



**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KUŞ TÜYÜNDEN ESİNLENEN YÜZEYLERDE SÜRÜKLEMENİN
AZALTILMASI**

AHMET İLYAS KODAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Makine Mühendisliği Programı

**DANIŞMAN
Prof. Dr. HASAN RIZA GÜVEN**

Aralık, 2017

İSTANBUL

Bu çalışma, 19.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Makine Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi



Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVENİ(Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Erol UZAL
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Prof. Dr. Nurdil ESKİN
İstanbul Teknik Üniversitesi
Makine Fakültesi



Prof. Dr. Mesut GÜR
İstanbul Teknik Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Banu KÖRBAHTI
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi



20.04.2016 tarihli resmi gazetede yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi'nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda bana rehberlik eden değerli danışman hocam Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN' e saygılarımı sunarım.

Tez çalışmam sürecinde bana destek veren ve yardımlarını esirgemeyen saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Şule KAPKIN'a yardımlarından dolayı sayın Oğuzhan Şan'a ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen değerli aileme teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2017

Ahmet İlyas KODAL



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
TABLO LİSTESİ.....	viii
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR.....	4
3. MALZEME VE YÖNTEM.....	6
3.1 AKIŞKAN SÜRÜKLEME MEKANİĞİ	6
3.2 KUŞ TÜYLERİNİN SÜRÜKLEME AZALTILMASINDAKİ ETKİLERİ	13
3.3 ÇIKINTI YÜZEYLERİNİN OPTİMİZASYONU	14
3.3.1 İKİ BOYUTLU ÇIKINTILARIN OPTİMİZASYONU	15
3.3.1.1 İki Boyutlu Modeller	19
3.3.1.2 İki Boyutlu Modeller İçin Akış Hacmi	21
3.3.1.3 İki Boyutlu Modeller için Sayısal Ağ Yapısı Mesh	22
3.3.1.4 İki Boyutlu Modellerin Analizi.....	27
3.3.2 ÜÇ BOYUTLU ÇIKINTILARIN OPTİMİZASYONU	27
3.3.2.1 Üç Boyutlu Modeller.....	28
3.3.2.2 Üç Boyutlu Modeller İçin Akış Hacmi	29
3.3.2.3 Üç Boyutlu Modeller İçin Sayısal Ağ Yapısı	30
3.3.2.4 Üç Boyutlu Modellerin Analizi	31
4. BULGULAR.....	32
4.1 İKİ BOYUTLU MODELLER İÇİN BULGULAR	32
4.2 ÜÇ BOYUTLU MODELLER İÇİN BULGULAR	36
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	39
KAYNAKLAR.....	40
ÖZGEÇMİŞ	44

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1: Pürüzsüz Yüzey ve Golf topu çukuru deseni ile kaplanmış otomobil.....	1
Şekil 1.2: Köpekbalığı derisi ile kaplanmış torpido ve Köpekbalığı derisi mikroskopik görüntüsü	2
Şekil 1.3: Köpekbalığı derisi ile kaplanmış uçak.....	2
Şekil 3.1: Düz bir tabaka üzerinde laminar akış ve türbülanslı akış arasındaki geçiş (Munson ve diğ. 2005)	7
Şekil 3.2: Lee ve Lee'nin havada atomize zeytin yağı kullanılarak, düz yüzey ve çıkıntılı yüzeyde 3 ve 5 m/s hızlarda yaptığı deneyin kesit görünümü.....	8
Şekil 3.3: Türbülans sınır tabaka ve çıkıntılı yüzey için hız profili görünüşü (Bechert, 1989).....	10
Şekil 3.4: Kuş tüyü mikro yapısı.....	14
Şekil 3.5: Testere dişli modellerin optimizasyonu (Bechert, 1997).....	16
Şekil 3.6: Taraklı modellerin optimizasyonu (Bechert ve diğ. 1997).....	17
Şekil 3.7: Bıçak çıkıntı modellerin optimizasyonu (Bechert, 1997).....	18
Şekil 3.8: Sapma açısının s^+ değerine göre değişim grafiği (Bechert, 1997).....	19
Şekil 3.9: (a) A tipi (b) B tipi (c) C tipi (d) D tipi (e) E tipi (f) F tipi (g) G tipi modellerin görünümü.....	20
Şekil 3.10: İki boyutlu modellerin akış hacmi	22
Şekil 3.11: A tipi modelin mesh görünümü	23
Şekil 3.12: B tipi modelin mesh görünümü	24
Şekil 3.13: C tipi modelin mesh görünümü	24
Şekil 3.14: D tipi modelin mesh görünümü	25
Şekil 3.15: E tipi modelin mesh görünümü.....	25
Şekil 3.16: F tipi modelin mesh görünümü	26
Şekil 3.17: G tipi modelin mesh görünümü	26

Şekil 3.18: Kuş tüyünün mikroskobik görüntüsü (Chen ve diğ. 2014).....	27
Şekil 3.19: Üç boyutlu modelin görünümü	28
Şekil 3.20: Üç boyutlu modellerin şematik görünümü (Testere dişli ve bozuk testere dişli).....	29
Şekil 3.21: Üç boyutlu modellerin akış hacmi görünümü	30
Şekil 3.22: Üç boyutlu modellerin mesh görünümü	31
Şekil 4.1: A tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri	33
Şekil 4.2: B tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri	33
Şekil 4.3: C tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri	34
Şekil 4.4: D tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri	34
Şekil 4.5: E tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri	35
Şekil 4.6: F tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.....	35
Şekil 4.7: G tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri	36
Şekil 4.8: s^+ - (DR) Sürüklenme azaltma oranı grafiği	37
Şekil 4.9: E2 modelin duvara yakın kısmındaki hız konturleri.....	38
Şekil 4.10: B2 modelin duvara yakın kısmındaki hız konturleri	38

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: İki boyutlu modellerin boyutları (sabit s değeri).....	21
Tablo 3.2: İki boyutlu modellerin boyutları (sabit h değeri)	21
Tablo 3.3: Üç boyutlu modellerin boyutları	29
Tablo 4.1: İki boyutlu modellerin yüzey kayma gerilmeleri	32
Tablo 4.2: Üç boyutlu modellerin kayma gerilmeleri ve sürüklenme azaltma oranları	37

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

h	: Çıkıntı yüksekliği
s	: Çıkıntı genişliği
t	: Çıkıntı tepesinin uzunluğu
Re	: Reynolds sayısı
h^+	: Boyutsuz yükseklik
s^+	: Boyutsuz genişlik
ρ	: Yoğunluk
μ	: Dinamik viskozite
τ	: Kayma gerilmesi
ν	: Kinematik viskozite
u	: Akışkanın ortalama hızı
D	: Hidrolik çap
G_k	: Ortalama hız gradyanından dolayı üretilen türbülans kinetik enrejisi
G_b	: Akışkan itme gücünden oluşan türbülans kinetik enerjisi
Y_m	: Sıkıştırılabilir türbülanstaki dalgalanma genişlemesinin genel dağılım oranı
C_T	: Sürtünme katsayısı

Kısaltmalar

Açıklama

CFD	: Computational Fluid Dynamics
DR	: Sürüklenme azalma oranı (Drag reduction rate)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KUŞ TÜYÜNDEN ESİNLENEN YÜZEYLERDE SÜRÜKLEMENİN AZALTILMASI

Ahmet İlyas KODAL

İstanbul Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN

Günümüzde giderek azalan yakıt kaynakları, ulaşımda yakıt harcamasının azaltılması yönündeki çalışmalara önem kazandırmıştır. Yüzeylerde sürüklemeyi azaltmak bu alanda önemli bir yöntemdir. Örneğin, sürüklenme sadece bir geminin gövde formunu optimize ederek değil ayrıca yüzey yapısı da değiştirilerek azaltılabilir. Köpekbalığı derisi ilham alınmış yüzeyler sürüklemeyi %10'a kadar azaltırken kuş tüyü ilham alınarak yapılmış yüzeylerde azalma %20'lere kadar çıkmaktadır. Bu çalışmada ilk olarak kuş tüyünden esinlenerek hazırlanmış iki boyutlu yüzeyleri bilgisayar destekli hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile analizi yapılarak, sürüklenme azaltma parametrelerinden olan kayma gerilmeleri incelenmiştir. İki boyutlu modelleri referans olarak üç boyutlu geometriler modellenmiş ve yine aynı şekilde analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları literatürde daha önceden yapılmış deneysel çalışmalar ile karşılaştırılmıştır.

Aralık 2017, 55 sayfa.

Anahtar kelimeler: HAD, Kuş tüyü, Micro yapılar, Sürüklenme azaltılması

SUMMARY

M.Sc. THESIS

DRAG REDUCTION ON BIRD FEATHER INSPIRED SURFACES

Ahmet İlyas KODAL

İstanbul University

Institute of Graduate Studies in Science and Engineering

Department of Mechanical Engineering

Supervisor : Prof. Dr. Hasan Rıza GÜVEN

Increasingly scarce fuel resources have gained importance in recent years to reduce fuel consumption in transportation. Reducing drag on the surface is an important method in this area. For example, drag can be reduced not only by optimizing the hull form of a ship, but also by altering its surface structure. Shark skin inspired surfaces reduce drag by up to 10%, while bird feather inspired surfaces reduce the drag up to 20%. In this study, two dimensional surfaces inspired by bird feathers were analyzed with computer aided computational fluid dynamics (CFD) and the shear stresses of the drag reduction parameters were investigated. Three dimensional geometries were modeled with reference to two dimensional models and analyzed in the same way. The results of the analysis are compared with experimental studies that have been done previously in the literature.

December 2017, 55 pages.

Keywords: CFD, Bird feather, Microstructures, Drag reduction

1. GİRİŞ

Yüzey sürtünmesinin azaltılması mühendislik alanlarında yapılan çalışmalarda önemli bir rol alır. Sürüklemenin azaltılması nesnelerin akış içindeki hareketlerinde daha az enerji harcamasına, daha hızlı hareket edebilmesine ve daha fazla mesafe alması sağlanabilir. Daha az sürüklenme ile birçok alanda daha fazla verim elde edileceğinden son zamanlarda sürüklenme azaltılması üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Sürüklemenin azaltılması, ulaşım, endüstri, biyonik kirlenmeler ve tıbbi alanlarında istenen bir durumdur. Örneğin, sürüklemenin azalması ile kara taşıtların, hava taşıtların ve gemilerin yakıt sarfiyatı azaltılır. Endüstri alanında örnek verilmek istenirse, borulardan geçen akışkanların sürüklemenin azaltılması ile daha az pompa enerjisi kullanabileceğidir. Tıbbi alanda ise protezlerde, biyonik sensörlerde ve kateterlerde sürüklenme azaltılarak biyonik kirlenmeler en aza indirilebilir.

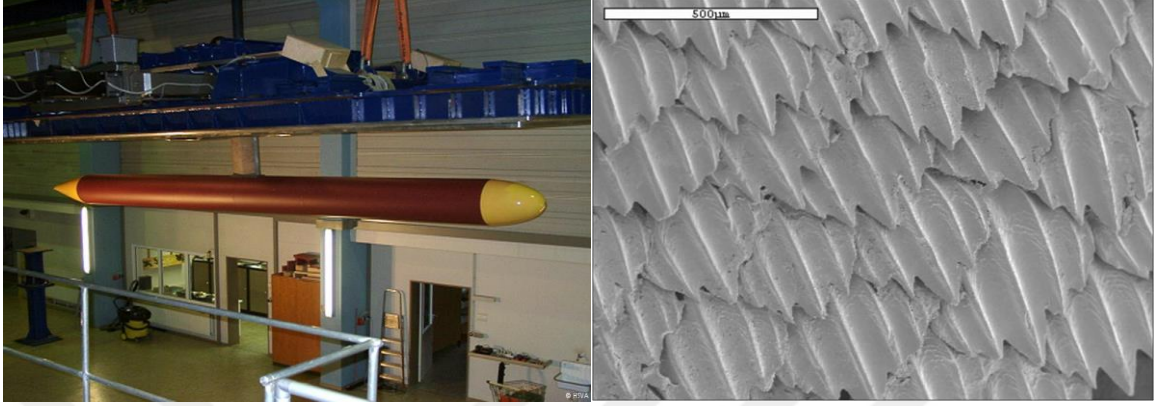
Amerikan televizyon programı olan Mythbusters, yaptığı deneyde Ford Taurus marka otomobili kil ile pürüzsüz ve golf topundaki çukurlar ile kaplayarak ne kadar yakıt harcadığını test etmişlerdir. Test sonuçlarına göre sırasıyla litre başına 11.05 ve 12.32 km yakıt tüketimi hesaplamışlardır. Bu da göstermektedir ki yüzeydeki çukurlar sürüklenme direncini azaltarak yakıt tüketiminin de azaltılmasını sağlar. Şekil 1.1’de pürüzsüz yüzey ve golf topu çukuru deseni ile kaplanmış otomobillerin resimleri verilmiştir.



Şekil 1.1: Pürüzsüz Yüzey ve Golf topu çukuru deseni ile kaplanmış otomobil.

Yakıt tasarruflu gemi tasarımların testlerinin yapıldığı Hamburg test tesislerinde sekiz metre uzunluğunda, yüzeyi köpekbalığı derisinden esinlenen çıkıntılı yüzey ile kaplanmış Şekil 1.2’de görünen torpido test edilmiştir. Testler sonucunda hız artıka çıkıntıların direncin

azaldığını göstermektedir. Böylelikle çıkıntılı yüzey ile kaplanmış gemiler hızlı giderek yılda 300.000 dolarlara kadar yakıt tasarrufu edebilirler.



Şekil 1.2: Köpekbalığı derisi ile kaplanmış torpido ve Köpekbalığı derisi mikroskobik görüntüsü. Alman hava yollarından Lufthansa Teknik iki Airbus A340 model uçağı, köpekbalığı derisinden kopyalanmış yüzey ile kaplayıp test etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda mikroyapıların uçak yüzeylerinde kullanılması, aerodinamiği geliştirerek harcanan enerjiyi ve yakıt tüketimini azalttığı saptanmıştır. Bu yüzey, uçağın %40 ila %70'ine uygulandığında yakıt tüketiminin yaklaşık yüzde bir oranında azaltılabileceği tahmin ediliyor. Lufthansa'nın yılda 90.000 ton yakıt yakması, bu yüzde birlik oranın cari fiyatlarla yaklaşık 94 milyon dolar tasarruf edilmesine eşittir.



Şekil 1.3: Köpekbalığı derisi ile kaplanmış uçak.

Ulaşımında olduğu gibi sürüklenme azaltılarak, borularda, rüzgar türbinlerinde ve akışın geçtiği bütün endüstriyel uygulamalarda enerji tasarrufu edilebilir. Sürüklemenin az olması ayrıca biyonik kirlenmelerinde az olmasıdır. Biyonik kirlenmeler tıbbi alanlarda, denizde ve endüstri

alanlarında sıkça karşılaşılan problemlerdendir. Bu problemler doğadan esinlenerek yapılan çıkıntılı yüzey kaplama yöntemiyle sürüklenme azaltılarak giderilir.

Bu çalışmada yüzeyler kuş tüyünden esinlenerek optimize edilip sürüklemeyi düşüren en uygun boyutların bulunması hedeflenmiştir. HAD analizinde zamandan tasarruf etmek için yüzeyler iki boyutlu olarak modellenmiştir. İki boyutlu modellerin analizi sonucunda uygun değerler veren 2 yüzey üç boyutlu modellenerek sürüklenme analizi yapılmıştır. Son olarak had ve önceden yapılmış olan literatür çalışmalarındaki sonuçlar karşılaştırılmıştır.



