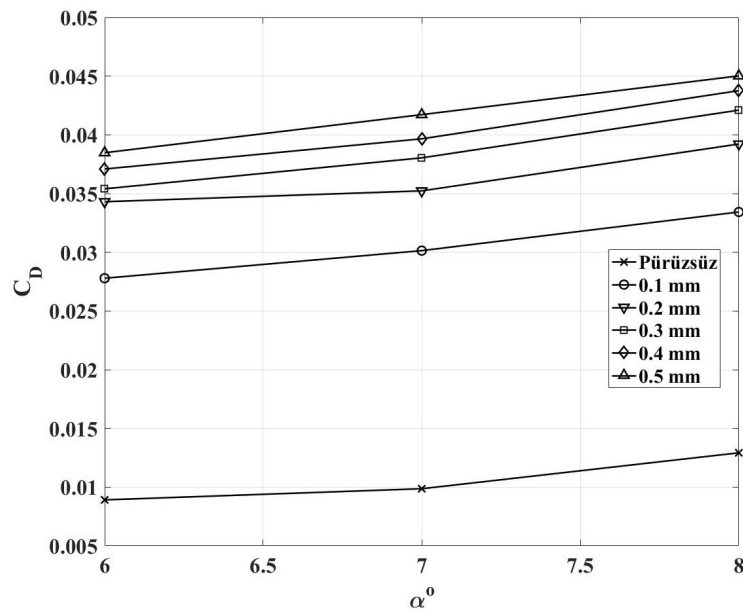
Şekil 6.79. $Re = 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

Reynolds sayısının 1.6×10^6 olması halinde ortaya çıkan kaldırma katsayısı-hücum açısı grafiği Şekil 6.80'de verilmiştir. Pürüzlü kanat yüzeyi için elde edilen kaldırma katsayıları pürüzsüz duruma göre $Re = 10^6$ 'dakine benzer oranda azalmıştır. Pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla kaldırma katsayısında düşüş devam etmiştir. Pürüzlülük yükseklikleri 0.3, 0.4 ve 0.5 mm için burada da kaldırma katsayıları birbirlerine oldukça yakın değerler almıştır.

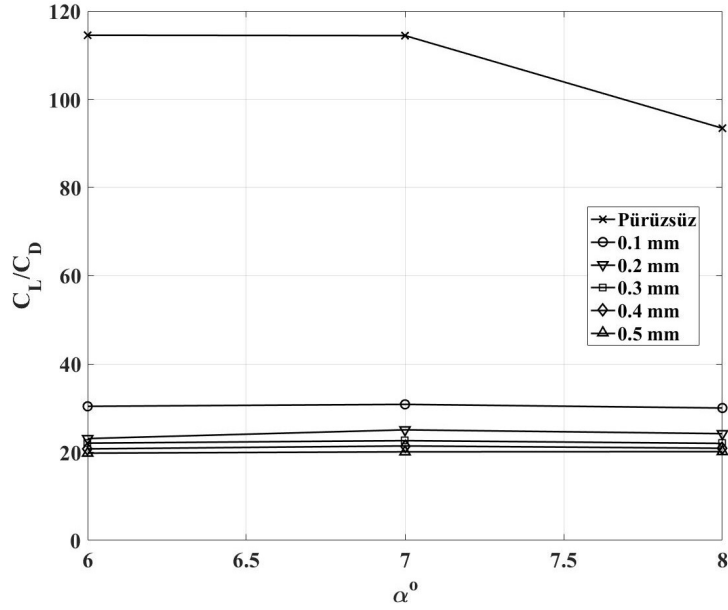


Şekil 6.80. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri.

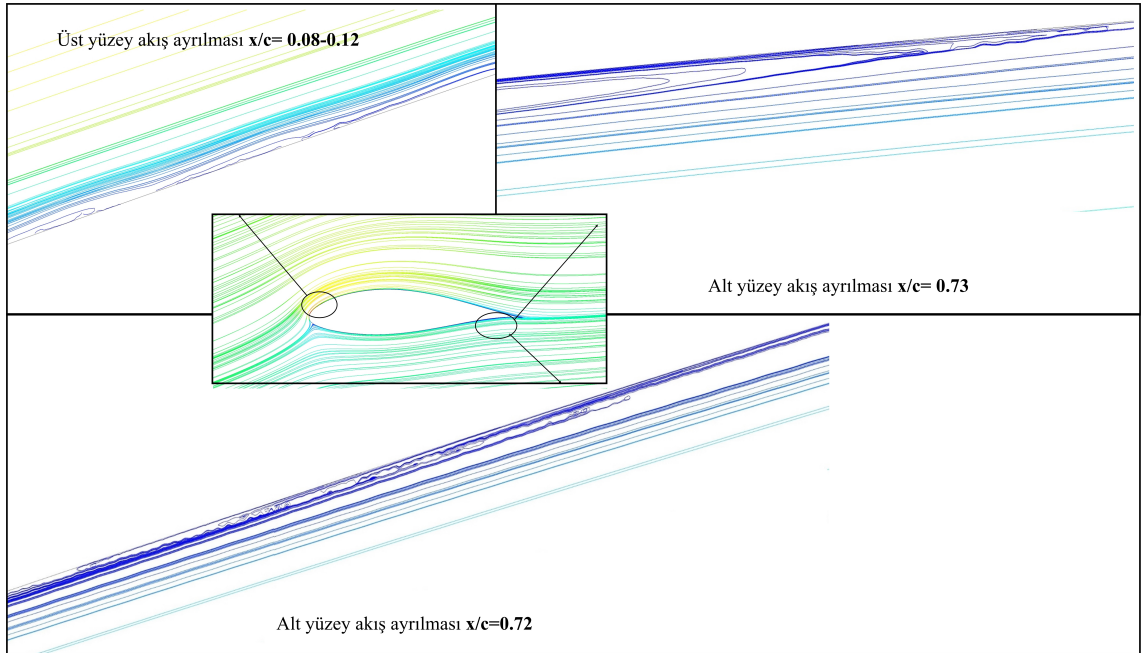
Şekil 6.81’de verilen sürüklenme katsayıları grafiğinde pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla sürüklenme katsayısında arttığı gözlemlenmiştir. Kaldırma/sürüklenme oranları Şekil 6.82’de gösterilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği arttıkça kaldırma/sürüklenme oranları görüldüğü gibi pürüzsüz duruma kıyasla oldukça düşük seviyede seyretmiştir. Ayrıca Reynolds sayısı 1.6×10^6 ’da kaldırma/sürüklenme oranı değerleri arasındaki farkın Reynolds sayısı arttıkça giderek açıldığı daha net bir şekilde görülmüştür.



Şekil 6.81. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri.



Şekil 6.82. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları.

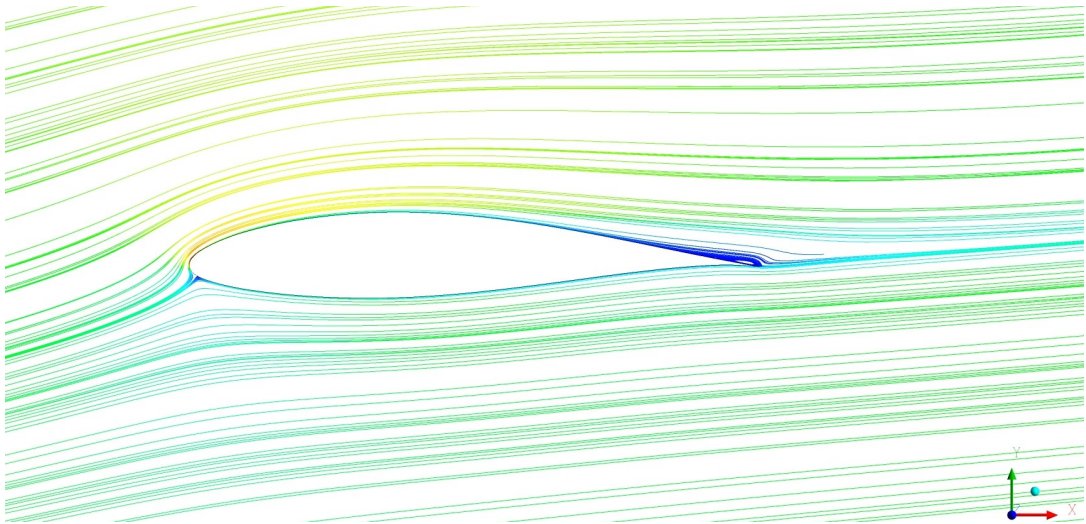


Şekil 6.83. $Re = 1.6 \times 10^6$ 'da pürüzsüz kanat üst yüzeyinde oluşan akım çizgileri.

Reynolds sayısı 1.6×10^6 'da pürüzsüz kanat üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 6.83'te verilmiştir. Şekil 6.87'deki kayma gerilmesi grafiği de göz önüne alındığı zaman pürüzsüz kanadın üst yüzeyinde $x/c = 0.08 - 0.12$ arasında kayma gerilmesinde daha önceki Reynolds sayılarında da karşılaşılan dalgalanmalar olduğu görülmüştür. Bahsedilen alan detaylı olarak irdelendiğinde Şekil 6.83'te görülen çok küçük boyutlarda ayrılma

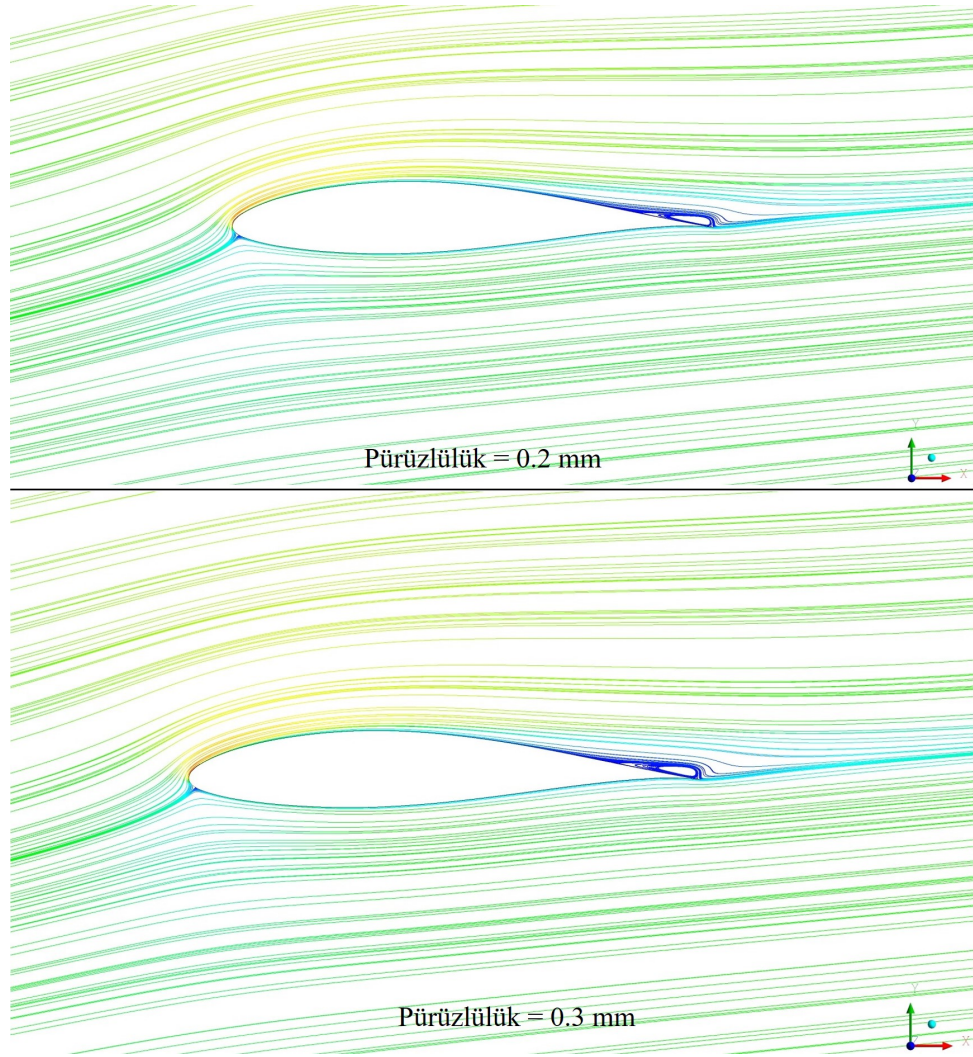
bölgeleri tespit edilmiştir. Kanadın alt yüzeyinden de akış ayrılması meydana gelmiştir. Şekil 6.87'den alt yüzey akış ayrılmasının $x/c = 0.72 - 0.73$ arasında olduğu görülmüştür. Akışın ayrıldığı bölge Şekil 6.83'te detaylı olarak gösterilmiştir. Buradan öncelikle küçük kabarcıklar şeklinde başlayan akış ayrılmasının daha sonra daha büyük bir ayrılma kabarcığına dönüştüğü görülmüştür.

