



**YÜKSEK HIZLI ULAŞIM ARAÇLARINDA AERODİNAMİK
FRENLEME OPTİMİZASYONU**

Doktora Tezi

Eşref ÇAKIR

Eskişehir 2025

**YÜKSEK HIZLI ULAŞIM ARAÇLARINDA AERODİNAMİK FRENLEME
OPTİMİZASYONU**

Eşref ÇAKIR

DOKTORA TEZİ

Uçak Gövde ve Motor Bakım Anabilim Dalı

Danışman: Öğr. Gör. Dr. Gökhan DURMUŞ

Eskişehir

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ağustos 2025

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Eşref ÇAKIR'ın YÜKSEK HIZLI ULAŞIM ARAÇLARINDA AERODİNAMİK FRENLEME OPTİMİZASYONU başlıklı çalışması 25/08/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek “Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği”nin ilgili maddeleri uyarınca, Uçak Gövde ve Motor Bakım Anabilim dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Unvan Adı Soyadı

İmza

Üye	: Öğr. Gör. Dr. Gökhan DURMUŞ
Üye	: Prof. Dr. Mehmet Şerif KAVSAOĞLU
Üye	: Prof. Dr. Ünver KAYNAK
Üye	: Doç.Dr. Mustafa KAYA
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Uğur ÖZDEMİR

Prof. Dr. Harun BÖCÜK
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

25/08/2025

DANIşMAN ONAYI

Danişmanlığını yürüttüğüm Doktora ğrencisi Eşref ÇAKIR, YÜKSEK HIZLI ULAşIM ARAÇLARINDA AERODİNAMİK FRENLEME OPTİMİZASYONU başlıklı tez çalışmasını tamamlamıştır. Hazırlamış olduğu tez tarafımca incelenmiş ve öğrencinin tez savunma sınavına alınması bilimsel ve etik açıdan uygun görülmüştür.

Tez Danişmanı

Öğr. Gör. Dr. Gökhan DURMUş



ÖZET

YÜKSEK HIZLI ULAŞIM ARAÇLARINDA AERODİNAMİK FRENLEME OPTİMİZASYONU

Eşref ÇAKIR

Uçak Gövde ve Motor Bakım Anabilim Dalı
Eskişehir Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağustos 2025

Danışman: Öğr. Gör. Dr. Gökhan DURMUŞ

Bu çalışmada diğer çalışmalardan farklı olarak (kalınlık)x(yükseklik)x(genişliği) sırası ile (0.2x2x50), (0.3x3x50) ve (0.5x5x50) cm olan 3 farklı levha ile mesafe değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimi (50x50x100) cm olan kapalı sistem rüzgâr tüneli test odasında 15,20,25 ve 30 m/s hızlarda incelenmiştir. Tasarlanan tek eksenli sürüklenme kuvvet ölçüm cihazı ile öncelikle boş sistemin oluşturduğu sürüklenme kuvveti daha sonra ise tek levhanın oluşturduğu sürüklenme kuvveti ölçülmüştür. Sonrasında ise iki levha sisteme yerleştirilerek aradaki mesafe değişimine bağlı olarak sürüklenme kuvveti değişimi incelenmiştir. Rüzgâr tüneli test odası uzunluğu 100 cm, levhalar arasındaki mesafe a , levha plakaların yüksekliği h kabul edilerek mesafe değişimi $a/h = 0-1-2-3...45$ şeklinde 0.5 cm kalınlıktaki levhalarda $a/h = 18$ 'e kadar, 0.3 cm kalınlıktaki levhalarda $a/h=30$ 'a kadar ve 0.2 cm kalınlıktaki levhalarda ise $a/h=45$ kat mesafeye kadar çift levhalar yerleştirilerek sürüklenme kuvvet ölçümü yapılmıştır. Çalışma sonunda literatüre paralel olarak levha yüksekliğinin artması ile sürüklenme kuvvetinin arttığı ve levha plakaların mesafe değişimi ile etkilendiği $a/h=0$ 'dan $a/h=6$ oranına kadar sürüklenme kuvvetinin sürekli azaldığı, $a/h=6$ 'dan sonra ise sürüklemenin sürekli arttığı tespit edilmiştir. $a/h=11$ mesafesinde ise çift levha sürüklenme katsayısı tek levha sürüklemesine ancak ulaşmıştır. Diğer bir ifade ile $a/h=11$ mesafesi ve öncesine yerleştirilen çift levha, tek levha kadar aerodinamik sürüklenme kuvveti oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Diğer taraftan $a/h=11$ 'den $a/h=45$ mesafesine kadar çift levhada sürüklenme kuvvetinin sürekli arttığı görülmüştür. Deneyler rüzgâr tüneli test odası ebatlarından dolayı $a/h=45$ mesafesine kadar gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile özellikle yüksek hızlı ulaşım araçlarında aerodinamik frenleme optimizasyon çalışmalarına önemli katkı sağlaması beklenmektedir.

Anahtar Sözcükler: Aerodinamik sürüklenme, Aerodinamik frenleme, Düz levha, optimizasyon, Yüksek hızlı araçlar.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF AERODYNAMIC BRAKING SYSTEMS IN HIGH-SPEED TRANSPORTATION VEHICLES

Eşref ÇAKIR

Department of Airframe and Powerplant Maintenance

Eskişehir Technical University, Institute of Graduate Programs, August 2025

Supervisor: Öğr. Gör. Dr. Gökhan DURMUŞ

In this study, unlike previous research in the literature, the change of drag coefficient depending on the distance change with 3 different plates of (thickness)x(height)x(width) dimensions of (0.2x2x50), (0.3x3x50) and (0.5x5x50) cm respectively was investigated at speeds of 15, 20, 25 and 30 m/s in a closed system wind tunnel test chamber of (50x50x100) cm. The designed single-axis drag force measurement device was used to measure the drag force generated by the empty system, followed by the drag force generated by a single plate. Then, two plates were placed in the system, and the change in drag force was examined depending on the distance between them. The wind tunnel test chamber was 100 cm long, the distance between the plates was a , and the plate height was h . Using the distance change $a/h = 0-1-2-3...45$, the drag force was measured by placing double plates at distances up to $a/h = 18$ for 0.5 cm thick plates, up to $a/h = 30$ for 0.3 cm thick plates, and up to $a/h = 45$ for 0.2 cm thick plates. The study concluded that, in line with literature, the drag force increases with increasing plate height. The drag force is affected by the change in plate spacing, decreasing continuously from $a/h=0$ to $a/h=6$, and increasing continuously after $a/h=6$. At a distance of $a/h=11$, the double plate drag coefficient barely reaches the drag coefficient of a single plate. In other words, it was observed that a double plate placed at $a/h=11$ and before did not generate as much aerodynamic drag as a single plate. On the other hand, it was observed that the drag force of the double plate increases continuously from $a/h=11$ to $a/h=45$. Experiments were conducted up to $a/h=45$ due to the dimensions of the wind tunnel test chamber. This study is expected to contribute significantly to aerodynamic braking optimization studies, particularly in high-speed transportation vehicles.

Keywords: Aerodynamic drag, Aerodynamic braking, Flat plate, Optimization, High-speed vehicles.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının hazırlanması sürecinde, akademik bilgi birikimi, deneyimi ve yol gösterici desteğiyle her aşamada bana rehberlik eden değerli danışmanım Öğr. Gör. Dr. Gökhan DURMUŞ'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmamın gelişmesine sağladığı katkılar, yapıcı eleştirileri ve yönlendirmeleriyle desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Mehmet Şerif KAVSAOĞLU'na da şükran borçluyum.

Eğitim hayatım boyunca bilgi ve tecrübeleriyle akademik gelişimime katkıda bulunan tüm hocalarıma teşekkür ederim. Araştırma sürecinde her zaman sabır, anlayış ve manevi destekleriyle yanımda olan aileme minnettarlığımı ifade ederim. Onların desteği, bu çalışmanın tamamlanmasında en büyük motivasyon kaynağım olmuştur.

Eşref ÇAKIR

25/08/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Eskişehir Teknik Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

Eşref ÇAKIR

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
BAŞLIK SAYFASI	I
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	II
DANIŞMAN ONAYI	III
ÖZET	IV
ABSTRACT.....	V
TEŞEKKÜR	VI
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	VII
İÇİNDEKİLER	VIII
TABLolar DİZİNİ.....	XI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XVI
1. GİRİŞ	1
1.1. Levha Plakaların Aerodinamik Frenlemedeki Tarihsel Gelişimi	1
1.2. Literatür Çalışması	2
2. MATERYAL VE METOD	8
2.1. Rüzgâr Tüneli ve Ölçüm Ekipmanları.....	8
2.1.1. Deney odası ve tasarımı	8
2.1.2. Pitot statik tüp	9
2.1.3. Rüzgâr tüneli kontrol ünitesi	10
2.2. Deney Seti Tasarımı	10
2.2.1. Deney seti tasarımı için gerekli ekipmanlar	10
2.2.1.1. <i>Yük hücreleri</i>	10
2.2.1.2. <i>Yük hücresi gösterge paneli</i>	11
2.2.1.3. <i>Monitör ve program</i>	12
2.2.2. Ölçümlerde kullanılan deney düzenekleri	12
2.2.2.1. <i>Birinci deney düzeneği</i>	13

2.2.2.2. İkinci deney düzeneği.....	14
2.2.2.3. Üçüncü deney düzeneği	16
2.3. Hesaplamalarda Kullanılacak Bağntı ve Denklemler	17
2.3.1. Hal denklemi.....	17
2.3.2. Bernoulli denklemi.....	18
2.3.3. Süreklilik denklemi	18
2.3.4. Reynolds sayısı.....	19
2.3.5. Rüzgâr tüneli test odasında hız hesaplamaları.....	19
2.3.5.1. Venturi tüpünde hız hesaplama	19
2.3.5.2. Pitot statik tüpü ile hız hesaplama.....	20
3. RÜZGÂR TUNELİNDE YAPILAN SÜRÜKLEME ANALİZLERİ.....	21
3.1. Sürüklenme	21
3.1.1. Sürüklemenin tanımı	21
3.1.2. Toplam sürüklenme (D) bileşenleri	21
3.1.2.1. Yüzey sürüklemesi	21
3.1.2.2. Form(basınç) sürüklemesi	22
3.1.3. Toplam sürüklenme katsayısı	22
3.1.4. Sürüklemeye etki eden faktörler	22
3.1.5. Sürüklenme katsayısı hesaplama (C_d).....	22
3.2. Silindir Etrafında Sürüklenme Analizleri.....	23
3.2.1. Silindir deney düzeneğinin hazırlık aşamaları.....	24
3.2.2. Silindir sürüklenme kuvvetinin ölçülmesi.....	25
3.2.2.1. Birinci deney düzeneği ile silindir sürüklenme kuvvetinin ölçülmesi.....	25
3.2.2.2. Üçüncü deney düzeneği ile sürüklenme kuvvetinin ölçülme	26
3.2.3. Elde edilen sonuçlar ve karşılaştırma	28
3.3. Seçili Kanat Profilleri Üzerinde Sürüklenme Analizleri	29
3.3.1. Elde edilen sonuçlar ve karşılaştırma	31
4. ARDIŞIK OLARAK YERLEŞTİRİLMİŞ DİKEY LEVHALARIN SÜRÜKLEME ANALİZLERİ VE ETKİLEŞİMLERİ	34
4.1. Ön Hazırlık ve Hesaplamalar	34

4.1.1. Ön hazırlık aşaması	34
4.1.2. Deney öncesi hesaplamalar	37
4.1.2.1. Hız hesaplamaları	37
4.1.2.2. Reynolds sayısı hesaplama.....	38
4.1.2.3. Sürüklenme katsayısı hesaplamaları (C_d)	39
4.2. Gerçekleştirilen Deneyler	40
4.2.1. Anlık ve ortalama sürüklenme katsayıları zaman grafiği ((C_d, t))	40
4.2.2. Sürüklenme kuvveti ile a/h oranı değişim grafiği D, ah	43
4.2.3. Sürüklenme katsayısı mesafe değişim grafiği ($C_d, a/h$)	44
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	52
KAYNAKÇA.....	58
EKLER	
ÖZGEÇMİŞ	

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1. Rüzgâr tüneli deneylerinde Reynolds sayılarına karşılık gelen hız ve basınç farkları.....	25
Tablo 3.2. Farklı Reynolds sayılarındaki sürükleme katsayılarının karşılaştırılması	28
Tablo 3.3. Venturi tüpü hesaplamalarına göre Reynolds sayılarının karşılık geldiği hız ve basınç farkları.....	31
Tablo 3.4. Pitot statik tüp hesaplamalarına göre Reynolds sayılarının karşılık geldiği hız ve basınç farkı	31
Tablo 3.5. NACA0024 kanat profiline ait hücum açısı değişimi ile elde edilen sürükleme katsayıları	32
Tablo 4.1. Levha yüksekliği a/h tablosu	35
Tablo 4.2. Levha deneylerinde kullanılacak hız, basınç farkı tablosu	38
Tablo 4.3. Rüzgâr tüneli deneylerinde 10-30 m/s hızlara karşılık gelen Reynolds sayıları.....	39

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Dünya savaşında kuyruk kısmına fren plakası yerleştirilen P 188.01. Alman savaş uçağı	1
Şekil 1.2. 1939 NACA TN Uçağında gövde kısmında bulunan frenleme plakaları	2
Şekil 1.3. Plaka sayısı değişimine bağlı olarak Cd değişim grafiği	6
Şekil 2.1. Kapalı sistem subsonik rüzgâr tünelin.....	8
Şekil 2.2. Rüzgâr tüneli deneylerinin yapılacağı deney odası alanı	9
Şekil 2.3. Hız hesaplamaları için kullanılan Pitot-statik tüp	9
Şekil 2-4. Rüzgâr tüneli deneylerinde kullanılan kontrol ünitesi	10
Şekil 2.5. Rüzgâr tüneli deneylerinde kullanılan S tipi yük hücreleri	11
Şekil 2.6. ID551 gösterge paneli görselleri	11
Şekil 2.7. Rüzgâr tüneli test odası şeffaf üst platform.....	12
Şekil 2.8. Rüzgâr tüneli test odası şeffaf alt platform	13
Şekil 2.9. Rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan birinci deney düzeneği.....	13
Şekil 2.10. Rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan birinci deney düzeneği.....	14
Şekil 2.11. Rüzgâr tüneli deney seti tasarımı için kullanılan rulman ve burç	14
Şekil 2.12. Rüzgâr tüneli test odası alt platform tasarım aşaması	15
Şekil 2.13. Rüzgâr tüneli test odası alt platform tasarım aşaması	15
Şekil 2.14. Sürüklenme kuvveti ölçümü için kullanılan 1500 N kapasiteli yük hücresi..	15
Şekil 2.15. Rüzgâr tüneli test odasına alt platformun konumlandırılması aşaması.....	16
Şekil 2.16. Rüzgâr tüneli test odasına ikinci deney setinin konumlandırılması ve veri alma aşaması	16
Şekil 2.17. Levhasız deney düzeneği.....	17
Şekil 2.18. Tek levha deneyi $a/h=0$	17
Şekil 2.19. Venturi tüpü.....	18
Şekil 3.1. Dairesel silindirler için Reynolds sayısı ile sürüklenme katsayılarının değişimi (NACA - TN- 3038)	23

Şekil 3.2. Dairesel bir silindirin toplam sürüklenmesine yüzey sürtünme sürüklenmesinin katkısı	24
Şekil 3.3. 3D yazıcıda üretilen 10x50 cm ebatlarındaki silindir	24
Şekil 3.4. Balans cihazı ile silindirin rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılması aşaması.....	26
Şekil 3.5. Balans mekanizması ile rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan silindir ile ölçüm yapılması.....	26
Şekil 3.6. Üçüncü deney düzeneği ile silindirin rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılması	27
Şekil 3.7. Üçüncü deney düzeneği ile rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan silindir ile ölçüm yapılması.....	27
Şekil 3.8. Farklı Reynolds sayılarındaki sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması.....	28
Şekil 3.9. 3d yazıcı ile üretilen NACA0024 kanat profili	29
Şekil 3.10. NACA0024 kanat profilinin balans mekanizmasına yerleştirilmesi.....	30
Şekil 3.11. NACA0024 kanat profilinin balans mekanizması ile test odasına yerleştirilmesi.....	30
Şekil 3.12. Hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (α , C_d).....	32
Şekil 3.13. Hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (α , C_d)	33
Şekil 4.1. 2 cm yükseklikteki metal deney levhaları	34
Şekil 4.2. 3 cm yükseklikteki metal deney levhaları	34
Şekil 4.3. 5 cm yükseklikteki metal deney levhaları	34
Şekil 4.4. Levha plakaların dikey olarak yerleştirildiği platform.....	35
Şekil 4.5. Çift levha 2 cm yükseklikteki levha plakalarda 2 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=1$)	41
Şekil 4.6. Çift levha 2 cm yükseklikteki levha plakalarda 36 cm mesafede 30 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=18$)	41
Şekil 4.7. Çift levha 3 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 3 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=1$).....	41
Şekil 4.8. Çift levha 3 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 54 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=18$).....	42
Şekil 4.9. Çift levha 5 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 5 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=1$).....	42

Şekil 4.10. Çift levha 5 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 90 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=18$).....	42
Şekil 4.11. 2 cm yükseklikteki levhalarda sürüklenme kuvveti mesafe değişimi ($D, a/h$)	43
Şekil 4.12. 3 cm yükseklikteki levhalarda Sürüklenme kuvveti mesafe değişimi ($D, a/h$)	44
Şekil 4.13. 5 cm yükseklikteki levhalarda sürüklenme kuvveti a/h oran değişimi ($D, a/h$)	44
Şekil 4.14. 2 cm yükseklikteki levhalarda 10 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	45
Şekil 4.15. 2 cm yükseklikteki levhalarda 15 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	45
Şekil 4.16. 2 cm yükseklikteki levhalarda 20 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	46
Şekil 4.17. 2 cm yükseklikteki levhalarda 25 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	46
Şekil 4.18. 2 cm yükseklikteki levhalarda 10 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	47
Şekil 4.19. 3 cm yükseklikteki levhalarda 15 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	47
Şekil 4.20. 3 cm yükseklikteki levhalarda 20 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd).....	48
Şekil 4.21. 3 cm yükseklikteki levhalarda 25 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	48
Şekil 4.22. 3 cm yükseklikteki levhalarda 30 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	49
Şekil 4.23. 5 cm yükseklikteki levhalarda 10 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	49
Şekil 4.24. 5 cm yükseklikteki levhalarda 15 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	50
Şekil 4.25. 5 cm yükseklikteki levhalarda 20 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	50
Şekil 4.26. 5 cm yükseklikteki levhalarda 25 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	51

Şekil 4.27. 5 cm yükseklikteki levhalarda 30 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	51
Şekil 5.1. 2-3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda levha plakalar arası a/h değişimine bağlı olarak 15-20-25 ve 30 m/s hızlarda sürüklenme katsayısı değişimi ((ah, Cd). 52	
Şekil 5.2. 2 cm yükseklikteki levhalarda 15-30 m/s hızlarda levha plakalar arası a/h oranı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	53
Şekil 5.3. 3 cm yükseklikteki levhalarda 15-30 m/s hızlarda levha plakalar arası a/h oranı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	54
Şekil 5.4. 5 cm yükseklikteki levhalarda 15-30 m/s hızlarda levha plakalar arası a/h oranı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (ah, Cd)	55
Şekil 5.5. Aynı veya yakın Reynolds sayılarına sahip levhalarda a/h değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimi (a/h, Cd).....	56
Şekil 5.6. Aynı veya yakın Reynolds sayılarına sahip levhalarda a/h değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimi (a/h, Cd).....	56
Şekil 5.7. Aynı veya yakın Reynolds sayılarına sahip levhalarda a/h değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimi (a/h, Cd).....	57

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

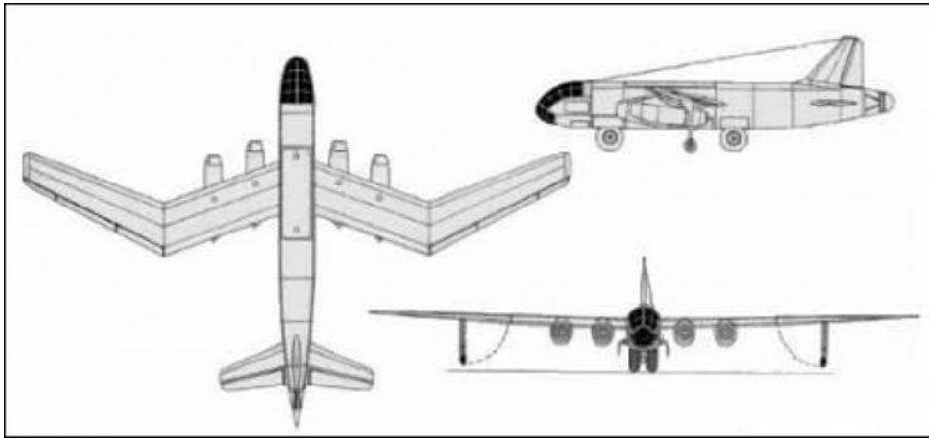
α	: Alpha hücum açısı
ρ	: Akışkan yoğunluğu
v	: akış hızı
C_D	: Toplam sürüklenme katsayısı
$C_{D, skin}$	: Yüzey sürüklenme katsayısı
A	: Yüzey sürüklenme katsayısı
$C_{D,form}$	: Form sürüklenme katsayısı
P_D	: Dinamik basınç
a	: Levha plakalar arası mesafe
h	: Levha plaka yüksekliği
a/h	: Levha plakalar arası mesafenin levha yüksekliğine oranı
A_1	: Venturi tüpü giriş alanı
A_2	: Venturi tüpü çıkış alanı
P_D	: Dinamik basınç
P_S	: Statik basınç
P_T	: Toplam basınç
M	: Mach sayısı
V_1	: Venturi tüpü giriş hızı
V_2	: Venturi tüpü çıkış hızı
$L=c$	: Veter uzunluğu
μ	: <i>vizkozite</i>
ΔP	: <i>Basınç farkıfarkı</i>
T	: Ortam sıcaklığı
R	: Gaz sabiti

1. GİRİŞ

Günümüzde mühendislik çalışmaları, sistemlerin daha verimli, güvenli ve çevre dostu hâle getirilmesini amaçlamaktadır. Bu bağlamda, aerodinamik yapıların incelenmesi ve optimize edilmesi, özellikle yüksek hızlı ulaşım araçlarında büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, aerodinamik frenleme performans optimizasyonunu araştırmak amacı ile ilk defa art arda yerleştirilen iki levha plakasının mesafe değişimi ile yaptığı aerodinamik frenleme kuvveti rüzgâr tüneli deneyleri ile incelenmiştir. Deneyler üç farklı kalınlık ve yükseklikte toplam altı test numunesi ile 15-20-25-30 m/s hızlarda yapılmıştır. Ölçümlerde sistem sürüklenme kuvveti, tek levha sürüklenme kuvveti ve çift levha sürüklenme kuvveti ölçüm deneyleri yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçların, aerodinamik frenleme optimizasyon sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkı sağlaması hedeflenmiştir.

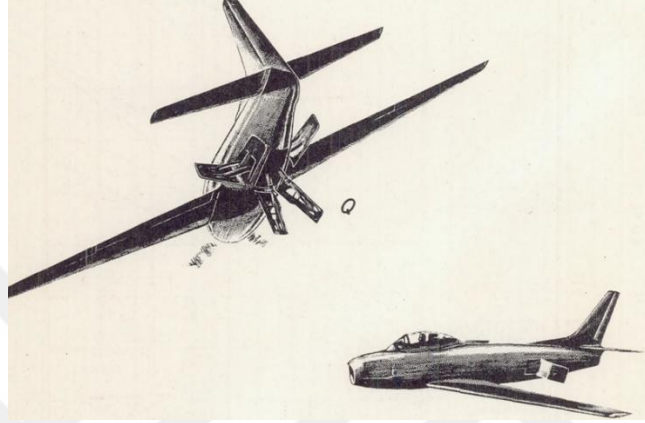
1.1. Levha Plakaların Aerodinamik Frenlemedeki Tarihsel Gelişimi

Sabit veya hareketli levha plakalar ilk olarak II. Dünya Savaşı döneminde (1930 – 1950) yüksek hızda sürüklenme kuvveti kontrolünü sağlamak amacı ile savaş uçaklarında kullanılmıştır. "Air brake", "spoiler", "dive brake" gibi terimlerle anılan bu sistemler, kanat üzerine, gövdeye ve kuyruk kısmına monte edilerek hava direncini artırmak için açılan basit levha plakalardan oluşmaktadır. [1]



Şekil 1.1. Dünya savaşında kuyruk kısmına fren plakası yerleştirilen P 188.01. Alman savaş uçağı [1]

Aerodinamik fren sistemleri, uçuş sırasında istenmeyen hız artışlarını önlemek, hızlı yavaşlama sağlamak ve sabit hızda daha dik açılı alçalmaları mümkün kılmak amacıyla geliştirilmiştir. 1939 yılında NACA tarafından yayımlanan teknik dokümanlarda, aerodinamik frenlerin uçuş manevralarındaki etkisi matematiksel olarak analiz edilmiştir. [2]



Şekil 1.2. 1939 NACA TN Uçağında gövde kısmında bulunan frenleme plakaları [2]

II. Dünya Savaşı döneminde yapılan savaş uçağı modelleri daha sonra yüksek hızlı otomotiv ve tren teknolojilerine ilham kaynağı olmuştur. Özellikle savaş uçağı tasarımındaki hava freni (air brake) mantığı günümüz aerodinamik frenleme plakaları ile benzerlik taşımaktadır [1].

1.2. Literatür Çalışması

Performans, araç veya sistemin belirli bir işlevi etkin ve verimli gerçekleştirmesi ile ilgili teknik bir terimdir. Çalışılan bilim alanlarına bağlı olarak farklılık gösteren performans parametreleri araç, model veya sisteminin: etkinliğini, kalitesini ve verimliliğini değerlendirmek ve ölçmek için kullanılır.

Ulaşım araçlarının tamamında en önemli performans parametrelerden biri olan aerodinamik performans ile ilgili aerodinamik sürüklemenin azaltılarak menzil mesafesi arttırımı ve yakıt sarfiyatının düşürülmesine yönelik deneysel ve nümerik çalışmalar olmakla birlikte diğer taraftan özellikle yüksek hızlarda aerodinamik sürüklenme kuvveti arttırılarak geleneksel frenleme sistemine yardımcı olan aerodinamik frenleme kuvveti elde edilerek araç veya sistemin aerodinamik performansını arttırmaya yönelik otomobil,

uçak ve tren gibi ulaşım araçları üzerinde önemli deneysel ve nümerik çalışmalar yapılmaktadır.

Araçların güvenli çalışması açısından hayati öneme sahip olan fren performansı, araç hızlarının artmasıyla birlikte, daha yüksek standartlara ihtiyaç duymaktadır [3]

Aerodinamik frenleme sistemleri, herhangi bir yüzey teması olmaksızın yaptıkları frenleme ile evre dostu yapılarıyla yüksek hızlı araç uygulamalarında dikkat çeken alternatifler arasında yer almaktadır. Aerodinamik frenleme hızın karesi le orantılı olarak attığı için özellikle yüksek hızlı ulaşım araçlarında sağladığı yüksek frenleme kuvveti ile büyük avantaj sağlamaktadır. Yapısı sade ve basit, bakım maliyetlerinin nispeten düşük olması diğer avantajlarıdır [3, 4].

Modern taşıtlar, düşük sürükleme ve taşıma katsayılarıyla optimize edilmiş aerodinamik tasarımlara sahip olsa da bu özellikler yüksek hızlı ve GT sınıfı araçlar için yetersiz kalmaktadır. Özellikle yüksek hızda viraj alma ve ani frenleme gibi durumlar, daha yüksek sürükleme kuvveti ve aktif aerodinamik kontrol sistemlerini gerekli kılmaktadır. Bu tür taşıtlarda, değişken yol koşullarının oluşturduğu dış kuvvetlere karşı dinamik yanıt verebilen gövde elemanlarına ihtiyaç duyulmaktadır[5-9]

Günümüzde birçok taşıt, yol tutuşunu sağlamak için elektronik destek sistemleriyle donatılmaktadır. Ancak bu sistemler, fren kuvvetlerini yalnızca tekerleklerle iletmekle sınırlı kalmakta, yol tutuşunun düşük olduğu durumlarda etkinlikleri azalabilmektedir. Oysa aerodinamik kuvvetler, kütle artırmayan yapıları ve hızla birlikte etkilerini artırmaları nedeniyle, taşıt stabilitesine katkı sağlayan alternatif ve tamamlayıcı sistemler olarak ön plana çıkmaktadır [6].

Piechna vd., (2009) bir spor otomobil modelinde ters negatif taşıma arttırmak ve sürüklemeyi azaltmak amacıyla n ve arka kanatların farklı yerleşim ve biçimleri incelenmiş, kanatların gövde üzerindeki aerodinamik etkileri CFD analizleriyle değerlendirilmiştir [10].

Janson ve Piechna (2015) ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak yüksek hızlı bir spor otomobil üzerine entegre edilen hareketli aerodinamik yüzeylerin oluşturduğu aerodinamik negatif taşıma kuvveti ve aerodinamik sürükleme kuvveti gibi aerodinamik performans parametrelerini, hareketli flapların açısı, boyutu, konumu ve geometrik şeklini değiştirilerek incelenmiştir [11].

Kurec vd., (2019) aktif bir araç kanadının altına yerleştirilmiş hareketli bir spoiler'a sahip araç ile kapalı sistem rüzgâr tünelinde yaptıkları deneysel analiz sonuçlarını sayısal

analiz sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Küçük bir eleman olan spoiler'ın hareketinin, araç gövdesi tarafından üretilen aşağı yönlü kuvvet (negatif taşıma) üzerinde önemli bir değişime neden olduğu gösterilmiştir [12].

Piechna (2021) hazırladığı detaylı literatür çalışmasında, araştırmacıların büyük çoğunluğunun hareketli aerodinamik elemanların kontrol sistemleriyle entegrasyonunu incelerken, kanat-gövde etkileşimini ihmal ettiğini ve bu durumun sistemin temel kontrol algoritmasının tanımlanması için yeterli fakat aerodinamik performans değerlendirmeleri açısından yetersiz olduğunu, gerçekçi sayısal modelleme yapılabilmesi için taşıt gövdesi ile aerodinamik elemanlar arasındaki karşılıklı etkileşimlerin mutlaka dikkate alınması gerektiğini ifade etmiştir [13].

Literatürde birçok araştırmacının sunduğu sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda, taşıt gövdesine entegre edilen aktif aerodinamik elemanların, özellikle düşey yöndeki gövde titreşimlerini azaltma ve araç güvenliğini artırma konusunda olumlu etkiler sağlayabileceği anlaşılmaktadır. Aktif aerodinamik elemanlar, sürüş karakteristiklerinden ödün vermeksizin, araç konforunu iyileştirme potansiyeline sahiptir [9, 10, 13-15].

Literatürde, değişken aerodinamik kuvvet üretimi konusunda, klasik profillere kıyasla daha hızlı tepki veren ve daha verimli çalışan çeşitli yenilikçi aerodinamik çözümler tanımlanmıştır. Ancak bu çözümlerin uygulama düzeyinde başarısı, yalnızca aerodinamik performanslarıyla değil, aynı zamanda kontrol sistemleriyle olan entegrasyonlarının doğruluğu ve fiziki uyumluluğuyla da doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, aerodinamik uzmanları ile kontrol algoritması geliştiricileri arasında disiplinler arası iş birliği sağlanması, hem modelleme doğruluğu hem de sistem performansı açısından kritik öneme sahiptir [13].

Aerodinamik sistemlerin en büyük avantajı, bu kuvvetlerin yol yüzeyinin durumundan bağımsız olarak etkili olmasıdır. Özellikle lastik-yol arasındaki sürtünmenin az olduğu durumlarda bile bu kuvvetler etkisini koruyabilmektedir. Ayrıca, bu kuvvetlerin üretimi için taşıt kütlelerinde bir artış gerekmez, dolayısıyla atalet kuvvetlerinde de bir artış oluşmaz. Aerodinamik kuvvetlerin şiddeti, hızın karesiyle doğru orantılı olarak arttığından, aracın kontrol kaybı riskinin yüksek olduğu hızlarda bu kuvvetler daha etkili hale gelir [6].

Dinamik yol koşullarında, aktif olarak kontrol edilen aerodinamik elemanların sadece ihtiyaç anlarında devreye alınması, taşıt sistemleri için çok boyutlu performans

artışları sunmaktadır. Özellikle virajlı yollarda, taşıtın gövdesine etkiyen ters lift kuvvetinin sadece kısa süreli olarak artırılması, tekerleklerin veya rayların yanal kuvvet üretimini artırmakta ve virajların daha yüksek hızla, ancak aynı güvenlik seviyesiyle geçilmesini mümkün kılmaktadır[9].

Konvansiyonel sürüş stratejilerinde, viraj öncesinde yapılan frenleme ve sonrasında gerçekleşen hızlanma, ekstra enerji harcamasına yol açarken, aktif aerodinamik müdahaleler sayesinde bu geçişler daha enerji verimli şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu sayede, maksimum hızı artırmadan ortalama hız yükseltilmekte; bu da özellikle şehirler arası ulaşım sürelerinde iyileşme sağlarken enerji tüketimini azaltmaktadır. Bu yaklaşım, batarya menzili sınırlı olan elektrikli taşıtlar için ayrı bir öneme sahiptir. [9, 11, 16].

Japonya'da 1955 yılında Hokkaido Shinkansen hattının açılışından önce çeşitli aerodinamik fren plakaları geliştirilmiş ve tam ölçekli araç testleri gerçekleştirilmiştir [17, 18].

1991, 2005 ve 2006 yıllarında ise Japonya'da, aerodinamik frenleme sistemleriyle donatılmış MLU 002N Maglev test treni ve Shinkansen Fastech 360 yüksek hızlı trenlerde rüzgâr direncine dayalı frenleme üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır. [19, 20]

Wu vd. (2011), yüksek hızlı trenlerin karşılaşması sırasında oluşan basınç dalgalarını kayan ağ (sliding mesh) yöntemiyle simüle etmiş ve aerodinamik fren plakalarının bu basınç darbeleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur [21].

Puharić vd. (2014), tren tavanına yerleştirilen farklı sayıda aerodinamik fren plakalarının performansını simüle etmiş ve fren plakalarının trenin ön kısmına yerleştirildiğinde maksimum sürüklenme oluşturduğunu; sonraki plakaların etkisinin azaldığını göstermiştir.[22]

Jianyong vd., (2014) uçak kanatlarının aerodinamik prensiplerine dayalı, hidrolik tahrik mekanizmasıyla çalışan tek yönlü açılan bir fren prototip geliştirmişlerdir. Yapılan prototip sayısal simülasyonlar ile karşılaştırılmış. Trenin hızının 250–500 km/s arasında olduğu durumlarda frenleme etkisinin %8 ila %60 oranında iyileştirilebildiğini ve 500 km/s hızda 0.12 m/s² ek yavaşlama sağlandığını bildirmiştir [23].

Durmuş ve Çiçek (2019) yaptıkları CFD analizlerinde yüksek hızlı trenlerin (HST) eğrisel raylar üzerinde viraj kontrolünü iyileştirmek, hareket kabiliyetini artırmak ve

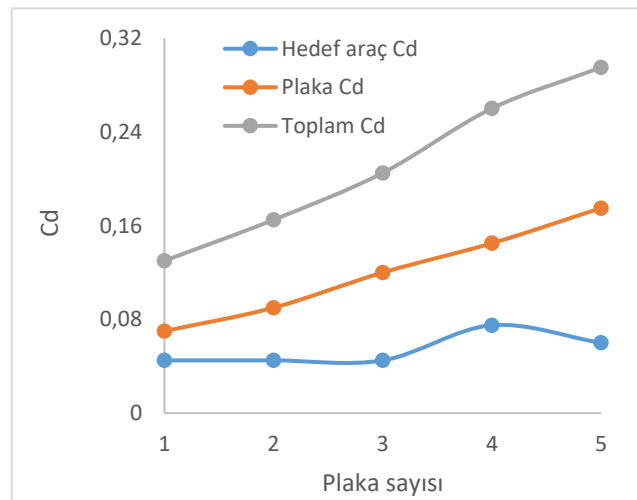
daha güvenli, hızlı bir seyir sağlamak amacıyla yeni bir kanat takımı tasarımı önerilmişlerdir [9].

Niu vd., (2020a) tren etrafındaki akış alanı üzerindeki fren plakası etkilerini değerlendirmek amacıyla farklı boyutta iki fren plakası kullanarak, trenin üst yüzeyinde dört farklı konum pozisyonunda nümerik analizler gerçekleştirdiler [24].

Niu vd., (2020b) Aerodinamik sürüklemeye kuvvetini artırmak için uygun fren plaka konfigürasyonunu belirlemek ve plakaların araç üstündeki, pantograf ve klima ünitesinin bulunduğu bölgede akış alanına etkisini analiz etmek için vagonlar arası boşluk bölgesine 1/8 ölçekli bir araç modeline üç farklı aerodinamik fren plakası konfigürasyonu monte ederek zamana bağlı akışı incelenmiştir. [25].

Yifan Li vd., (2023) ise sayısal simülasyon ile 300 km/s hızla seyreden dört vagonlu bir tren için ara-vagon boşluğu (ICG) içerisine gövde dayanımını zayıflatmadan yerleştirilen yeni nesil aerodinamik frenleme plakalarının, yerleştirme konumu ve açılma yüksekliğinin aerodinamik özellikler üzerindeki etkileri ve uygulanabilirliğini araştırmışlardır. [8].

Peng Li vd., (2023) iki yarım vagonlardan oluşan 1/8 ölçekli simetrik bir tren modeli esas alınarak, frenleme plakası eklenmiş trenin aerodinamik performansı sayısal olarak analiz edilmiştir. Çalışmada, frenleme plakasının şekli, yüzey alanı, açılma açısı, konumu ve sayısı gibi tekil parametrelerinin aerodinamik sürüklemeye üzerindeki etkisi detaylı şekilde incelenmiştir [26].



Şekil 1.3. Plaka sayısı değişimine bağlı olarak Cd değişim grafiği [26].

Wang vd., (2023) RANS tabanlı 3B sayısal akış simülasyonları ve SST $k-\omega$ türbülans modeli kullanarak maglev trenler için birden fazla frenleme plakasının optimal açılma açıları belirlenmiştir [27].

Zhu vd. (2024), 600 km/s hızla giden maglev treninde aerodinamik fren levhalarının, 20 m/s yan rüzgâr etkisi altında zamana bağlı aerodinamik tepkilerini incelenmiştir [28].

Yukarıdaki veriler, frenleme plakalarının yalnızca boyutlarının değil, yerleşim konumlarının ve sayılarının da toplam sürüklenme kuvveti üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Bu da tasarım sürecinde yalnızca yüzey alanına değil, akış yönü içindeki etkileşimlerine de odaklanılması gerektiğini ortaya koymaktadır. Gelecekteki çalışmalar açısından frenleme plakası konfigürasyonlarının aerodinamik sürüklemeyi artırmadaki etkisi daha da araştırılmaya değerdir.

2. MATERYAL VE METOD

Çalışmanın bu aşamasında levha plakaların mesafe değişimine bağlı olarak oluşturduğu aerodinamik frenleme kuvveti kapalı sistem subsonik rüzgâr tüneline 15-20-25-30 m/s hızlarda deneysel analizinde kullanılacak ekipmanlar, ölçüm aletleri, deney odası, test düzeneği ve ayrıca rüzgâr tüneli test odasında yapılacak deneylerde ihtiyaç duyulan denklem ve tanımlamalar yer almaktadır.

2.1. Rüzgâr Tüneli ve Ölçüm Ekipmanları

Deneyler Eskişehir Teknik Üniversitesi Aerodinamik Laboratuvarında 50 m/s hızlara kadar ulaşabilen kapalı sistem subsonik rüzgâr tüneline yapılmıştır. Deneyler için yeni test odası ve yeni test seti tasarımları yapılmıştır.



Şekil 2.1. Kapalı sistem subsonik rüzgâr tünelin

2.1.1. Deney odası ve tasarımı

Rüzgâr tüneli testlerinin yapıldığı test odası 50x50x100 cm en-boy-uzunluk ölçülerine sahip alandır. Bu alana tasarımı yapılacak olan test seti ölçüm platformu yerleştirilerek ölçümler yapılmıştır.



Şekil 2.2. *Rüzgâr tüneli deneylerinin yapılacağı deney odası alanı*

2.1.2. Pitot statik tüp

Rüzgâr tüneli hız hesaplamaları için pitot statik tüp kullanılmaktadır. Pitot statik tüpte iki port bulunmaktadır. Akışa dik olan port toplam basıncı akışa paralel olan port ise statik basınç değerini verir. Pitot statik tüp değerleri ya manometre veya transdüserde toplam basınç statik basınç farkı olarak okunur. Okunan bu değer dinamik basınca eşittir. Bulunan bu dinamik basınç değeri, bernoulli ve süreklilik denklemi kullanılarak test odası hız hesaplamaları yapılır.



Şekil 2.3. *Hız hesaplamaları için kullanılan Pitot-statik tüp*

2.1.3. Rüzgâr tüneli kontrol ünitesi

Rüzgâr tüneli kontrol ünitesi arka kısmında bulunan port girişleri ile pitot statik veya venturi tüplerinden gelen basınç değerleri ile hız hesaplama ve ön yüzünde bulunan tuşlar ve ayar düğmesi ile güç (RPM) ayarı olmak üzere iki göreve sahiptir. Rüzgâr tüneli kontrol ünitesi üzerinde iki değer okunur biri RPM diğeri ise basınç farkıdır.