2. GENEL KISIMLAR

Köpekbalığı derisi benzeri pürüzlü yüzeylerde yapılan çalışmalarda, Walsh ve diğ. (1989), yüzeyinde küçük oluklu yapıların sınır tabakasındaki sürtünme sürüklenmesini önemli ölçüde azalttığını bulmuşlardır. Bu çalışmalar, akışkan sürüklenme azalmasında biyonomik pürüzsüz yüzeylerin uygulanmasını teşvik etti ve sürüklemeyi azaltmak için havacılık, denizcilik, kara taşıtları ve askeri uygulamalara odaklanan araştırmalara yol açtı. Bullen ve Mckenzie (2008) yaptıkları çalışmada, batı Avustralya da yaşayan 23 çeşit yarasa türlerinin baş ve gövde derilerini inceleyerek yüksek hızda uçan türlerin derisindeki pürüzlü çıkıntılı yüzey alanlarının sürüklenme direncini %10 olarak azalttığını gözlemlemişlerdir. Sürtünme direnci üzerindeki yüzey biçiminin etkisini incelemek için Bourisli ve Al-Sahhaf (2008), kare, üçgen ve yarı dairesel olmak üzere üç farklı yönde oluklar kullanan bir dizi simülasyon testiyle sürtünme katsayısını ve hızını analiz etmişlerdir. Sonuç olarak pürüzsüz yüzeylerin üçünün de pürüzsüz yüzeylere kıyasla daha az direnç verdiğini ve üçgen çıkıntılı yüzeylerin en büyük sürüklenme azalmasını sağladığını bulmuşlardır. Simülasyon yazılımı kullanan El-Samni ve diğ. (2005;2007), farklı çıkıntı yapıları ve oluklar arası aralıklarla kıvrım benzeri pürüzsüz yüzeylerde kütle akışını dengelemek için basınç gradyanı belirlediler. Bu sistem, sürüklenme azaltılması ile ilişkili olarak çıkıntı yapılarını ve çıkıntılar arasındaki boşlukları geometrik olarak optimize etmek için kullanılmıştır ve bu çalışmalarda %11 sürüklenme azalması elde edilmiştir. Ren ve diğ. (2005) yaptığı çalışma yüzey tasarımında biyonomik pürüzsüz yüzey değerlendirmesini içermektedir. Değişken ebatlarda konveks gövde, çukur ve çıkıntı türlerini taşıyan pürüzsüz yüzeyler düşük hızlı, ses altı ve ses üstü rüzgar tüneli testlerine tabi tutulmuştur. Sonuçlar, test edilen pürüzsüz yüzeylerin tümünün azaltılmış direnç verdiğini ve en yüksek sürüklenme azaltma oranının yaklaşık %5 olduğunu ortaya koymuştur. Zhou ve diğ. (2006) güvercin tüyünün pürüzsüz yüzeyini incelemişlerdir. Çıkıntı içeren pürüzlü yüzeylerin bir gövdenin arkasına yerleştirilmesi ile ölçülen sürüklenme azalması %16.56'lıklara kadar sonuç vermiştir. Pürüzsüz yüzeylerde sürüklenme azaltılmasının altında yatan mekanizmaları aydınlatmak için Sirovich ve Karlsson (1997) V-şekilli oluk açılmış yüzeylerdeki sürüklenme azalmasındaki değişimi rüzgar tüneline test etmişlerdir. Sürüklenme azalmasıyla türbülans enerji dağılımının azaldığını bulmuşlardır ve türbülans enerji dağılımında bir azalmanın pürüzlü yüzey yaklaşımı tarafından kullanılan bir mekanizma olabileceğini göstermektedir. Tucker ve Parrottın (1970) yaptığı, Harris şahinin rüzgar tüneline serbest bir şekilde süzüldüğü deneysel çalışmada şahinin uç tüylerini kırpmadan ve kırparak minimum sürüklemeyi

ölçmüşlerdir. Sonuç olarak tüyleri kırpılan şahinin, tüyleri kırılmayan şahine göre %70-%90 sürüklenme artırdığını bulmuşlardır. Nachtigall (1998), hava tüneline deneysel olarak, pürüzsüz sığırcık kuşu modelinin, sığırcık kuşu modeline kıyasla sürüklemesinin %14 daha düşük olduğunu bulmuştur. Chen ve diğ. (2014) su tüneline gerçekleştirdiği deneyde kuş tüyünün yapısından esinlenerek, farklı geometrik şekil ve ölçülere sahip 3 farklı modelde sürüklemenin yükseklik/genişlik oranının 0.6 da en iyi olduğunu ve sürüklemeyi yüzde 21'e kadar azalttığını görmüştür.

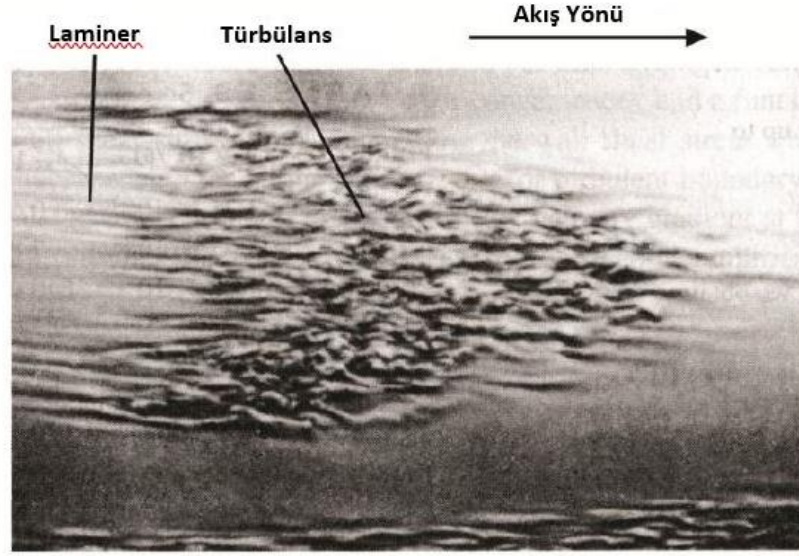


3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1 AKIŞKAN SÜRÜKLEME MEKANİĞİ

Akışın sürüklenmesi temel olarak basınç sürüklemesi ve sürtünme sürüklemesi olarak ikiye ayrılır. Basınç sürüklemesi, akışkanın bir nesne üzerinden geçmesi için gerekli enerji ile ilişkilidir. Su ve hava içindeki sürüklemelerin çoğu basınç sürüklemesidir. Çünkü bir nesnenin akışkan içinde ilerleyebilmesi için nesnenin önündeki akışkanın nesne etrafından yüzeye temas ederek nesnenin arkasına geçmesi gereklidir. Yüzeydeki akıcı şekiller ile basınç sürüklemesinin büyüklüğü azaltılır. Sürtünme ve viskoz sürüklemeleri paralel akıştaki yüzey ve akışkan arasındaki etkileşimden meydana gelir. Sürtünme sürüklemesi, bir masanın üstünde kayan bir deste kartın hareketine benzer. Masa ile destenin altındaki kart arasındaki ve birbirini takip eden her kart arasındaki sürtünme etkileşimleri, sıvı molekülleri arasındaki viskoz etkileşimlerini gibidir. Akışkan akışında bir nesnenin yüzeyinden uzaklaştığında, her akışkan katmanının akışın hızının sıfır olduğu tabakaya ulaşıncaya kadar daha az hızı vardır. Yüksek viskoziteli akışkanlar akışkan tabakaları arasında daha yüksek görünür sürtünmeye sahiptir. Buda bir akışkanın akışı içinde bir nesne tarafından çarpıtılmış akışkan tabakanın kalınlığını artırır. Bu nedenle çok viskozlu akışkanların az viskozlu akışkanlara göre nispeten daha yüksek sürtünmesi vardır. Sürüklenmede benzer bir artış sıvı hızı arttıkça da oluşur. Bir nesne yüzeyinden uzaktaki bozulmamış akışkan ile akışkan katmanında bir hız gradyanı oluşturan sürüklenme, akışkan ile nesne arasındaki momentum transferi için gereken enerjinin bir ölçüsüdür (Dean ve Bhushan, 2010).

Sürtünme sürüklemesi, komşu moleküllerin aynı yönde hareket ettiğini ve farklı hızlarda akan akışkan tabakalar arasında momentum transferinin gerçekleştiğini varsayar. Şekil 3.1’de laminar ve türbülanslı akış arasındaki geçiş görüntüsünü göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi moleküller akış yönünde ortalama hızla dönen ve çapraz akım hareketi yaparlar. Türbülanslı akışta moleküller arasında çapraz akışlı ve paralel olmayan bağıl hızların dahil edilmesi momentum transferinde çarpıcı bir artışa neden olur. Çapraz akış momentum aktarımı özellikle ilgi çekicidir, çünkü tüm momentum bir cismin yüzeyine paralel olarak iletilindiğinde sürüklenmede bir artış meydana gelir. Laminar akıştan türbülanslı akışa geçiş borular için 4000 reynolds sayısında, düz bir plaka için 500,000 reynolds sayısında meydana gelir. Reynolds



Şekil 3.1: Düz bir tabaka üzerinde laminar akış ve türbülanslı akış arasındaki geçiş (Munson ve diğ. 2005).

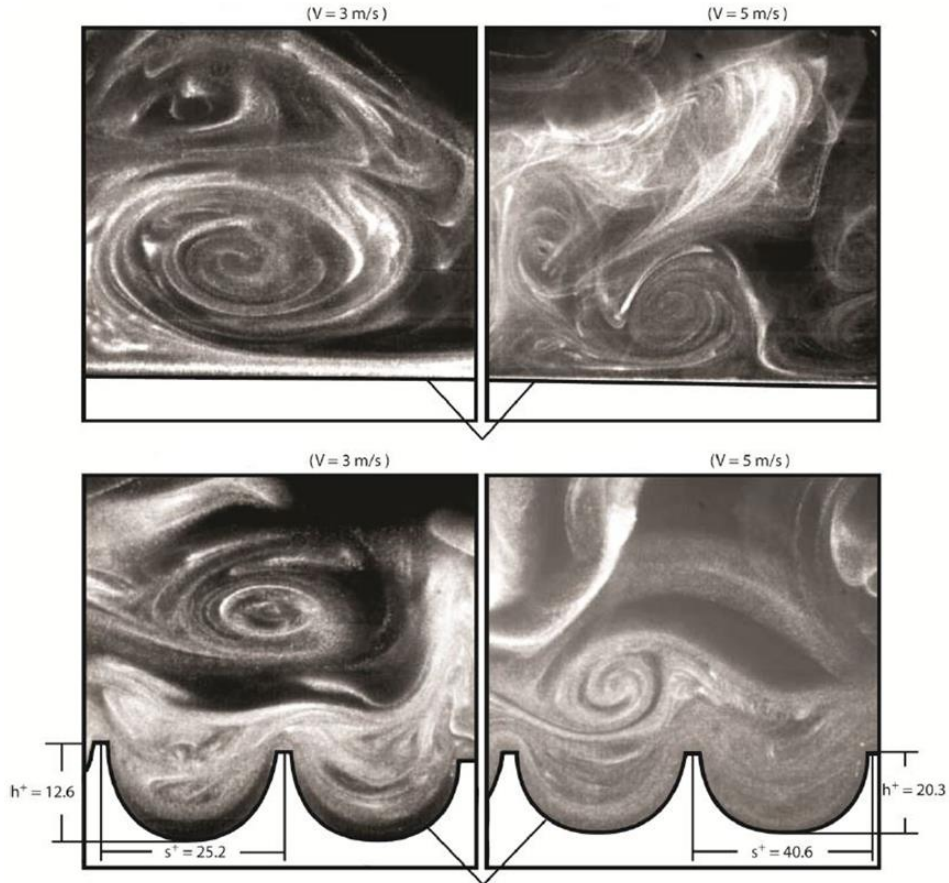
sayısı, Re , belirli bir akıştaki atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranıdır. Boru içindeki akış için,

$$Re = \frac{\text{atalet kuvvet}}{\text{Viskoz kuvvet}} = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.1)$$

formulu kullanılır. Burada (ρ) akışkan yoğunluğunu, (V) akışkanın hızını, (D) borunun çapını ve (μ) dinamik viskoziteyi göstermektedir. Düz bir plakanın üzerindeki akış için aynı formülde borunun çapı yerine plakanın uzunluğu (L) alınır. Reynolds sayısının yukarıdaki geçiş değerlerinden çok daha düşük değerler için moleküller arasındaki viskoz kuvvetler ile laminar akış hakim olur. Daha büyük reynolds değerleri için, akış atalet kuvvetleri tarafından türbülansa hakimdir. (Munson ve diğ. 2005)

Tamamen gelişmiş türbülanslı akış hız dağılımında tam rastgelelik sergilediği genel olarak bilinir ve tam gelişmiş türbülanslı akış içinde farklı desenler ve akış karakteristikleri gösteren farklı bölgeler mevcuttur (Kline ve diğ. 1967). Viskoz alt tabakada organizasyon belirgin olmakla birlikte yüzeye en yakın tabaka ve dış katmandaki türbülanslı sınır tabakalar karışık ve düzensizdir. Bu viskoz alt tabakadaki düzensiz hareketler viskoz alt tabaka yüzeyinde oluşan akım içerisindeki girdapların dışarı püskürtülmesine neden olur. Akışkan girdaplar (ortalama hız yönünde eksenler etrafında dönen girdaplar) viskoz alt katmanda meydana gelir. Bu girdaplar yüzey boyunca dönerken ve akarken, yüzeyde doğal olarak çapraz akış yönüne

dönüşürler. Hem girdaplar ve yüzey arasındaki etkileşim hem de komşu girdapların birbiriyle çarpışarak girdaplar yüzeyden hızla dışarıya ve dış sınır tabakalarına atılır. Atılan girdaplar, diğer girdaplarla karışırlar ve çapraz akış yönündeki geçici hız vektörlerinin ortalama akış yönündeki hız vektörleri kadar genişleyebileceği şekilde bükülürler (Kline ve diğ. 1967). Girdapların viskoz alt katmanın dışına atılması ve türbülanslı sınır tabaka akışının dış katmalarındaki düzensiz akışı, momentum aktarımının biçimidir ve akışkan sürüklemesinde büyük faktörlerdir. Akış yönünde dönen girdapların dışarı atılma davranışının azaltılması, sürüklenme azaltılmasının kritik bir hedefi olup, bunun sunduğu sürüklenme azaltma olasılıkları oldukça büyüktür. Lee ve Lee'nin havada atomize zeytin yağı kullanılarak, düz yüzey ve çıkıntılı yüzeyde 3 ve 5 m/s hızlarda yaptığı deneyin kesit görünümünün görselleştirilmesi şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2: Lee ve Lee'nin havada atomize zeytin yağı kullanılarak, düz yüzey ve çıkıntılı yüzeyde 3 ve 5 m/s hızlarda yaptığı deneyin kesit görünümü.

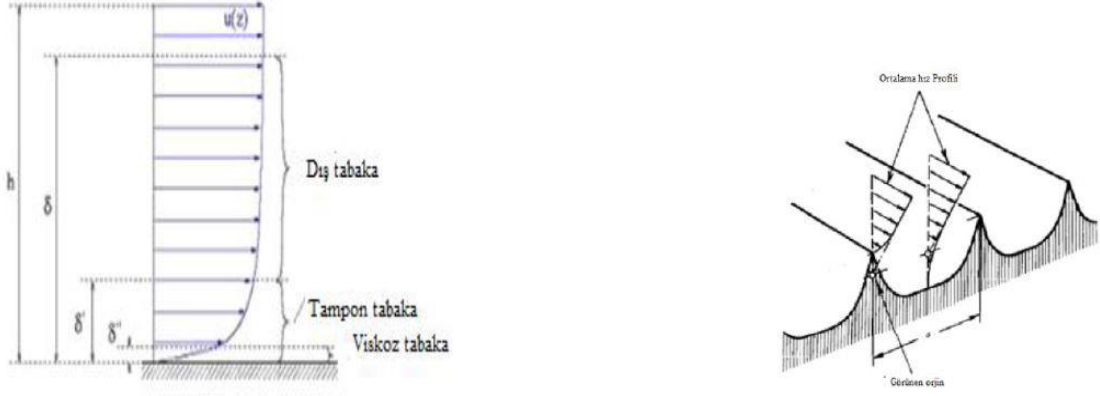
Köpekbalıkların derisini kaplayan küçük çıkıntılar, yüzey boyunca toplam kayma gerilmesini azaltarak ve viskoz alt tabakadaki akış yönündeki girdapların çapraz akışa çevirmesine

engelleyerek çalışırlar. Bu etkiler ve bu etkilerin sürüklenme azaltılmasındaki rolü anlaşılır olmasına rağmen girdap çevirisinde azalmaya neden olan mekanizmalar tam olarak anlaşılmamıştır.

Köpekbalığı derisinden esinlenerek oluşturulan çıkıntılı yüzeylerin sürüklemeyi artırmasının klasik nedenlerinden biride ıslak yüzey alanını artırmasıdır. Türbülanslı akış rejiminde, daha geniş yüzey alanına etki eden kayma gerilmelerinden ötürü akışkan sürüklenmesi yüzey alanında artar. Bununla birlikte, girdaplar bir çıkıntı yüzeyi üzerinde olduğundan çıkıntıların üstünde kalırlar ve yalnızca uçlarla etkileşirler. Nadiren çıkıntıların çukurlarında yüksek hızlı akış oluşur. Yüksek hızdaki girdaplar çıkıntı uçlarında yalnızca küçük bir yüzey alanı ile etkileşime girdiğinden, sadece bu alan yüksek kayma gerilmelerine maruz kalır. Çıkıntıların çukurlarındaki düşük hızlı akışkan akışı çıkıntı yüzeylerine nazaran daha düşük bir kayma gerilmesi oluşturmaktadır. Girdapları çıkıntıların uçlarında tutarak, çıkıntı çukurlarında çapraz akım hızı değişimleri, düz bir plakanın üzerindeki çapraz akım hızı değişimlerinden çok daha düşüktür (Lee ve Lee, 2001). Çapraz akış hız değişimindeki bu fark, yüzeyin yakınında kayma gerilmesi ve momentum transferinde azalma olduğunun bir göstergesi olup artan yüzey alanın etkisini en aza indirir. Girdaplar, çıkıntı uçlarının üzerinde kalmasına rağmen, çıkıntı çukurlarında süreksiz olarak bazı ikincil girdap oluşumları meydana gelir. Bu süreksiz ikincil girdapların akış hızının artması, çıkıntı çukur yüzeyindeki etkileşiminin az olması nedeniyle kayma gerilmesini artırır.

Akış, akışkan sürüklemesini fazla artırmadan çapraz akımı ve benzer etkileri azaltmak için çıkıntıların girdaplarla etkileşime girmesini sağlar. Çıkıntılar akış alanında iken, etkili akış kaynağını bir miktar yükseltirler. Çıkıntıların yüksekliklerin akışın başlangıçtaki dikey kaymasından daha büyük olduğu miktara etkili çıkıntı yüksekliği denir. Çıkıntı yüzeyleri üzerindeki yüksekliklerde laminar akışın ortalama akış yönü hızını hesaplayarak ve bunları düz bir plakanın üzerindeki yüksekliklerde laminar akışın ortalama akış yön hızlarıyla karşılaştırarak etkili akış yönündeki çıkıntı yüksekliği, h_{ps} , laminar akış için bulunmuştur. Etkili çapraz akışlı çıkıntı yüksekliği, h_{pc} , bir çıkıntı yüzeyi üzerindeki çapraz akış hızlarını düz bir plakanınkilere kıyasla laminar akış için benzer şekilde bulunur. Akış yönünde ve çapraz akım akış hızı profilleri ve etkili çıkıntı yüksekliklerinin bir şeması şekil 3.3'de gösterilmektedir. Herhangi bir çıkıntı geometrisinin düşük reynolds akışları için girdap dönüşümlerini azalttığı durumlarda akış yönü ve çapraz akım kaynağındaki dikey kaymalar

arasındaki fark, $\Delta h = h_{ps} - h_{pc}$, olarak bulunur (Bechert ve diğ, 1997). Reynolds sayısı arttıkça artan yüzey alanı genel akışkan sürüklenmesini etkiler ve bu laminar akış teorilerine sürüklenme azaltma korelasyonunu bozar.