Pürüzlülük boyutunun 0.1 mm olması halinde Şekil 6.84'teki akım çizgileri oluşmuştur. Şekil 6.84'te Reynolds 10^6 'ya benzer küçük bir ayrılma kabarcığının meydana geldiği görülmüştür. Bu ayrılmanın Şekil 6.87'ye bakıldığında 0.1 mm pürüzlülük yüksekliği için $x/c = 0.90$ 'da meydana geldiği tespit edilmiştir.



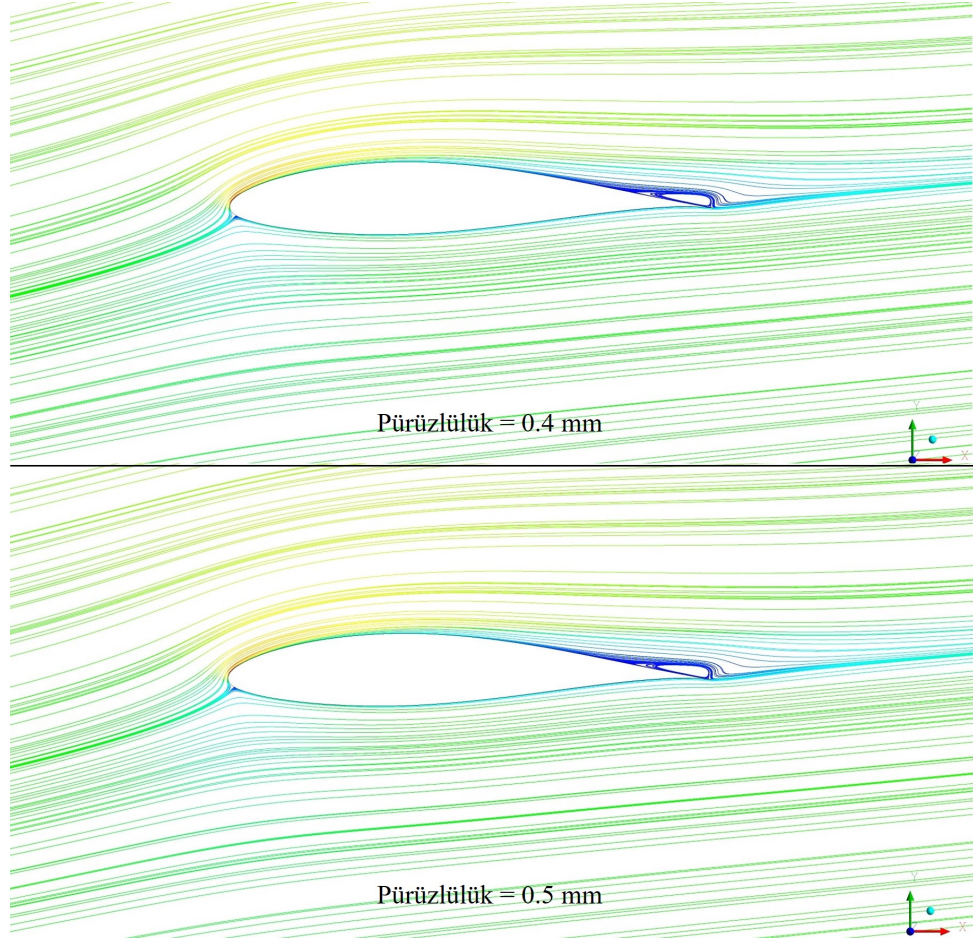
Şekil 6.84. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm 'de olduğunda Şekil 6.85'te görüldüğü gibi kanat üst yüzeyinde kuyruk kenarında 0.1 mm pürüzlülük yüksekliğine kıyasla daha büyük bir ayrılma kabarcığı ortaya çıkmıştır. Şekil 6.87'den akışın kanat üzerinden tam olarak $x/c = 0.83$ 'ten ayrıldığı belirlenmiştir. Pürüzlülük 0.3 mm olarak uygulandığında ise Şekil 6.85 ve 6.87'ye bakılarak akışın $x/c = 0.82$ 'de 0.1 ve 0.2 mm pürüzlülük uygulamalarına göre daha erken ayrıldığı sonucuna varılmıştır.

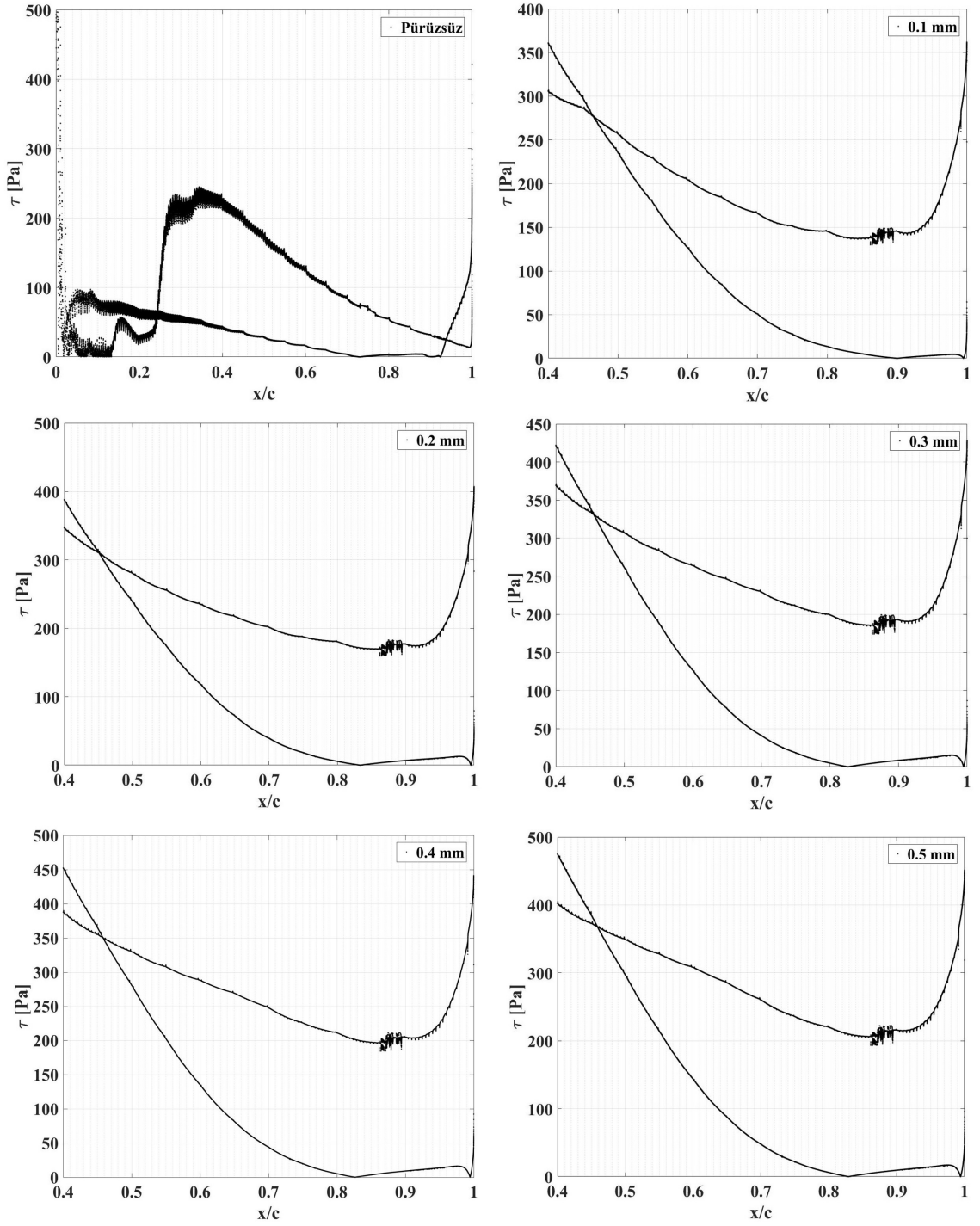


Şekil 6.85. $Re = 1.6 \times 10^6$ 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

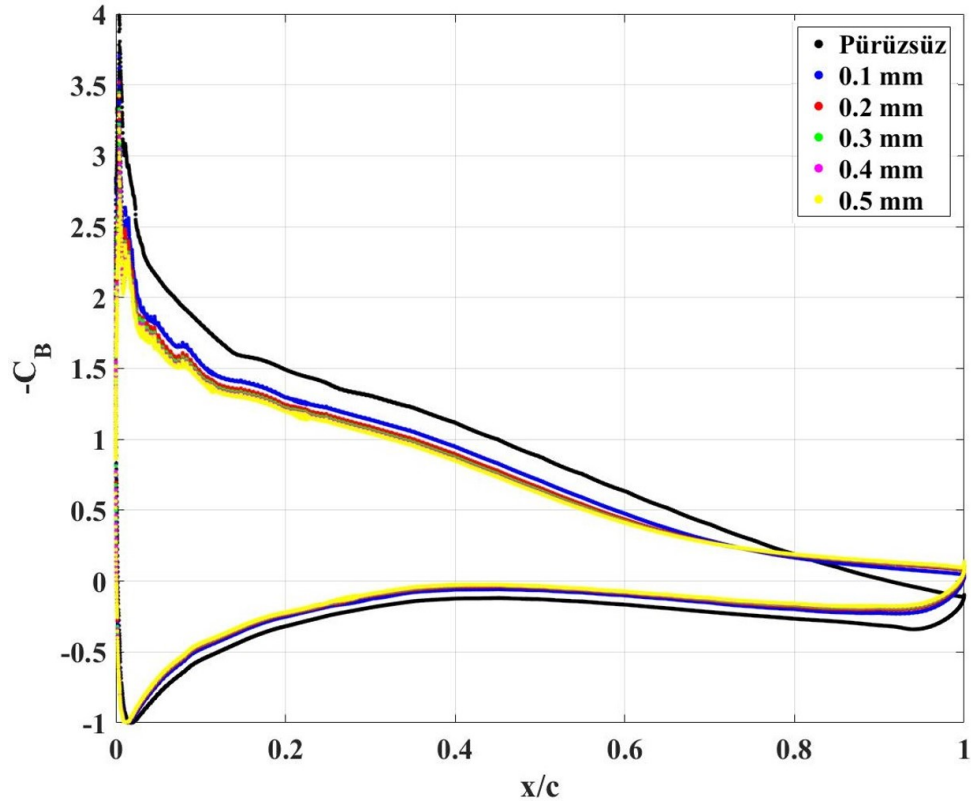
Kanat yüzeyine 0.4 ve 0.5 mm yüksekliklerinde pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.86'da verilen akım çizgileri oluşmuştur. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 mm için Şekil 6.86'da görülen akış ayrılmasının, 0.3 mm pürüzlülük yüksekliği ile aynı noktada yani $x/c = 0.82$ 'de olduğu kayma gerilmesi grafiğinden belirlenmiştir. Ayrıca bu iki pürüzlülük durumu için de ayrılma kabarcıklarının büyüklükleri hemen hemen aynı olmuştur. Pürüzlülük boyutu 0.5 mm olduğunda ise akışın 0.3 ve 0.4 mm pürüzlülük boyutlarındaki ayrılma konumu ile aynı $x/c = 0.82$ 'de koptuğu belirlenmiştir. Diğer iki pürüzlülük yüksekliğinde oluşan ayrılma kabarcığı büyüklüklerine çok yakın boyutlarda bir ayrılma kabarcığı 0.5 mm'de de meydana gelmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.3, 0.4 ve 0.5 mm olduğunda $Re = 1.6 \times 10^6$ ve $\alpha = 8^\circ$ şartlarında bu üç pürüzlülüğün akış üzerinde hemen hemen aynı etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6.86. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