Şekil 2-4. Rüzgâr tüneli deneylerinde kullanılan kontrol ünitesi

2.2. Deney Seti Tasarımı

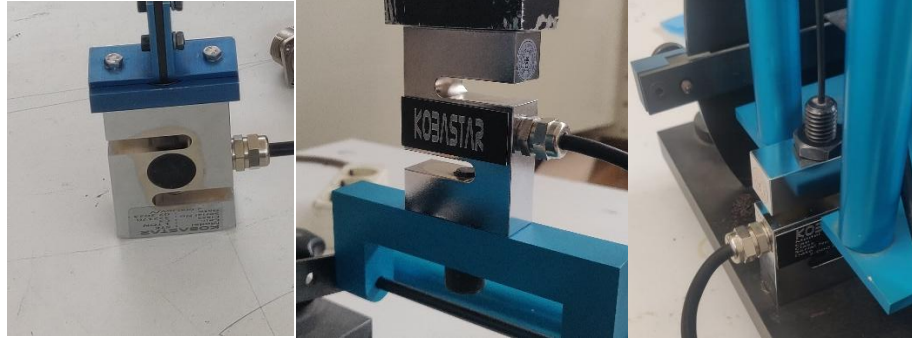
Öncelikle yapılacak deney setinin rüzgâr tüneli test odası ebatlarına uygun olması gerekmektedir. Bu yüzden rüzgâr tüneli ebatlarına uygun 50x50x100 cm ebatlarına uygun olacak şekilde deney odası tasarımı yapılmıştır. Alt ve üst iki platformdan oluşan test odasının üst kısmı rüzgâr tüneli test odası giriş ve çıkışlarına monte edilir. Platformun alt kısmı ise ölçüm alanı olduğu için herhangi bir noktaya temas etmeksizin konumlandırılır. Bu çalışmada üç farklı deney seti tasarımı yapılmıştır. İlk iki tasarım birden fazla levha plakanın aerodinamik sürüklenme kuvvetini ölçmede yetersiz kaldığı için üçüncü bir tasarıma ihtiyaç duyulmuştur.

2.2.1. Deney seti tasarımı için gerekli ekipmanlar

2.2.1.1. Yük hücreleri

Yük hücreleri yatay veya dikey kuvvetlerin ölçümü için kullanılır. Kullanım alanına göre platform tipi, baskı tipi, çift lama tipi, pin tipi, S tipi gibi farklı çeşitlerde yük hücresi

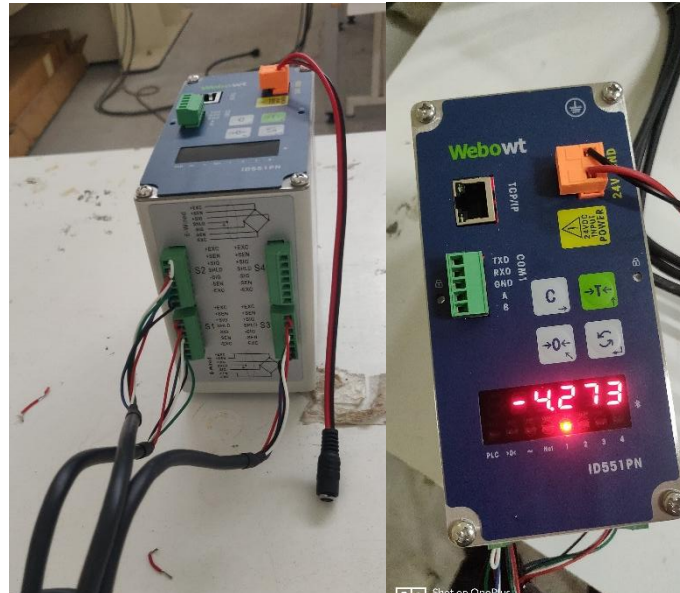
mevcuttur. Burada kullanılan yük hücrelerinin her biri 150 kg kuvvete sahip S tipi yük hücreleridir.



Şekil 2.5. Rüzgâr tüneli deneylerinde kullanılan S tipi yük hücreleri

2.2.1.2. Yük hücresi gösterge paneli

Bu çalışmada ID551 gösterge paneli kullanılmıştır. Bu gösterge paneli yük hücrelerinden gelen veriyi okur. Üzerinde bulunan girişler ile aynı anda dört tane yük hücresi verisini okuyabilir. Ayrıca usb bağlantısı ve modbus poll program arayüzü ile verilerin aynı anda bilgisayara aktarılmasına olanak sağlar.



Şekil 2.6. ID551 gösterge paneli görselleri

2.2.1.3. Monitör ve program

Bilgisayara yüklenen modbus poll programı ile gösterge panelinde okunan veriler anlık olarak okunmakta ve kaydedilmektedir. Modbus poll programı ayarları ile anlık olarak veriler gerçek zamanlı olarak okunmaktadır. Modbus poll programı ile s en fazla 1 veri alınmaktadır.

2.2.2. Ölçümlerde kullanılan deney düzenekleri

Mevcut koşullarda aerodinamik laboratuvarından bulunan balans cihazının revizyonu yapılarak kanat profilleri ve küçük model uçakların lift drag ve yunuslama moment hesaplamaları yapılacak şekilde onarılmıştır. Fakat bu balans mekanizmasının yapılan deneyler sonucunda birden fazla metal levha sürükleme kuvveti ölçümlerinde oldukça yüksek hata değerleri verdiği görülmüştür. Bu yüzden yeni model ve tasarımlar üzerine yoğunlaşılarak daha doğru sonuçlar veren yeni bir model geliştirilmiştir. Öncelikle deney odası üst platformu 10 mm kalınlıkta pleksi glass şeffaf malzeme kullanarak inşa edilmiştir. Burada pitot statik tüpün hız ölçümü yapabilmesi için gerekli kısımlar delinmiştir. Daha sonra test odası ebatlarına uygun alt platform tasarlanmıştır.



Şekil 2.7. Rüzgâr tüneli test odası şeffaf üst platform



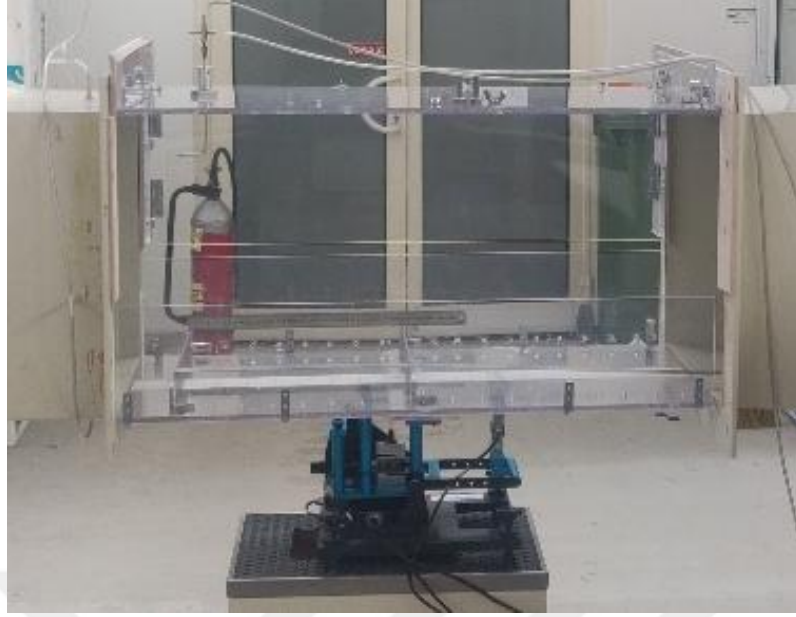
Şekil 2.8. Rüzgâr tüneli test odası şeffaf alt platform

2.2.2.1. Birinci deney düzeneği

Kanat profili, silindir profiller, model uçakların taşıma, sürüklenme ve yunuslama momenti ölçümlerinin yapıldığı arızalı olan balans mekanizması yük hücreleri ve gösterge paneli değişimi ile aktif hale getirilmiştir. Fakat bu hali ile levha plakaların sürüleme kuvvetini ölçmede yetersiz olduğu için bazı değişiklikler yapılarak alt platform kısmı balans mekanizmasına uyumlu olacak şekilde yerleştirilmiştir. Bu şekilde ölçümler alınmış fakat balans mekanizması moment prensibi ile çalıştığı için hatalı sonuçlar okunmuştur. Bu nedenden dolayı bu deney seti iptal edilmiştir.



Şekil 2.9. Rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan birinci deney düzeneği



Şekil 2.10. Rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan birinci deney düzeneği

2.2.2.2. İkinci deney düzeneği

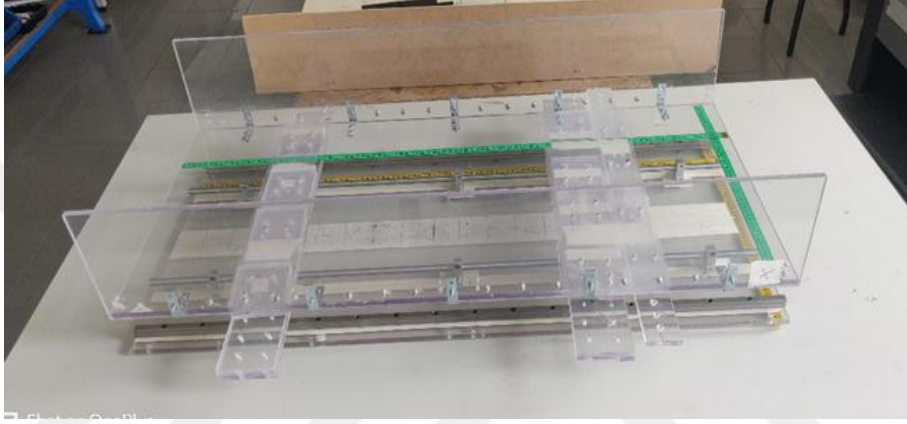
İkinci deney seti tasarımı birinci deney seti tasarımına ek olarak 12 mm çapında 4 adet bilyeli lineer rulman 4 adet slayt burç aparatı 2 adet 100 cm uzunluğunda lineer optik mil kullanılmıştır. Kullanılan bu rulman seti ile alt platformun yatayda sürtünmesiz olarak hareket etmesi sağlanmıştır. Fakat bu sistemde de moment etkisinden dolayı istenilen sonuçlar elde edilememiştir.



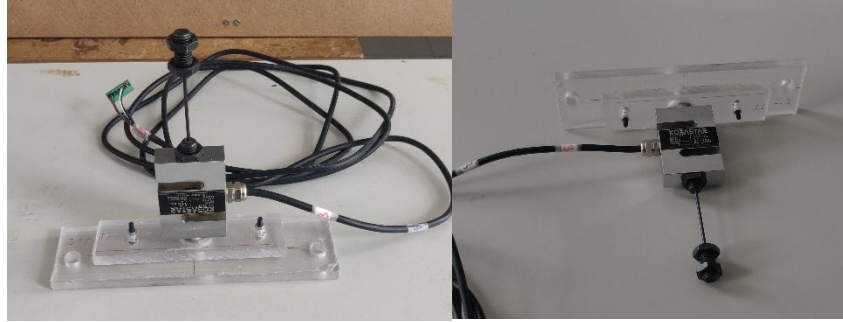
Şekil 2.11. Rüzgâr tüneli deney seti tasarımı için kullanılan rulman ve burç



Şekil 2.12. Rüzgâr tüneli test odası alt platform tasarım aşaması



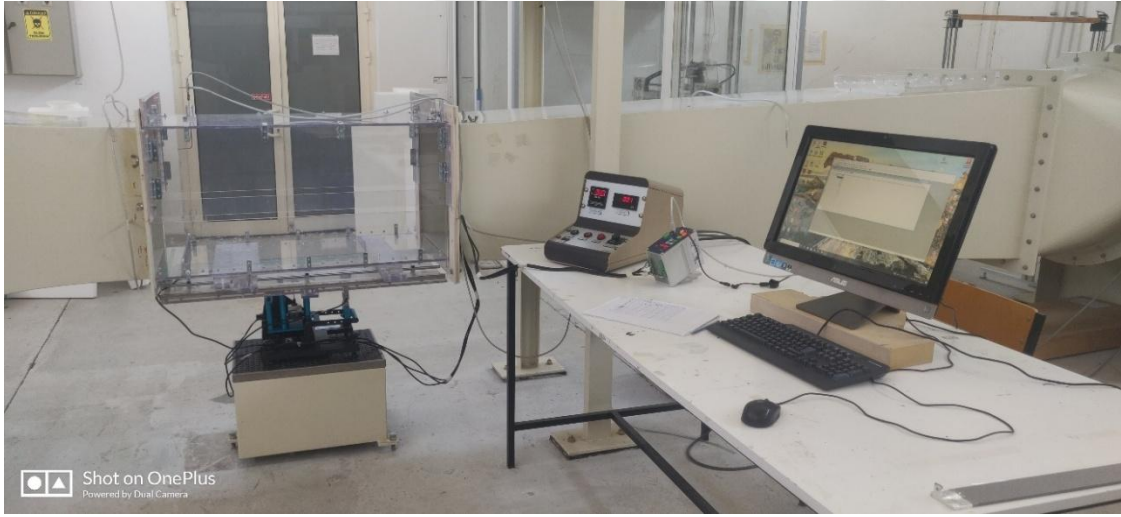
Şekil 2.13. Rüzgâr tüneli test odası alt platform tasarım aşaması



Şekil 2.14. Sürüklenme kuvveti ölçümü için kullanılan 1500 N kapasiteli yük hücresi



Şekil 2.15. Rüzgâr tüneli test odasına alt platformun konumlandırılması aşaması



Şekil 2.16. Rüzgâr tüneli test odasına ikinci deney setinin konumlandırılması ve veri alma aşaması

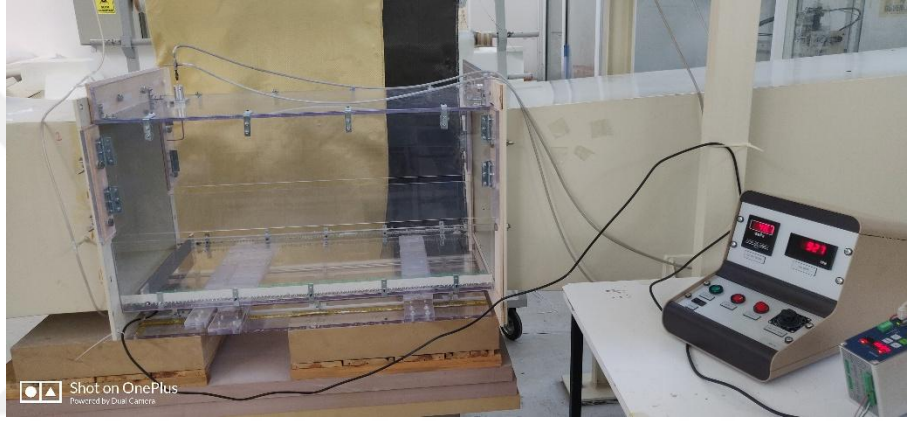
İkinci rüzgâr tüneli deney setinde birinci deney setine göre daha makul değerler alınmıştır. Fakat balans mekanizmasının oluşturduğu momentten dolayı veriler istenilen hassasiyette olmadığı için bu deney seti de iptal edilmiştir.

2.2.2.3. Üçüncü deney düzeneği

Bu deney seti mekanizması için 1 adet yük hücresi 1 adet Id551 gösterge paneli kullanılarak yatay ekseninde oluşan sürüklenme kuvveti ölçümleri başarılı bir şekilde yapılmıştır. Bu deney düzeneği önceki deney düzeneklerinde karşılaştığımız moment etkilerinden bağımsız olarak yatay ekseninde yük değişimlerini başarılı bir şekilde ölçmüştür.



Şekil 2.17. Levhasız deney düzeneği



Şekil 2.18. Tek levha deneyi $a/h=0$

2.3. Hesaplamalarda Kullanılacak Bağntı ve Denklemler

Rüzgâr tüneline deney yapmadan önce bazı denklem hesaplamaları ve tanımların ifade edilmesi gerekmektedir. Rüzgâr tüneline kullanılan en önemli denklemler bernoulli, süreklilik ve hal denklemdir. Bu denklemler kullanılarak rüzgâr tüneli test odasının herhangi bir kesitindeki hız hesaplaması rahatlıkla yapılabilir.

2.3.1. Hal denklemi

Denklem 2.1 ile ifade edilen hal denklemi kullanılarak rüzgâr tüneli deneylerinde yoğunluk hesaplamaları yapılmaktadır. Denklemde ρ_{∞} ortam yoğunluğu, P ortam basıncı, R gaz sabiti ($287 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}} \cdot \text{K}$), T ortamın mutlak sıcaklığını ifade etmektedir.

$$P_{\infty} = \rho_{\infty} R T_{\infty} \quad (2.1)$$

2.3.2. Bernoulli denklemi

Bernoulli denklemi akışkanlar mekaniğinin en temel denklemlerinden biridir ve akışkanın enerjisinin korunumu ilkesine dayanır. Bernoulli denklemi, sürtünmesiz, sıkıştırılamaz ve sürekli akışlarda, P_S statik basıncı P_D ise dinamik basınç olmak üzere denklem 2.2 de ifade edildiği gibi herhangi bir noktadaki statik basınç ve dinamik basınç toplamının toplam basınca eşit olduğunu ifade eder.

$$P_S + P_D = P_T \quad (2.2)$$

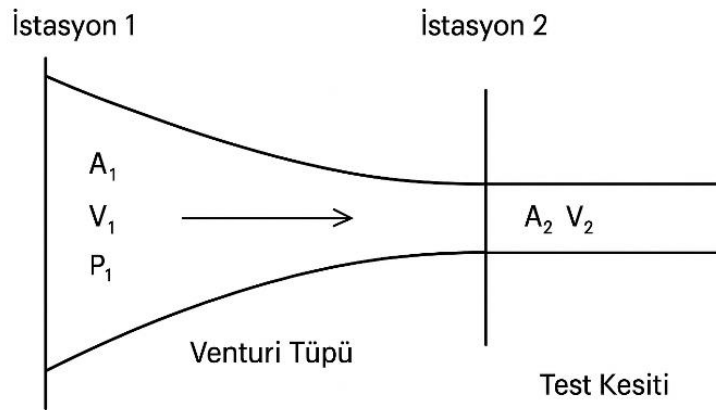
$$P_S + \frac{1}{2} \rho V^2 = P_T \quad (2.3)$$

Ayrıca V_1 akışkan içerisindeki birinci noktanın hızı V_2 ise akışkan içerisindeki ikinci noktanın hızı olmak üzere denklem 2.4 elde edilir.

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = P_T \quad (2.4)$$

2.3.3. Süreklilik denklemi

Süreklilik denklemi, akışkanlar mekaniğinde kütlenin korunumu ilkesine dayanır. Rüzgâr tüneli deney odası veya venturi tüpünün herhangi iki kesitinden birim zamanda geçen akışkan debisi sabittir. Yani rüzgâr tünelinin farklı iki noktasındaki alan, yoğunluk ve hız çarpımları birbirine eşit olmak zorundadır. Denklem 2.5'te iki nokta arasında süreklilik denklemi verilmiştir.



Şekil 2.19. Venturi tüpü

$$A_1 V_1 \rho_1 = A_2 V_2 \rho_2 \quad (2.5)$$

Rüzgâr tüneli hız hesaplamalarında 100 m/s altındaki hızlarda akış sıkıştırılamaz olarak kabul edildiği için ortam yoğunluğu sabit olarak kabul edilir. Bu yüzden $\rho_1 = \rho_2$

olarak kabul edilir. Bu durumda Şekil 2.19 da verilen iki nokta arasındaki kesit alan ve hız çarpımları eşit olur. Denklem 2.6 da 2 nokta arasında yoğunluğun sabit olduğu durumlar için süreklilik denklemi verilmiştir.

$$A_1V_1 = A_2V_2 \quad (2.6)$$

2.3.4. Reynolds sayısı

Reynolds Sayısı, bir akışkanın içindeki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını belirleyen boyutsuz bir sayıdır. Bu sayı, akışın laminar mı yoksa türbülanslı mı olduğunu tahmin etmek için kullanılır. Rüzgâr tüneli deneylerinde dinamik benzerlik sağlamak için hız yerine Reynolds sayısı kullanılmaktadır. Çünkü hız ile yapılan deneylerde akışkanın yoğunluğu (ρ), viskozitesi (μ) ve akışın gerçekleştiği geometrinin boyutu (L, karakteristik uzunluk) gibi faktörleri hesaba katılmaz. Reynolds sayısı, tüm bu parametreleri tek bir boyutsuz sayıda birleştirir. Denklem 2.7 Reynolds denklemini ifade etmektedir.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (2.7)$$

2.3.5. Rüzgâr tüneli test odasında hız hesaplamaları

Rüzgâr tüneline hız hesaplamaları iki şekilde yapılmaktadır. Birincisi venturi tüpünde ile iki nokta arasındaki basınç farkı hız ilişkisi kullanılarak ikincisi ise pitot statik tüp ile test odasında herhangi bir noktasında toplam basınç, statik basınç farkı alınarak dinamik basıncın bulunması ile elde edilir.

2.3.5.1. Venturi tüpünde hız hesaplama

Venturi tüpünde hız hesaplaması için hal denklemi, bernoulli ve süreklilik denklemi kullanılır. Hız 100 m/s altında olduğu için akış sıkıştırılmaz kabul edilir. Bu durumda yoğunluk her noktada sabittir.

$$A_1 = \text{Mevcut venturi tüpü giriş kesit alanı} = 1.21\text{m}^2$$

$$A_2 = \text{Mevcut venturi tüpü çıkış kesit alanı} = 0.25\text{m}^2$$

$$V_1 = \text{venturi tüpü girişindeki hız}$$

$$V_2 = \text{venturi tüpü çıkışındaki hız}$$

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$$

$$\rho_1 = \rho_2$$

$$\begin{aligned}
A_1 V_1 &= A_2 V_2 \\
1.21 V_1 &= 0.25 V_2 \\
V_1 &= 0.206 V_2 \Rightarrow V_1^2 = 0.042 V_2^2 \\
P_1 - P_2 &= \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2) \\
\Delta P = P_1 - P_2 &= \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - 0.042 V_2^2) \\
\Delta P &= \rho \cdot 0.478 \cdot V_2^2 \quad (2.8)
\end{aligned}$$

Denklem 2.8 Eskişehir teknik üniversitesi kapalı sistem rüzgâr tüneline 1.21 ve 0.25 m² kesit alanlarına sahip A₁ ve A₂ kesit alanlarına sahip venturi tüpünde A₁, A₂ noktalarındaki basınç farkı hız oranını vermektedir. Mevcut rüzgâr tüneline deneyler maksimum 55 m/s de yapılmaktadır. 100 m/s nin altında hızlar sıkıştırılmaz kabul edildiği için yoğunluk sabit alınır. Kısacası venturi tüpünün farklı iki noktasındaki basınç farkı hızın karesi ile orantılı olarak artmaktadır.

2.3.5.2. Pitot statik tüpü ile hız hesaplama

Rüzgâr tüneli test odasına yerleştirilen pitot statik tüpü toplam basıncın statik basınçtan farkını verir. Elde edilen basınç dinamik basınçtır. Dinamik basınç kullanılarak test odasındaki hız hesaplanır. Denklem 2.9 de verildiği gibi yoğunluk sabit olduğu için dinamik basınç hızın karesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır.

$$P_D + P_S = P_T \Rightarrow P_D = P_T - P_S \Rightarrow P_D = \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.8)$$

3. RÜZGÂR TÜNELİNDE YAPILAN SÜRÜKLEME ANALİZLERİ

3.1. Sürüklenme

3.1.1. Sürüklemenin tanımı

Bir katı cisim, akışkan içerisinde durgun veya hareketli konumda bulunduğunda akışkan tarafından belirli bir direnç kuvvetine maruz kalır. Bu direnç, cismin yüzeyinde gelişen sınır tabakası içinde etkili olan kayma gerilmelerinden kaynaklanmakta olup, akışkan ile katı arasındaki etkileşim sonucu ortaya çıkan sürüklenme kuvveti olarak tanımlanmaktadır.

Sınır tabakası tamamen laminel karakterdeyse, o zaman kesme kuvvetleri yalnızca viskoz kuvvetlerdir; ancak sınır tabakası türbülanslıysa, direnç sınır tabakasının akışkandaki hız dalgalanmasından kaynaklanır. Bu dirençler yüzey sürüklemesidir. Ancak, sınır tabakasının ayrılması gerçekleştiğinde, gövdenin arkasındaki akış hemen türbülanslı hareket halindedir. Bu türbülanslı akım ayrılması, yüzey sürüklenmesi nedeniyle kaybedilen enerjiye ek olarak enerji kaybına neden olur. Türbülanslı akış ayrılmasıyla kaybedilen bu enerji, form (basınç) sürüklenmesidir ve akışkanın aktığı gövdenin formunun veya şeklinin bir fonksiyonudur. Katı cisimlerin yanından geçen akış için sürüklenme katsayısı denklem 3.1 de verilmiştir.

$$D = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 A \quad (3.1)$$

Burada D, akışkan akışından dolayı gövdeye uygulanan direnç kuvvetidir ve A, belirli veri korelasyonuna bağlı olarak önden veya yandan yansıtılan alandır. Sürüklenme katsayısının hangi alana dayandığını ayırt etmek önemlidir. Genellikle akışa dik düzlemlerde önden iz düşüm alanı referans olarak değerlendirilir. Sürüklenme katsayısı hesaplanarak bulunan kuvvet hem yüzey hem de form (basınç) sürüklemesini içerir.

3.1.2. Toplam sürüklenme (D) bileşenleri

3.1.2.1. Yüzey sürüklenmesi

Yüzey sürtünmesi kaynaklı sürüklenme sınır tabakanın cinsine göre farklılık gösterir. Laminer sınır tabakada akış düzgün ilerler. Akış direnci sadece viskoz kesme geriliminden kaynaklanır. Türbülanslı akışta akış düzensiz ve türbülanslı olduğu için kesme gerilimine ek olarak hız dalgalanmaları ek akış direnci oluşturur. Dolayısıyla yüzey pürüzlülüğü arttıkça yüzey sürtünme kaynaklı sürüklenme artar.

3.1.2.2. Form(basınç) sürüklemesi

Form sürüklemesi, akışkanın cismin üzerinden geçerken sınır tabakasının ayrılması sonucu cismin arka bölgesinde oluşan türbülanslı düşük basınç alanından kaynaklanır. Bu durumda cismin ön yüzeyinde yüksek basınç, arka yüzeyinde ise düşük basınç meydana gelir ve ortaya çıkan basınç farkı cismin hareketine karşı yönelmiş bir direnç kuvveti oluşturur. Form sürüklemesi büyük ölçüde cismin geometrisine bağlıdır. Aerodinamik olarak tasarlanmış gövdelerde akış daha geç ayrıldığı için form sürüklemesi düşük seviyelerde gerçekleşirken, künt geometrili gövdelerde akış erken ayrılmakta ve bu da yüksek form sürüklemesine yol açmaktadır.

3.1.3. Toplam sürüklem katsayısı

Toplam sürüklem katsayısı yüzeyi sürüklemesi katsayısı ve basın sürüklemesi katsayısının toplamına eşittir denklem 3.2 de ifade edilmiştir.

$$C_d = C_{d,skin} + C_{d,form} \quad (3.2)$$

3.1.4. Sürüklemeye etki eden faktörler

Bir cismin akışkan içerisindeki sürüklem kuvveti çeşitli parametrelere bağlı olarak değişmektedir. Bu parametrelerin başlıcaları aşağıda özetlenmiştir:

Reynolds sayısı (Re): Akış rejiminin belirlenmesinde temel bir ölçüttür. Düşük Reynolds sayılarında sınır tabakası laminar özellik gösterirken, yüksek Reynolds sayılarında türbülanslı yapıya dönüşür. Bu durum, sürüklem kuvvetinin büyüklüğünü doğrudan etkilemektedir.

Yüzey pürüzlülüğü: Yüzey pürüzlülüğü arttıkça sınır tabakası üzerindeki sürtünme kuvvetleri artar. Bununla birlikte, belirli koşullarda yüzey pürüzlülüğü, akış ayrılmasını geciktirerek sürüklem kuvvetinin azalmasına da katkı sağlayabilir.

Cisim şekli: Gövde geometrisi, akışın ayrılma noktasını ve basınç dağılımını belirleyen en kritik faktördür. Aerodinamik olarak tasarlanmış gövdeler düşük form sürüklemesine sahipken, künt geometrili gövdeler erken akış ayrılmasına sebep olarak yüksek form sürüklemesine yol açmaktadır.

3.1.5. Sürüklem katsayısı hesaplama (C_d)

Sürüklem kuvveti; hız, sürüklemeye maruz kalan cismin kesit alanı ve sürüklem katsayısının bir fonksiyonudur. Denklem 3.3 sürüklem kuvvetini vermektedir.

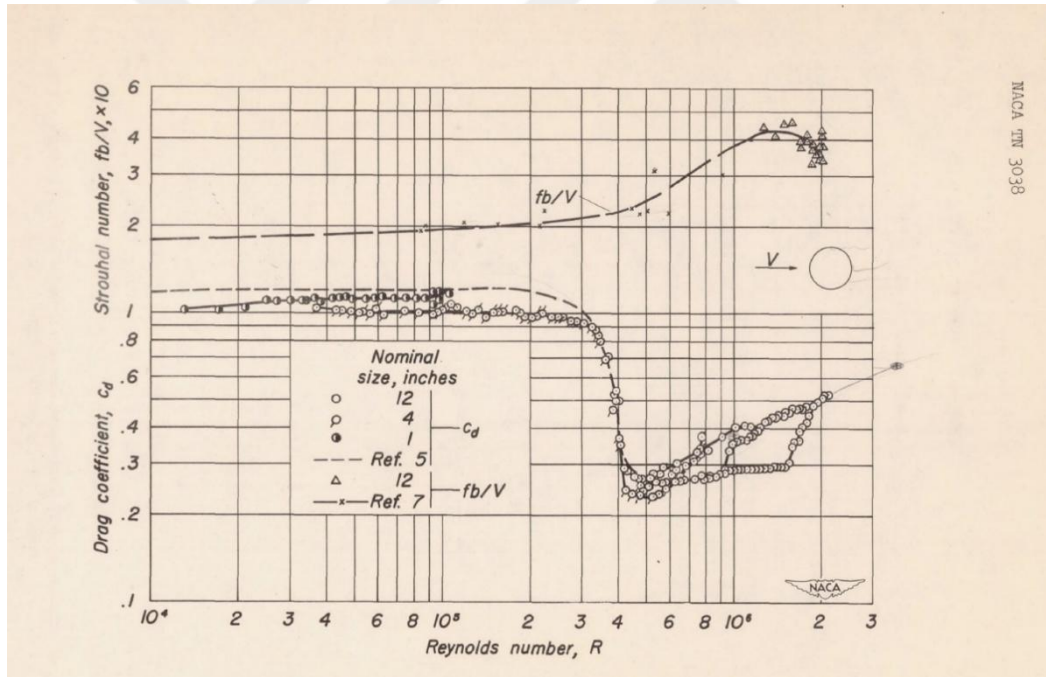
$$D = \frac{1}{2} C_d \rho V^2 A \quad (3.3)$$

Sürüklenme kuvveti formülünde C_d sürüklenme katsayısını ρ ortam yoğunluğunu V hızı A ise referans alınan yüzey alanı ifade etmektedir. Formülde aşağıdaki gibi C_d sürüklenme katsayısı yalnız bırakılarak hesaplanır. Denklem 3.4 sürüklenme katsayısını ifade etmektedir.

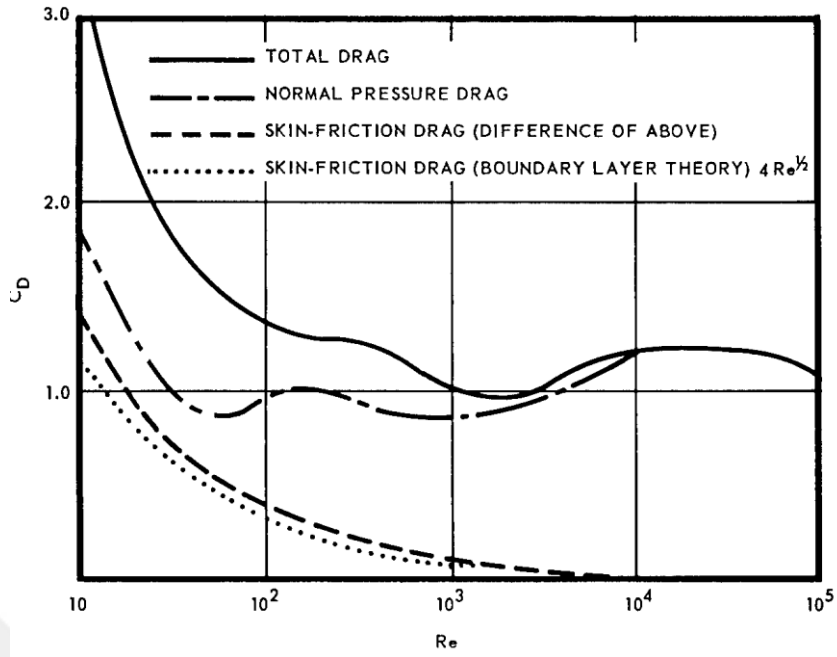
$$C_d = \frac{2D}{\rho V^2 A} \quad (3.4)$$

3.2. Silindir Etrafında Sürüklenme Analizleri

Şekil 3.1'deki noktalı çizgi ve test noktalarıyla gösterildiği gibi dairesel bir silindir için sürüklenme katsayı değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir. Şekil 3.2'de dairesel bir silindir için toplam sürüklemenin form sürüklemesi ve yüzey sürüklemesi olarak analizi verilmiştir. [29]



Şekil 3.1. Dairesel silindirler için Reynolds sayısı ile sürüklenme katsayılarının değişimi (NACA - TN-3038) [29]



Şekil 3.2. Dairesel bir silindirin toplam sürüklenmesine yüzey sürtünme sürüklemesinin katkısı[29]

3.2.1. Silindir deney düzeneğinin hazırlık aşamaları

Bu aşamada yapılan çalışmalar göz önüne alınarak 10 cm çapında 50 cm uzunluğunda bir silindir 3D yazıcıda üretilmiştir. Üretilen bu silindirin ortasından her iki taraftan ölçüm alınmasını sağlayacak metal çubuk yerleştirilmiştir. Daha sonra deney odasında gerekli revizyonlar yapılarak önce balans mekanizması ile daha sonra ise yeni tasarlanan 3. deney düzeneği ile sürüklenme kuvvet ölçümleri yapılmıştır. Bulunan sonuçlar literatür verileri ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.3. 3D yazıcıda üretilen 10x50 cm ebatlarındaki silindir

Rüzgâr tüneline 50000-200000 Reynolds sayılarında toplam 16 farklı Reynolds değerinde 10 cm çapında 50 cm genişliğinde silindir ile ölçüm yapılmıştır. Her bir

Reynolds sayısına karşılık gelen hız ve basınç farkları hesaplamalar sonucu Tablo 3.1’de verilmiştir. Bu hesaplamalar önceki bölümde verilen Bernoulli, süreklilik ve Reynolds sayısı denklemleri kullanılarak bulunmuştur. Sağlıklı ve hassas verilerin elde edilmesi için incelenen her bir Reynolds değeri için 360 ve toplamda 10 000 veri alınmıştır. İki farklı silindir deneyi yapılmıştır. Birincisi 1. deney düzeneği olarak adlandırdığımız balans cihazı ile yaptığımız ölçümler ikincisi ise 3. deney düzeneği ile yaptığımız ölçümlerdir. Bu deney sonuçları literatür çalışmaları ile karşılaştırılmıştır. Tablo 3.1’de rüzgâr tüneline yapılacak silindir deneylerinde basınç farklarının karşılık geldiği Reynolds sayısı ve hız değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Rüzgâr tüneline deneylerinde Reynolds sayılarına karşılık gelen hız ve basınç farkları

Re	V (m/s)	ΔP (N/m ²)
50000	8.2	36.5
60000	9.8	52.6
70000	11.5	71.5
80000	13.1	93.4
90000	14.8	118.3
100000	16.4	146.0
110000	18.0	176.6
120000	19.7	210.2
130000	21.3	246.7
140000	23.0	286.1
150000	24.6	328.5
160000	26.2	373.7
170000	27.9	421.9
180000	29.5	473.0
190000	31.2	527.0
200000	32.8	583.9

3.2.2. Silindir sürüklenme kuvvetinin ölçülmesi

3.2.2.1. Birinci deney düzeneği ile silindir sürüklenme kuvvetinin ölçülmesi

Şekil 3.4 ve Şekil 3.5’de görüldüğü üzere Kuvvet moment cihazı (balans mekanizması) bağlantı ayakları bir yere temas etmeden aralarında pleksiglas olacak şekilde sistemin dışına alınmıştır. Bu şekilde deney odası net olarak izlenebilmektedir.

Ayrıca bağlantı ayakları ve silindir hiçbir yere temas etmediği için sağlıklı sonuçların elde edilme olasılığı oldukça yüksektir.



Şekil 3.4. Balans cihazı ile silindirin rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılması aşaması



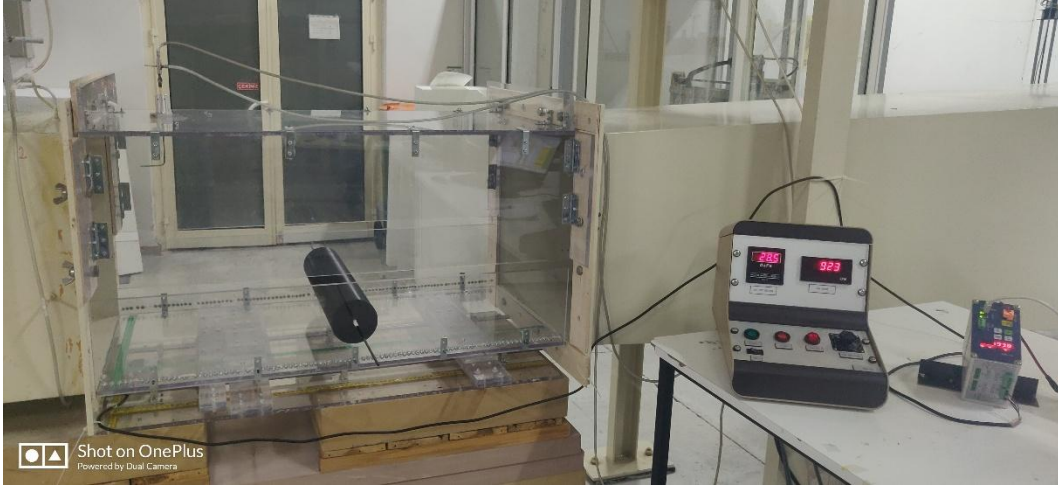
Şekil 3.5. Balans mekanizması ile rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan silindir ile ölçüm yapılması

3.2.2.2. Üçüncü deney düzeneği ile sürüklenme kuvvetinin ölçülme

3. deney düzeneği de tasarlanan platform ile tek yük hücresi kullanılarak tek eksenli kuvvet ölçümü yapılmıştır. Öncelikle silindir yerleştirmeden farklı Reynolds sayılarında sistemin boş sürüklenme kuvveti ölçülmüştür. Daha sonra silindir yerleştirilerek farklı Reynolds sayılarında ölçülen değerler boş sistem değerlerinden çıkarılarak ilgili Reynolds sayılarında silindir sürüklenme kuvveti bulunmuştur.