Şekil 3.3: Türbülans sınır tabaka ve çıkıntılı yüzey için hız profili görünüşü (Bechert, 1989).

Çıkıntıların akış yönü olmayan momentum transferinde azaltma sağlaması sürüklenme azaltılmasındaki ikinci mekanizmadır. Bu mekanizmalar tamamen anlaşılmamasına rağmen, akışa çıkıntı yapan çıkıntılar çapraz akış kayma gerilmesinde bir artışa neden olur (Bechert ve diğ. 1997). Bu da girdap etkileşimini, boşaltımı ve dış tabaka türbülansını azaltan çapraz akışlı girdap dönüşümünde bir azalmaya neden olur. Çıkan girdaplarda taşınan ve akış yönü olmayan yönlerde aktarılan momentum akış verimliliği için tamamen boşa harcanır ve yüzeydeki girdapların translasyonunu ve ejeksiyonunu azaltarak, enerji verimliliğinde büyük kazanım sağlar.

Yayınlanan çalışmaları sentezledikten sonra, Zhang (2007) biyonomik pürüzlü yüzeyin, sınır tabakasını kontrol ederek sürüklenme azalmasına aracı olduğunu ve bunun da türbülans kinetik enerji dağılımının frekansını azalttığını varsaymaktadır. Kesin kanıtlardan yoksun olsada, bu varsayım hala uygulamada faydalı bir rehberlik sunmaktadır. Önceki araştırmalara göre, sürüklenme azaltma sağlamak için pürüzlü yüzeylerdeki çıkıntıların yüksekliği veya çukurların derinlikleri, gövde yüzeyleri ile sınır tabakasının en dış kısmı arasındaki mesafeden daha küçük olmalıdır. Yüzeylerdeki akışın hareketi üç tabakayı yani viskoz alt tabaka, tampon tabaka ve logaritmik kanun tabakasını içeren yakın sınır alanının akan durumlarında büyük ölçüde etkilenir. Yakın sınır alanının dışındaki alana, akışın kesinlikle çalkantılı olduğu çekirdek bölgesi veya dış bölge denir. Viskoz alt tabakanın ve logaritmik kanun tabakasının akış

durumunu matematiksel olarak tanımlamak için iki boyutsuz parametre hız u^+ ve mesafe y^+ , aşağıdaki gibi eklenmiştir (Wang, 2004):

$$u^+ = u/u_t \quad (3.2)$$

$$y^+ = (\Delta y/\nu)\sqrt{\tau_w/\rho} \quad (3.3)$$

$$u_t = \sqrt{(\tau_w/\rho)} \quad (3.4)$$

burada, u akışın ortalama hızını, u_t akışın sınır alanına yakın sürtünme hızını, Δy sınır mesafesini, ν akışın kinematik viskozitesini, τ_w sınır akışındaki kayma gerilmesini ve ρ akışın yoğunluğunu temsil eder.

Versteeg ve Malalasekera (1995), tampon tabakasının ayrı olarak tanımlanmadığı basitleştirilmiş bir iki katmanlı model ile çalışmasında, viskoz alt katman ve logaritmik kanun katmanı arasında bir $y^+ = 11.63$ bölme noktası olduğunu bulmuşlardır. Sınırın bitişteki hacim kontrol düğümleri $y^+ \leq 11.63$ 'ü karşılarsa, kontrol düğümlerinin yapışkan alt katman içinde olduğu düşünülür. Buna karşılık, $y^+ > 11.63$ olduğunda düğümler logaritmik yasa katmanı içindedir. Logaritmik kanun katmanı ile iç bölgesi arasındaki arayüzün boyutu, Reynolds sayısının değerine bağlıdır. Wang'a (2004) göre $y^+ > 300$ olduğunda hacim kontrol düğümü iç bölgededir. Öte yandan, Fluent kullanıcı kılavuzu (Fluent Inc., 2006), $y^+ > 500$ olduğunda hacim kontrol düğümünün iç bölgede olduğunu belirtir. Önceden belirtildiği gibi, patlama sıklığını azaltmak için gövde yüzey birimlerindeki yükseklik veya derinlik, gövde yüzeyi ile logaritmik kanun tabakası arasındaki mesafeden daha küçük olmalıdır. Bu çalışmada logaritmik kanun katmanının alanı, düz olmayan birimlerin boyutunu tasarlamak için $11.63 < y^+ < 116.3$ gibi geniş bir aralığı kapsar. Sınır alanının yakınında kayma gerilmesi τ_w aşağıdaki şekilde hesaplanır (Versteeg and Malalasekera, 1995):

$$\tau_w = \rho C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} u/u^+ \quad (3.5)$$

burada C_μ gerilme oranı ile ilgili değişken, k_P P düğümünün türbülans kinetik enerjisi, u P düğümündeki ortalama hızı ve u^+ boyutsuz parametredir.

Yukarıda bahsedilen denklemler daha da basitleştirilerek:

$$\tau_w = \rho k_P C_\mu^{1/2} \quad (3.6)$$

elde edilir.

K-Epsilon Modelin aslı Launder ve Spalding (1972) tarafından verilmiştir. Türbülans enerji k ve dağıtma oranı ε (dissipation rate) aşağıda verilen denklemler ile elde edilir;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R_\varepsilon + S_\varepsilon \quad (3.8)$$

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ model sabitleridir. G_k ortalama hızdan dolayı oluşan kinetik enerjiyi Y_M sıkıştırılabilir türbülanstaki dilatasyonun toplam dağılım oranına katkısını α_k ve α_ε sırasıyla k ve ε nun Prandtl sayılarını temsil eder. S_k ve S_ε kaynak terimlerdir.

Sürüklenme azaltılması oranı aşağıdaki formül ile ifade edilir:

$$DR = \frac{C_{T,\text{çık}} - C_{T,\text{düz}}}{C_{T,\text{düz}}} \times 100 \times 2 \quad (3.9)$$

burada $C_{T,\text{düz}}$ referans olarak alınan pürüzsüz yüzeyin toplam sürüklenme katsayısıdır ve $C_{T,\text{çık}}$ çukıntı eklenen pürüzlü yüzeyin toplam sürüklenme katsayısıdır. Toplam sürüklenme katsayısı;

$$C_T = \frac{2(\overline{\tau_w + D_p})}{\rho u_b^2} \quad (3.10)$$

şeklinde ifade edilir. D_p basınç sürüklemesini, u_b akış debisini gösterir. Sürüklenme azaltma oranı aynı zamanda yüzey kayma gerilmesi kullanılarak da hesaplanılabilir.

$$DR = \frac{\tau_{w,\text{çık}} - \tau_{w,\text{düz}}}{\tau_{w,\text{düz}}} \quad (3.11)$$

τ_w yüzey kayma gerilmesidir. Burada $\tau_{w,\text{düz}}$ referans olarak alınan pürüzsüz düz yüzeyin kayma gerilmesini, $\tau_{w,\text{çık}}$ ise çıkıntılı yüzey eklenen pürüzlü yüzeyin kayma gerilmesini göstermektedir. Bir kanaldaki gelişmiş akış için yüzey gerilmeleri basınç gradyeni ile ifade edilir.

$$\tau_w = -\delta \left(\frac{dp}{dx} \right) \quad (3.12)$$

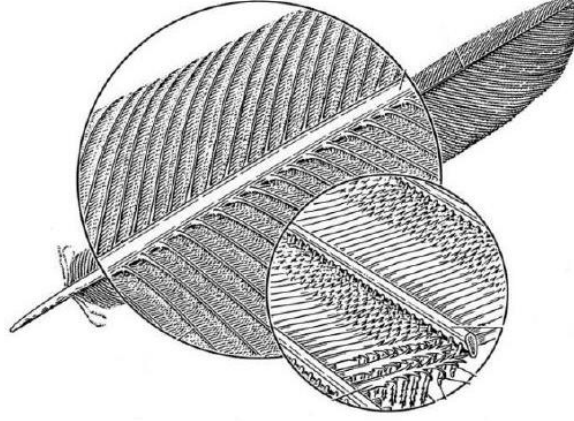
Burada δ kanalın yarı genişliğidir. τ_w formülde yerine yazılırsa;

$$DR = \frac{\tau_{w,\text{çık}} - \tau_{w,\text{düz}}}{\tau_{w,\text{düz}}} = \frac{\delta_{\text{çık}} \left(\frac{dp}{dx} \right)_{\text{çık}} - \delta_{\text{düz}} \left(\frac{dp}{dx} \right)_{\text{düz}}}{\delta_{\text{düz}} \left(\frac{dp}{dx} \right)_{\text{düz}}} \quad (3.13)$$

elde edilir. Sürüklenme azaltma oranının negatif değer çıkması sürüklemeyi azalttığını ve pozitif değer çıkması da sürüklemeyi artırdığını göstermektedir.

3.2 KUŞ TÜYLERİNİN SÜRÜKLEME AZALTILMASINDAKİ ETKİLERİ

Kuş tüy yapısı boyutları ırk çeşitliğine göre değişmesine rağmen kuş genel yapısı aynıdır. Tüy geometrisi boyutları farklı coğrafik bölgelerde ortam koşullarına göre evrimleşerek en uygun yapıya ulaşmıştır. Tüyler ile kaplı olan kanatlar kuşların uçuş mekanizmalarıdır. Uçuş tüyleri kanatlarda el telekleri ve kol telekleri olmak üzere iki ayrılmaktadır. El telekleri en uzun uçuş tüyleridir ve kol teleklerine göre daha asimetrik bir yapıya sahiptirler. Uçuş için çok önemli olan bu tüyler uçuşta kuşun havalanmasını sağlar. Kol telekleri, el teleklerin alt kısmında kanat kolu ile gövde arasında kalan tüylerdir. Uçuş esnasından kuşun havada kalmasını uçuş kontrolünü sağlar.



Şekil 3.4: Kuş tüyü mikro yapısı.

Tüy yapısına mikroskobik olarak bakıldığında tüy kıllarının shaft boyunca iki taraflı dizildiği görülmektedir. Komşu kıllar arasındaki tüycükler paralel olarak kıl boyunca uzanmaktadır. Şekil 3.4’de görüldüğü üzere mikro yapıdaki tüycükler shaft kadar iç ve dış tarafta bulunarak tüy çıkıntılarını oluşturmaktadır. Tüyün bu mikro oluklu çıkıntı yapısı sayesinde çıkıntılar akış ile etkileşime geçer ve çıkıntı çukurlarından çapraz akış hız dalgalanmaları oluşur. Oluşan bu dalgalanmalar yüzey kayma gerilmelerini ve momentum transferini pozitif yönde etkiler ve sürüklemeyi azaltır. Tüycükler arasındaki uzaklık, s , her yerde aynı olmasına karşın tüycüklerin yüksekliği, h , kıldan uzaklaştıkça azalmaktadır. Genel olarak tüylerdeki h/s oranı 0.2 ile 0.9 arasında değişmektedir. Bu çalışmadaki yüzeyler tüycüklerin mikro yapısındaki boyutlarından ve dizilimlerinden esinlenerek tasarlanmıştır.

3.3 ÇIKINTI YÜZEYLERİNİN OPTİMİZASYONU

Kuşların kanatlarındaki uçuş tüylerinin sayı ve yapısal büyüklüğü, kuşların türlerine göre farklılık göstermesine rağmen genel olarak ortasında shaft ve shaftın üzerinde ince dallardaki kıllardan oluşur. Doğadaki varyanslar nedeniyle, çok çeşitli sentetik çıkıntılar karakterize edilmiştir. Akış yönünde enine kesiti alınan iki boyutlu çıkıntılar daha yaygın şekilde karakterize edilmiştir. En ayrıntılı tanımlama şekil 3.5, şekil 3.6 ve şekil 3.7’de görüldüğü gibi, testere dişi, taraklı ve bıçak kesitli simetrik iki boyutlu çıkıntılar için tanımlanmıştır (Walsh, 1980; Bechert ve Hoppe, 1985; Bechert ve diğ. 1986; Walsh ve Lindemann 1984; Wilkinson ve Lazos, 1987; Wilkinson ve diğ. 1988; Walsh ve Anders, 1989). Alternatif çıkıntılı geometrileri genel olarak artan bir fayda sağlamaz. Asimetrik çıkıntılar, aşamalı çıkıntılar ve yuvarlatılmış veya çentikli tepeler içeren çıkıntılar da dahil olmak üzere bu çıkıntılar ayrıntılı

olarak incelenmiş ve standart çıkıntı geometrilerinin faydasını geliştirmemiştir (Walsh, 1980; Walsh ve Lindemann, 1984). İncelenen diğer iki boyutlu çıkıntılı şekiller, arasında değişen kardeş tipleri (Bechert ve diğ. 1997) ve daha büyük çıkıntıların üstündeki küçük çıkıntılarla aşamalı çıkıntılardır (Wilkinson ve diğ. 1987). İki boyutlu çıkıntıları içeren köpekbalığı derisi ve kuş tüyünden esinlenen üç boyutlu çıkıntılarda incelenmiştir. Çıkıntı tipleri, hizalanmış bölmeli bıçak çıkıntılarını (Wilkinson ve Lazos, 1987), bölmeli bıçak çıkıntıları (Bechert ve diğ. 2000), uzantılı üç boyutlu bıçak çıkıntıları (Bechert ve diğ. 2000), üç boyutlu köpekbalığı derisi kopya çıkıntıları (Bechert ve diğ. 2000; Lang ve diğ. 2008; Jung ve Bhushan, 2010) ve üç boyutlu kuş tüyü kopya çıkıntılarıdır (Chen ve diğ. 2014).

Çoğu araştırma, sadece akışkan hızını değiştirerek ve bir rüzgar tüneli veya akışkan akış kanalı içindeki bir kayma gerilmesi verilerinden bulunan boyutsuz değer s^+ değiştirerek yapılır. s^+ mikro çıkıntılar arasındaki mesafeye bağlı boyutsuz bir değerdir ve

$$s^+ = \frac{sV_\tau}{\nu} \quad (3.14)$$

formülü ile hesaplanır. s mikro çıkıntılar arasındaki mesafeyi, V_τ sürtünme hızını ve ν viskoziteyi göstermektedir. Sürtünme hızı,

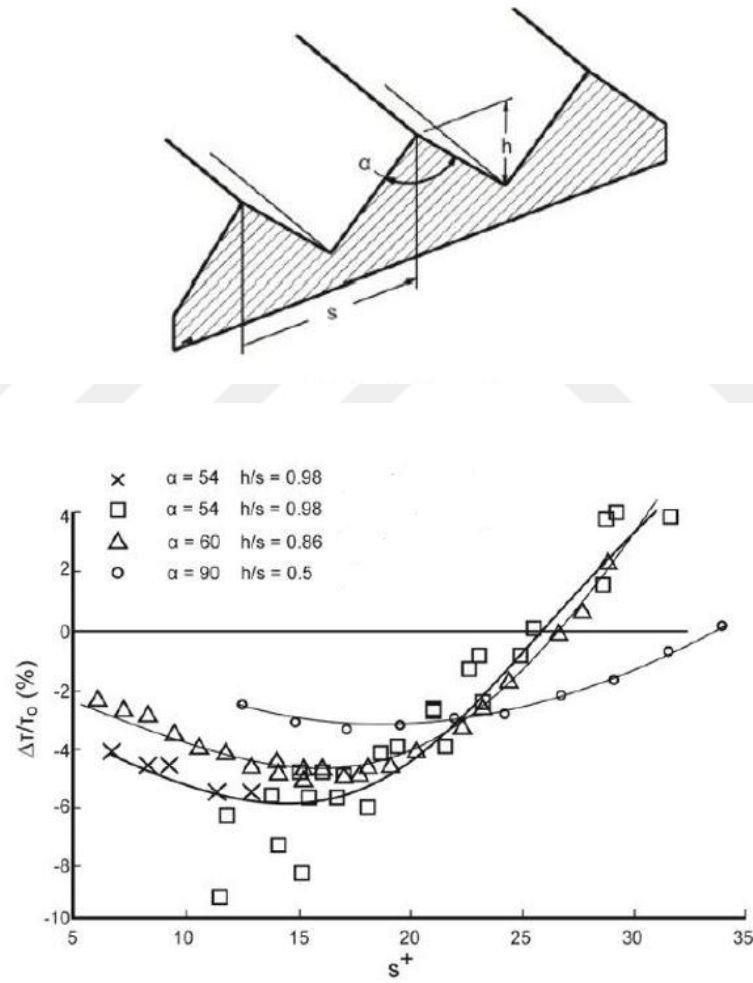
$$V_\tau = \sqrt{\tau_0/\rho} \quad (3.15)$$

ile ifade edilir. τ_0 pürüzsüz yüzeydeki kayma gerilmesidir. Ölçülen kayma gerilmesi düz bir plaka üzerindeki kayma gerilmesi ile karşılaştırılır ve akış koşulları için hesaplanan s^+ değerine göre çizilir. Bu şekilde, belirli bir karakteristik boyut kümesine sahip bir çıkıntı dizisi için performans eğrisi oluşturulur. Çeşitli yüzey malzemeleri hava, yağ ve suda denemiştir. Boyutsuz akış koşulları altında, karakteristik boyut oranlarını paylaşan giriş dizileri, farklı malzemelerden yapılmış, farklı akışkanlarda test edilmiş veya farklı bir ölçekte imal edilmiş olsada, benzer performans eğrileri oluşturur.