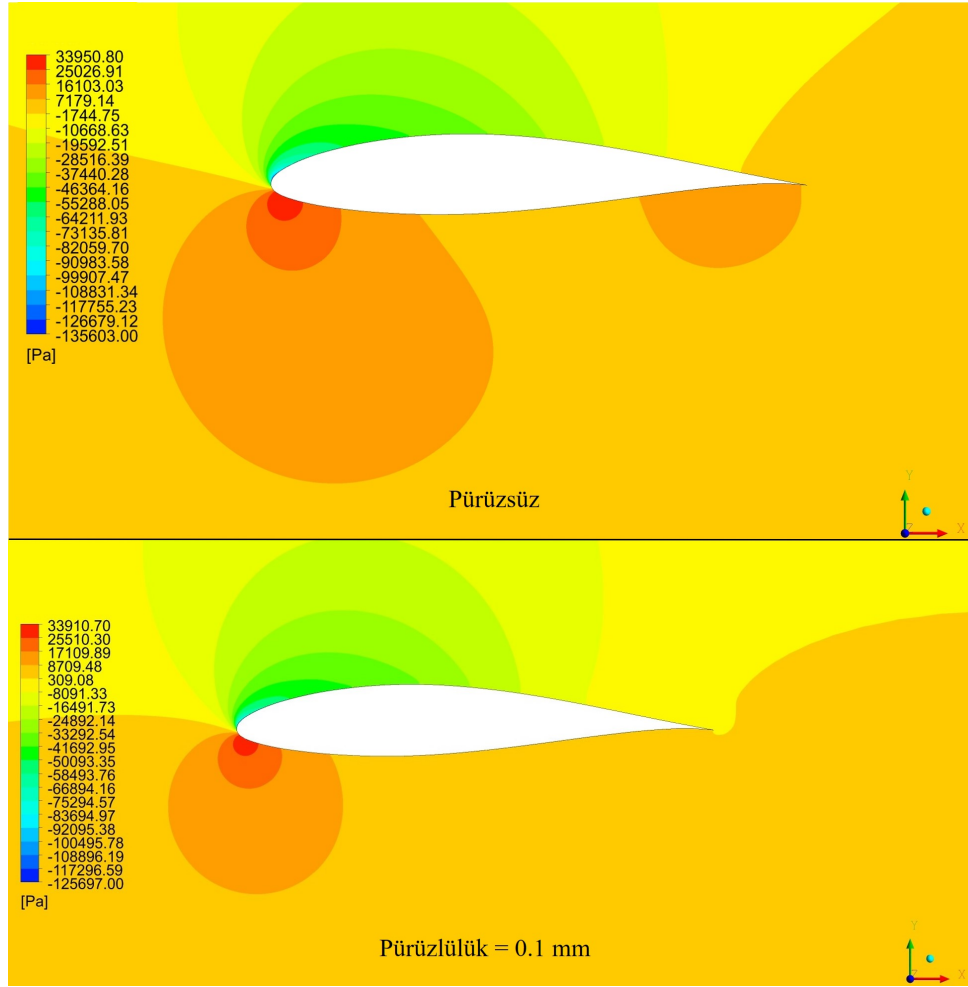


Şekil 6.87. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.



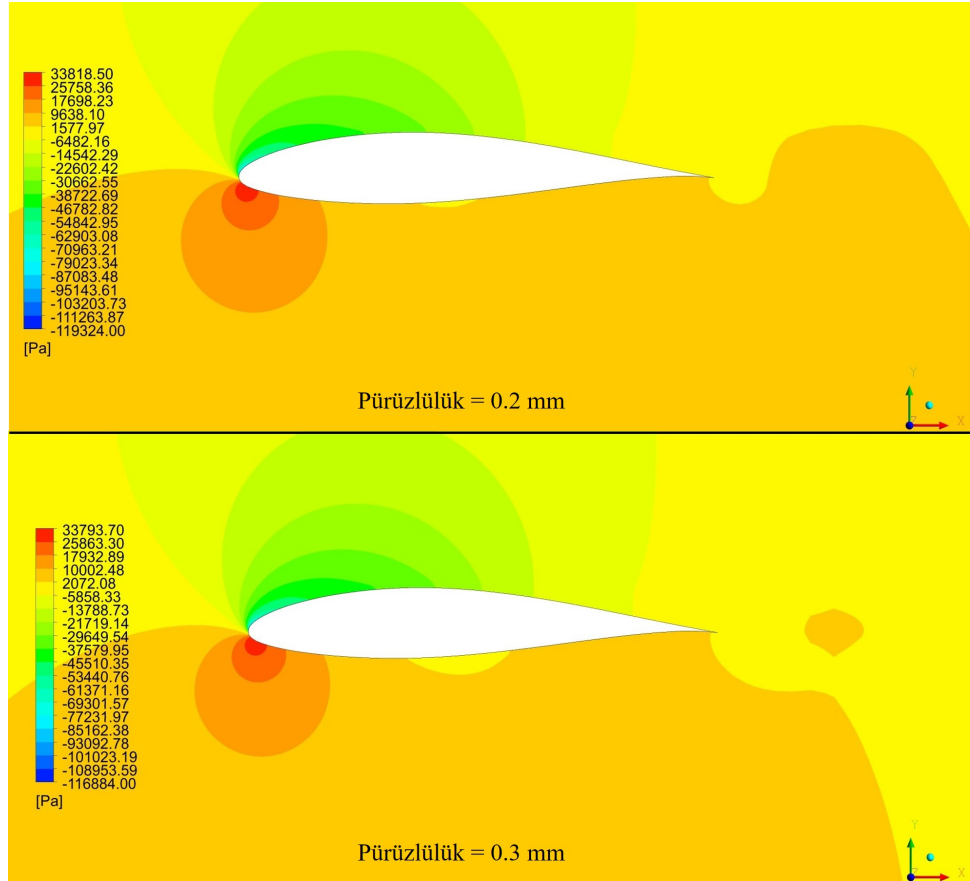
Şekil 6.88. $Re = 1.6 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.

Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda $Re = 1.6 \times 10^6$ için basınç katsayıları Şekil 6.88'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği arttıkça kanat alt yüzeyinde basınç katsayıları azalmıştır. Burada da tüm pürüzlülük boyutlarında kanadın alt yüzeyinde kuyruk kenarında negatif basınç katsayılarının oluştuğu görülmüştür. Kanadın vakum tarafına bakıldığında hücum kenarında en düşük basınç katsayısı değerleri pürüzsüz durumda elde edilmiş, pürüzlülük yüksekliği arttıkça basınç katsayısı da artmıştır. Buna bağlı olarak alt ve üst yüzey arasında basınç farkı azalmıştır. Vakum bölgesinde pürüzsüz ve pürüzlü durumlar için basınç katsayıları $Re = 10^6$ 'ya benzer şekilde kuyruk kenarında $x/c = 0.8$ 'de yaklaşık eşit olmuşlardır. Bu noktadan sonra pürüzsüz yüzey basınç katsayısı değerleri artmaya devam etmiştir. Pürüzlü yüzey basınç katsayıları ise bu noktadan sonra sabit kalmıştır.



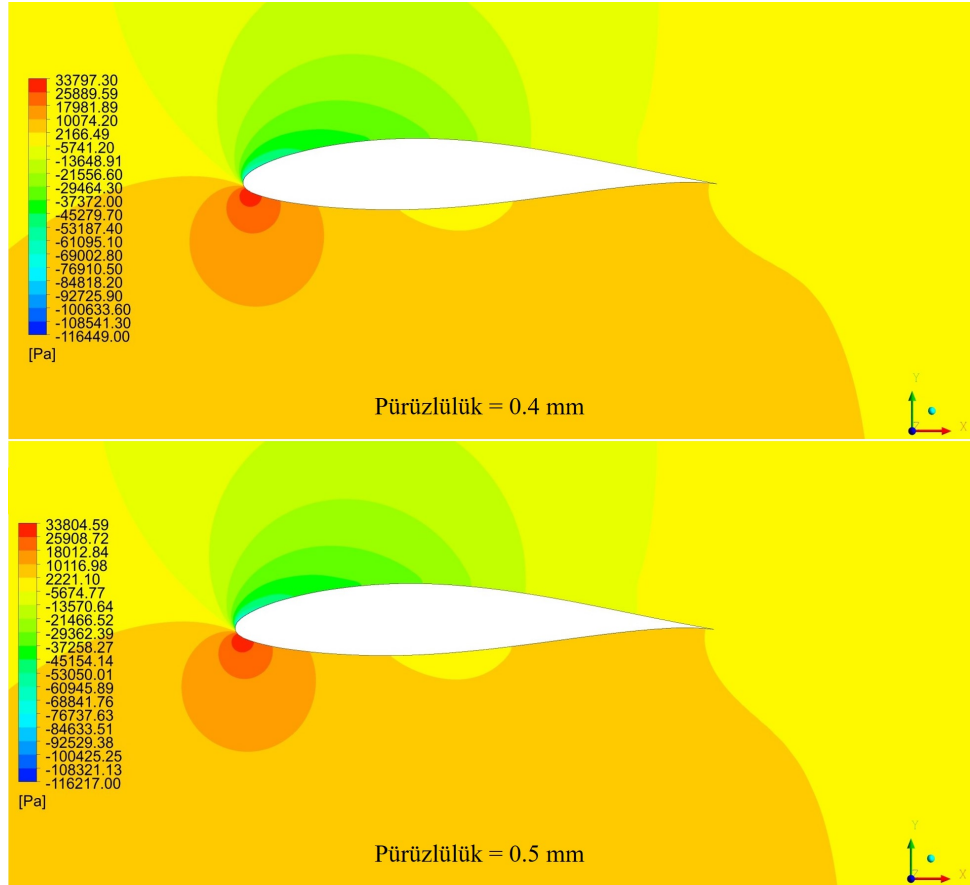
Şekil 6.89. $Re = 1.6 \times 10^6$ 'da pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte basınç dağılımı.

Pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlü durumda $Re = 1.6 \times 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de basınç dağılımı Şekil 6.89'da verilmiştir. Pürüzsüz durumda vakum bölgesinde basınç en düşük -135 kPa'a kadar inmiştir. Kuyruk kenarına doğru ise basınç yaklaşık -1.7 kPa'a yükselmiş, kuyruk kenarına gelindiğinde ise 7.1 kPa basınç elde edilmiştir. Pürüzsüz yüzey için basınç bölgesinde durma noktasında basıncın 33.9 kPa olduğu, kuyruk kenarında ise 16 kPa basınç meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu iki bölge arasında ise ortalama 7.1 kPa basınç alanı ortaya çıkmıştır. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında ise Şekil 6.89'da görüldüğü gibi vakum bölgesinde -125 kPa ile 0.3 kPa arasında basınç dağılımı gerçekleşmiştir. Basınç bölgesinde ise ortalama 8.7 kPa basınç dağılımı oluşmuştur. Bununla beraber durma noktasında basıncın 33.9 kPa'a kadar çıktığı görülmüştür.



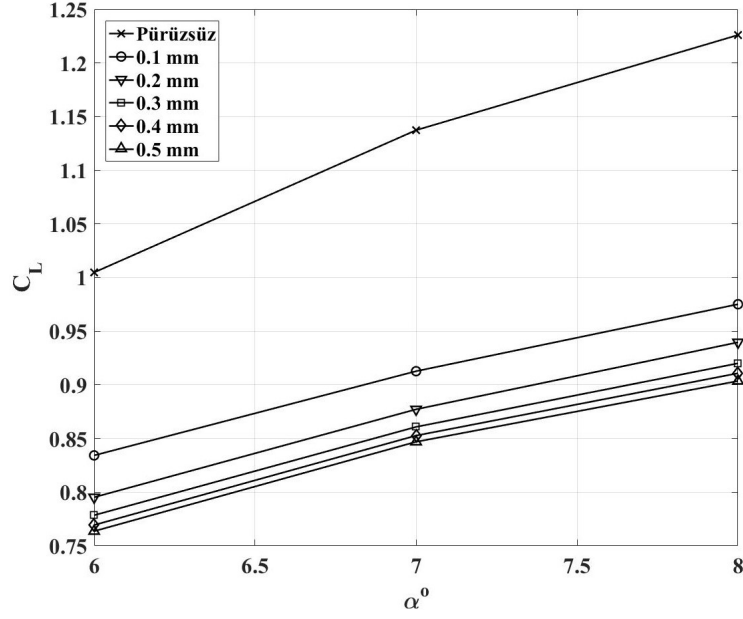
Şekil 6.90. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

$Re = 1.6 \times 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.90'da verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda vakum tarafında basınç -119 kPa ile 1.5 kPa arasında dağılım göstermiştir. Basınç kanat alt yüzeyinde durma noktasında 33.8 kPa olmuştur. Alt yüzeyde ortalama 9.6 kPa basınç alanı meydana gelmiştir. Kanadın orta bölgesinde 1.5 kPa değerinde bir basınç alanı görülmüştür. Benzer şekilde kuyruk bölgesinde de basınç 1.5 kPa'a düşmüştür. Pürüzlülük yüksekliği 0.3 mm için vakum tarafında basınç -116 kPa ile 2 kPa arasında dağılım göstermiştir. Basınç tarafında durma noktasında 33.7 kPa basınç elde edilmiştir. Buna ek olarak basınç bölgesinde ortalama 10 kPa basınç dağılımı olmuştur. Orta bölgede ise basınç 2 Pa'a kadar düşmüştür. Kuyruk bölgesinde de basıncın 2 kPa'a düştüğü görülmüştür.