Şekil 3.6. Üçüncü deney düzeneği ile silindirin rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılması

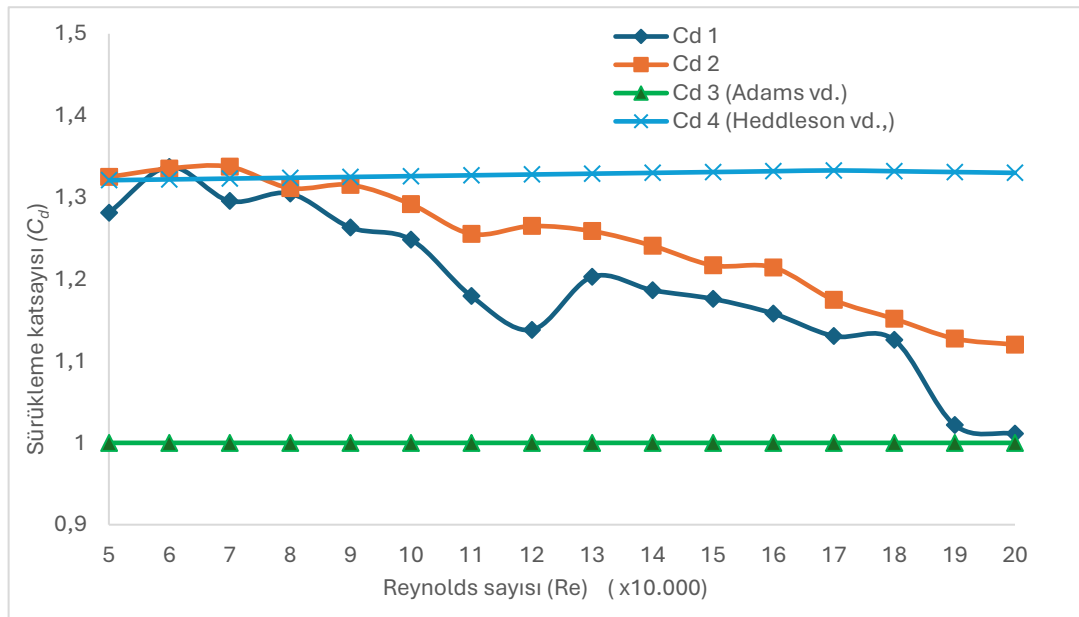


Şekil 3.7. Üçüncü deney düzeneği ile rüzgâr tüneli test odasına konumlandırılan silindir ile ölçüm yapılması

3.2.3. Elde edilen sonuçlar ve karşılaştırma

Tablo 3.2. Farklı Reynolds sayılarındaki sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması

Re	C _{d1} (1. deney düzeneği)	C _{d2} (3. deney düzeneği)	C _{d3} (Heddleson, vd.)	C _{d4} (Adams vd.)
50000	1,28	1,37	1	1,32
60000	1,34	1,38	1	1,32
70000	1,30	1,40	1	1,32
80000	1,30	1,37	1	1,32
90000	1,26	1,38	1	1,33
100000	1,25	1,35	1	1,33
110000	1,18	1,32	1	1,33
120000	1,14	1,33	1	1,33
130000	1,20	1,32	1	1,33
140000	1,19	1,30	1	1,33
150000	1,18	1,28	1	1,33
160000	1,16	1,27	1	1,33
170000	1,13	1,23	1	1,33
180000	1,13	1,21	1	1,33
190000	1,02	1,19	1	1,33
200000	1,01	1,18	1	1,33

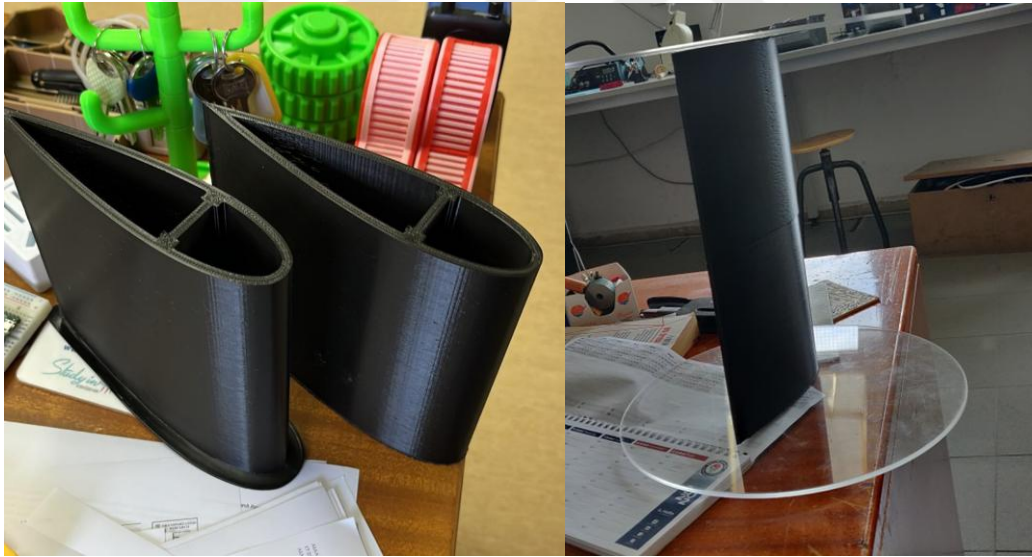


Şekil 3.8. Farklı Reynolds sayılarındaki sürüklenme katsayılarının karşılaştırılması

Tablo 3.2 ve Şekil 3.8’de 10 cm çapında 50 cm genişliğindeki silindir ile 50000-200000 Re aralığında 1. deney düzeneği ve 3. deney düzeneği ile olmak üzere 2 farklı deney yapılmıştır. Bulunan sonuçlar literatür çalışmaları [29, 30] ile karşılaştırıldığında uyumlu sonuçlar bulunduğu görülmüştür.

3.3. Seçili Kanat Profilleri Üzerinde Sürüklenme Analizleri

NACA0024 kanat profili 3D yazıcıda üretilmiştir. Üretilen kanat profilinin her iki tarafına lazer kesicide kesilmiş dairesel şeffaf akrilik levhalar yerleştirilerek rüzgâr tüneli test odasında 2 boyutlu deney sonuçları elde edilmiştir. Bu ölçümlerde venturi tüpü kullanılarak hız hesaplamaları yapılmıştır. Bu şekilde hazırlanan NACA0024 kanat profili üzerinde farklı hücum açılarında ve farklı Reynolds sayılarında ölçümler yapılmıştır. Özellikle 200000 Reynolds değerlerinde bulunan sonuçlar Xfoil ve önceki deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmış ve uyumlu sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 3.9. 3d yazıcı ile üretilen NACA0024 kanat profili



Şekil 3.10. *NACA0024 kanat profilinin balans mekanizmasına yerleştirilmesi*



Şekil 3.11. *NACA0024 kanat profilinin balans mekanizması ile test odasına yerleştirilmesi*

Deney öncesi rüzgâr tüneline hangi basınç farklarının hangi Reynolds sayısına karşılık geldiği Reynolds sayısı, Bernoulli denklemi, hal denklemi ve süreklilik denklemi kullanılarak hem pitot statik tüpte hem de venturi tüpünde hesaplanarak Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Venturi tüpü hesaplamalarına göre Reynolds sayılarının karşılık geldiği hız ve basınç farkları

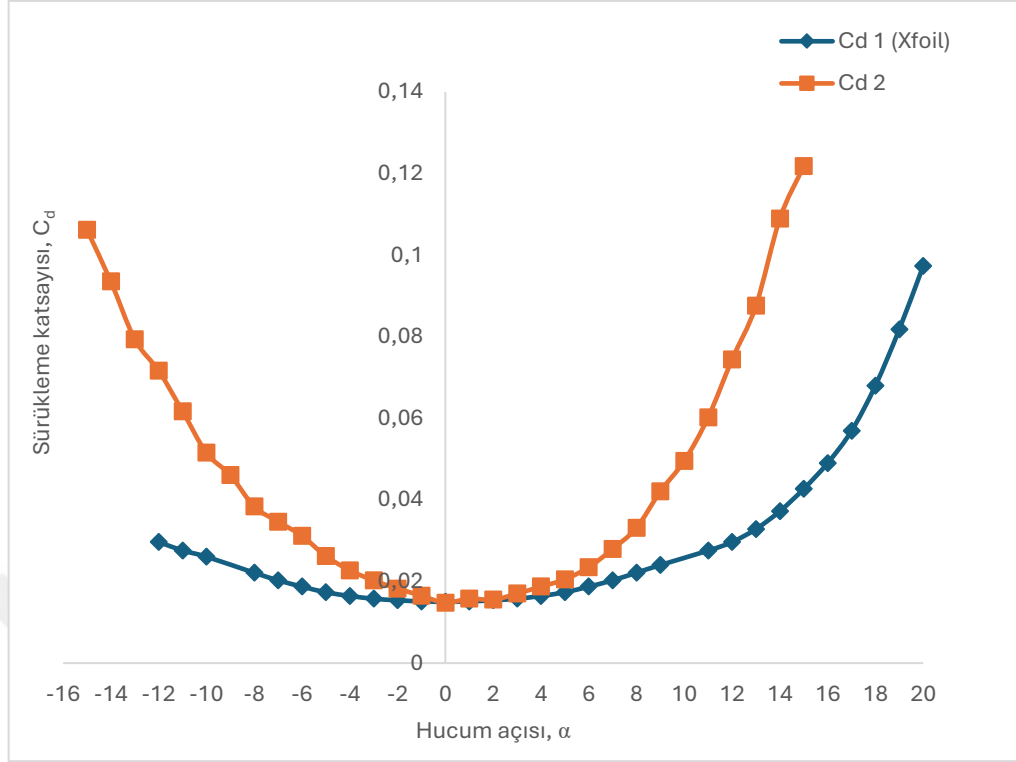
Re	V_2 (m/s)	ΔP (N/m ²)
50000	5.5	17.1
100000	10.9	68.4
150000	16.4	153.8
200000	21.9	273.4
250000	27.3	427.2
300000	32.8	615.2

Tablo 3.4. Pitot statik tüp hesaplamalarına göre Reynolds sayılarının karşılık geldiği hız ve basınç farkı

Re	V_2 (m/s)	ΔP (N/m ²)
50000	5.5	16.2
100000	10.9	64.9
150000	16.4	146.0
200000	21.9	259.5
250000	27.3	405.5
300000	32.8	583.9

3.3.1. Elde edilen sonuçlar ve karşılaştırma

NACA0024 kanat profili ile 1. deney düzeneğinde hücum açısı değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişim grafikleri Şekil 3.12 ve Şekil 3.13 gibi verilmiştir. Bulunan rüzgâr tüneli deney sonuçları Xfoil analizleri ve diğer çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür.

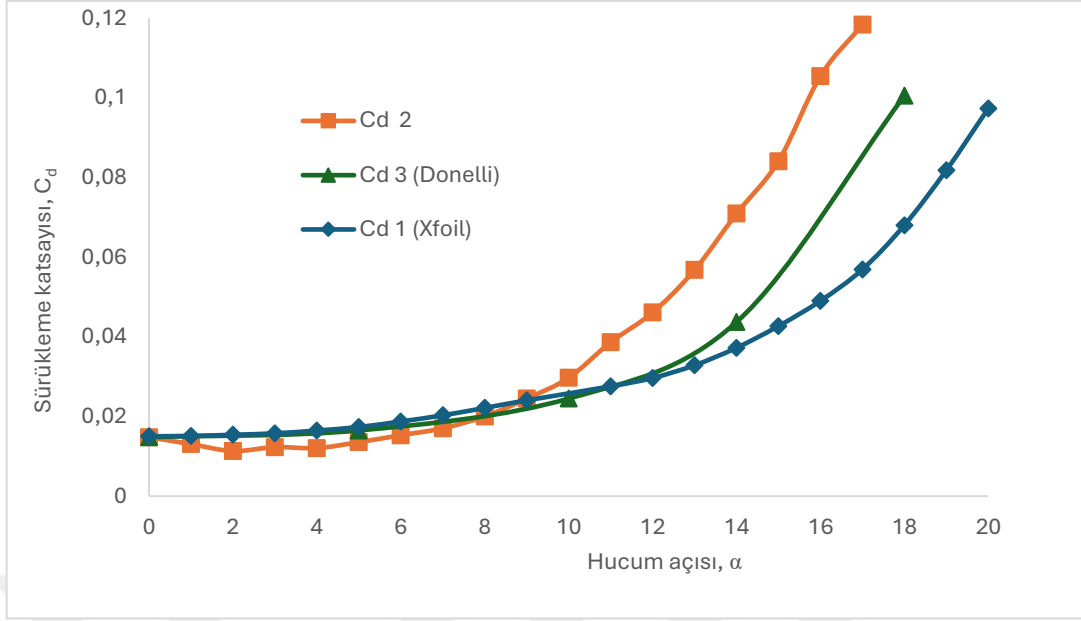


Şekil 3.12. Hücum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (α, C_d)

Tablo 3.5 NACA0024 kanat profiline ait farklı çalışmalarda elde edilen rüzgâr tüneli sürüklenme katsayısı deney sonuçları verilmiştir.

Tablo 3.5. NACA0024 kanat profiline ait hücum açısı değişimi ile elde edilen sürüklenme katsayıları [31]

α (°)	C_d
0	0.0148
5	0.0165
10	0.0245
14	0.0437
18	0.1005



Şekil 3.13. Hucum açısı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi (α, C_d)

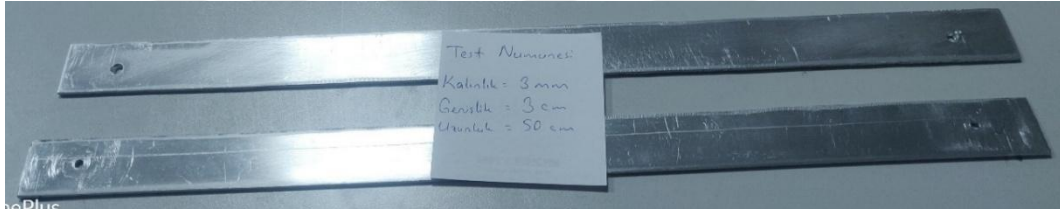
Rüzgâr tüneline revizyonu yapılan 1. deney düzeneği yani balans mekanizması ile NACA0024 kanat profilinin sürüklenme katsayısı ile 10 cm çapında silindirin sürüklenme katsayısı ölçüm ve hesaplanması yapılmıştır. Bu deneylerin amacı levha plaka deneyleri öncesi balans mekanizmasının sürüklenme katsayısı ölçümlerinin doğruluğunun teyit etmektir. 2. deney düzeneği ile yapılan ölçümler doğru sonuçlar vermediği için iptal edilmiştir. 3. deney düzeneği ile ise 10 cm çapında silindirin sürüklenme katsayısı ile 2-3 ve 5 cm yükseklikteki levha plakaların sürüklenme katsayısı ölçülmüştür. Ölçümlerde hız değerleri anemometre, venturi tüpü ve pitot statik tüp ile yapılmıştır. Pitot statik tüp ve venturi tüpünde basınç farkları Bernoulli yöntemi kullanılarak, basınç farklarından hız hesabı ve Reynolds sayısı hesaplamaları yapılmıştır.

4. ARDIŞIK OLARAK YERLEŞTİRİLMİŞ DİKEY LEVHALARIN SÜRÜKLEME ANALİZLERİ VE ETKİLEŞİMLERİ

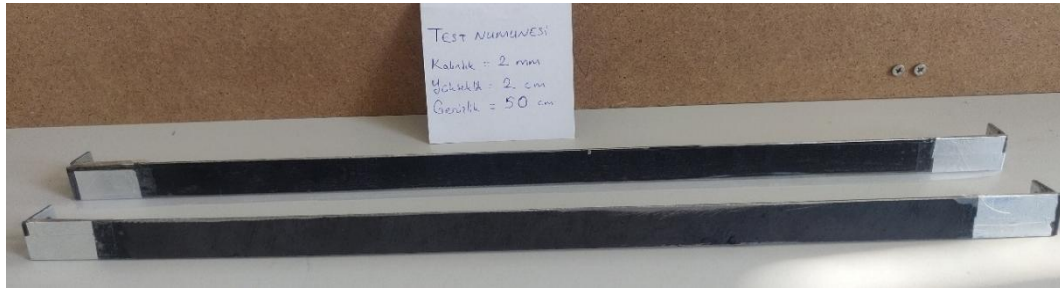
4.1. Ön Hazırlık ve Hesaplamalar

4.1.1. Ön hazırlık aşaması

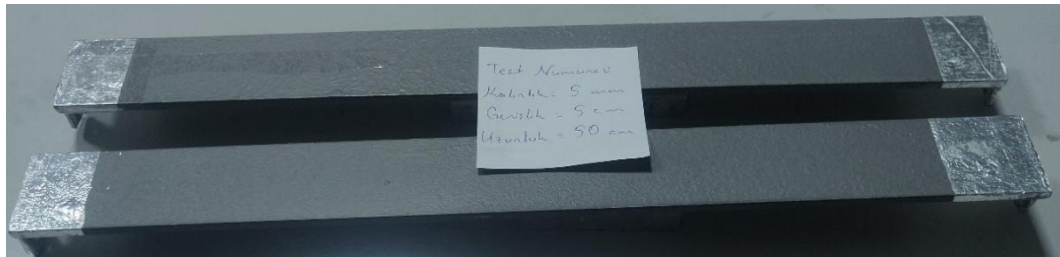
Bu çalışmada yatay düz platform üzerinde akışa dikey olarak yerleştirilmiş 3 farklı levha üzerinde sürüklenme analizleri ve etkileşimleri gerçekleştirilmiştir. Birinci levha Şekil 4.1 de görüldüğü gibi 2 cm yüksekliğinde 50 cm boyunda 2 mm kalınlığında olarak üretilmiştir. İkinci levha Şekil 4.2 de görüldüğü gibi 3 cm yüksekliğinde 50 cm boyunda 3 mm kalınlığında olarak üretilmiştir. Üçüncü levha Şekil 4.3 de görüldüğü gibi 5 cm yüksekliğinde 50 cm boyunda 5 mm kalınlığında olarak üretilmiştir. Tüm levhalar geometrik olarak benzerliğe sahip olup kalınlık yükseklik oranı 0.1 olarak seçilmiştir.



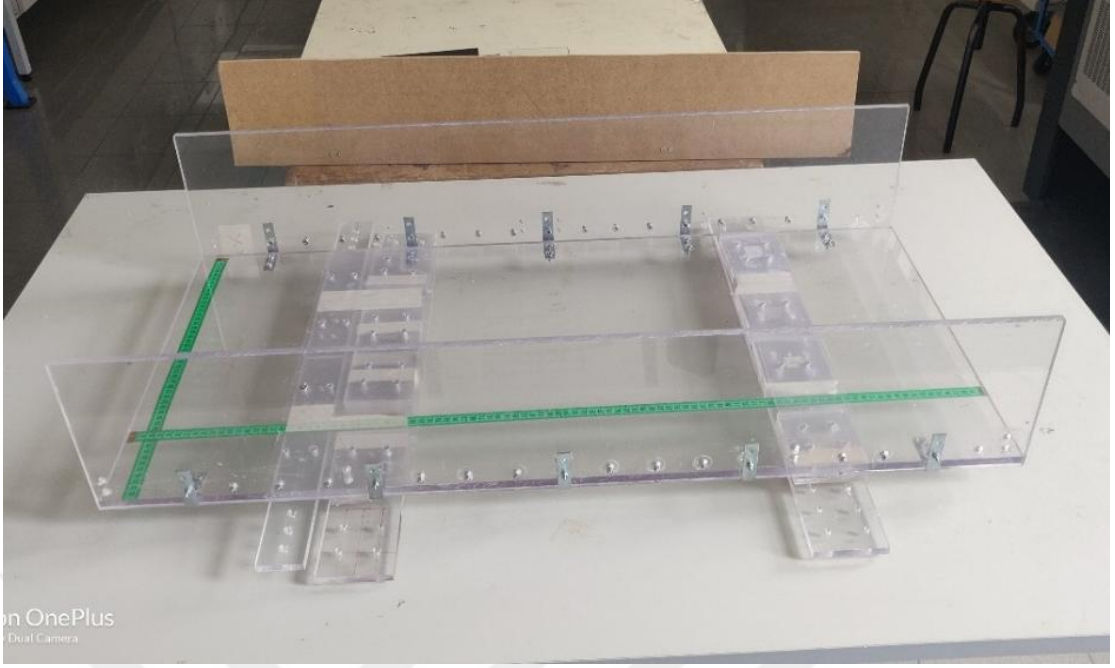
Şekil 4.1. 2 cm yükseklikteki metal deney levhaları



Şekil 4.2. 3 cm yükseklikteki metal deney levhaları



Şekil 4.3. 5 cm yükseklikteki metal deney levhaları



Şekil 4.4. Levha plakaların dikey olarak yerleştirildiği platform

Boyuttan bağımsız ölçümler yapılabilmek için levhalar arası mesafenin(a), levha yüksekliğinin(h), levhalar arası mesafe yükseklik oranı ise a/h olarak tanımlanmıştır. Her bir levha için ilgili oran aşağıdaki tablolarda verilmiştir.

Tablo 4.1. Levha yüksekliği a/h tablosu

a/h	Levha yüksekliği (h)		
	$h=5$ cm	$h=3$ cm	$h=2$ cm
0	0	0	0
1	5	3	2
2	10	6	4
3	15	9	6
4	20	12	8
5	25	15	10
6	30	18	12
7	35	21	14
8	40	24	16
9	45	27	18
10	50	30	20
11	55	33	22
12	60	36	24
13	65	39	26

Tablo 4.1. (Devam) *Levha yüksekliği a/h tablosu*

a/h	Levha yüksekliği (h)		
	h=5 cm	h=3 cm	h=2 cm
14	70	42	28
15	75	45	30
16	80	48	32
17	85	51	34
18	90	54	36
19		57	38
20		60	40
21		63	42
22		66	44
23		69	46
24		72	48
25		75	50
26		78	52
27		81	54
28		84	56
29		87	58
30		90	60
31			62
32			64
33			66
34			68
35			70
36			72
37			74
38			76
39			78
40			80
41			82
42			84
43			86
44			88
45			90

4.1.2. Deney öncesi hesaplamalar

Deneyin öncesinde yapılması gereken en önemli hazırlıklardan bir tanesi hız hesaplamaların yapılmasıdır. Hangi hızlara karşılık hangi basınç farklarının geldiği hesaplanmalı ve buna göre sistem hazırlanmalıdır. Rüzgâr tüneline hız hesaplamaları bernoulli prensibine dayanmaktadır. Venturi tüpünde 2 nokta arasındaki basınç farkı ile hız hesaplamaları yapılmaktadır. Pitot statik tüpte ise pitot statik tüpün konumlandığı noktada toplam basınçtan statik basınç farkı alınarak dinamik basınç bulunur. Bulunan dinamik basınç kullanılarak hız hesaplaması yapılır.

Deney öncesinde kullanılacak hız değerlerine karşılık gelen basınç farkı değerlerinin bulunması için öncelikle mevcut ortam yoğunluğunun hesaplanması gerekmektedir. Ortam yoğunluğunun hesaplanması Hal denklemi ile yapılmaktadır. İkinci aşamasında ise bernoulli denklemi kullanılarak bulunan yoğunluk ve hız değerleri ile basınç farkı hız hesaplaması yapılır. Bu çatışmada pitot statik tüp ile hız hesaplaması yapıldığı için bunun yoğunluk ve hız değerleri basınç farkının bulunması için yeterli olacaktır.

4.1.2.1. Hız hesaplamaları

Pitot statik tüpte hangi hıza hangi basınç farkının karşılık geldiği denklem 4.1 ile ifade edilmiştir

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \rho * V^2 \quad (4.1)$$

Örnek; 10 m/s hızda test odasındaki basınç farkının pitot statik tüp ile hesaplanmasını yapınız.

Çözüm:

$$P=92500 \text{ N/m}^2$$

$$R = 287 \text{ N.m/kg.K}$$

$$T=273.15+C^0=273.15+24=297.15 \text{ K}$$

$$P = \rho RT$$

$$92500=\rho(287)(298.15)$$

$$\rho = 1.085 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\Delta P = \frac{1}{2} * \rho * V^2$$

$$10 \text{ m/s hız değeri için } \Delta P = \frac{1}{2} * 1.085 * 10^2 = 54.3 \text{ N/m}^2$$

Bu şekilde hesaplamalar yapılarak rüzgâr tüneli deneylerinde 10-30 m/s hız aralıklarına karşılık gelen basınç farkları Tablo 4. verilmiştir.

Tablo 4.2. Levha deneylerinde kullanılacak hız, basınç farkı tablosu

Hız (V)	Basınç Farkı (Pa) ΔP
10	54.3
15	122.1
20	217.0
25	339,1
30	488.3

4.1.2.2. Reynolds sayısı hesaplama

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \text{ olmak üzere}$$

V= Hız (m/s) (Tablo 4. deki hız değerleri kullanılır)

L=karakteristik uzunluk olmak üzere

2 cm yüksekliğe sahip levhalarda L=0.02 m

3 cm yüksekliğe sahip levhalarda L=0.03 m

5 cm yüksekliğe sahip levhalarda L=0.05 m değerlerine sahiptir.

Örnek: 2 cm levhalarda 10 m/s hızdaki Re sayısını bulalım.

Çözüm:

$$V= 10 \text{ m/s}$$

$$L= 0.02 \text{ m}$$

$$\rho = 1.0851 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu = 0,0000178 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \cdot \text{s}$$

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} = \frac{1.0851 * 10 * 0.02}{0.0000178} = 18288$$

Bu işlemler 10-30 m/s hız aralığında tüm levha plakalar için yapılarak Tablo 4. bulunur.

Tablo 4.3. Rüzgâr tüneli deneylerinde 10-30 m/s hızlara karşılık gelen Reynolds sayıları

10-30 m/s hızlarda levha plakalarda hesaplanan Reynolds sayıları			
Hız (V)	2 cm levha	3 cm levha	5 cm levha
10	18288	27432	45721
15	24384	36576	60961
20	30480	45721	76201
25	36576	54865	91441
30	1219	1829	3048

4.1.2.3. Sürüklenme katsayısı hesaplamaları (C_d)

Tablo 4. hız basınç farkı tablosu kullanılarak rüzgâr tüneli deneylerine başlanır. Rüzgâr tüneline deney düzenekleri aracılığı ile anlık olarak sürüklenme kuvvet bilgileri monitöre aktarılır. Bulunan sürüklenme kuvvetleri ilgili sürüklenme katsayısı formülünde yerine yazılarak her bir a/h ve her bir hız değeri için sürüklenme katsayıları hesaplanır.

Örnek: 2 cm yüksekliğe sahip levha plakanın 10 m/s deki sürüklenme katsayısını bulalım.

Çözüm:

A= Referans yüzey alan: 2 cm levha için= 0.02*0.5=0.01 m²

ρ = ortam yoğunluğu = 1.0851 $\frac{kg}{m^3}$ (daha önce hesaplanmıştı.)

D: sürüklenme kuvveti: cihazdan direk okunur.

$C_d = \frac{2D}{\rho V^2 A} = \frac{2D}{1.085.10^2.0.01} = \frac{2D}{1.085}$ şeklinde olur.

Not: Sürüklenme kat sayısı hesaplamalarında, tasarımı yapılan 3. deney düzeneği verileri kullanılarak 10-30 m/s hızlarda sürüklenme kuvvetleri elde edilmiştir. Elde edilen sürüklenme kuvvetleri kullanılarak her hız ve a/h mesafe değişimi için sürüklenme katsayıları hesaplanmıştır.

4.2. Gerçekleştirilen Deneyler

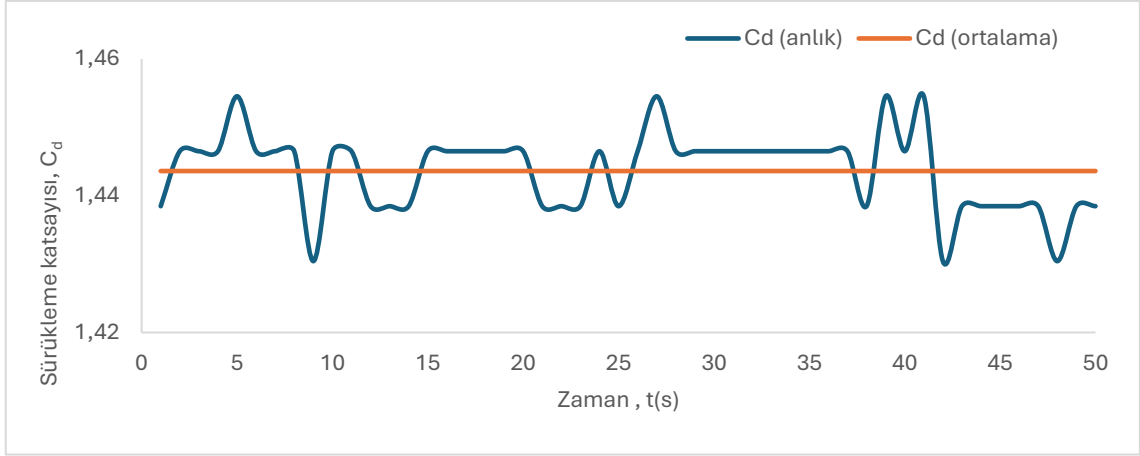
Tüm deneyler Tablo 4. kullanılarak 10-30 m/s değişen hızlarda sırası ile yatay platform üzerine dikey olarak yerleştirilmiş, tek levha ve çift levha üzerinde gerçekleştirilmiştir. Tüm deneylerde öncelikle tek levhalar platforma dik olarak yerleştirilerek yapılmıştır. Bulunan tek levha deney sonuçları referans alınarak çift levha deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Çift levha deneyleri a/h oranına bağlı olarak 5 cm yükseklikteki levhalarda a/h=18, 3 cm yükseklikteki levhalarda a/h=30 ve 2 cm yükseklikteki levhalarda ise a/h=45 mesafesine kadar toplam 93 farklı deney yapılmıştır. Bu deneylerde aşağıdaki veriler elde edilmiştir.

- Anlık ve ortalama sürüklenme Katsayıları grafiği
- Sürüklenme kuvveti mesafe (a/h) değişim grafiği
- Sürüklenme katsayısı mesafe (a/h) değişim grafiği

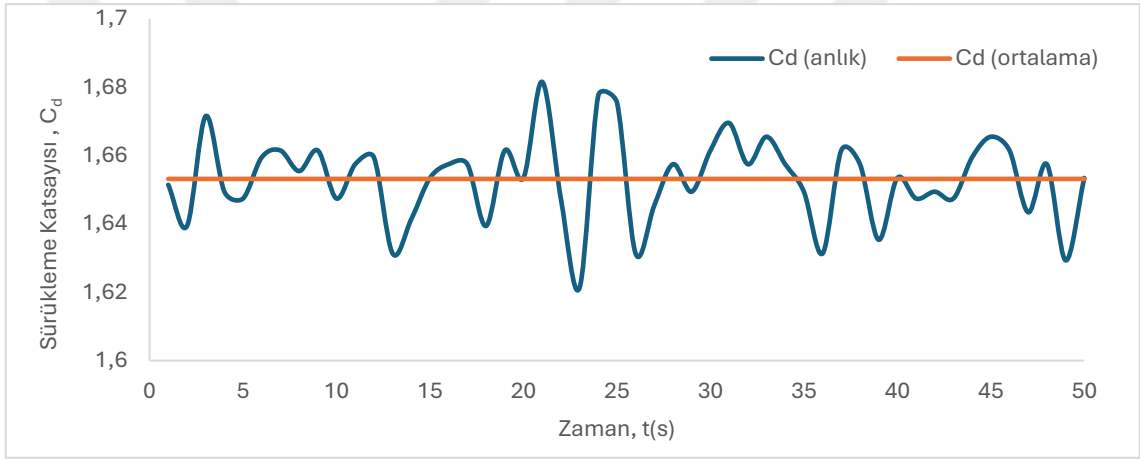
4.2.1. Anlık ve ortalama sürüklenme katsayıları zaman grafiği ((C_d, t))

Levha plaka deneylerinde her bir hız ve mesafe değişiminde en az 50 verinin ortalaması alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Ek 1 de sırası ile 15-30 m/s değişen hızlarda tek levha ve çift levha deneylerinde elde edilen veriler kullanılarak anlık ve ortalama C_d grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafiklerde özellikle minimum ve maksimum değerlerin ölçüldüğü a/h mesafe değerleri Ek 1 de daha detaylı olarak verilmiştir. Burada örnek teşkil etmesi bakımından her bir levha çifti için iki tane anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı grafiği verilmiştir.

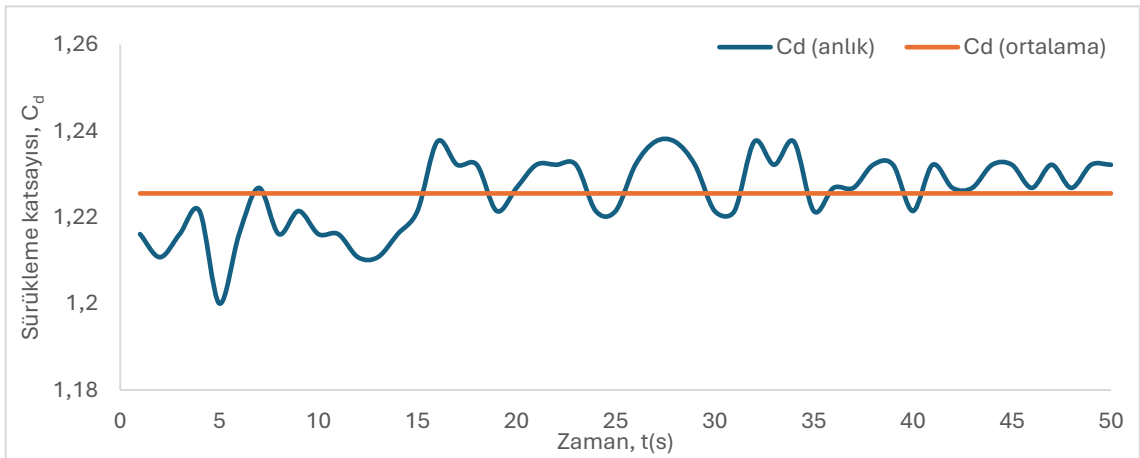
Şekil 4.5 de 2 cm yüksekliğe sahip levha plakalarda iki levha plaka arasındaki mesafe 2 cm hız 15 m/s iken ölçülen anlık ve hesaplanan ortalama sürüklenme katsayısının zaman ile değişim grafiği verilmiştir. Şekil 4.6 ise aynı levha plakalarda iki levha plaka arasındaki mesafe 36 cm hız 30 m/s iken ölçülen anlık ve ortalama sürüklenme katsayısının zaman ile değişim grafiği verilmiştir. Mesafe ve hız artışına bağlı olarak sürüklenme katsayılarındaki anlık değişimler daha yüksek olmuştur. Buda mesafe ve hız artışı ile akış rejiminin değiştiğini göstermektedir. 2 cm yüksekliğe sahip levha plakalarda elde edilen bu sonuçlar 3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda da elde edilmiştir.



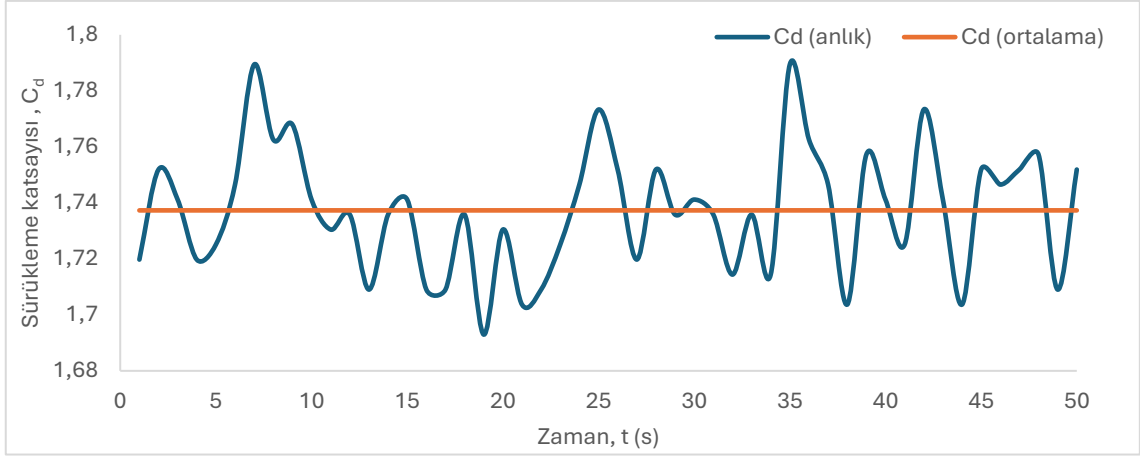
Şekil 4.5. Çift levha 2 cm yükseklikteki levha plakalarda 2 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=1$)



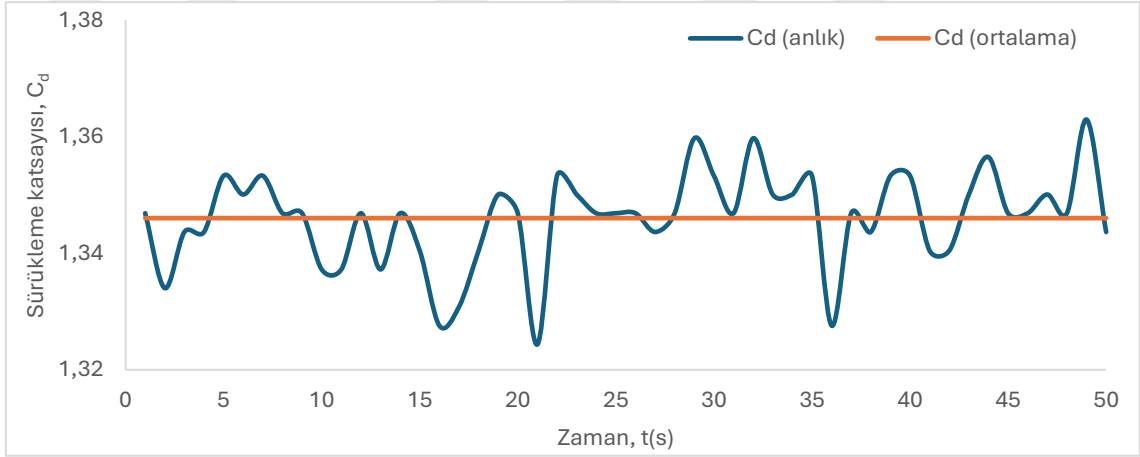
Şekil 4.6. Çift levha 2 cm yükseklikteki levha plakalarda 36 cm mesafede 30 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=18$)



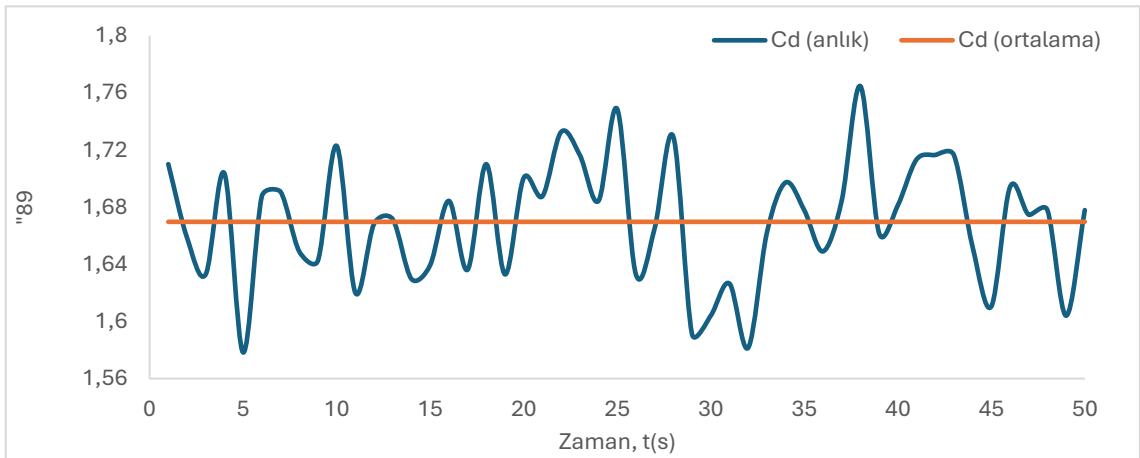
Şekil 4.7. Çift levha 3 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 3 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=1$)



Şekil 4.8. Çift levha 3 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 54 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=18$)



Şekil 4.9. Çift levha 5 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 5 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=1$)

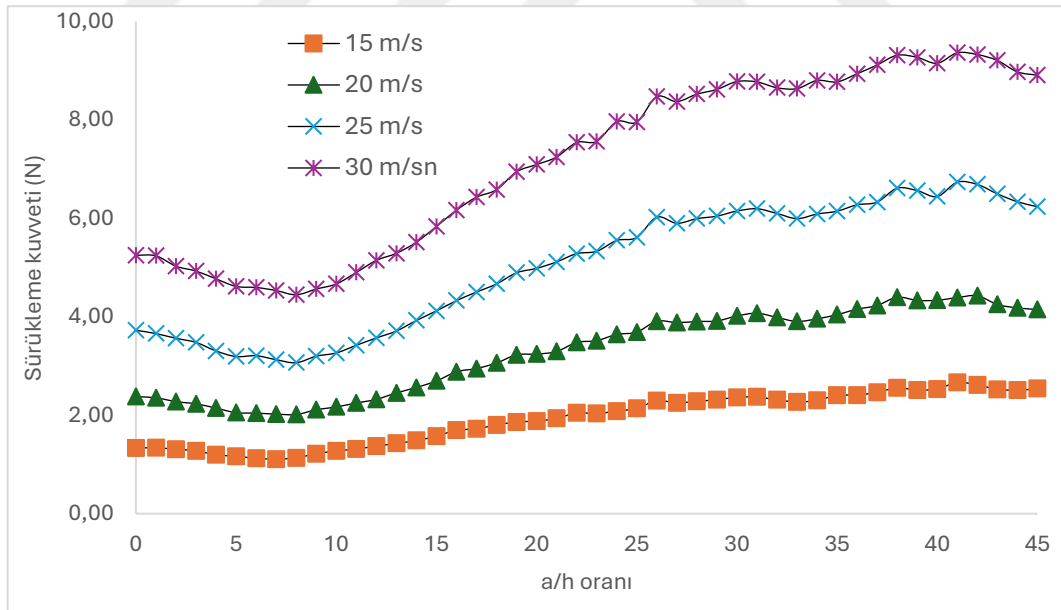


Şekil 4.10. Çift levha 5 cm yükseklikteki çift levha plakalarda 90 cm mesafede 15 m/s hızda anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı değişimi ($a/h=18$)

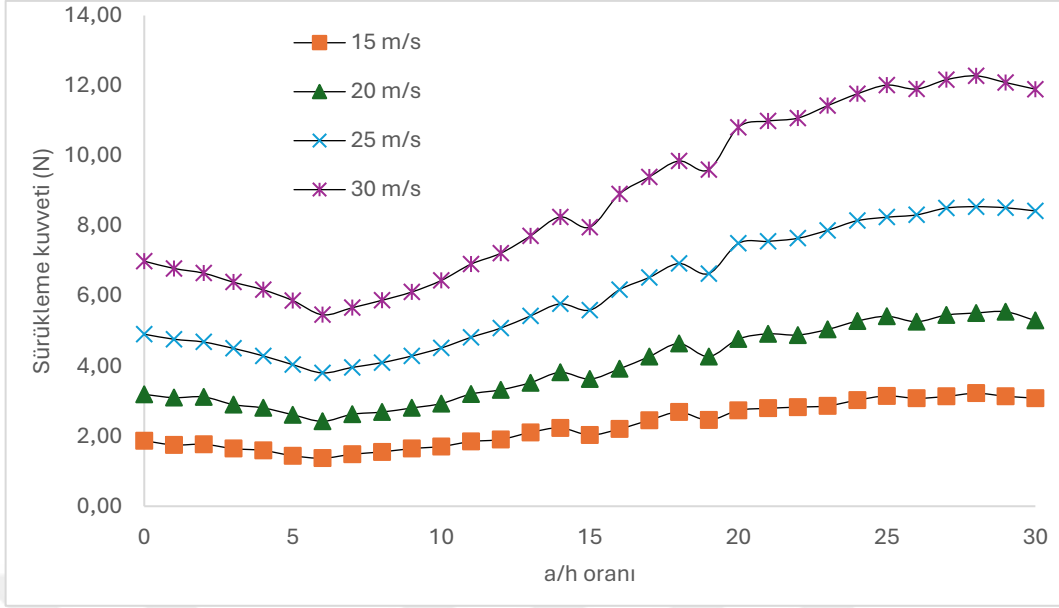
4.2.2. Sürüklenme kuvveti ile a/h oranı değişim grafiği $(D, \frac{a}{h})$

15-30 m/s hızlarda a/h oranına bağlı olarak 2-3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda elde edilen sürüklenme kuvveti değişim grafikleri Şekil 4.11, Şekil 4.12, Şekil 4.13 ve ekler kısmı EK 2’de tablo tablo halinde verilmiştir.