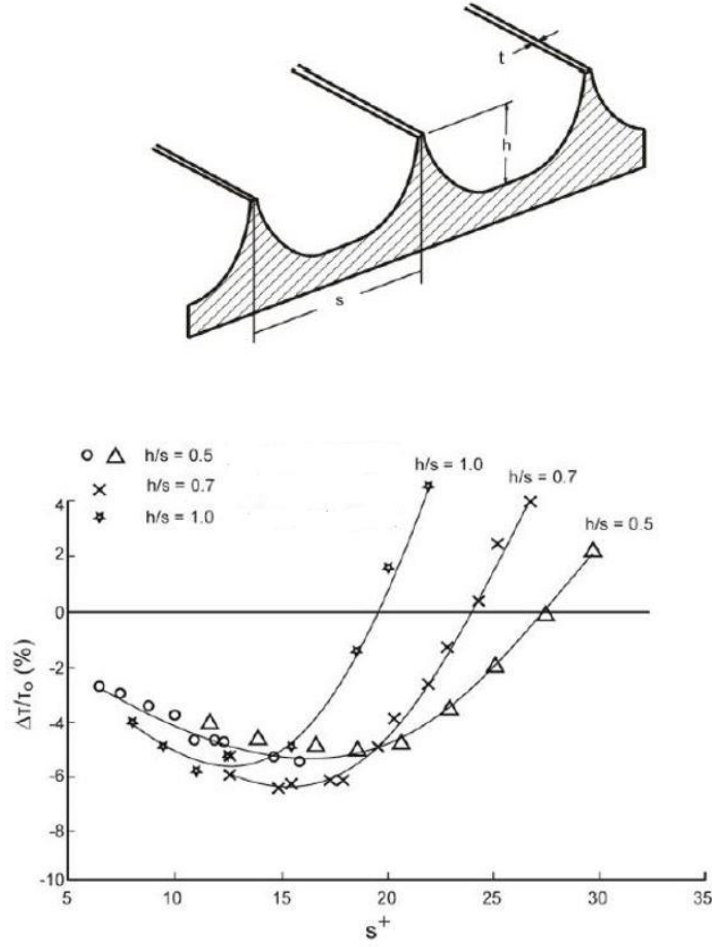
3.3.1 İKİ BOYUTLU ÇIKINTILARIN OPTİMASYONU

Testere dişli çıkıntılar üzerinde en çok çalışılan çıkıntı tipidir. Karakteristik boyutları ve optimizasyon verilerini içeren şema Şekil 3.5’de gösterilmiştir. Testere dişli çıkıntılar, yükseklik – genişlik (h/s) oranları veya tepe açısı α ile tanımlanır. Şekil 3.5’de testere dişli çıkıntıların optimizasyon verilerini göstermektedir. Eldeki verilere göre optimal testere dişli

çıkıntılar, $h/s \sim 1.0$ ve $\alpha \sim 54^\circ$ de yaklaşık %5 sürüklenme azalması sağlar. Taraklı çıkıntılar çoğunlukla h/s oranı ile tanımlanır, ancak test şekilleri araştırma grupları arasında çeşitlilik göstermektedir. Temel şekiller benzer olmakla birlikte, standart bir tarak profili hakkında herhangi bir fikir oluşturulamamıştır. Genel olarak, herhangi bir çukur şekli tarak olarak adlandırılabilir ve testere dişi, taraklı ve bıçak çıkıntı optimizasyonları arasındaki verileri karşılaştırması, karşılaştırılabilir şekillerin genelleştirilmesini sağlar. İdeal olarak, çıkıntı ucu ince ve keskin, ancak ölçülebilir ucu kalınlıkları olan taraklı çıkıntılar da olumlu sonuçlar üretir.



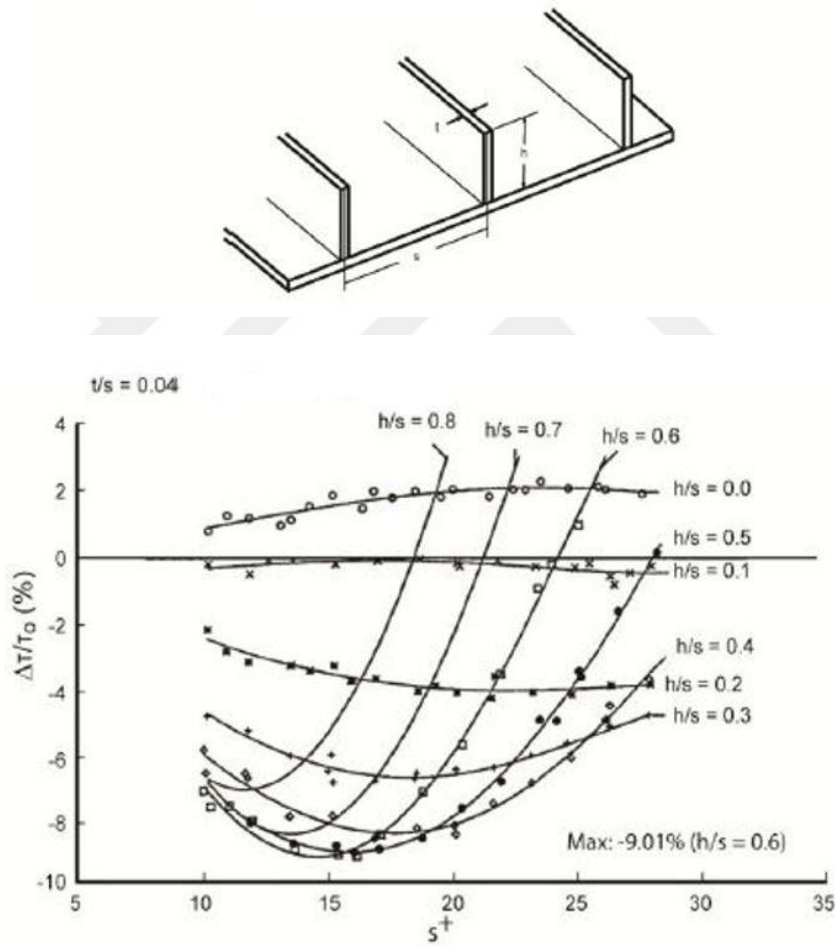
Şekil 3.5: Testere dişli modellerin optimizasyonu (Bechert, 1997).



Şekil 3.6: Taraklı modellerin optimizasyonu (Bechert ve diğ. 1997).

Şekil 3.6, taraklı çıkıntılar için optimizasyon verilerini göstermektedir. $h/s \sim 0.7$ olan taraklı çıkıntılar için %6.5'lik bir maksimum sürüklenme azalması sağlanmıştır (Bechert ve diğ. 1997). Bıçak çıkıntıları, karakteristik boyut oranlarında incelenmiştir. Bıçak çıkıntıları için karakteristik boyutları ve optimizasyon verisine sahip bir şema şekil 3.7'de verilmektedir. Ayarlanabilir bir bıçaklı çıkıntılı yüzey imal edilerek, optimize edilmiş $h/s \sim 0.5$ ve $t/s = 0.02$ boyutları ile %9.9 sürüklenme azalması sağlamıştır (Bechert ve diğ., 1997). Zayıf yapıları nedeniyle, optimum bıçak çıkıntı kalınlığı, akışkan dinamikleri ile değil, mukavemet ile sınırlanır. Çok ince bıçak çıkıntıları sıvı akışında bükülür ve sonuç olarak girdapların oluşmasını sağlar. Testere, tarak ve bıçak çıkıntılar için en uygun sürüklenme indirgeme geometrileri karşılaştırıldığında, bıçak çıkıntıları en yüksek sürüklenme azalması sağladığı, taraklı çıkıntıların en fazla ikinci sürüklenme azaltan ve testere dişi çıkıntıların ise en az sürüklenme azalttığı görülür. Bıçak ve tarak çıkıntı tipleri sürüklemeyi iyi azaltmasına rağmen

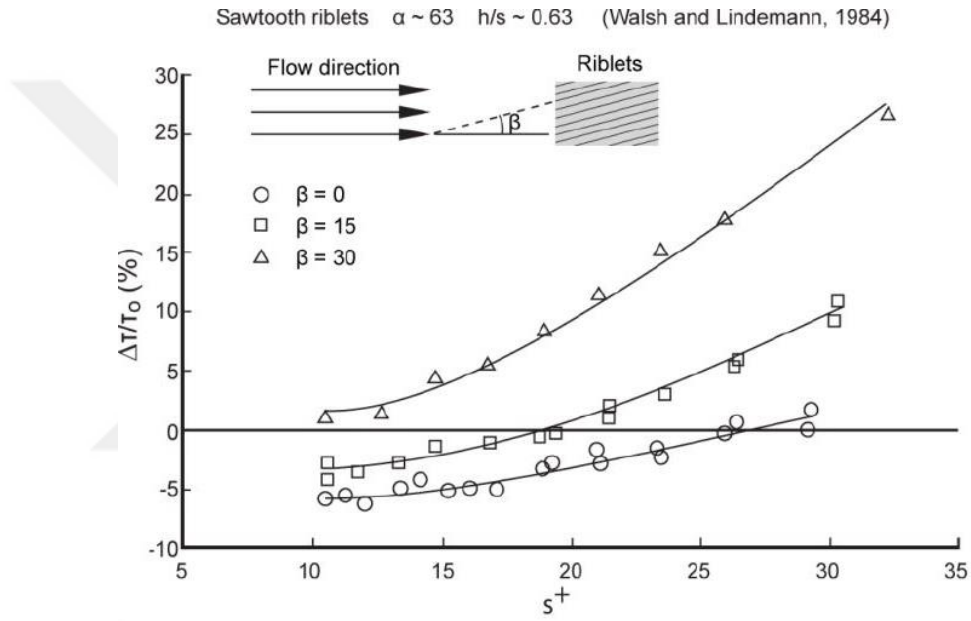
dayanıklılık sorunu ve üretim zorluğu vardır. Öte yandan testere dişli çıkıntılar en sağlam ve üretimi diğer çıkıntı tiplerine göre daha kolaydır. Bu nedenle bu çalışmada iki boyutlu geometrilerde testere dişli çıkıntılar tercih edilmiştir. Şekiller incelendiğinde genel olarak her çıkıntı tipinin $s^+ \sim 15$ yakınında en iyi sürüklenme azaltması sonucu verdiği görülmektedir. Daha büyük s^+ girdapların çıkıntılar arasındaki boşluğa düşmeye başlamasına neden olur, bu çıkıntılar arasındaki yüzeydeki kayma gerilimini artırır. s^+ optimum değer altına düştüğü zaman, çıkıntıların toplam boyutu, girdap çevrimini yeterince engelleyemediği bir noktaya düşer.



Şekil 3.7: Bıçak çıkıntı modellerin optimizasyonu (Bechert, 1997).

Sürüklenme azaltma fayda potansiyelini akış yönünde etkin çıkıntı yüksekliğine kıyasla, artan çıkıntı yüksekliğinin sürüklenme azaltma potansiyeli ile ilişkili olduğu bilinir. Aynı h/s oranı için kanat çıkıntıları, küçük kesit alanlarından dolayı efektif akış başlangıcında en küçük kaymaya

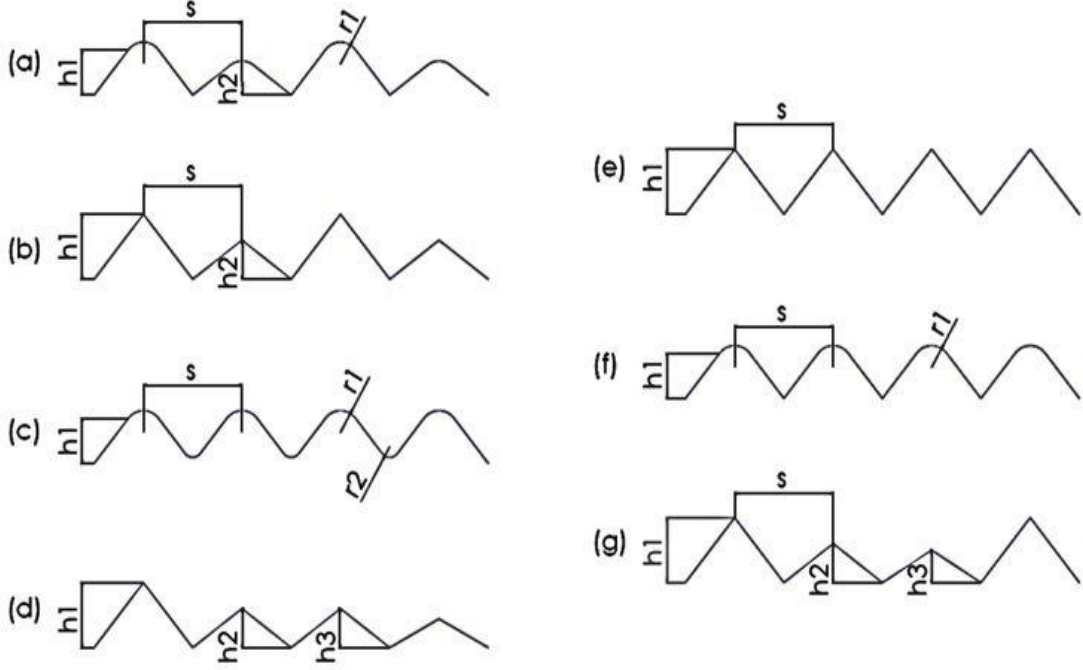
sahiptir ve testere dişi çıkıntıları etkili akışın başlangıcında en büyük kaymaya sahiptir. Çıkıntı uygulamalarında başka bir nokta ise sürüklenme azalmasının sapma açısı ile ilişkisidir. Sapma açısı, ortalama akış yönü ve çıkıntı yönelimi arasındaki açı, çıkıntı yüzeylerinin sürüklenme azaltma yararları üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Çıkıntı yüzeyleri $\beta = 30^\circ$ 'nin üzerinde sürüklenme azaltması göstermeye başlar ancak $\beta = 15^\circ$ 'ye kadar sürüklenme azaltılması görülebilir (Walsh ve Lindemann, 1984). Şekil 3.8'de testere dişi çıkıntılar üzerindeki akış için sapma açısının etkilerini göstermektedir. Kuş tüylerindeki çıkıntıların sapma açısı genel olarak 30° dir.



Şekil 3.8: Sapma açısının s^+ değerine göre değişim grafiği (Walsh ve Lindemann, 1984).

3.3.1.1 İki Boyutlu Modeller

Kuş tüy yapısından esinlenerek hazırlanan modellerde sürüklenme değerleri tüy yapısının geometrik ölçülerine bağlı olarak değişmektedir. Modelin çıkıntı geometrik şekli, çıkıntı yüksekliği 'h' ve genişliği 's' üzerinde yapılan çalışma ile yüzeye etki eden kayma gerilmeleri üzerindeki etkileri belirlenmiştir. İki boyut üzerinde oluşturulan geometriler optimize edilerek üç boyutta kullanılacak geometrik ölçülerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Aşağıda kullanılan modellerin geometrik şekilleri gösterilmiştir. Modellerin toplam uzunluğu 0.0022 metredir.



Şekil 3.9: (a) A tipi (b) B tipi (c) C tipi (d) D tipi (e) E tipi (f) F tipi (g) G tipi modellerin görünümü.

İlk olarak değişen genişlik 's' değerleri ve sabit tutulan yükseklik 'h' değerleri daha sonrasında sabit genişlik ve değişen yükseklik ile hazırlanan farklı geometrik şekillere sahip modellerle genişliğin ve yüksekliğin yüzeye etki eden kayma gerilmesi değişimindeki etkisi araştırıldı. 60 mikron-120 mikron metre ve 60-120 mikron metre yüksekliğindeki çıkıntı aralığında değişen genişlik ve yükseklik değerlerine sahip model geometrik boyutları aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3.1: İki boyutlu modellerin boyutları (sabit s değeri).

sabit s değeri						
Model No.	$h1(\mu m)$	$h2(\mu m)$	$h3(\mu m)$	$s(\mu m)$	$r1(\mu m)$	$r2(\mu m)$
A1	50	20	—	100	10	—
A2	50	26	—	100	10	—
A3	55	25	—	100	5	—
A4	55	31	—	100	5	—
B1	60	30	—	100	—	—
B2	60	36	—	100	—	—
C1	50	—	—	100	10	5
C2	55	—	—	100	5	10
D1	60	58	—	100	—	—
E1	60	—	—	100	—	—
E2	70	—	—	100	—	—
F1	50	—	—	100	10	—
F2	70	—	—	100	—	—
G1	60	30	30	100	—	—
G2	60	36	30	100	—	—

Tablo 3.2: İki boyutlu modellerin boyutları (sabit h değeri).

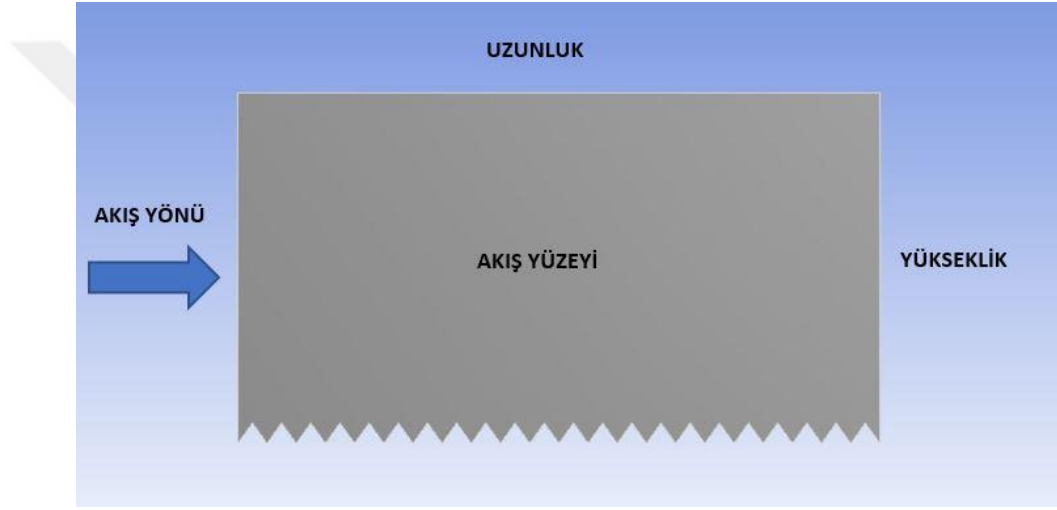
sabit h değeri			
Model No.	$s(\mu m)$	$h1(\mu m)$	$h2(\mu m)$
B3	70	60	30
B4	80	60	30
B5	90	60	30
B6	110	60	30
B7	120	60	30
C3	70	50	—
C4	80	50	—
C5	90	50	—
C6	110	50	—
C7	120	50	—
E3	70	60	—
E4	80	60	—
E5	90	60	—
E6	110	60	—
E7	120	60	—

3.3.1.2 İki Boyutlu Modeller İçin Akış Hacmi

Akış hacmi boyutları hesaplama zamanını azaltmak için, akışı bozmayacak şekilde yeterince küçük seçildi. Aşağıdaki şekilde akış hacmi ve akış yönü gösterilmiştir.

Akış hacminin yüksekliği minimum değerde seçilmesinin nedeni, akış hacminin boyutları arttıkça sayısal ağ yapısındaki -mesh- hücrelerin sayısı artacağından hesaplama zamanı artacaktır. Sayısal ağ yapısındaki hücrelerin çoğu analiz yapılacak yüzeyin sınır tabakasına yerleştirildi. Kontrol hacminin yüksekliğini sınırlayan diğer önemli faktör ise basınç gradyantının sıfır olması gerektiğidir. Analizdeki akışkan hızı 3.2 m/s seçildi.

Kontrol hacmi yüksekliği analizi yapılan geometrinin yüksekliğinin en az 20 katı olmalıdır. Bu nedenle akış hacmi yüksekliği h yüksekliğinin 20 katı olarak belirlenmiştir. Kontrol hacmi uzunluğu 0.0022 m'dir.

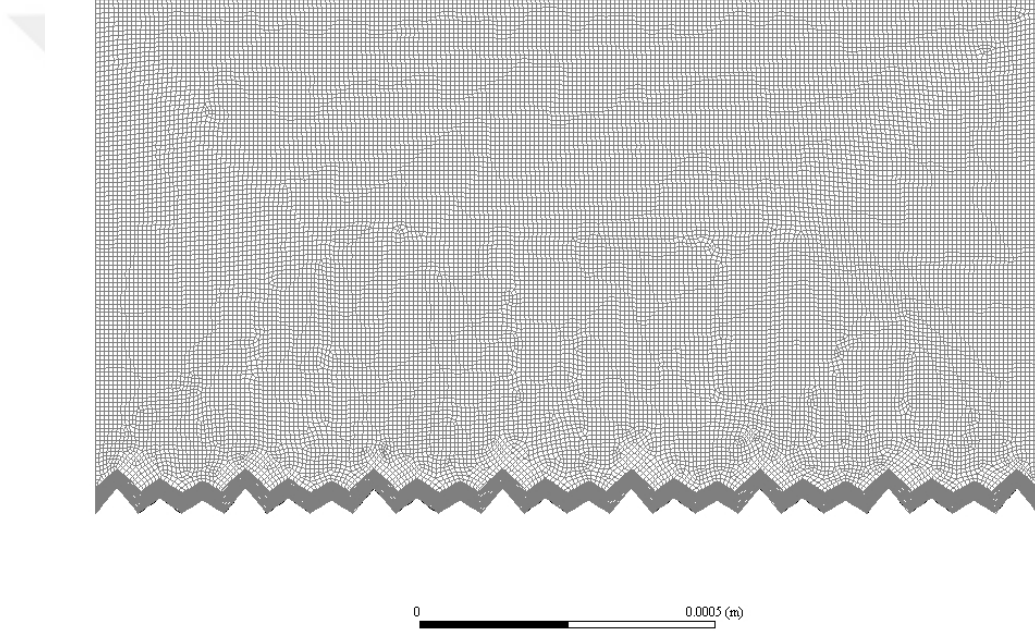


Şekil 3.10: İki boyutlu modellerin akış hacmi.

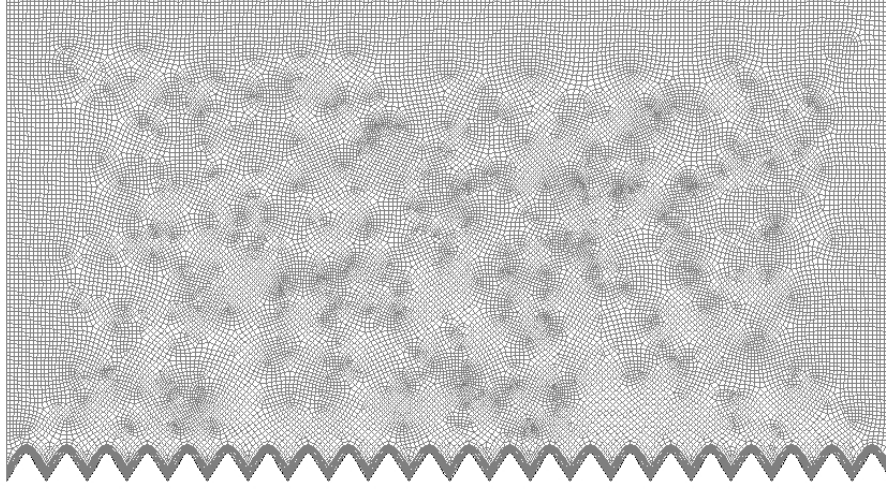
3.3.1.3 İki Boyutlu Modeller için Sayısal Ağ Yapısı Mesh

İki boyutlu modellerin meshlenmesi için ansys-mesh programı kullanılmıştır. Mesh, ilk aşamada kontrol hacmini oluşturan büyük hücreler ve daha sonrasında yüzeyin yakınındaki küçük hücreler olmak üzere iki aşamada oluşturuldu. Akış hacminin giriş, çıkış ve dış yüzeyleri üçgen yapılu hücrelerden oluşturuldu. Dış yüzeylerde bu hücre yapısını kullanarak analiz zamanının azaltılması hedeflenmiştir. Akış hacminin orta hacmi dikdörtgen yapılu hücreler ile oluşturuldu. Sayısal ağ yapısı analiz yapılacak yüzeyde hücreler daha küçük boyutlu, sık ve akış hacminin duvarlarına doğru daha büyük boyutlu ve seyrek şekilde hazırlandı. Akış hacminde farklı boyutlara ve şekillere sahip hücreler ile oluşturulmasının nedeni analizin daha hızlı yakınsamasını sağlamaktır.

Modellerin mesh eleman sayıları 40.000 – 45.000 arasında değişmektedir. Mesh yapısı maksimum kalitesi 1 ve minimum 0.0260 olmak üzere mesh ortalama kaliteleri 0.72 dir. Mesh kalitesinin düşük olduğu hücreler akış hacminin duvarlarında yani analiz yapılacak yüzey üzerinde veya yakınında olmadığından analiz üzerinde etkisi olmayacaktır. Aşağıda iki boyutlu modeller için mesh şekilleri verilmiştir.

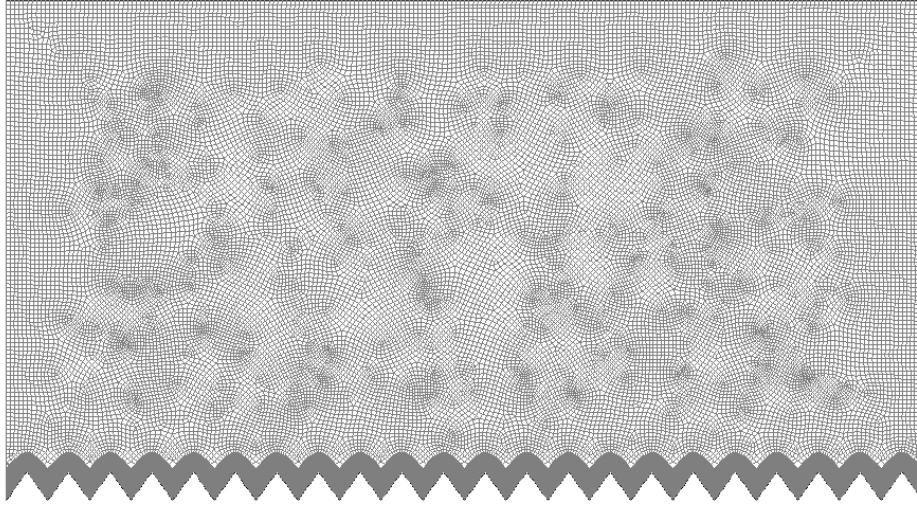


Şekil 3.11: A tipi modelin mesh görünümü.



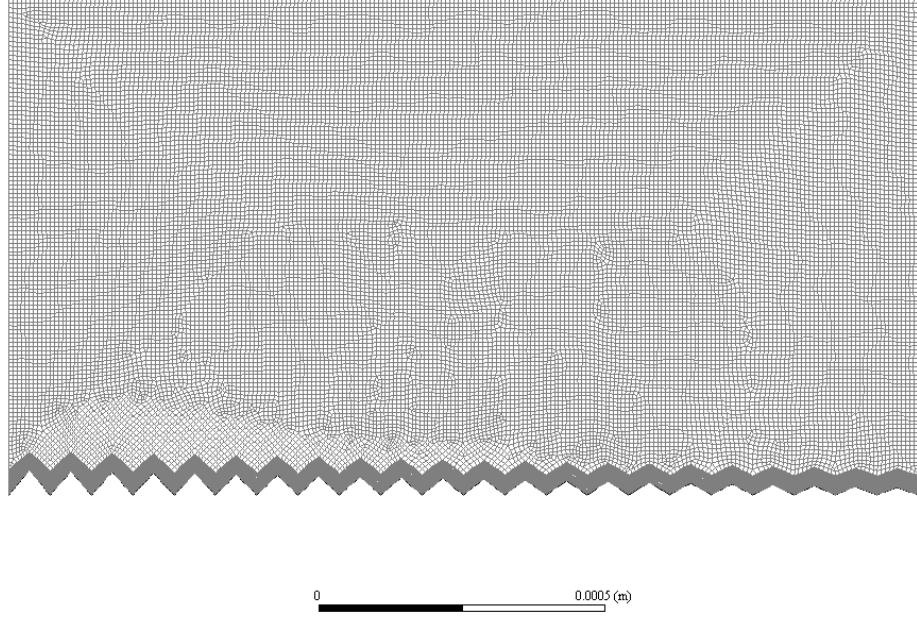
0 0.0005 (m)

Şekil 3.12: B tipi modelin mesh görünümü.

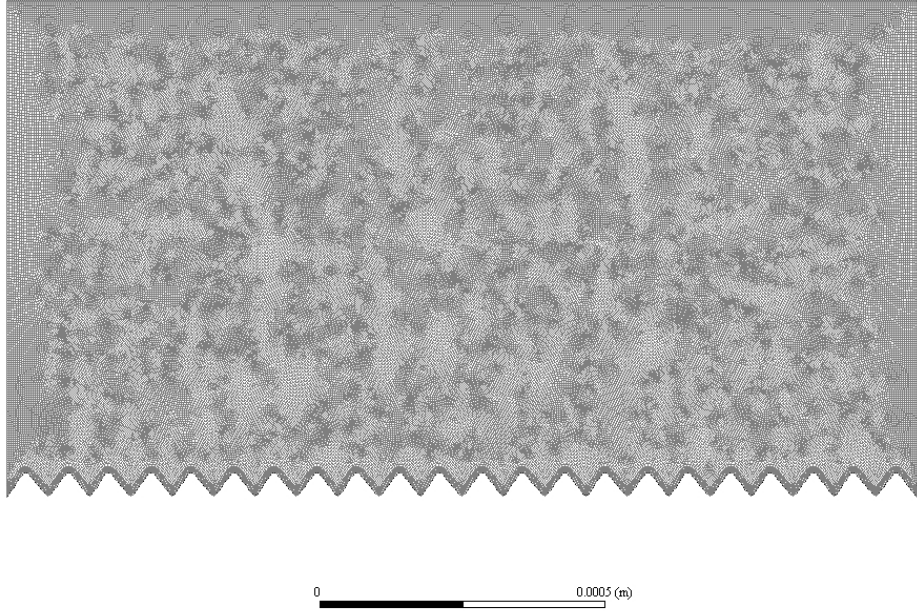


0 0.0005 (m)

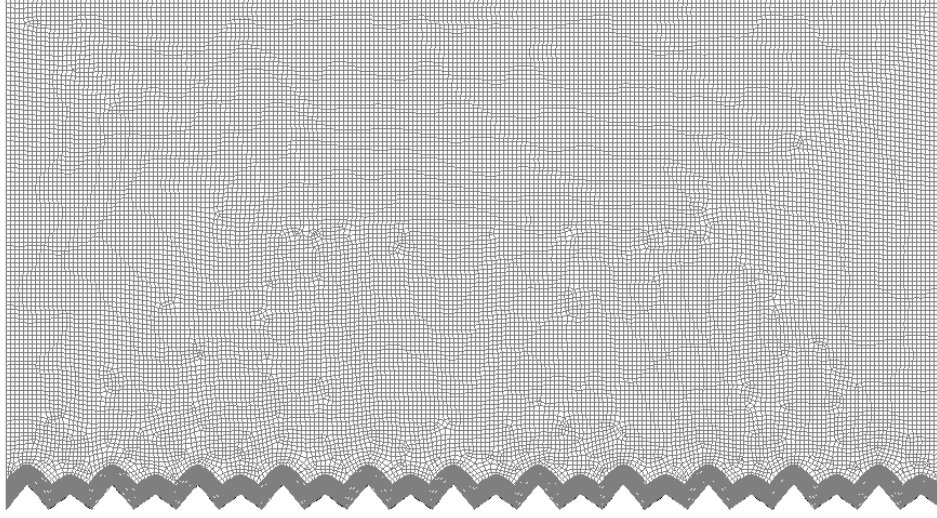
Şekil 3.13: C tipi modelin mesh görünümü.



Şekil 3.14: D tipi modelin mesh görünümü.

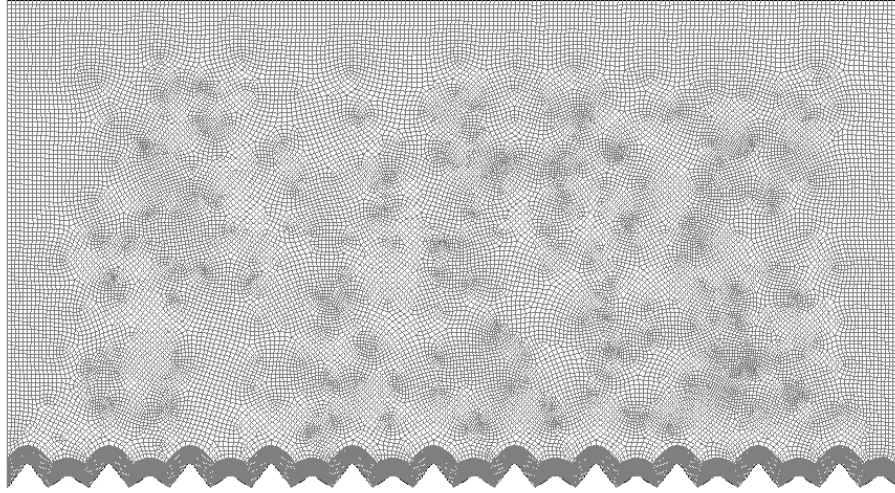


Şekil 3.15: E tipi modelin mesh görünümü.



0 0.0005 (m)

Şekil 3.16: F tipi modelin mesh görünümü.



0 0.0005 (m)

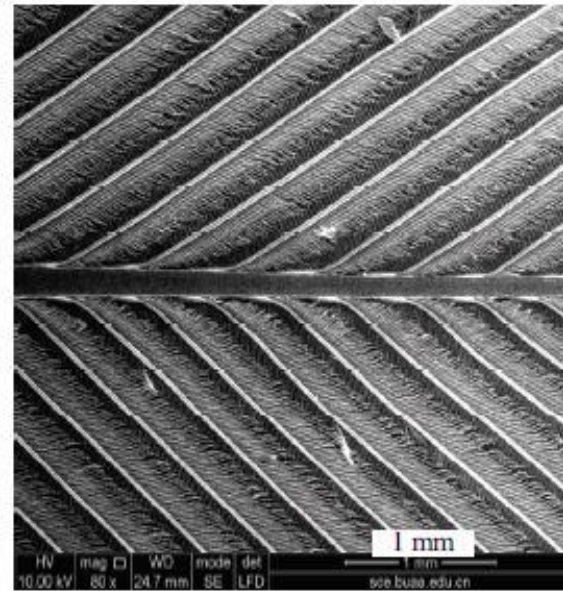
Şekil 3.17: G tipi modelin mesh görünümü.

3.3.1.4 İki Boyutlu Modellerin Analizi

Modeller ansys-fluent programında zamandan bağımsız ve iki boyutlu olarak analiz edilmiştir. Türbülans modeli olarak RNG k- ϵ , enhanced wall treatment ile birlikte seçilmiştir. Akışkan olarak hızı 3.2 m/s olan su alınmıştır. Türbülans yoğunluğu %5 ve türbülans viskozite oranı 5 olarak seçilmiştir. Akış hacmi duvarları ve analiz yapılacak yüzeyler sabit yüzey olarak tanımlanmıştır. Akışkanın duvara temas eden kısımlarının hızı sıfır olacağından akışkan parçacıkları kaymama durumu vardır (no-slip condition). Bu nedenden dolayı akış hacmi duvarları ve analiz yapılan yüzeyde bu tercih edilmiştir. Çözüm metodu olarak SIMPLE algoritması tercih edilerek yakınsama kriteri olarak 10^{-5} girilmiştir.

3.3.2 ÜÇ BOYUTLU ÇIKINTILARIN OPTİMİZASYONU

Kuş kanatlarının uçuş tüylerinin sayısının ve yapısal büyüklüğünün kuş türlerinde farklı olmasına karşın, evrensel olarak merkezi boşluklu shaftın tipik bir biçimine ve kıl olarak adlandırılan ince dallara sahiptirler. Mikroskobik açıdan bakıldığında, tüylerin aynı tarafındaki kıllar paralel olarak hizalanır ve shaft boyunca çıkıntıları oluştururlar. Kuş tüyünün mikroskobik resmi aşağıda görülmektedir.



Şekil 3.18: Kuş tüyünün mikroskobik görüntüsü (Chen ve diğ. 2014).

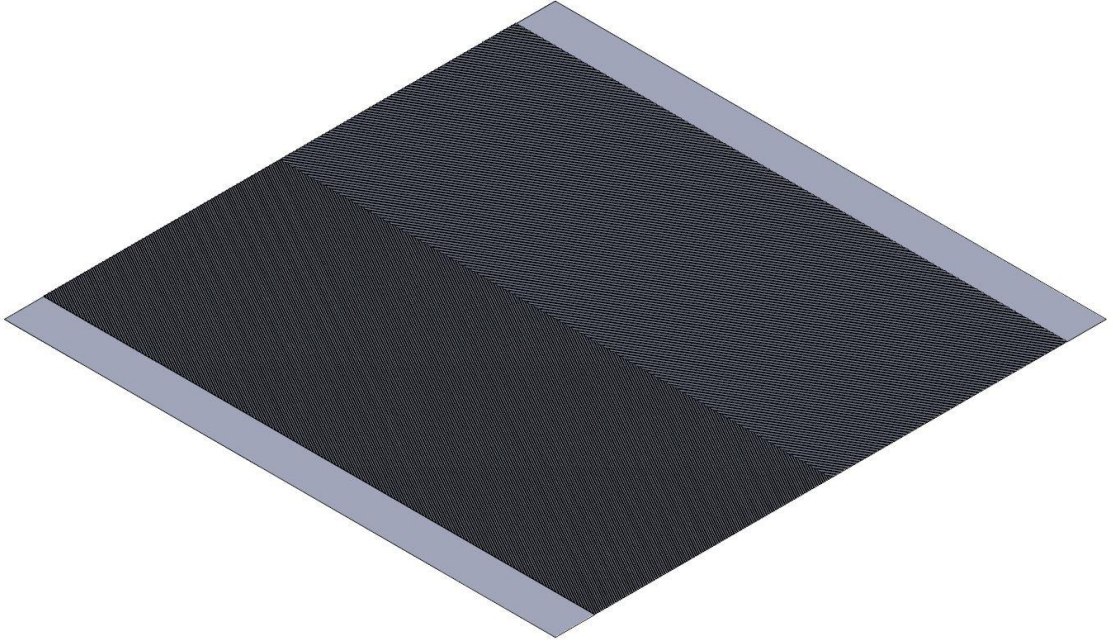
Chen ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada güvercinin uçuş tüyü yapısından esinlenerek oluşturduğu çıkıntıların sürüklemeyi %16'lara kadar azalttığını bulmuşlardır. Chen ve diğ.

(2014) yaptığı çalışmada güvercinin uçuş kanatın dan yola çıkarak, çıkıntılarının bitiminde kenarlarda pürüzsüz yüzey bırakılarak ve bırakılmayarak hazırladığı yüzeyleri su tüneline test etmiştir. Kenarında pürüzsüz yüzeyli çıkıntılarının sürüklemeyi daha iyi azalttığını bulmuşlardır. Chen ve diğ. (2014) yaptığı çalışmadan yola çıkılarak bu çalışmada hazırlanan yüzey modellerin çıkıntılarının bitiminde kenarlarda pürüzsüz yüzey bırakılmıştır.

3.3.2.1 Üç Boyutlu Modeller

İki boyutlu analizlerde uygun sonuç veren testere dişli tip olan E2 ve bozuk testere dişli tip olan B2 modelleri üç boyutlu modellenerek fluent programında analizi yapılmıştır.

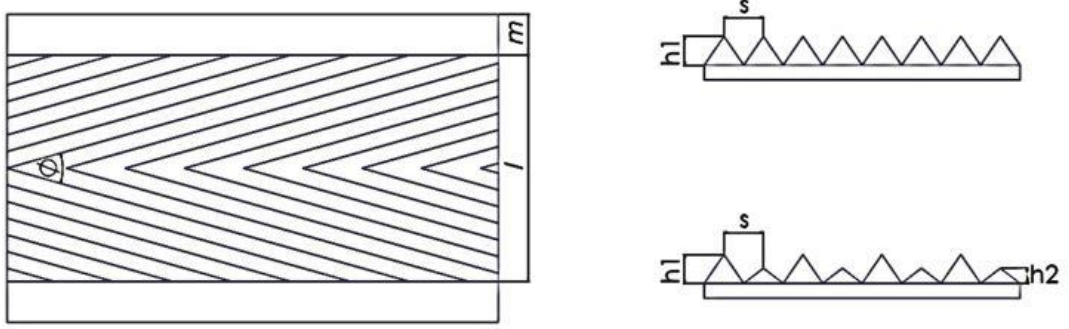
Modellerin uzunluğu ve genişliği 0.035 m olarak alınmıştır. Modellerin görünümü ve şematik görünimleri şekil 3.19 ve 3.20’ de ve boyutları tablo 3-3’ de verilmiştir. Akış alanı yüksekliği çıkıntı yüksekliğinin 20 katı olacak şekilde alınmıştır.



Şekil 3.19: Üç boyutlu modelin görünümü.

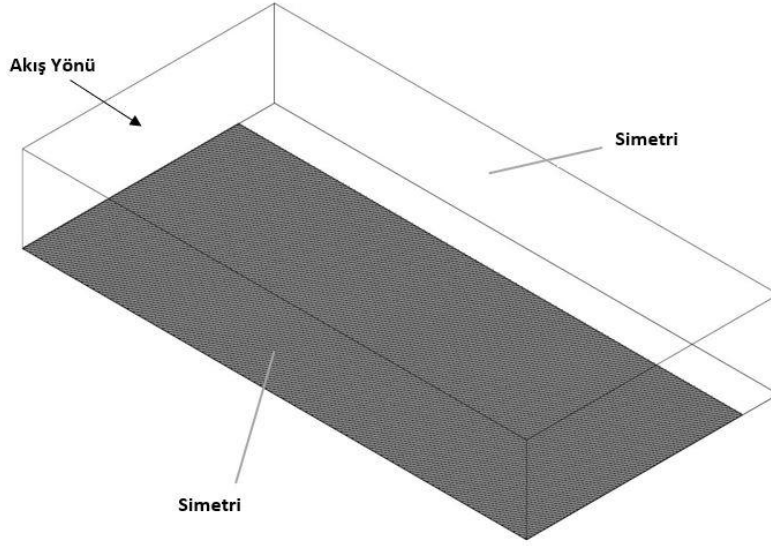
Tablo 3.3: Üç boyutlu modellerin boyutları.

Model	L(m)	s(μm)	h1(μm)	h2(μm)
E2-3D	0.03	100	70	—
B2-3D	0.03	100	60	36

**Şekil 3.20:** Üç boyutlu modellerin şematik görünümü (Testere dişli ve bozuk testere dişli).

3.3.2.2 Üç Boyutlu Modeller İçin Akış Hacmi

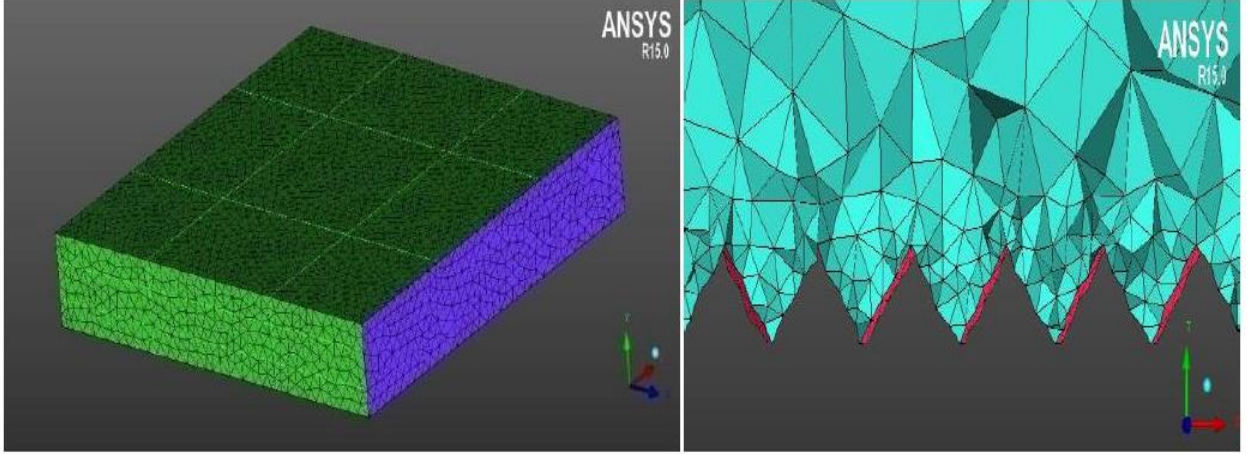
Akış hacmi boyutları hesaplama zamanını azaltmak için, akışı bozmayacak şekilde yeterince küçük seçildi. Aynı zamanda hesaplama zamanını azaltmak için akış hacminin yan duvarları simetri olarak alınmıştır. Böylelikle mesh sayısı yarıya indirilmiştir. Sayısal ağ yapısındaki hücrelerin çoğu analiz yapılacak yüzeyin sınır tabakasına yerleştirildi. Aşağıdaki şekilde üç boyutlu modeller için akış hacmi ve akış yönü gösterilmiştir.



Şekil 3.21: Üç boyutlu modellerin akış hacmi görünümü.

3.3.2.3 Üç Boyutlu Modeller İçin Sayısal Ağ Yapısı

Modellerin meshlenmesi ICEM programında yapılmış olup her bir model için yaklaşık 3 milyon hesaplama elemanından oluşmaktadır. Mesh, ilk aşamada kontrol hacmini oluşturan büyük hücreler ve daha sonrasında yüzeyin yakınındaki küçük hücreler olmak üzere iki aşamada oluşturuldu. Akış hacminin giriş, çıkış ve dış yüzeyleri dörtyüzlü üçgen yapılı hücrelerden oluşturuldu. Dış yüzeylerde bu hücre yapısını kullanarak analiz zamanının azaltılması hedeflenmiştir. Üç boyutlu analizler için ise akış hacminin orta hacmi altı yüzlü dikdörtgen yapılı hücreler ile oluşturuldu. Sayısal ağ yapısı analiz yapılacak yüzeyde hücreler daha küçük boyutlu, sık ve akış hacminin duvarlarına doğru daha büyük boyutlu ve seyrek şekilde hazırlandı. Akış hacminde farklı boyutlara ve şekillere sahip hücreler ile oluşturulmasının nedeni analizin daha hızlı yakınmasını sağlamaktır. Aşağıda üç boyutlu modelin mesh şekli görülmektedir.



Şekil 3.22: Üç boyutlu modellerin mesh görünümü.

Mesh yapıları maksimum kalitesi 1 ve minimum 0.00267 olmak üzere mesh ortalama kaliteleri 0.6-0.7 dir. Mesh kalitesinin düşük olduğu hücreler akış hacminin duvarlarında yani analiz yapılacak yüzey üzerinde veya yakınında olmadığından analiz üzerinde etkisi olmayacaktır.

3.3.2.4 Üç Boyutlu Modellerin Analizi

Modeller fluent programında zamandan bağımsız ve üç boyutlu olarak analiz edilmiştir. Türbülans modeli olarak RNG k- ϵ , enhanced wall treatment ile birlikte seçilmiştir. Akışkan olarak su alınmıştır. Su 1-5 m/s hızlarda alınarak ayrı ayrı analiz edilmiştir. Türbülans yoğunluğu %5 ve türbülans viskozite oranı 5 alınmıştır. Akışkanın duvara temas eden kısımlarının hızı sıfır olacağından akışkan parçacıkları kaymama durumu vardır (no-slip condition). Bu nedenden dolayı akış hacmi duvarları ve analiz yapılan yüzeyde bu tercih edilmiştir. Kenarlar simetri alınarak çıkış basıncı atmosfer basıncına eşitlenmiştir. Çözüm metodu olarak SIMPLE algoritması tercih edilmiştir.

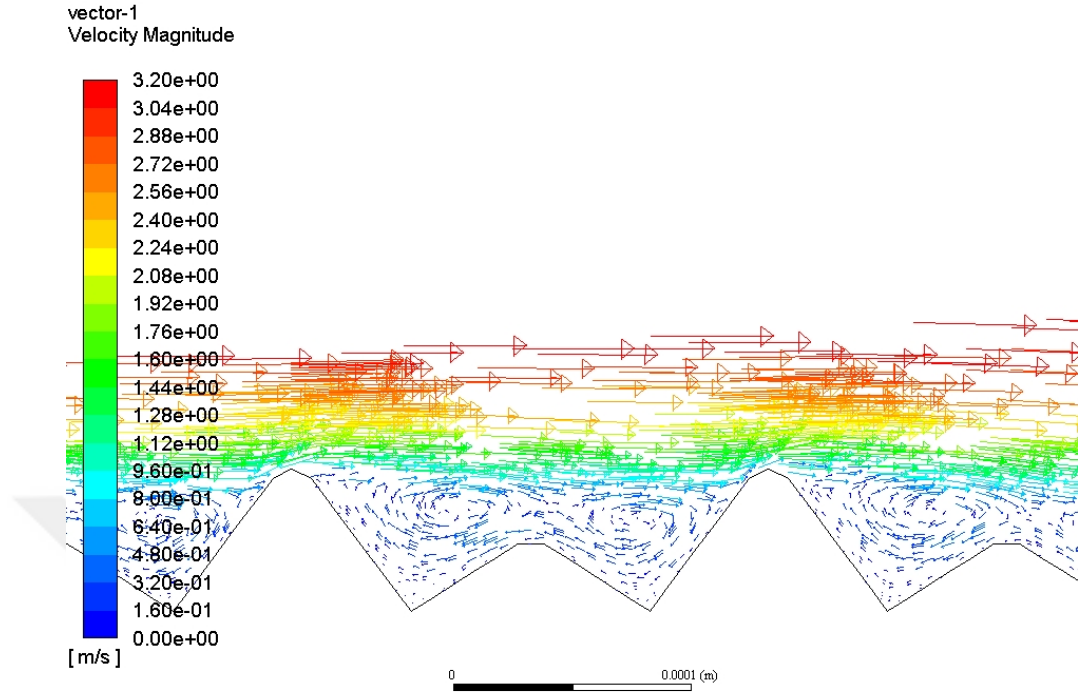
4. BULGULAR

4.1 İKİ BOYUTLU MODELLER İÇİN BULGULAR

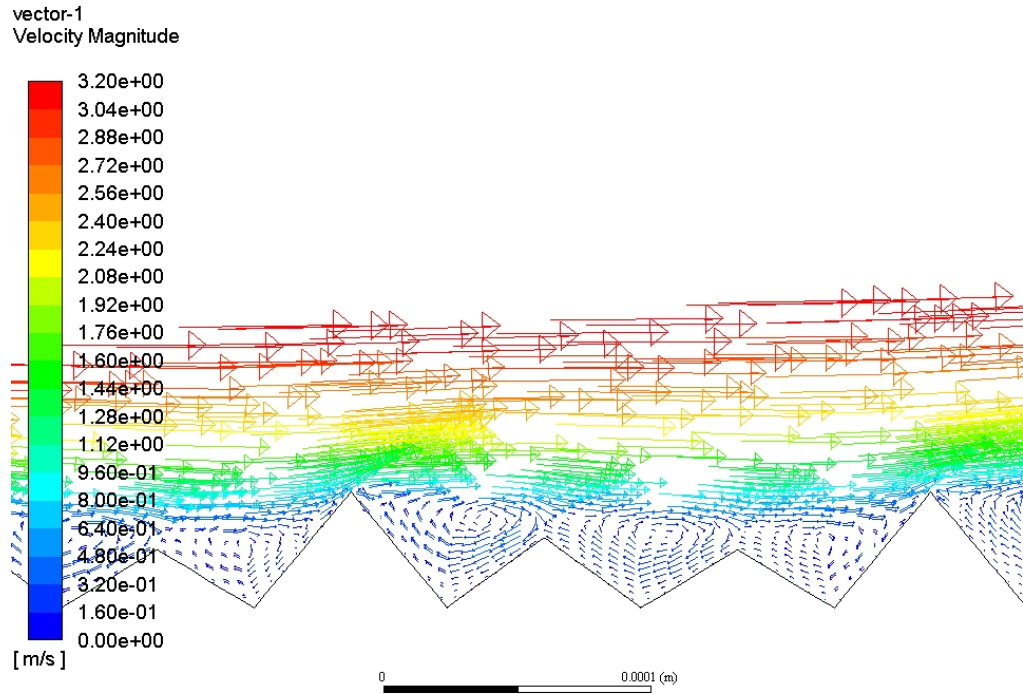
Kayma gerilmeleri tablo 4.1' de verilmiştir. Bu çalışmada farklı parametrelere sahip geometriler üzerinde yapılan analizlerde ilk olarak sabit genişlik 's' değişen yükseklik 'h' ve sabit yükseklik 'h' değişen genişlik 's' değerlerinde geometrilere ait yüzey kayma gerilmeleri değerleri incelendi. Daha sonrasında farklı geometrili şekillere sahip geometriler incelendi. Elde edilen sonuçlara göre en iyi sonuçlar sivri uçlu geometrilerinden verdiği görüldü. Bu geometri üzerinde yapılan sabit genişlik değişen yükseklik analizlerinde h değerinin değişmesinin geometrinin sürüklenme azaltma etkisi h değerinin azalmasıyla daha iyi sonuçlar sağladığı görüldü. Yükseklik değeri büyüdükçe negatif bir etki yaptığı ve en iyi sonucun 60 mikro metre iken verdiği görüldü. Değişen genişlik değerleri için genişlik arttıkça daha iyi sonuçlar arttığı ve s değerinin 120 mikro metreden büyük olduğu değerlerde daha kötü sonuçlar verdiği görüldü.

Tablo 4.1: İki boyutlu modellerin yüzey kayma gerilmeleri.

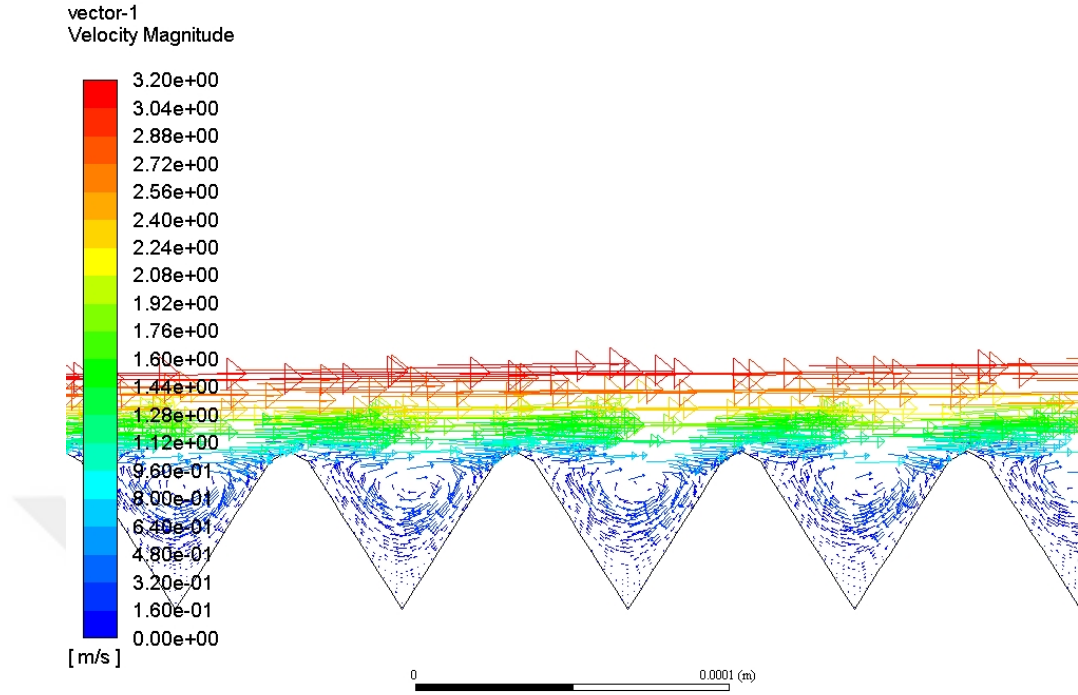
Model No.	Yüzey Kayma Gerilmesi	Model No.	Yüzey Kayma Gerilmesi
A1	267.0989	B3	250.6781
A2	260.7030	B4	241.4895
A3	255.0355	B5	235.7331
A4	248.5038	B6	240.1354
B1	225.5292	B7	240.1355
B2	214.8383	C3	267.7403
C1	295.6923	C4	261.6751
C2	298.8647	C5	274.3768
D1	257.60723	C6	262.0401
E1	215.5315	C7	262.5453
E2	194.2745	E3	194.2745
F1	257.7382	E4	221.2682
F2	260.5493	E5	229.5911
G1	230.1364	E6	234.7039
G2	236.52	E7	238.2734



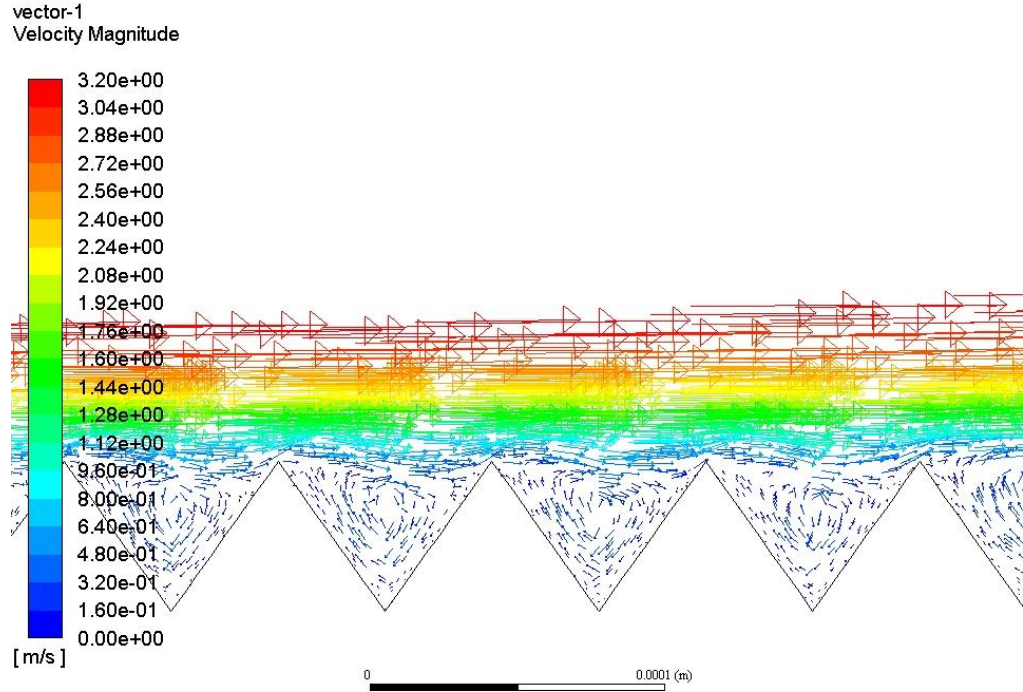
Şekil 4.1: A tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.



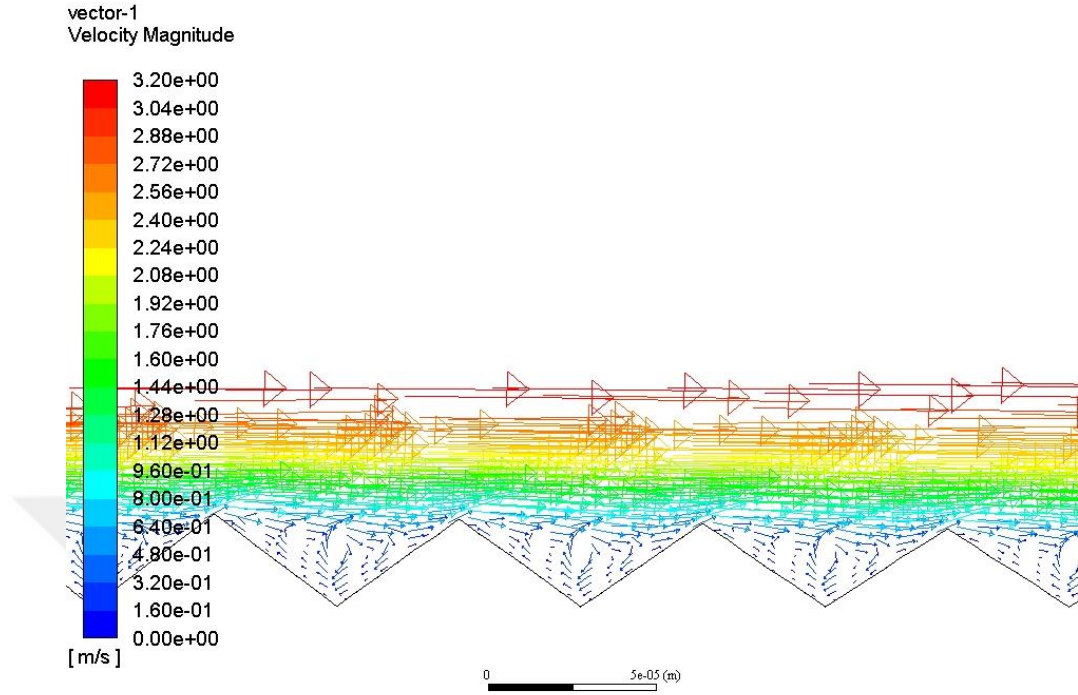
Şekil 4.2: B tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.



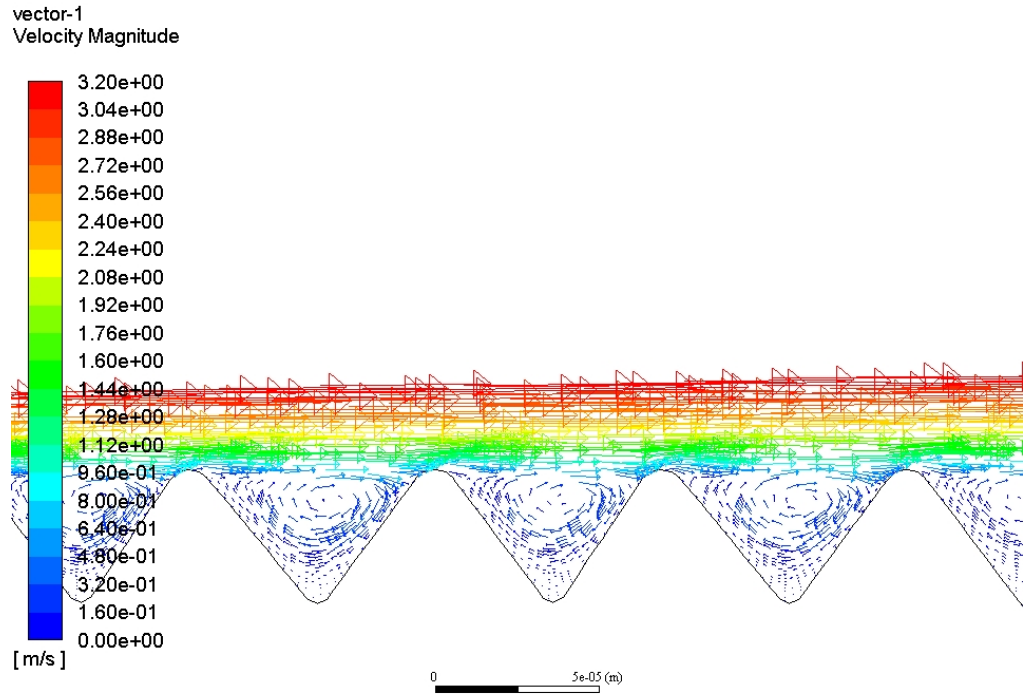
Şekil 4.3: C tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.



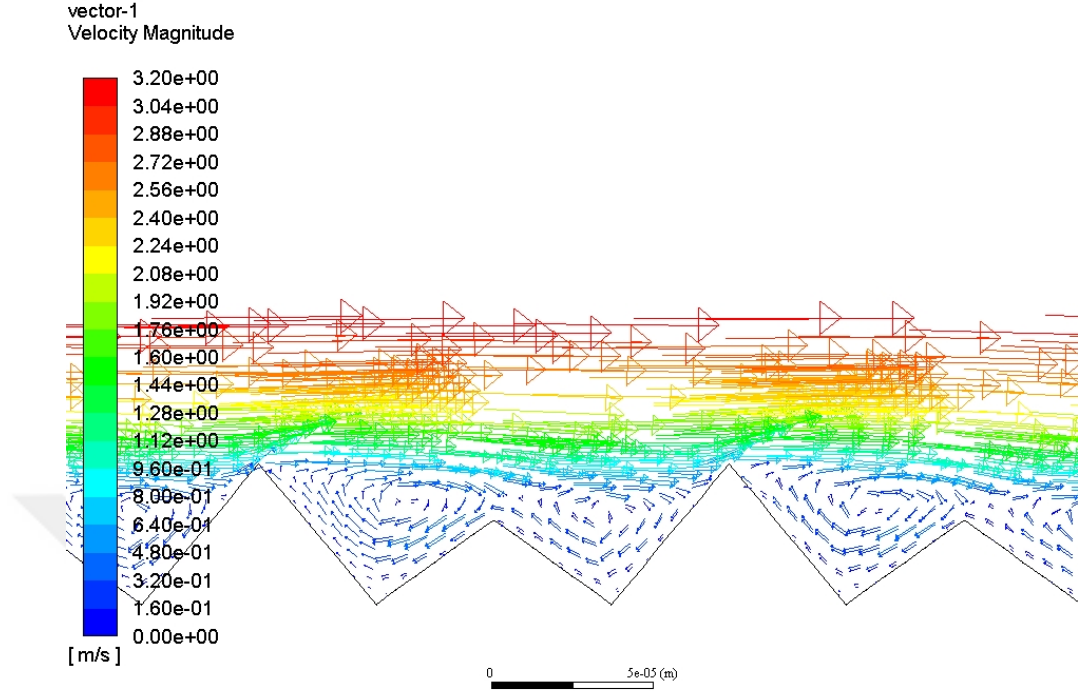
Şekil 4.4: D tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.



Şekil 4.5: E tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.



Şekil 4.6: F tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.



Şekil 4.7: G tipi modelin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri.

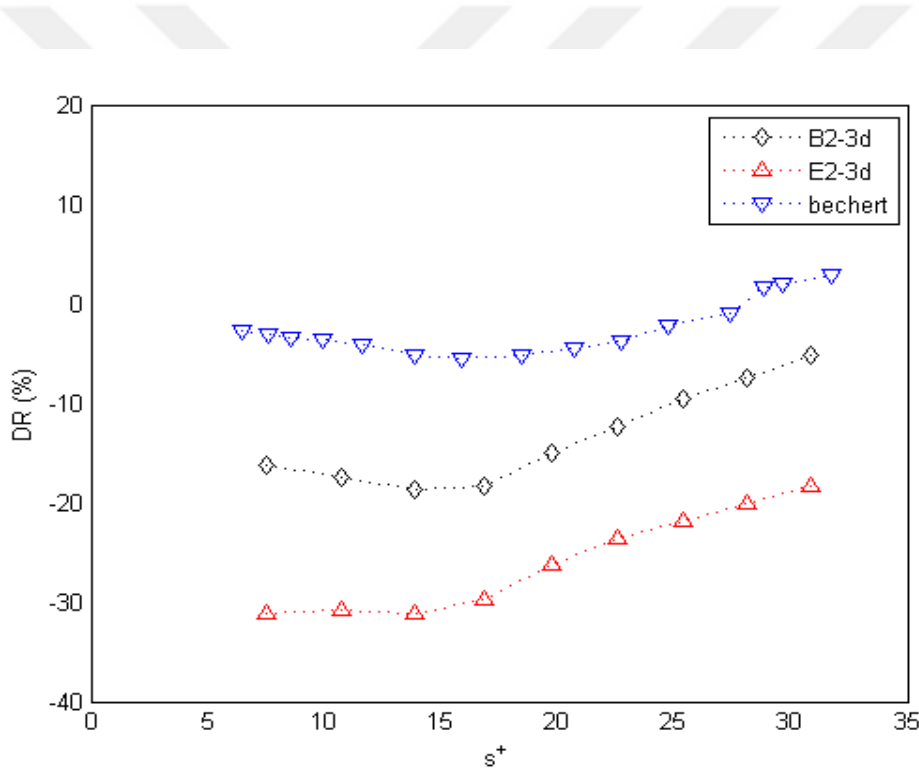
4.2 ÜÇ BOYUTLU MODELLER İÇİN BULGULAR

Yapılan çalışmalar sonucunda E2 ve B2 modellerin kayma gerilmesi diğer modellere göre daha düşük olduğu belirlenmiştir. E2 ve B2 modellerin duvara yakın kısımlarındaki hız vektörleri Şekil 4.2 ve şekil 4.5’de görülmektedir. Şekillerde görüldüğü gibi girdaplar, çıkıntı uçları ile etkileşime geçerek çukur boşluklarında düşük hız alanları oluşturmaktadır. Bu düşük hız alanları çapraz akış hız dalgalanmalarıyla düşük yüzey gerilmesi oluşturur. Çıkıntı uçlarında bu gerilme değerleri fazla olsa da sadece çok küçük bir alandadır. Yüzey alanının büyük bir kısmı düşük yüzey gerilmesine sahiptir.

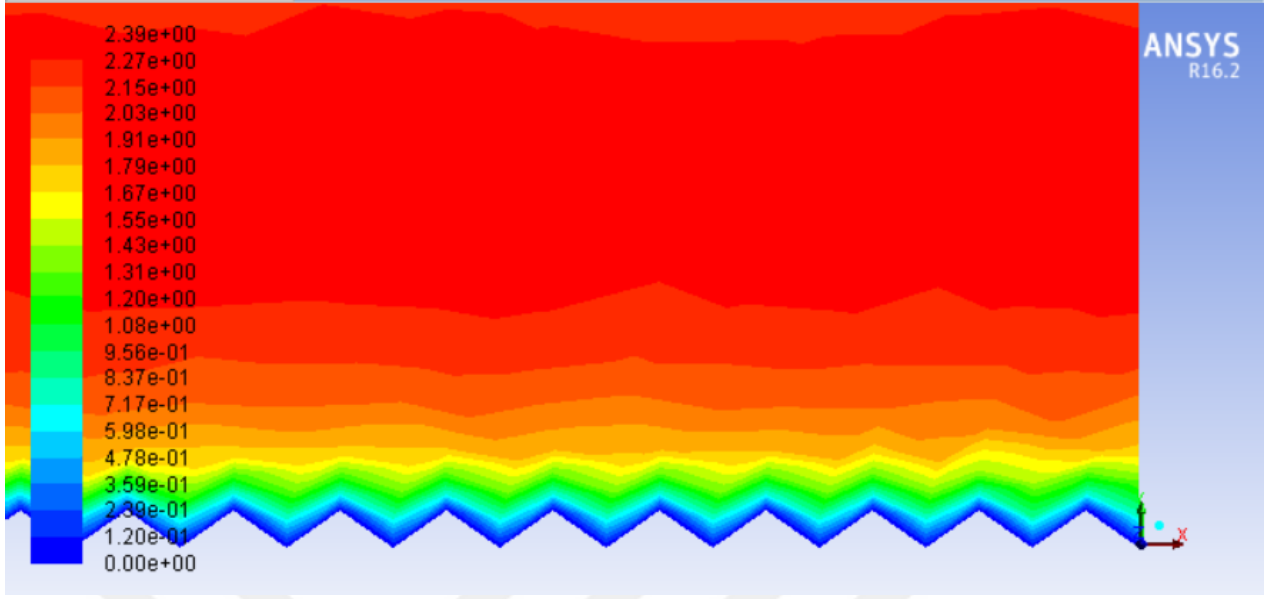
2 boyutlu modellerden yola çıkılarak hazırlanan B2-3d ve E2-3d modellerinde sırasıyla %18 ve %30'lara kadar bir sürüklenme azalması bulunmuştur. Şekil 4.8’de Bechert yaptığı deneysel çalışmanın sonucu ile bu çalışmadaki sonuçların değişik s^+ değerlerinde sürüklemenin nasıl değiştiği karşılaştırılmıştır. Her iki model için sürüklenme azaltmasının $s^+ \approx 15$ değerinde maksimum olduğu saptanmıştır.

Tablo 4.2: Üç boyutlu modellerin kayma gerilmeleri ve sürüklenme azaltma oranları (DR).

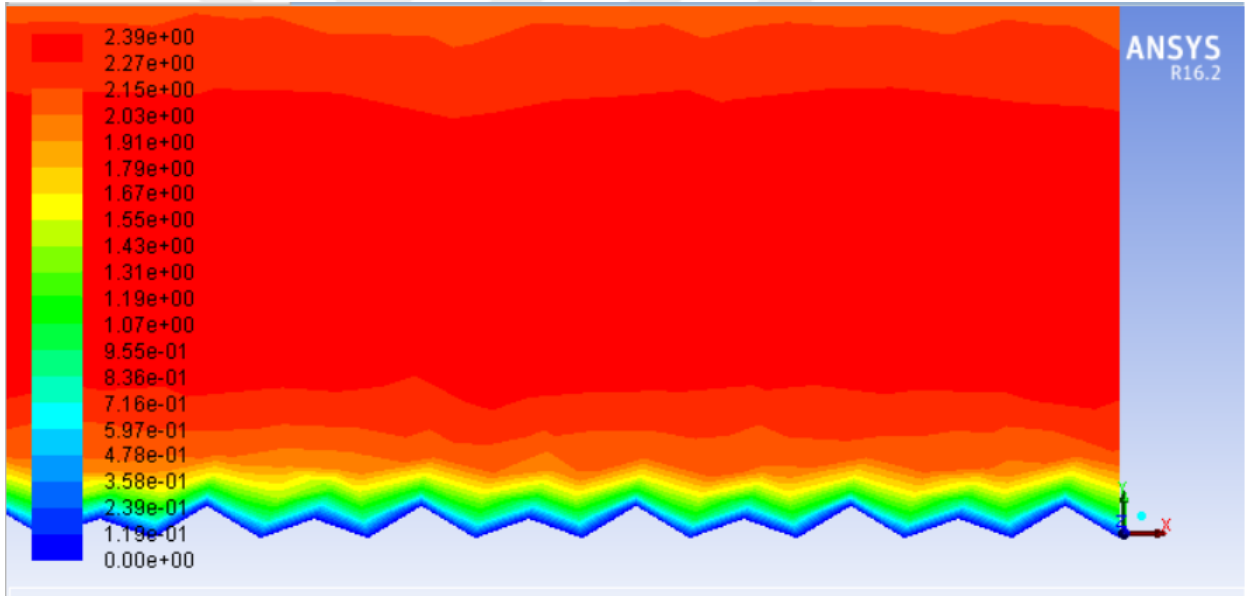
Hiz	s^+	B-2 Model Yüzey Kayma Gerilmesi	E-2 Model Yüzey Kayma Gerilmesi	Referans Yüzey Kayma Gerilmesi	DR B-2	DR E-2
1	7.55003	7.4058	6.0863	8.8384	-16.2087	-31.1381
1.5	10.7653	14.2808	11.9665	17.2871	-17.3906	-30.7779
2	13.8468	23.4522	19.8668	28.8275	-18.6462	-31.0837
2.5	16.8324	34.4958	29.6695	42.2552	-18.3629	-29.7849
3	19.7437	47.1484	40.9832	55.5063	-15.0576	-26.1647
3.5	22.5947	61.6261	53.7174	70.3359	-12.3831	-23.6272
4	25.3951	78.7964	68.1716	87.1471	-9.5823	-21.7741
4.5	28.1520	97.5785	84.2276	105.4707	-7.4828	-20.1412
5	30.8707	118.3505	102.0215	124.8846	-5.2321	-18.3073

**Şekil 4.8:** s^+ - (DR) Sürüklenme azaltma oranı grafiği.

Şekil 4.9 ve şekil 4.10'da kesit hız konturlerinde de gözüktüğü gibi E2-3d modelin viskoz alt katman kalınlığı B2-3d modeline göre daha kalın çıkmıştır. Viskoz alt tabakanın yoğunlaşması türbülans girdaplarını yüzeyden uzaklaştırır ve yüzey için sürüklemeyi azaltmada kayganlaştırıcı olarak çalışır.



Şekil 4.9: E2 modelin duvara yakın kısmındaki hız konturleri.



Şekil 4.10: B2 modelin duvara yakın kısmındaki hız konturleri.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yapılan literatür araştırmasında ve yapılan çalışmada yüzey yapılarında değişiklikler yapılarak sürüklemenin önemli bir miktarda azaltılabileceği bulunmuştur. Sürüklemenin azaltılması ile özellikle büyük ulaşım şirketlerinde yakıt tüketimini azaltılarak büyük oranda kar edilmesini sağlar. Boruların iç kısımları pürüzlü yüzey ile kaplanarak sürüklenme azalması ile gerekli olan pompa gücünde azaltılabilir.

Sürüklenme bir nesnenin şeklini optimize edilerek azaltılabileceği gibi nesnenin yüzey yapısı da değiştirilerek azaltılabilir. Yüzey yapısını optimize ederken doğada en uygun koşullara göre evrimleşmiş canlılardan esinlenmek iyi sonuçlar almamızı sağlar. Bu canlılar suda hızlı yüzen köpekbalığı ya da havada hızlı uçan kuşlar olabilir. Bu canlıların yüzeylerindeki çıkıntılı yapılar sürüklemeyi azaltan bir etki oluşturduğu bilinen bir gerçektir.

Değişik boyutlarda ve tiplerde toplam 30 tane iki boyutlu model üzerinde sürüklemenin nasıl değiştiği araştırılmıştır. İki boyutlu modeller incelendiğinde, literatür çalışmasında bahsetildiği gibi yuvarlatılmış modellerin iyi sonuç vermediği bulunmuştur. Yükseklik uzunluk oranı olan h/s oranının 0.6 – 0.7 değerlerinde en iyi sonuç verdiği ve daha büyük değerlerde fazla bir değişiminin olmadığı tespit edilmiştir. Yukarıda verilen iki boyutlu modellerin duvara yakın kısmındaki hız vektörleri incelendiğinde oluşan girdaplar, çıkıntı uçları ile etkileşime geçerek çukur boşluklarında düşük hız alanları oluşturmaktadır. Bu düşük hız alanları çapraz akış hız dalgalanmalarıyla düşük yüzey gerilmesi oluşturarak sürüklemeyi azaltan bir etki oluşturur.

Üç boyutlu modellerde birçok literatür çalışmasında olduğu gibi bu çalışmada da en iyi sonuç $s^+ \approx 15$ değerinde çıkmıştır. Bu değerde bozuk testere dişli tip B2–3d model %18'lere ve testere dişli tip E2-3d model ise %30'lara kadar sürüklenme azalması gerçekleştirmiştir. Yukarıda üç boyutlu modeller için verilen duvar kısmına yakın hız konturleri incelendiğinde E2-3d modelin viskoz alt katman kalınlığı B2-3d modeline göre daha kalın çıkmıştır. Viskoz alt tabakanın yoğunlaşması türbülans girdaplarını yüzeyden uzaklaştırır ve yüzey için sürüklemeyi azaltmada kayganlaştırıcı olarak çalışır.

Yapılan çalışma, kuş tüyünden esinlenerek oluşturulan yüzeylerin sürüklemeyi önemli bir şekilde azalttığını göstermektedir. Oluşturulan modeller ileride deneyleri yapılarak daha da optimize edilerek geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Bechert, D.W. and Hoppe, G., 1985, —On the Drag Reduction of the Shark Skin, Paper AIAA-85-0564, presented at *AIAA Shear Flow Control Conference*, Boulder, CO, March 12-14.
- Bechert, D.W., Bartenwerfer, M., Hoppe G., ve Reif, W.-E., 1986, —Drag reduction mechanisms derived from shark skin, Paper ICAS-86-1.8.3, presented at *15th Congress of the International Council of Aeronautical Sciences*, London, UK, Sept. 7-12.
- Bechert, D.W., Bruse, M., Hage, W., ve diğ., 1997, Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with an adjustable geometry. *J. Fluid Mech.* vol. 338, pp. 59-87.
- Bechert, D.W., Bruse, M., Hage, W., ve Meyer, R., 2000, —Fluid mechanics of biological surfaces and their technological application, *Naturwissenschaften* 87, 157-171.
- Bourisli, R.I., Al-Sahhaf, A.A., 2008, CFD Modeling of Turbulent Boundary Layer Flow in Passive Drag-Reducing Applications. *Advances in Fluid Mechanics VII, WIT Transactions on Engineering Science*, 59:79-90. [doi:10.2495/AFM080081]
- Bullen, R.D., McKenzie, N.L., 2008, The pelage of bats (Chiroptera) and the presence of aerodynamic riblets: the effect on aerodynamic cleanliness. *Zoology*, 111(4):279-286. [doi:10.1016/j.zool.2007.09.001]
- Chen, H., Rao, F., Shang, X., ve diğ., 2013, Biomimetic drag reduction study on herringbone riblets of bird feather. *Journal of Bionic Engineering* 10 341–349. DOI: 10.1016/S1672-6529(13)60229-2.
- Chen, H., Rao, F., Shang, X., ve diğ., 2014, Flow over bio-inspired 3D herringbone wall riblets. *Exp. Fluids* 55:1698. DOI: 10.1007/s00348-014-1698-4.
- Dean, B. ve Bhushan, B., 2010, Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2010) 368, 4775–4806 DOI:10.1098/rsta.2010.0201.

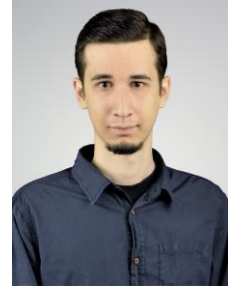
- EI-Samni, O.A., Yoon, H.S., Chun, H.H., 2005, Turbulent flow over thin rectangular riblets. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19(9):1801-1810
- EI-Samni, O.A., Chun, H.H., Yoon, H.S., 2007, Drag reduction of turbulent flow over thin rectangular riblets. *International Journal of Engineering Science*, 45(2-8):436-454. [doi:10.1016/j.ijengsci.2007.03.002]
- Feng, B, Chen, D, Wang, J, ve diğ., 2014, Bionic research on bird feather for drag reduction. *Advances in Mechanical Engineering*. Article ID 849294.
- Hori, T, Ueda, T, Kato, H, ve diğ., 2005, *Practical application of microbubbles to ships – Large scale model experiments and a new full-scale experiment*. ResearchGate, <https://www.researchgate.net/publication/239278712> (Ziyaret Tarihi: 24 Nisan 2017).
- Jung, Y.C. ve Bhushan, B., 2010, Biomimetic structures for fluid drag reduction in laminar and turbulent flows, *J. Phys.: Condens. Matt.* 22, 035104.
- Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A., ve Runstadler, P.W., 1967, The structure of turbulent boundary layers, *J. Fluid Mech.* 30, 741-773.
- Lang, A.W., Motta, P., Hidalgo, P., ve Westcott, M., 2008, Bristled shark skin: a microgeometry for boundary layer control Bioinspiration and Biomimetics 3, 1-9.
- Launder, B.E., Spalding, D.B., 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2):269-289. [doi:10.1016/0045-7825(74)90029-2].
- Lee, S.-J., ve Lee, S.-H., 2001, Flow field analysis of a turbulent boundary layer over a riblet surface, *Exp. Fluids* 30, 153-166.
- Martin, S., 2013, *Fluid flow modelling of biomimetic structures*. Undergraduate Honors Thesis, The Ohio State University, USA.
- Munson, B., Young, D., ve Okiishi, T., 2005, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 5th ed., Wiley, New York.

- Nachtigall, W., 1998, Starlings and starling models in wind tunnels. *Journal of Avian Biology*, Vol. 29, No. 4, Optimal Migration, pp. 478-484.
- Ng, JH, Jaiman, RK and Lim, TT., 2015, Direct Numerical Simulations of Riblets in a Fully-developed turbulent channel flow: effects of geometry. *WSPC Proceedings*.
- Pennycuik, CJ., 1968, A wind-tunnel study of gliding flight in the pigeon *columba livia*. *j. Exp. Biol.*, 49, 509-526.
- Pulles, C. J. A., 1988, *Drag reduction of turbulent boundary layers by means of grooved surfaces* Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven DOI: 10.6100/IR280307.
- Ren, L.Q., Zhang, C.C., Tian, L.M., 2005, Experimental study on drag reduction for bodies of revolution using bionic non-smoothness. *Journal of Jilin University* (Engineering and Technology Edition), 35(4):431-436.
- Sasamori, M, Mamori, H, Iwamoto, K, ve diğ., 2014, Experimental study on drag-reduction effect due to sinusoidal riblets in turbulent channel flow. *Exp Fluids*, 55:1828 DOI: 10.1007/s00348-014-1828-z.
- Saravi, SS ve Cheng, K., 2013, A review of drag reduction by riblets and micro-textures in the turbulent boundary layers. *European Scientific Journal* vol.9, No.33 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e- ISSN 1857- 7431.
- Sirovich, L., Karlsson, S., 1997, Turbulent drag reduction by passive mechanisms. *Nature*, 388(6644):753-755. [doi:10.1038/41966].
- Shi, Z, Chen, J ve Chen, Q., 2015, On the turbulence models and turbulent Schmidt number in simulating stratified flows. *Journal of Building Performance Simulation*.
- Tucker, AV ve Parrott, CG., 1970, Aerodynamics of gliding flight in a falcon and other birds. *The Journal of Experimental Biology*, 5, 345-367.
- Versteeg, H.K., Malalasekera, W., 1995, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. Wiley, New York, USA.

- Walsh, M.J., 1980, *Drag characteristics of v-groove and transverse curvature riblets*, *Viscous Flow Drag Reduction*. 72, 169-184.
- Walsh, M.J., ve Anders, J.B., 1989, Riblet/LEBU research at NASA Langley, *Appl. Sci. Res.* 46, 255-262.
- Walsh, M. J. ve Lindemann, A. M., 1984, Optimization and Application of Riblets for Turbulent Drag Reduction. *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, New York, USA, 347, 1–11.
- Wang, F.J., 2004, Computational Fluid Dynamics: Principle and Application of CFD Software. *Tsinghua University Press*, Beijing, China, p.125-132.
- Wilkinson, S.P. ve Lazos, B.S., 1987, Direct drag and hot-wire measurements on thin-element riblet arrays, presented at the *IUTAM Symposium on Turbulence Management and Relaminarization*, Bangalore, India, Jan 19-23.
- Zhang, C.C., 2007, *Drag Reduction of Bodies of Revolution by Flow Control Using Bionic Non-Smooth Surface*. MS Thesis, Jilin University, Changchun, China.
- Zhou, C.H., Tian, L.M., Ren, L.Q., Zhao, W.F., Zhang, R., Zhang, S.C., 2006, Research on non-smooth surface morphology and bionic technology of Columba livia feather. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 37(11):180-183.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Ahmet İlyas KODAL
Doğum Yeri	Fatih
Doğum Tarihi	25.10.1993
Uyruğu	☒ T.C. ☐ Diğer:
Telefon	+90 506 664 87 30
E-Posta Adresi	a.kodal@ogr.iu.edu.tr
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	İstanbul Arel Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik – Mimarlık Fakültesi
Bölümü	Makine Mühendisliği Bölümü
Mezuniyet Yılı	17.07.2015

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Makine Mühendisliği
Programı	Makine Mühendisliği
Mezuniyet Tarihi	19.12.2017