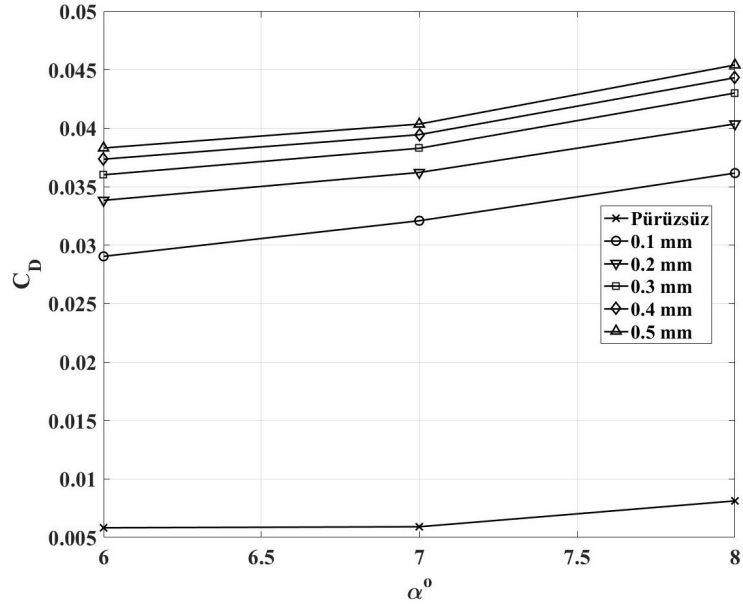
Şekil 6.91. $Re = 1.6 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

$Re = 1.6 \times 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.91'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 mm için vakum bölgesinde hücum kenarı yakınlarında basıncın yaklaşık -116 kPa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık 2.2 kPa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Basınç tarafında durma noktasında basınç 33.8 kPa'a kadar çıkmıştır. Yine kanadın alt tarafında orta bölgede basıncın 2.2 kPa'a düştüğü bir alan oluşmuştur. Durma noktası ile bu düşük basınç alanının dışında kalan bölgelerde ortalama 10 kPa basınç meydana gelmiştir. Kuyruk kenarında ise basıncın tekrar 2.2 kPa'a düştüğü gözlemlenmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.5 mm olduğunda ise vakum tarafında -116 kPa ile 2.2 kPa arasında basınç dağılımı oluşmuştur. Kanadın alt yüzeyinde durma noktasında basınç 33.8 kPa'a ulaşmış orta noktada ise yine düşük basınç alanı 2.2 kPa olarak ortaya çıkmış bunların dışında ortalama 10 kPa basınç dağılımı olmuştur. Kuyruk kenarında ise basınç yeniden 2.2 kPa'a düşmüştür.



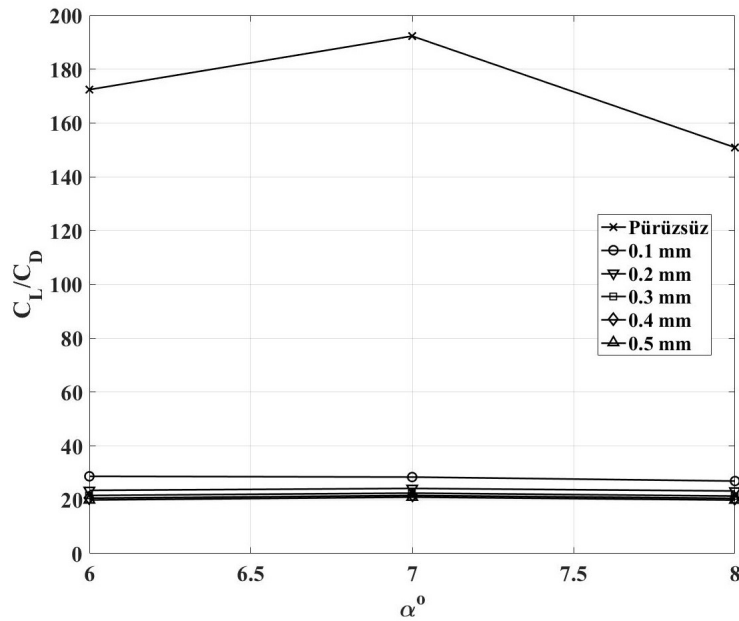
Şekil 6.92. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L değerleri.

Reynolds sayısının 3×10^6 olduğu şartlarda elde edilen kaldırma katsayısı-hücum açısı grafiği Şekil 6.92'de verilmiştir. Pürüzsüz durumda kaldırma katsayılarının en yüksek değerlerine ulaştığı, pürüzlülük uygulanması halinde kaldırma katsayısının pürüzlülük yüksekliği artarken düştüğü görülmüştür.



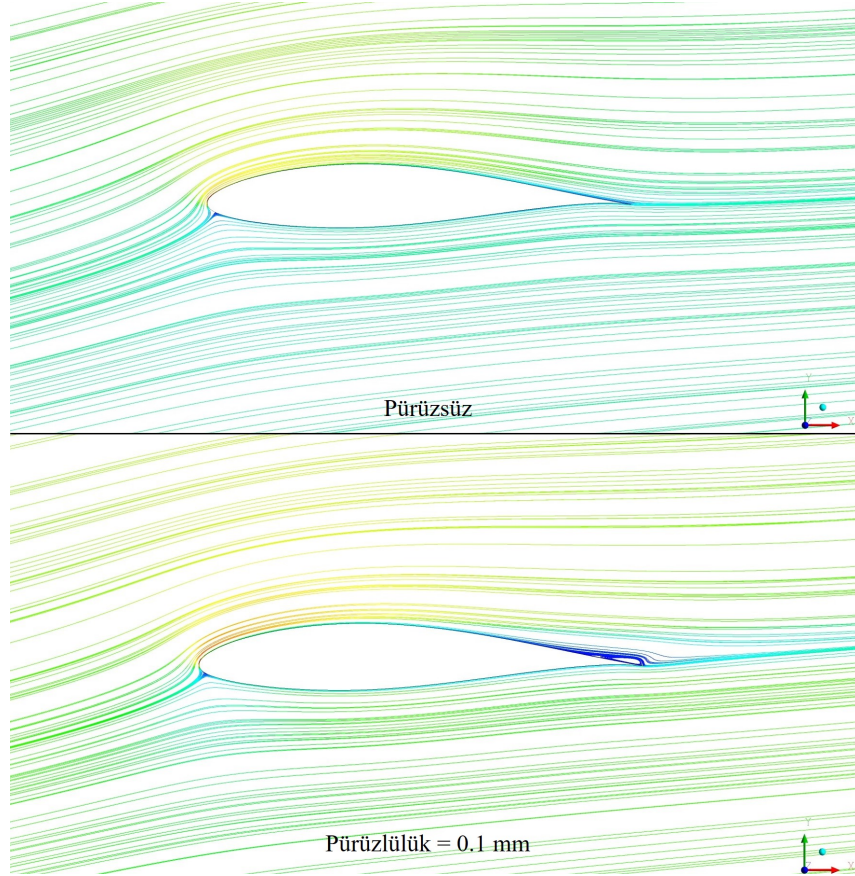
Şekil 6.93. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_D değerleri.

Şekil 6.93'te verilen sürüklenme katsayıları grafiğinde pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla sürüklenme katsayısında arttığı gözlemlenmiştir. Kaldırma/sürüklenme oranlarının Şekil 6.94'te gösterilmiştir. Kaldırma/sürüklenme oranında da pürüzsüz duruma kıyasla ciddi bir düşüş görülmüştür. Reynolds sayısı 3×10^6 şartlarında elde edilen kaldırma/sürüklenme oranı değerlerinden Reynolds sayısı arttıkça pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda elde edilen katsayılar arasındaki farkların giderek açıldığı görülmüştür.



Şekil 6.94. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin C_L/C_D oranları.

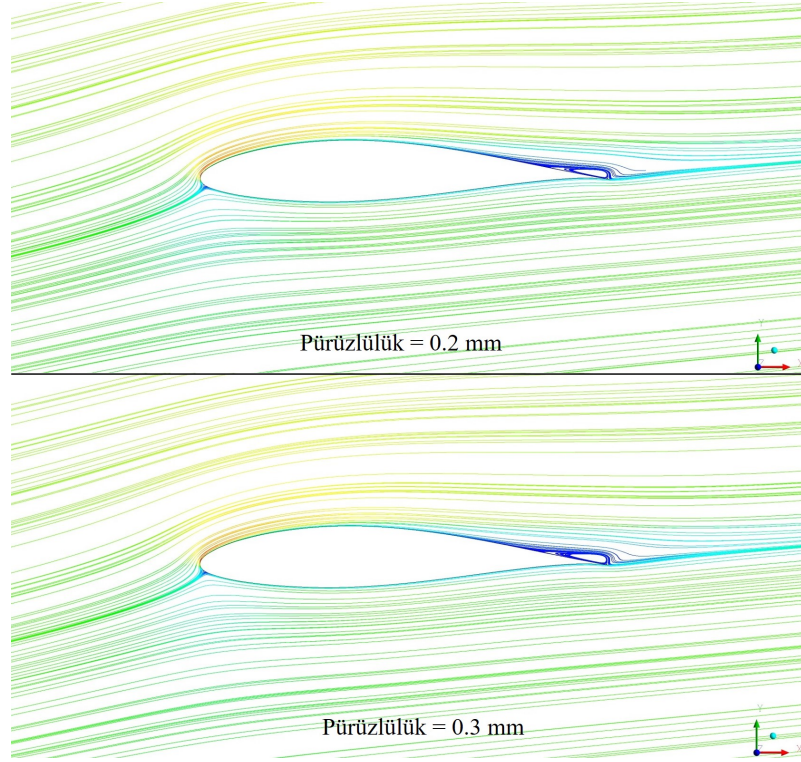
Reynolds sayısı 3×10^6 'da pürüzsüz kanat üzerinde oluşan akım çizgileri Şekil 6.95'te verilmiştir. Şekil 6.98'deki kayma gerilmesi grafiği incelendiğinde kanadın üst yüzeyinde $x/c = 0.018 - 0.12$ arasında kayma gerilmeleri sıfır çizgisine yakın bir şekilde dalgalanma göstermiş ancak kayma gerilmesi 0 Pa değerine düşmediğinden akış ayrılması meydana gelmemiştir. Bu Reynolds sayısında kanat yüzeyi pürüzsüz olduğunda herhangi bir ayrılma saptanmamıştır. Pürüzlülük boyutunun 0.1 mm olması halinde Şekil 6.95'teki akım çizgileri oluşmuştur. Şekil 6.95'te küçük bir ayrılma kabarcığının meydana geldiği görülmüştür. Bu ayrılmanın Şekil 6.98'e bakıldığında 0.1 mm pürüzlülük yüksekliği için $x/c = 0.86$ 'da meydana geldiği tespit edilmiştir.



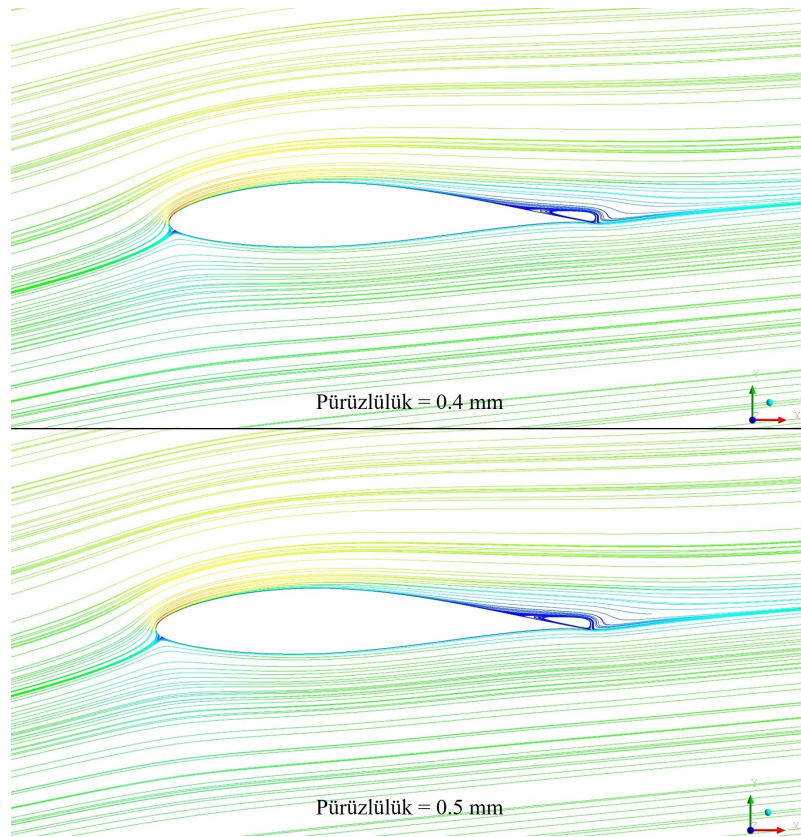
Şekil 6.95. $Re = 3 \times 10^6$ 'da pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda Şekil 6.96'da görüldüğü gibi kanat üst yüzeyinde bir ayrılma kabarcığı ortaya çıkmıştır. Şekil 6.98'den 0.2 mm için akışın kanat üzerinden tam olarak $x/c = 0.83$ 'ten ayrıldığı belirlenmiştir. Pürüzlülük 0.3 mm olarak uygulandığında ise Şekil 6.96 ve 6.98'e bakılarak akışın 0.1 ve 0.2 mm pürüzlülük yüksekliklerine kıyasla daha büyük bir ayrılma kabarcığı ile $x/c = 0.82$ 'den ayrıldığı tespit edilmiştir.