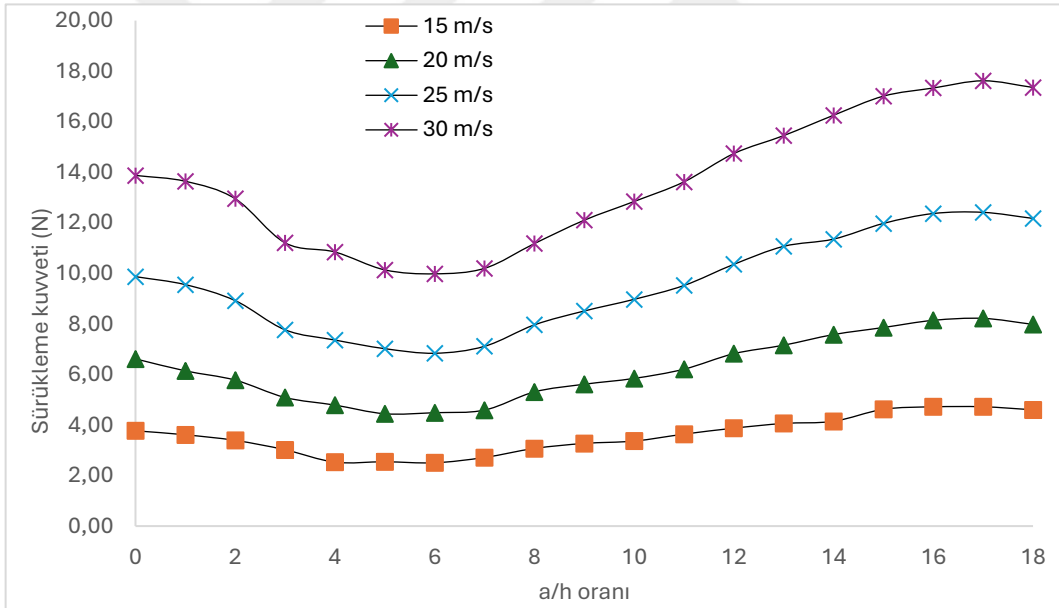
- 3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda $0 > \frac{a}{h} > 6$ aralığında, 2 cm yükseklikteki levhalarda ise $0 > \frac{a}{h} > 7$ aralığında a/h oranı arttıkça sürüklenme kuvveti sürekli düşmektedir.
- 3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda en düşük sürüklenme kuvveti $a/h=6$ mesafesinde ölçülürken 2 cm yükseklikteki levhalarda $a/h=7$ mesafe uzaklığında ölçülmüştür.
- 5 cm levhalarda $6 > \frac{a}{h} > 18$ aralığında, 3 cm levhalarda ise $6 > \frac{a}{h} > 30$ aralığında ve 2 cm levhalarda ise $7 > \frac{a}{h} > 45$ aralığında a/h oranı arttıkça sürüklenme kuvveti sürekli artmaktadır.
- Levha plakaların yüksekliği arttıkça sürüklenme kuvveti artmaktadır.



Şekil 4.11. 2 cm yükseklikteki levhalarda sürüklenme kuvveti mesafe değişimi (D, a/h)



Şekil 4.12. 3 cm yükseklikteki levhalarda Sürüklenme kuvveti mesafe değişimi (D , a/h)

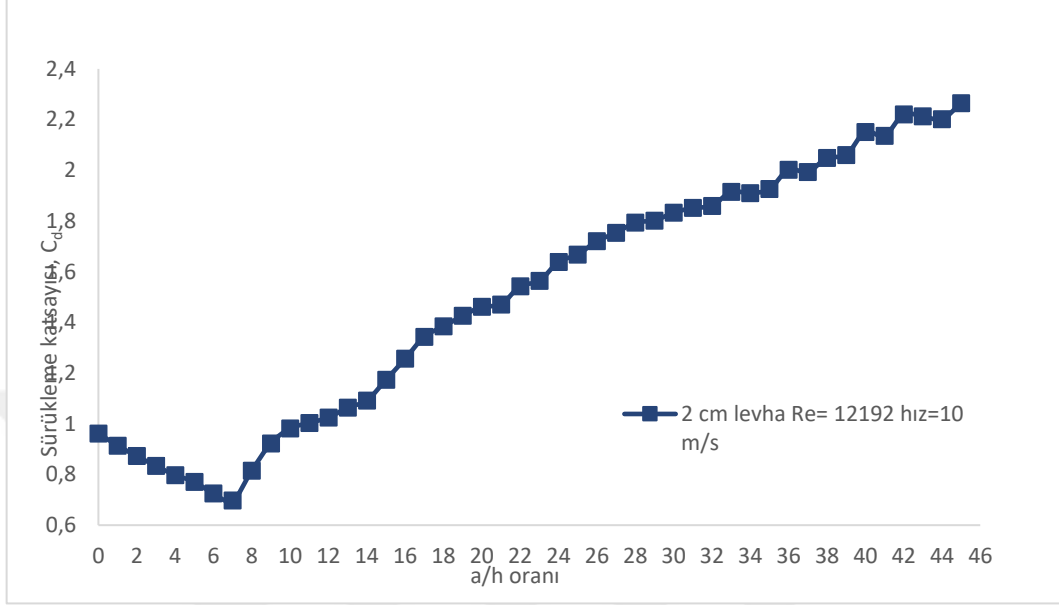


Şekil 4.13. 5 cm yükseklikteki levhalarda sürüklenme kuvveti a/h oran değişimi (D , a/h)

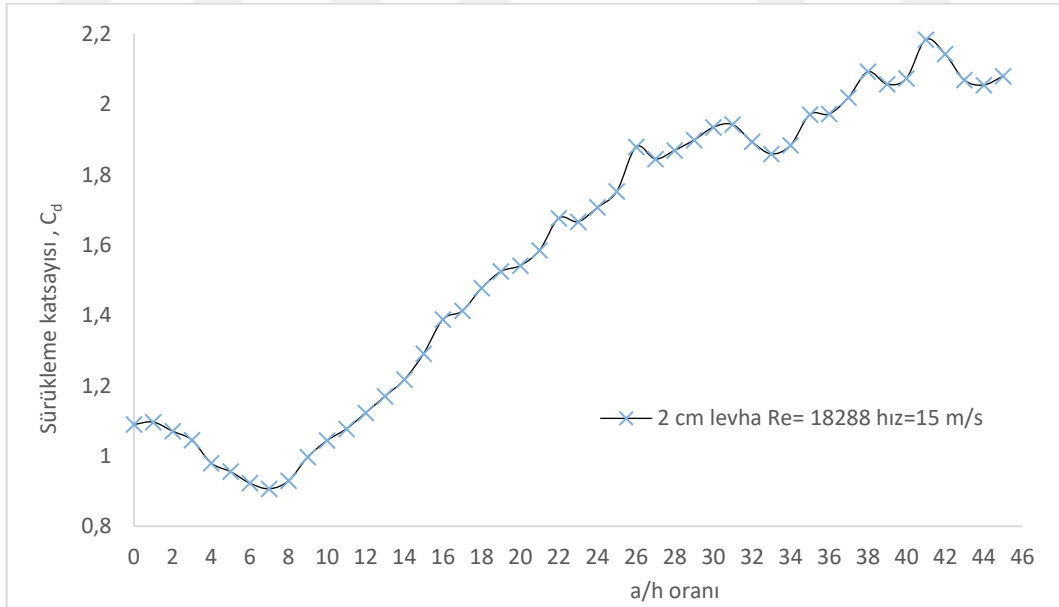
4.2.3. Sürüklenme katsayısı mesafe değişim grafiği (C_d , a/h)

3. deney düzeneği ile yapılan ölçümlerde elde edilen sürüklenme kuvvetleri kullanılarak sürüklenme katsayıları 2-3 ve 5 cm yükseklikteki levha plakalar için 15- 30 m/s hızlarda hesaplanarak Şekil 4.15-28 de grafikler halinde verilmiştir. EK 3.1’de 2 EK 3.2. 3 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h , C_d), EK 3.2’de 3 EK 3.2. 3 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h , C_d) ve EK 3.3’te 5

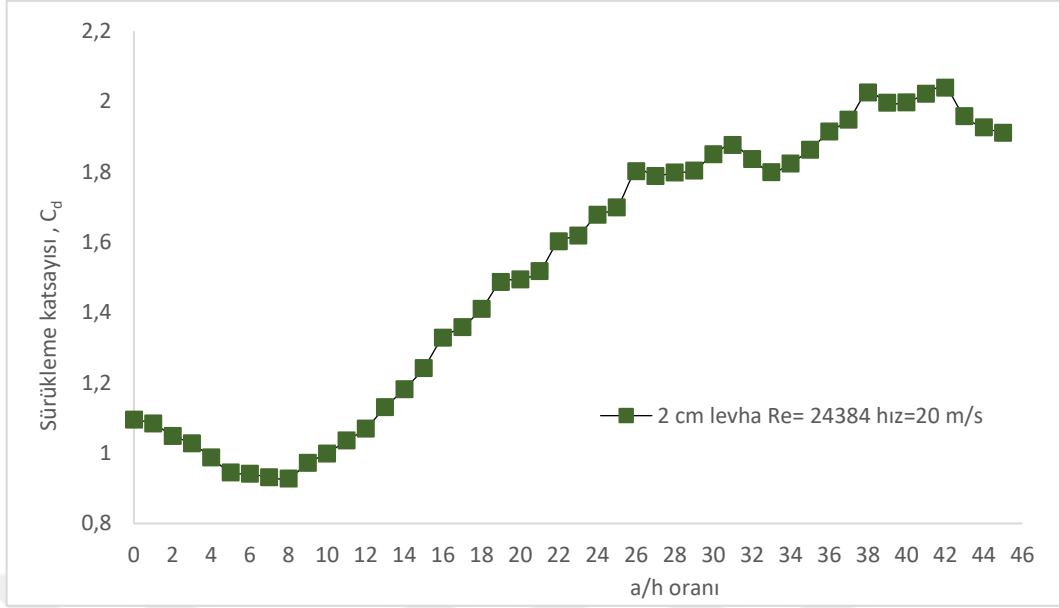
EK 3.2. 3 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h , C_d) sayısal değerler tablo halinde verilmiştir.



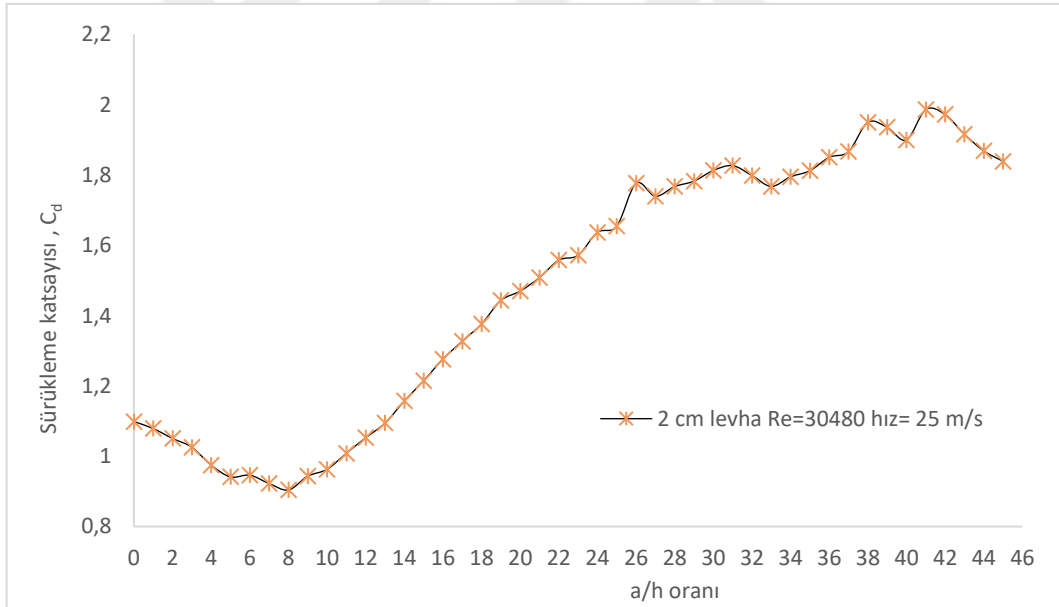
Şekil 4.14. 2 cm yükseklikteki levhalarda 10 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}$, C_d)



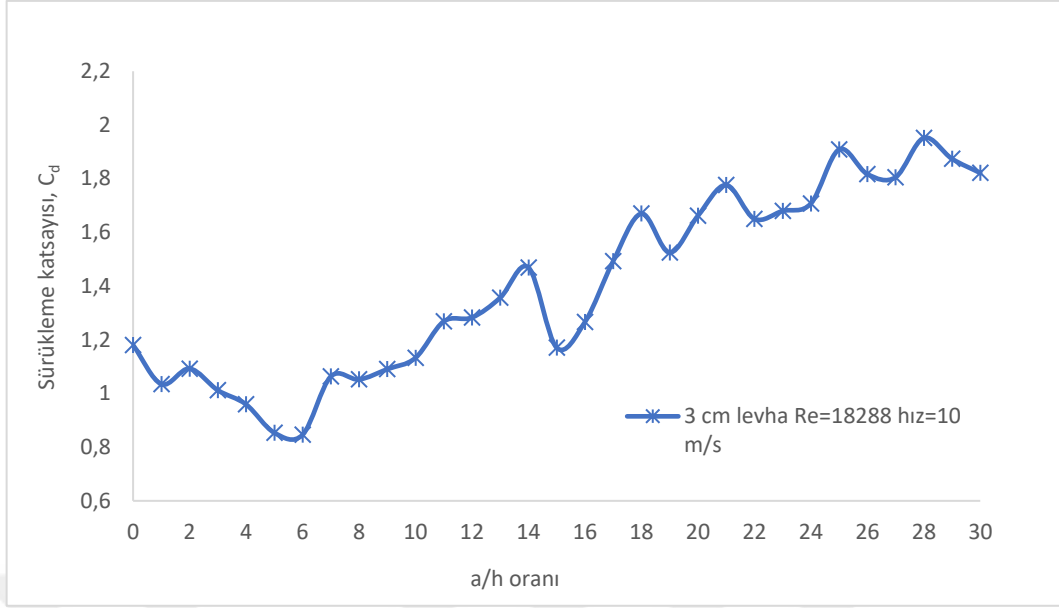
Şekil 4.15. 2 cm yükseklikteki levhalarda 15 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}$, C_d)



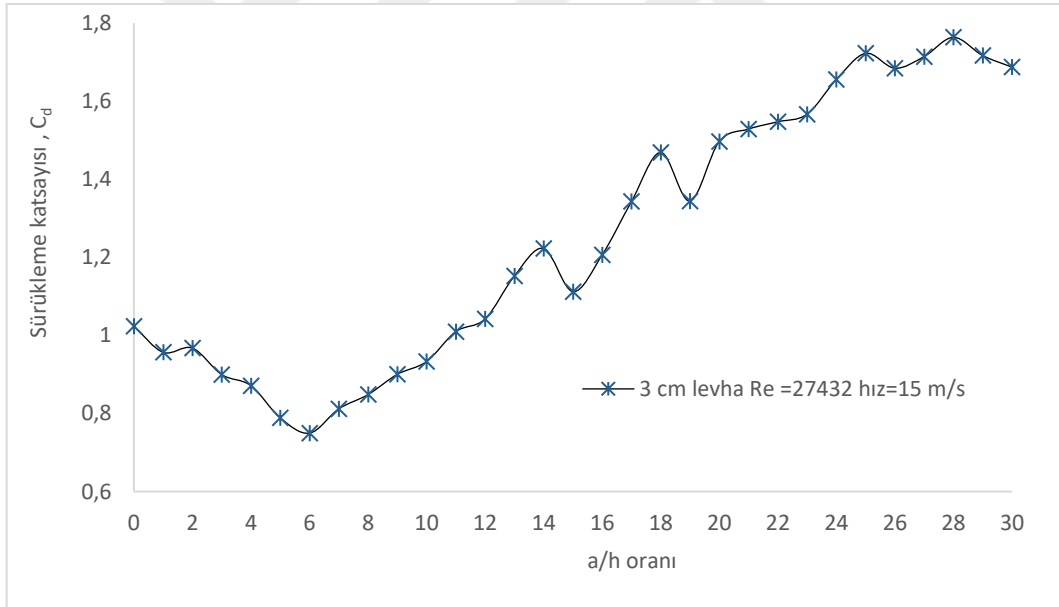
Şekil 4.16. 2 cm yükseklikteki levhalarda 20 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklemeye katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



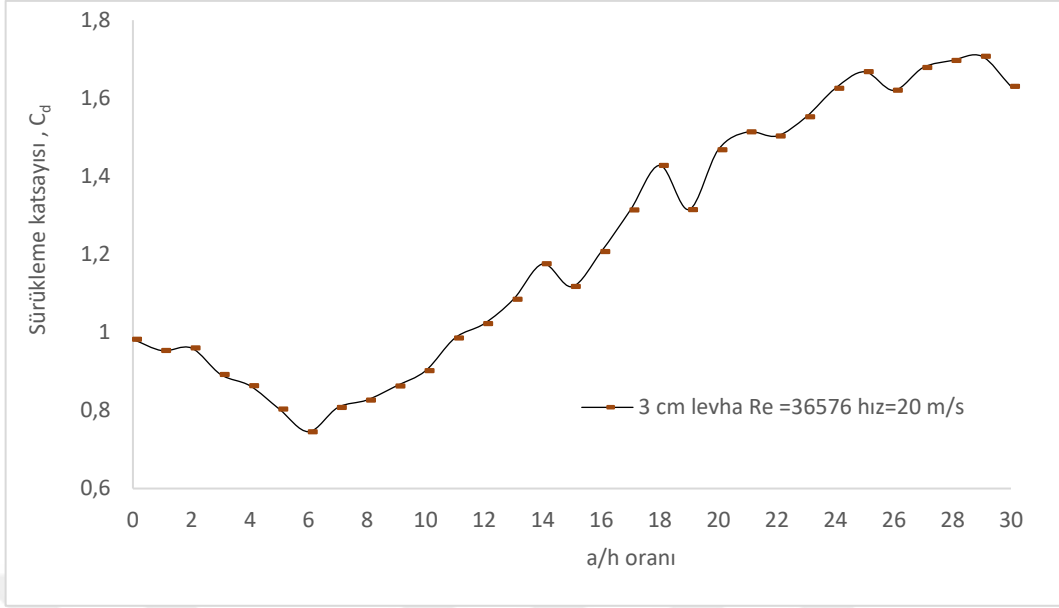
Şekil 4.17. 2 cm yükseklikteki levhalarda 25 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklemeye katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



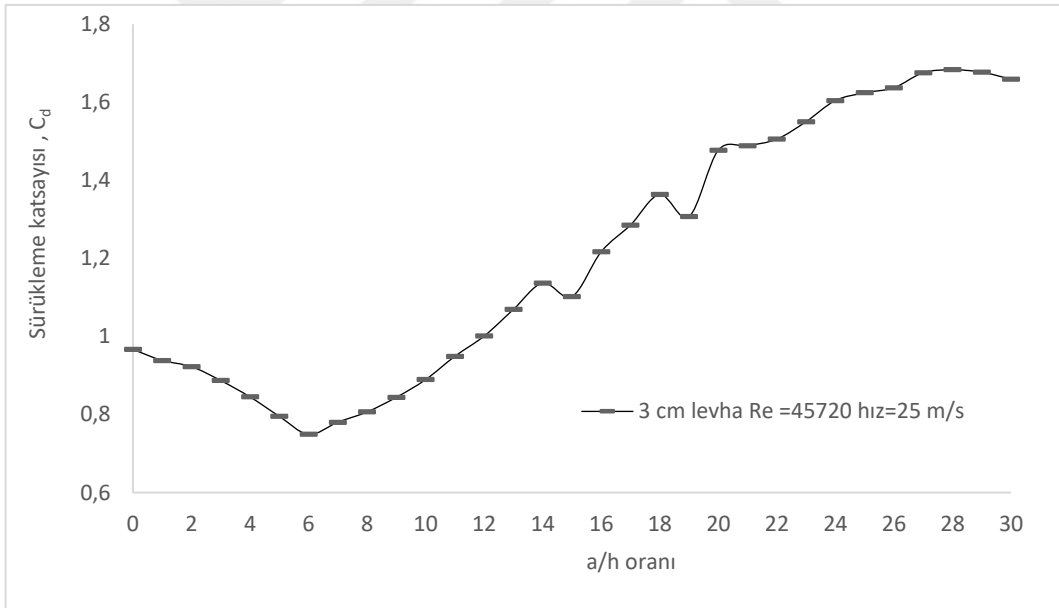
Şekil 4.18. 2 cm yükseklikteki levhalarda 10 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



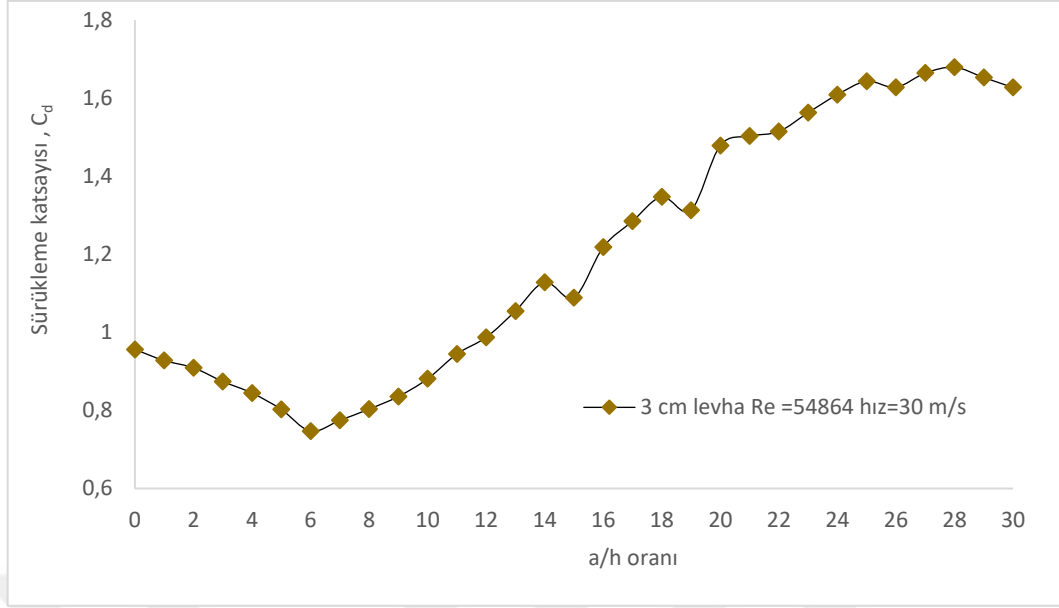
Şekil 4.19. 3 cm yükseklikteki levhalarda 15 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



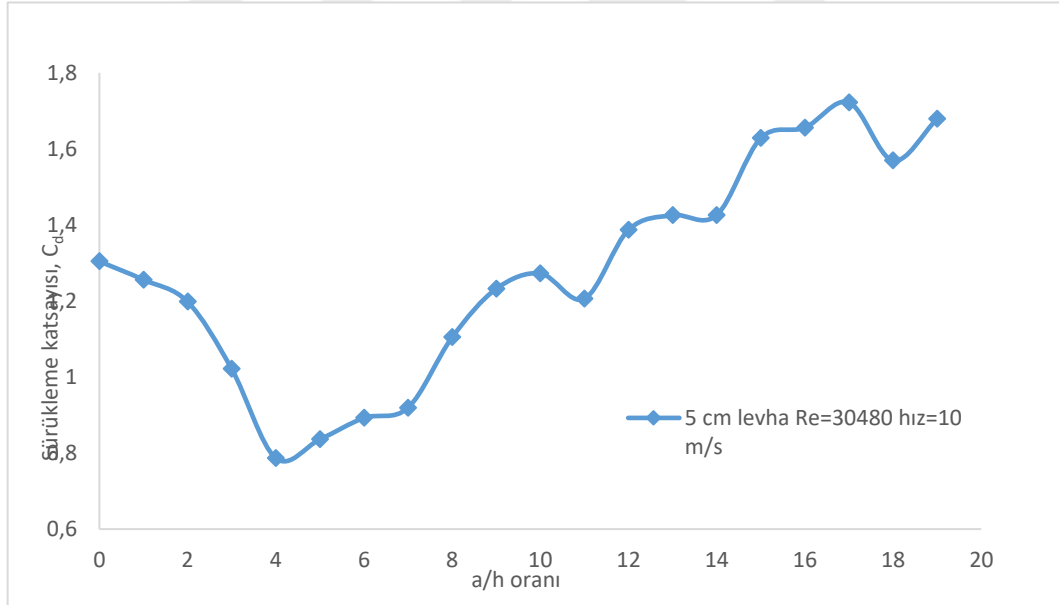
Şekil 4.20. 3 cm yükseklikteki levhalarda 20 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



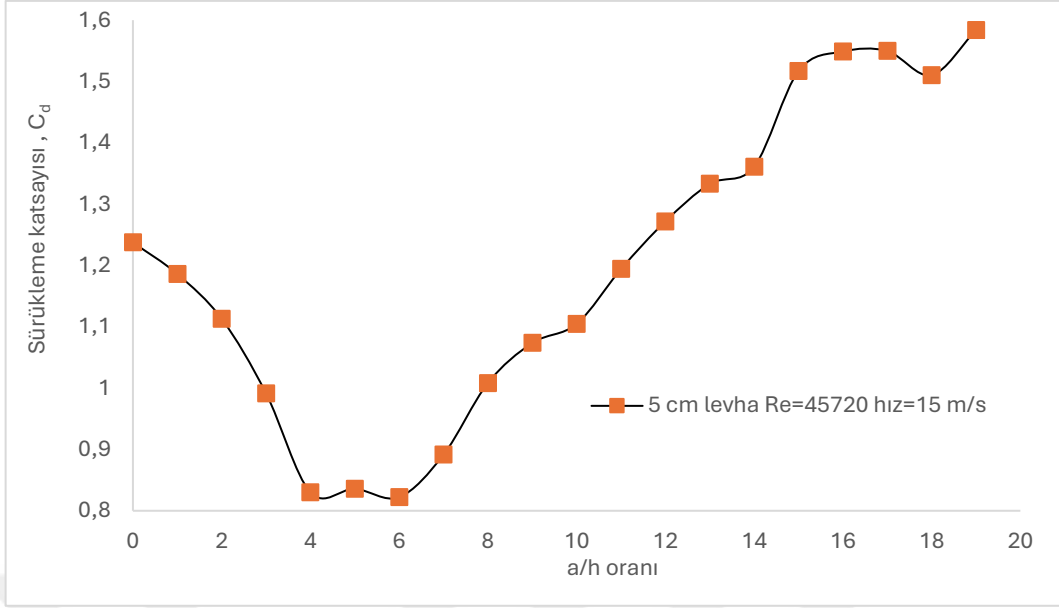
Şekil 4.21. 3 cm yükseklikteki levhalarda 25 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



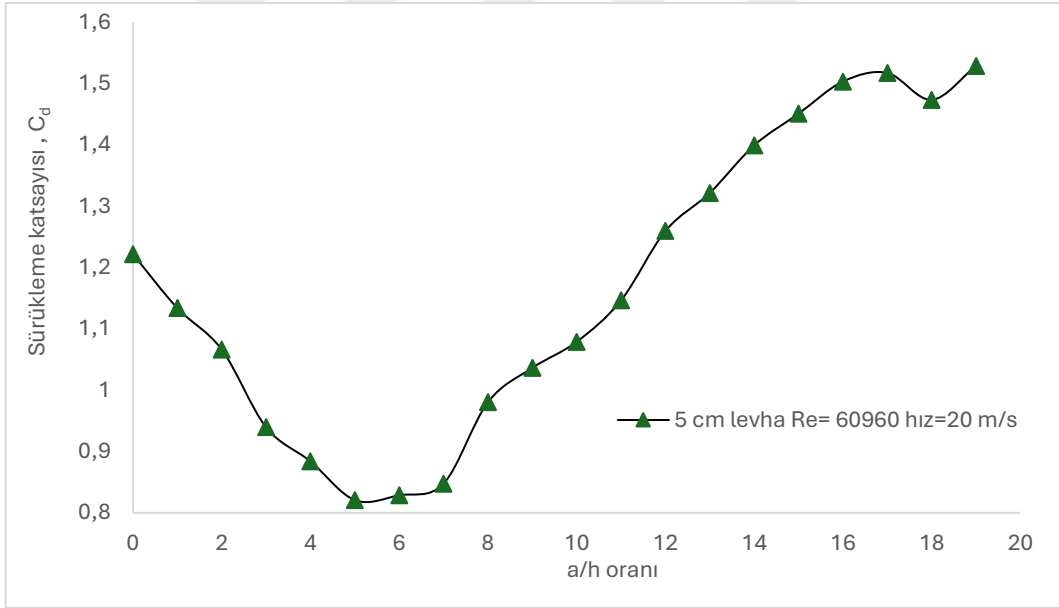
Şekil 4.22. 3 cm yükseklikteki levhalarda 30 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklemeye katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



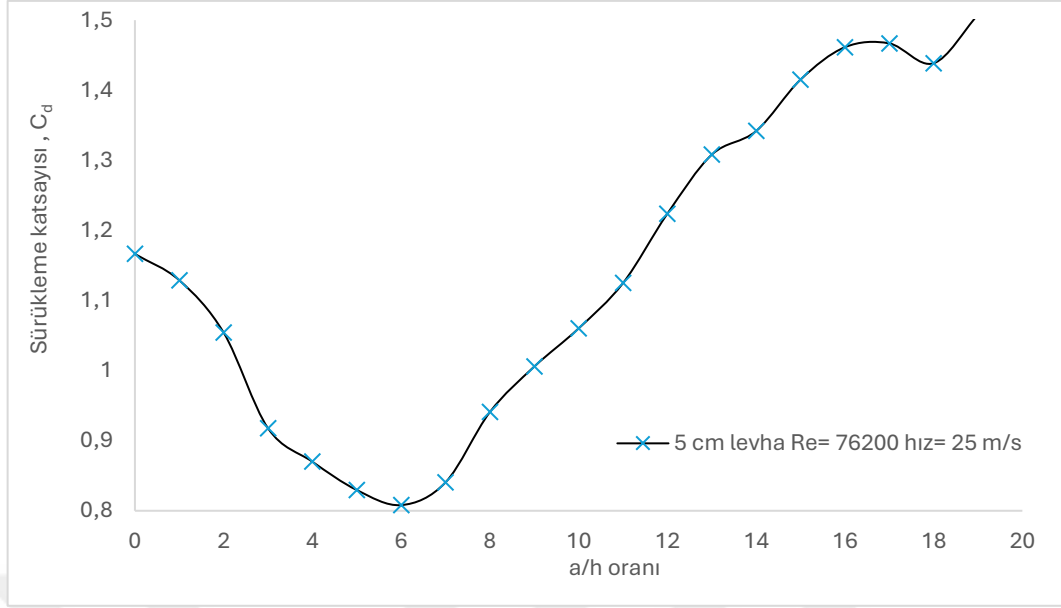
Şekil 4.23. 5 cm yükseklikteki levhalarda 10 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklemeye katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



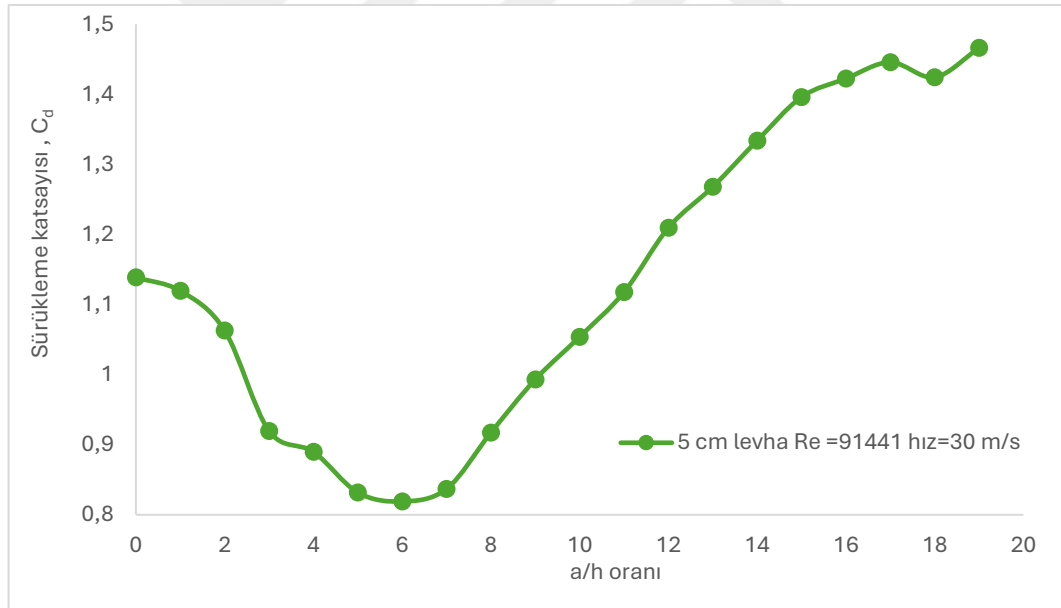
Şekil 4.24. 5 cm yükseklikteki levhalarda 15 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklemeye katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



Şekil 4.25. 5 cm yükseklikteki levhalarda 20 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklemeye katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



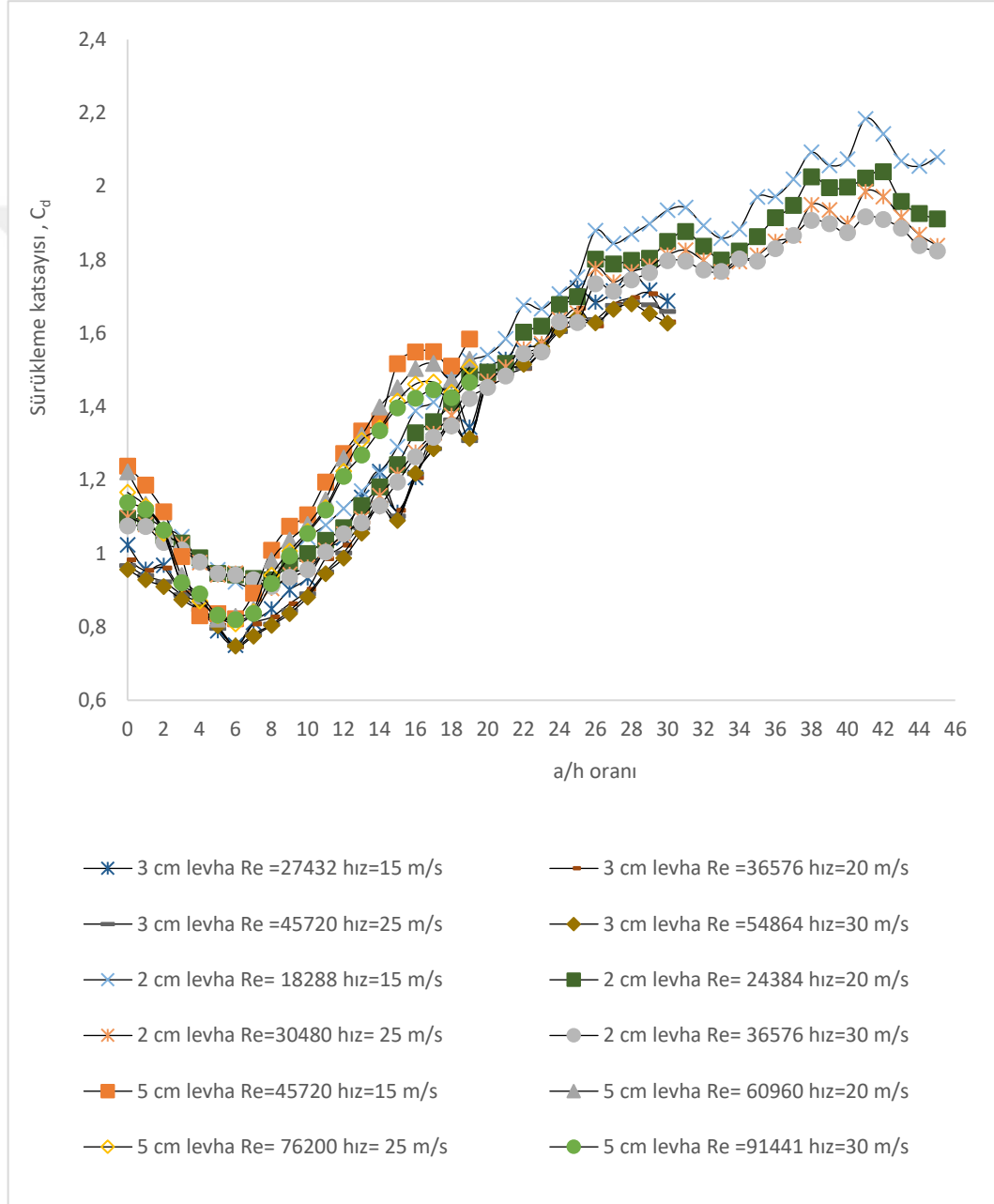
Şekil 4.26. 5 cm yükseklikteki levhalarda 25 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)



Şekil 4.27. 5 cm yükseklikteki levhalarda 30 m/s hızda levha plakalar arası a/h değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)

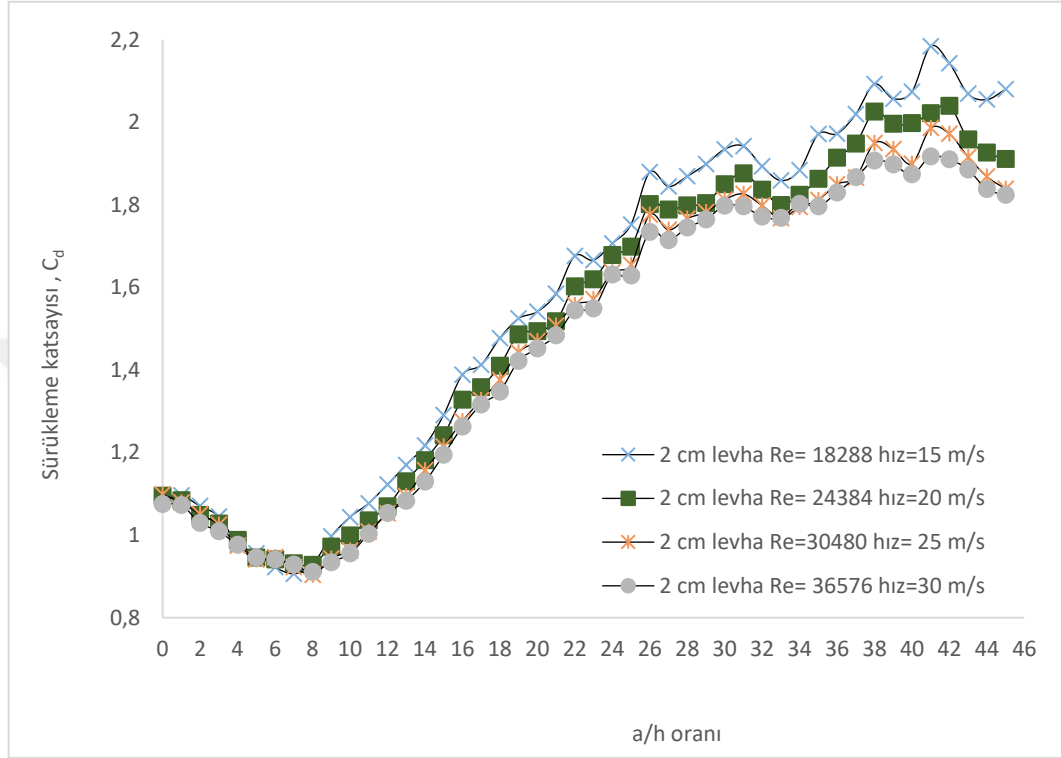
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Şekil 5.1 de 2-3 ve 5 cm yüksekliğe sahip levha plakaların 15-30 m/s hızlarda a/h mesafe oranı değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayı değişimleri tek bir grafikte verilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca bu hız değerlerine karşılık gelen Reynolds sayılarında hesaplanarak yazılmıştır. Ayrıca 10 m/s hızlarda ölçülen değerler diğer sonuçlarla uyumlu olmadığı için çıkarılmıştır.



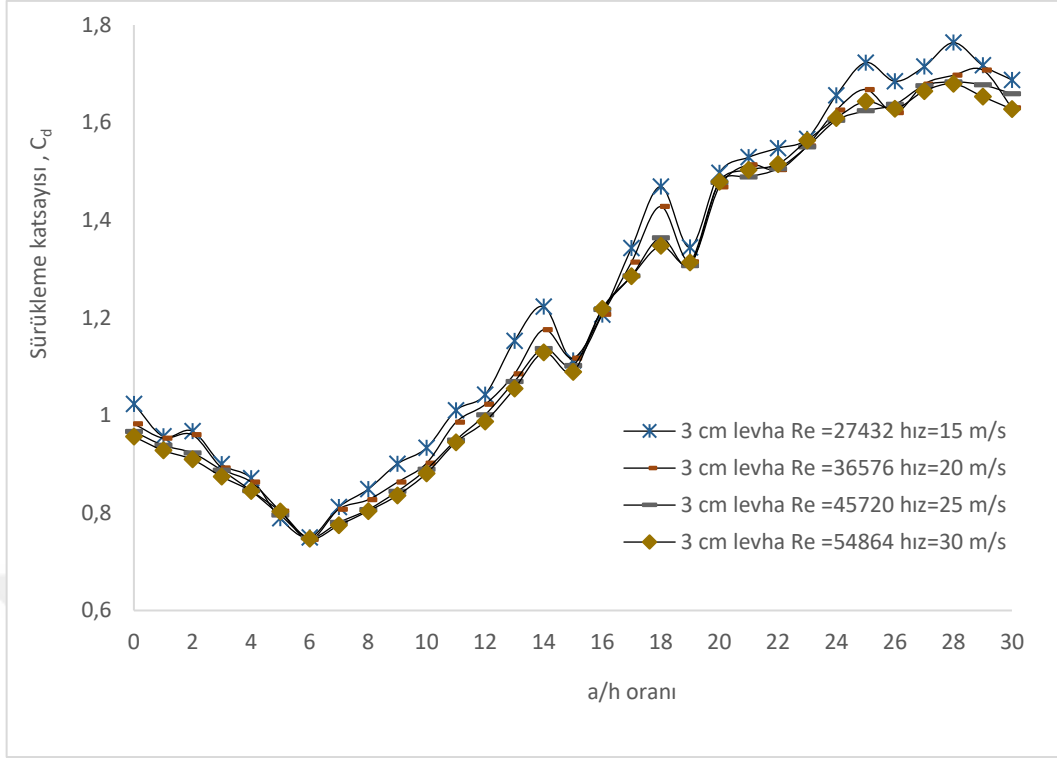
Şekil 5.1. 2-3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda levha plakalar arası a/h değişimine bağlı olarak 15-20-25 ve 30 m/s hızlarda sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}$, C_d)

Şekil 5.2 de 2 cm yüksekliğe sahip levha plakaların 15-30 m/s hızlarda a/h mesafe oranı değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayı değişimleri tek bir grafikte verilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca bu hız değerlerine karşılık gelen Reynolds sayılarında hesaplanarak yazılmıştır.



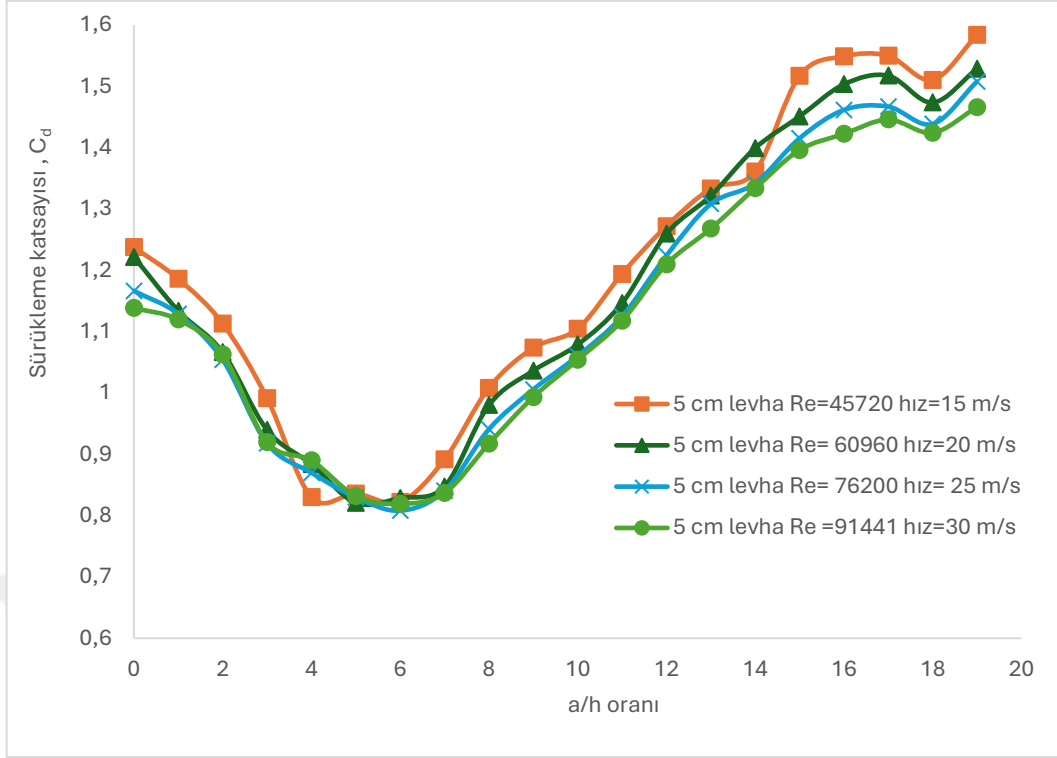
Şekil 5.2. 2 cm yükseklikteki levhalarda 15-30 m/s hızlarda levha plakalar arası a/h oranı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}, C_d$)

Şekil 5.3 de 3 cm yüksekliğe sahip levha plakaların 15-30 m/s hızlarda a/h mesafe oranı değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayı değişimleri tek bir grafikte verilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca bu hız değerlerine karşılık gelen Reynolds sayılarında hesaplanarak yazılmıştır.



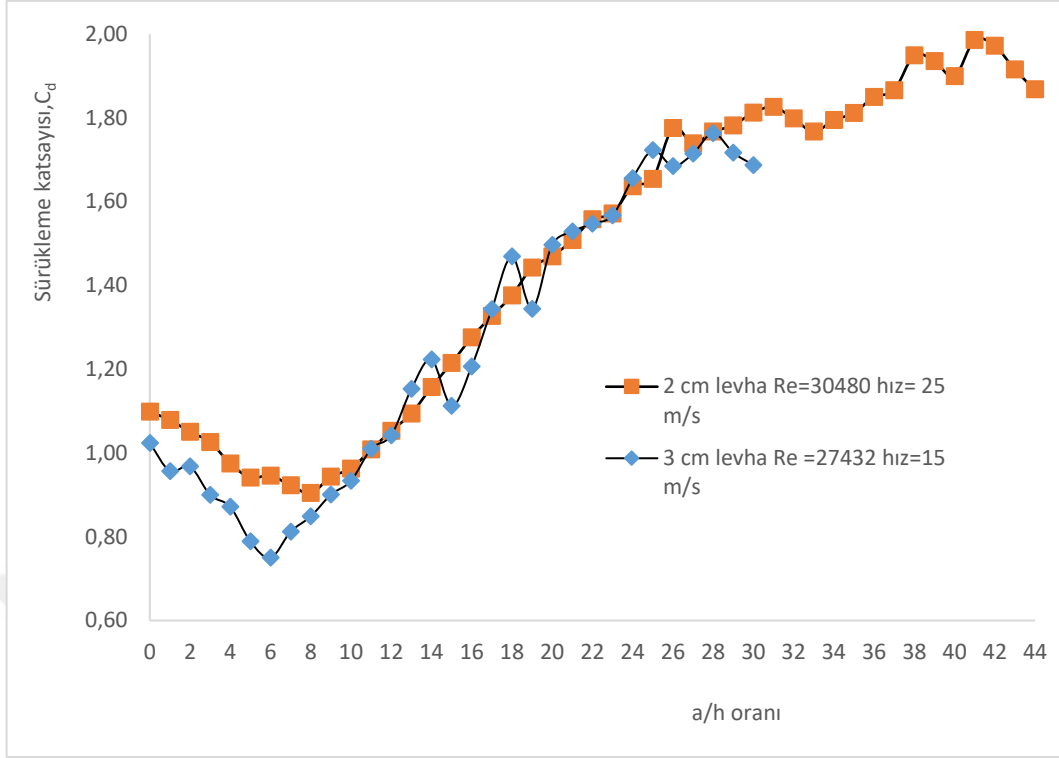
Şekil 5.3. 3 cm yükseklikteki levhalarda 15-30 m/s hızlarda levha plakalar arası a/h oranı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}$, C_d)

Şekil 5.4 de 2 cm yüksekliğe sahip levha plakaların 15-30 m/s hızlarda a/h mesafe oranı değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimleri tek bir grafikte verilmiştir. Bu grafiklerde ayrıca bu hız değerlerine karşılık gelen Reynolds sayılarında hesaplanarak yazılmıştır.

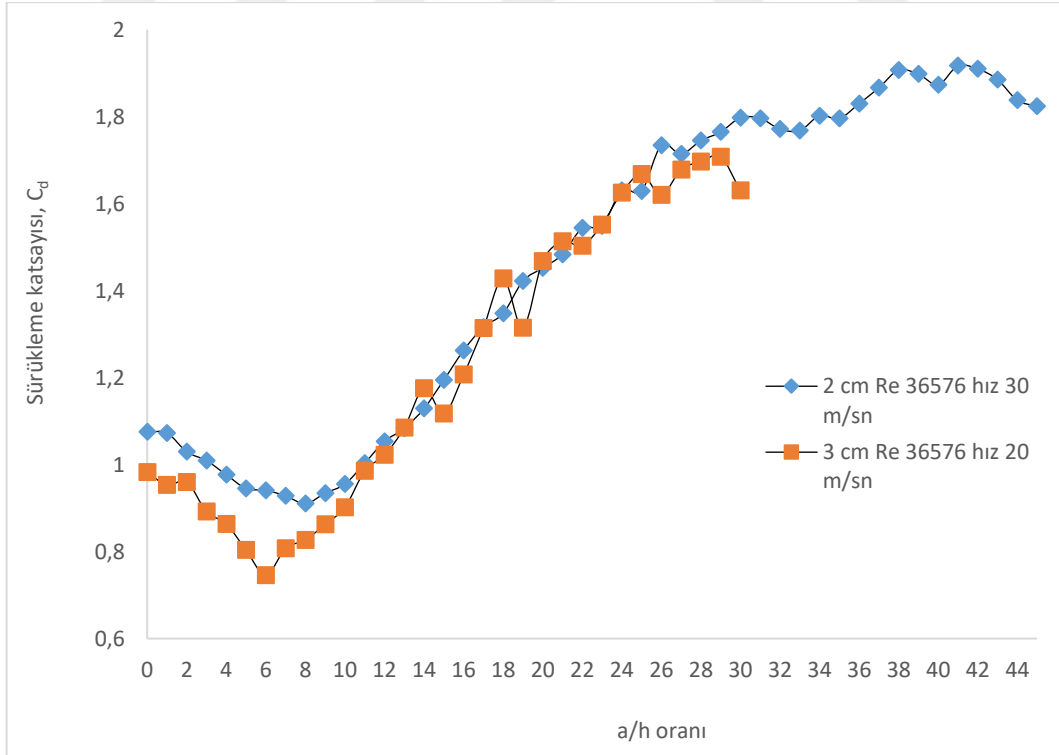


Şekil 5.4. 5 cm yükseklikteki levhalarda 15-30 m/s hızlarda levha plakalar arası a/h oranı değişimi ile sürüklenme katsayısı değişimi ($\frac{a}{h}$, C_d)

Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 de aynı veya yakın Reynolds sayılarına sahip levhalarda a/h oran değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişim grafikleri verilmiştir.



Şekil 5.5. Aynı veya yakın Reynolds sayılarına sahip levhalarda a/h değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimi (a/h , C_d)



Şekil 5.6. Aynı veya yakın Reynolds sayılarına sahip levhalarda a/h değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimi (a/h , C_d)



Şekil 5.7. Aynı veya yakın Reynolds sayılarına sahip levhalarda a/h değişimine bağlı olarak sürüklenme katsayısı değişimi (a/h, Cd)

Sonuç olarak;

Anlık ve ortalama sürüklenme katsayısı zaman grafikleri göz önüne alındığında a/h oranı ve hız artışına bağlı olarak sürüklenme katsayılarındaki anlık değişimler daha yüksek olmuştur. Buda mesafe ve hız artışı ile akış rejiminin değiştiğini göstermektedir.

3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda $0 > \frac{a}{h} > 6$ aralığında, 2 cm yükseklikteki levhalarda ise $0 > \frac{a}{h} > 7$ aralığında a/h oranı arttıkça sürüklenme katsayısı sürekli düşmektedir.

3 ve 5 cm yükseklikteki levhalarda en düşük sürüklenme katsayısı a/h=6 mesafesinde ölçülürken 2 cm yükseklikteki levhalarda a/h=7 mesafe uzaklığında ölçülmüştür.

5 cm levhalarda $6 > \frac{a}{h} > 18$ aralığında, 3 cm levhalarda ise $6 > \frac{a}{h} > 30$ aralığında ve 2 cm levhalarda ise $7 > \frac{a}{h} > 45$ aralığında a/h oranı arttıkça sürüklenme katsayısı sürekli artmaktadır.

Yapılan deneylerde benzer Reynolds sayılarında sürüklenme katsayısı sonuçlarının birbiri ile çakışmamasının bir nedeni Reynolds sayısı hesaplamalarında kullanılan karakteristik uzunluğun ilgili akışlardaki viskoz akışın etkisini tam ve doğru bir şekilde göstermediği söylenebilir.

KAYNAKÇA

- [1] Crocker, D. H. (2011). *Secret Nazi Aircraft: Luftwaffe's Advanced Aircraft Projects 1939–1945* (2nd ed.). Hobby Books.
- [2] Stephenson, J. D. (1949). *The effects of aerodynamic brakes upon the speed characteristics of airplanes* (NACA Technical Note No. 1939). Washington, DC: National Advisory Committee for Aeronautics.
- [3] Raghunathan, R. S., Kim, H.-D., and Setoguchi, T. (2002). Aerodynamics of high-speed railway train. *Progress in Aerospace Sciences*, 38(6–7), 469–514.
- [4] Schetz, J. A. (2001). Aerodynamics of high-speed trains. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 33, 371–414.
- [5] Genta, G. (1997). *Motor vehicle dynamics: modeling and simulation* (Vol. 43). Singapore: World Scientific.
- [6] Byrne, C. E. I. (2016). Review of *Aerodynamics of Road Vehicles* (4th ed.), edited by W.-H. Hucho. *The Aeronautical Journal*, 103(1026), 398–398.
- [7] Katz, J. (2006). Aerodynamics of race cars. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38, 27–63.
- [8] Li, Y., Li, T., and Zhang, J. (2023). Effect of aerodynamic braking plates installed in inter-car gap on aerodynamic characteristics of high-speed train. *Alexandria Engineering Journal*, 71, 209–225.
- [9] Çiçek, M., and Durmuş, G. (2019). Aerodynamic control in high-speed trains with a novel design of wing set. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 6(1), 1–8.
- [10] Piechna, J., Rudniak, L., and Piechna, A. (2009). CFD analysis of the central engine generic sports car aerodynamics. In *Proceedings of the Fourth European Automotive Simulation Conference*, Munich, Germany, 6–7 July 2009.
- [11] Janson, T., and Piechna, J. (2015). Numerical analysis of aerodynamic characteristics of a high-speed car with movable bodywork elements. *Archive of Mechanical Engineering*, 62(4), 497–512.
- [12] Kurec, K., Remer, M., Mayer, T., Tudruj, S., and Piechna, J. (2019). Flow control for a car-mounted rear wing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 152, 384–399.
- [13] Piechna, J. (2021). A review of active aerodynamic systems for road vehicles. *Energies*, 14(23), 7887.
- [14] Corno, M., Bottelli, S., Panzani, G., Tanelli, M., Spelta, C., and Savaresi, S. M. (2013). Improving high speed road-holding using actively controlled aerodynamic surfaces. In *Proceedings of the European Control Conference*, Zurich, Switzerland.
- [15] Corno, M., Bottelli, S., Tanelli, M., Spelta, C., and Savaresi, S. M. (2014). Active control of aerodynamic surfaces for ride control in sport vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*, 47(3), 7553–7558.

- [16] Pietrzak, P., and Piechna, J. (2013). Numerical investigation of the controllable wing stall caused by the air injection. *Archive of Mechanical Engineering*, 60(2).
- [17] Takami, H., and Maekawa, H. (2017). Characteristics of a wind-actuated aerodynamic braking device for high-speed trains. *Journal of Physics: Conference Series*, 822, 012061.
- [18] Yoshimura, M., Saito, S., Hosaka, S., and Tsunoda, H. (2000). Characteristics of the aerodynamic brake of the vehicle on the Yamanashi maglev test line. *Quarterly Report of the Railway Technical Research Institute*, 41(2), 74–78.
- [19] Sawada, K. (1996). Development of magnetically levitated high speed transport system in Japan. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(4), 2230–2235.
- [20] Shirakuni, N., Endo, Y., Takahashi, K., and Yamamoto, K. (2002). Overview of new vehicles for the Yamanashi Maglev test line. In *Proceedings of the International Conference on Magnetically Levitated Systems (Maglev 2002)*, Lausanne, Switzerland.
- [21] Wu, M.-L., Zhu, Y.-Y., Tian, C., and Fei, W.-W. (2011). Influence of aerodynamic braking on the pressure wave of a crossing high-speed train. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 12, 979–984.
- [22] Puharić, M., Matić, D., Linić, S., Ristić, S., and Lučanin, V. (2014). Determination of braking force on the aerodynamic brake by numerical simulations. *FME Transactions*, 42, 106–111.
- [23] Zuo, J., Wu, M., Tian, C., Xi, Y., Luo, Z., and Chen, Z. (2013). Aerodynamic braking device for high-speed trains: Design, simulation and experiment. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 228(3), 260–270.
- [24] Niu, J., Wang, Y., Wu, D., and Liu, F. (2020). Comparison of different configurations of aerodynamic braking plate on the flow around a high-speed train. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 655–668.
- [25] Niu, J., Wang, Y., Liu, F., and Chen, Z. (2020). Comparative study on the effect of aerodynamic braking plates mounted at the inter-carriage region of a high-speed train with pantograph and air-conditioning unit for enhanced braking. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206, 104360.
- [26] Li, P., Huang, S., Liu, Y., and Niu, J. (2023). Regularity and sensitivity analysis of main parameters of plate effects on the aerodynamic braking drag of a high-speed train. *Transportation Safety and Environment*, 5(2), tdac051.
- [27] Wang, X., Hu, X., Wang, P., Zheng, J., Li, H., Deng, Z., and Zhang, W. (2023). Numerical simulation and optimization on opening angles of aerodynamic braking plates sets for a maglev train. *Advances in Aerodynamics*, 5(1), 8.
- [28] Zhu, F., Xie, J., Lv, D., Xu, G., Yao, H., and Niu, J. (2024). Transient aerodynamic behavior of a high-speed Maglev train in plate braking under crosswind. *Physics of Fluids*, 36(3).

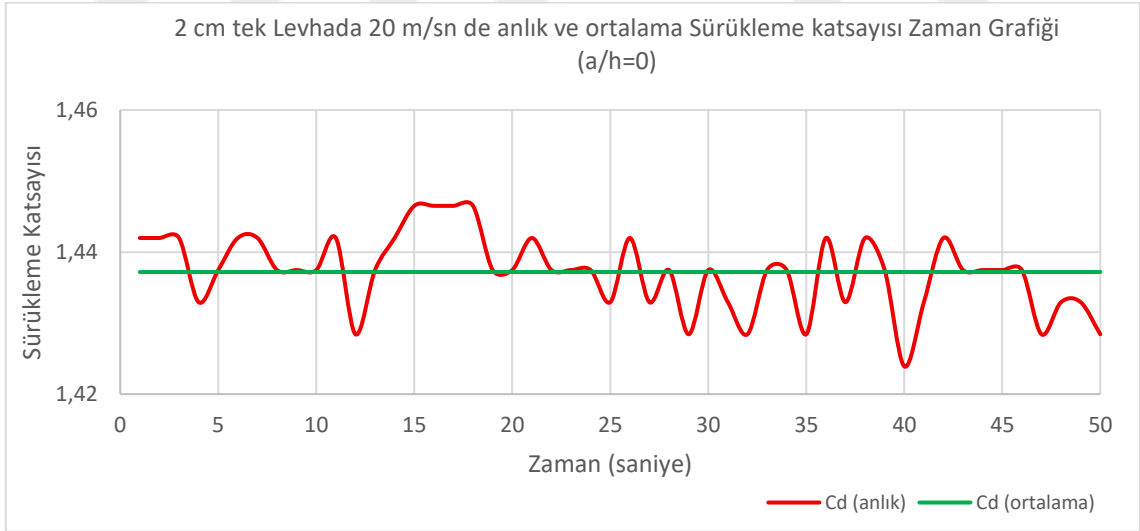
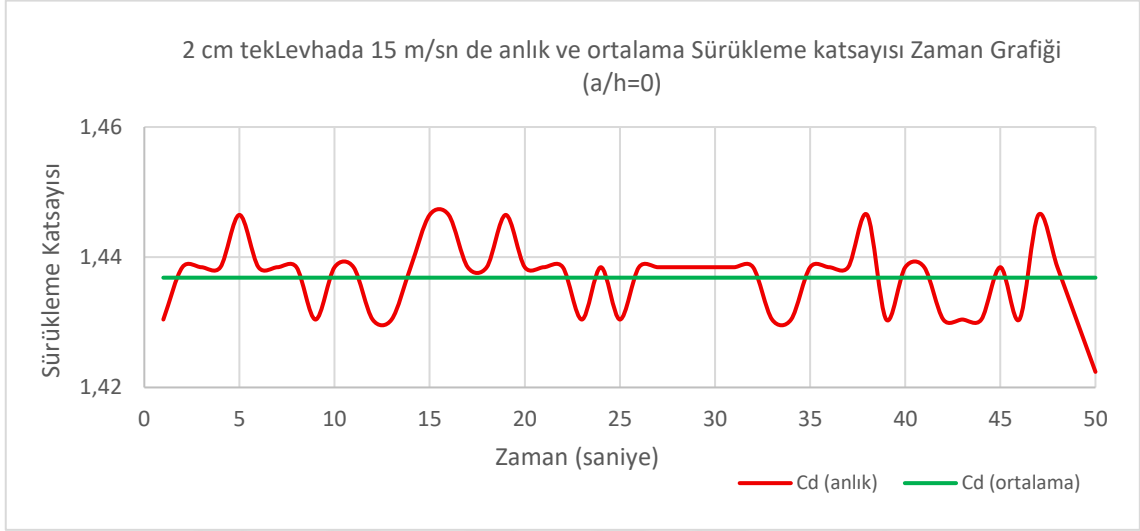
- [29] Heddleson, C. F., Brown, D. L., and Cliffe, R. T. (1957). *Summary of drag coefficients of various shaped cylinders*. Cincinnati, OH: General Electric Co. (Report No. ADA395503).
- [30] McAdams, W. H. (1954). *Heat transmission* (3rd ed.). New York: McGraw-Hill Book Company.
- [31] Donelli, R. S., Iannelli, P., Iuliano, E., and De Rosa, D. (2010). Suction optimization on thick airfoil to trap vortices. In *Conference of the Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics*.

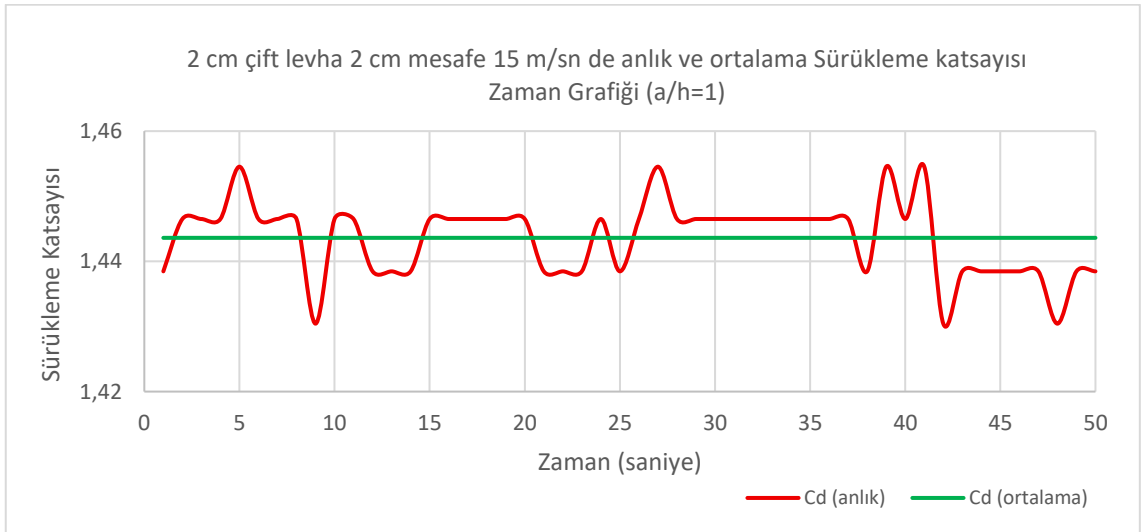
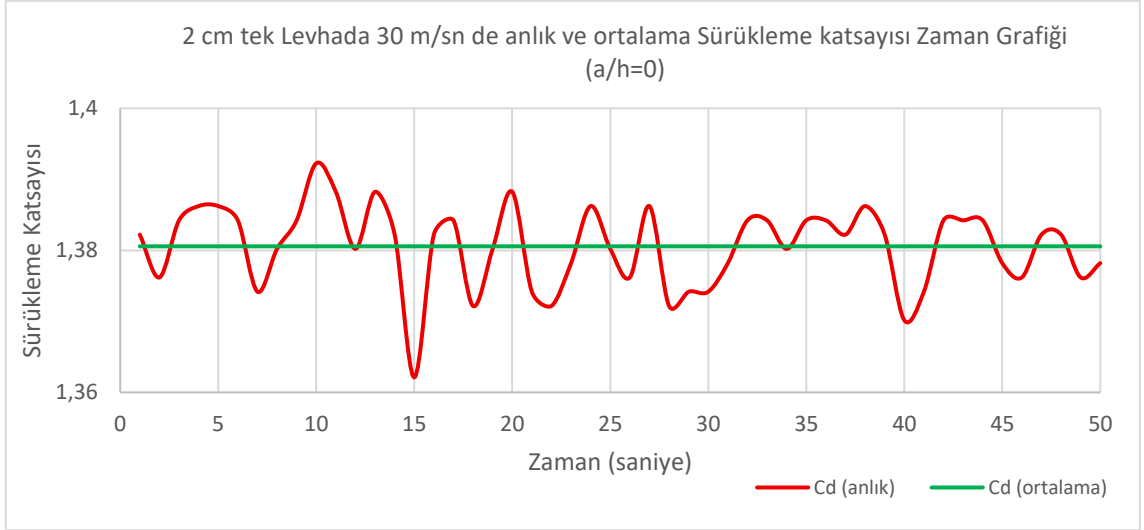
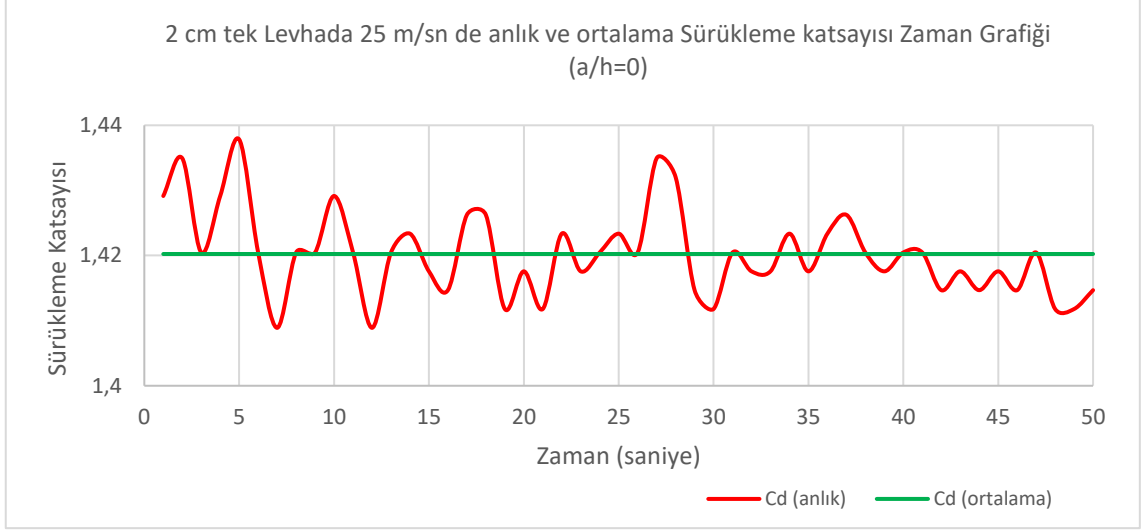


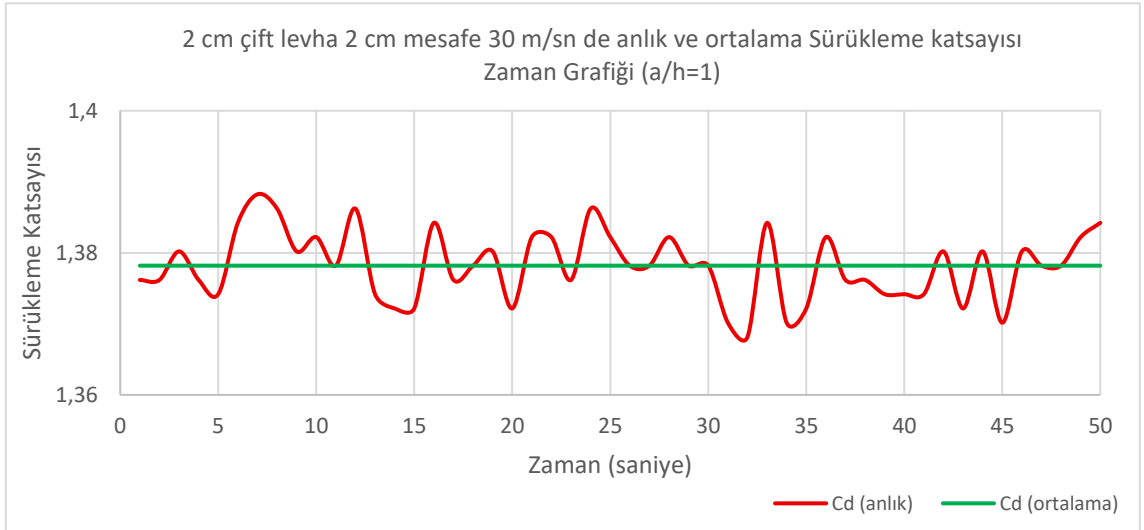
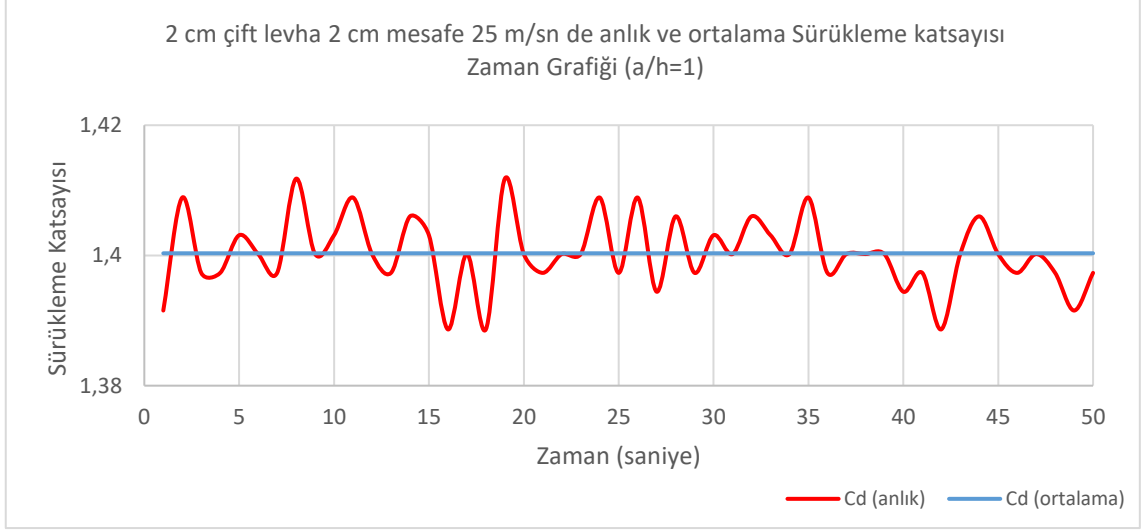
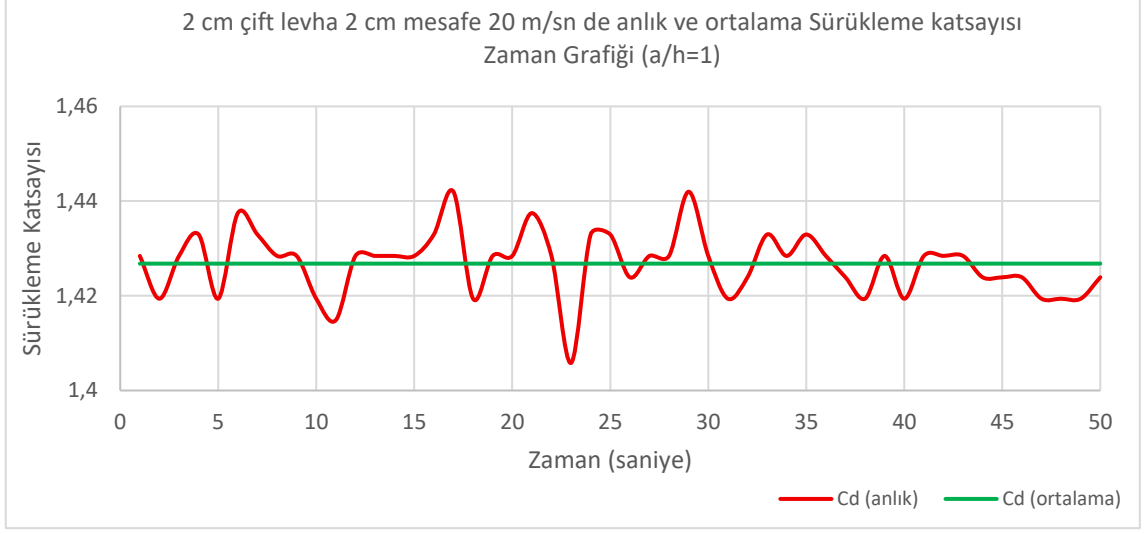
EKLER

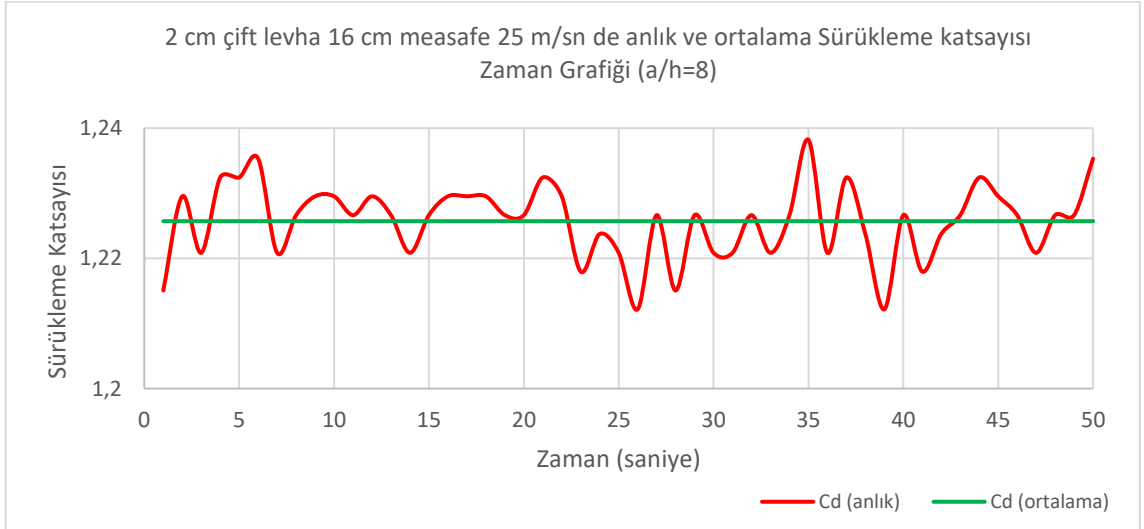
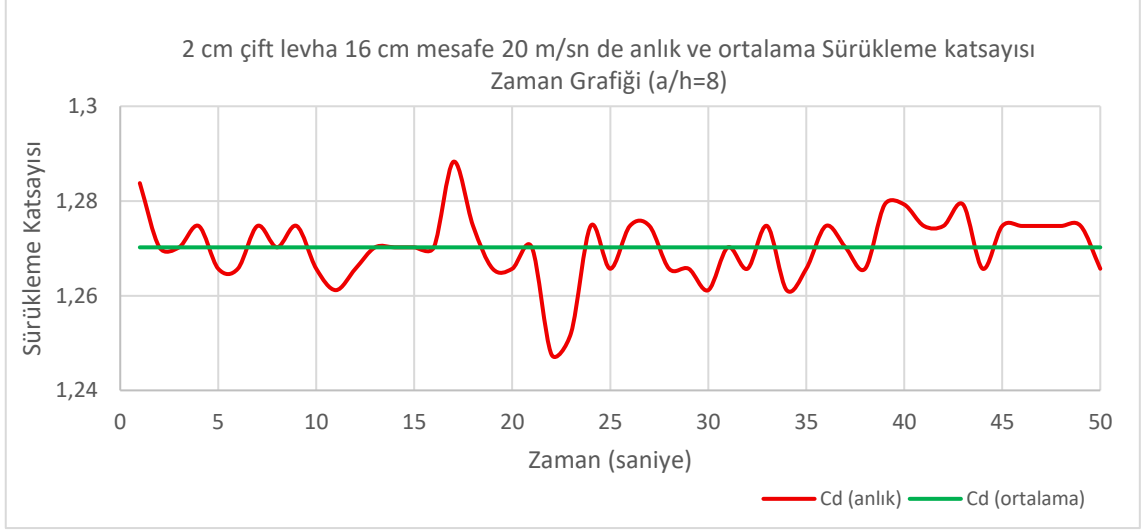
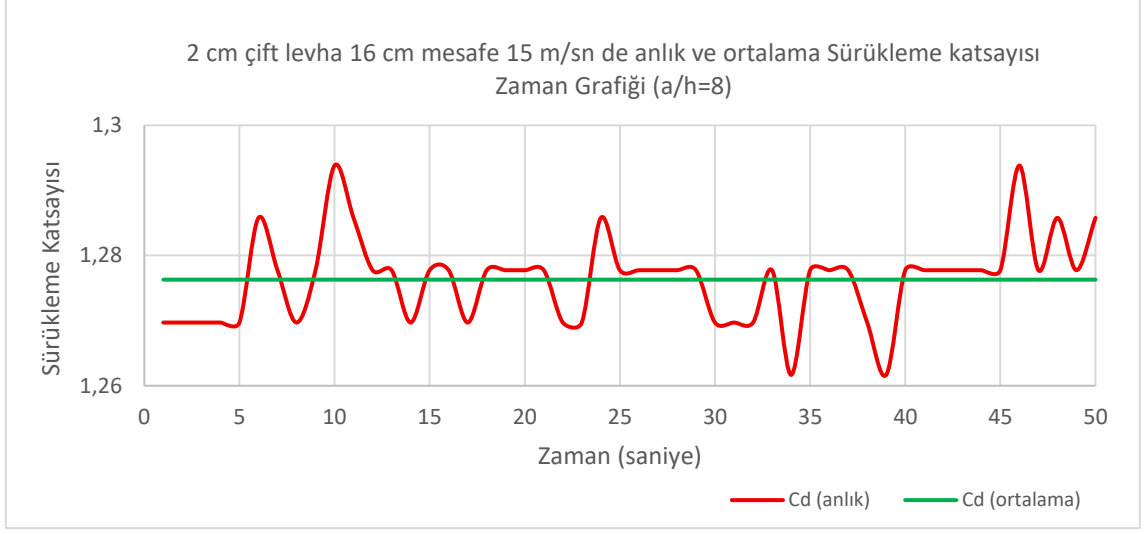
EK 1 Anlık ve ortalama sürüklenme katsayıları grafiği