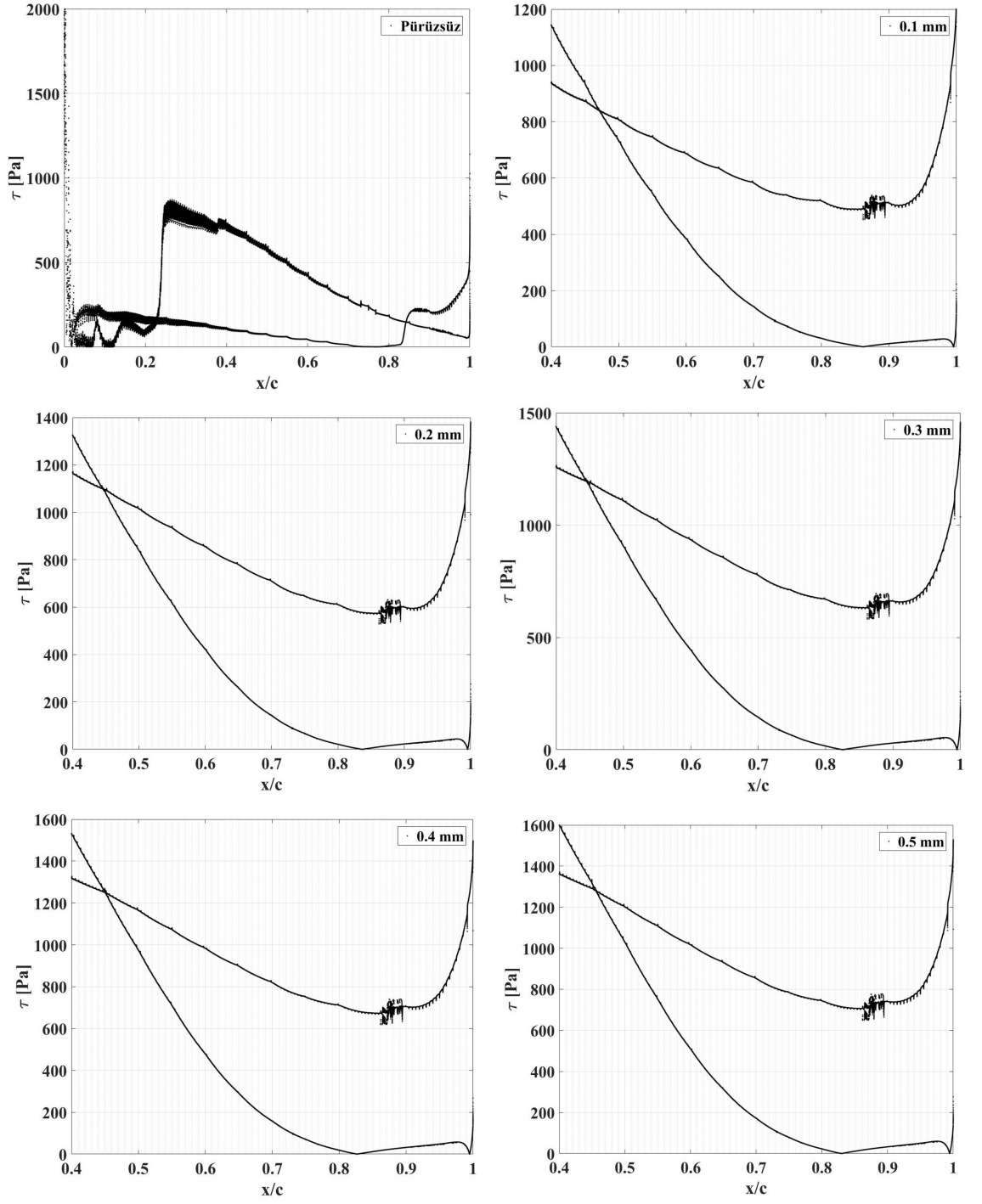
Kanat yüzeyine 0.4 ve 0.5 mm yüksekliklerinde pürüzlülük uygulandığında Şekil 6.97'de verilen akım çizgileri oluşmuştur. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 mm için Şekil 6.97'de görülen akış ayrılmasının, Şekil 6.98 incelenerek $Re = 1.6 \times 10^6$ 'da olduğu gibi 0.3 mm pürüzlülük yüksekliği ile aynı noktadan yani $x/c = 0.82$ 'den gerçekleştiği anlaşılmıştır. Pürüzlülük boyutu 0.5 mm olduğunda ise akışın 0.3 ve 0.4 mm pürüzlülük boyutlarındaki ayrılma konumuyla aynı şekilde $x/c = 0.82$ 'de koptuğu belirlenmiştir. Reynolds sayısı 3×10^6 olması halinde 0.3, 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliklerinin akış üzerinde yaklaşık aynı etkiye sahip olduğu sonucuna varılmıştır.



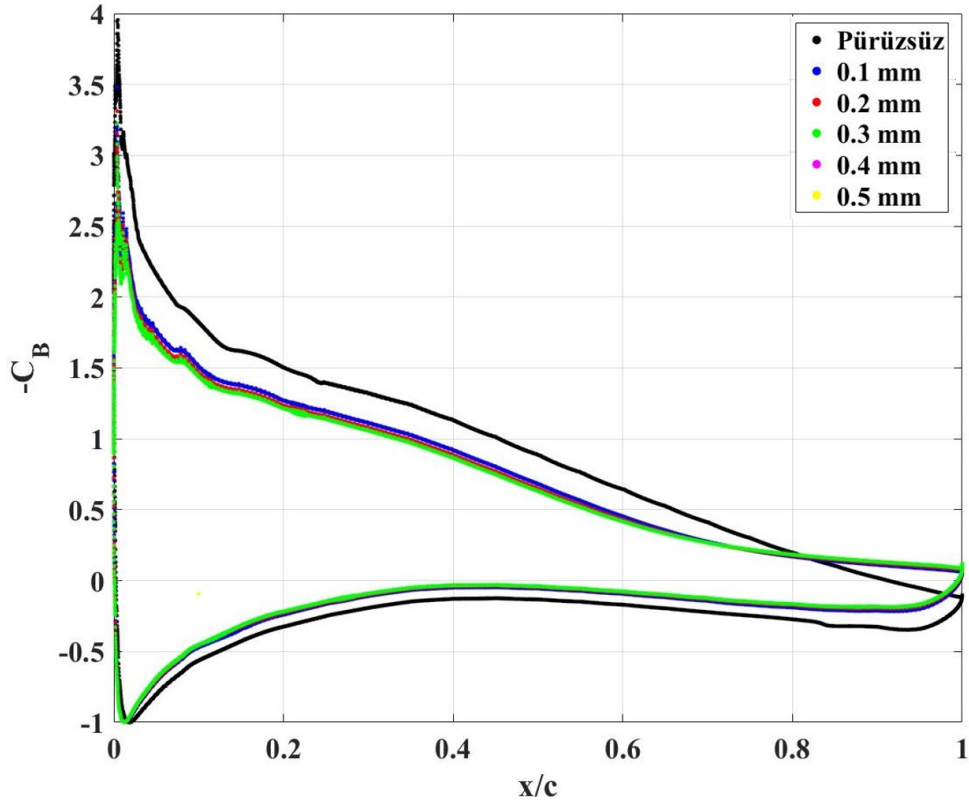
Şekil 6.96. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.



Şekil 6.97. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte oluşan akım çizgileri.

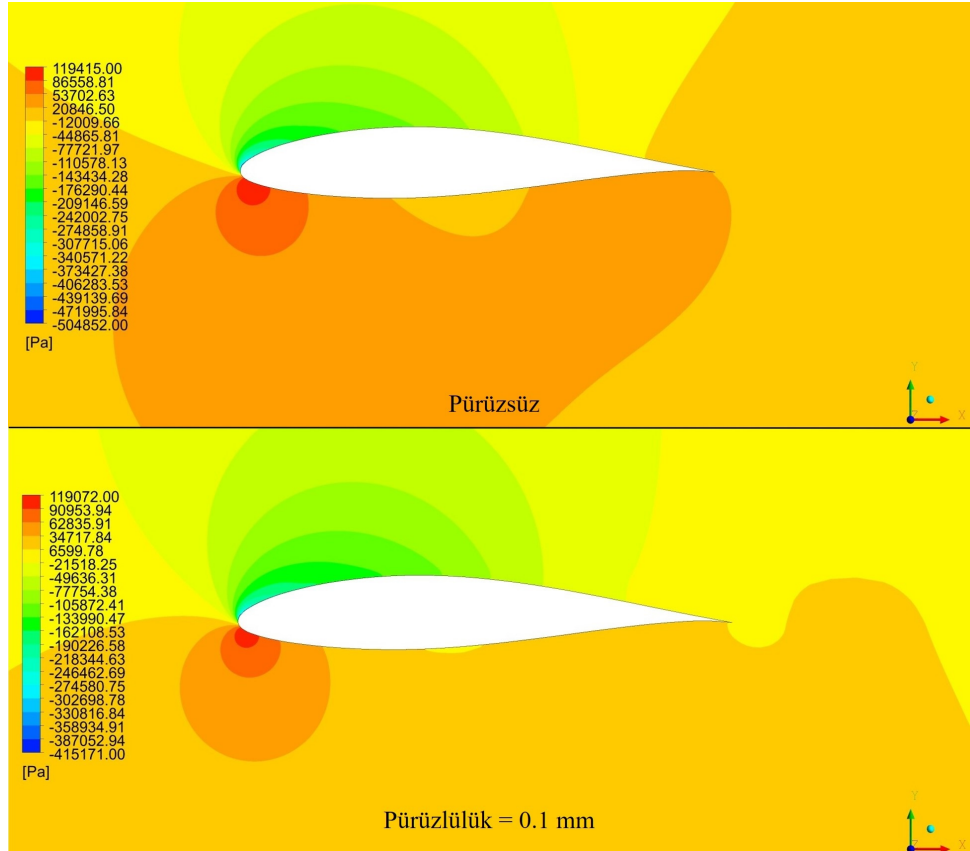


Şekil 6.98. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin kayma gerilmeleri.