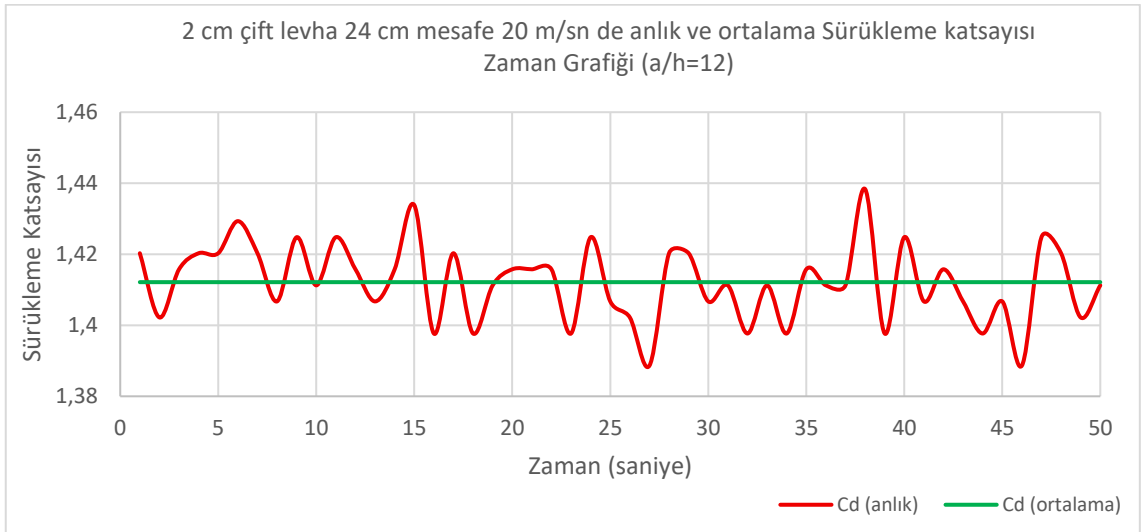
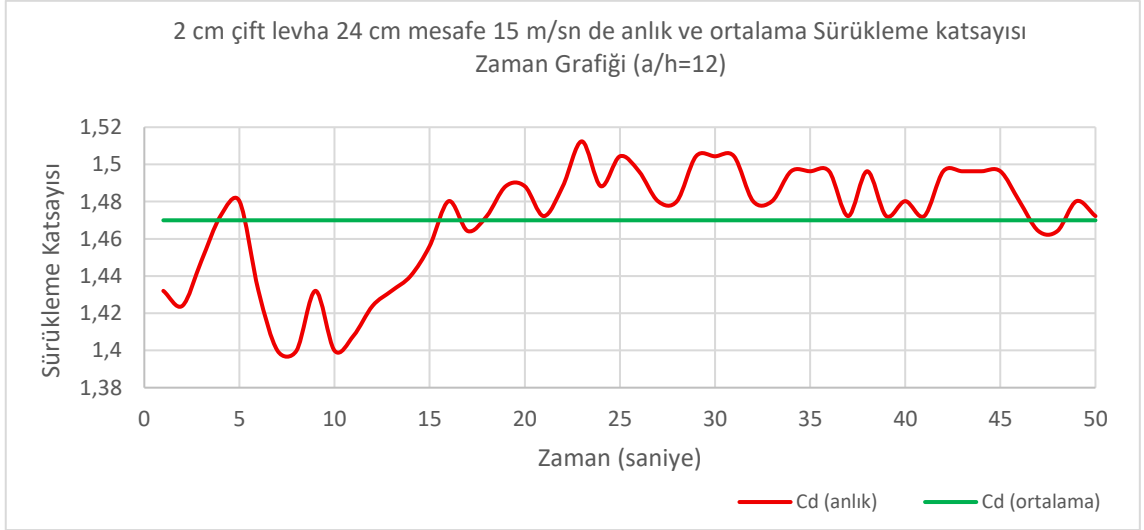
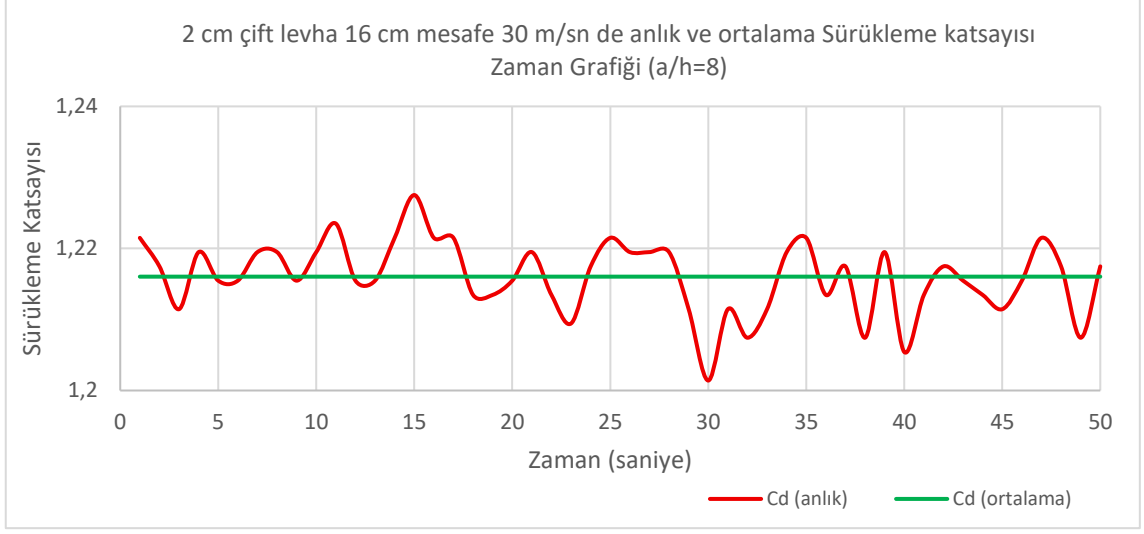
EK 1.1. 2 cm levhalarda anlık ve ortalama sürüklenme katsayıları grafiği

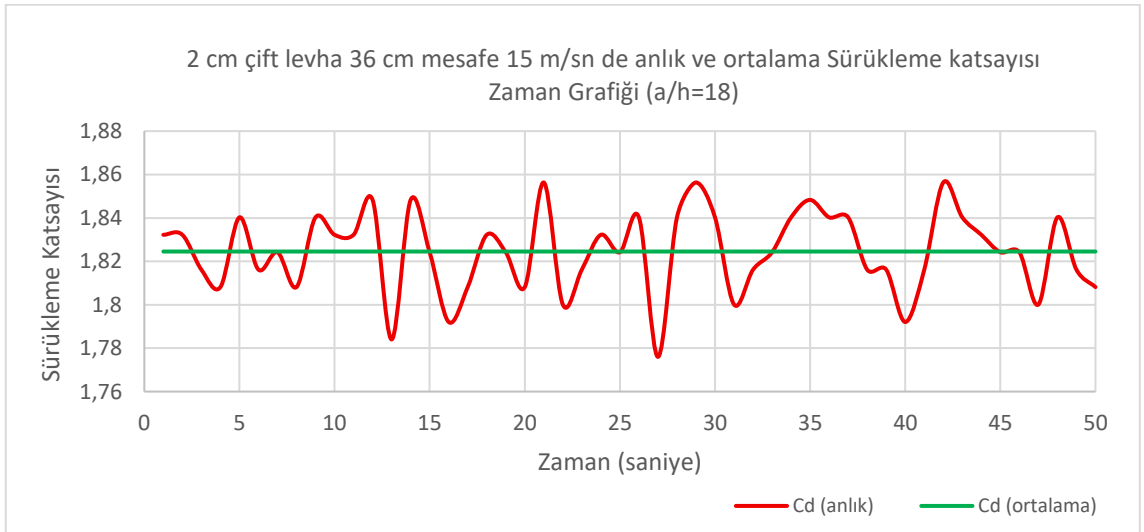
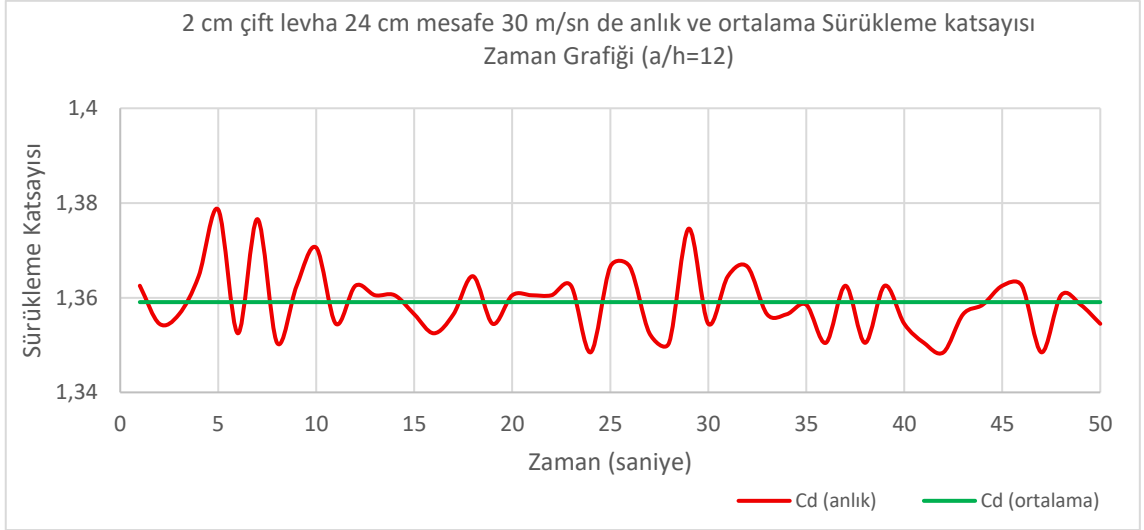
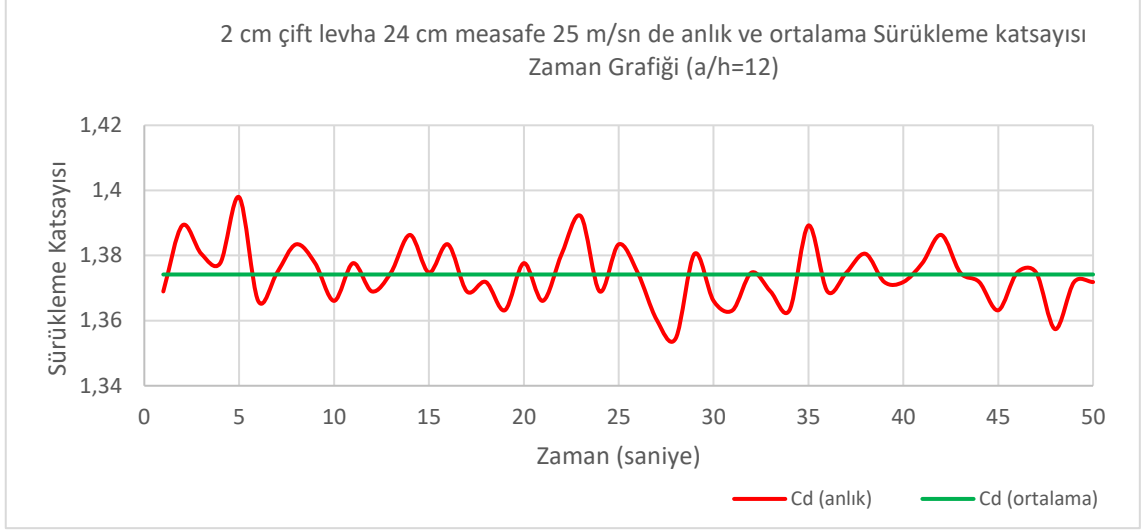


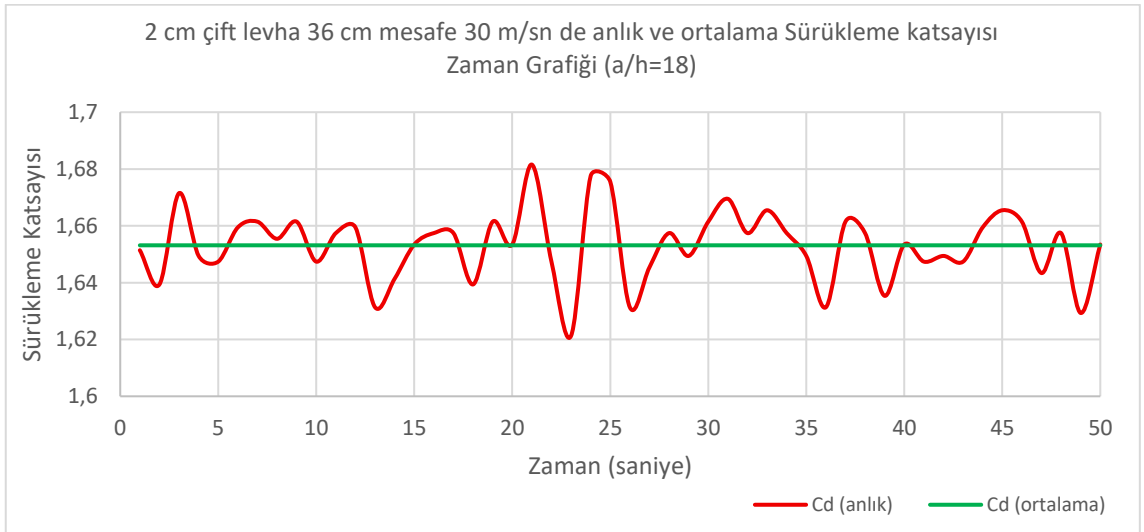
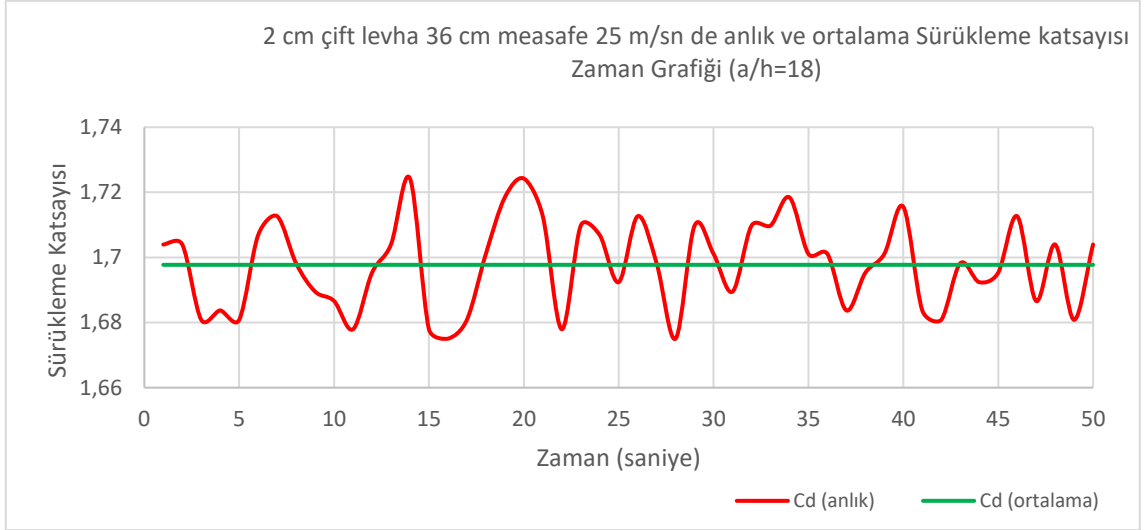
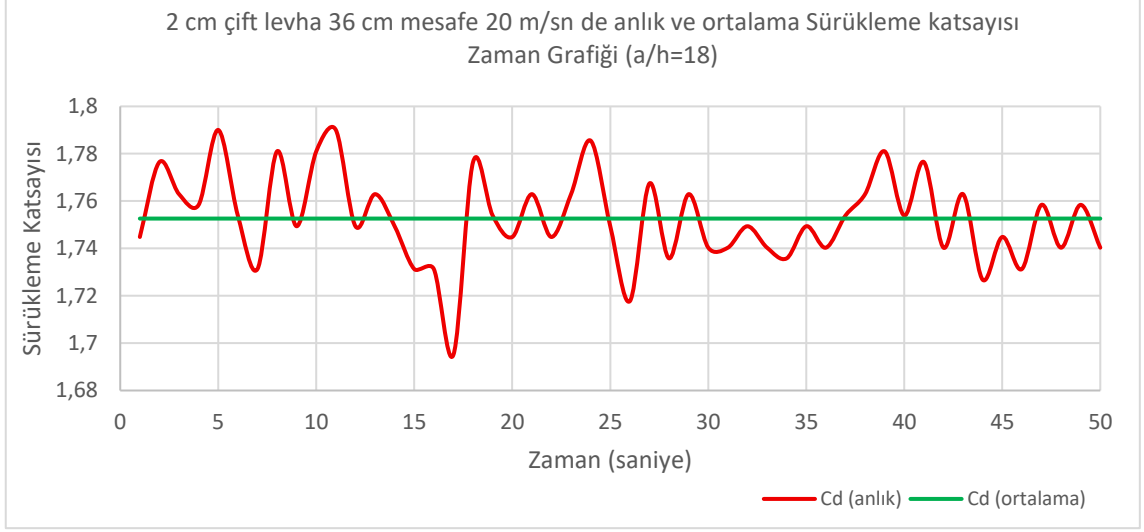


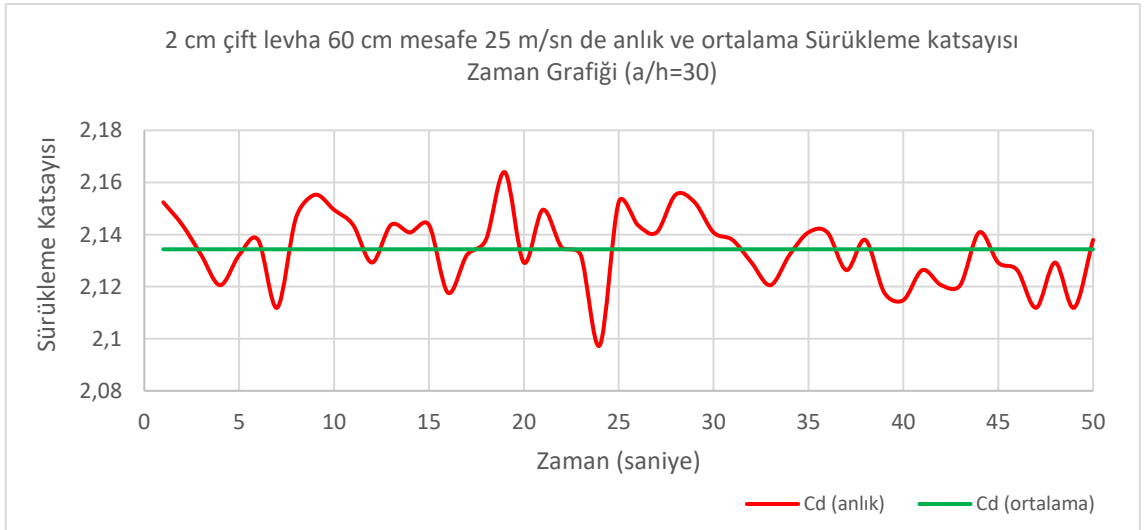
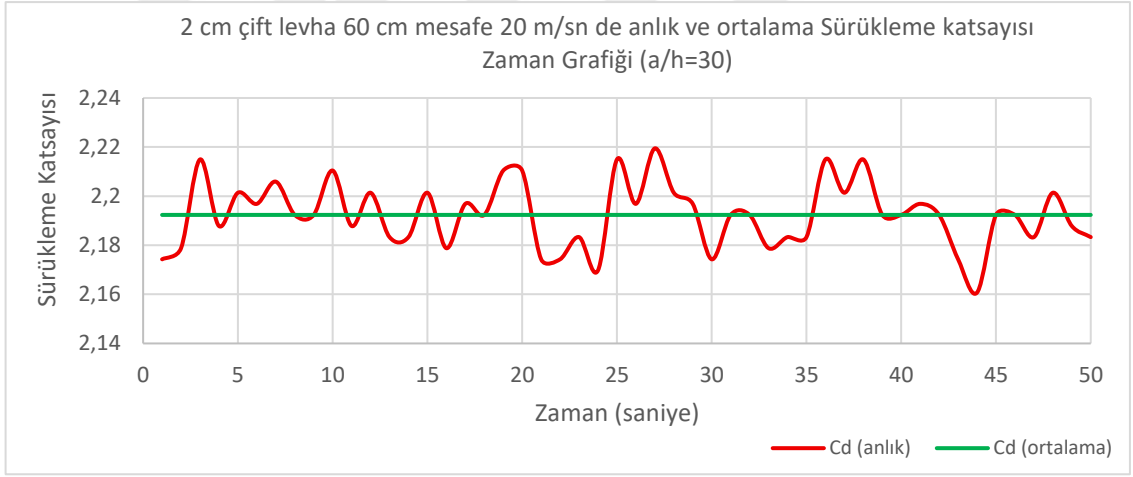
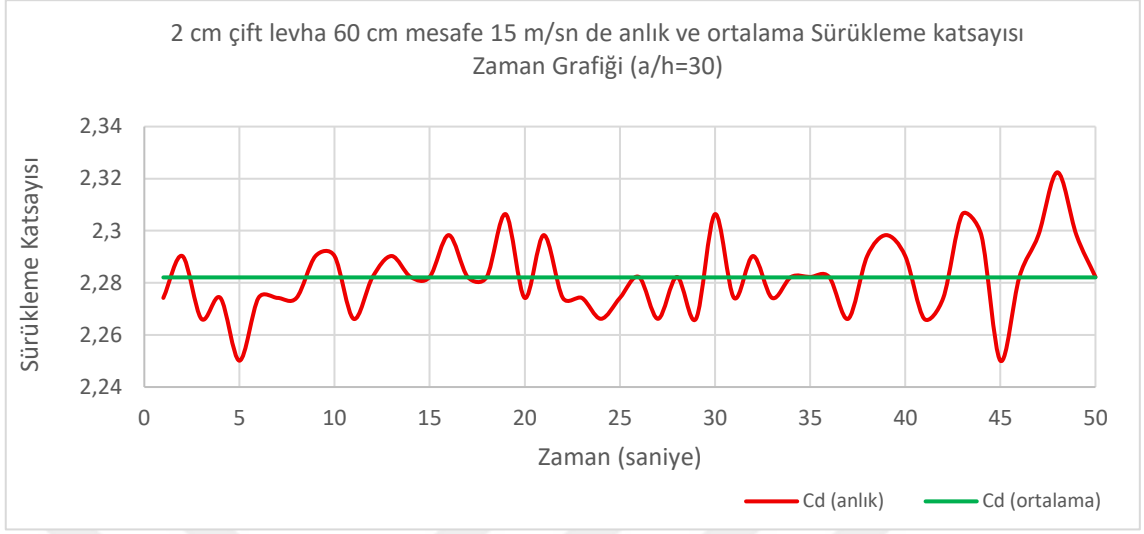


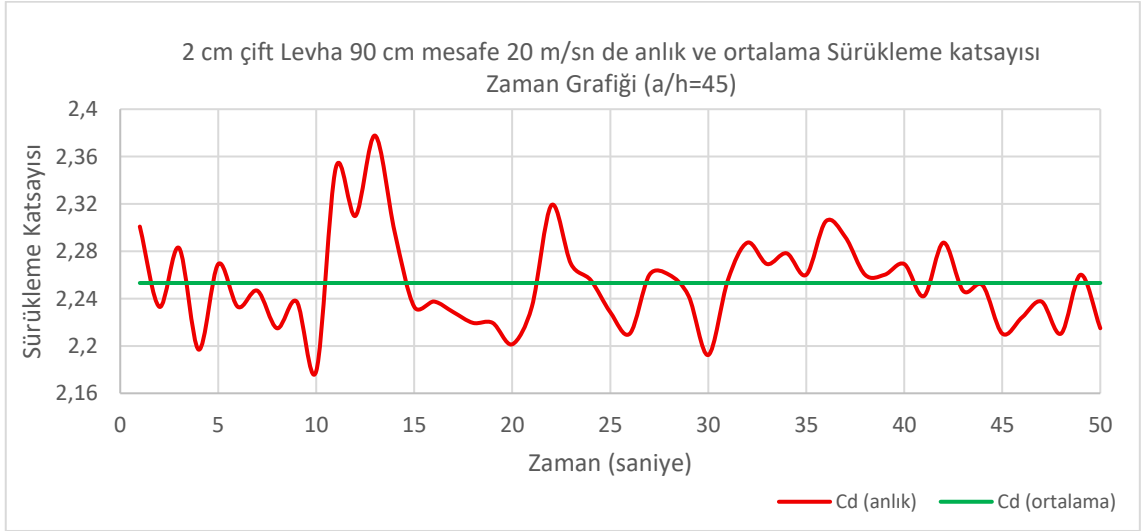
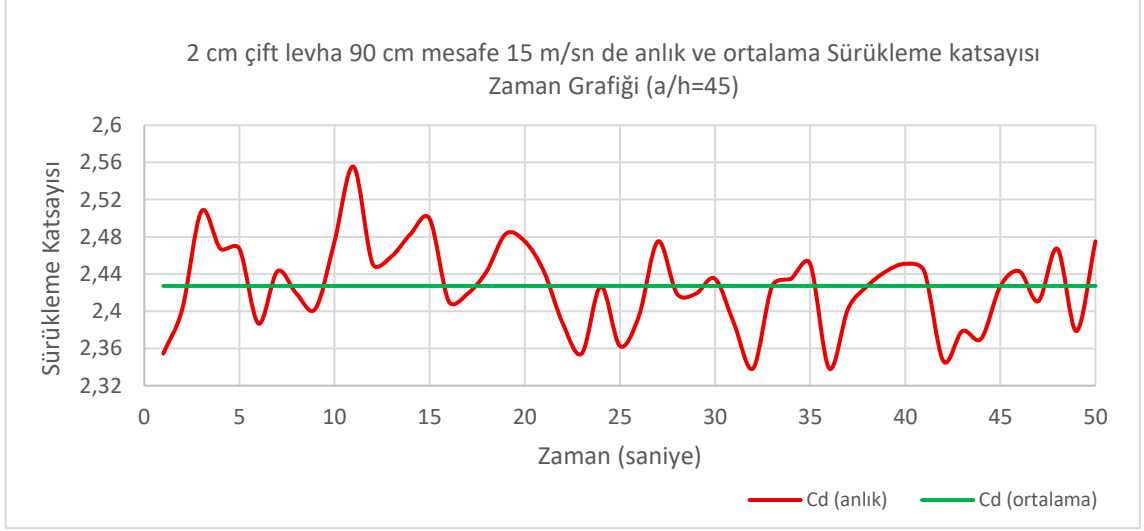
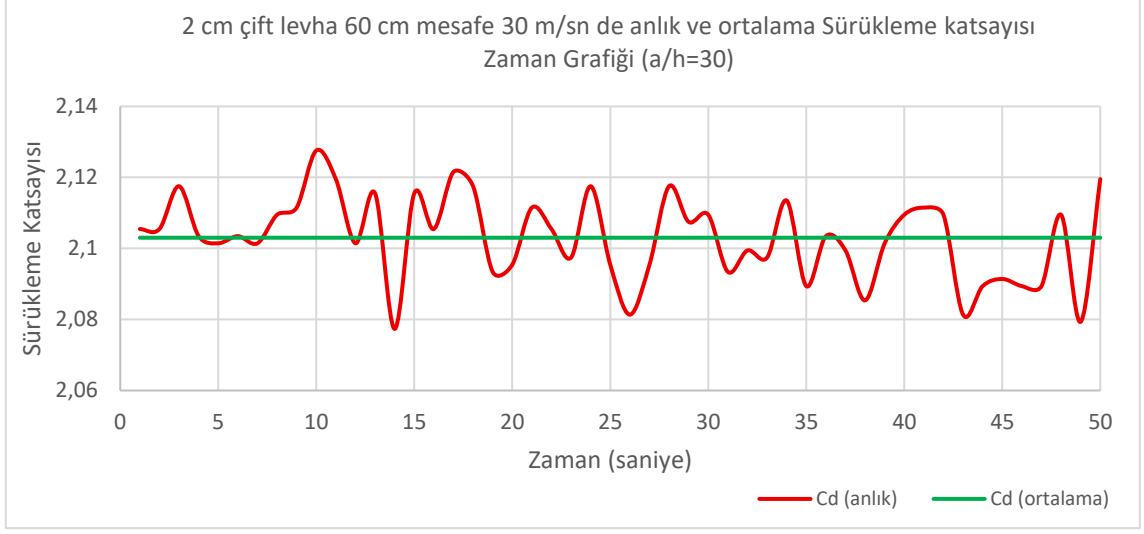


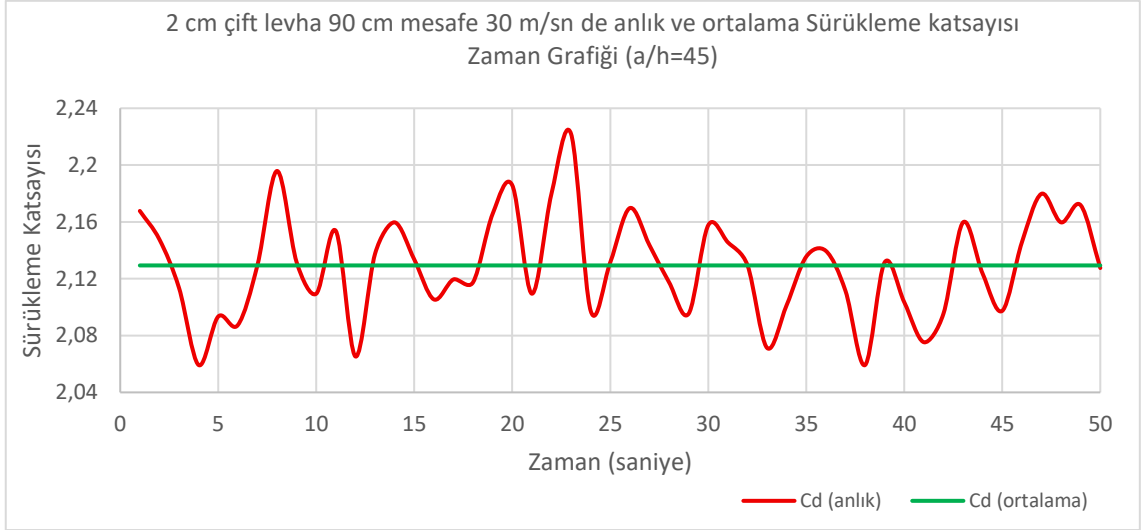
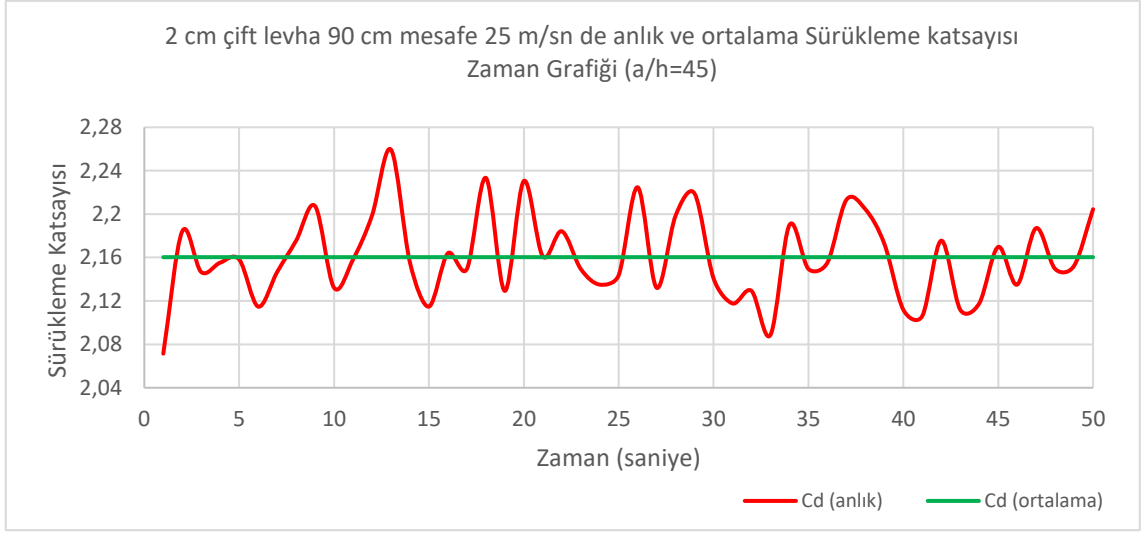




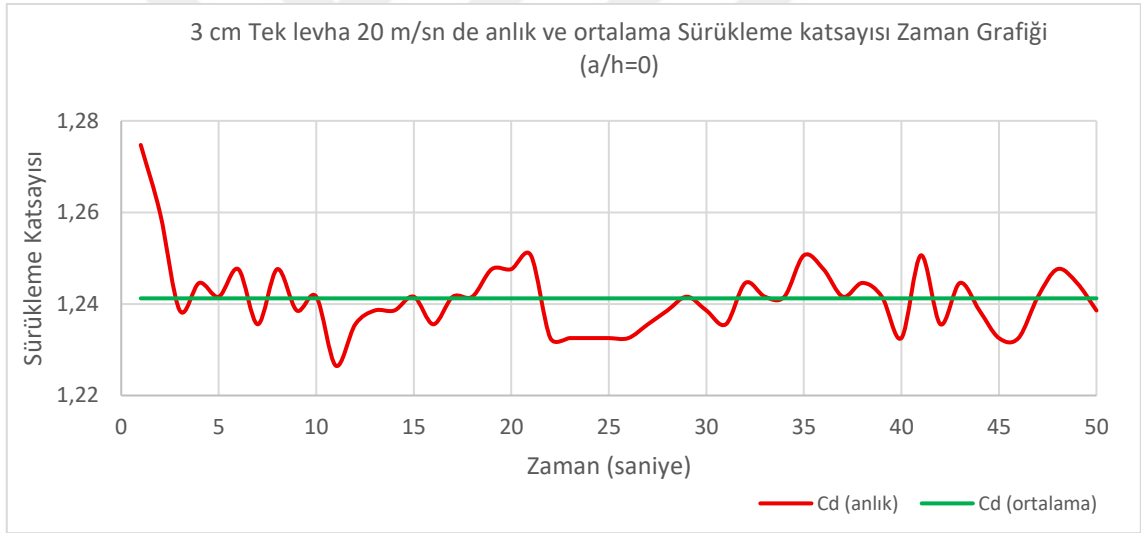
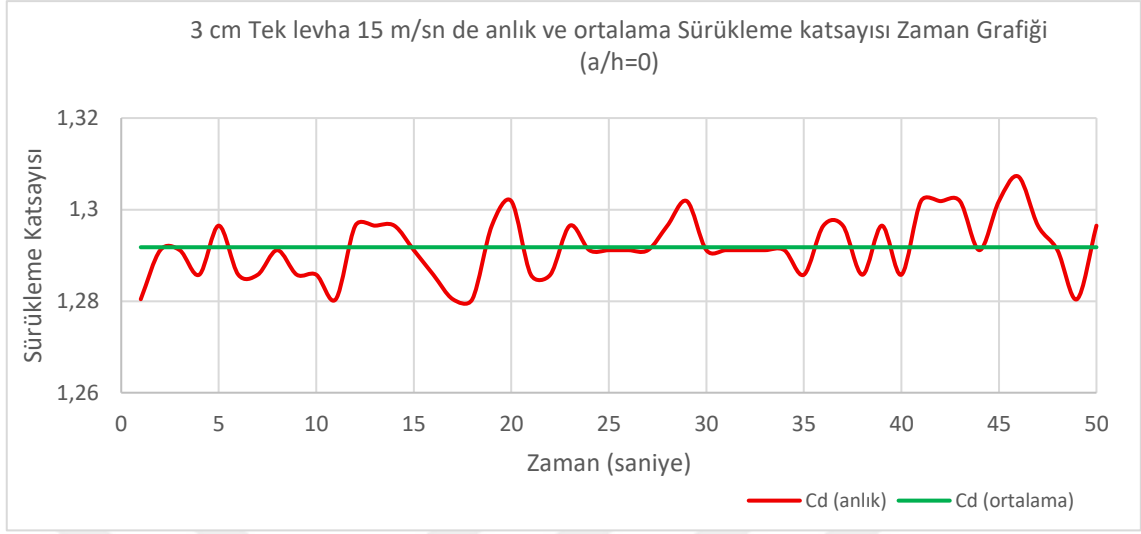


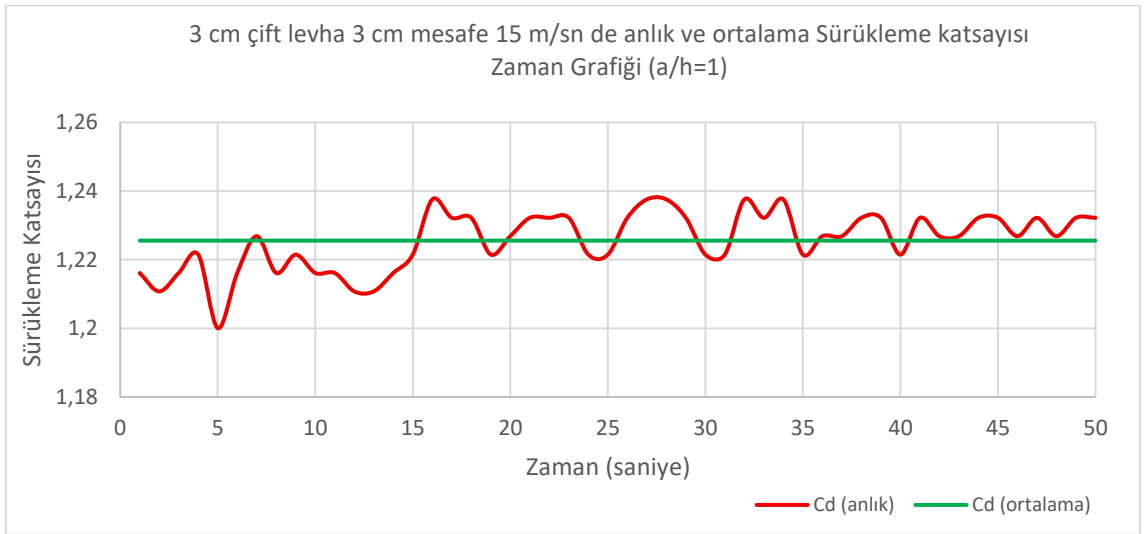
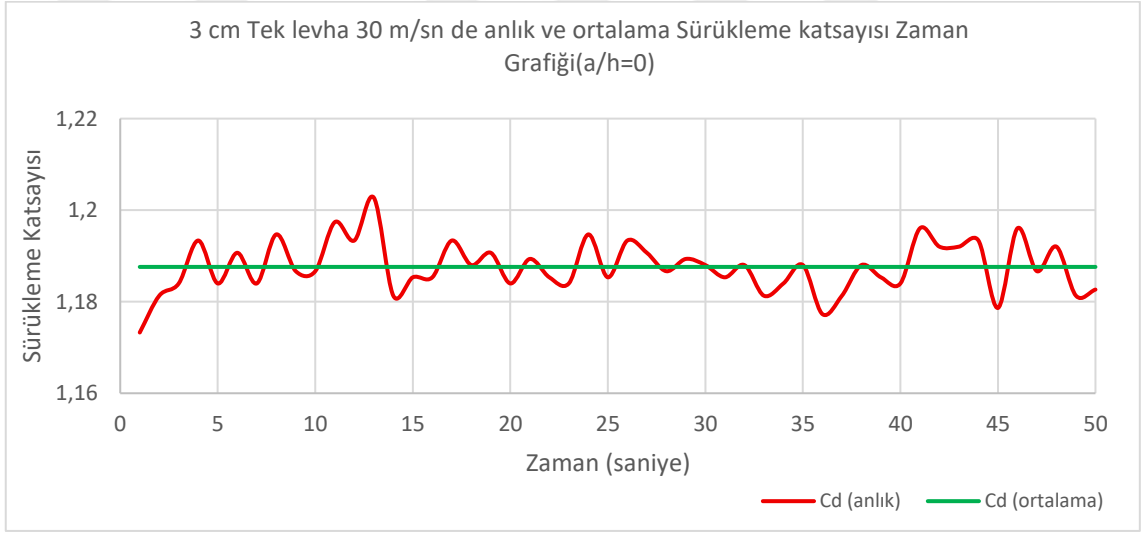
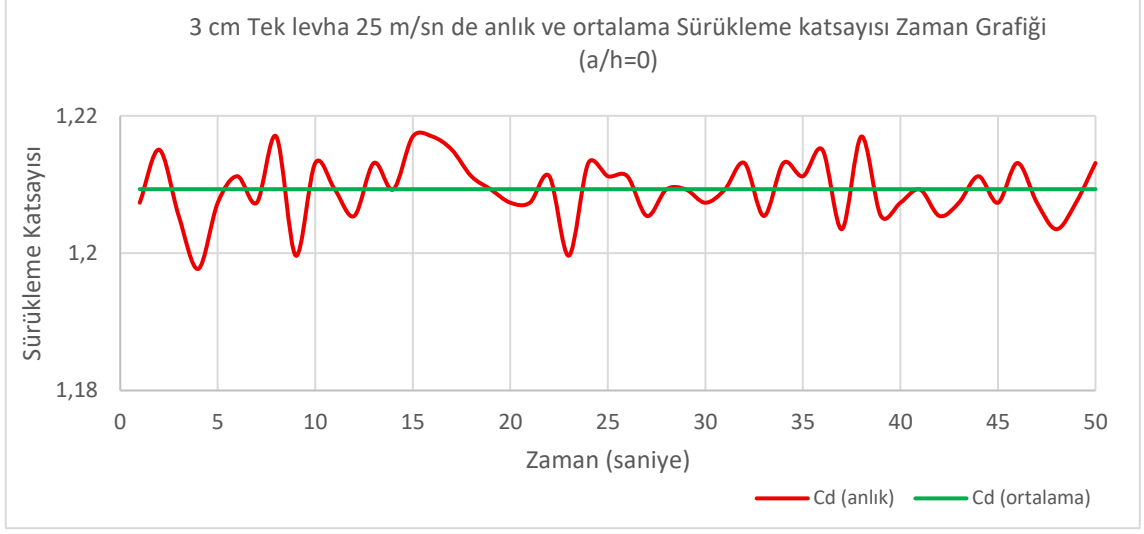


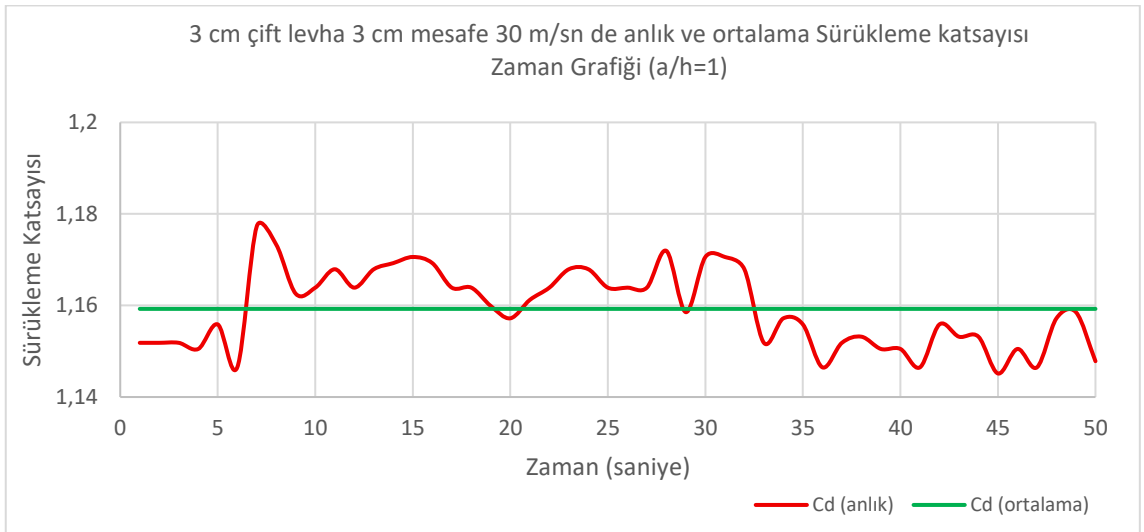
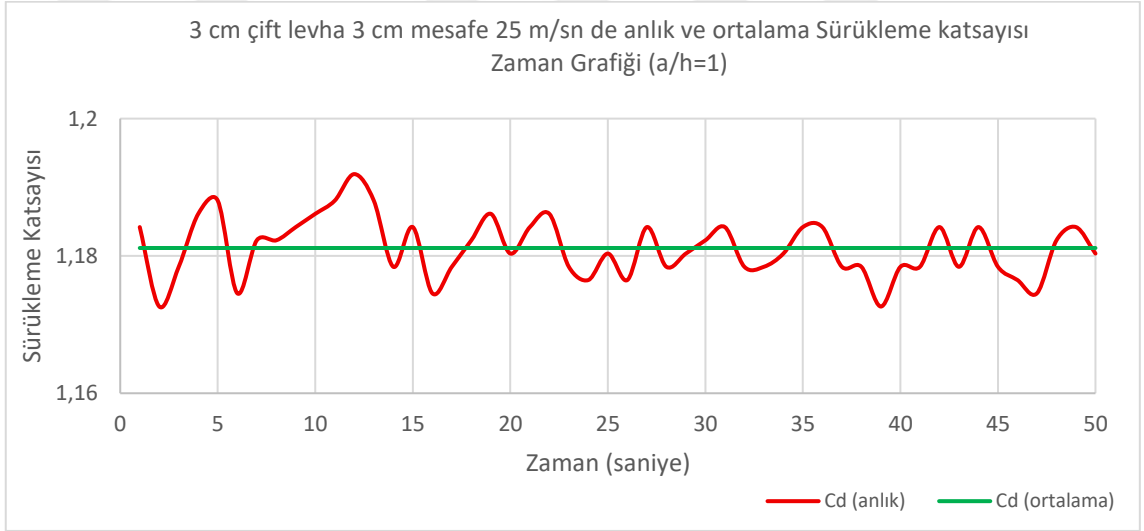
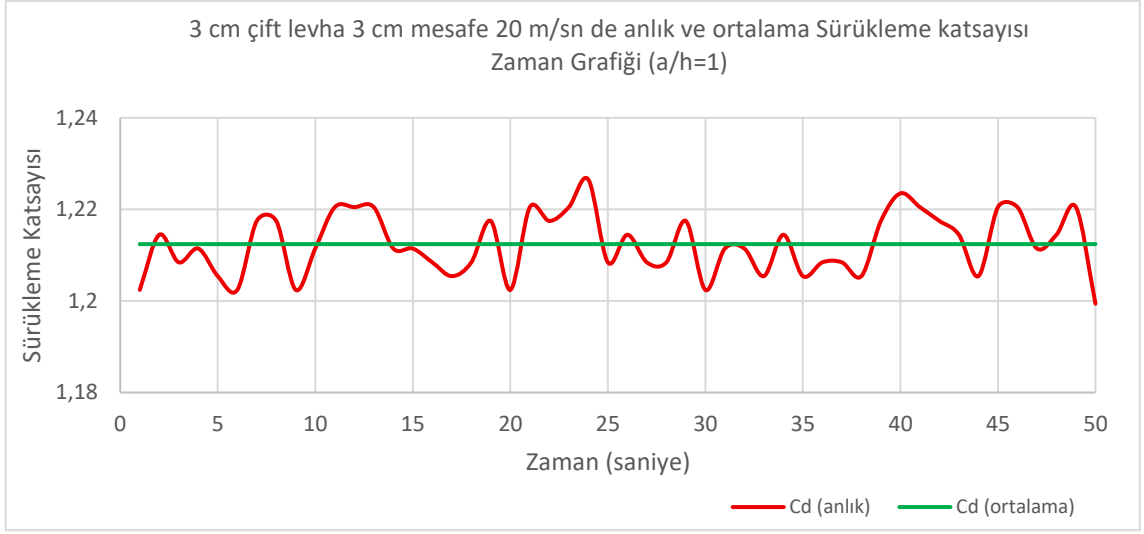


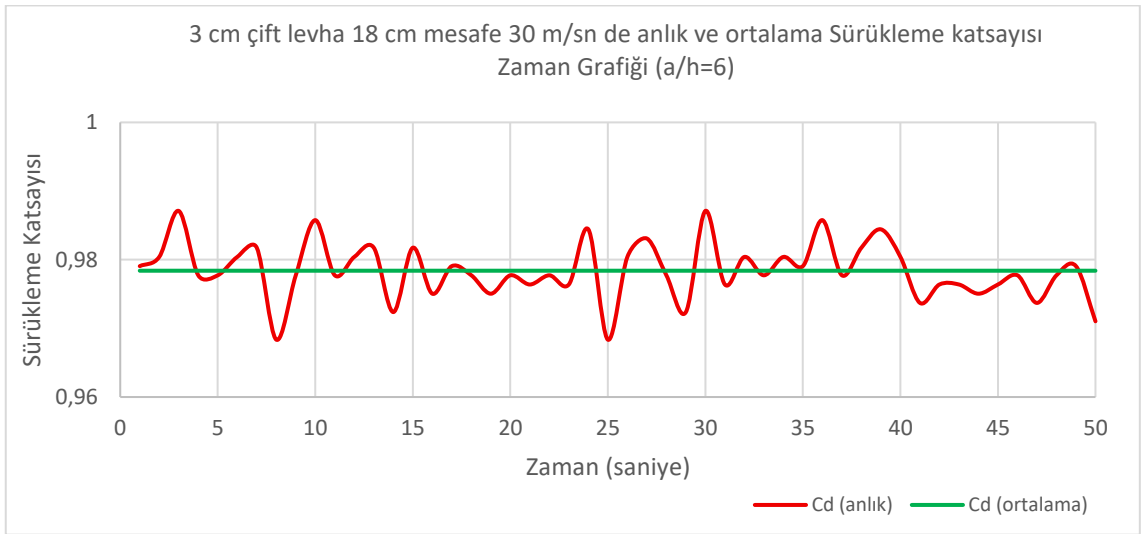
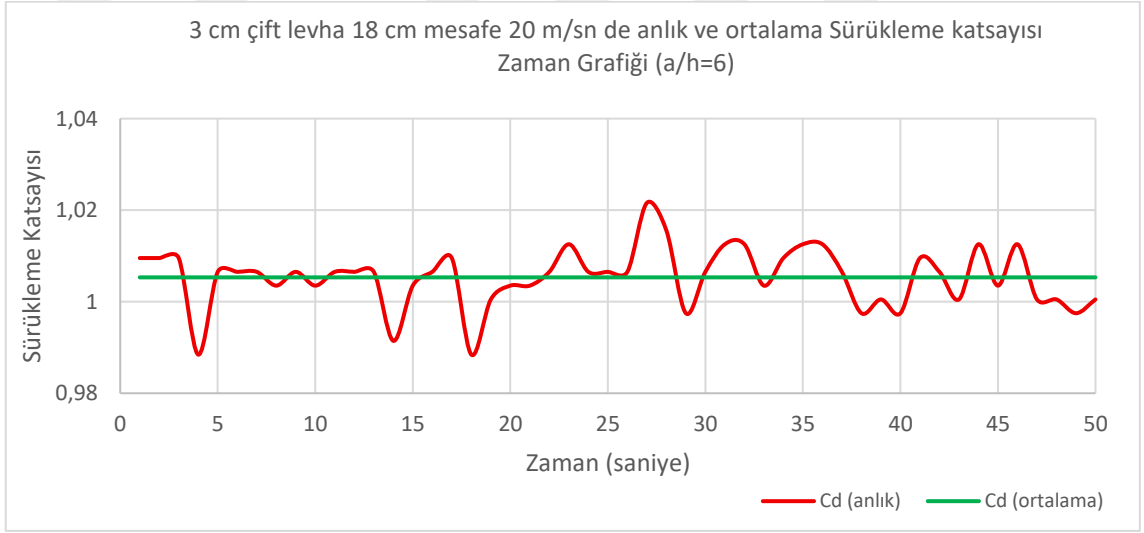
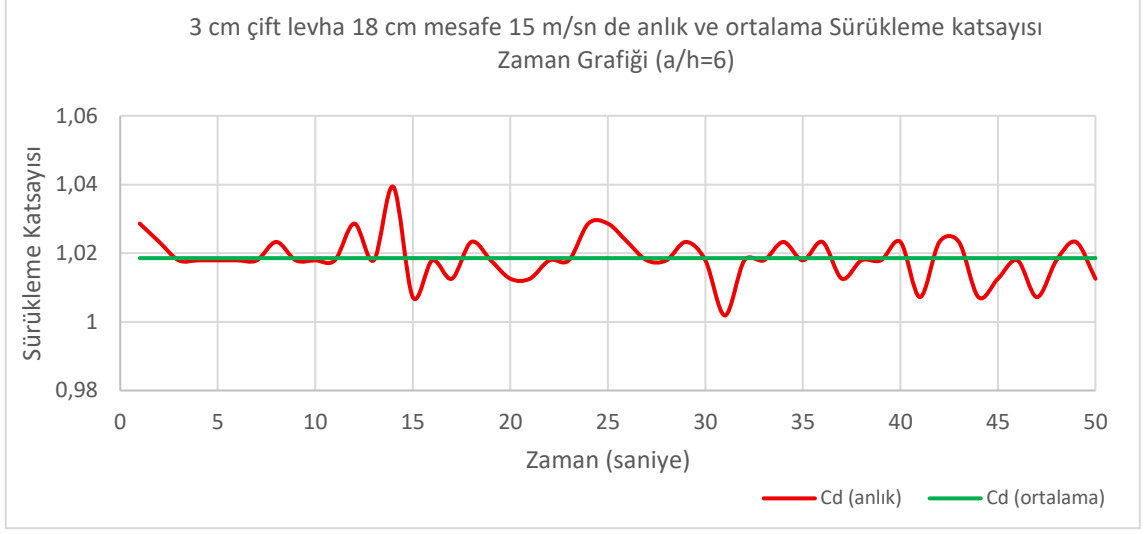


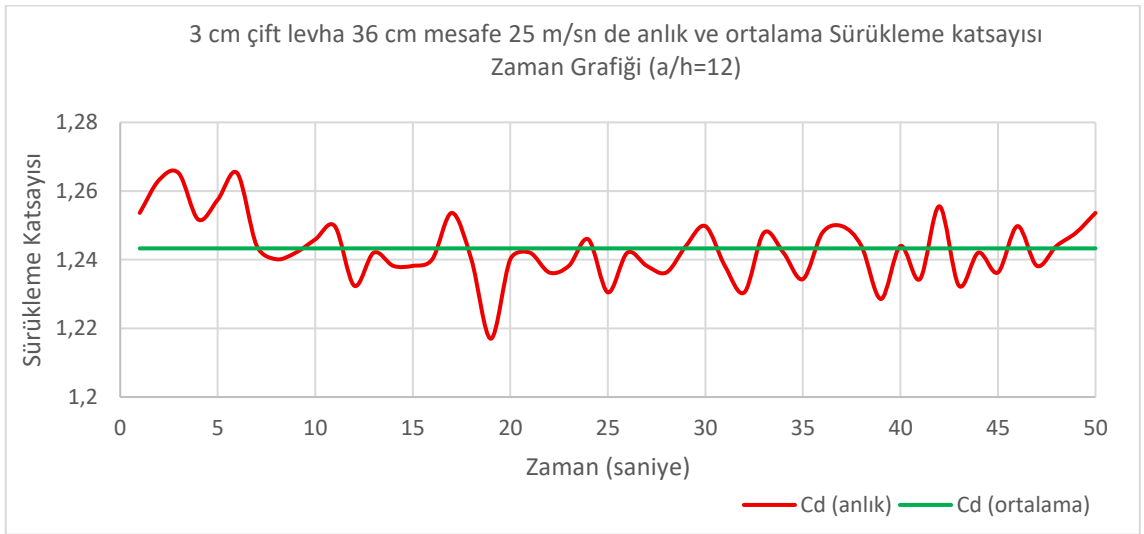
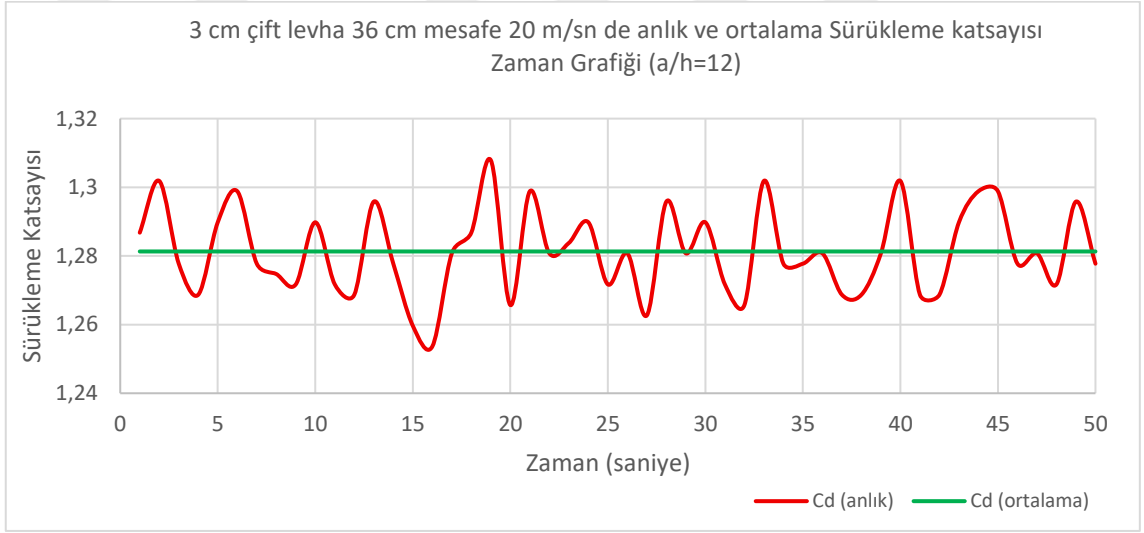
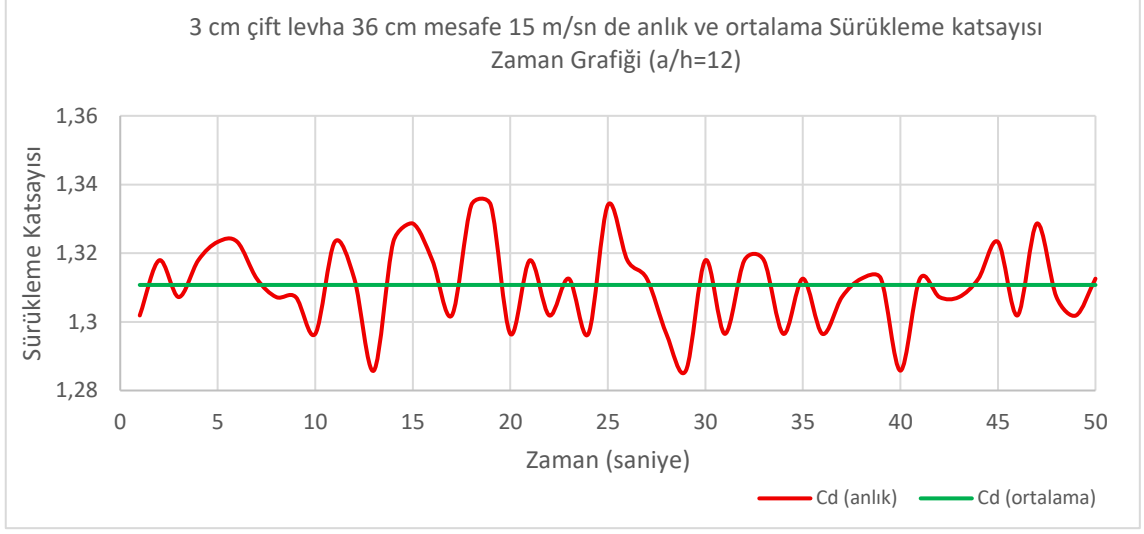
EK 1.2. 3 cm levhalarda anlık ve ortalama sürüklenme katsayıları grafiği

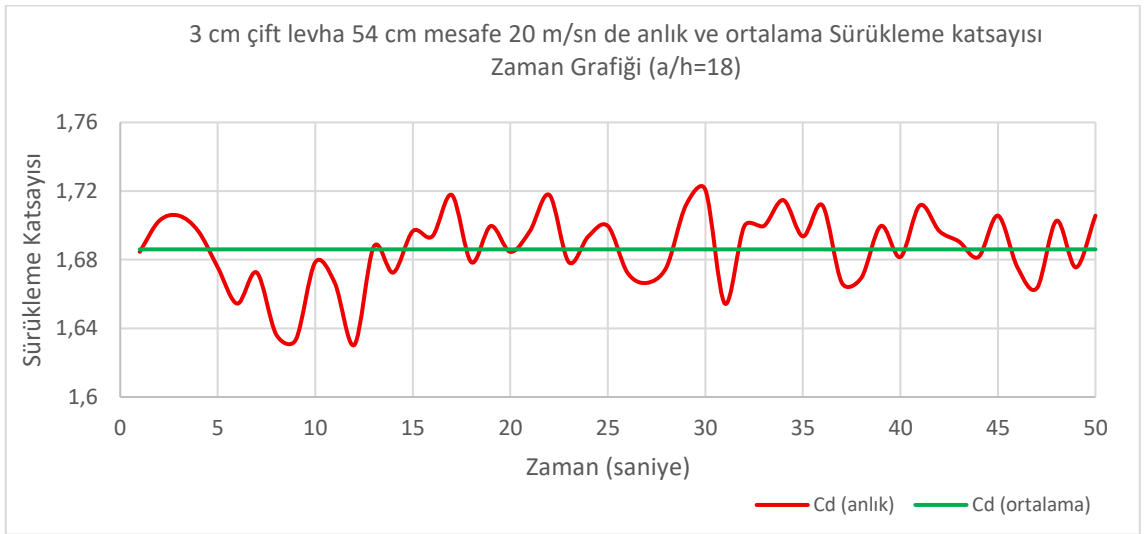
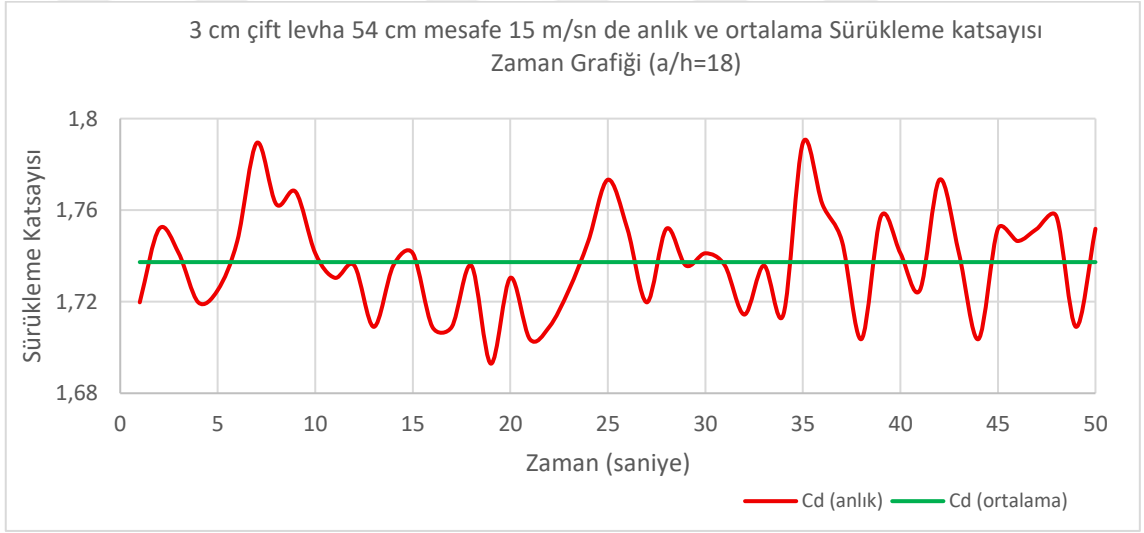
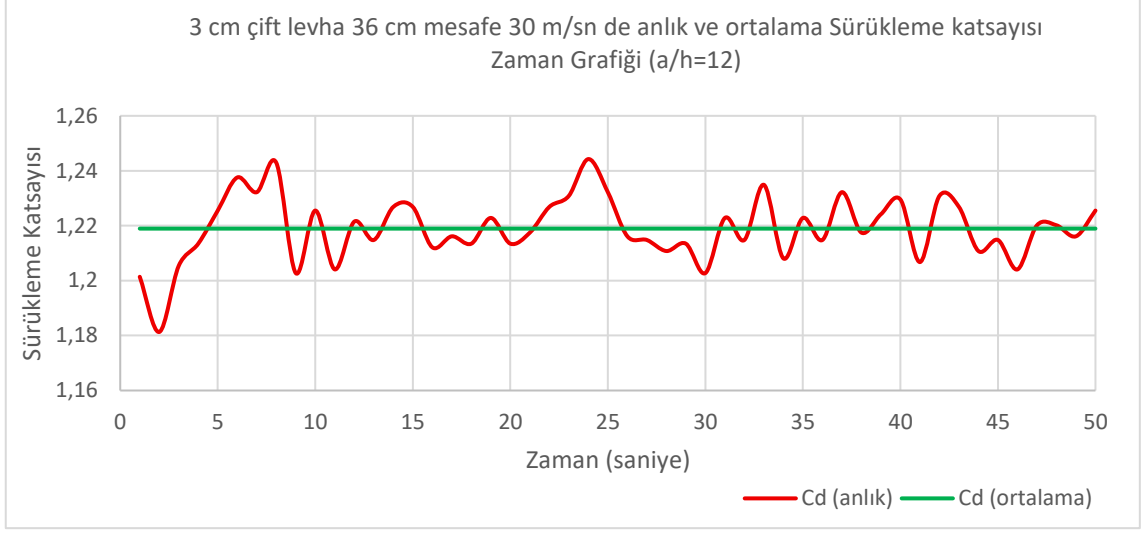




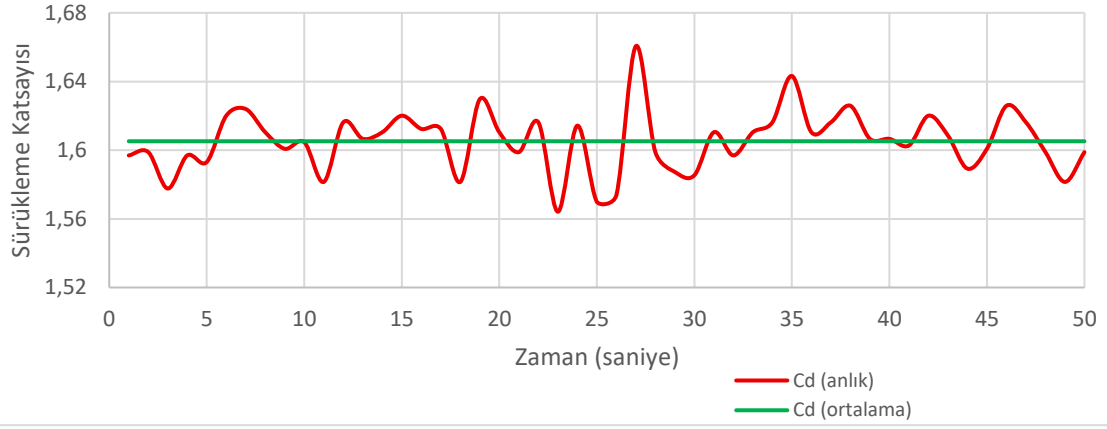




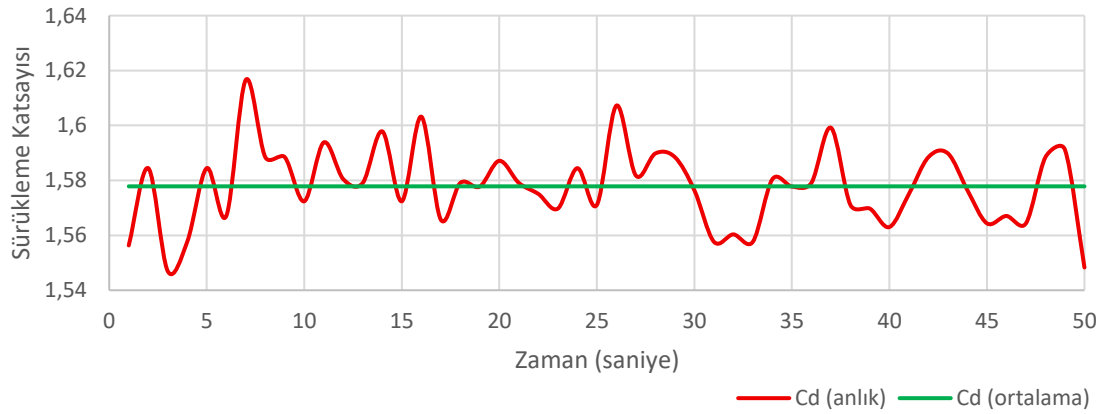




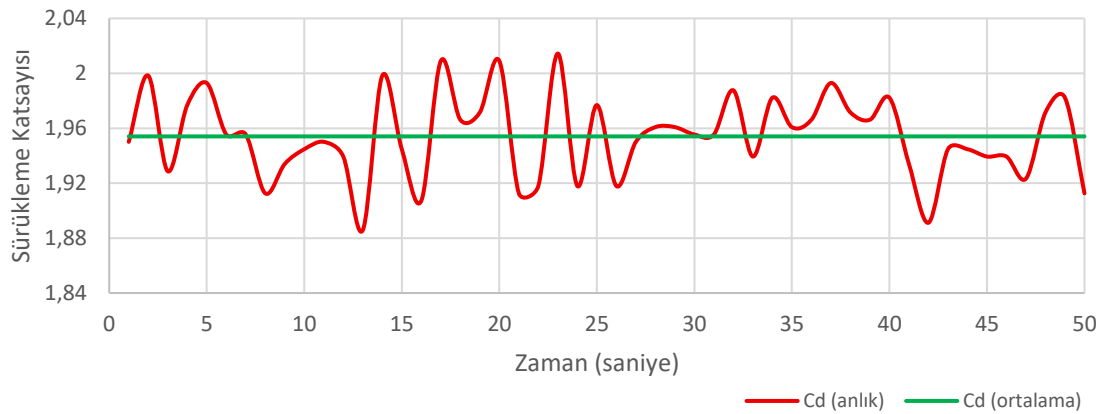
3 cm çift levha 54 cm mesafe 25 m/sn de anlık ve ortalama
Sürüklenme katsayısı Zaman Grafiği ($a/h=18$)

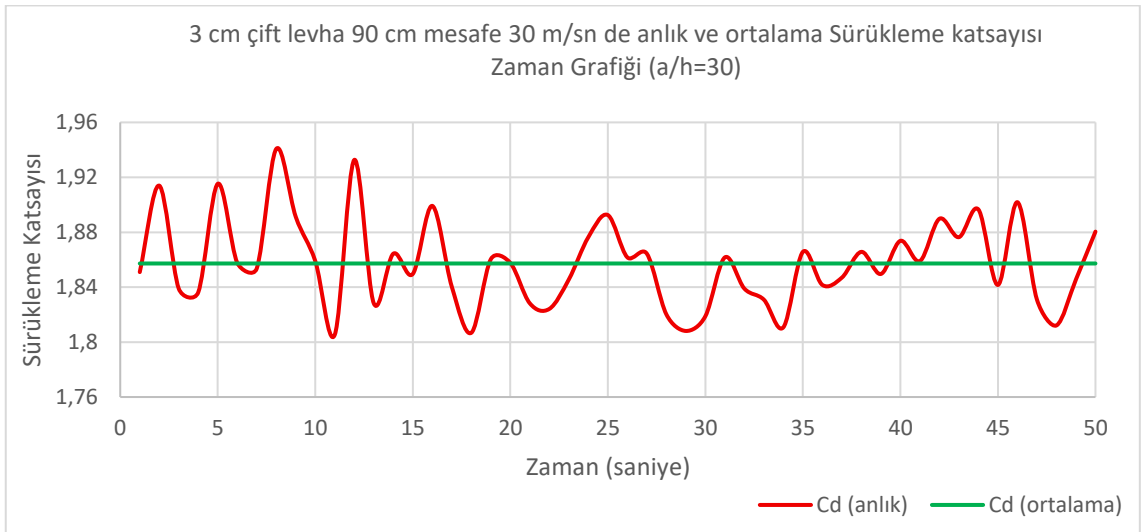
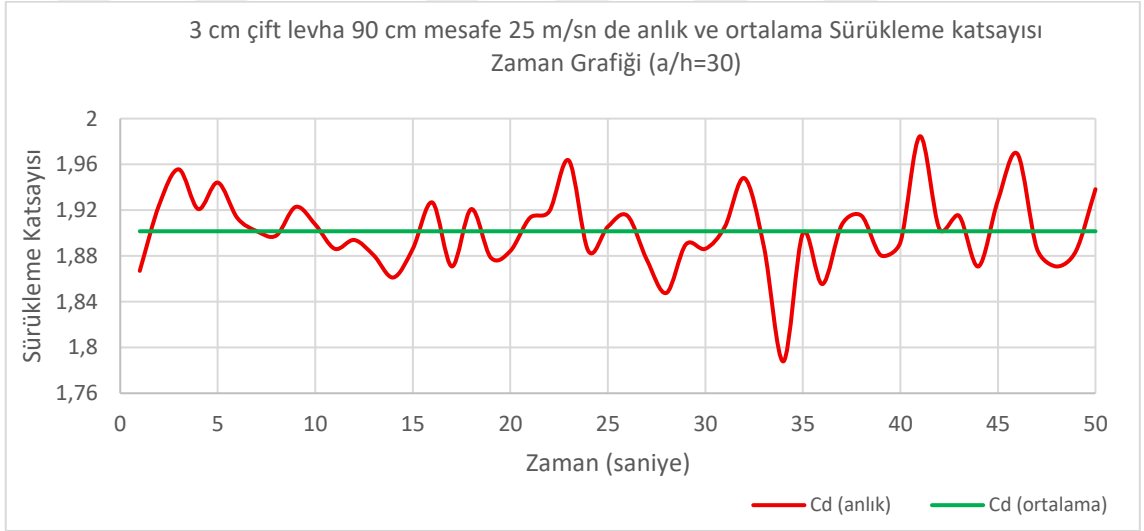
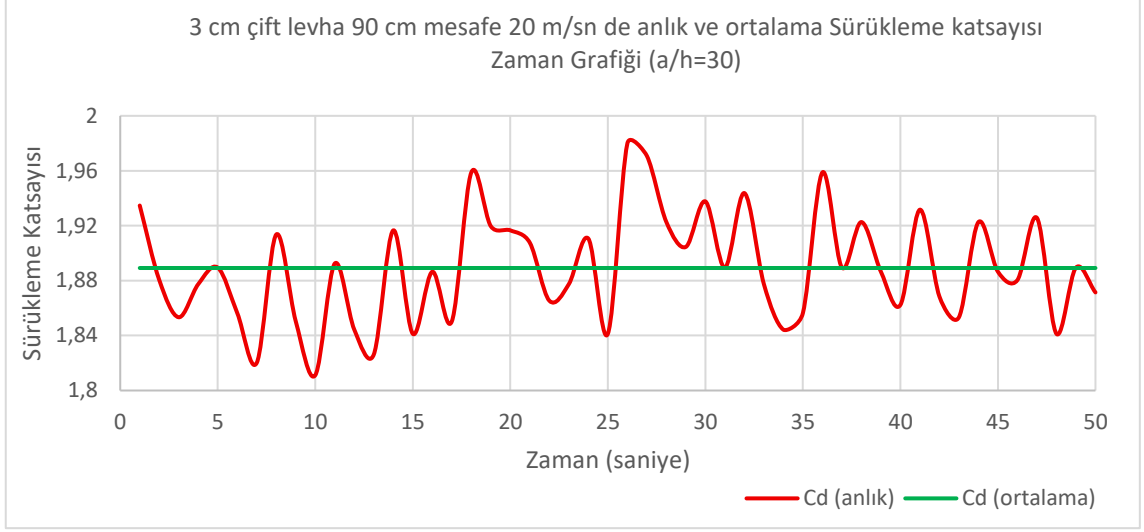


3 cm çift levha 54 cm mesafe 30 m/sn de anlık ve ortalama Sürüklenme katsayısı
Zaman Grafiği ($a/h=54$)

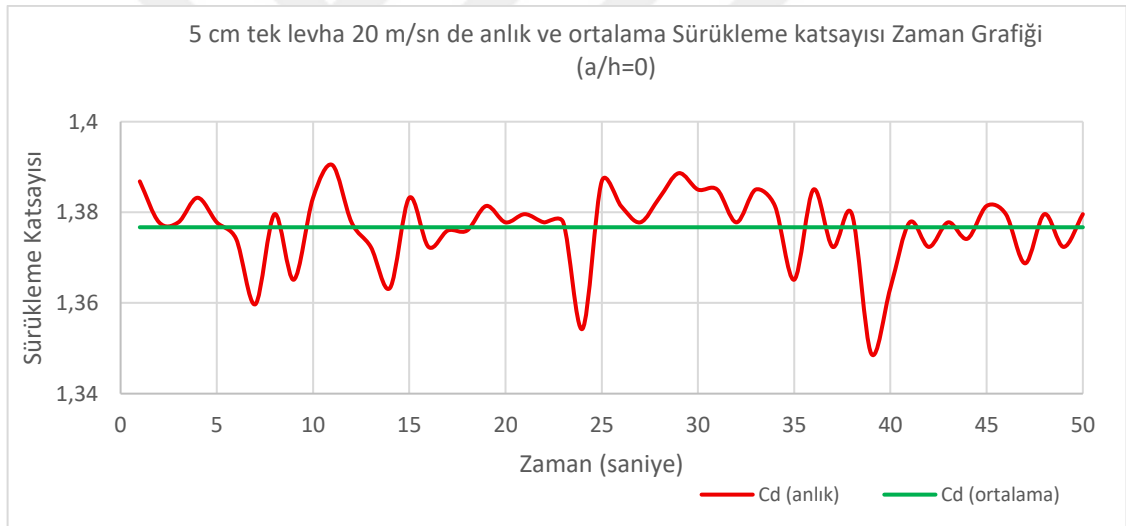
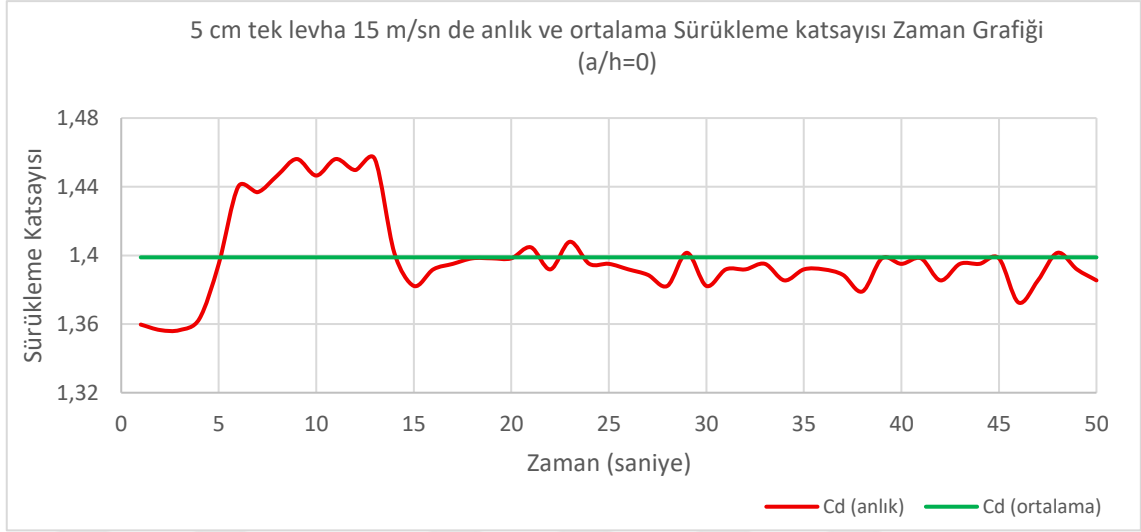


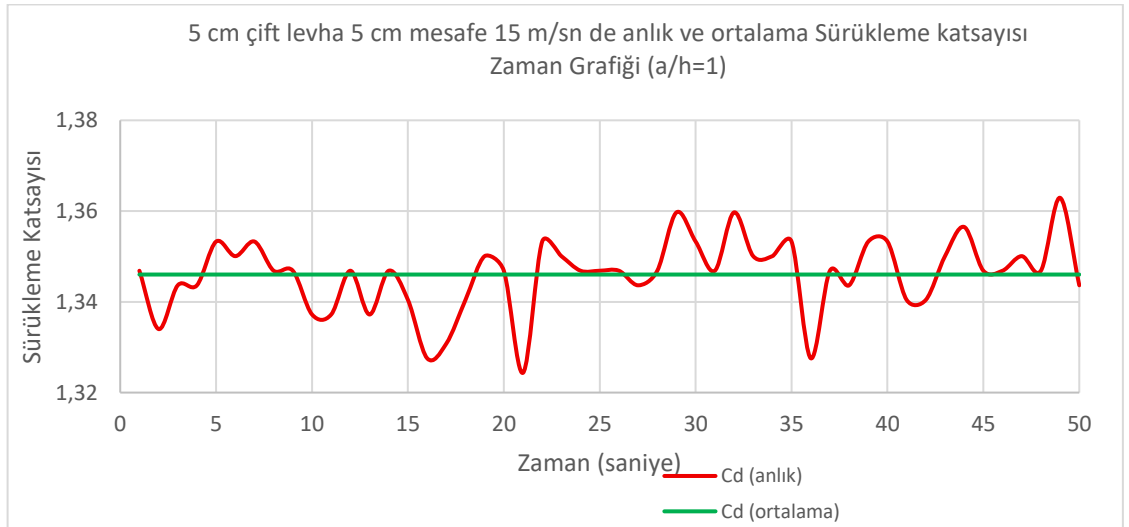
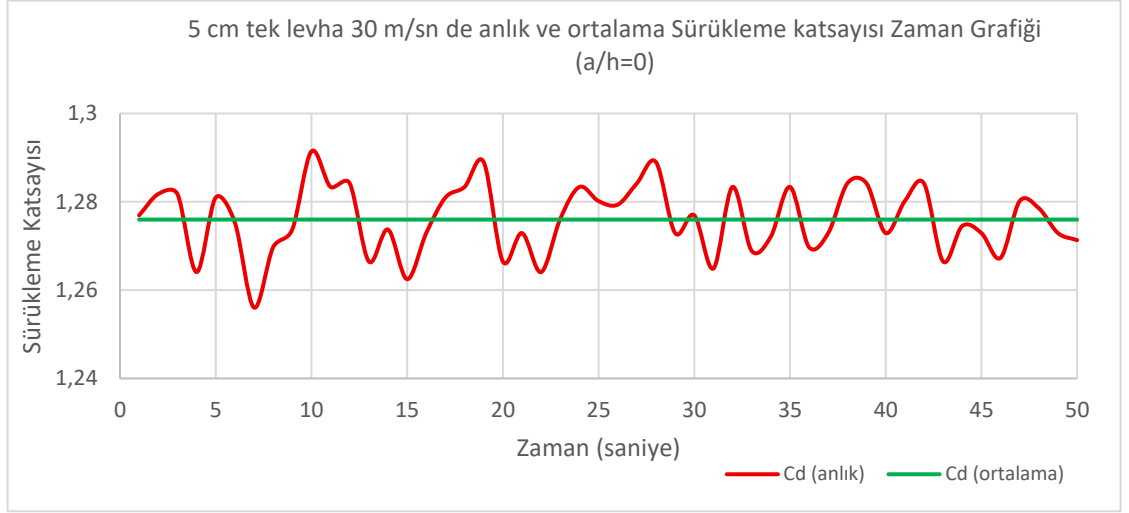
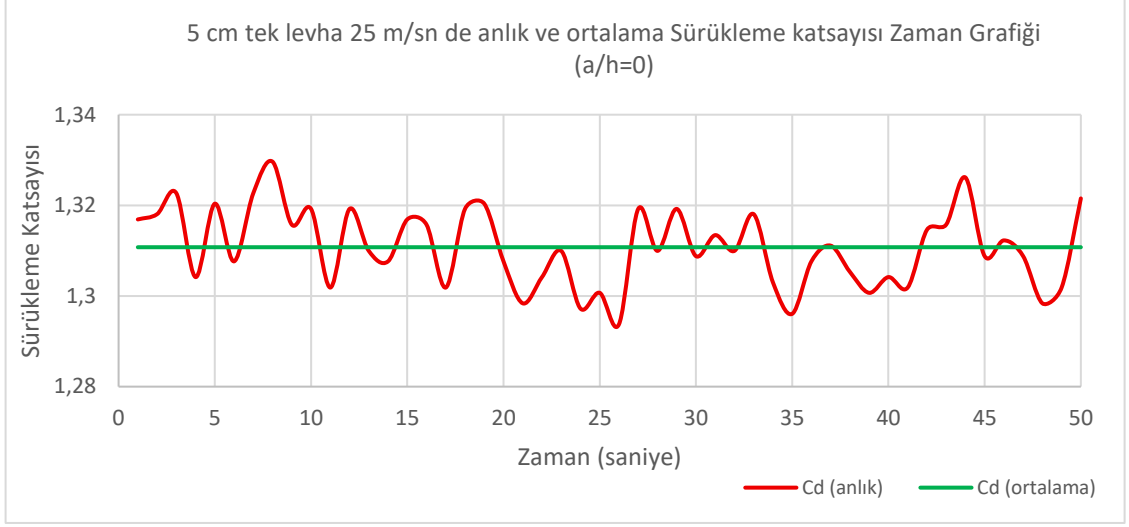
3 cm çift levha 90 cm mesafe 15 m/sn de anlık ve ortalama Sürüklenme katsayısı
Zaman Grafiği ($a/h=30$)