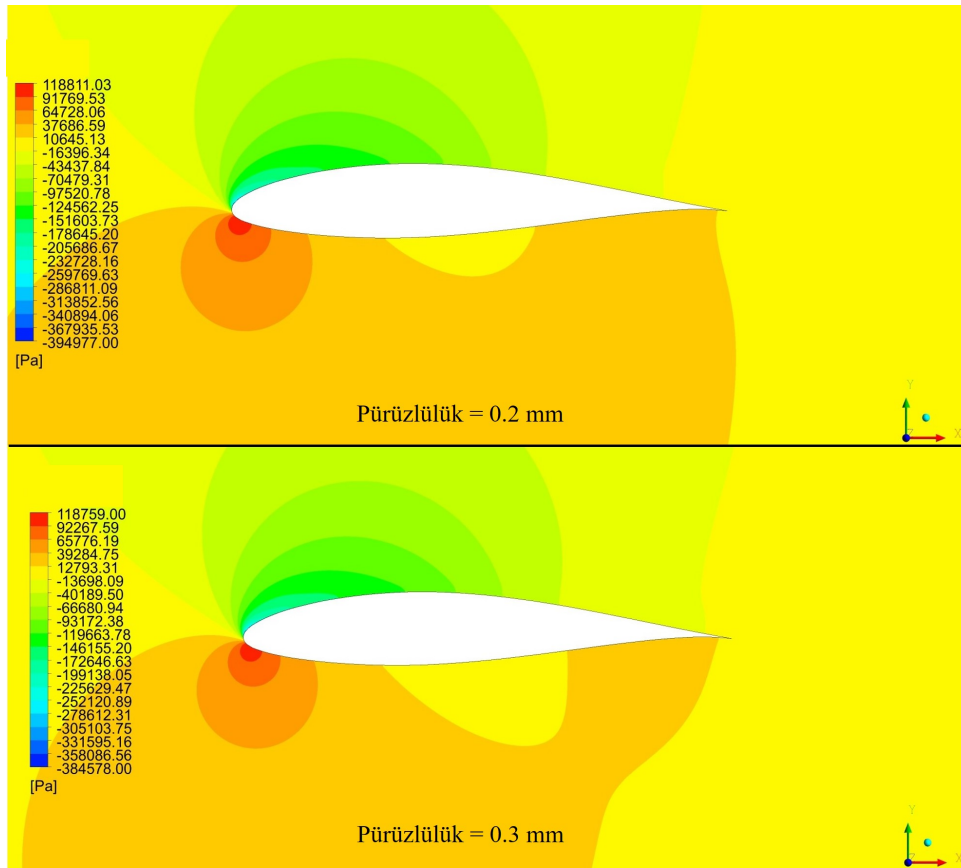
Şekil 6.99. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve pürüzlü yüzeylerin basınç katsayıları.

Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda $Re = 3 \times 10^6$ için basınç katsayıları Şekil 6.99'da verilmiştir. Şekil 6.99 incelendiğinde pürüzlülük uygulanması halinde alt yüzeydeki basınç katsayıları arasındaki farkın 10^6 ve 1.6×10^6 Reynolds sayısı şartlarına göre açıkça daha fazla olduğu görülmüştür. Pürüzlülük yüksekliği arttıkça kanat alt yüzeyinde basınç katsayıları azalmıştır. Kanadın vakum tarafında en düşük basınç katsayısı değerleri pürüzsüz durumda olmuştur. Yine vakum tarafında pürüzlülük yüksekliği arttıkça basınç katsayısı da artmıştır. Pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla kanadın alt ve üst yüzeyleri arasındaki basınç farkı azalmıştır.



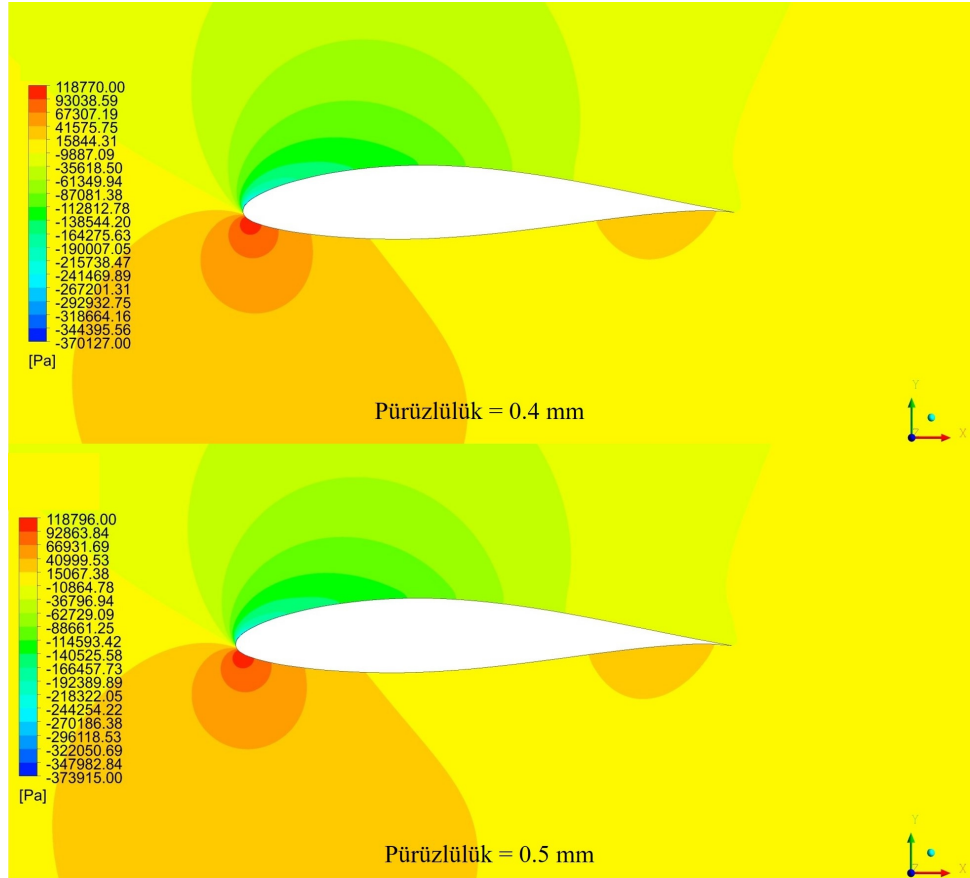
Şekil 6.100. $Re = 3 \times 10^6$ için pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlü yüzeylerin basınç dağılımları.

Pürüzsüz ve 0.1 mm pürüzlü durumda $Re = 3 \times 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de basınç dağılımı Şekil 6.100'de verilmiştir. Pürüzsüz durumda vakum bölgesinde basınç en düşük -504 kPa'a kadar inmiştir. Kuyruk kenarına doğru ise basınç yaklaşık -12 kPa'a yükselmiş, kuyruk kenarına geldiğinde ise 20 kPa basınç elde edilmiştir. Pürüzsüz yüzey için basınç bölgesinde durma noktasında basıncın 119 kPa olduğu, kuyruk kenarına kadar ise 53.7 kPa basınç dağılımının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu iki bölge arasında kanadın hemen hemen orta bölgesinde 20 kPa basınç alanı olmuştur. Kanat yüzeyine 0.1 mm pürüzlülük uygulandığında ise Şekil 6.100'de görüldüğü gibi vakum bölgesinde -415 kPa ile 6.5 kPa arasında basınç dağılımı gerçekleşmiştir. Basınç bölgesinde ise ağırlıklı olarak 34.7k Pa basınç dağılımı oluşmuştur. Durma noktasında basınç 119 kPa'a kadar çıkmıştır. Kanadın orta kısmında pürüzsüz duruma benzer şekilde ancak daha küçük çapta 6.5 kPa basınç alanı meydana gelmiştir.



Şekil 6.101. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

$Re = 3 \times 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.2 ve 0.3 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.101'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm olduğunda vakum tarafında basınç genel olarak -97.5 kPa ile 10.6 kPa arasında değişmiştir. Kanat alt yüzeyinde durma noktasında basınç 118.8 kPa olurken, ortalama 37.7 kPa basınç alanı meydana gelmiştir. Kanadın orta bölgesinde 10.6 kPa'a kadar bir basınç düşüşü gerçekleşmiştir. Benzer şekilde kuyruk kenarında da basıncın 10.6 kPa'a düştüğü gözlemlenmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.3 mm için vakum tarafında basınç ağırlıklı olarak -93 kPa ile -13.6 kPa arasında dağılım göstermiştir. Kuyruk kenarında ise basınç 12.8 kPa'a çıkmıştır. Basınç tarafında durma noktası bölgesinde 118 kPa basınç elde edilmiştir. Orta bölgede ise 12.8 kPa basınç alanı meydana gelmiştir. Bu alan dışında durma noktası ile kuyruk kenarı arasında ortalama 39 kPa basınç dağılımı oluşmuştur.



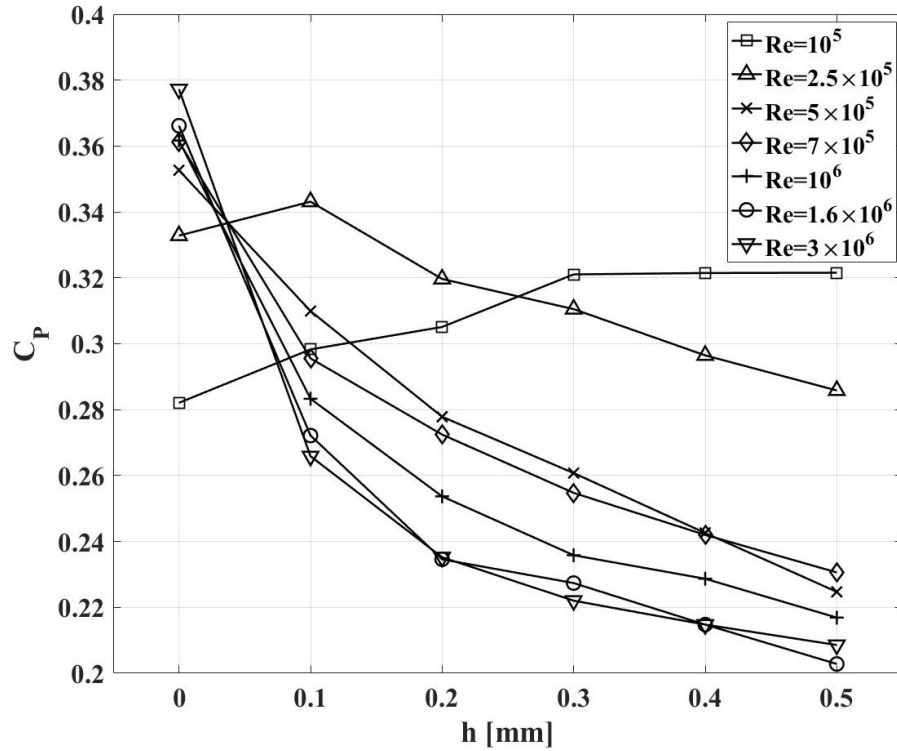
Şekil 6.102. $Re = 3 \times 10^6$ için 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte basınç dağılımları.

$Re = 3 \times 10^6$ için $\alpha = 8^\circ$ 'de 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülük yüksekliğine sahip yüzeylerin basınç dağılımları Şekil 6.102'de verilmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.4 mm için vakum bölgesinde hücum kenarı yakınlarında basıncın yaklaşık -370 kPa'a kadar düştüğü kuyruk kenarına doğru basıncın yükselerek yaklaşık -9.9 kPa'a kadar arttığı gözlemlenmiştir. Basınç tarafında durma noktasında basınç 118 kPa'a kadar çıkmıştır. Kanadın alt tarafında orta bölgede basıncın 15.8 kPa'a düştüğü bir alan oluşmuştur. Durma noktası ile bu düşük basınç alanı arasında ve kuyruk kenarında 41.5 kPa basınç meydana gelmiştir. Pürüzlülük yüksekliği 0.5 mm olduğunda ise vakum tarafında hücum kenarı civarında -373 kPa'a kadar basınç düşüşü meydana gelmiş kuyruk kenarına doğru yaklaşık -10 kPa basınç ortaya çıkmıştır. Kanadın alt yüzeyinde durma noktasında basınç 118.7 kPa'a ulaşmış orta noktada ise yine düşük basınç alanı 15 kPa olarak ortaya çıkmıştır. Durma noktası ile bu düşük basınç alanı arasında ve kuyruk kenarında 40.9 kPa basınç alanı elde edilmiştir.

6.5. Türbin Güç Katsayısı Hesabı

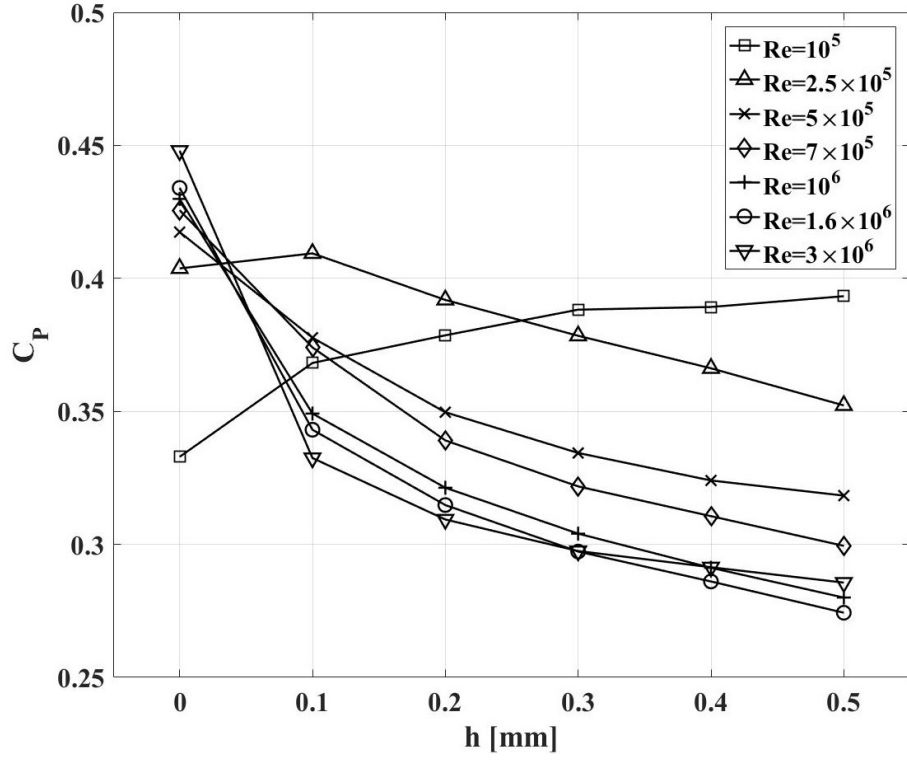
Pürüzsüz ve pürüzlü durumlar için 7 farklı Reynolds sayısında optimum hücum açılarında yapılan analizlerden kaldırma ve sürüklenme katsayıları elde edilmiştir. Pürüzlülüğün bahsedildiği üzere pozitif ve negatif etki ettiği durumlar görülmüştür. Kaldırma ve sürüklenme katsayılarındaki pürüzlülüğe bağlı değişimlerin türbin performansına etkisini somut bir şekilde incelemek adına Kanat Elemanı Momentum teorisi kullanılmıştır. Bu sayede iki boyutlu gerçekleştirilen analizlerin üç boyutlu bir rüzgar türbinine uyarlanarak güç katsayısı hesabı gerçekleştirilmiştir. Kanat Elemanı Momentum teorisi uygulanırken Bakırcı ve Yılmaz (2018) tarafından yapılan çalışmadaki adımlar takip edilmiş ve güç katsayıları elde edilmiştir. Pürüzsüz ve pürüzlü durumlarda performansı incelenen rüzgar türbinin 3 kanatlı ve 20 m yarıçapa sahip olduğu varsayılmıştır. Türbinin güç katsayısını hesaplayabilmek için uygun bir uç hız oranı (λ) belirlemek gerekmiştir. Optimum kanat uç hız oranının Ragheb (2014) tarafından 3 kanatlı rüzgar türbinleri için 7 olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte 6-8 arasının da kanat uç hız oranı için kabul edilebilir seviye olduğu raporlanmıştır. Bu tez kapsamında da Ragheb (2014) tarafından belirtilen $\lambda = 7$ hesaplamalarda kullanılmıştır.

Kanat Elemanı Momentum Teorisi ile $\alpha = 6^\circ$ hücum açısında yapılan hesaplamalarda türbin performans göstergesi olan güç katsayısı C_p 'nin her bir Reynolds sayısında pürüzlülük yüksekliği ile nasıl değiştiği Şekil 6.103'te verilmiştir. Reynolds sayısı 10^5 olduğunda türbin güç katsayısı pürüzlülük yüksekliğinin artmasıyla artmıştır. Bu Reynolds sayısında 0.3, 0.4 ve 0.5 mm pürüzlülükte türbin güç katsayıları hemen hemen sabit kalmıştır. Reynolds sayısı 2.5×10^5 'te pürüzlülük yüksekliğinin 0.1 mm olması güç katsayısını arttırmıştır. Ancak pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm ve üzeri için güç katsayısı pürüzsüz durumdan daha düşük olmuştur. Reynolds sayısı $5 \times 10^5 \leq Re \leq 3 \times 10^6$ aralığındayken pürüzsüz durumda 0.33-0.38 aralığında olan güç katsayısı pürüzlülük yüksekliği arttıkça düşmüş ve yaklaşık 0.2-0.23 aralığına kadar inmiştir.

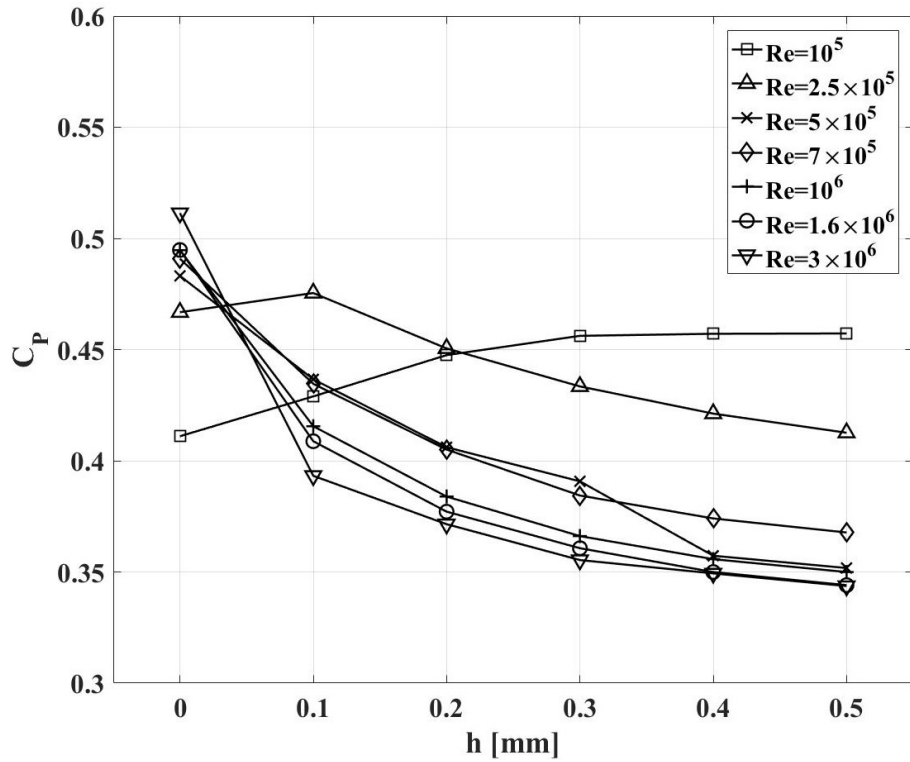


Şekil 6.103. Türbin güç katsayısının $\alpha = 6^\circ$ 'de pürüzlülük yüksekliği ile değişimi.

Güç katsayısının farklı Reynolds sayılarında pürüzlülük yüksekliği ile değişimi $\alpha = 7^\circ$ için Şekil 6.104'te verilmiştir. Reynolds sayısı 10^5 'te bu hücum açısında da türbin güç katsayısının pürüzlülük boyutlarının artmasıyla yükseldiği görülmüştür. Reynolds sayısı 2.5×10^5 olduğunda ise pürüzlülük yüksekliği 0.1 mm 'de güç katsayısında artış olmuş daha yüksek pürüzlülüklerde ise düşüş meydana gelmiştir. Hücum açısının 6° olmasından farklı olarak burada güç katsayıları bir miktar yüksek bulunmuştur. Şekil 6.105'te hücum açısının 8° olması halinde güç katsayısının pürüzlülük yüksekliği ile ilişkisi gösterilmiştir. Burada da diğer iki hücum açısına benzer biçimde 10^5 Reynolds sayısında pürüzlülük yüksekliğinin artması türbinin performansına olumlu yönde etki ederek güç katsayısının artmasına sebep olmuştur. Yine $Re = 2.5 \times 10^5$ durumunda 0.1 mm pürüzlülük türbin güç üretimine pozitif katkı sağlamıştır. Reynolds sayısının 2.5×10^5 'ten büyük olduğu tüm durumlarda pürüzlülük yüksekliğinin güç katsayısını ciddi oranda düşürdüğü görülmüştür.



Şekil 6.104. Türbin güç katsayısının $\alpha = 7^\circ$ 'de pürüzlülük yüksekliği ile değişimi.



Şekil 6.105. Türbin güç katsayısının $\alpha = 8^\circ$ 'de pürüzlülük yüksekliği ile değişimi.

7. SONUÇLAR

Rüzgar türbini kanat profillerinden olan NACA 63-415 üzerindeki akış bu tez kapsamında numerik olarak incelenmiştir. Rüzgar türbininin en iyi performansı sergileyeceği optimum hücum açısını belirlemek için $0^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ hücum açısı aralığında 6 farklı Reynolds sayısında çalışılmıştır. Optimum hücum açısı bulunurken kanat yüzeyi pürüzsüz olarak modellenmiştir. Spalart-Allmaras ve SST $k-\omega$ türbülans modelleri kullanılmış, bu türbülans modelleri ile optimum hücum açısının 6° ile 8° arasında olduğu tespit edilmiştir.

Optimum hücum açısı aralığı pürüzsüz kanat yüzeyi için belirlendikten sonra pürüzlülük uygulamalarına geçilmiştir. Kanat yüzeyinde yayılı pürüzlülük 0.1-0.5 mm arasında yüksekliğe sahip olacak şekilde modellenmiştir. Reynolds sayısı 10^5 için kanat yüzeyinin tüm pürüzlülük durumlarında pürüzsüz kanattan daha yüksek kaldırma, daha düşük sürüklenme katsayısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca pürüzlülük yüksekliği arttıkça kaldırma performansı artarken sürüklenme katsayısı daha da düşmüştür. Reynolds sayısı 2.5×10^5 olduğunda 0.1 mm pürüzlülük yüksekliği kaldırma katsayısının pürüzsüz durumdan daha fazla, sürüklenme katsayısının ise daha az olmasını sağlamış ve pürüzsüz durumda birkaç noktadan kopan akışın ayrılmasını engellemiştir. Aynı Reynolds sayısında 0.2 mm ve üzeri pürüzlülük boyutlarında kaldırma katsayısının pürüzsüz halden daha düşük, sürüklenme katsayısının daha yüksek olduğu görülmüştür. Pürüzlülük yüksekliği 0.2 mm'den itibaren arttıkça kaldırma katsayısı düşmeye, sürüklenme katsayısı artmaya devam etmiştir. Bahsedilen bu iki Reynolds sayısı şartlarında uygun pürüzlülük boyutlarının kanat aerodinamik performansına olumlu yönde etki edebileceği sonucuna varılmıştır.

Reynolds sayısının 5×10^5 ve üzeri olduğu şartlarda pürüzlülük uygulanmasının kanat kaldırma katsayısını düşürdüğü, sürüklenme katsayısını arttırdığı görülmüştür. Bununla birlikte Reynolds sayısı 5×10^5 ve 7×10^5 için 0.1 mm pürüzlülük yüksekliğinde akış kanat yüzeyine bağlanarak ayrılma önlenmiştir. Buradan da uygun pürüzlülük yüksekliği ile akış ayrılmasının önlenebileceği sonucu çıkarılmıştır.

Kanat Elemanı Momentum Teorisi kullanılarak 20 m yarıçapında 3 kanatlı bir rüzgar türbini için güç katsayısı hesaplanmıştır. Yapılan hesaplarda Reynolds sayısının 10^5 olması halinde güç katsayısının pürüzlülük uygulanarak %11'e varan artış sağlanabileceği

sonucuna varılmıştır. Reynolds sayısı 2.5×10^5 'te ise pürüzlülük yüksekliği 0.1 mm olarak uygulandığında yaklaşık %2 artış elde edilmiştir. Reynolds sayısı 2.5×10^5 için pürüzlülük yüksekliği 0.1 mm üzerine çıktığında ise güç katsayısında pürüzsüz duruma göre %11'e varan düşüş meydana gelmiştir. Güç katsayısı $Re = 5 \times 10^5$ şartlarında pürüzlülüğe bağlı olarak %27'ye varan düşüş göstermiştir. Reynolds sayısı 7×10^5 'e ulaştığında pürüzlü kanada sahip türbinin güç katsayısında pürüzsüz duruma göre %25'e kadar düşme meydana gelmiştir. Rüzgar türbini $Re = 10^6$ koşullarında çalıştırıldığında ise kanatların pürüzlü olmasının güç katsayısında % 29 seviyelerinde düşüşe neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Reynolds sayısı 1.6×10^6 olduğunda da güç katsayısında $Re = 10^6$ şartlarına benzer oranda azalma olmuştur. Son olarak Reynolds sayısı 3×10^6 olduğunda pürüzlülüğe bağlı olarak türbin güç katsayısında %32'ye varan düşme meydana gelebileceği sonucuna varılmıştır.

Burada pürüzlülük ile elde edilen iyileştirmenin, aynı parametreler ve akış koşullarında deneysel çalışmaları yürütülerek sayısal tahminlerin doğrulanması gerekmektedir. Ayrıca bu kanat profili için pürüzlülük ile elde edilen iyileştirmenin farklı kanat profillerinde de sayısal ve deneysel olarak incelenmesi bundan sonraki çalışmalar arasında olabilir.

KAYNAKLAR

- Abbott, I. H., & Von Doenhoff, A. E. (2012). *Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data*. Courier Corporation.
- Airfoil Tools. <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=n63415-il>, (11.02.2019).
- Alter, S. (2004). A structured grid quality measure for simulated hypersonic flows. *42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. 5-8 January 2004, Reno, Nevada, 612.
- ANSYS Inc. (2013). *ANSYS Fluent 15.0 theory guide*. Technical report, Canonsburg, PA, USA.
- Bak, C., & Fuglsang, P. (2002). Modification of the NACA 63(2)-415 leading edge for better aerodynamic performance. *J. Sol. Energy Eng.*, 124(4), 327–334.
- Bak, C., Fuglsang, P., Johansen, J., & Antoniou, I. (2000). *Wind Tunnel Tests of the NACA 63-415 and a Modified NACA 63-415 airfoil*. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark.
- Bakırcı, M., & Yılmaz, S. (2018). Theoretical and computational investigations of the optimal tip-speed ratio of horizontal-axis wind turbines. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21(6), 1128–1142.
- Betz, A. (1966). *Introduction to the Theory of Flow Machines*. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Blasco, P., Palacios, J., & Schmitz, S. (2017). Effect of icing roughness on wind turbine power production. *Wind Energy*, 20(4), 601–617.
- Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons.
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. (2012). *Akışkanlar Mekaniği Temelleri ve Uygulamaları 2. basım*. (T. Engin, Çev.). Güven Kitabevi, İzmir.
- Chakroun, W., Al-Mesri, I., & Al-Fahad, S. (2004). Effect of surface roughness on the aerodynamic characteristics of a symmetrical airfoil. *Wind Engineering*, 28(5), 547–564.
- Çolak, İ., & Demirtaş, M. (2008). Rüzgâr enerjisinden elektrik üretiminin Türkiye'deki gelişimi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 1(2), 55–62.
- Corten, G., & Veldkamp, H. (2001). Insects Cause Double Stall. *European Wind Energy Conference 2001*. 2–6 July 2001, CopenHagen, Denmark.
- Darbandi, M., Mohajer, A., Behrouzifar, A., Jalali, R., & Schneider, G. E. (2014). Evaluating the effect of blade surface roughness in megawatt wind turbine performance using analytical and numerical approaches. *International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*. 14–16 July 2014, Florida.

- Diab, A., Alaa, M., Hossam El-Din, A., Salem, H., & Ghoneim, Z. (2015). Performance degradation of wind turbine airfoils due to dust contamination: a comparative numerical study. *ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition*. 15–19 June 2015, Montreal, Quebec, Canada.
- Durak, M., & Özer, S. (2008). *Rüzgar Enerjisi Teori ve Uygulama*. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği, Ankara.
- EERE. <https://www.energy.gov/eere/wind/wind-energy-technologies-office>, (19.08.2019).
- Elibüyük, U., & Üçgül, İ. (2014). Rüzgâr türbinleri, çeşitleri ve rüzgâr enerjisi depolama yöntemleri. *SDÜ Yekarum e-Dergi*, 2(3), 1–14.
- Etemaddar, M., Hansen, M. O. L., & Moan, T. (2014). Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions. *Wind Energy*, 17(2), 241–265.
- ETKB. <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Ruzgar>, (04.02.2020).
- Ferrer, E., & Munduate, X. (2009). CFD predictions of transition and distributed roughness over a wind turbine airfoil. *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*. 5–8 January 2009, Orlando, Florida.
- Gaudern, N. (2014). A practical study of the aerodynamic impact of wind turbine blade leading edge erosion. *Journal of Physics: Conference Series*, 524, 1–10.
- Global Wind Energy Council (2020). *Global Wind Report 2019*. Technical report, Brussels, Belgium.
- Golding, E. W., & Harris, R. (1976). *The generation of electricity by wind power*. E. & FN Spon, London, UK.
- Hansen, M. O. (2015). *Aerodynamics of Wind Turbines*. Routledge, New York.
- Hau, E. (2013). *Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics*. Springer Science & Business Media, London, UK.
- Hinze, J. (1975). *Turbulence*. McGraw-Hill Publishing Co., New York, USA.
- Hochart, C., Fortin, G., Perron, J., & Ilinca, A. (2008). Wind turbine performance under icing conditions. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 11(4), 319–333.
- Imran, R. M., Hussain, D. A., & Soltani, M. (2016). An experimental analysis of the effect of icing on wind turbine rotor blades. *2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (T&D)*, 2–5 May 2016, Dallas, Texas, 1–5.
- International Energy Agency (IEA). (2018). *World Energy Outlook: Offshore Energy Outlook 2018*. Technical report, Paris, France.
- Jafari, K., Djavareshkian, M. H., & Feshalami, B. F. (2017). The effects of different roughness configurations on aerodynamic performance of wind turbine airfoil and blade. *International Journal of Renewable Energy Development*, 6(3), 273–281.

- Karık, F., Sözen, A., & İskender, Ü. (2015). Türkiye’de Rüzgar Enerjisinde Mevcut Durum. *Mühendislik Bilimleri Dergisi, Gazi Üniversitesi*, 1(2), 219–234.
- Khalfallah, M. G., & Koliub, A. M. (2007). Effect of dust on the performance of wind turbines. *Desalination*, 209(1-3), 209–220.
- Kirby, B. J. (2010). *Micro-and Nanoscale Fluid Mechanics: Transport in Microfluidic Devices*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kruse, E. K., Sørensen, N. N., & Bak, C. (2018). Predicting the influence of surface protuberance on the aerodynamic characteristics of a NACA 63(3)-418. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(2), 1–10.
- Kuethe, A., & Chow, Y. C. (1986). *Foundations of Aerodynamics*. Wiley, New York.
- Langtry, R. B., & Menter, F. R. (2009). Correlation-based transition modeling for unstructured parallelized computational fluid dynamics codes. *AIAA journal*, 47(12), 2894–2906.
- Li, D., Li, R., Yang, C., & Wang, X. (2010). Effects of surface roughness on aerodynamic performance of a wind turbine airfoil. *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 28–31 March 2010, Chengdu, China, 1-4.
- Lock, C., Bateman, H., & Townend, H. (1924). *Experiments to Verify the Independence of the Elements of an Airscrew Blade*. HM Stationery Office, London.
- Maniaci, D. C., White, E. B., Wilcox, B., Langel, C. M., van Dam, C., & Paquette, J. A. (2016). Experimental measurement and CFD model development of thick wind turbine airfoils with leading edge erosion. *Journal of Physics: Conference Series*, 753(2), 1–10.
- Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605.
- MGM. <https://www.mgm.gov.tr/genel/meteorolojiyegir.aspx?s=2>, (17.02.2020).
- Milne-Thomson, L. M. (1996). *Theoretical Hydrodynamics*. Courier Corporation, New York, USA.
- Nurbay, N., & Çınar, A. (2005). Rüzgar türbinlerinin çeşitleri ve birbirleriyle karşılaştırılması. *III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu*, 19-21 Ekim 2005, Mersin, 19–21.
- Özçakmak, Ö. S., Madsen, H., Sørensen, N., Sørensen, J., Fischer, A., & Bak, C. (2018). Inflow turbulence and leading edge roughness effects on laminar-turbulent transition on NACA 63-418 airfoil. *Journal of Physics: Conference Series*, 1037(2), 1-8.
- Özkan, M., Thomas, P., Cooper, A., & Garrett, S. (2017). Comparison of the effects of surface roughness and confinement on rotor–stator cavity flow. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 11(1), 142–158.

- Papadakis, M., Yeong, H. W., Wong, S. C., Vargas, M., & Potapczuk, M. (2003). Aerodynamic performance of a swept wing with ice accretions. *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 6–9 January 2003, Reno, Nevada, 1-48.
- Papadopoulou, K., Alasis, C., & Xydis, G. A. (2020). On the wind blade's surface roughness due to dust accumulation and its impact on the wind turbine's performance: A heuristic qblade-based modeling assessment. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 39(1), 2–11.
- Pechlivanoglou, G., Fuehr, S., Nayeri, C., & Paschereit, C. (2010). The effect of distributed roughness on the power performance of wind turbines. *ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air*, June 14-18 2010, Glasgow, UK, 845–855.
- Ragheb, M. (2014). *Optimal Rotor Tip Speed Ratio*. Lecture Notes of Course No. NPRE, 475.
- Ransford, T. (1995). *Potential Theory in the Complex Plane*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Ren, N., & Ou, J. (2009). Dust effect on the performance of wind turbine airfoils. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 1, 102–107.
- REN21 (2018). *Renewables 2018 Global Status Report*. Technical report, Paris, France.
- Sagol, E., Reggio, M., & Ilinca, A. (2013). Issues concerning roughness on wind turbine blades. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 514-525.
- Salem, H., Diab, A., & Ghoneim, Z. (2013). CFD simulation and analysis of performance degradation of wind turbine blades in dusty environments. *Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013*, 20–23 October 2013, Madrid, Spain, 827–832.
- Sareen, A., Sapre, C. A., & Selig, M. S. (2014). Effects of leading edge erosion on wind turbine blade performance. *Wind Energy*, 17, 1531-1542.
- Soltani, M. R., Birjandi, A. H., & Moorani, M. S. (2011). Effect of surface contamination on the performance of a section of a wind turbine blade. *Scientia Iranica*, 18(3), 349–357.
- Spalart, S., & Allmaras, S. (1992). A one-equation turbulence model for aerodynamic flows. *30th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit*, 6-9 January 1992, Reno, Nevada, 1–22.
- Timmer, W., & Van Rooij, R. (2003). Summary of the Delft University wind turbine dedicated airfoils. *J. Sol. Energy Eng.*, 125(4), 488–496.
- Tu, J., Yeoh, Guan, H., & Liu, C. (2020). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Temelleri ve Uygulamaları*. (T. Engin, Çev.) Palme Yayınevi, Ankara.
- Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (2019). *Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu 2019*, Ankara.

- Villalpando, F., Reggio, M., & Ilinca, A. (2012). Numerical study of flow around iced wind turbine airfoil. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 6(1), 39–45.
- White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics 7th ed.* McGraw-Hill, New York, USA.
- Wikipedia (2020a). https://en.wikipedia.org/wiki/Vestas_V164, (02.02.2020).
- Wikipedia (2020b). https://tr.wikipedia.org/wiki/Coriolis_etikisi, (17.02.2020).
- Wilcox, B., & White, E. (2016). Computational analysis of insect impingement patterns on wind turbine blades. *Wind Energy*, 19(3), 483-495.
- Wilcox, D. C. (2006). *Turbulence modeling for CFD 3rd ed.* DCW Industries, California, USA.
- YEGM. <http://www.yegm.gov.tr/yenilenebilir.aspx>, (01.08.2019).
- Zhang, X., Wang, G., Zhang, M., Liu, H., & Li, W. (2017). Numerical study of the aerodynamic performance of blunt trailing-edge airfoil considering the sensitive roughness height. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(29), 18252–18262.
- Zhang, Y. (2018). Effects of distributed leading-edge roughness on aerodynamic performance of a low-Reynolds-number airfoil: an experimental study. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 8(3), 201–207.
- Zidane, I. F., Saqr, K. M., Swadener, G., Ma, X., & Shehadeh, M. F. (2017). Computational fluid dynamics study of dusty air flow over NACA 63-415 airfoil for wind turbine applications. *Jurnal Teknologi*, 79(7-3), 1–6.

ÖZ GEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Onur ERKAN
Doğum Yeri ve Tarihi : Çanakkale / 17.03.1994

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Pamukkale Üniversitesi
Makine Mühendisliği Bölümü
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Stajlar : Er-Bakır Elektrolitik Bakır Mamulleri A.Ş. / Denizli (2016)
Çalıştığı Kurumlar : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi (2018 – devam ediyor)

İletişim

Adres : Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Makine Mühendisliği Bölümü 11230 Bilecik
E-Posta Adresi : onur.erkkan@bilecik.edu.tr

Akademik Çalışmaları

- Erkan, O., & Özkan, M. (2020). Investigation of the Flow Over NACA 63-415 Airfoil. *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 3-4.
- Erkan, O., & Özkan, M. (2019). Rotor-Stator Akış Konfigürasyonunda Sınır Tabaka Oluşumu. *22. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, 11-14 Eylül 2019, Kocaeli.
- Erkan, O., & Özkan, M. (2019). Rüzgar Türbin Kanadı Performans İncelemesi. *22. Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, 11-14 Eylül 2019, Kocaeli.
- Erkan, O., Özkan, M., & Arslan, O. (2018). Mini Kanal İle Fotovoltaik Hücre Soğutma. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2(2), 34-38.