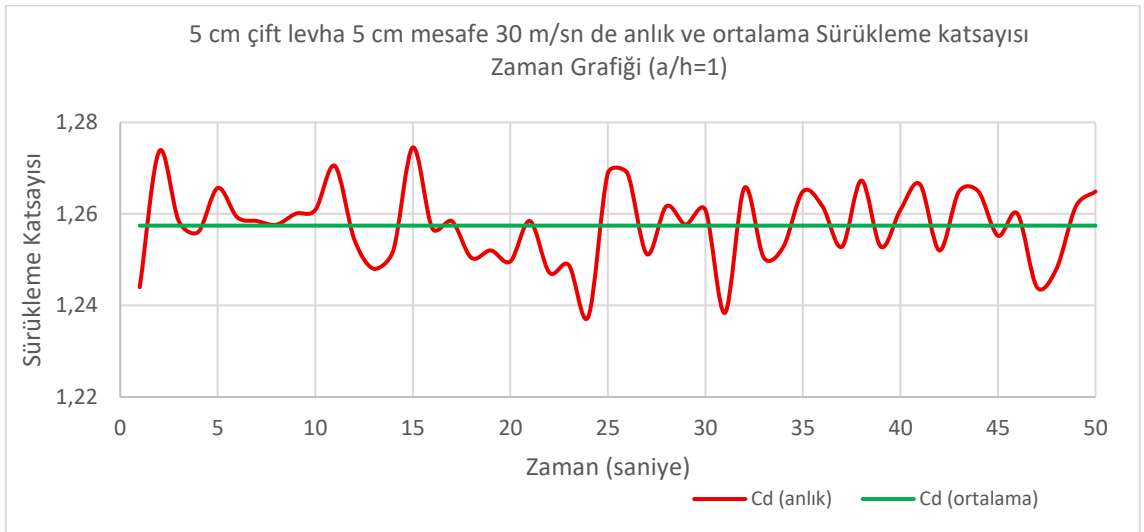
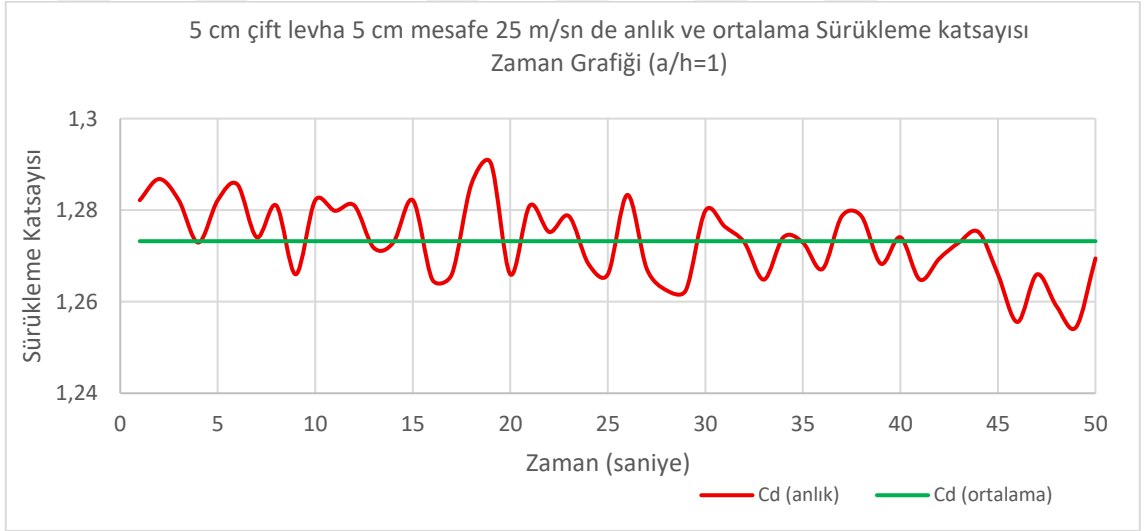
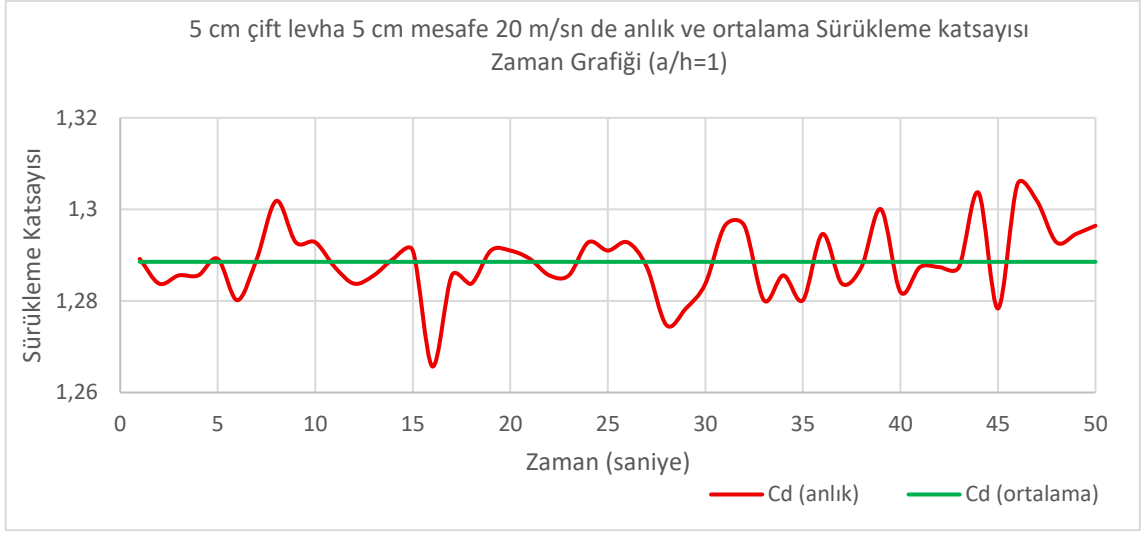


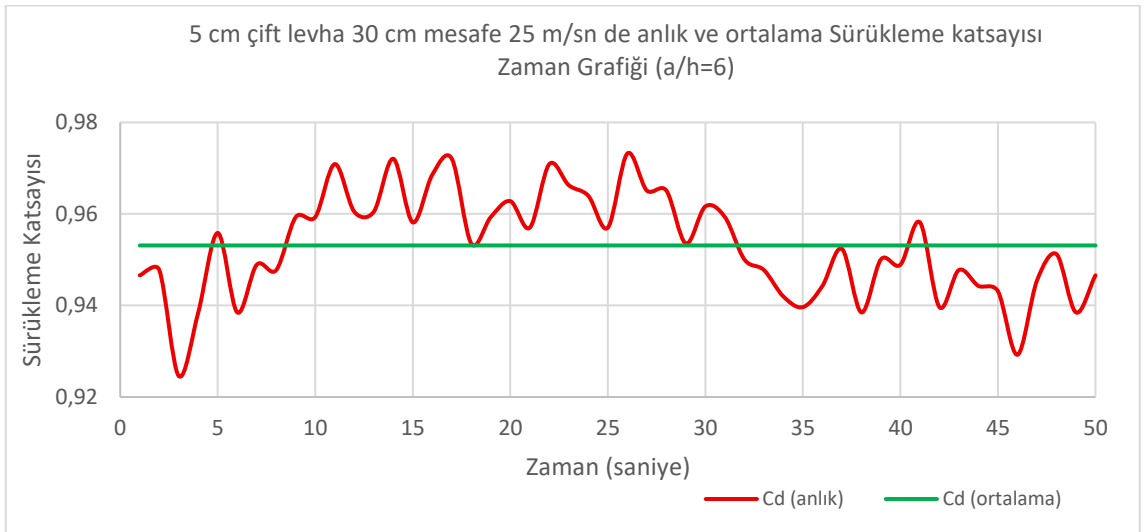
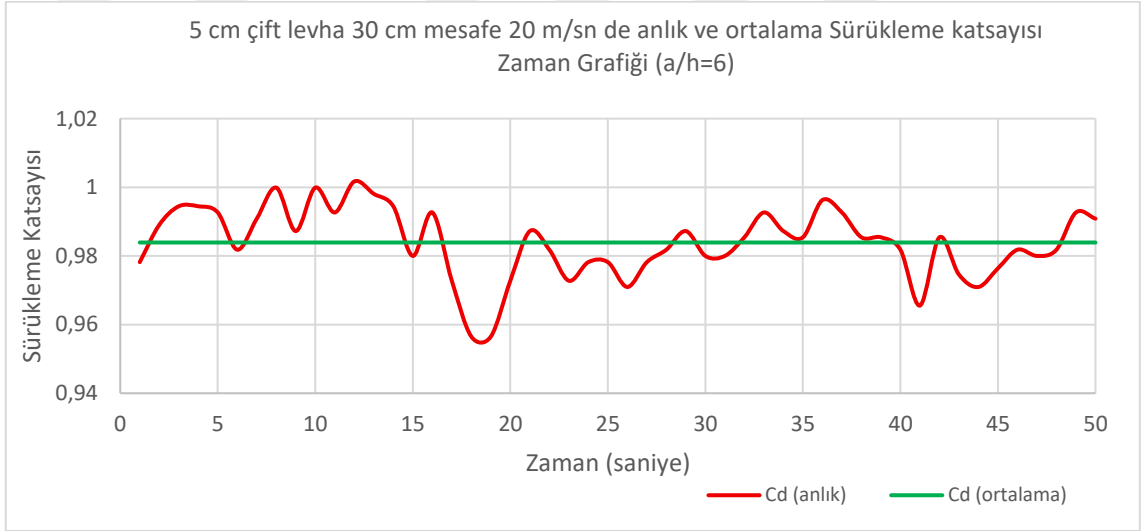
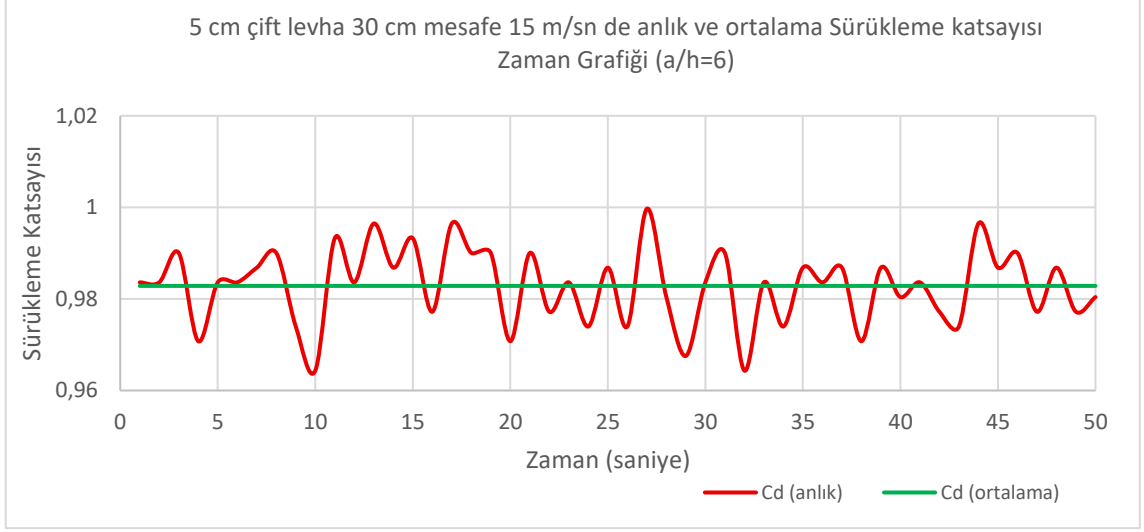


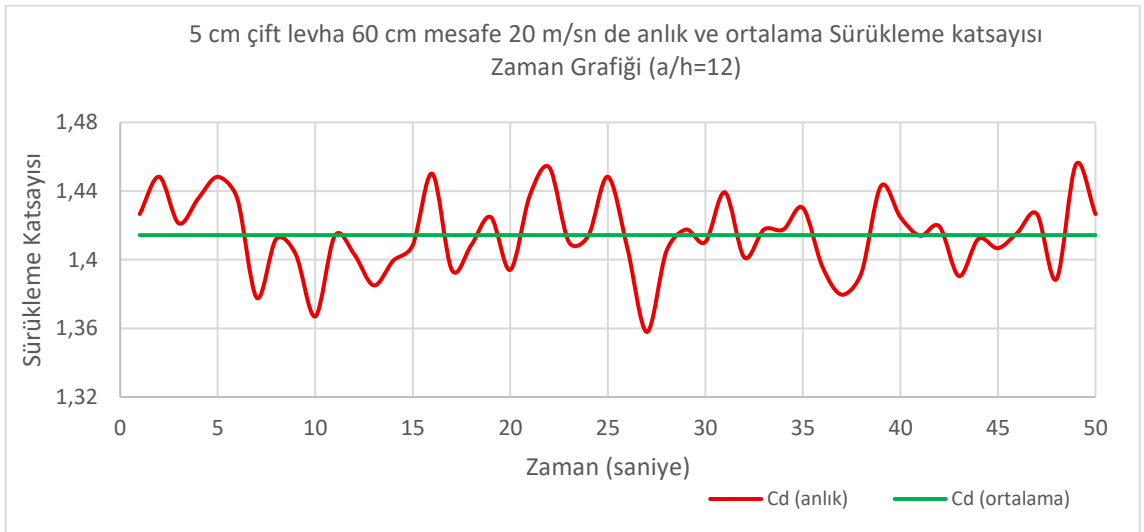
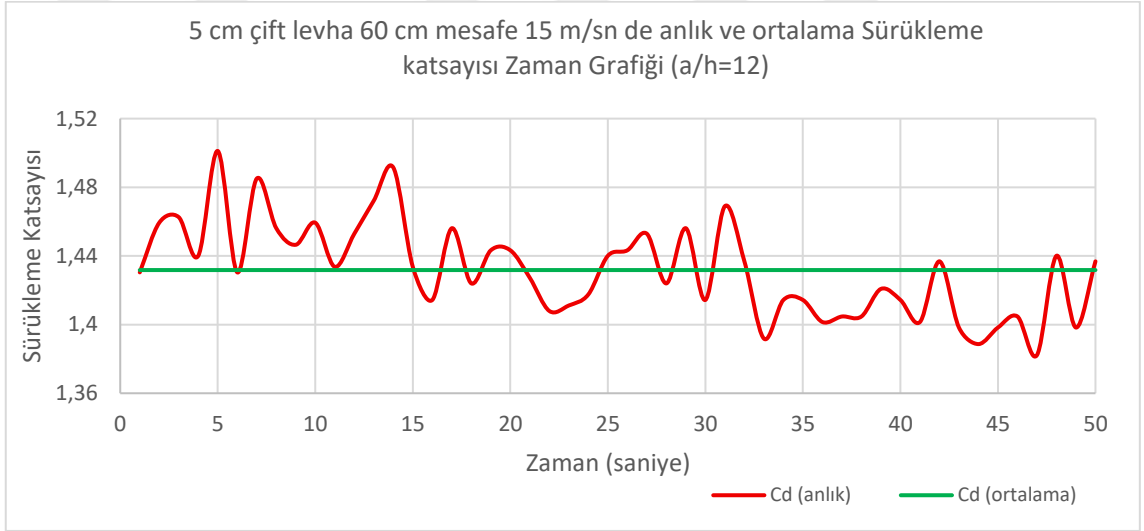
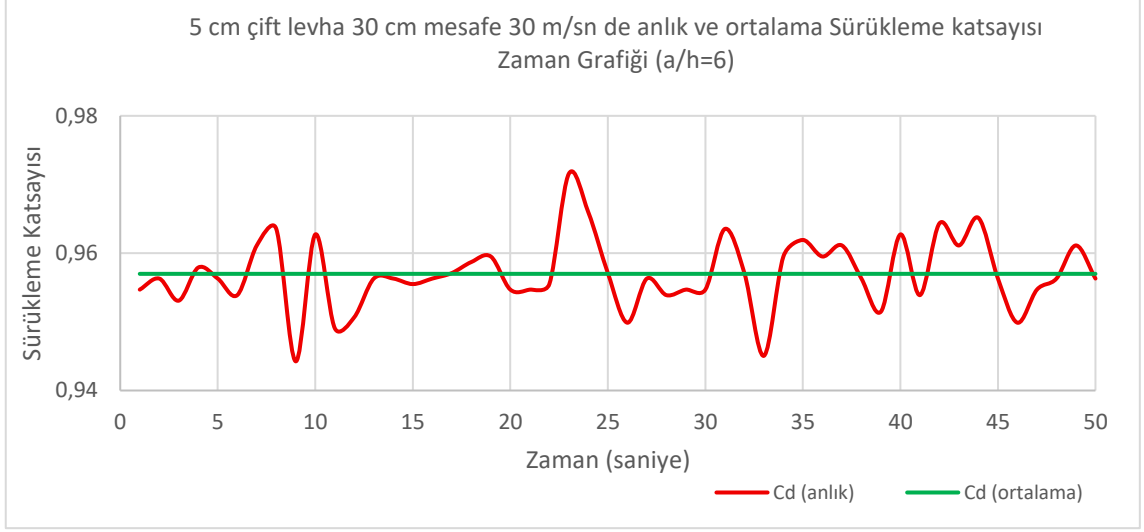
EK 1.3. 5 cm levhalarda anlık ve ortalama sürüklenme katsayıları grafiği

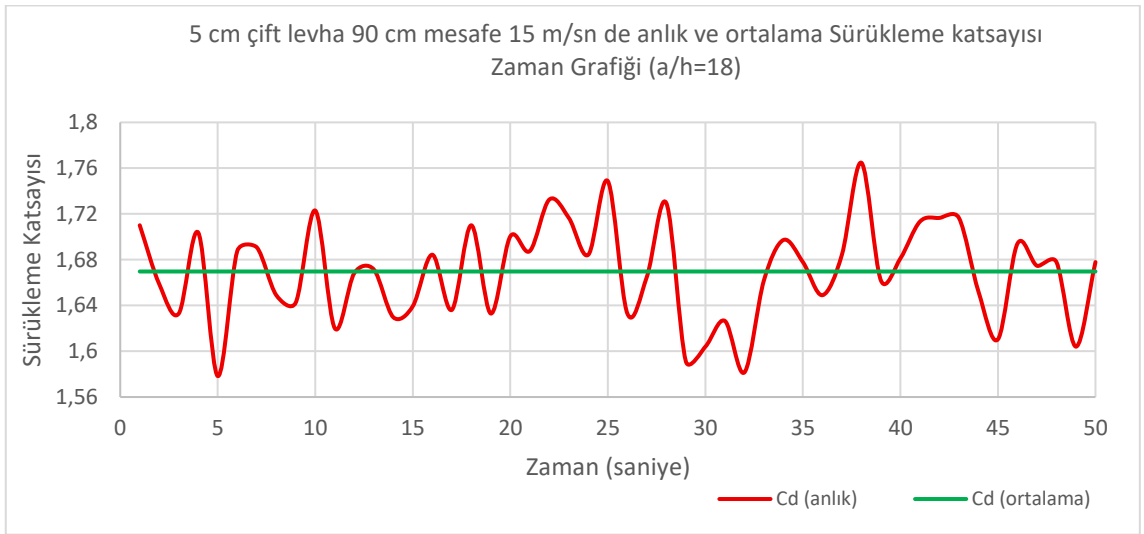
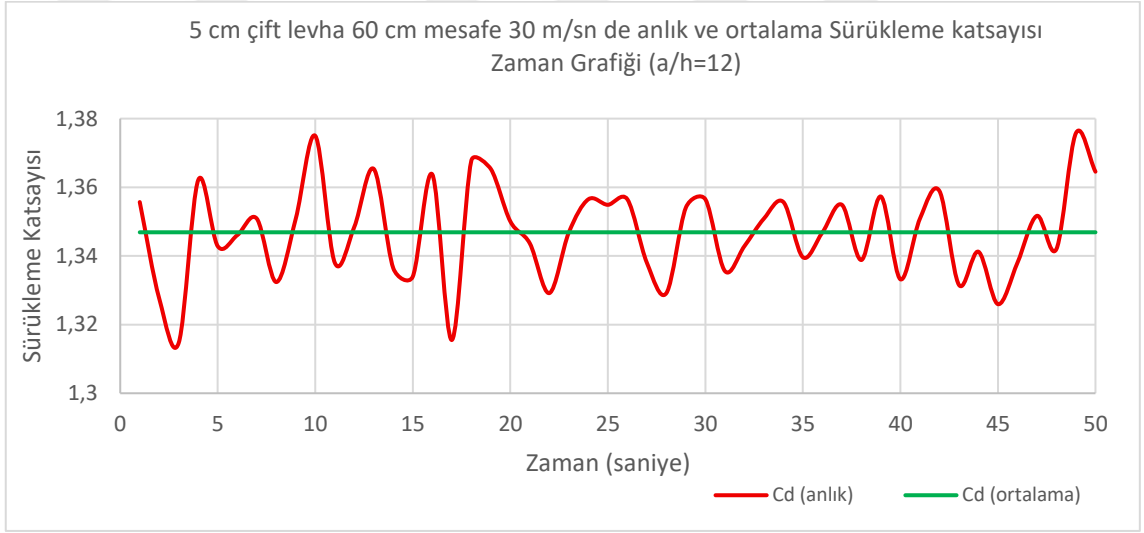
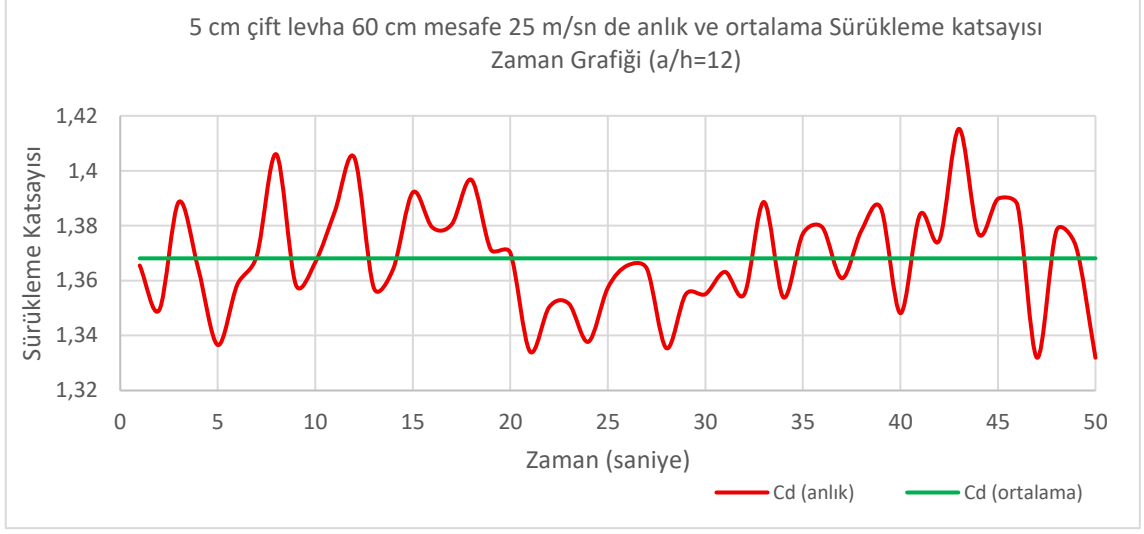


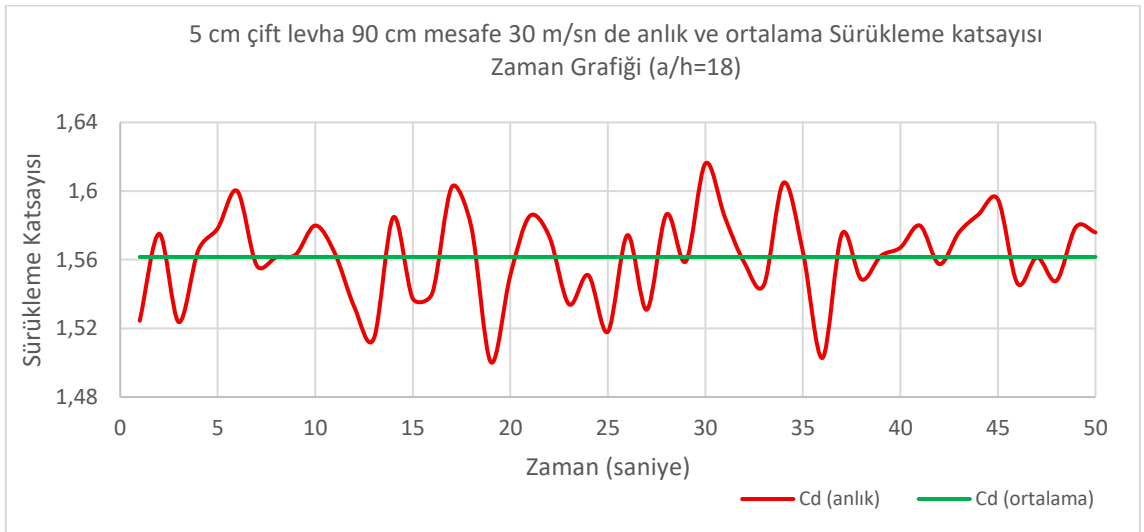
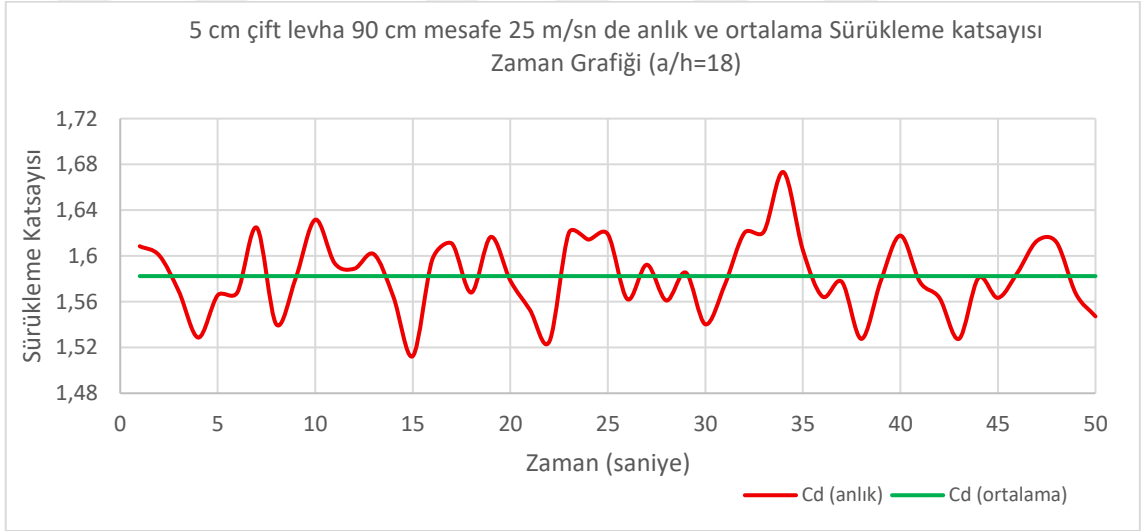
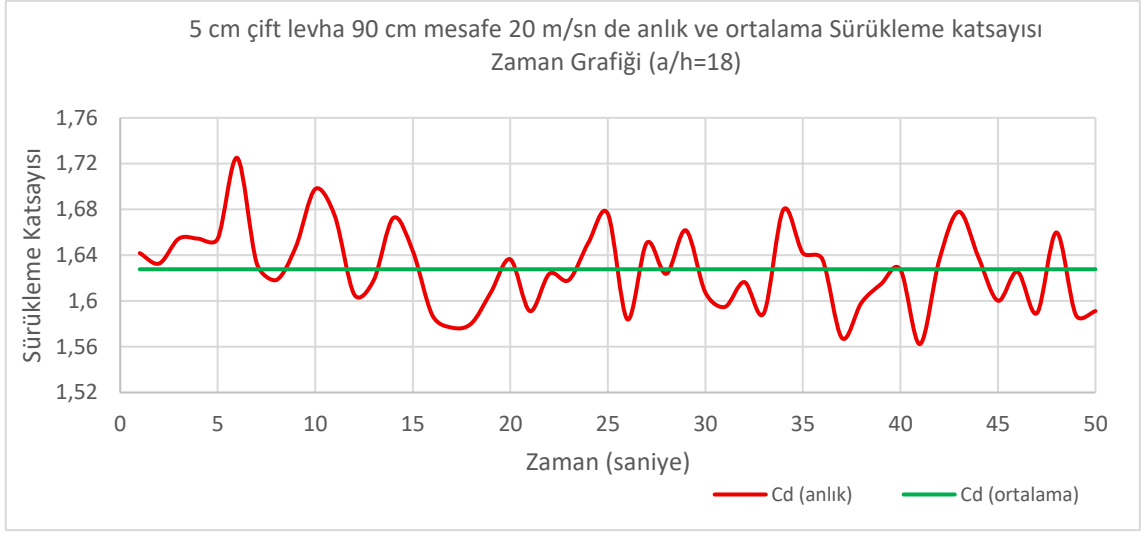












EK 2 10-30 m/s Hızlarda a/h Oranı ile Sürüklenme Kuvveti Değişim (a/h. D) Tabloları
EK 2.1. 2 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme kuvveti değişimi (a/h. D)

2 cm levhalarda 10-30 m/s hızlarda a/h oranı ile sürüklenme kuvveti (F) değişimi (a/h. D)					
a/h	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
0	0.52	1.33	2.38	3.73	5.25
1	0.5	1.34	2.35	3.66	5.24
2	0.47	1.31	2.28	3.56	5.03
3	0.45	1.28	2.23	3.48	4.93
4	0.43	1.2	2.14	3.3	4.77
5	0.42	1.17	2.05	3.19	4.62
6	0.39	1.13	2.04	3.21	4.59
7	0.38	1.11	2.02	3.13	4.53
8	0.44	1.13	2.01	3.07	4.45
9	0.5	1.22	2.11	3.2	4.56
10	0.53	1.27	2.17	3.26	4.67
11	0.54	1.31	2.25	3.42	4.9
12	0.56	1.37	2.32	3.57	5.14
13	0.58	1.43	2.45	3.71	5.29
14	0.59	1.49	2.56	3.92	5.51
15	0.64	1.58	2.69	4.12	5.83
16	0.68	1.69	2.88	4.33	6.16
17	0.73	1.72	2.95	4.5	6.43
18	0.75	1.8	3.06	4.67	6.58
19	0.77	1.86	3.23	4.89	6.94
20	0.79	1.88	3.24	4.98	7.09
21	0.8	1.93	3.29	5.11	7.24
22	0.84	2.05	3.48	5.28	7.54
23	0.85	2.03	3.51	5.33	7.56
24	0.89	2.08	3.64	5.55	7.96
25	0.9	2.14	3.69	5.61	7.95
26	0.93	2.29	3.91	6.02	8.47
27	0.95	2.25	3.88	5.9	8.37
28	0.97	2.28	3.9	5.99	8.52
29	0.98	2.32	3.91	6.04	8.62
30	0.99	2.36	4.02	6.15	8.78
31	1.0	2.37	4.07	6.19	8.77
32	1.01	2.31	3.99	6.1	8.65
33	1.04	2.27	3.9	5.99	8.63
34	1.04	2.3	3.96	6.09	8.8
35	1.04	2.41	4.04	6.14	8.77
36	1.09	2.41	4.15	6.27	8.94
37	1.08	2.47	4.23	6.33	9.11
38	1.11	2.55	4.4	6.61	9.31
39	1.12	2.51	4.33	6.56	9.27
40	1.17	2.53	4.34	6.44	9.15
41	1.16	2.67	4.39	6.73	9.36
42	1.2	2.62	4.43	6.69	9.33
43	1.2	2.53	4.25	6.5	9.21
44	1.19	2.51	4.18	6.34	8.97
45	1.23	2.54	4.15	6.23	8.91

EK 2.2. 3 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme kuvveti değişimi (a/h. D)

3 cm levhalarda 10-30 m/s hızlarda a/h oranı ile sürüklenme kuvveti (F) değişimi (a/h. D)					
a/h	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
0	0.96	1.87	3.19	4.91	6.99
1	0.84	1.75	3.10	4.77	6.78
2	0.89	1.77	3.12	4.69	6.65
3	0.82	1.64	2.90	4.50	6.39
4	0.78	1.59	2.81	4.29	6.18
5	0.69	1.44	2.61	4.04	5.87
6	0.69	1.37	2.42	3.80	5.46
7	0.86	1.48	2.62	3.96	5.66
8	0.85	1.55	2.69	4.10	5.87
9	0.89	1.65	2.80	4.29	6.11
10	0.92	1.71	2.93	4.52	6.44
11	1.03	1.85	3.20	4.82	6.91
12	1.04	1.91	3.32	5.08	7.22
13	1.10	2.11	3.52	5.43	7.71
14	1.19	2.24	3.82	5.77	8.25
15	0.95	2.03	3.63	5.60	7.96
16	1.03	2.21	3.92	6.18	8.91
17	1.21	2.45	4.27	6.53	9.39
18	1.36	2.68	4.64	6.92	9.85
19	1.24	2.46	4.27	6.64	9.60
20	1.35	2.74	4.77	7.50	10.81
21	1.44	2.79	4.92	7.56	10.99
22	1.34	2.83	4.88	7.64	11.07
23	1.36	2.86	5.04	7.87	11.43
24	1.39	3.03	5.28	8.15	11.76
25	1.55	3.15	5.42	8.25	12.02
26	1.48	3.08	5.26	8.31	11.90
27	1.47	3.13	5.45	8.51	12.17
28	1.59	3.22	5.51	8.55	12.28
29	1.52	3.14	5.55	8.52	12.09
30	1.48	3.08	5.30	8.42	11.90

EK 2.3. 5 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme kuvveti değişimi (a/h. D)

5 cm levhalarda 10-30 m/s hızlarda a/h oranı ile sürüklenme kuvveti (N) değişimi (a/h. D)					
a/h	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	
0	1.77	3.77	6.62	9.87	13.87
1	1.70	3.61	6.14	9.55	13.64
2	1.62	3.39	5.78	8.92	12.95
3	1.38	3.02	5.09	7.77	11.21
4	1.07	2.53	4.79	7.36	10.84
5	1.13	2.55	4.45	7.02	10.14
6	1.21	2.50	4.49	6.84	9.98
7	1.24	2.72	4.59	7.11	10.20
8	1.50	3.07	5.31	7.96	11.18
9	1.67	3.27	5.61	8.51	12.10
10	1.72	3.37	5.84	8.97	12.84
11	1.63	3.64	6.21	9.52	13.62
12	1.88	3.87	6.82	10.36	14.74
13	1.93	4.06	7.16	11.07	15.45
14	1.93	4.15	7.58	11.35	16.25
15	2.20	4.62	7.86	11.98	17.01
16	2.24	4.72	8.14	12.37	17.33
17	2.33	4.72	8.22	12.41	17.62
18	2.12	4.60	7.98	12.17	17.36

EK 3. a/h Oranı ile Sürüklenme Katsayısı Değişim (a/h. Cd) Tablosu

EK 3.1. 2 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h. Cd)

2 cm levhalarda 10-30 m/s hızlarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h. Cd)					
a/h	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
0.00	0.96	1.09	1.09	1.10	1.08
1.00	0.91	1.10	1.08	1.08	1.07
2.00	0.87	1.07	1.05	1.05	1.03
3.00	0.83	1.05	1.03	1.03	1.01
4.00	0.80	0.98	0.99	0.97	0.98
5.00	0.77	0.96	0.95	0.94	0.95
6.00	0.72	0.92	0.94	0.95	0.94
7.00	0.70	0.91	0.93	0.92	0.93
8.00	0.82	0.93	0.93	0.90	0.91
9.00	0.92	1.00	0.97	0.94	0.93
10.00	0.98	1.04	1.00	0.96	0.96
11.00	1.00	1.08	1.04	1.01	1.00
12.00	1.03	1.12	1.07	1.05	1.05
13.00	1.06	1.17	1.13	1.09	1.08
14.00	1.09	1.22	1.18	1.16	1.13
15.00	1.17	1.29	1.24	1.21	1.19
16.00	1.26	1.39	1.33	1.28	1.26
17.00	1.34	1.41	1.36	1.33	1.32
18.00	1.38	1.48	1.41	1.38	1.35
19.00	1.43	1.52	1.49	1.44	1.42
20.00	1.46	1.54	1.49	1.47	1.45
21.00	1.47	1.58	1.52	1.51	1.48
22.00	1.54	1.68	1.60	1.56	1.54
23.00	1.56	1.67	1.62	1.57	1.55
24.00	1.64	1.71	1.68	1.64	1.63
25.00	1.67	1.75	1.70	1.65	1.63
26.00	1.72	1.88	1.80	1.78	1.73
27.00	1.75	1.84	1.79	1.74	1.71
28.00	1.79	1.87	1.80	1.77	1.75
29.00	1.80	1.90	1.80	1.78	1.76
30.00	1.83	1.93	1.85	1.81	1.80
31.00	1.85	1.94	1.88	1.83	1.80
32.00	1.86	1.89	1.84	1.80	1.77
33.00	1.91	1.86	1.80	1.77	1.77
34.00	1.91	1.88	1.82	1.79	1.80
35.00	1.93	1.97	1.86	1.81	1.80
36.00	2.00	1.97	1.91	1.85	1.83
37.00	1.99	2.02	1.95	1.87	1.87
38.00	2.05	2.09	2.03	1.95	1.91
39.00	2.06	2.06	2.00	1.94	1.90
40.00	2.15	2.07	2.00	1.90	1.87
41.00	2.14	2.18	2.02	1.99	1.92
42.00	2.22	2.14	2.04	1.97	1.91
43.00	2.21	2.07	1.96	1.92	1.89
44.00	2.20	2.05	1.93	1.87	1.84
45.00	2.26	2.08	1.91	1.84	1.82

EK 3.2. 3 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h. Cd)

3 cm levhalarda 10-30 m/s hızlarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h. Cd)					
a/h	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
0	1.18	1.02	0.98	0.97	0.96
1	1.03	0.96	0.95	0.94	0.93
2	1.09	0.97	0.96	0.92	0.91
3	1.01	0.90	0.89	0.89	0.87
4	0.96	0.87	0.86	0.85	0.84
5	0.85	0.79	0.80	0.80	0.80
6	0.85	0.75	0.75	0.75	0.75
7	1.06	0.81	0.81	0.78	0.77
8	1.05	0.85	0.83	0.81	0.80
9	1.09	0.90	0.86	0.84	0.84
10	1.13	0.93	0.90	0.89	0.88
11	1.27	1.01	0.99	0.95	0.94
12	1.28	1.04	1.02	1.00	0.99
13	1.36	1.15	1.08	1.07	1.05
14	1.47	1.22	1.18	1.14	1.13
15	1.17	1.11	1.12	1.10	1.09
16	1.27	1.21	1.21	1.22	1.22
17	1.49	1.34	1.31	1.29	1.28
18	1.67	1.47	1.43	1.36	1.35
19	1.52	1.34	1.31	1.31	1.31
20	1.66	1.50	1.47	1.48	1.48
21	1.78	1.53	1.51	1.49	1.50
22	1.65	1.55	1.50	1.51	1.51
23	1.68	1.57	1.55	1.55	1.56
24	1.71	1.66	1.63	1.60	1.61
25	1.91	1.72	1.67	1.62	1.64
26	1.82	1.68	1.62	1.64	1.63
27	1.81	1.71	1.68	1.68	1.66
28	1.95	1.76	1.70	1.68	1.68
29	1.87	1.72	1.71	1.68	1.65
30	1.82	1.69	1.63	1.66	1.63

EK 3.3. 5 cm levhalarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h. Cd)

5 cm levhalarda 10-30 m/s hızlarda a/h oranı ile sürüklenme katsayısı değişimi (a/h. Cd)					
a/h	10 m/s	15 m/s	20 m/s	25 m/s	30 m/s
0.00	1.30	1.24	1.22	1.17	1.14
1.00	1.26	1.19	1.13	1.13	1.12
2.00	1.20	1.11	1.07	1.05	1.06
3.00	1.02	0.99	0.94	0.92	0.92
4.00	0.79	0.83	0.88	0.87	0.89
5.00	0.84	0.84	0.82	0.83	0.83
6.00	0.89	0.82	0.83	0.81	0.82
7.00	0.92	0.89	0.85	0.84	0.84
8.00	1.10	1.01	0.98	0.94	0.92
9.00	1.23	1.07	1.04	1.01	0.99
10.00	1.27	1.10	1.08	1.06	1.05
11.00	1.21	1.19	1.15	1.12	1.12
12.00	1.39	1.27	1.26	1.22	1.21
13.00	1.43	1.33	1.32	1.31	1.27
14.00	1.43	1.36	1.40	1.34	1.33
15.00	1.63	1.52	1.45	1.42	1.40
16.00	1.66	1.55	1.50	1.46	1.42
17.00	1.72	1.55	1.52	1.47	1.45
18.00	1.57	1.51	1.47	1.44	1.42

ÖZGEÇMİŞ

ORCID NO: 0000-0002-7684-482X

Ad Soyad : Eşref ÇAKIR

Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim ve Mesleki Geçmişi:

- Lisans, 2012, Anadolu Üniversitesi/Sivil Havacılık Yüksekokulu/Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü/Uçak Gövde-Motor Bakım
- Yüksek Lisans, 2016, Erciyes Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/Sivil Havacılık
- Doktora, 2025, Eskişehir Teknik Üniversitesi/Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/Uçak Gövde-Motor Bakım

Yayınları ve/veya Bilimsel/Sanatsal Faaliyetleri:

- Karcı A., Erturun V., Çakır E. Ve Çam Y. (2024) Fatigue Crack Growth Rate And Propagation Mechanisms Of Sic Particle Reinforced Al Alloy Matrix Composites Aircraft Engineering And Aerospace Technology.
- Karcı A. Ve Çakır E. (2014) Parçacık Takviyeli Al Matrisli Kompozitlerin Yorulma Çatlak İlerleme Hızı ve Yorulma Çatlak İlerleme Mekanizmaları V. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı