

# **SU TUTMAYAN NANOYAPILI YÜZEY TASARIMI**

## **YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Serhat AKINCI**

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NANOTEKNOLOJİ VE İLERİ MALZEMELER  
ANABİLİM DALI**

**MERSİN  
NİSAN - 2020**

# SU TUTMAYAN NANOYAPILI YÜZEY TASARIMI

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat AKINCI

MERSİN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOTEKNOLOJİ VE İLERİ MALZEMELER  
ANABİLİM DALI

Danışman  
Doktor Öğretim Üyesi Filiz KARAÖMERLİOĞLU

MERSİN  
NİSAN - 2020

## ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
  - Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
  - Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
  - Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
  - Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
  - Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
  - Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi
- beyan ederim.

## ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

07/04/ 2020

İmza / Signature

Serhat AKINCI

## ÖZET

### SU TUTMAYAN NANOYAPILI YÜZEY TASARIMI

Dış ortam şartlarında çalışan cihazların, makinelerin, sistemlerin yüzeylerinde su tutması, soğuk iklim şartları düşünülürse buzlanmaya neden olur. Oluşan buzlanma ise bu sistemlerin performansını düşürür. Bu sıkıntıyı önlemek amacıyla tez çalışmasında su tutmayan nanoyapılı yüzey tasarımı yapılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarında bir çok kez deneysel olarak süperhidrofobik özelliği olduğu kanıtlanan yüzey geometri modelinin Sonlu Elemanlar Metodu-SEM (FEM- Finite Element Methods) kullanan, Bilgisayar Destekli Tasarım-BDT (CAM-Computer Aided Desing) ile tasarlanıp yine aynı metodu kullanan ve Hesaplanabilir Akışkanlar Dinamiği-HAD (CFD-Computational Fluid Dynamics) hesaplamaları yapan programlar ile de sanal ortama uygulanıp analizi yapılmıştır.

Elde edilen sonuçlar tasarlanan yüzey geometrisinin süperhidrofobik olmasının yanı sıra sürtünme etkilerini de azaltacak hava akımı ve yüzey arasında bir boşluk filmi varmış gibi sürtünme etkilerinde avantajlar sağladığı saptanmıştır. Bu sebeple uçak kanatlarında buzlanma önleyici bir yöntem olarak düşünülen süperhidrofobik yüzeyin sanal olarak analizlerinin yapılmasının sürtünmeye olan olumlu etkileri de anlaşılıp günümüzde kullanılan buzlanma giderici ve önleyici yöntemlere ideal bir alternatif olabileceği düşünülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrofobik, anti-icing, modelleme, nanoteknoloji, yüzey.

**Danışman:** Doktor Öğretim Üyesi, Filiz KARAÖMERLİOĞLU, Mersin Üniversitesi, Nanoteknoloji ve İleri Mazlemeler Anabilim Dalı, Mersin.

## ABSTRACT

### DESIGN OF ICE-FREE NANOSTRUCTURED SURFACES

When the devices, machines and systems working in outdoor conditions keep the water on their surfaces, it may cause icing especially in cold climate conditions. That formed icing reduces the performance of these systems. In order to prevent this problem, a water-repellent nanostructured surface design has been made in this thesis study

Considering the studies in the literature, surface geometry model -which has been proved many times to be superhydrophobic - has been designed by Computer Aided Design (CAD) which use Finite Element Methods (FEM), and then applied to the virtual environment and analyzed via programs which again use the same method and make calculations of Computational Fluid Dynamics (CFD).

The results show that as well as being super hydrophobic, the designed surface geometry also provides benefits in friction effects such as there is a gap layer between the air flow and the surface which will reduce the friction effects. For this reason, it is well understood the positive effects of superhydrophobic surface on friction in virtual analysis which is considered as an anti-icing method on aircraft wings and it is assumed that it can be an ideal alternative to the anti-icing and de-icing methods used today.

**Keywords:** Hydrophobic, anti-icing, modeling, nanotechnology, surface.

**Advisor:** Assistant Professor Dr. Filiz KARAÖMERLİOĞLU, Mersin University, Nanotechnology and Advanced Materials Department, Mersin.

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve tez sürecinde değerli bilgi birikimi ve tecrübesiyle desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, her türlü koşul ve şartlarda yardımcı olan ve yol gösteren tez danışmanım Sn. Doktor Öğretim Üyesi Filiz KARAÖMERLİOĞLU'na teşekkürü borç bilirim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi destek veren her kararımı destekleyen aileme, sevgi dolu annem Nabahat AKINCI ve saygıdeğer ağabeyim M.Hüseyin AKINCI'na sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım. Her anıma mutluluk ve değer katan sevgili kardeşlerim Elif AKINCI, Evin DEMİRTAŞ ve İlkay Armağan AKINCI'ya ayrıca biricik yeğenlerim Alya Deniz ve Beyazıt'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tezin modelleme ve analiz aşamasında desteğini ve tüm imkanlarını kullanımına açtıkları için Sn. Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin MUTLU, Mak. Yük. Müh. Emre KAYGUSUZ'a ve şirketleri Big Gradyan Enerji'ye, tez yazım aşamasında zamanını ve birikimini benden esirgemeyen kıymetli Ar. Gör. Gürol Yokuş, Uzm. Hemşire Döne AKSU, Öğr. Gör. Hasan KOCADAYIOĞULLARI ve Dilek SAYDERE'ye teşekkür ederim.

*Babam Vedat AKINCI, annem Nabahat AKINCI ve ağabeyim M.Hüseyin AKINCI'ya itafen...*

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	
ONAY	i
ETİK BEYAN	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR ve SİMGELER	xi
<b>1. GİRİŞ</b>	<b>1</b>
<b>2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI</b>	<b>2</b>
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b>	<b>6</b>
3.1. Nanoteknolojinin Tanımı	6
3.2. Nano-teknolojinin Amaçları	7
3.3. Nanoteknolojinin Kullanım Alanları	7
3.3.1. Uzay ve Havacılık Sektörü	8
3.3.2. Nanoelektronik ve Bilgisayar Teknolojisi	8
3.3.3. Tıp ve Sağlık	8
3.3.4. Çevre ve Enerji	8
3.3.5. Askeri Ürünler ve Savunma	9
3.3.6. Bilim ve Eğitim	9
3.4. Buzlanma	9
3.4.1. Saydam Buz	10
3.4.1.1. Saydam Buz Tabakasının Oluşumunda ve Kalınlığında Rol Oynayan Faktörler	10
3.4.1.2. Buzlanma Giderici İşlemler (Anti-İcing)	11
3.5. Süperhidrofobiklik	11
3.5.1. Doğal Hidrofobik Yüzeyler	12
3.5.2. Yüzey Gerilimi ve Temas Açısı	12
3.5.2.1. Wenzel Durumu	14
3.5.2.2. Cassie-Baxter Durumu	16
3.5.2.3. Wenzel ve Cassie-Baxter Modellerine İlişkin Tartışma	17
3.6. Alüminyum	19
3.6.1. Allüminyumun Temel Özellikleri	19
3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi	20
3.7.1. Genel Tanımlama	20
3.7.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri	21
3.7.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Formülasyonu	22
3.8. CAD (Computer Aided Desing) programları	23
3.8.1. CAD Kullanım Alanları	23
3.8.2. Programın genel içeriği	24
3.9. Akışkanlar Mekaniğinin Temel Diferansiyel Denklemleri	25

3.9.1. Kütlenin Korunumunun Diferansiyel Denklemi	25
3.9.2. Momentumun Korunumunun Diferansiyel Denklemi	25
3.9.3. Navier-Stokes Denklemleri	26
3.9.4. Herhangi Bir Büyüklüğün Adveksiyon-Difüzyon Denklemi	27
3.9.5. Akışkanlar Mekaniğinin Temel Denklemlerinin Kapalı Formu	27
<b>4. BULGULAR</b>	29
4.1. Süperhidrofobik Yüzey Geometrisi Tasarımı	29
4.2. Süperhidrofobik Yüzey Geometrisi Analizi	30
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ</b>	64
<hr/>	
KAYNAKLAR	65
ÖZGEÇMİŞ	67
<hr/>	





## TABLolar DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Tablo 1. Alüminyumun mekanik özellikleri	20
Tablo 2. Genel mühendislik problemleri için değişkenler	23



## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1. Temas açısı $\theta_Y$ ve tüm yüzey gerilimleri, düz bir yüzeye dayanan bir su damlasından oluşan bir sistemdedir	13
Şekil 2. Wenzel durumu bir damlacık şematik gösterimi	14
Şekil 3. Bir yüzeydeki pürüzsüzlülüğün üç boyutlu bir modeli	15
Şekil 4. Wenzel'in modeline göre pürüzlülük faktörü $R_f$ 'nin bir fonksiyonu olarak farklı Genç temas açıları $\theta_0$ için CA değerleri	16
Şekil 5. Cassie-Baxter durumunda bir damlacık şematik gösterim	17
Şekil 6. Dengede olan üç fazlı bir sistemin sıvı-buhar (a), katı-sıvı (b) ve katı-buhar (c) ara yüzey gerilimleri gösterilmektedir. Balansları (d) 'de gösterilmiştir ve temas açısı $\gamma_{LV} - \gamma_{SL}$ (e) arasındaki açıdır	18
Şekil 7. Süperhidrofobik bir noktadan pürüzsüz bir alan üzerine genişleyen bir su damlasını gösteren video kaset çerçeveleri	18
Şekil 8. Daire çevresinin FEM ile bulunması	21
Şekil 9. Bir boyutlu bir sonlu eleman	21
Şekil 10. Şekilde iki boyutlu dikdörtgen, iki üçgenli dikdörtgen, dörtgen elemanı ve dört üçgenli dörtgen elemanı tipi sonlu elemanlar da kullanılmaktadır	21
Şekil 11. İki boyutlu değişik dörtgen geometri biçimli sonlu elemanlar	22
Şekil 12. Üç boyutlu karesel ve üçgensel elemanlar	22
Şekil 13. Solidworks ile süperhidrofobik yüzey geometri tasarımı	29
Şekil 14. Solidworks ile çizilmiş yüzey geometrisinin XFlow'a aktarımı	30
Şekil 15. Yüzey geometrisinin analiz görüntülemesi	31
Şekil 16. X eksenli Hız (Veloncity) skalası	31
Şekil 17. X eksenli izohips hatlı Hız (Veloncity) skalası	32
Şekil 18. X eksenli türbülans yoğunluğu 3D skalası	33
Şekil 19. X eksenli türbülans yoğunluğu skalası	33
Şekil 20. X eksenli izohips hatlı türbülans yoğunluğu skalası	34
Şekil 21. Y eksenli koordinat ve ölçülendirme gösterimi	34
Şekil 22. Y eksenli kesit yüzeyi 3D gösterimi	35
Şekil 23. Y eksenli Hız (Veloncity) skalası	35
Şekil 24. Y eksenli 3D Hız (Veloncity) skalası	36
Şekil 25. Y eksenli izohips hatlı Hız (Veloncity) skalası	37
Şekil 26. Y eksenli tepe görünümlü Hız (Veloncity) skalası	37
Şekil 27. Y eksenli 3D türbülans yoğunluğu skalası	38
Şekil 28. Y eksenli 3D toplam basınç skalası	39
Şekil 29. Y eksenli Hız (Veloncity) vektörel skalası	39
Şekil 30. Y eksenli yakınlaştırılmış vektörel Hız (Veloncity) skalası	40
Şekil 31. Y eksenli vektörel Hız (Veloncity) tepe görünümü	41
Şekil 32. Y eksenli vektörel Hız (Veloncity) tepe yakınlaştırılmış gösterimi	41
Şekil 33. Y eksenli vektörel Hız (Veloncity) tepe gösterimi hava çıkış gösterimi	42
Şekil 34. Y eksenli kesit yüzeyi konumu gösterimi, tepe teğet	43
Şekil 35. Y eksenli kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken 3D Hız (Veloncity) skalası	43
Şekil 36. Y eksenli kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken tepe görünümü Hız (Veloncity) skalası	44
Şekil 37. Y eksenli kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken vektörel Hız (Veloncity) skalası	45
Şekil 38. Y eksenli kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken vektörel Hız (Veloncity) skalası açı 2.	46
Şekil 39. Y eksenli kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken 3D vektörel Hız (Veloncity) skalası	47
Şekil 40. Y eksenli kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken 3D türbülans yoğunluğu skalası	48
Şekil 41. Y eksenli kesit yüzeyi tepe noktasından 1 $\mu$ m yükseklikte konum görseli	48
Şekil 42. Y eksenli kesit yüzeyi tepe noktasından 1 $\mu$ m yükseklikte 3D Hız (Veloncity) skalası	49

Şekil 43. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 1 µm yükseklikte tepenin görünümü Hız (Veloncity) ölçeği	50
Şekil 44. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 1 µm yükseklikte 3D vektörel Hız (Veloncity) ölçeği	51
Şekil 45. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 1 µm yükseklikte yakınlaştırılmış vektörel Hız (Veloncity) ölçeği	52
Şekil 46. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 1 µm yükseklikte 3D Türbülans yoğunluğu ölçeği	53
Şekil 47. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 1 µm yükseklikte tepenin görünümü ve izohips hatlı Türbülans yoğunluğu ölçeği	54
Şekil 48. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 1 µm yükseklikte tepenin görünümü vektörel Türbülans yoğunluğu ölçeği	55
Şekil 49. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 1 µm yükseklikte tepenin görünümü Toplam basınç ölçeği	56
Şekil 50. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 5 µm yükseklikteki konum gösterimi	57
Şekil 51. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 5 µm yükseklikte 3D Hız (Veloncity) ölçeği	58
Şekil 52. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 5 µm yükseklikte izohips hatlı 3D Hız (Veloncity) ölçeği	59
Şekil 53. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 5 µm yükseklikte vektörel Hız (Veloncity) ölçeği	60
Şekil 54. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 5 µm yükseklikte tepenin görünümü Türbülans yoğunluğu ölçeği	61
Şekil 55. Y eksenli kesit yüzeyi tepenin noktasından 5 µm yükseklikte tepenin görünümü Toplam basınç ölçeği	62

---

## KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simge	Tanım
SEM	Sonlu Elemanlar Metodu
CAD	Computer Aided Desing- Bilgisayar Destekli Tasarım
FEM	Finite Element Method
FEA	Finite Element Analysis
HAD	Hesaplanabilir Akışkanlar Dinamiği
CFD	Computation Fluid Dynamic
LA	Liquid Air
SA	Solid Air
LS	Solid Liquid
$\mu m$	Mikrometre
Nm	Nanometre
$\gamma$	Arayüz
$^{\circ}$	Derece
$^{\circ}C$	Santigrat derece
K	Kelvin
$\theta_w$	Wenzel temas açısı
$\theta_y$	Young temas açısı
$\rho$	Sıvı yoğunluğu
g	Yerçekimi ivmesi

## 1. GİRİŞ

Yakın zamanda internetin iyice yayılması ile birlikte teknolojik ve bilimsel çalışmalara ulaşma, istifade etme ve geliştirme imkanları hızlanarak arttı. Bu sebeple her geçen gün kullanım alanları artan ve neredeyse yaşamımızın olmazsa olmazı haline gelen bilgisayarlarında gelişimi hızlandı. Geliştirilen mikro elektroniğin her alanda kullanılması mevcut iki durum için birbirini tetikleyen olaylar oldu [1].

20. yy son çeyreğinde bilim dünyasında elde edilen gelişmeler boyut olarak nanometre (metrenin milyarda biri) seviyelerinde malzeme özelliklerinin fiziksel ve kimyasal olarak oldukça farklı ve ilgi çekici bir hal aldığı fark edilmiştir. Doğrudan atomları görüntüleyebilen taramalı tünel mikroskopları ile ve bu mikroskoptan türetilen atomik kuvvet mikroskobu sayesinde hem atomları birer birer inceleme fırsatı tanırken hem de kontrollü bir şekilde istenilen yere taşınabilmesi ile yapay malzemeler üretmenin ilk aşaması gerçekleşmiş oldu. Nanometre boyutlarında tasarlanmış yapay malzemelerde istenilen fiziksel ve kimyasal malzemeler üretilebileceğinden daha işlevsel daha mukavemetli ve daha hızlı işlemler yapabilen malzemeler üretilebilir. Bu yeni tip malzemeler birçok alanda tasarruf kapılarını da aralamaktadır. Daha az enerji tüketen, daha az yer kaplayan ve daha küçük malzemeler üretilmesi birçok sektördeki sorunları da giderecektir [2].

Atomik boyutlarda kuvantum yasalarının geçerli olduğu görülmektedir. Malzeme atomların dizilişine bağlı olarak gözle görünür değişiklikler gösterebilmektedir. Örneğin, bir molekülden bir atom çıkartıldığı veya bir atom eklendiği zaman özellikler kısmen veya tamamen değişebilmekte, molekülün fiziksel, kimyasal, mekaniksel ve iletkenlik gibi birçok özelliği farklı bir hale gelebilmektedir. Nano-yapılardaki bu değişebilme ve farklılaşabilme özelliği birçok teknolojik uygulamalar için farklı fırsatlar yaratmaktadır [3].

## 2. KAYNAK ARAŞTIRMALARI

Bu çalışmada, bir buzlanma önleyici kaplama ile sulu yağlama tabakası yapılmıştır. Bu anti-buzlanma kaplama çeşitli yüzeylere ve buza doğrudan uygulanabilir. Kaplamasız yüzeylere göre büyük ölçüde kaplanmış yüzeylerde yapışma mukavemeti düşürülebilir.

Buzlanma önleyici kaplama üzerinde oluşan buzun, ilk kez, kontrol edilebilen sıcaklık ve rüzgar hızıyla rüzgar tüneline bir rüzgar hareketi ile şekillenebileceği kanıtlanmıştır. Ayrıca, sıcaklık -53°C'ye düştüğünde düşük buzlanma önleyici kaplamanın buz tutuşu bile korunabilir. Buzlanma önleyici kaplamanın sağlamlığı ve dayanıklılığı, buzlanma / buz çözme deneyleri ile kanıtlanmıştır. Sonuçlar, sulu bir yağlama katmanına sahip olan buzlanma önleyici kaplamanın, pratik uygulamalar için büyük bir önem taşıdığını göstermektedir. Çeşitli yüzeylerde buz birikmesi, günlük yaşamımızda ciddi sorunlara neden olur. Bazı durumlarda, uçak kazası ve güç şebekelerinin çökmesi gibi felaket olaylarına neden olur, bu da ciddi ekonomik etkilere ve büyük can kayıplarına neden olur [4].

Geçtiğimiz yıllarda bilim adamları buz oluşumunu geciktirmek ya da önlemek için süperhidrofobik yüzeylere odaklanmışlardır. Bununla birlikte, süperhidrofobiklik, yüksek nemde kaybolacak veya buz çözme işlemi altında yok olacak ve buz, yüzey dokusuna nüfuz ettiğinde buz yapışma mukavemeti genişleyecektir. Son zamanlarda, anti-icing için mikro / nano gözenekli alt taşlara kilitlenmiş bir yağlama yağı filmi bildirilmiştir. Yağlama yağı filmi, biriken buzun kolayca çıkarılmasını sağlayan buz yapışmasını önemli ölçüde azaltır [5].

Yağın buharlaşma yoluyla tükenmesini veya oluşan buzun uzaklaşmasını engelleyerek uzun süreli dayanıklılık olması daha iyi olur. Dou ve ark.'nın daha önceki çalışmalarında, silikonlu bir plaka yüzeyinde fotolitografik olarak hazırlanmış mikro gözeneklerin içine aşılınmış çapraz bağlı higroskopik polimerlerle bir prototip anti-buzlanma kaplaması geliştirilmiştir. Bu yöntem, buz yapıştırma kuvvetini büyük ölçüde azaltır ve su, nemden veya erimiş buzdan geri alınabileceğinden, dayanıklılık problemi yoktur. Bununla birlikte, bu prototip kaplama sınırlı kullanımlıdır, çünkü mikro gözeneklerin hazırlanması ve farklı katı alt katmanlardaki mikro gözeneklerdeki çapraz bağlı higroskopik polimerlerin aşılınması pratik değildir. Bu nedenle, dayanıklı bir kayganlaştırıcı sulu tabaka ile mekanik sağlam bir kaplamaya sahip olmak daha fazla tercih edilir ve en önemlisi kaplama doğrudan katı yüzeylerin çeşitleri üzerine uygulanabilir. Son olarak, buzlanma önleyici kaplamaların pratik uygulamaları için çok önemlidir [6].

Buz birikimini kontrol eden malzemeler, uçak verimliliği, otoyol ve enerji hattı bakımı ve bina inşaatı için önemlidir. Mevcut buz çözme sistemlerinin çoğu, hem enerji hem de kaynak yoğunluğundaki buzun fiziksel veya kimyasal olarak uzaklaştırılmasını içerir. Daha arzu edilen bir yaklaşım, birikimiyle savaşmaktan ziyade buz oluşumunu önlemek olacaktır. Son

zamanlarda süper soğutulmuş yüzeylerde duran statik su damlacıklarının donmasına çok dikkat edilmiştir. Bununla birlikte, buz birikimi, damlacık / substrat çarpması ve ardından donma ile başlar. Burada süper soğutulmuş nano-yapılı ve mikro-yapılı yüzeyleri etkileyen dinamik damlacıkların davranışlarına odaklanılmıştır. Sıcaklığa bağlı damlacık / yüzey etkileşiminin ayrıntılı deneysel analizi, yüksek derecede sipariş edilen süperhidrofobik malzemelerin, buz çekirdeklenmesinden önce etkiyen suyu geri püskürtme yeteneklerinden dolayı, yaklaşık olarak -25 ila -30°C'ye kadar tamamen buzdan muaf olarak kalacak şekilde tasarlanabileceğini göstermektedir. Bu sıcaklıkların altında biriken buzlar kolaylıkla temizlenebilir. Damlacık retraksiyonuna, iğnelemeye ve donmaya katkıda bulunan faktörler, klasik nükleasyon teorisinin ısı transferi ve ıslatma dinamikleriyle birleştirilerek, rasyonel olarak tasarlanan buz önleyici malzemelerin geliştirilmesi için temel oluşturulmaktadır. Özellikle, gelişmiş mekanik ve basınç stabiliteleri, kolay kopyalama ve büyük ölçekli imalatlar için uygun hücre ve kapalı hücre yüzey mikro yapıları içeren hidrofobik polimerik kaplamaların potansiyelini ve malzemelerinin ve kimyasal özelliklerinin daha iyi ayarlanması için fırsatların altı çizilmiştir [5].

Atmosferdeki aşırı soğutulmuş damlacıklardan kaynaklanan atmosferik buzlanma, soğuk iklime ve yüksek irtifaya sahip bölgelerde yapılan insan yapımı yapılarda, hem sosyoekonomik kayıplarda hem de insan yaşamında kayıplarla sonuçlanan felaket sonuçlara neden olabilir. Buzlanma problemini azaltmak için, zaten birikmiş olan buzu gidermek için kimyasal, termal ve mekanik teknikler içeren aktif buz çözücü geliştirilmiştir. Ancak, bu teknikler, yüksek enerji tüketimi, çevreye zarar verme tehlikesi, yüksek ekonomik maliyetler ve sık sık tekrar uygulama ihtiyacı gibi sorunlarla karşı karşıya kaldıklarından, alt-optimaldir [5,6].

Süperhidrofobiklik alanındaki araştırmaların çoğu, açık hücreli yapılara sahip yüzeyleri, örneğin; sütun benzeri yüzeyler ve tümsekler ve vadiler içeren yüzeyler. Kapalı hücreli yüzeylerin, hidrofobik özelliklerini basınç altında tutmada daha iyi olmaları bakımından karşılaştırmalı bir avantaja sahip oldukları bildirilmiştir. Boinowich ve Emelyanenko'nun çalışmasında LAMMPS simülasyonlarını kullanarak, kapalı hücreli yapıların ıslatma özellikleri (genellikle buz sifobik özelliklerine sık sık yakından bağlı) daha fazla araştırılmıştır. Simülasyonlar, bu yüzeylerdeki ıslanmanın bilinen Wenzel ve Cassie-Baxter teorilerini karşıladığını göstermektedir. Bununla birlikte, simülasyonların yapıldığı küçük ölçekte, pürüzlülük ölçeğini ayarlama etkisi teori tarafından öngörülen şekilde değildir. Ayrıca, kapalı hücre yüzeyleri için açık hücre yapılarına karşı karşılaştırmalı bir avantaj gösterilememiştir. Fiziksel bir deney de yapılmıştır; burada su damlacıklarının neredeyse süper bir hidrofobik siyah silikon yüzeyindeki dinamik davranışı üzerindeki yoğunluğu test edilmiştir. Sonuçlar iyi bilinen bir sorunu doğrular: Yoğuşma hidrofobik yüzeylerin su geçirmezliğini ciddi şekilde bozar [7].

Boinowich ve Emelyanenko'nun çalışmasındaki literatür taraması ve deneyler, süperhidrofobik yüzeylerin buzlanma önleyici uygulamalarda kullanım için büyük bir potansiyele sahip olduğunu, gecikmiş donma, azalan buz birikimi ve azaltılmış buz yapışması olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, mekanik hasardan kaynaklanan buz-tutmazlığın bozulması ve nemli koşullarda azaltılmış buz-tutmazlık dahil, ana problemler çözülememiştir [7].

Buz oluşumu ve birikimi, uçak, gemiler, açık deniz petrol platformları, rüzgar türbinleri, barajlar, elektrik santralleri, enerji nakil hatları ve telekomünikasyon ekipmanları, ısı pompaları, buzdolapları ve klimalar dahil olmak üzere altyapı bileşenlerinin, mekanizmalarının ve makinelerinin verimliliğini azaltır. Son yıllarda, buzlanma işlemlerini düzenleyen fizikokimyasal olayların daha ayrıntılı bir şekilde anlaşılması ve buzlanmanın önlenmesi ve / veya sonuçlarının azaltılması için daha etkin sistemler geliştirilmesi için çaba gösterilmiştir [8].

En popüler buz çözme stratejileri genel olarak güç tüketir ve her zaman verimli ve çevresel olarak güvenli değildir. Örneğin, mekanik ve elektrotermal yöntemler, havai iletim hatlarının pervane koşulları altında çalışmasını olumsuz etkileyen faktörlerle mücadele etmek için kullanılır. Bu yöntemlerin ıslak kar toplama, buzlanma ve donma yağmuru veya don birikmesinden korunmadaki etkinliği literatürde tekrar tekrar tartışılmıştır. Üstten geçen bir iletim hattındaki mekanik etki, tamir edilen bir bölümün normal çalışmasını bozan koşullar yaratır. Ayrıca, mekanik yöntemlerin çoğu, hatta ek mekanik baskı yaratır. Bu stres bazı durumlarda başarısızlığa neden olabilir. Ayrıca, elektrik hatlarının buzlanmasına karşı mücadele için mekanik yöntemlerin uygulanması, genel olarak hatta erişim ve tellerin ve elektrik iletim kulelerinin doğrudan taşınmasını gerektirir. Elektrotermal yöntemler, buzlanmaya karşı korunan bir cisim üzerinden akımın geçişi sırasında gelişen ısısının kullanılmasına dayanır [9].

Son yıllarda, buz oluşumuna maruz kalan yapısal parçalar üzerinde buz oluşumunun veya hızlandırılmış buz erimesinin önlenmesi için birçok elektrotermal yöntem önerilmiştir. Bununla birlikte, bu yöntemler ek güç tüketimi ve pahalı ekipman gerektirir. Elektrik enerjisinin taşınmasında elektrotermal yöntemlerin kullanımına, ya ağlardaki elektrik akışının yeniden dağıtılması eşlik eder ve bazı durumlarda, bazı tüketicilerin geçici olarak karartılması veya ağ şemasına izin veren daha karmaşık bir ağ yapılandırması gereklidir ya da elektromanyetik dalga yayılım parametreleri değiştirilecektir. Bu nedenle, elektrotermal yöntemlerin uygulanması, buzlanmaya karşı korunan bir nesnenin imalat ve işleminin hatırı sayılır bir şekilde takdir edilmesiyle sonuçlanmaktadır. Bazı durumlarda, bu tür yöntemlerin kullanılması, bir nesnenin çalışma ömründe azalma ve durumunu izleyen otomatik bir sistem gibi olumsuz etkilere neden olur [7].



Buz tutmaz kaplamalar, küresel enerji tasarrufu üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir ve birçok altyapı, nakliye ve soğutma sisteminde güvenliği artırabilir. Buz-itici yüzeylerin geliştirilmesine yönelik son yıllarda en çok nilüfer yapraklarından esinlenilmiş süperhidrofobik yüzeylerin kullanılması önlenmiştir, ancak bu yüzeyler su yoğunlaşması ve don oluşumu nedeniyle yüksek nem koşullarında başarısızlık gösterir ve hatta geniş yüzey alanı nedeniyle artan buz yapışmasına neden olur. Suyla karışmayan bir sıvıyı kimyasal olarak işlevsel hale getirilmiş bir nano-yapılı yüzeye akıtmak suretiyle stabil, pürüzsüz, düşük histerezli bir kayganlaştırıcı üst tabakanın tutulduğu kaygan, sıvı ile doldurulmuş gözenekli yüzeylere (SLIPS) dayanan kökten farklı tipte bir buz itici malzeme rapor edilmiştir [9,10].

Endüstriyel olarak ilgili metaller üzerinde, özellikle de en yaygın kullanılan hafif yapı malzemelerinden biri olan alüminyum üzerinde doğrudan bir imalat yöntemi geliştirilmiştir. SLIPS kaplı Al yüzeylerinin, yalnızca yoğunlaştırılmış nemi etkili bir şekilde ortadan kaldırarak buz/don birikimini baskılamakla kalmayıp, aynı zamanda, en son teknolojiye sahip malzemelerden daha az büyüklükte daha düşük bir buz yapışma derecesi gösterdiğini de gösterilmiştir. Kapsamlı buzlanma/buz çözme deneylerinin ardından teorik bir analiz temelinde, SLIPS'in buz tutmayan yüzeyler olarak çok düşük temas açısı histerezisinden kaynaklanan yüksek oranda azaltılmış kayan damlacık boyutları özel avantajları tartışılmıştır. Yüzeylerimizin, geleneksel malzemelerin buz biriktirdiği, donma önleyici olmadığı gösterilmiştir. Bu sonuçlar, SLIPS'in soğutma, havacılık, çatılar, teller, dış mekan tabelaları, korkuluklar ve rüzgar türbinleri gibi geniş uygulamalar için sağlam buzlanma önleyici malzemeler geliştirmek için umut verici bir aday olduğunu göstermektedir [10].

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tez çalışmasında nanomalzemeler kullanılacaktır. Yapılan kuramsal çalışmada işlem yapılmamış, normal yüzey akış analizleri ve nano-yüzey olarak tasarlanmış yüzeylerin analizleri karşılaştırılacaktır. Kullanılacak programlar Solidworks, ve XFlow olacaktır. Kuramsal bir çalışma olacağından sarf malzemesi olmayacaktır. Teçhizat olarak da deneysel çalışma olmayacağından bilgisayar ve bilgisayar programları kullanılacaktır.

Ele alınacak değişkenler normal yüzey ile su tutmayan nanoyüzey değişkenleri olacaktır. İki yüzeyin de analizi yapılacak ve iki durum arasındaki fark bağdaştırılıp açıklanacaktır.

Bu çalışmada, bir çok kez deneysel olarak süperhidrofobik özelliği olduğu kanıtlanan yüzey geometri modelinin Sonlu Elemanlar Metodu-SEM (FEM- Finite Element Methods) kullanan, Bilgisayar Destekli Tasarım-BDT (CAM-Computer Aided Desing) ile tasarlanıp yine aynı metodu kullanan ve Hesaplanabilir Akışkanlar Dinamiği-HAD (CFD-Computational Fluid Dynamics) hesaplamaları yapan programlar ile de sanal ortama uygulanıp analizi yapılmıştır.

#### 3.1. Nanoteknolojinin Tanımı

Yunancada nanos kelimesi “küçük,cüce” anlamlarına gelmektedir buradan gelen nano kelimesi fiziki olarak ebatın milyarda biri anlamındadır. Nanometre ise metrenin milyarda biri anlamındadır. Bir nanometre ortalama üç atomun uzunluğuna denktir [11]. Nanometre o kadar küçük bir birimdir ki yaşadığımız normal boyutlar için örnek vermek gerekirse bir saç telinin eni ortalama yüz bin nanometre uzunluğundadır. [3].

Bir ölçek olan nano, ve bu ölçek dahilinde geliştirilen teknolojilerden ismini alan nanoteknoloji bu ölçekteki teknolojiler anlamındadır. Çıplak gözle görmenin mümkün olmayacağı küçüklükte nanoteknoloji ile uğraşmak multi-disipliner çalışmalar gerektirir [12].

Nano boyuttaki malzemelerin özellikleri makroskobik skaladan oldukça farklıdır, nano boyutlarda birçok farklı özellik daha belirir. Malzemenin boyutları nanometre boyutlarına kadar ininceklasik davranışlar yerine kuantum davranışlar gözlenir, fiziksel özellikler farklı refleksler gösterir [11].

Nano sadece bir ölçek olduğundan nanoteknolojinin malzeme imalatından başlayarak, elektronik, tıp, manyetik, optik, mekanik, ve biyomedikal amaçlı işlemler gibi birçok disiplini de kapsayan çok geniş bir uygulama alanı mevcuttur. Mevcut mühendislik malzemelerinin birçok özelliği mikron boyuttaki içyapılarından (kristal, tane) kaynaklanmaktadır. Nano malzemeler ise, üstün özelliklerini, sahip olduğu daha küçük boyuttaki yapılara borçludurlar [12].

Günümüzde nanoteknoloji süper bilgisayarlara mikroskop altında bakılması, milyonlarca sinema film kaydedilebilen DVD'lerin üretimi, canlı dokusu içerisinde hastalığı belirleyip mücadele edebilen, ameliyat yapan nano robotlar, insan beyninin kapasitesi ek nano hafızalarla güçlendirilebilmesi, çok hafif ve çok dayanıklı malzemeler üretilebilmesi gibi imkanlar sunmaktadır. Gündelik kıyafetler gibi sıradan mamüllerin değişeceği gibi, havacılık ve uzay sektörüne kadar birçok alanda farklı tasarımlar ve teknolojilerin çıkması mümkün olacaktır. Bu gelişmelerin dünyayı baştan şekillendirebileceği, teknolojik anlamda çağlar açacağı düşünülmektedir. Yani yeniçağ, nanobilim ve nanoteknoloji çağı olarak başlaması kuvvetle muhtemeldir [13].

Nano boyutta bir ölçek olduğunu ilk kez Amerikalı fizikçi Richard Feynman ortaya atmış ve "There is plenty of room at the bottom" konulu sunumunda 1959'da ilk defa nano boyuta değinmiştir. [13].

Bu konuşma nanoteknolojide başlangıç kabul edilirken bu boyutlarda çalışanların olabilmesi için, herşeyden önce bu boyutta ölçme ve üretim yöntemlerinin gelişmesi gerektiğinin altını çizmiştir. Feynman'ın konuşmasında; onlarca ciltlik kitapları dahi bir iğne ucuna yazılabileceği, gözle görülmeyecek abatlarda motorlar yapılabileceği ve çok küçük bilgisayarlar üretilebileceği gibi konulara değinmiştir [14].

### **3.2. Nano-teknolojinin Amaçları**

Günümüzde çalışma alanı yaygınlaşan nanoteknolojinin bazı amaçları bulunmaktadır.

- Nanometre ölçekli yapıların analizi,
- Nanometre boyutunda yapıların fiziksel özelliklerinin anlaşılması,
- Dayanıklı, hafif ve çok hızlı yapılar,
- Duyarlılığı çok hassas cihazların geliştirilmesi,
- Daha az enerji sarfiyatı ile daha çok iş yapabilme,
- Nanometre ölçekli yapıların imalatı,
- Alışıldandan farklı ve üstün malzeme özellikleri/üretim süreçlerinin elde edilmesi,
- Uygun yöntemler kullanılarak nano ile makro boyut arasında bağ kurulması [15].

### **3.3. Nanoteknolojinin Kullanım Alanları**

Nanoteknolojinin oldukça geniş bir yelpazede kullanım alanı bulunmaktadır. Çağımızda temel bilimler, haberleşme ve ulaşım gibi birçok alanlarda kullanılmasının yanı sıra, tıp biliminde de oldukça fazla gelişmelere sebep olmuştur. Gelişmekte olan bir teknoloji olan nanoteknolojinin az sayıda uygulama alanı olsa da gelecekte çok daha geniş alanlara yayılacağı açıktır [16].

Yıllar sonra büyük bir sorun olarak karşımıza çıkacak olacak olan enerji edinebilme bu teknolojiyle daha çevreci ve yenilenebilir bir yöntemle çözülebilecektir. Muhtemeldir ki yakın çağda canlı organizma içerisinde çalışabilecek, uyum sağlayabilecek ve problemleri tespit edip çözüm bulabilecek bilgisayarlar imal edilecektir. Nanoteknoloji için, çağımızın önemli teknolojisi olduğunu söylenebilir [13].

### **3.3.1. Uzay ve Havacılık Sektörü**

Yapısal olarak daha hafif, sağlam ve termal özellik bakımından birçok avantaj sağlaması sebebi ile havacılık sektöründe nanoteknolojik öğelerin kullanımının büyük önem taşıyacağı düşünülmektedir. Havacılık ve uzay sektörlerinde çok önemli olan ağırlık parametresi, nanoteknolojik minimal bilgisayarlar, daha hafif malzemeler ve yer kazancı ile kontrolü basit bir hale dönüşecektir [17].

### **3.3.2. Nanoelektronik ve Bilgisayar Teknolojisi**

Nano ölçeklerin kullanılmasıyla, bilgisayarlar ve öğelerinin daha küçük, daha ergonomik ve daha hızlı olabileceği; belki de milisaniyeler içerisinde milyarlarca işlem yapabilecek hale dönüşecekleri düşünülmektedir. Bunun yanı sıra bilgisayarların kayıt alabilme kapasiteleri çok artacak ve mevcut olan birçok probleme çözüm bulunabilecektir [17].

### **3.3.3. Tıp ve Sağlık**

Nano boyutlardaki cihazlar ile birçok hastalığın teşhisinde ve tedavisinde farklı yöntemler geliştirebileceği, bu yöntemler ile zarar görmüş sinirlerin onarılabileceği, sorunlu yapıların yok edilebileceği düşünülmektedir. Ayrıca, üretilmesi mümkün olabileceği düşünülen malzeme yapıları ile insan vücudu ile daha uyumlu implantlar ve öğeler kullanılabilir [17].

### **3.3.4. Çevre ve Enerji**

İnsanlığın pek yakın bir çağda yaşayacağı en temel problemlerin başında enerji bulunmaktadır. Bu problem dolaylı olarak çevre problemleri ile de bağlantılıdır. Nanoteknoloji, enerjinin daha verimli kullanılmasında, depolanmasında ve üretilmesinde uygulama alanları olduğundan bu konuda birçok sorunun çözümü olabileceği düşünülmektedir. Birçok yeni sistem ve enerji üretimi yöntemi fosil yakıtların yerini alarak daha çevreci tüketim imkanı sağlayacaktır. Ayrıca, insanlığın temel problemleri arasında

ikinci sırada su yer almaktadır. Temiz su eldesi için nanoteknolojik filitreler de kullanılabilir [17].

### 3.3.5. Askeri Ürünler ve Savunma

Nanoteknoloji ile üretilen bazı malzemeler daha hafif, mukavemetli ve uzun ömürlü olmaktadır. Nanoteknolojik algılama cihazları ile birçok zehirli gazlar ve radyoaktivite tespit edilebilir. Nanoteknoloji ürünler ile daha hafif koruyucu kıyafetler üretilirken bu kıyafetler hareket kabiliyetini de daha az kısıtlamaktadır. Nanoteknoloji ile yapılan askeri akıllı kıyafetler kullanacağı enerjiyi güneş veya kullanıcının hareketinden temin edebilecektir. Karanlıkta kendi kuvvetlerince fark edilebilecek ve bu sayede birçok askeri personel için birçok avantaj sağlayabilecektir [18].

### 3.3.6. Bilim ve Eğitim

Nanoteknoloji birçok disiplinin ortak alanı olabilecek bir anabilim dalıdır. Fizik, kimya, biyoloji gibi temel bilimlerle mekanik, elektronik, makine, bilgisayar mühendisliği gibi uygulamalı bilimlerin potansiyel ortak çalışma alanı olması nedeniyle yeni çağ eğitim modellerinde yer alması gereklidir [17].

## 3.4. Buzlanma

Hava sıcaklığı donma noktasının altına düştüğünde, nem yağış şekline dönüştüğü veya yoğunlaştığı durumlarda buzlanma olayı gerçekleşmektedir. "Dondurucu yağmur" olarak da bilinen atmosferdeki aşırı soğutulmuş damlacıklardan kaynaklanan atmosferik buzlanma, hem yerde hem de havada insan yapımı birçok yapı ve ekipman için yıkıcı sonuçlara neden olabilmekte ve bu da sosyoekonomik kayıplara, ölümcül kazalara neden olabilmektedir. Buzun hem metalik hem de yalıtıcı yüzeylere yüksek aderansı, havacılık, hidroelektrik, telekomünikasyon, navigasyon, elektrik dağıtım gibi sektörlerdeki ekipman ve yapıları ciddi şekilde sınırlayabilir veya tahrip edebilir [19].

Havadaki sisin yoğunlaşması ile buzlanma oluşmaktadır. Ancak buzlanma genellikle sert hava şartlarında meydana gelir. Ortam sıcaklığı, donma noktasının üstünde olsa dahi, uçak yüzeyi bu noktanın altında kalıyorsa ve ortamda nem bulunuyorsa buzlanma oluşur. Yağmur, 0°C altında bulunan uçak yüzeyine temas ettiğinde, kanatların üzerinde saydam buz tabakası oluşur. Uçağın performansında, pürüzsüz ve temiz uçak yüzeylerinin önemi çok büyüktür. Yüzeyde biriken buz, don ve kar uçağın ağırlığını artırarak, uçağın havalanması esnasında ve seyir esnasında çekme kuvvetlerinde sorunlara neden olabilmektedir [20].

Buz birikimi, uçakların hem yerde hem de troposferde bulutların arasından süzülürken aşırı soğutulmuş su damlacıklarına maruz kalmasıyla oluşan ciddi bir problemdir. Gözle fark edilmesi çok zor ince saydam bir buz tabakasının bile olması kanatların, pervanelerin, ön camların, antenlerin, havalandırma deliklerinin, girişlerin ve kaportaların işlevlerini sınırlandırabilir. Örneğin, yatay kuyruk sabitleyici üzerinde biriken buz, burnun aşağı doğru eğilimini dengeleme yeteneğini azaltır. Bu kuyruk durak adı verilen bir olguya yol açabilir [21]. Rüzgar tüneli ve uçuş testleri, bir zımpara kağıdının kalınlığında bir buz tabakasının havalanma kapasitesini yüzde 30 azaltabileceğini ve yüzde 40'a kadar sürtünmeyi artırabileceğini göstermiştir [22].

Kanatlarda ve / veya kuyrukta buz birikmesi nedeniyle kaldırma kuvveti kaybının, 12 Şubat 2009'da 50 kişiyi öldüren Colgan Air Flight 3407'nin trajik Buffalo çökmesine neden olduğuna inanılmaktadır [23]. Atmosferik buzlanmadan kaynaklanan diğer bir uçak kazası 31 Ekim 1994'teki American Eagle Flight 4184 kazasıdır. Uçağın donmuş yağmurla karşılaşması ve ardından hızlı buz birikimi olması nedeniyle pilotlar uçağın kontrolünü kaybetmiş ve Roselawn, Indiana yakınlarındaki bir soya arazisine düşmüştür [24].

### **3.4.1. Saydam Buz**

Bazı durumlarda uçakların üst yüzeyinde çok ince ve çıplak gözle fark edilmeyecek kadar ince buz tabakası oluşabilmektedir. Bu durum kanatların ön kısımlarında ve alt taraflarında da buzlanma meydana getirebilir. Bu tip buzlanmaya saydam buzlanma denir. Kanatlar nemli durumda iken, yapılan kontroller esnasında düşük ışıktaki saydam buz tespit etmek oldukça zordur. Saydam buzun, şeffaf olması nedeniyle kanat yüzeyinin detayları buzun dışından dahi görülebilir. Kanatların ön ve üst yüzeyinde oluşan saydam buz, arka bağlantılı motorları olan uçaklar için çok tehlikelidir. Uçağın havalanması veya inişe geçtiği sırada, kanatlarda oluşan esneklik nedeniyle, kanat yüzeyine yapışmış olarak bulunan buz kırılarak kanattan ayrılır. Ayrılan bu buz tabakası kırıkları motorlar tarafından emilir ve buzun büyüklüğüne bağlı hasar oluşabilir. Bu buzlanmalar yüzey pürüzlülüğüne neden olarak dolaylı bir şekilde uçağın dengesine ve aerodinamik yapıya zarar verir [25].

#### **3.4.1.1. Saydam Buz Tabakasının Oluşumunda ve Kalınlığında Rol Oynayan Faktörler**

- Bir önceki istasyonda eklenen yakıtın düşük sıcaklıkta olması veya bir önceki uzun uçuş süresinin sonunda, tankta kalan yakıtın sıcaklığının 0°C altında olması,
- Kanat tanklarındaki yakıtın soğuması ve yüzeye temas esnasında yaşanabilecek donmalar,

- Yeni sefer öncesi ilave edilen nispeten daha sıcak yakıtın düşen karı eritmesi ve bu erimiş karın tekrar donması.
- Hücüm kenarında bulunan termal buz önleyici kullanımında yağın karın yüzeye inerek erimesi ve tekrar donması [25].

### 3.4.1.2. Buzlanma Giderici İşlemler (Anti-İcing)

Uçaklarda buz, don, kar ve tam erimemiş karın temizlenmesi için yapılan işleme buzlanma giderici işlemler (anti-icing) denir. Bu işlemde sıcak hava, sıcak su veya sıcak su ile buz giderici sıvının karışımı uçağın dış yüzeyine uygulanır. İlk kademe olarak mevcut buzlanma kütlesi bertaraf edilir. Bu işlem aynı zamanda uçak üzerinde kar, don ve buz birikmesini ve yapışmasını belirli bir zaman (holdever time = koruma süresi) önlemek amacıyla yapılan işlemdir. Bu işlemde buz önleyici sıvı, su karışımı veya sadece buz önleyici sıvı uçağın yüzeyine uygulanır. Kullanılan sıvı belirli bir süre uçağı koruyacak şekilde uçak yüzeyinde kalır [26].

İki kademeli buz giderici/ buz önleyici işlem ise ayrı iki kademeden oluşur. Birinci kademe buzun çözülmesi için uygulanır. Buz giderici işlemden sonra, uçak yüzeyinde buz ve kar toplanmasını önlemek için buz önleyici sıvısı tatbik edilir. İkinci kademe birinci kademeden uygulanmasından sonra 3 dakika içinde yapılmalıdır [26].

## 3.5. Süperhidrofobiklik

Süperhidrofobik yüzeyler, aşırı su itici özellikleri ile karakterize edilir. Bu yüzeyler, örneğin, hava koşullarına dayanıklı giysiler, sürtünmeleri azaltılmış uidik sistemler, kendi kendini temizleyen pencereler, çatı kiremitleri, güneş panelleri ve [27] 2006 ve 2007 yılları arasında ortaya konan süper hidrofobik yüzeylerdeki makale sayısı bu konuya olan büyük ilgi artışını gösteren bir kanıttır. Bu, daha önce bu konuda yayınlanan toplam makale sayısının iki katından fazladır. Yunanca'da "hydro" 'su', "phobos" 'korku anlamına gelir. Hidrofobik sudan korkan, yani suyu sevmeyen anlamına gelmektedir. Süperhidrofobik ise sudan nefret eden demektir. Bu yüzeyler suyla yaptıkları temas açısına göre adlandırılırlar. Temas açısı bir katının bir sıvı tarafından ıslatılma miktarının nicel ölçümüdür. Temas açısı, 90 dereceden küçükse sıvı yüzeyi ıslatıyor, 90°den büyükse ıslatmıyor denir. Hidrofobik yapılarda ıslanmayan yüzeyin sıvı ile arasındaki açı 90°den büyüktür ve bu açı ne kadar büyür ise hidrofobiklik o kadar artacaktır [28].

### 3.5.1. Doğal Hidrofobik Yüzeyler

Doğadan süperhidrofobik yüzeylere verebilecek en bilinen örneklerden biri, nilüfer çiçeğidir. Nilüfer çiçeğinin yaprakları her zaman temizdir, üzerinde toz barındırmaz. Bu yapraklar, birbirinden 10-15  $\mu\text{m}$  uzaklıkta bulunan ve 5-10  $\mu\text{m}$  çapında olan küçük yumrucuklarla kaplı olurlar. Bunların yanı sıra bütün yüzey 1 nanometre çapındaki hidrofobik tabaka ile örtülüdür. Yüzeyde bulunan bu pürüzler "Lotus Etkisi" olarak da adlandırılmaktadır. Su damlaları yaprak yüzeyine temas ettiğinde, hem hidrofobik kaplamadan, hem de yüzey pürüzlülüğünden dolayı 170°'ye yakın bir değme açısı oluştururlar [3].

### 3.5.2. Yüzey Gerilimi ve Temas Açısı

Herhangi bir materyalin yüzeyi, yüzey atomları arasındaki kırık bağların kütlede bulunan atomlardan çok daha yüksek bir kısmından kaynaklanan aşırı bir enerji ile ilişkilidir. Bu fazla enerjiye, yüzey basıncını sabit basınç ve sıcaklıkta arttırmada birim alan için gereken iş olan yüzey gerilimi adı verilir [29]. SI birimlerinde, yüzey gerilimi birim alan başına enerji cinsinden veya birim uzunluk başına kuvvet yani  $\text{J}/\text{m}^2$  veya  $\text{N}/\text{m}$  olarak ölçülür. Belirli bir materyalin yüzey gerilimi, örneğin üreantasyon yoluyla kimyasal olarak değiştirilebilir.

Bir gaz fazında asılı olan bir damlacık, şeklini belirleyen iki kuvvete maruz bırakılır. Bunlar, yüzey alanını en aza indirecek şekilde etki eden yüzey gerilimi, ve onu güçlendirmek için etki eden yerçekimi kuvvetidir. Yerçekimi etkisi, damlacıkların boyutu, sözde kılcal uzunluktan daha küçük olduğu sürece ihmal edilebilir [30].

$$\mathcal{K}_c = \sqrt{\frac{\gamma_{LA}}{\rho g}} \quad (3.1)$$

Burada,  $\gamma_{LA}$  sıvı-hava ara yüzeyinin yüzey gerilimidir,  $\rho$  sıvı yoğunluğu ve  $g$  yerçekiminin ivmesidir. Ortam koşullarında, kılcal temiz suyun uzunluğu  $\sim 2,7$  mm'dir [31].

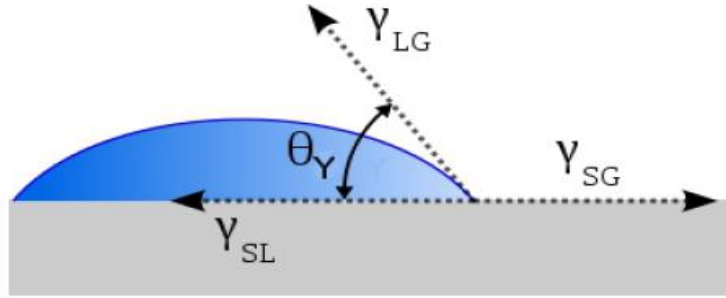
Su damlacıkları tamamen pürüzsüz ve kimyasal olarak homojen bir yüzeye temas ettiğinde, katı hava ara yüzünün bir kısmı aynı alanın katı-sıvı ara yüzüyle değiştirilir. Katı likidite sisteminin enerjisi artık Dupre denklemi tarafından verilen bir enerji ile azalmıştır [32].

$$W_{SL} = \gamma_{SA} + \gamma_{LA} - \gamma_{SL} \quad (3.2)$$

$W_{SL}$ , birim alan başına yapışma işidir ve  $\gamma_{SA}$ ,  $\gamma_{LA}$  ve  $\gamma_{SL}$ , sırasıyla, katı hava, sıvı hava ve katı-sıvı ara yüz enerjileridir. Yeni ara yüzün tanıtımı nedeniyle damlacık şekli değişir. Katı-sıvı ara yüzey enerjisinin katı-buhar ara yüzey enerjisinden daha düşük olduğu durumlarda, damlacık yüzeye kendiliğinden yayılma eğiliminde olacaktır. Eğer katı-sıvı ara yüz enerjisi, katı-buhar ara yüzey enerjisinden daha yüksek ise, diğer taraftan, spontan yayılma



gerçekleşmeyecektir. Bunun yerine, damlacık boncuklanır ve daha küresel bir şekil alır. Damlacık anahat teğetinin üç fazlı temas hattındaki yüzeyle yaptığı açı, sistemin temas açısı (CA) olarak bilinir (Şekil 1). Pürüzsüz ve kimyasal olarak homojen bir yüzeyde, bu temas açısına Young temas açısı denir, genellikle  $\theta_Y$  veya  $\theta_0$  olarak gösterilir [32].



**Şekil 1.** Temas açısı  $\theta_Y$  ve tüm yüzey gerilimleri, düz bir yüzeye dayanan bir su damlasından oluşan bir sistemdedir.

Damlacık boyutu kılcal uzunluktan daha küçük olduğunda ve hacim ve basınç sabit olduğunda, sistemin üç ara yüzünün net yüzey gerilimi en aza indirilerek  $\theta_Y$  belirlenebilir [32].

$$E_{tot} = \gamma_{LA}(A_{LA} + A_{SL}) - W_{SL}A_{SL} \quad (3.3)$$

Burada  $A_{LA}$  ve  $A_{SL}$  sırasıyla sıvı-hava ve katı-sıvı ara yüzey alanlarıdır ve kararlı haldedir.

$$dE_{tot} = \gamma_{SA}(dA_{LA} + dA_{SL}) - W_{SL}dA_{SL} = 0 \quad (3.4)$$

$dA_{LA}/dA_{SL} = \cos \theta_Y$ , geometrik ilişkisini kullanarak ve formül (3.2) ve (3.4)'ü birleştirerek, bir ve kimyasal olarak homojen bir yüzeyde temas açısı için iyi bilinen Young denklemi elde edilir [32]:

$$\cos \theta_Y = \frac{\gamma_{SA} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LA}} \quad (3.5)$$

Bu denklem bir sıvı damlacığının  $\gamma_{SA} - \gamma_{SL} \geq \gamma_{LA}$  ( $\cos \theta_Y \geq 1$ ,  $\theta = 0$ ) yüzeyinde yayılacağını,  $\gamma_{SA} = \gamma_{SL}$  ( $\cos \theta_Y = 0$ ) olduğunda  $90^\circ$  temas açısını oluşturduğunu ve  $\gamma_{SA} < \gamma_{SL}$  ( $\cos \theta_Y < 0$ ) iken  $90^\circ$ 'den yüksek bir temas açısını oluşturduğunu söylemektedir.

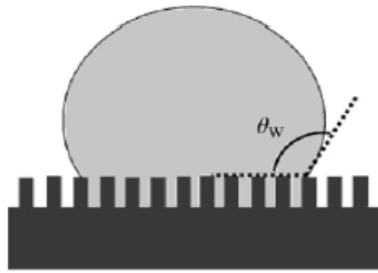
Düşük  $\gamma_{SA}$  gösteren yüzeyler genellikle az sayıda (hatta hiç) polar yüzey grubuna sahip olmaları ile karakterize edilir [33]. CA genellikle bir yüzeyin hidrofobikliğinin, yani suyun itme eğiliminin göreceli bir ölçüsü olarak kullanılır.  $0^\circ$ 'lık bir CA, yüzeyin tamamen ıslandığını belirtirken,  $180^\circ$ 'lik bir CA, ıslanmamayı tamamlar. Genel olarak,  $\gamma_{SA}$  yüzey gerilimi ne kadar düşük olursa, bir yüzeyin temas açısı  $\theta$  de o kadar yüksek olur. CA'nın  $90^\circ$ 'den büyük olduğu

yüzeyler hidrofobik olarak sınıflandırılırken, CA'nın 90'dan küçük olduğu yüzeylere hidrofilik denir. Daha da alt bölümlere ayırma: Su CA 150°' den yüksek olduğunda, yüzeyin süperhidrofobik olduğu söylenir. Bazı süperhidrofobiklik nitelikleri de, yüzeylerin düşük temas açısı histerezisine (CAH) sahip olmasını gerektirir [34].

Yüzeylerde, elde edilebilecek en yüksek su CA 115-120 (poli (tetra üoroetilen)) veya uorin sonlu organik yüzeyler için). Başka bir deyişle, tek başına yüzey kimyası süperhidrofobik yüzeyler oluşturmak için yeterli değildir. Bununla birlikte, süper-hidrofobiklik, "kendinden" hidrofobik bir malzemeyi uygun bir yüzey dokusu veya pürüzlülüğü ile birleştirerek elde edilebilir [35].

### 3.5.2.1. Wenzel Durumu

Young denklemi, yüzey pürüzlü olanla değiştirildiği zaman geçerli olmamaktadır. Bu durumda, yüzey gerilimi su damlasının ıslanabilirliğini etkileyen tek faktör olmamaktadır. Yüzey pürüzlülüğü de ıslanabilirliği etkileyen diğer faktördür. Pürüzlü bir yüzeyde, biriken su damlacığı, damlacıktaki iki farklı denge durumuna karşılık gelen iki ana konjürasyonun alternatiflerine göre değişkenlik gösterir [36]. İlk olasılık, damlacıkların katı yüzeyin konturlarına uyması, yani yüzeyin oluklarını ıslatılmasıdır. Buna, 1936'da bu modelin ilkelerini ana hatlarıyla açıklayan Robert N. Wenzel adını taşıyan Wenzel durumu denir [37]. Model, yüzey pürüzlülüğünün düzenli olarak düzenlenmiş kare sütunlardan oluştuğu Şekil 2'de iki boyutta şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 2.** Wenzel durumu bir damlacık şematik gösterimi [27].

Wenzel gerçek katı-sıvı alanının pürüzsüz yüzey veya damlacık temas yüzeyinden daha fazla olacak şekilde pürüzlü olması durumunda ıslanmanın gerçekleşmesi için net enerjinin daha az olmasının yeterli olacağını saptamıştır. Bu durumda katının daha hızlı ıslanması durumu ortaya çıkmıştır. Aynı şekilde, katı-sıvı ara yüz enerjisinin katı-hava ara yüzey enerjisinden daha yüksek olduğu yüzeyler (yani, kendinden su itici olan yüzeyler) pürüzlüken

ıslanmaları daha da zor olacaktır. Wenzel durumu bir su damlasının denge koşulu aşağıdaki denklem ile verilmiştir [37].

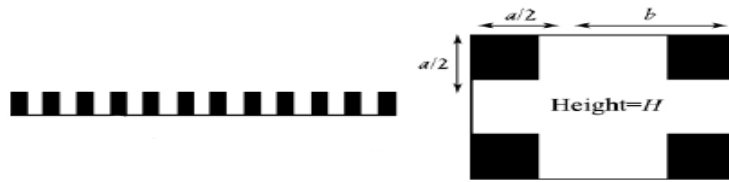
$$\cos \theta_W = R_f \cos \theta_Y \quad (3.6)$$

Burada  $\theta_W$ , Wenzel temas açısıdır,  $\theta_Y$ , aynı malzemenin bir yüzeyinde Young temas açısı ve  $R_f$ , gerçek katı-sıvı alan ( $A_{SL}$ 'nin) ve çıkıntılı yüzey alanı ( $A_f$ ) oranı ile bulunan pürüzlülük faktörü.

Her bir kenar uzunluğu  $a$  olan, üzerinde  $H$  yüksekliğinde kare sütunlar yükselen ve bu sütunlar arası uzunluğun  $b$  olduğu pürüzlü kare bir yüzey (bkz. Şekil 3.) için pürüzlülük  $R_f = 1 + (4aH)/(a + b)^2$  formülü ile bulunabilmektedir. Wenzel denklemi bu pürüzlülük değeri bulunduğundan sonra yazılabilir [38].

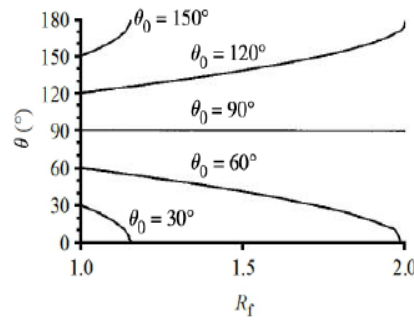
$$\cos \theta_W = \left(1 + \frac{4A}{a/H}\right) \cos \theta_Y \quad (3.7)$$

Burada  $A$  parametresi  $A = 1 / ((b/a) + 1)^2$  formülü ile bulunur.



**Şekil 3.** Bir yüzeydeki pürüzsüzlüğün üç boyutlu bir modeli [38].

Wenzel durumundaki damlacıkların, yüzeyin "içsel" davranışını artırma eğiliminde olacağı Wenzel denkleminde gelmektedir: Hidrofilik yüzeyler ( $\theta_Y < 90^\circ$ ) daha hidrofilik hale gelmekte, bu da  $CA$ 'nın azalacağı anlamına gelir; hidrofobik yüzeyler ( $\theta_Y > 90^\circ$ ), artan  $CA$  değerlerine karşılık gelecek şekilde daha hidrofobik hale gelmektedir. Yüzeydeki ( $R_f = 90^\circ$ ), Wenzel denklemi Young denklemini (3.5) vermektedir.  $CA$ 'nın pürüzlülük faktörü  $R_f$ 'ye bağımlılığı, Şekil 4'te şematik olarak gösterilmiştir.



**Şekil 4.** Wenzel'in modeline göre pürüzlülük faktörü  $R_f$ 'nin bir fonksiyonu olarak farklı Genç temas açıları  $\theta_0$  için CA değerleri. [39].

Görüldüğü gibi, artan pürüzlülük faktörü  $R_f$  ile ölçülen CA, hidrofilik yüzeyler için azalır ve hidrofobik yüzeyler için artar, bu tam olarak Wenzel modelinin öngördüğü sonucu doğrulamaktadır [39].

### 3.5.2.2. Cassie-Baxter Durumu

Pürüzlü bir yüzeydeki ikinci olasılık, damlacıkların, yüzey boşluklarının üstüne asılması ve havanın kendisinin altındaki izole oyuklarda tutulmasıdır. Bu durum, 1944 yılında teoriyi belirleyen Cassie ve Baxter'den sonra Cassie-Baxter durumu olarak bilinir. Bazen "fakir state" olarak da adlandırılır, çünkü damla Şekil 5'te gösterildiği gibi bir mikrona yatağı üzerine oturur [40].

Cassie-Baxter durumunda bir yüzeyde bir su damlası durduğunda, katı-hava bölgesi katı-sıvı bir alanla değiştirilir. Cassie ve Baxter sırasıyla  $f_1$  ve  $f_2$ 'yi sıvı-katı ve sıvı-hava fraksiyonel alanını ( $f_1 + f_2 = 1$ ) gösterir ve bu yüzeyde bir su damlasının yayılması sürecinde,  $f_1\gamma_{SA}$ , katı-hava ara biriminin yok edilmesinde kazanılırken,  $f_1\gamma_{LS}$  ve  $f_2\gamma_{LA}$  enerjileri, sırasıyla yeni katı-sıvı ve sıvı-hava ara yüzeylerinin oluşturulmasında harcanmaktadır [40]. Bu nedenle, süreçte harcanan net enerji,

$$E_{net} = f_1(\gamma_{LS} - \gamma_{SA}) + f_2\gamma_{LA} \quad (3.8)$$

denklem 1.5'i denklem 1.8'de yerine yazılarak şu denklem elde edilir;

$$E_{net} = \gamma_{LA}(f_2 - f_1 \cos \theta_Y) \quad (3.9)$$

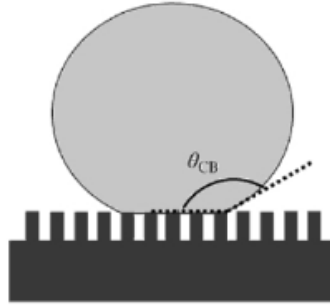
$\gamma_{LS} - \gamma_{SA}$  yeni katı sıvı arayüzünü oluşturmak için harcanan enerji  $E$  olduğundan su damlası ve yüzey arasında 3.5 deki denklem de yerine yazılabilir.

$$\cos \theta_Y = \frac{-E}{\gamma_{LA}} \quad (3.10)$$

O halde Cassie-Baxter durumunda pürüzlü bir yüzeydeki bir damlacık için formül (3.11) hali almaktadır.

$$\cos \theta_{CB} = \frac{-E_{net}}{\gamma_{LA}} = f_1 \cos \theta_Y - f_2 \quad (3.11)$$

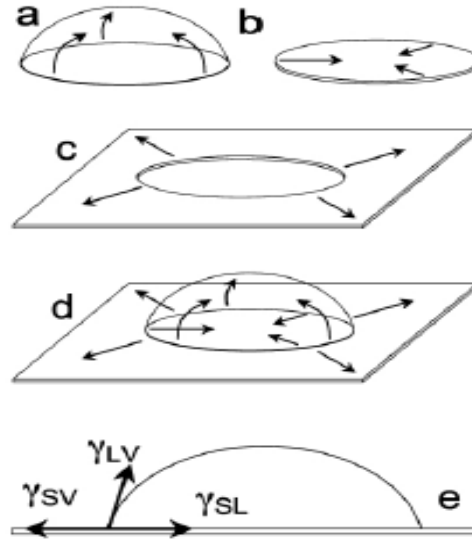
Bir su damlası, yüzey boşluklarının üstüne oturduğunda, yüzey gerilimi azalır ve bu, CA'da bir artışa yol açar. Damlacık altındaki alanın sıvı hava fraksiyonu ne kadar yüksek olursa, Cassie-Baxter modeline göre CA da o kadar yüksek olur. Bu, kendinden hidrofilik olan yüzeyler için de geçerlidir.



Şekil 5. Cassie-Baxter durumunda bir damlacık şematik gösterim [27].

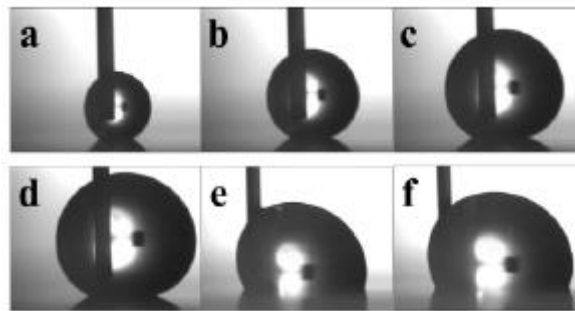
### 3.5.2.3. Wenzel ve Cassie-Baxter Modellerine İlişkin Tartışma

CA'nın belirli bir yüzeydeki davranışını tam olarak belirleyen şey hakkında bazı tartışmalar bildirilmiştir. CA geleneksel olarak, Şekil 6'da gösterildiği gibi sıvı-hava, katı-sıvı ve katı-hava ara yüzey gerilimlerinin dengesinin bir sonucu olarak açıklanmaktadır.



**Şekil 6.** Dengeye ulaşmış üç fazlı bir sistemin sıvı-buhar (a), katı-sıvı (b) ve katı-buhar (c) ara yüz gerilimleri gösterilmektedir. Balansları (d) 'de gösterilmiştir ve temas açısı  $\gamma_{LV} - \gamma_{SL}$  (e) arasındaki açıdır.

Katı-sıvı temas alanı ıslanmayı etkileyen ana faktördür. Wenzel ve Cassie ve Baxter'e göre teoriler, sistemin üç ara yüz enerjisinden biri veya daha fazlası değişirse CA'nın değişeceğini öne sürüyor. Gao ve McCarthy [41] durumun böyle olmadığını ve ıslatma davranışını belirleyen önemli faktörün aslında üç faz (katı-sıvı-buhar) temas hattındaki katı-sıvı etkileşimi olduğunu göstermek için basit bir deney yapmıştır. Bunu kanıtlamak için, daha yumuşak, pürüzlü veya çevre alandan kimyasal olarak farklı lekeler içeren yüzeyler üretmişlerdir. Bir şırınga yardımı ile süperhidrofobik alanda ve süperhidrofobik alandan normal zeminli alana su damlasını sürükleyerek gözlemlemişlerdir.



**Şekil 7.** Süperhidrofobik bir noktadan pürüzsüz bir alan üzerine genişleyen bir su damlasını gösteren video kaset çerçeveleri. [41].

Günümüzde uçak kanatlarının hücum kısımlarında alüminyum alaşımları kullanılmaktadır ve uçağın bu kısımları yukarıda bahsedildiği üzere buzlanma sorunu ile karşı karşıya kalmaktadır. Süperhidrofobik yüzey tasarımı bu sorunu önlemek için yapılmıştır.

### 3.6. Alüminyum

Çin'in 3. yüzyılında askeri lider olan Chou Chu'nun mezarında bulunan bir metal süslemenin analizinde bu süs malzemesinin % 85' alüminyum olduğu ortaya çıkmıştır. Nasıl üretildiği hala açıklanamamaktadır. 1700'lerin sonunda, alüminyum oksidin bir metal içerdiği biliniyordu, ancak onu çıkarmak için yapılan tüm girişimler sonuçsuz kalmaktaydı. Humphry Davy, alüminyum eldesi için sodyum ve potasyumda elektrik akımı kullanmıştı, ancak yöntemi işe yaramamıştır. Üreten ilk kişi 1825 yılında Danimarka'nın Kopenhag kentindeki Hans Christian Oersted'di ve alüminyum klorürü potasyumla ısıtarak yapmıştır fakat yine de, örneği saf olmamıştır. Alman kimyager Friedrich Wöhler'e yöntemi 1827'de mükemmelleştirmek ve potasyum yerine alüminyum klorürü sodyum kullanarak ilk kez saf alüminyum elde etmiştir [42].

Günümüzde endüstrinin bir çok kolunda kullanılmakta ve dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Hafiflik ve yüksek dayanım özellikleri gerektiren otomotiv, havacılık ve savunma sanayisinde çok fazla kullanım alanına sahiptir. Estetiğin ön planda olduğu inşaat ve mobilya sanayisinde de geniş kullanım alanı bulur [42].

#### 3.6.1. Allüminyumun Temel Özellikleri

- Atom Numarası: 13
- Element Serisi: Metaller
- Grup, Periyot, Blok: 13, 3, p
- Atom Ağırlığı: 26,9815386(8) g/mol
- Elektron Dizilimi: Ne 3s<sup>2</sup> 3p<sup>1</sup>
- Enerji Seviyesi Başına Elektronlar: 2, 8, 3
- Yoğunluk: 2,70 g/cm<sup>3</sup>
- Sıvı Haldeki Yoğunluğu: 2,375 g/cm<sup>3</sup>
- Ergime Noktası: 933,47 °K (660,32 °C)
- Kaynama Noktası: 2792 °K (2519 °C)
- Ergime Isısı: 10,71 kJ/mol
- Buharlaşma Isısı: 294,0 kJ/mol
- Isı Kapasitesi: 24,2 J/(mol•K)
- Elektrik Direnci: 26,50 nΩ•m (20°C'de)
- Isıl İletkenlik: 237 W/(m•K)
- Isıl Genleşme: 23,1 µm/(m•K) (25°C'de)
- Ses Hızı: 5000 m/s (20 °C'de)
- Mohs Sertliği: 2,75
- Vickers Sertliği: 167 MPa
- Brinell Sertliği: 245 MPa

**Tablo 1.** Alüminyumun mekanik özellikleri

Temper - -	Akma Mukavemeti (MPa) min-max	Çekme Mukavemeti (MPa) min-max	Uzama (%50) min-max	Sertlik (brinell) min-max
0	75	185	20	55
T3	340	475	18	120
T6	230-300	310-395	10-12	110
T8	275-215	370-420	10-12	115

Günümüzde çoğu uçak tipinde kullanılır. Çünkü hafif ve güçlüdür. Alüminyum alaşımları çelik kadar kolay aşındırmaz. Ancak, kuvvetlerini yüksek sıcaklıklarda kayb ettikleri için, ses hızından daha hızlı uçan uçaklarda çok sıcak hale gelen gövde yüzeylerinde kullanılamazlar. Havacılık mühendisliğinde kullanılan, farklı alüminyum türü vardır: *Alüminyum 2024-3003-5052-6061-7075* [42].

Havacılık sektöründe en yaygın ve geniş kullanım alanına sahip alüminyum türüdür. 2024: Al-Cu Alaşımları: Esas alaşım elementi bakırdır. Başta magnezyum olmak üzere diğer alaşım elementleri de bulunabilir, yüksek mukavemet istenen havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [42].

### 3.7. Sonlu Elemanlar Yöntemi

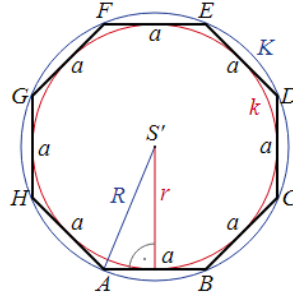
#### 3.7.1. Genel Tanımlama

Finite Element Method (FEM) yani sonlu elemanlar yöntemi, matematiksel yöntemler ile çözülmesi zor ya da imkansız olan problemlerin çözümü için kullanılan sayısal temelli bir yöntemdir. 1956 yılında ilk olarak Turner, Clough, Martin ve Top tarafından uçak gövdelerindeki gerilmeleri hesaplayabilmek için kullanılmıştır, günümüzde ise birçok mühendislik problemine uygulanmıştır [43].

FEM karmaşık bir problemi küçük alt problemlere ayırarak daha kolay bir şekilde çözüm yapmamızı sağlayan bir yöntemdir. Bu alt problemler, "sonlu eleman" adı verilen basit, birbirine bağlı küçük modellerdir [43].

Günümüzde FEM olarak bilinen çözüm yönteminin arkasında bulunan temel fikirler yüzyıllar öncesinde bilim adamları çemberin çevre uzunluğunu bulmak için çemberin etrafından poligonlar çizerek çokgenler oluşturması ve köşe sayısı artırılan poligon ile çemberin gerçek çevresini ve alanını daha doğru hesaplanabilmesi ile oluşturulur [43].

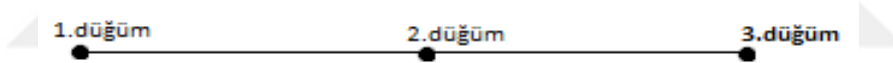




**Şekil 8.** Daire çevresinin FEM ile bulunması.

### 3.7.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi Eleman Tipleri

Çözümleme yapılacak bir parçada olabildiğince gerçek veya gerçeğe en yakın sonuçları alabilmek için en uygun şekilde sonlu elemanlara bölünmelidir. Bu işlemde sürekli ortamın boyutuna ve parçanın geometrisine uygun elemanın şekli seçilmelidir. Bu elemanlar bir, iki veya üç boyutlu olabilirler. Genelde, sonlu elemanın sınırları düzgün olarak seçilebilir ya da, bazı durumlarda eğri sınırlı elemanlarında kullanılması gerekebilir. Ortam geometrisi, yükleri, malzeme özellikleri ve yer değişimleri bir bağımsız uzay koordinatı şeklinde ifade edilebiliyorsa, Şekil 9' da gösterilen verilen bir boyutlu sonlu elemanlar tercih edilir [44].



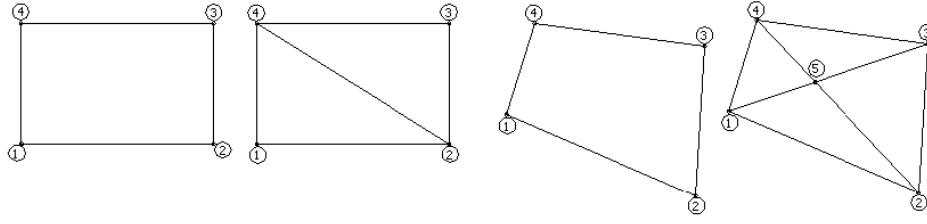
**Şekil 9.** Bir boyutlu bir sonlu eleman.

Bunun yanında iki boyutlu sonlu elemanlar tipleri de ortam geometrisine göre tercih edilebilir.



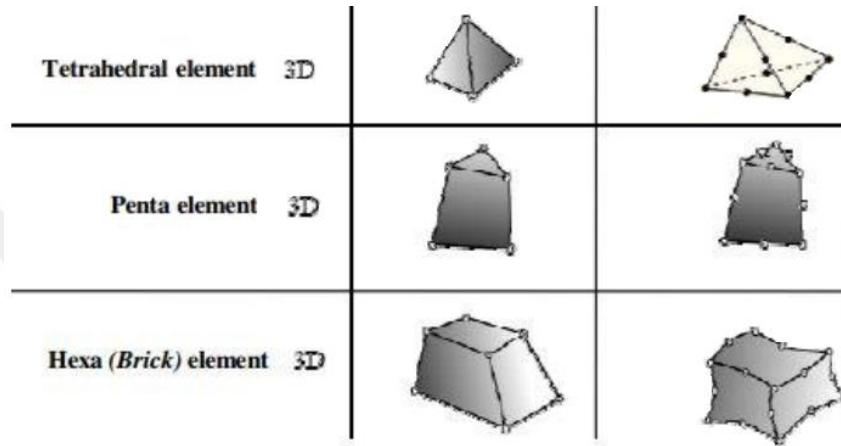
**Şekil 10.** Şekilde iki boyutlu dikdörtgen, iki üçgenli dikdörtgen, dörtgen elemanı ve dört üçgenli dörtgen elemanı tipi sonlu elemanlar da kullanılmaktadır.

Şekil 11'de bahsi geçen iki boyutlu dörtgen sonlu eleman tiplerine örnekler sırasıyla gösterilmiştir.



**Şekil 11.** İki boyutlu değişik dörtgen geometri biçimli sonlu elemanlar.

İki boyutlu elemanların yanı sıra üç boyutlu karesel ve üçgenel elemanlarda bulunur.



**Şekil 12.** Üç boyutlu karesel ve üçgenel elemanlar.

### 3.7.3. Sonlu Elemanlar Metodunun Formülasyonu

“Yönetici denklemler” (governing equations) mühendislik problemlerinde, problemin temelinde yer alan, onun matematiksel alt yapısını oluşturan denklemlerdir ve problemin mevcut durum için uygulanan şartlarını belirten sınır koşullarından (boundary condition) oluşur.

$$L(\emptyset) + f = 0 \quad \text{Yönetici Denklemler} \quad (3.12)$$

$$B(\emptyset) + g = 0 \quad \text{Sınır Koşulları} \quad (3.13)$$

Bu iki denklemden çıkarım olarak 1.14 denklemini yazılabilir.

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (3.14)$$

(1.14) denklemini her sonlu eleman için tekrar yazılarak matematiksel denklemler elde edilir. Bu denklemler içerisinde gerilme analizleri için,

[K]: Stiffness (Katılık) matrisi

{u}: Yer değiştirme vektörü

{F}: Kuvvet vektörü adını alır.

$\{u\} = [K]^{-1}\{F\}$  (3.15) yaklaşımı ile de bilinmeyen vektör bulunabilir.

Değişik mühendislik problemleri için K, u ve F için özelleştirmeler Tablo 2'de gösterildiği gibidir [45].

**Tablo 2.** Genel mühendislik problemleri için değişkenler

Problem	Özellik [K]	Davranış {u}	Yük {F}
Elastik	Katılık	Yer değiştirme	Kuvvet
Termal	İletkenlik	Sıcaklık	Isı kaynağı
Akışkan	Viskozite	Hız	Bünye kuvveti
Elektrostatik	Dielektrik geçirgenliği	Elektrik potansiyeli	Elektrik yükü

### 3.8. CAD (Computer Aided Desing) programları

CAD programları (Bilgisayar Destekli Tasarım) adını da aldığı üzere bilgisayar üzerinden bize modelleme imkanı sağlayan özel yazılımlı programlardır. Bu programlar günümüzde mühendislik, mimarlık ve birçok tasarlama alanında çalışan sektörlerde yaygın olarak kullanılır. CAD programları daha önce de bahsettiğimiz FEM (Sonlu Elemanlar Metodu)'u baz alarak birçok formülü işler ve görsel bir ara yüz ile bize sunar. Genel olarak modelleme bir amaç doğrultusunda yapılır ve bu kısım gündelik hayatta mevcut olan durumu sanal ortama taşımamanın ilk adımıdır. Sonraki adımlarda sektörün gereklilikleri doğrultusunda adımlar atılır. Elde edilen sonuçlar ise henüz pratiğe geçmemiş olan projeler için fikirler sunar. Birçok paket CAD programlarında ilerlemeler ve adımlar kısmen farklılık gösterse de genel olarak birbirine çok yakındır. Basit iki boyutlu çizimden karmaşık yapılara, bunların birleştirilmesinden, analiz yapılmasına ve simülasyonuna doğru ilerlen adımları takip eder [46, 47].

#### 3.8.1. CAD Kullanım Alanları

- CAD kullanarak ölçülü ve vektör tabanlı üç boyutlu çizimler yapılabilir.
- Yapılan çalışmaları pek çok farklı program uzantıları ile kaydedip işlemlere oradan devam edilebilir.
- Yapılan çizimler üzerinden teknik veriler alınabilir.
- Montaj modülleri sayesinde ayrı ayrı yapılan çalışmaları bir araya toplayabilir birlikte çalışılabilir.
- Yapılan parçalar üzerinde darbe, statik vb. testler yapılabilir çok ayrıntılı sonuçlara ulaşılabilir.
- Çalışmalar animasyon eklentisi sayesinde hareketlendirilebilir [46,47].

### 3.8.2. Programın genel içeriği

- *Sketcher (Taslak Oluşturma)*
  - a) Profil çizimleri.
  - b) Profillere uygulanacak işlemler.
- *Part Design (Parça Tasarımı)*
  - a) Görüntü ayarlamaları
  - b) Sketch tabanlı uygulamalar
  - c) Katı modelleme
  - d) Katı modelin translation ile koordinatların değiştirilmesi
  - e) Sac metal şekillendirilmesi
  - f) Yüzey oluşturma işlemleri
  - g) Yüzey tabanlı katı oluşturma
  - h) Parçaların imali için gerekli olan kalıplamanın uygulanması
- *Assembly Design (Montaj Tasarımı)*
  - a) Parçaların montajlanması
  - b) Kısıtlamaların oluşturulması
  - c) Mekanizmaların hareketi
  - d) Mekanizmalarda hareket engelleyiciler
  - e) Mekanizmalarda bağımlı hareketler
  - f) Montajlara Toolbox yardımı ile parça çağırımı
  - g) Smart Mate ile hızlı parça ekleme
- *Drafting (Hazırlık)*
  - a) Teknik resimlerin çıkarılması
  - b) Görüntü oluşturma
  - c) Ölçümlendirme
  - d) Montaj numaralarının girilmesi
  - e) Şekil ve ölçüsel toleranslar
- *Analiz*
  - a) Cosmos Works ile basit bir parçanın lineer gerilme analizi
  - b) Cosmos Works ile basit bir parçanın termal analizi
  - c) Burkulma analizi
  - d) Optimizasyon testler
  - e) Tasarlanan bir parçanın her türlü sınır şartları altında test etmesi [47].

### 3.9. Akışkanlar Mekaniğinin Temel Diferansiyel Denklemleri

Bir harekete ait diferansiyel denklemi çözmek zor olmakla beraber matematiksel özellikleri hakkındaki bilgi birikimimiz de oldukça kısıtlıdır. Ancak bu konuda bazı alternatif yollar düşünülebilir. Bunlar öncelikle bazı kabullenmeler yapmayı gerektirir. Daimi akış ve sıkıştırılamaz akış kabulleri yapılırsa önemli sayıda yararlı çözümler elde edilebilir. Son olarak büyük bir basitleştirme sürtünmesiz akış kabulüdür. Yapılan kabuller Bernoulli denklemini geçerli kılar ve çok çeşitli idealleştirilmiş ya da ideal akışkan, muhtemel çözümleri sağlar [48].

#### 3.9.1. Kütle Korunumunun Diferansiyel Denklemi

Temel diferansiyel denklemler ya kontrol hacmi ve yahut elemansal sistem üzerinden türetilebilir. Kütle korunumunun diferansiyel denklemi şöyle ifade edilir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (3.16)$$

Sonsuz küçük kontrol hacimleri için kütle korunumu, yoğunluk ve hızın sürekli fonksiyon olarak tanımlanmasının yanı sıra başka bir kabul gerektirmediğinden genellikle süreklilik denklemi olarak isimlendirilir. Yani akış daimi de olsa veya daimi olmasa da, sürtünmeli de sürtünmesiz de, sıkıştırılabilir ya da sıkıştırılamaz da olabilir. Süreklilik bağıntısı kısa biçimde şöyle gösterilir;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad (3.17)$$

şeklinde gösterilmektedir. Vektörel gösterilen bu denklem mümkün olduğunca basit ve sadeleştirilmiştir ama kartezyen koordinat sisteminden diğer koordinat sistemlerine oldukça kolayca dönüştürülme imkanı vardır.

#### 3.9.2. Momentumun Korunumunun Diferansiyel Denklemi

Sonsuz küçük bir eleman için akışkanlar mekaniğinde temel diferansiyel momentum denklemi şöyle ifade edilir:

$$f - \nabla_p + \nabla_{\tau_{ij}} = \rho \frac{dV}{dt} \quad (3.18)$$

Gösterilen f birim hacme gelen kütle kuvvetleridir ve  $\frac{dV}{dt}$ 'nin genişletilmiş hali formül (3.19)'te gösterilmiştir:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + u \frac{\partial V}{\partial x} + v \frac{\partial V}{\partial y} + w \frac{\partial V}{\partial z} \quad (3.19)$$

(1.18) denklemi formülün sadeleştirilmiş halidir. Momentum denkleminin sadeleştirilmeden önceki temel hali aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial r_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial r_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial r_{xz}}{\partial z} + f_x \quad (3.20)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial r_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial r_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial r_{yz}}{\partial z} + f_y \quad (3.21)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial r_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial r_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial r_{zz}}{\partial z} + f_z \quad (3.22)$$

Formül 1.20, 1.21, 1.22'deki gösterimler momentum denklemleri herhangi bir akışkanın genel hareketi için kullanılmaktadır.

Ayrıca özel akışkanlar, özel viskoz gerilme terimleri ile yeniden düzenlenebilirler.

### 3.9.3. Navier-Stokes Denklemleri

Bir momentum denklemindeki gerilme matris denklem tensörü gösterimi;

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

gösterildiği yazılabilir. Burada viskoz gerilme tensörü  $\tau_{ij}$  hız alanı ve viskozite gibi ölçülebilir akışkan özellikleri cinsinden yazılmak istenirse şöyle formülize edilebilir;

$$\tau_{ij} = \begin{bmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) & \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} & \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \\ \mu \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) & \mu \left( \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) & 2\mu \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Bu denklemleri momentumun korunumu denkleminde yerine yazılıp düzenlenirse sabit viskoziteli sıkıştırılmaz bir akış için Navier-Stokes denklemi elde edilir.

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\vec{\nabla}P + \rho\vec{g} + \mu\nabla^2\vec{V} \quad (3.25)$$

Navier-Stokes denkleminin kartezyen koordinatlarda genişletilmiş hali aşağıdaki gibidir:

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] \quad (3.26)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] \quad (3.27)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \quad (3.28)$$

### 3.9.4. Herhangi Bir Büyüklüğün Adveksiyon-Difüzyon Denklemi

Herhangi bir akış probleminde adveksiyonun yanında difüzyon da gerçekleşir. Sıkıştırılmaz akışlar için herhangi bir büyüklüğün integral yapıda adveksiyon-difüzyon'u birleştirip ortak çözen denklem,

$$\frac{d}{dt} \int \phi dV + \int \phi (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA = \int \Gamma \nabla^2 \phi \cdot \vec{n} dA + \int Q dV \quad (3.29)$$

şeklinindedir.

### 3.9.5. Akışkanlar Mekanizmasının Temel Denklemlerinin Kapalı Formu

Akışkan hareketinin kapalı formülü (3.30)'da gösterildiği gibidir.

Kütlenin korunumunun diferansiyel denklemi:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (3.30)$$

x, y, z eksenleri için momentumun korunum denklemleri:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{V}) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad} u) + S_{Mx} \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{V}) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad} v) + S_{My} \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{V}) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad} w) + S_{Mz} \quad (3.33)$$

Momentumun ve kütlenin korunum denklemleri genel olarak formül (3.34)'deki gibi ifade edilebilirler:

$$\frac{\partial(\rho \phi)}{\partial t} + \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_{\phi} \quad (3.34)$$

Bu denklem  $\phi$  değişkeni için değişim denklemidir. Denklemdaki  $\phi$  yerine 1, u, v, w,  $\Gamma$  uygun difüzyon katsayıları yazılarak çözüm yapılır. Sonlu hacimler yöntemi için önemli bir adım (3.34) denkleminin kontrol hacmi üzerinde entegrasyonudur.

$$\int \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int \text{div}(\rho\phi\vec{V}) dV = \int \text{div}(\Gamma \text{grad}\phi) dV + \int S_\phi dV \quad (3.35)$$

Sol taraftaki terim net taşınım akışını, sağ taraftaki terimler ise net difüzyon akışını ve hacimdeki kaynağı gösterir.



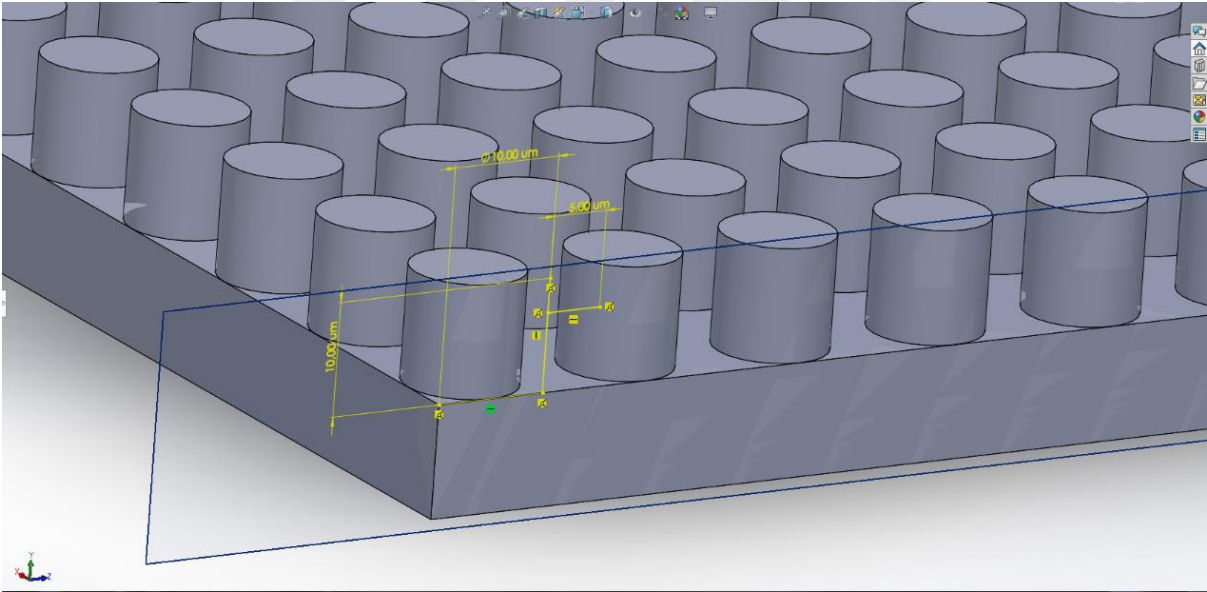


## 4. BULGULAR

### 4.1. Süperhidrofobik Yüzey Geometrisi Tasarımı

FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemini) kullanan SolidWorks'ü kısaca “üç boyutlu katı modelleme yapmamızı sağlayan CAD (Computer Aided Design) programdır” şeklinde tanımlayabiliriz. Özellikle sürekli 3 boyutlu çizim yapmayı gerektiren ve katı modellemenin sıkça kullanıldığı alanlarda, SolidWorks, AutoCad vb. gibi daha çok iki boyutlu tasarım ihtiyacını karşılamaya yönelik olarak yapılmış olan programlardan farklı olarak, çizimi render, hide veya shade etmemize gerek kalmadan doğrudan katı model olarak parçayı çizmemize ve üzerindeki modifikasyonları bizzat görerek yapmamıza olanak verir.

Bu çalışmada parça modellememiz Solidworks programında çizildi. Bu tarz mühendislik programları ölçütleri temel olarak metrik ölçekte ayarlıdır. Nanometre ve mikrometre skalada çalışmak için önce ölçek ayarlamaları yapıldı. Kenar uzunlukları 555 mikron ve yüksekliği 10 mikron olan bir taban üzerine mikron boyutunda silindir çıkıntılar döşendi. Ölçütler aşağıdaki şekilde gösterildiği gibi ayarlanmıştır.



**Şekil 13.** Solidworks ile süperhidrofobik yüzey geometri tasarımı

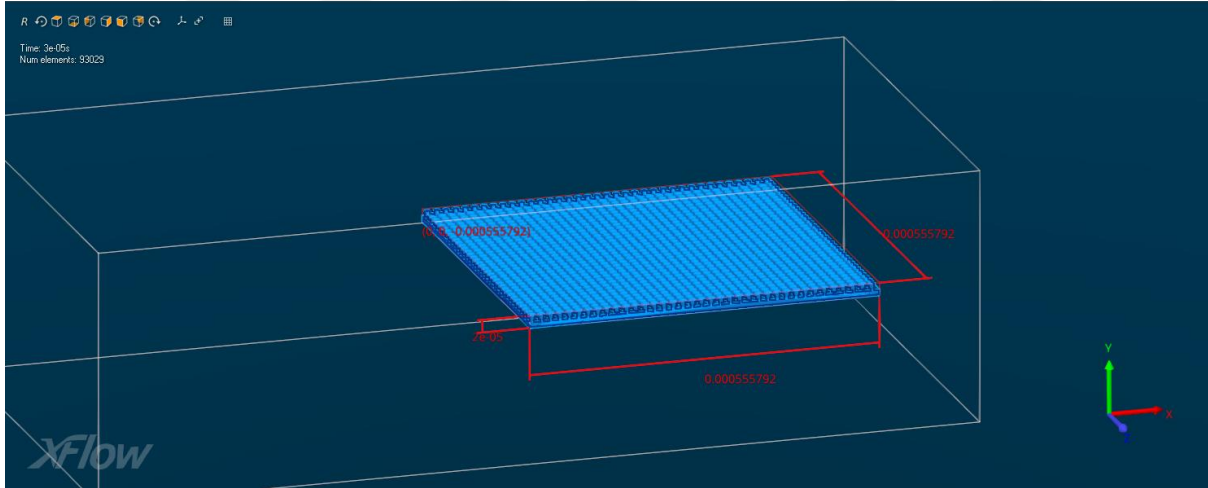
Her silindirin çapı ve yüksekliği 10 mikron olarak çizilmiştir. Silindirler arasındaki mesafe 5 mikron olarak hidrofobik yüzey özelliği göstermesi adına ölçülendirilmiştir. Malzeme olarak daha önce yukarıda belirtilen günümüz yolcu uçaklarının büyük bir çoğunluğunun kanat hücum kısımlarında kullanılan daha önce gerekli fiziki, kimyasal ve mekaniksel özelliklerini verdiğimiz alüminyumun bakır ile alaşımında oluşan 2000 serisinin 2024 isimli alaşımı

kullanılmıştır. Birçok metal ve ametal malzemelerin fiziki kimyasal ve mekaniksel özelliği program içerisindeki kütüphanede hazır olarak alınabilir ama farklı bir malzeme yapısında çalışılmak istenirse program akma mukavemeti, moleküler yoğunluk, elektrik iletim katsayısı vb. dataları sizin girmenizi isteyerek tanımlayabilmektedir.

#### 4.2. Süperhidrofobik Yüzey Geometrisi Analizi

XFlow, SIMULIA'nın Akışkanlar Simülasyon portföyünün bir parçası olarak yüksek kalitede Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) uygulamaları için Navier stokes denklemleri gibi birçok akış içeren formülleri işleyen ve gerçek hareketli geometriler, karmaşık çok fazlı akışlar, serbest yüzey akışları ve sıvı-yapı etkileşimleri içeren yüksek frekanslı simülasyonlar hazırlayan karmaşık bir akışkan analiz programıdır.

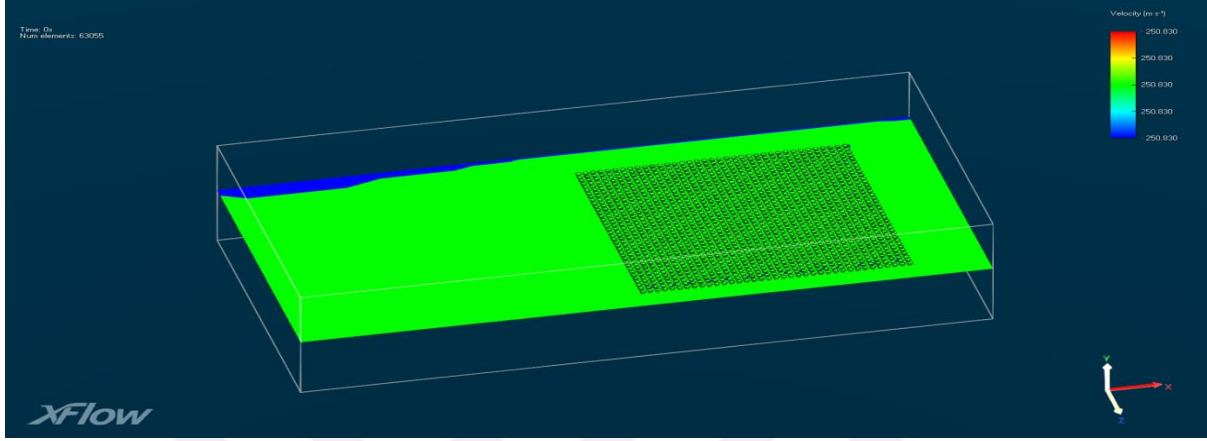
Solidworks'de yaptığımız modellemeyi analiz yapmak için Simulia XFlow'a taşıırken (.stp) dosya uzantısı ile taşıdık. Bu tarz mühendislik programlarında bir paket programdan diğerine projeyi taşıırken dikkat etmeniz gereken hususlardan biri ise budur "uygun dosya uzantısı". Uygun dosya uzantısı bir programdan diğerine geçilirken mevcut datalarınızın da sağlıklı bir şekilde geçmesini sağlar. Öncelikle XFlow'a daha önce Solidworks yardımı ile modellediğimiz ve özelliklerini atanılan geometriyi ve malzeme türünü tanıttı.



**Şekil 14.** Solidworks ile çizilmiş yüzey geometrisinin XFlow'a aktarımı.

Geometri, ölçülendirme ve malzeme özellikleri güncelledikten sonra ortam parametreleri girildi. Sanal rüzgar tüneli (virtual wind tunnel) olarak kontrol hacminin ebatları ve konumu ayarlandı. Giriş-Çıkış duvarları belirlenerek, yer çekimi ivmesi  $9,81 \text{ m/s}^2$  girildi. Tünel içerisindeki rüzgar hızı Boeing marka uçak firmasının 787 dreamliner yolcu uçağının seyir hızı örnek alınıp birim m/s çevirimi yapıldıktan sonra  $250,83 \text{ m/s}$  olarak girilmiştir. (Boeing.com.tr)

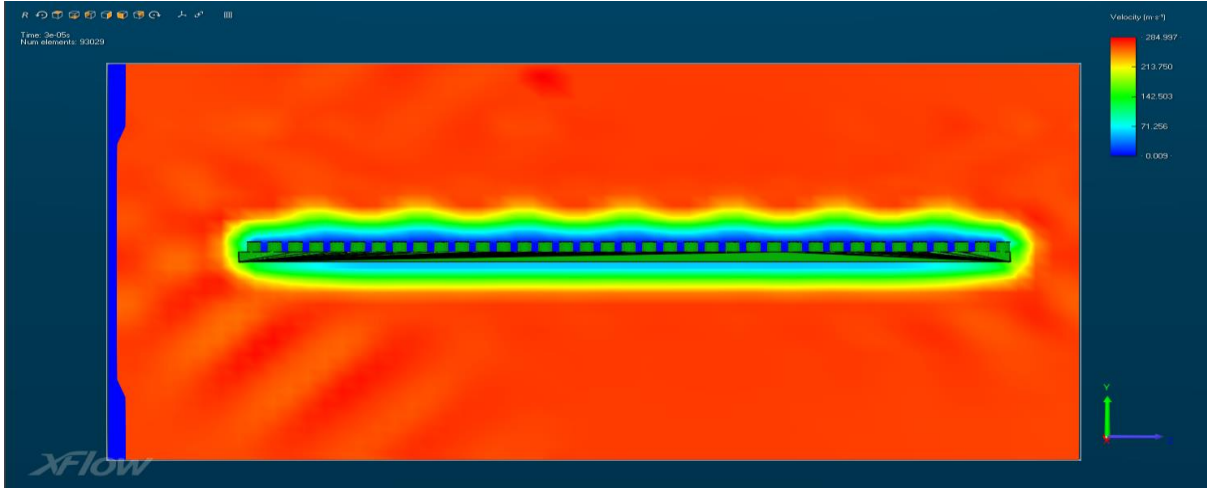
Malzeme girdileri Solidworks programından Al2024 alaşımı olarak girildiğinden halihazırda senkronize olmuştur. Rüzgar analizi yapmak için gereken programal düzenlemeler yapıldıktan sonra CRP programı daha önce bahsettiğimiz formülleri işleyerek sonuçları görsel bir arayüz ile hazırlamış bulunmaktadır.



Şekil 15. Yüzey geometrisinin analiz görüntülemesi

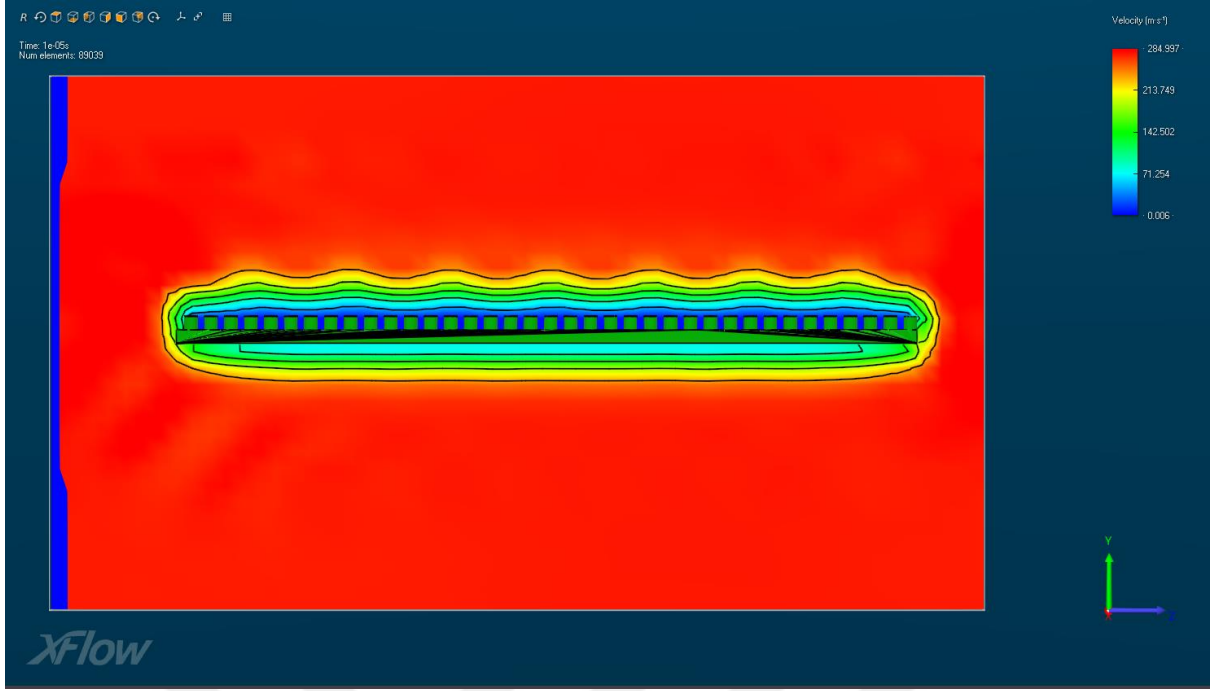
Simüle etmeden zamana bağlı görseller her saniye için bir görüntü oluşturulacak şekilde hazırlandı. İlk görüntü sağ üst kısımda renk skalası ile anlık parametre büyüklüklerini gösterecek şekilde hazırlandı.

X ekseninden kesit görüntüleri:



Şekil 16. X eksen Hız (Velocity) skalası

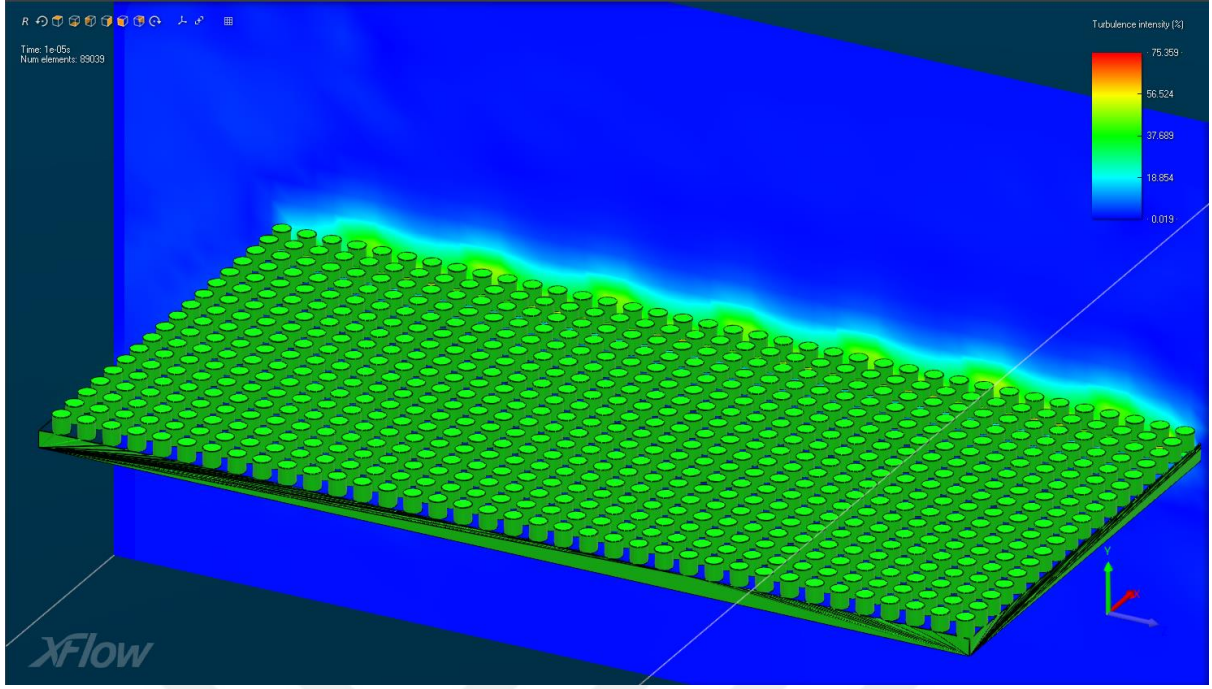
Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. (Mavi: 0.009 m/s-Kırmızı: 284.997 m/s) Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.



**Şekil 17.** X eksenli izohips hatlı Hız (Velocity) skalası

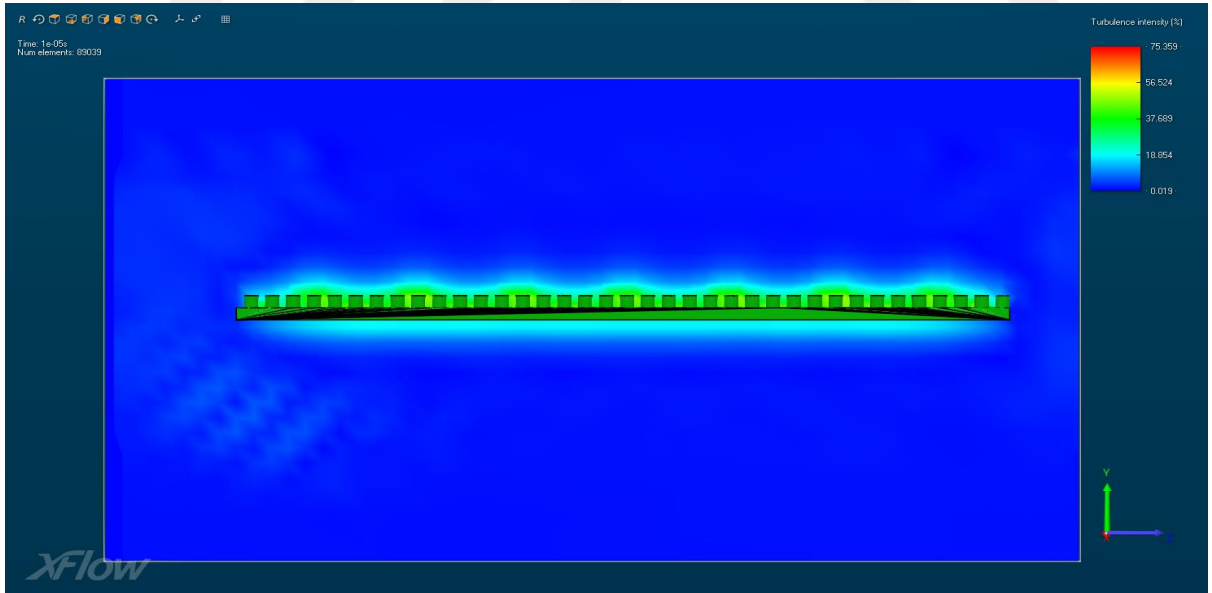
Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. İzohips hatları ile hız katmanları belirlenmiştir. (Mavi: 0.009 m/s-Kırmızı: 284.997 m/s) Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.

Parçanın alt kısmının pürüzsüz olması ve üst kısmının süperhidrofobik özellik gösterebilecek şekilde pürüzlü tasarlanması bu iki farklı durumun bir birini kıyaslamasına imkan sağlıyor. Şekilde görüldüğü gibi pürüzsüz alt kısımda hız değerleri yüzeye en yakın kısımda 71.254 m/s iken üstteki süperhidrofobik yüzeyde ise 0.006 m/s gibi küçük bir hız dolaylarındadır.



**Şekil 18.** X eksenli türbülans yoğunluğu 3D skalası

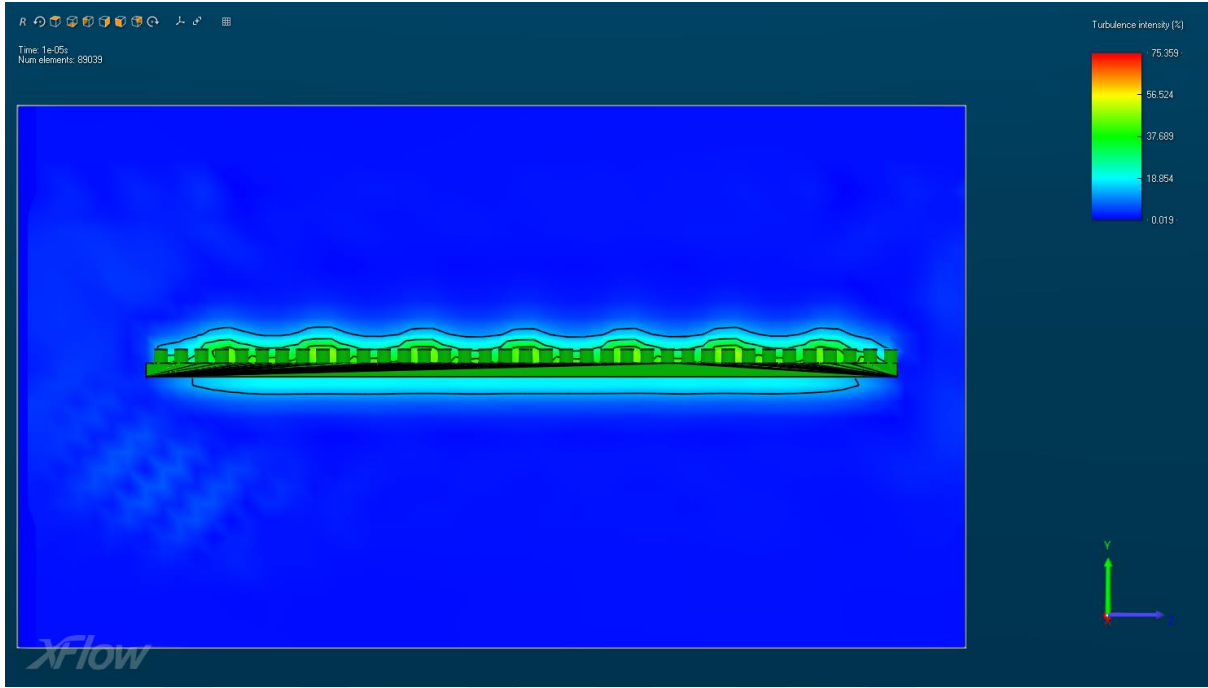
Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. (Mavi: %0.0019 - Kırmızı: %75.359) Renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir.



**Şekil 19.** X eksenli türbülans yoğunluğu skalası

Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. (Mavi: %0.0019 - Kırmızı: %75.359) Renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir.

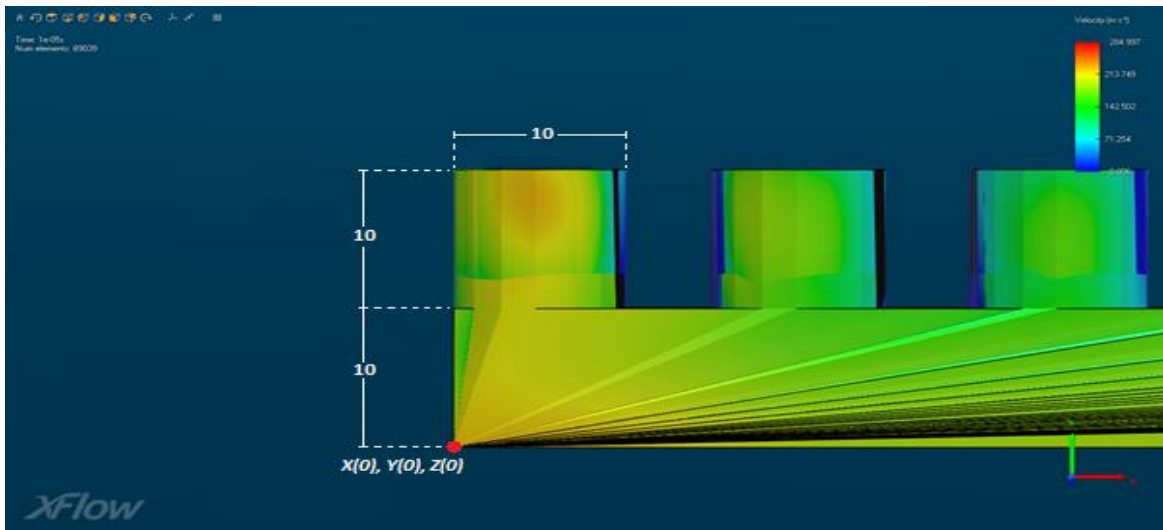




**Şekil 20.** X eksenli izohips hatlı türbülans yoğunluğu skalası

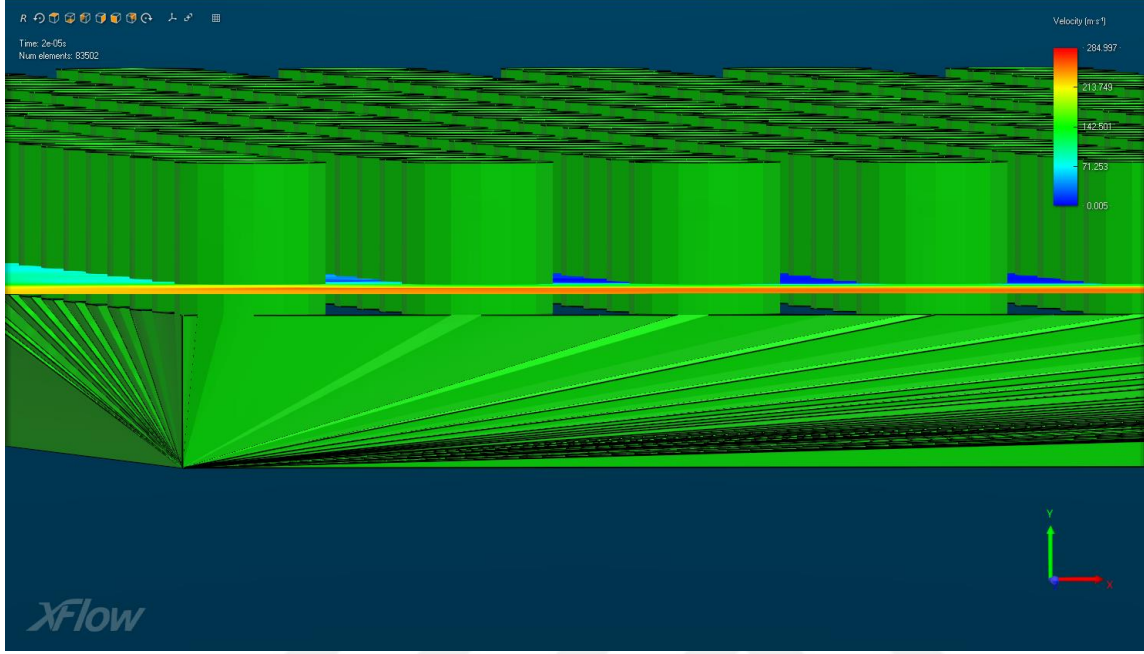
Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. (Mavi: %0.0019 - Kırmızı: %75.359). izohips hatları ile türbülans yoğunluk katmanları verilmiştir. Renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir.

Türbülans (havadaki boşluk) yoğunluk parçamızın alt kısmında %18.854 civarında iken üst yani süperhidrofobik kısımda %37.689'dan fazla ve dolaylarındadır. Burdan elde edeceğimiz çıkarım da üst süperhidrofobik yüzeyimizde parça ve hava arasında bir boşluk filmi mevcuttur. Y ekseninde kesit görüntüleri:



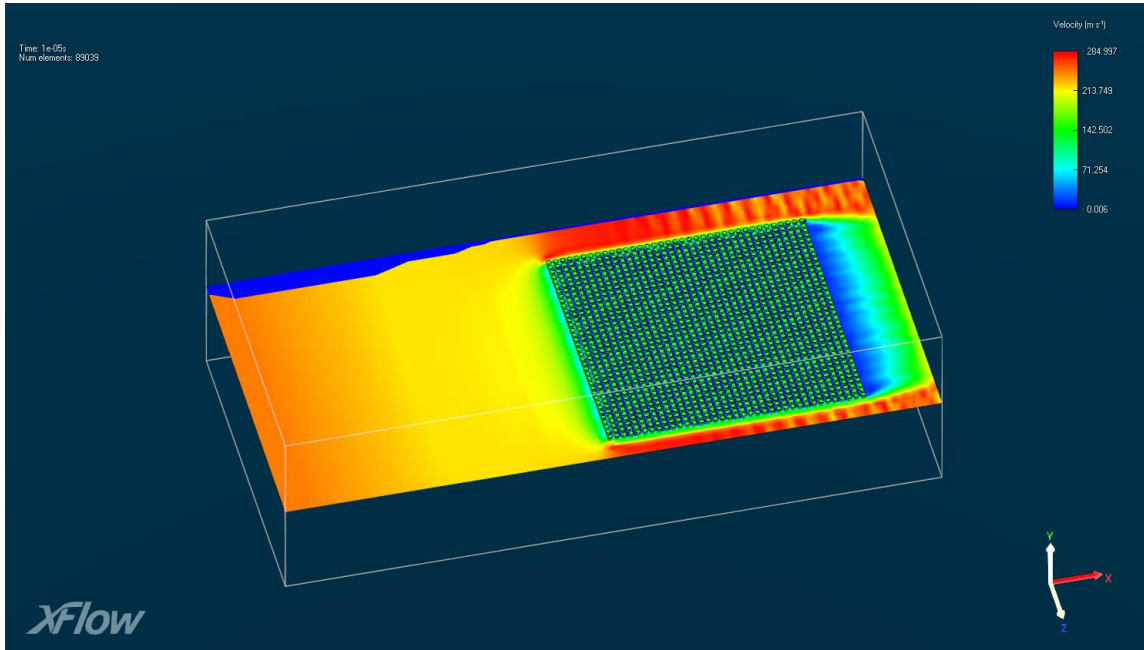
**Şekil 21.** Y eksenli koordinat ve ölçülendirme gösterimi

Şekil 21’de kırmızı nokta ile ifade edilen yer koordinat sisteminin orijini ve X,Y,Z eksenlerinin de başlangıç noktasıdır. Gösterildiği gibi zemin kalınlığı, sütun yüksekliği ve sütun çapı  $10\mu\text{m}$ ’dir. Sütunlar arası boşluk daha önce Şekil 13’te gösterildiği üzere  $5\mu\text{m}$ ’dir.



Şekil 22. Y eksenli kesit yüzeyi 3D gösterimi

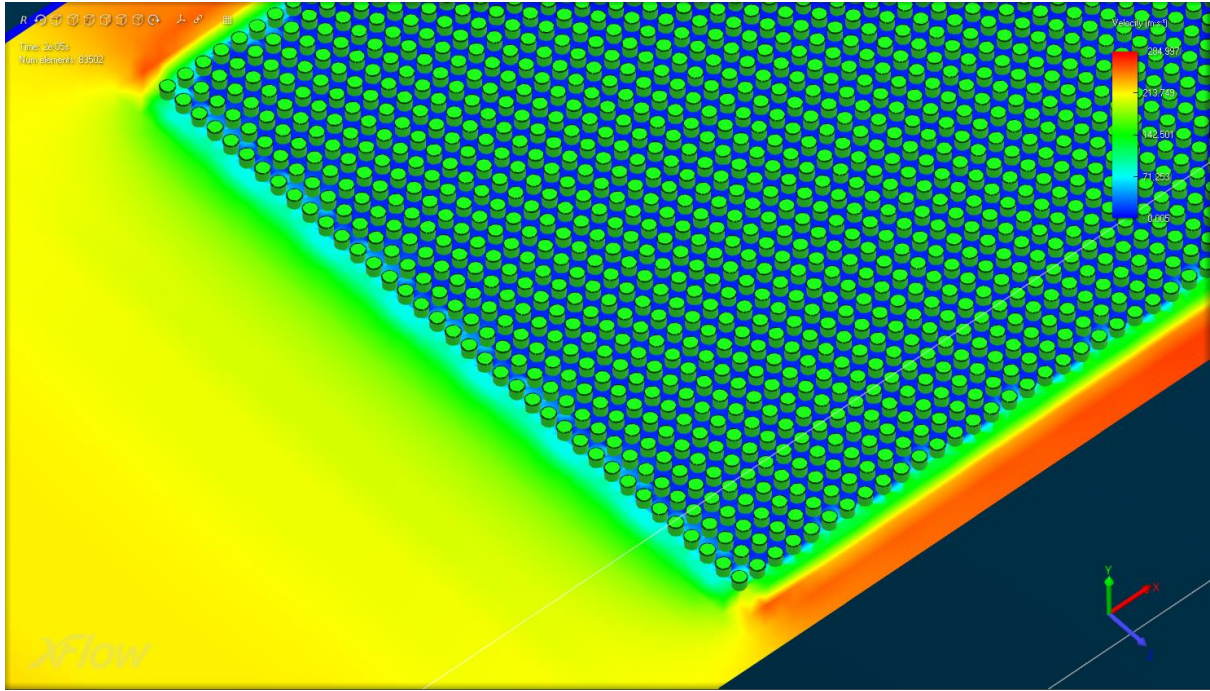
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10\mu\text{m} + 2\mu\text{m}$  (zeminden  $12\mu\text{m}$ ) yüksekliktedir.



Şekil 23. Y eksenli Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi: 0.006 m/s-Kırmızı: 284.997 m/s).

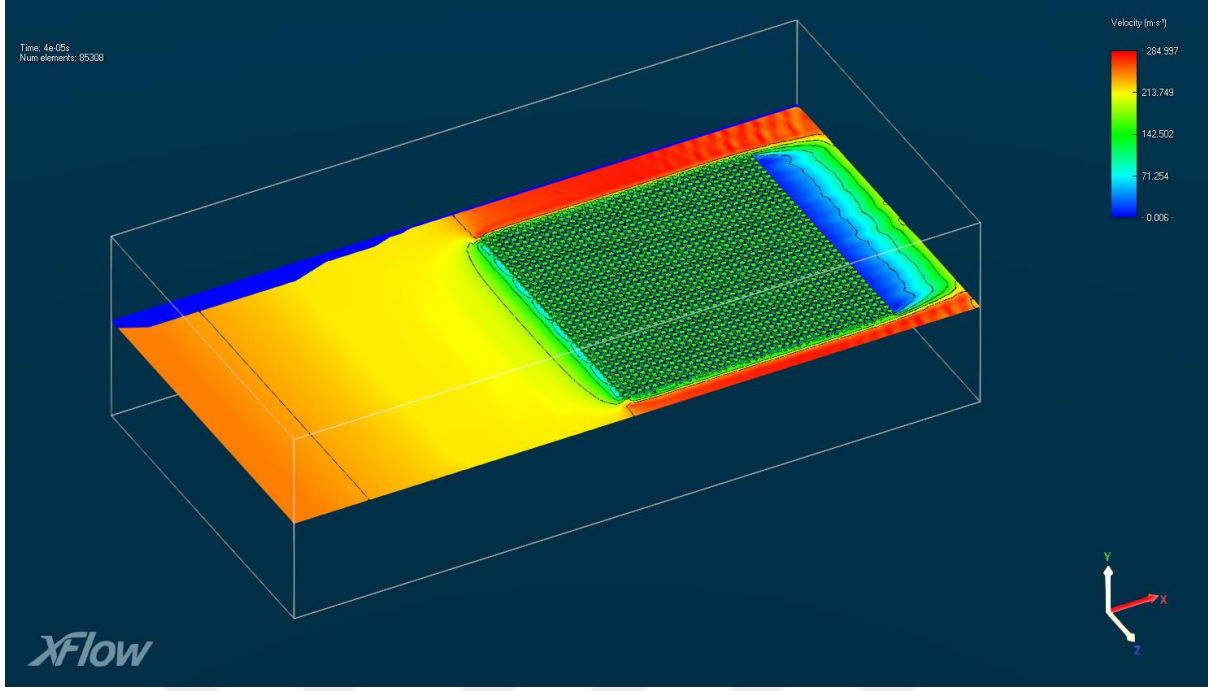
Görselde de görüldüğü üzere 250.83 m/s hızla akan havanın parçanın yanlarında hızının bir miktar arttığı ve ilk temas yerinde azaldığı ama üst yüzeydeki sütunların arasında sıfır olduğu görülmektedir.



**Şekil 24.** Y eksenli 3D Hız (Velocity) skalası

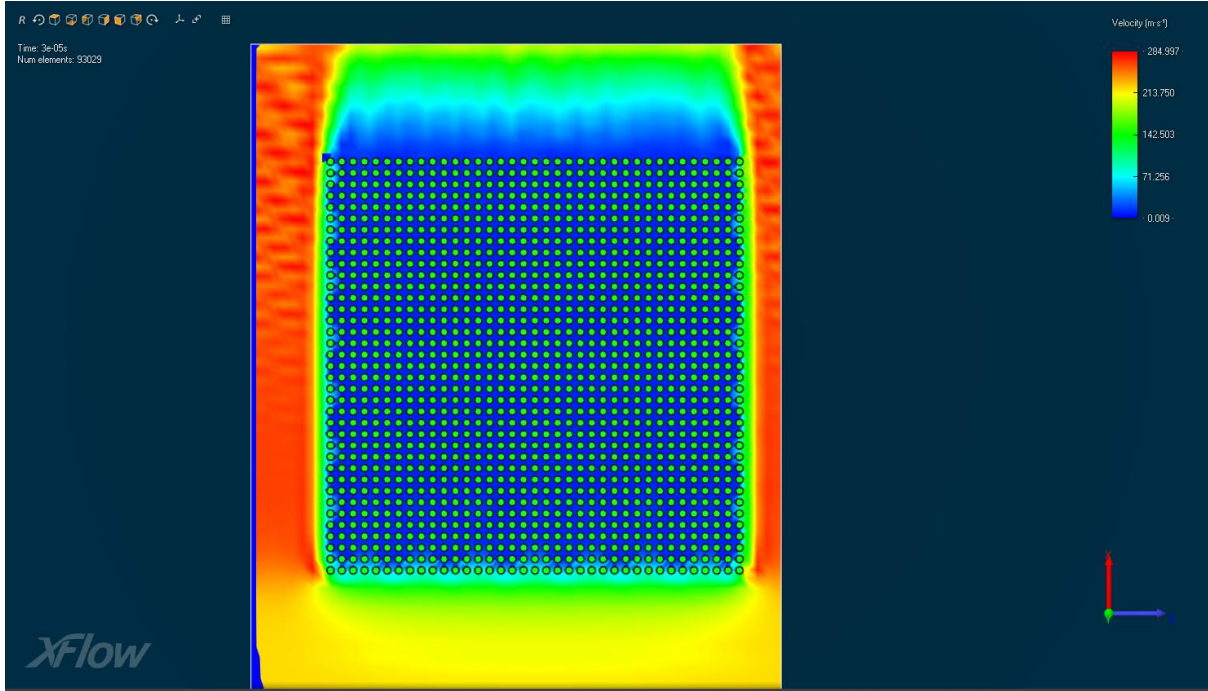
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi: 0.006 m/s-Kırmızı: 284.997 m/s).





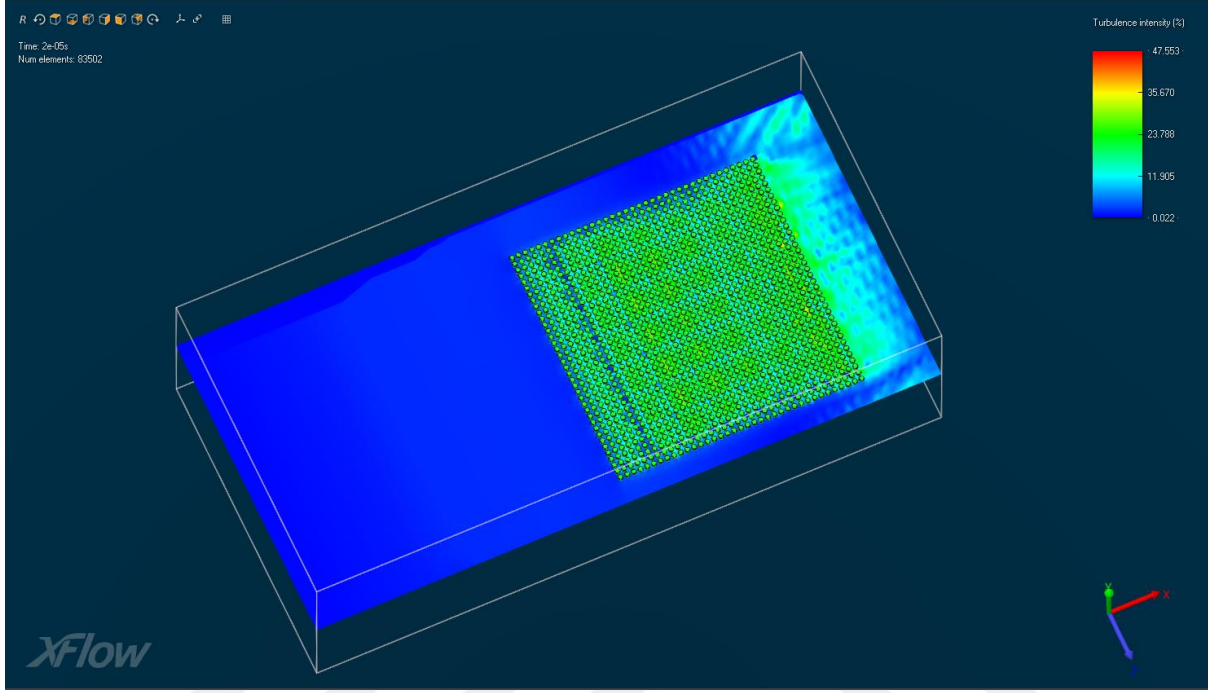
Şekil 25. Y eksenli izohips hatlı Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. İzohips hatları ile hız katmanları belirlenmiştir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ).



Şekil 26. Y eksenli tepe görünümü Hız (Velocity) skalası

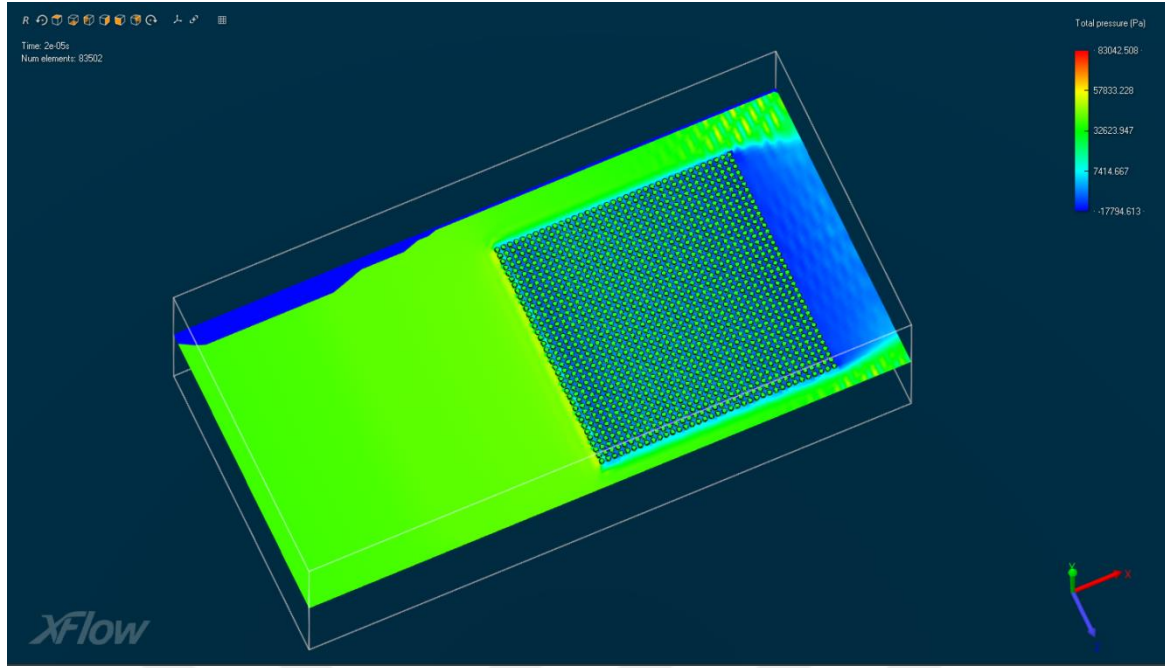
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ).



**Şekil 27.** Y eksenine 3D türbülans yoğunluğu skalası

Kesit Y eksenine üzerinde  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (yani zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliğinde türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. (Mavi:  $\%0.022$  - Kırmızı:  $\%47.553$ ) Renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir.

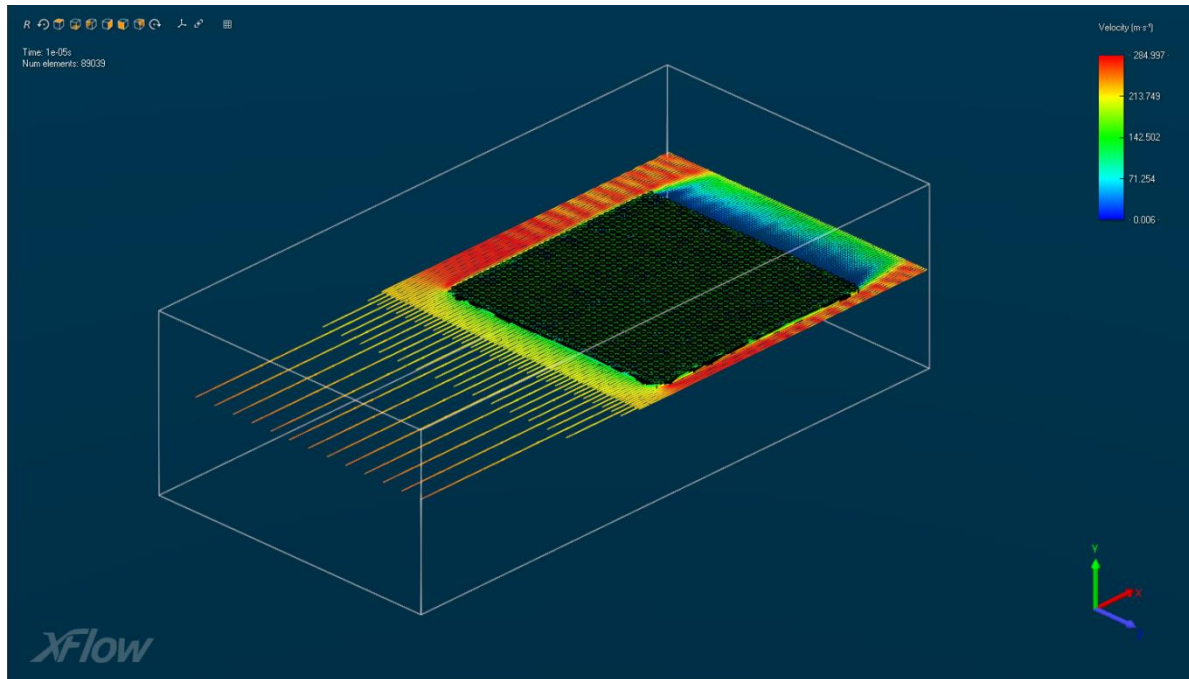
Şekil 27'de de görüleceği gibi hava yüzeyindeki sütunların arasına dolmayarak orada bir türbülans oluşumuna sebebiyet vermektedir.



Şekil 28. Y eksenli 3D toplam basınç skalası

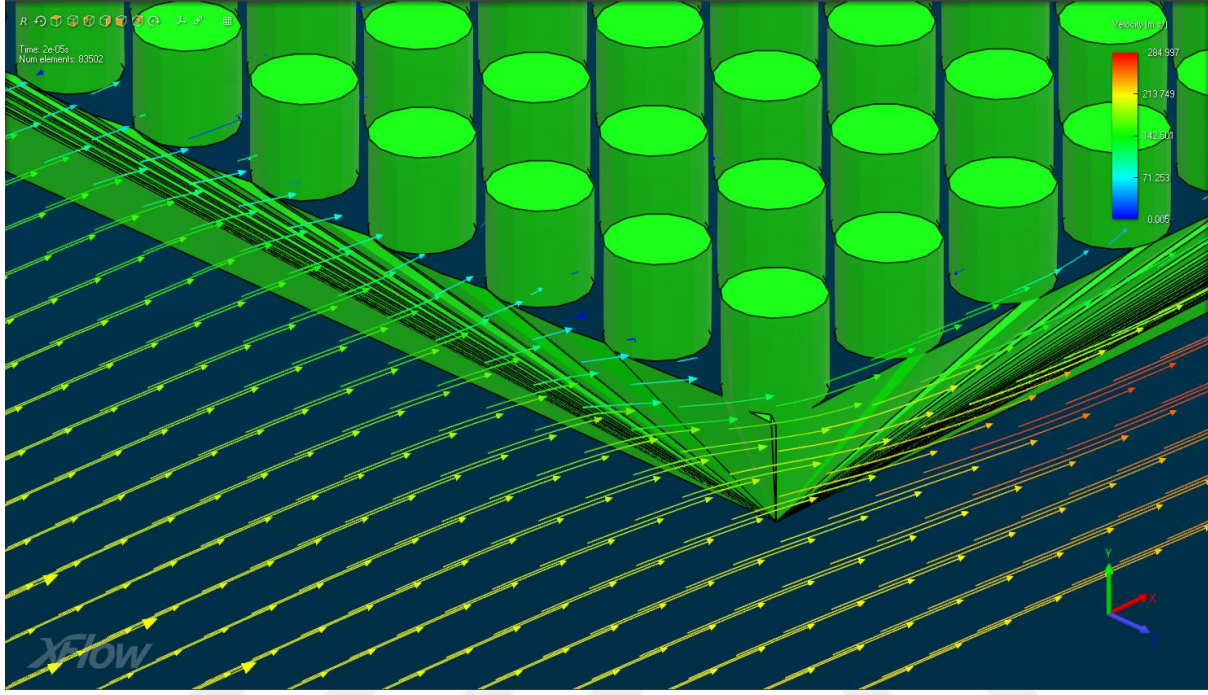
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Toplam basınç (total pressure) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. Renk dağılımı parça etrafındaki toplam basıncı temsil etmektedir (Mavi:  $-17794.613\text{Pa}$  - Kırmızı:  $83042.508\text{Pa}$ ).

Havanın sütunlar arasına dolmamasından kaynaklı sütunlar arasındaki toplam basınç değerleri sifıra yakın görülmektedir.



Şekil 29. Y eksenli Hız (Velocity) vektörel skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ). Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.

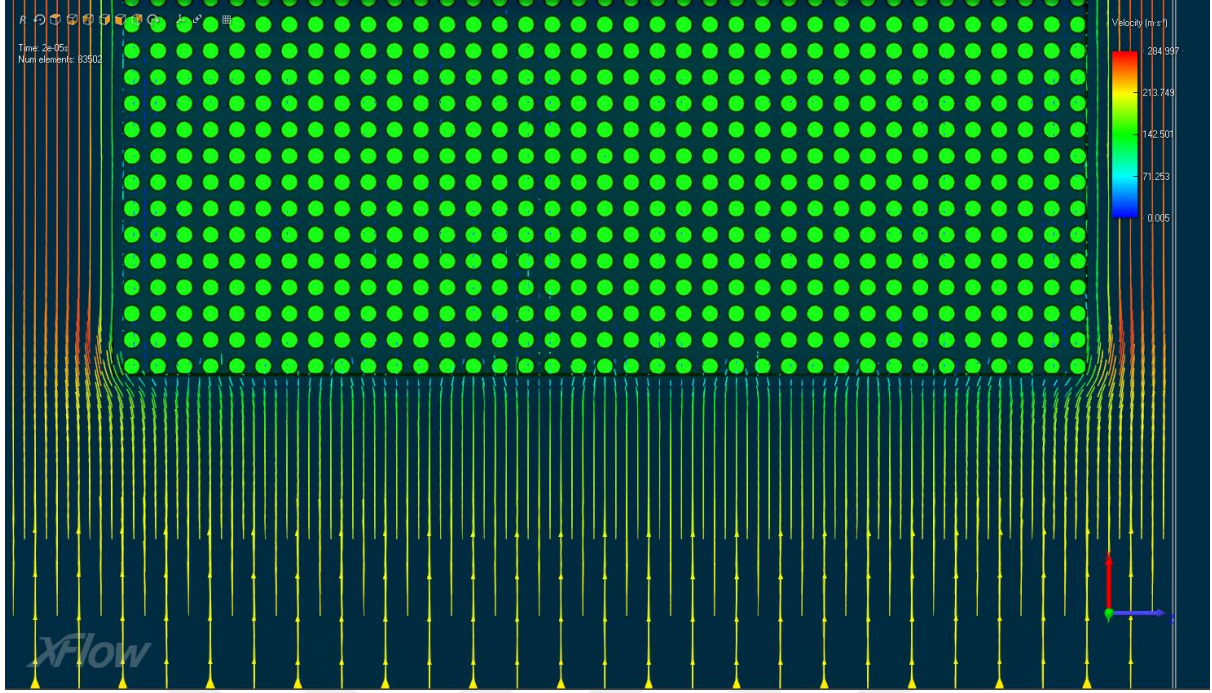


**Şekil 30.** Y eksenini yakınlaştırmış vektörel Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ). Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.

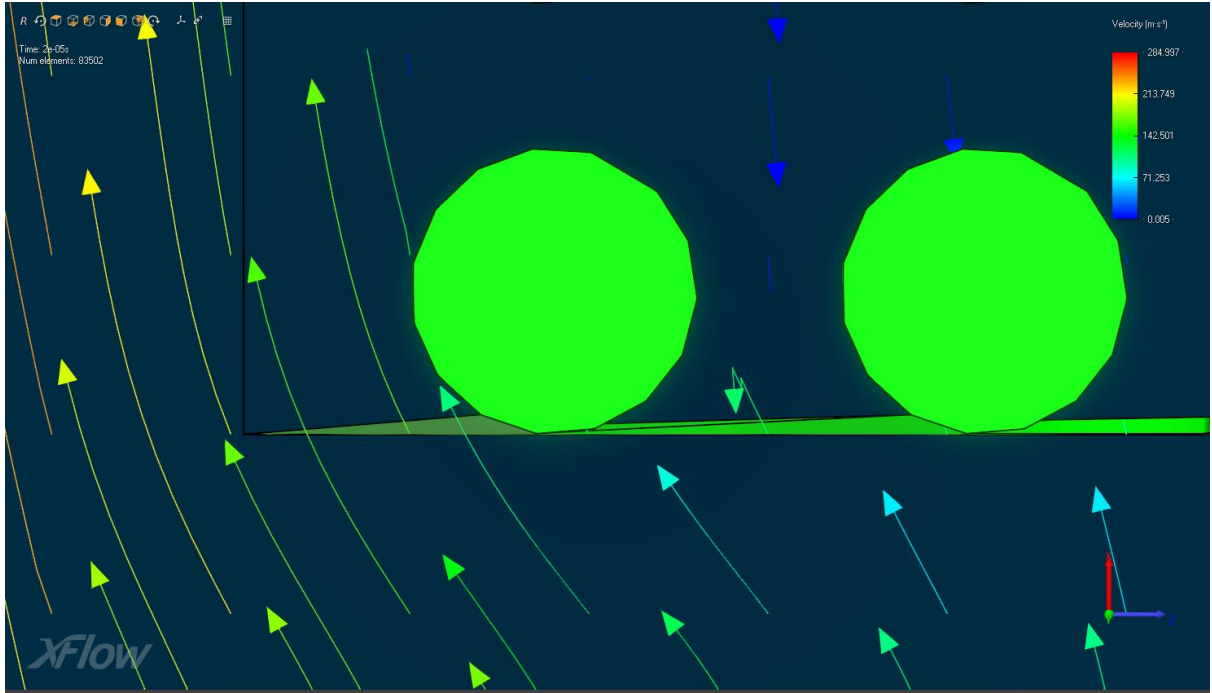
Daha yakından vektörel gösterime bakıldığı zaman hava akımının kıvrılarak sütunların yanından aktığı görülmektedir.





**Şekil 31.** Y eksenli vektörel Hız (Velocity) tepe görünümü

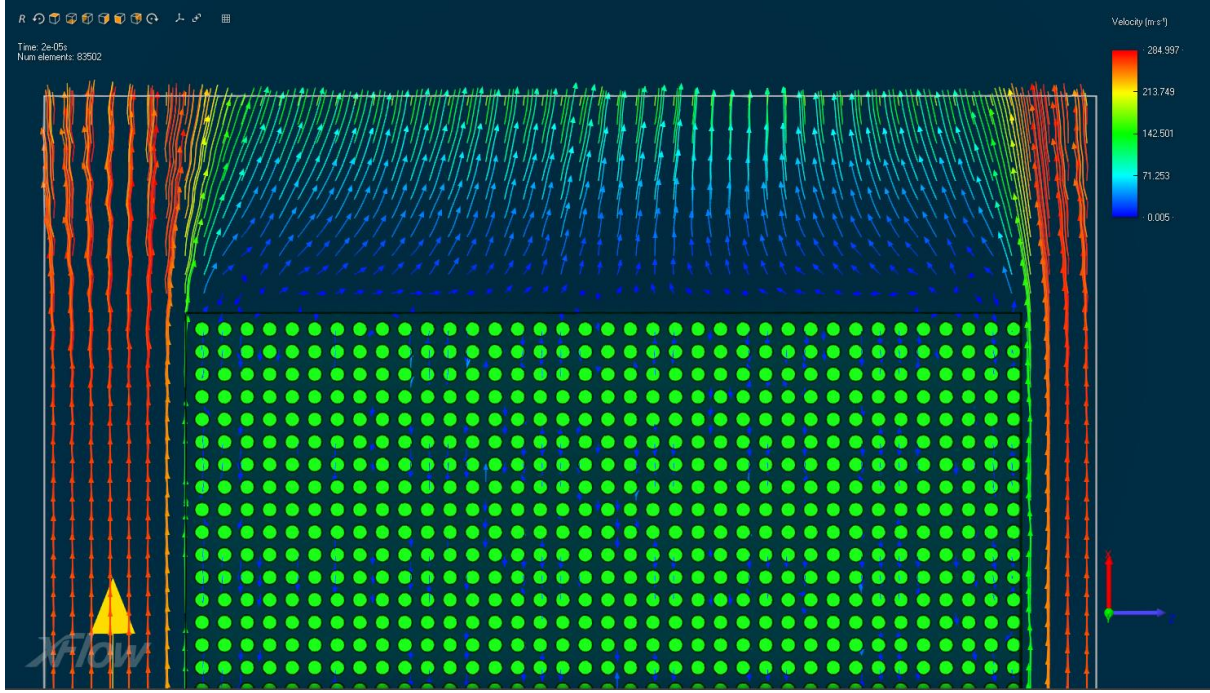
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. (Mavi:  $0.006\text{m/s}$ - Kırmızı:  $284.997\text{m/s}$ ). Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.



**Şekil 32.** Y eksenli vektörel Hız (Velocity) tepe yakınlaştırılmış gösterimi

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. (Mavi:  $0.006\text{m/s}$ - Kırmızı:  $284.997\text{m/s}$ ). Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.

Vektörel gösterimde daha yakından farkedilecektir ki sütunlar arasına hava dolmamakta ve yön değiştirmektedir.

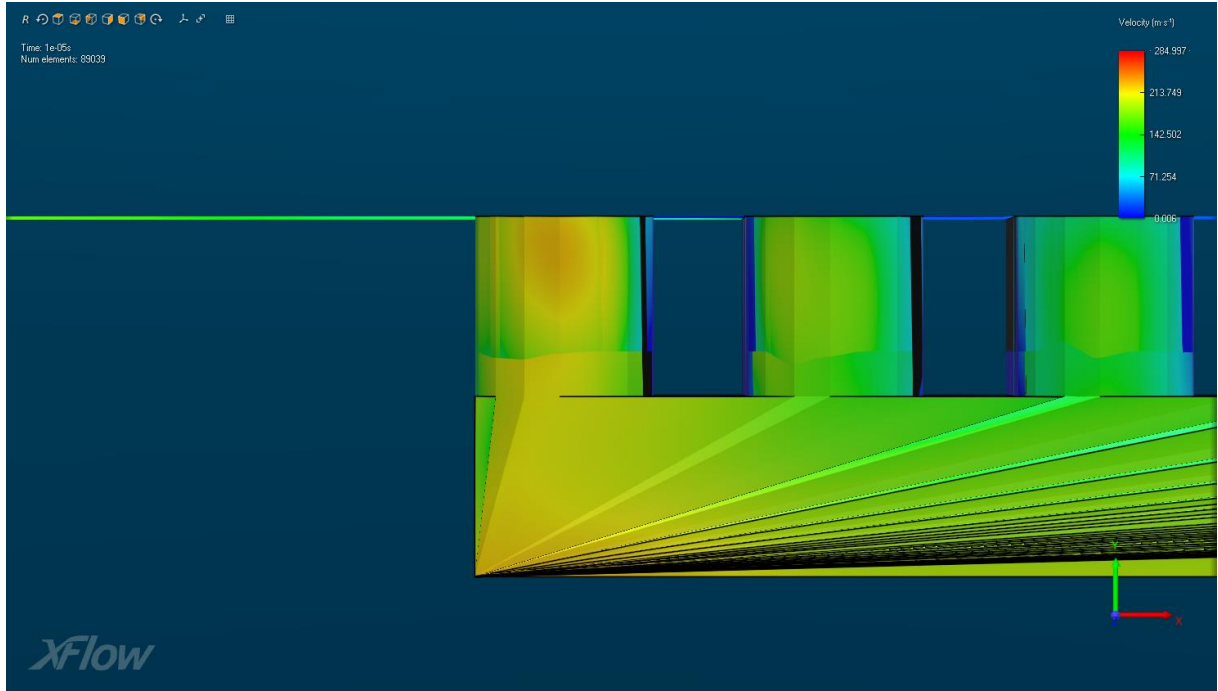


**Şekil 33.** Y eksen vektörel Hız (Velocity) tepe gösterimi hava çıkış gösterimi

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 2 \mu\text{m}$  (zeminden  $12 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. (Mavi:  $0.006\text{m/s}$ - Kırmızı:  $284.997\text{m/s}$ ). Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.

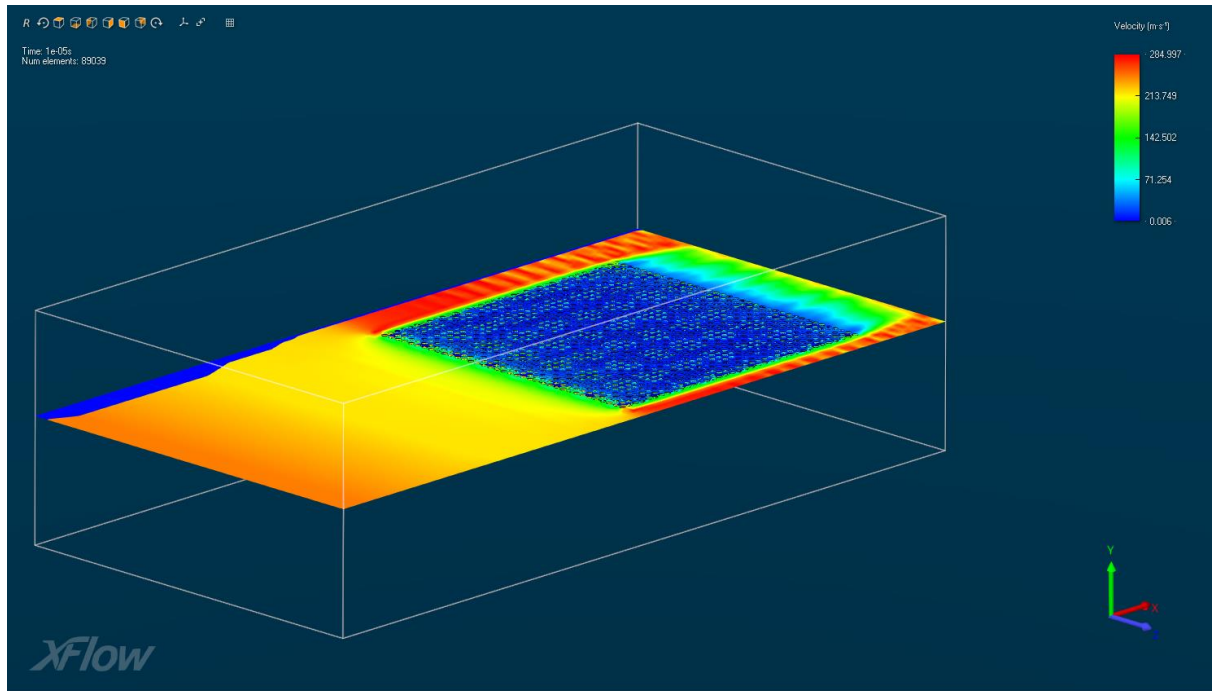
Çıkış kısmında sütunlar arasından hava gelmediği için sütunların arkasında kalan kısımlarda da havanın hızı sıfıra yakın iken kenarlara kıvrılan hava daha hızlı hareket edip kırmızı renk ile gösterilmiştir.

Y eksenine tepe noktasına teğet:



Şekil 34. Y eksenine kesit yüzeyi konumu gösterimi, tepe teğet

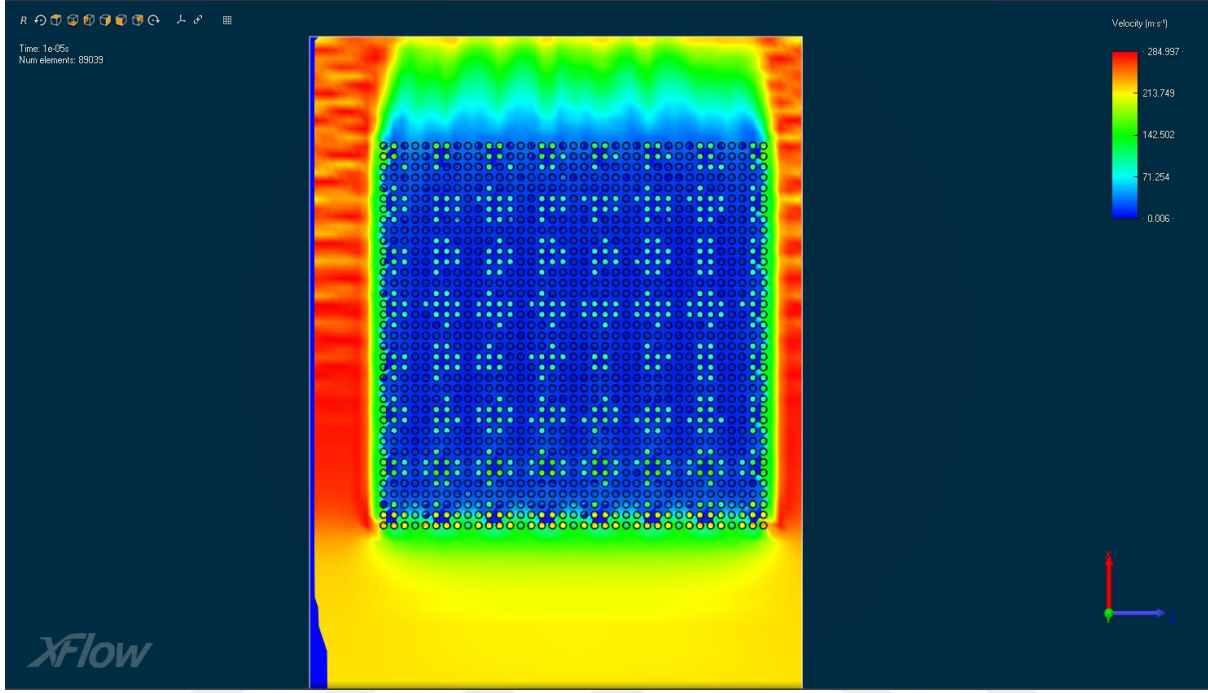
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$  (zeminden  $20 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine teğettir.



Şekil 35. Y eksenine kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken 3D Hız (Velocity) skalası



Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$  (zeminden  $20 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine teğettir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ).

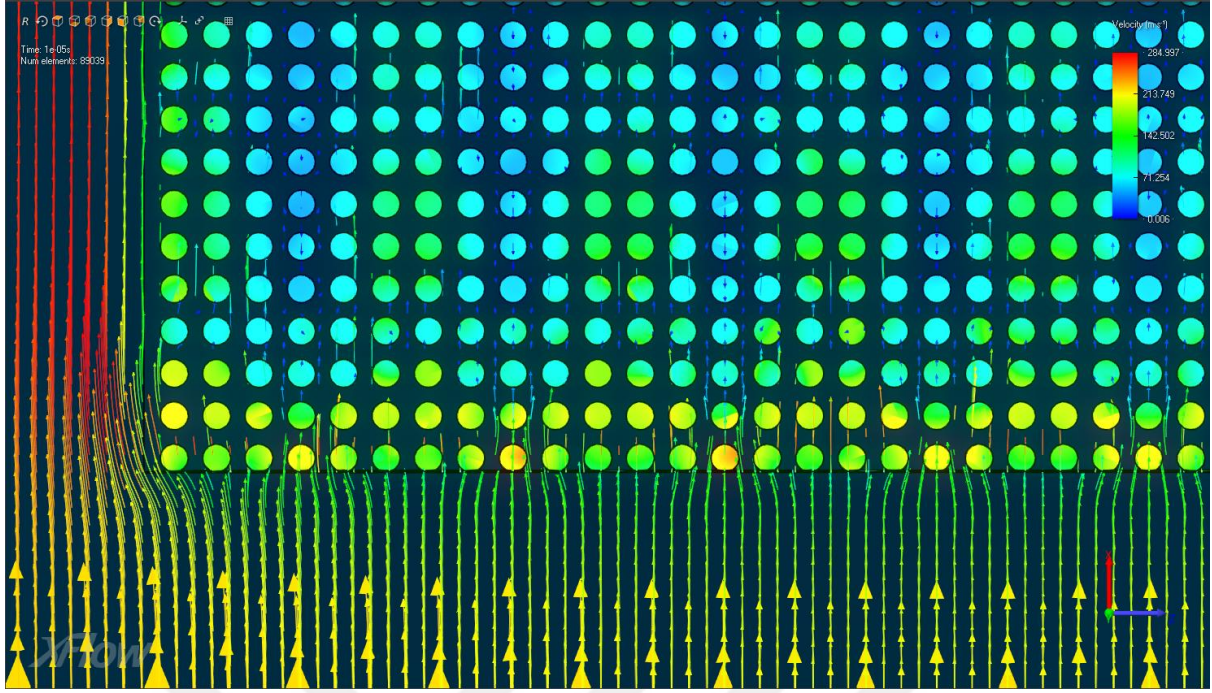


**Şekil 36.** Y ekseni kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken tepe görünümü Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$  (zeminden  $20 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine teğettir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ).

Tepe noktasına teğet bir kesitten bakıldığında havanın davranışında çok büyük bir değişiklik olmasa da bölge bölge bazı kısımlarda hızın arttığı görülmektedir. Hala yüzey ile hava akımı arasındaki boşluk filminin etkileri devam etmektedir.

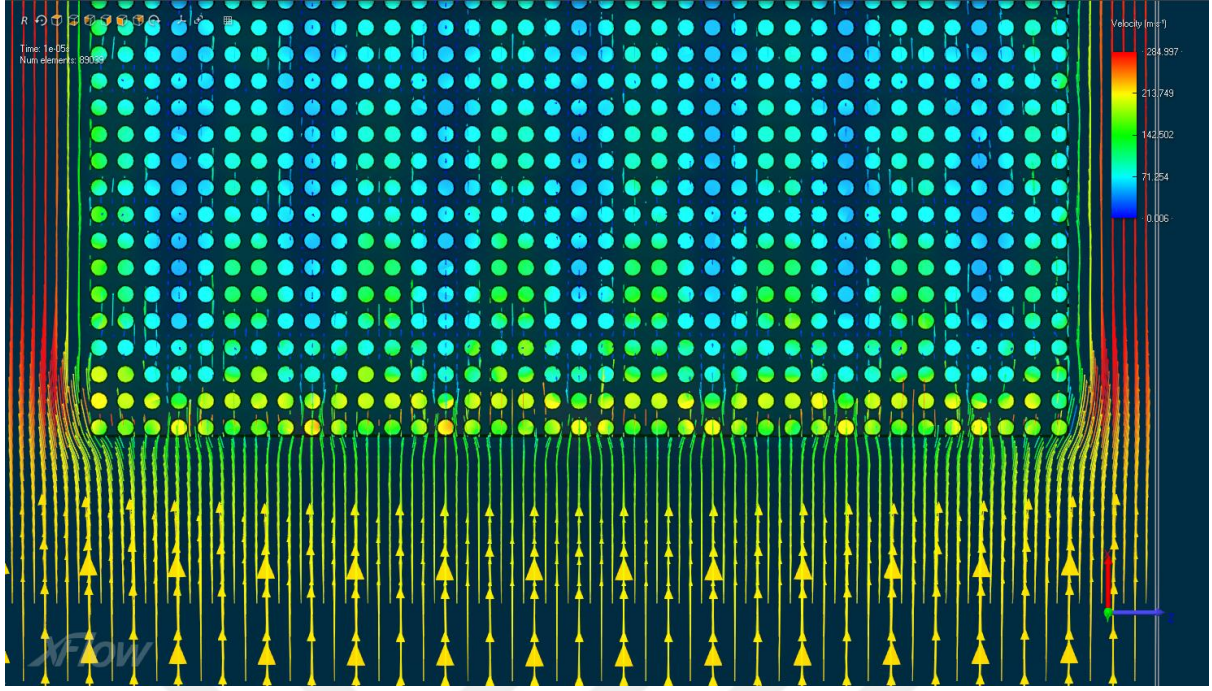




Şekil 37. Y eksenine kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken vektörel Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$  (zeminden  $20 \mu\text{m}$ ) yükseklikindedir ve parçanın üst yüzeyine teğettir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ) Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. Ayrıca izosurface görünülülüğü açılarak renk dağılımı parça yüzeyinde işlenmiştir.

Tepe noktasına teğet alınan kesitteki vektörel gösterim şunu gösteriyor ki; hava akımı çok ciddi boyutlarda olmasa da sütunlar arasına nüfuz etmeye başlamıştır.

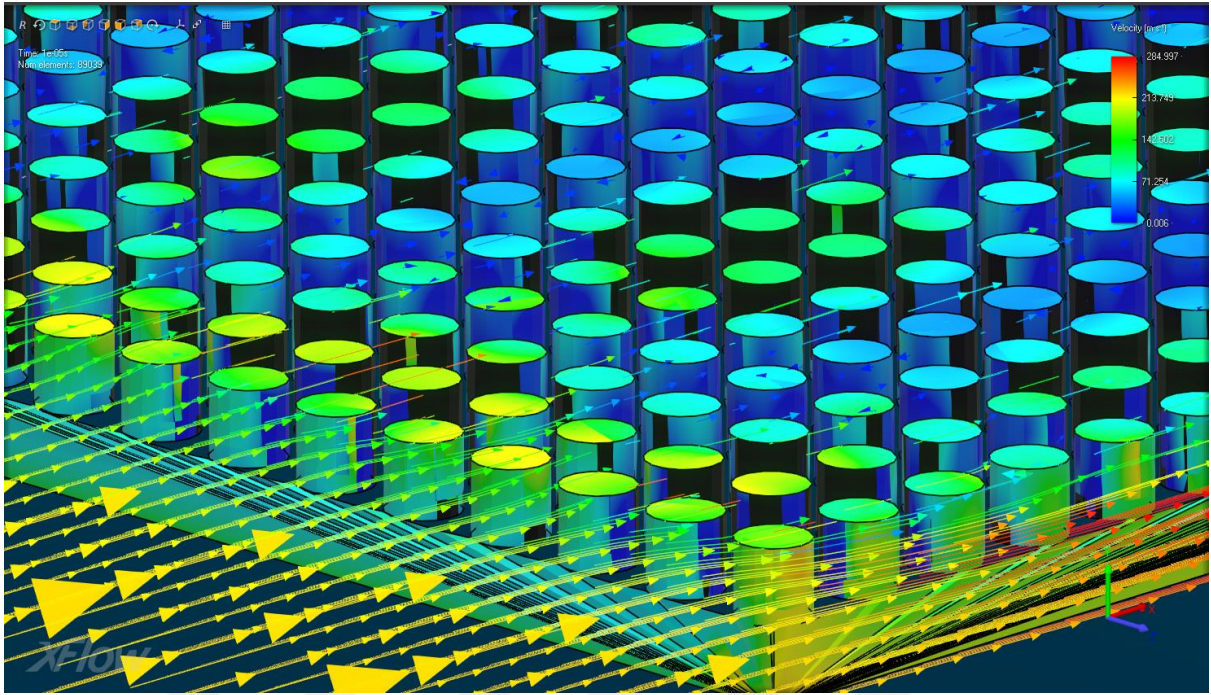


**Şekil 38.** Y eksen kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken vektörel Hız (Velocity) skalası açığı 2.

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$  (zeminden  $20 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine teğettir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ) Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir.

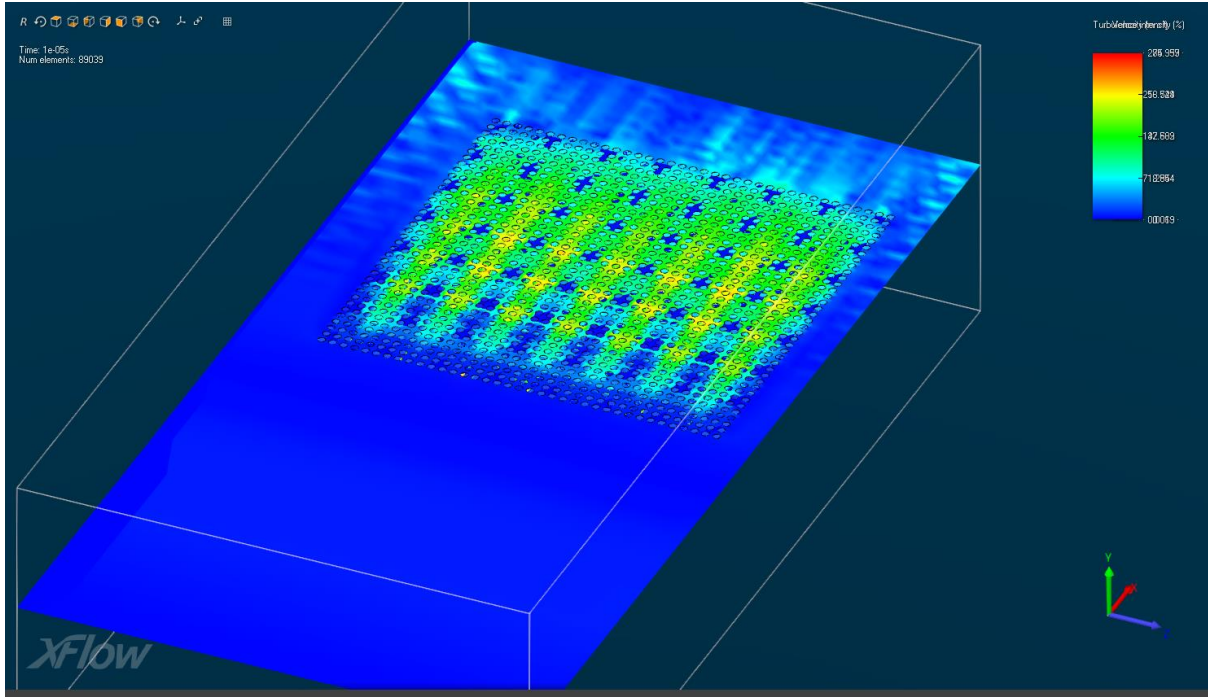
Ayrıca izosurface görünürlüğü açılarak renk dağılımı parça yüzeyinde işlenmiştir. İzosurface görünürlüğü ile aralara nüfus eden hava akımını sütunların üzerindeki yeşil renk ile anlaşılabilir.





**Şekil 39.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken 3D vektörel Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$  (zeminden  $20 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine teğettir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ) Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. Ayrıca izosurface görünülürlüğü açılarak renk dağılımı parça yüzeyinde işlenmiştir.

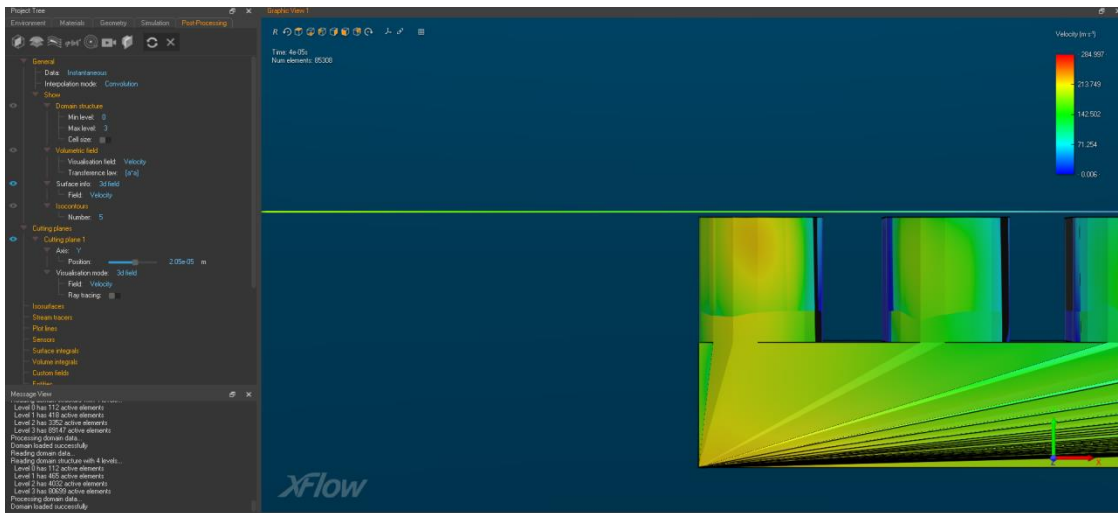


**Şekil 40.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe teğet konumunda iken 3D türbülans yoğunluğu skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m}$  (zeminden  $20 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine teğettir. Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. (Mavi: %0.031 - Kırmızı: %47.359) Renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir.

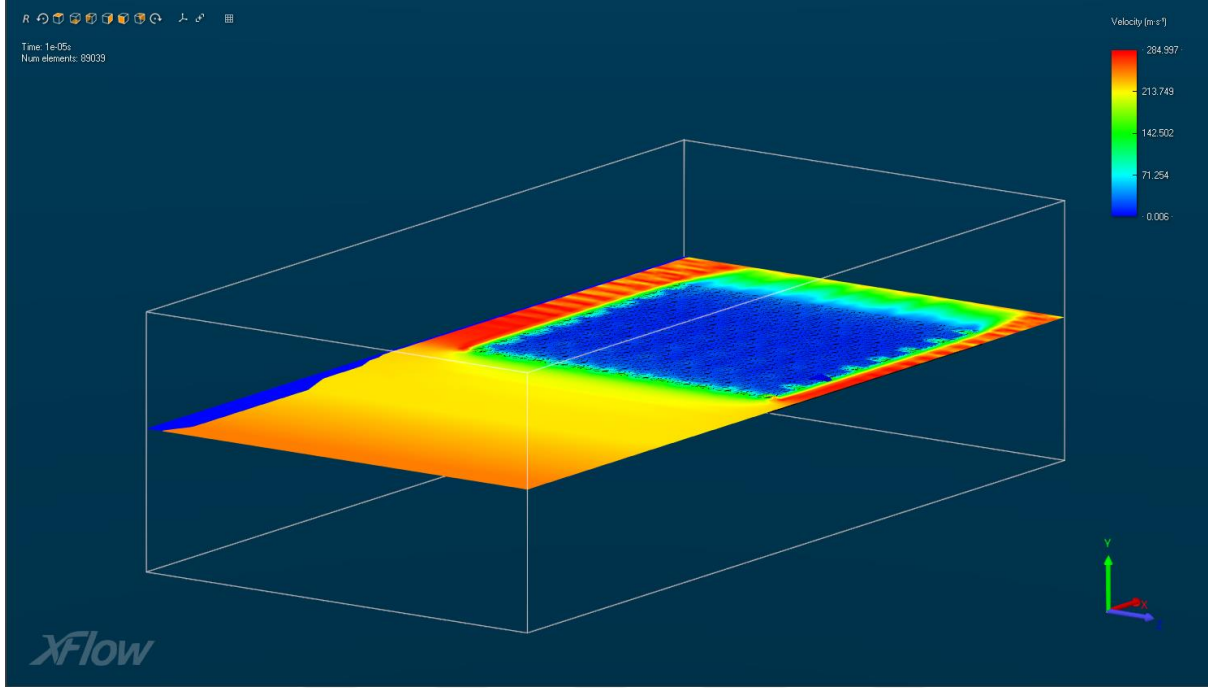
Tepe noktasına teğet bölgede türbülans sütunları arasındaki kadar yoğun olmasa da varlığına devam etmektedir.

Y eksenini tepe noktasına temassız 1 mikron üstünde:



**Şekil 41.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından  $1 \mu\text{m}$  yükseklikte konum görseli

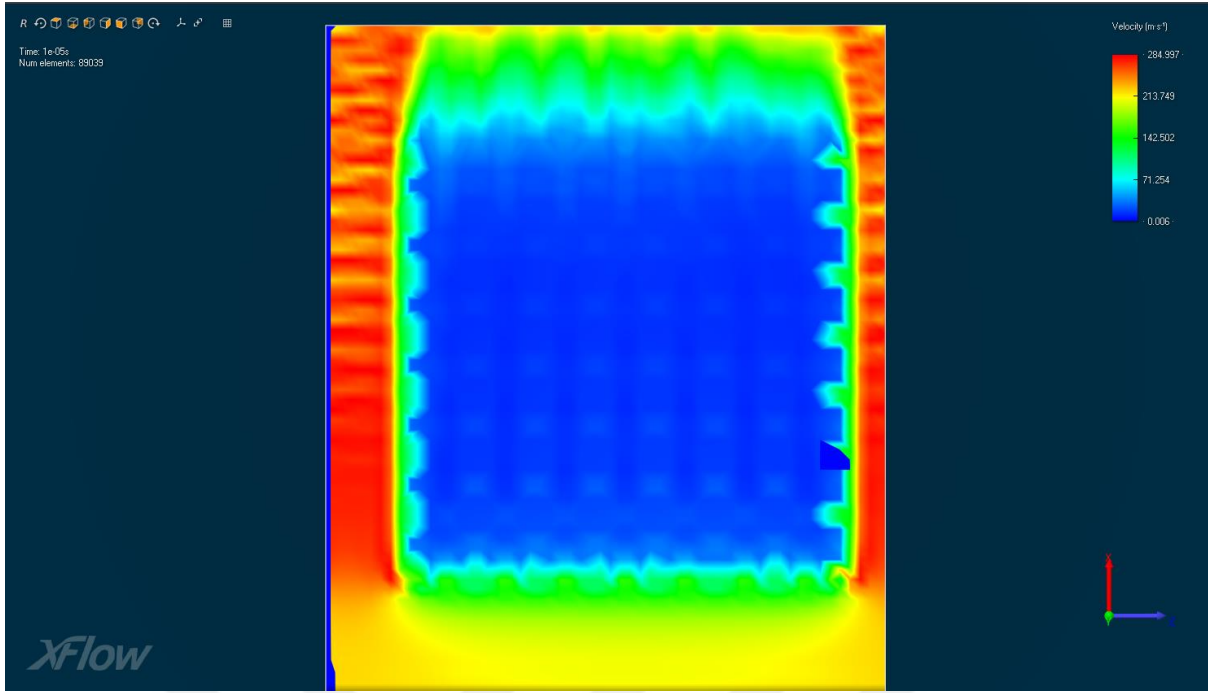
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir.



**Şekil 42.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından  $1 \mu\text{m}$  yükseklikte 3D Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ).

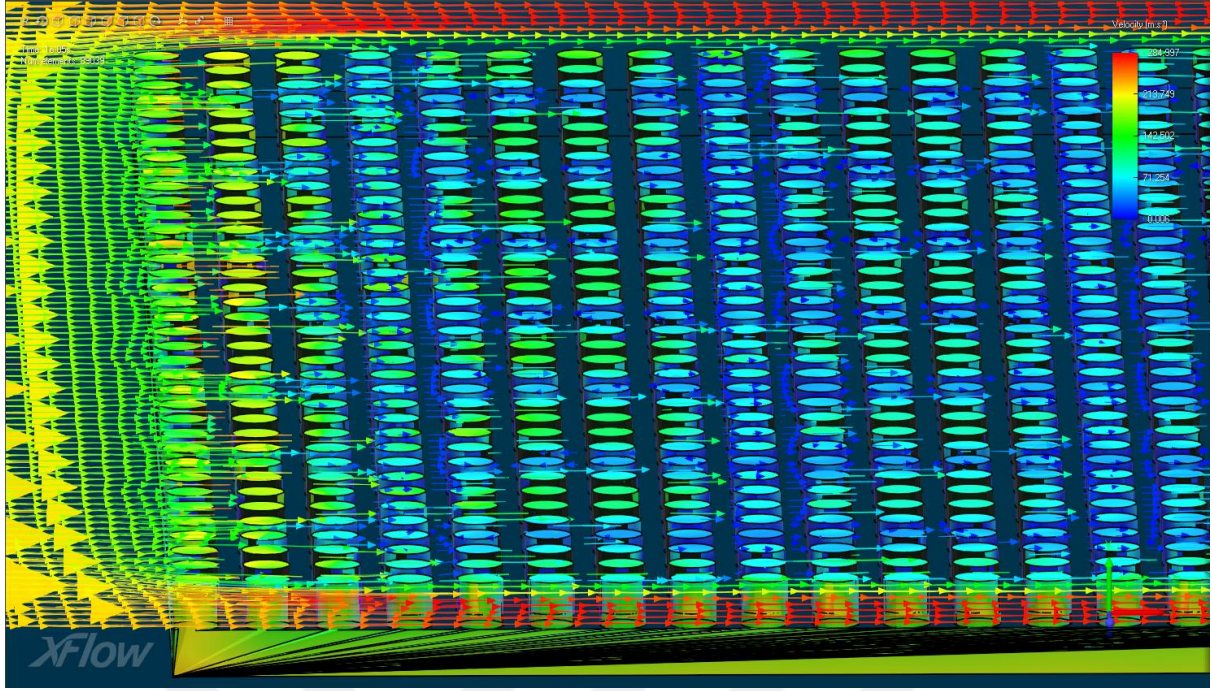
Yüzey ile bütün temasın koparıldığı bu kesitte, daha önceki X eksenindeki kesit görsellerini destekleyecek şekilde hala yüzey geometrisinin etkisi devam etmektedir.



**Şekil 43.** Y ekseni kesit yüzeyi tepe noktasından  $1 \mu\text{m}$  yükseklikte tepe görünümü Hız (Velocity) skalası

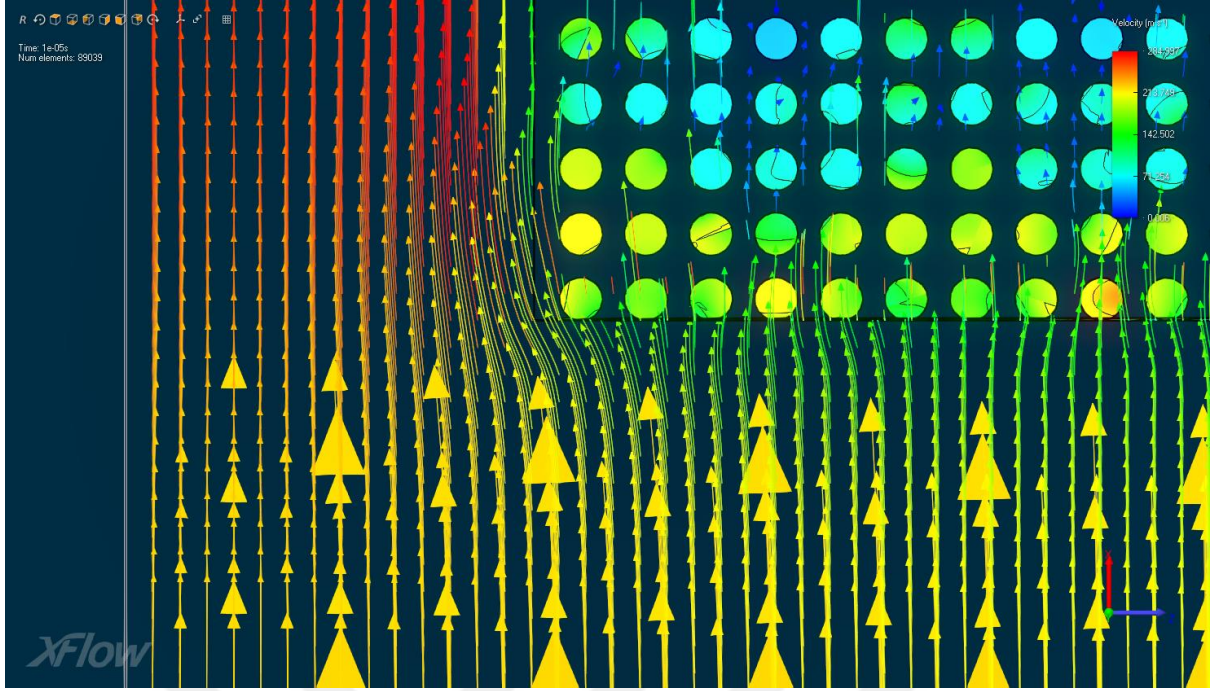
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ).





**Şekil 44.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından 1  $\mu\text{m}$  yükseklikte 3D vektörel Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ) Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. Ayrıca izosurface görünürlüğü açılarak renk dağılımı parça yüzeyinde işlenmiştir.

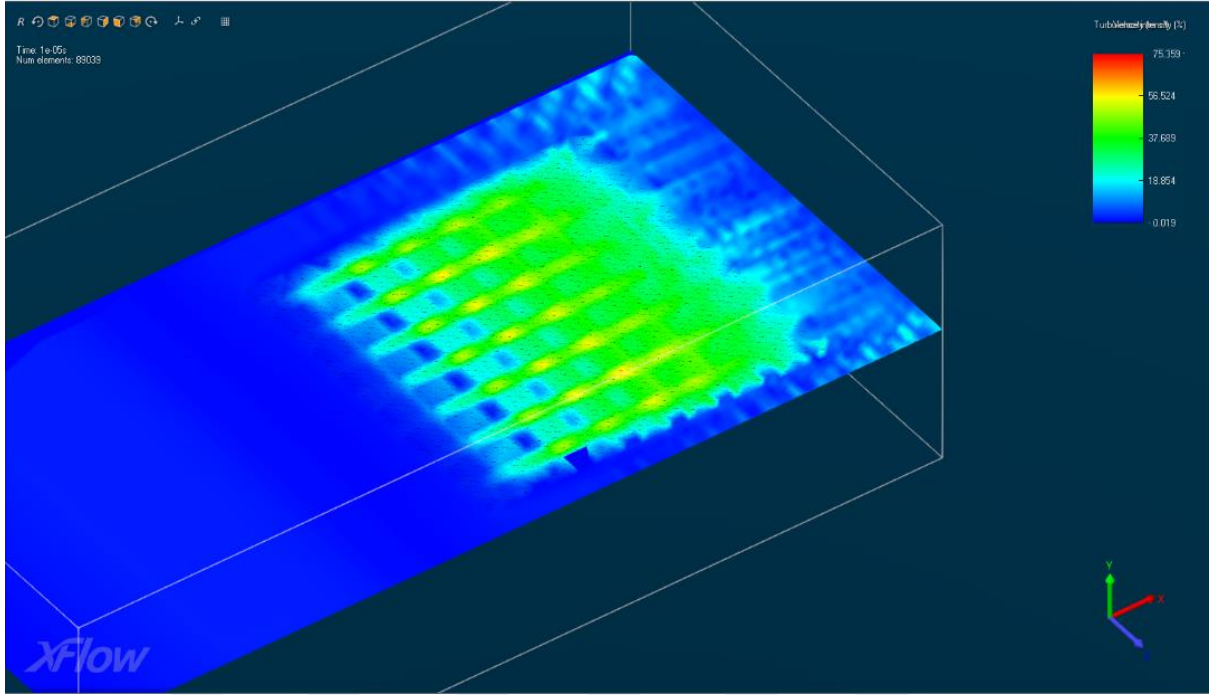


**Şekil 45.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından 1  $\mu\text{m}$  yükseklikte yakınlaştırılmış vektörel Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Vektörler rüzgar hızının yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. (Mavi:  $0.006 \text{ m/s}$ -Kırmızı:  $284.997 \text{ m/s}$ ) Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir. Ayrıca izosurface görünürlüğü açılarak renk dağılımı parça yüzeyinde işlenmiştir.

Hava akımı zeminden yükseldikçe ve yüzey geometrimizden uzaklaştıkça daha lineer hareket emeye başlayıp parça ile hava akımı arasındaki boşluk filminden daha az etkilenecek akmaktadır.

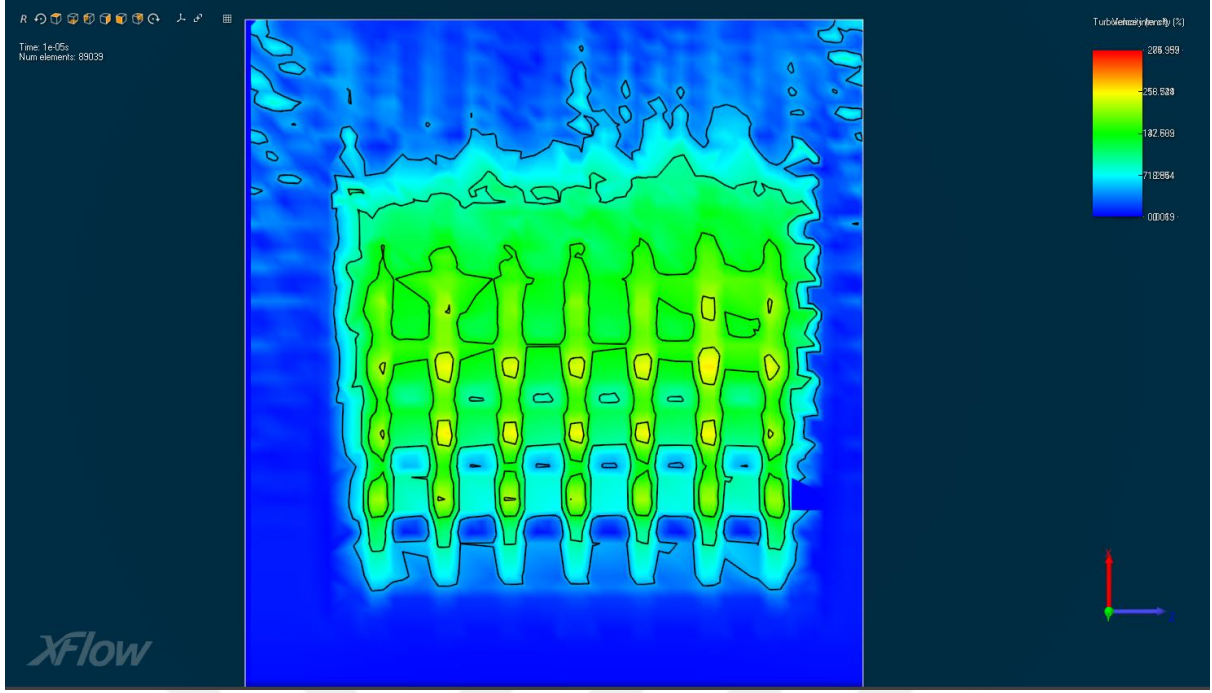




**Şekil 46.** Y eksenini kesit yüzeyi tepesi noktasından 1  $\mu\text{m}$  yükseklikte 3D Türbülans yoğunluğu skalası

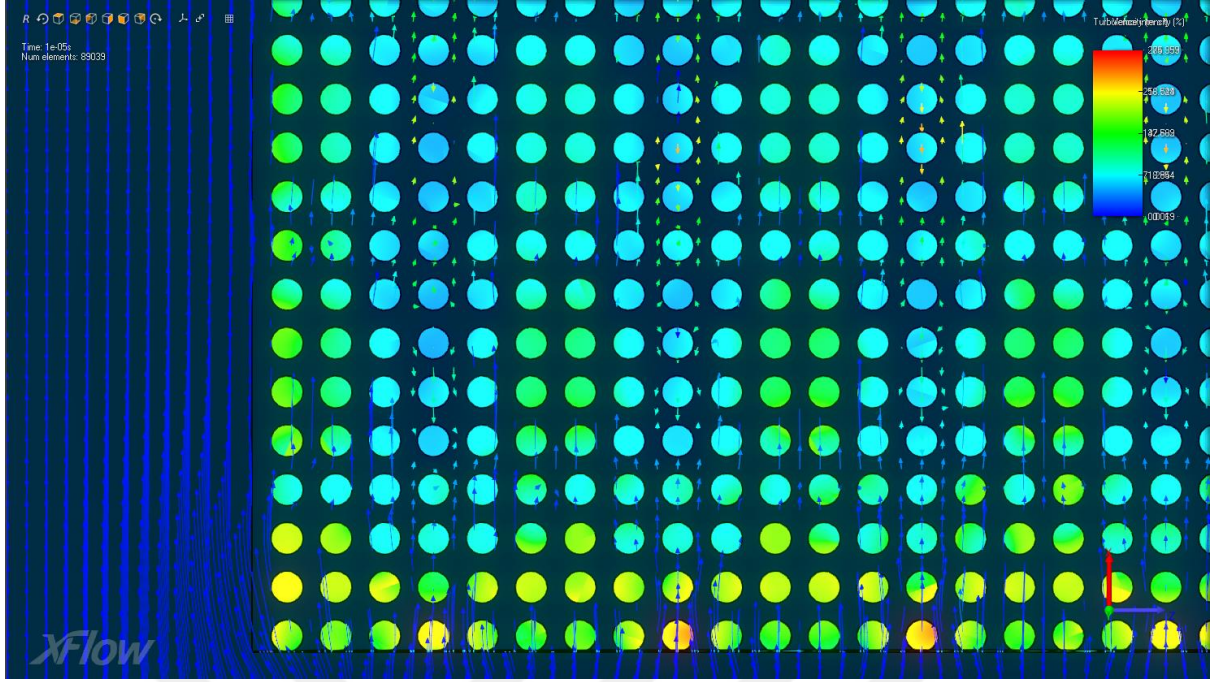
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. Renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir (Mavi: %0.0019 - Kırmızı: %75.359).

Şekilde boşluk filmimizin etkisinin zeminden yükseldikçe azaldığı çıkarımında bulanabileceğimiz veriler sunmuştur. Türbülans oranı azalmış olsa da devam etmekte ve havanın giriş yaptığı kısımda daha fazla içeri katedebildiği görülmektedir. Görselde sütunların dizilişi türbülansın azalmasıyla iyice seçilebilmeye başlamıştır.



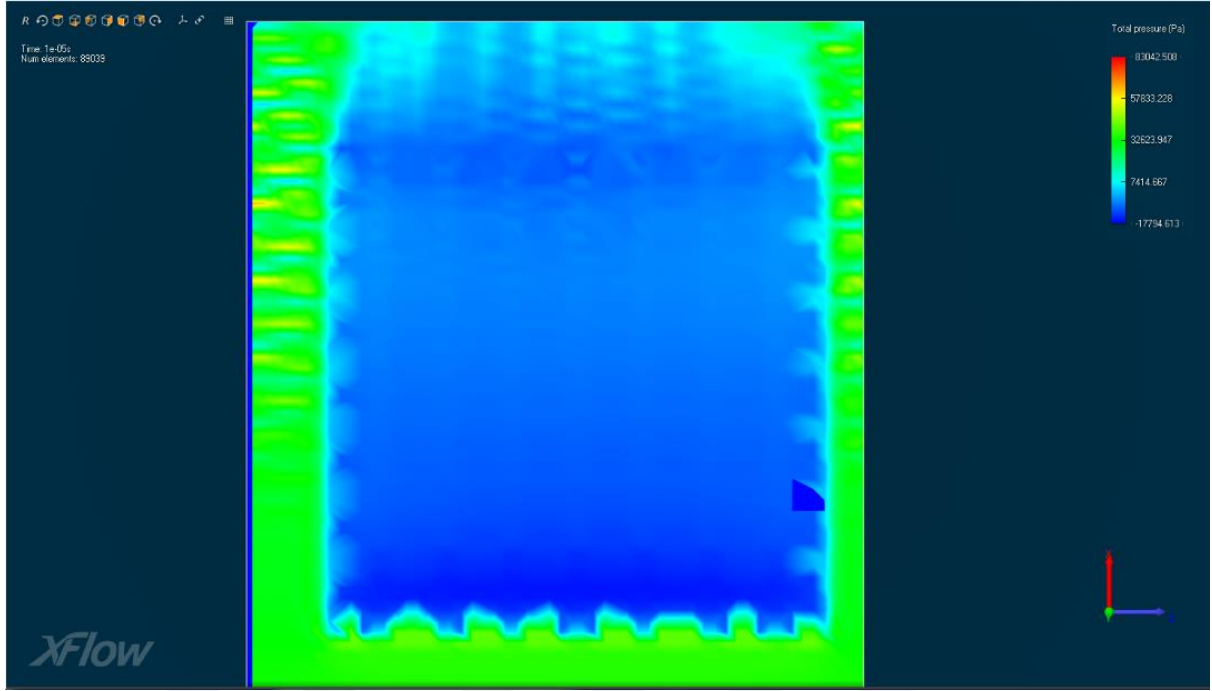
**Şekil 47.** Y eksenini kesit yüzeyini tepe noktasından  $1 \mu\text{m}$  yükseklikte tepe görünümü ve izohips hatlı Türbülans yoğunluğu skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. İzohips hatları türbülans yoğunluğunun katmanlarını ve renk dağılımını parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir (Mavi: %0.0019 - Kırmızı: %75.359).



**Şekil 48.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından  $1 \mu\text{m}$  yükseklikte tepe görünümü vektörel Türbülans yoğunluğu skalası

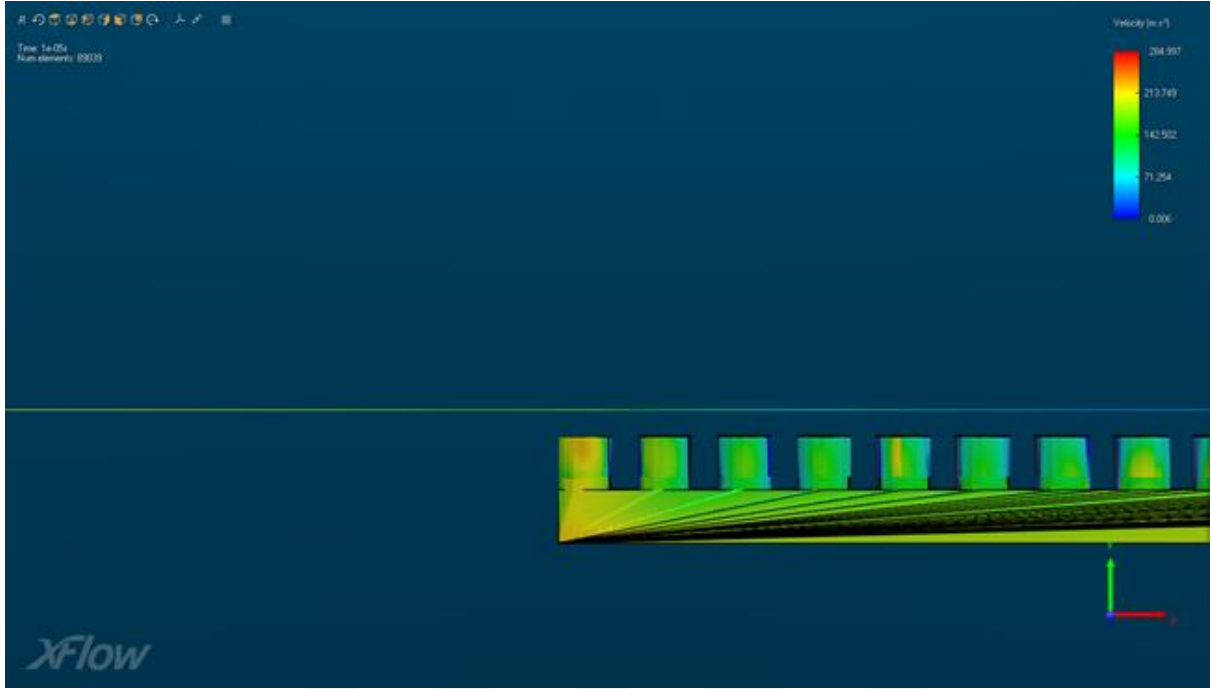
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. Vektörler türbülans yoğunluk yönünü göstermekte ve renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir (Mavi: %0.0019 - Kırmızı: %75.359).



**Şekil 49.** Y ekseni kesit yüzeyi tepe noktasından  $1 \mu\text{m}$  yükseklikte tepe görünümü Toplam basınç skalası

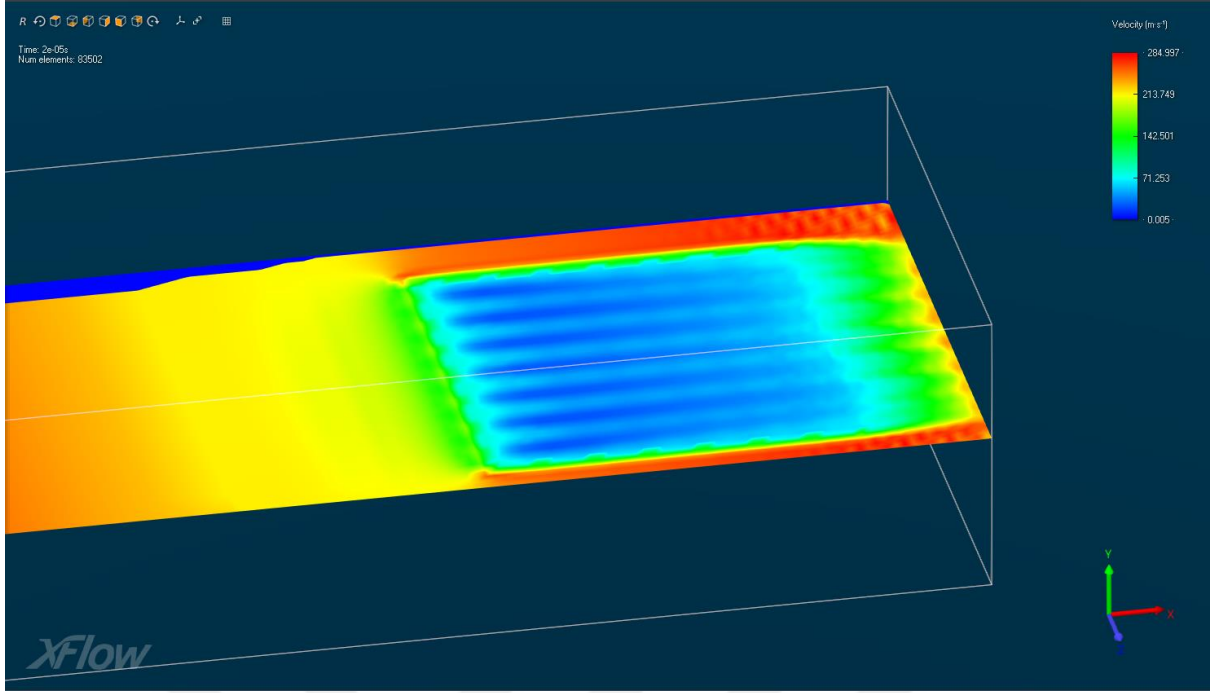
Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 1 \mu\text{m}$  (zeminden  $21 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Toplam basınç (total pressure) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. Renk dağılımı parça etrafındaki toplam basıncı temsil etmektedir (Mavi:  $-17794.613\text{Pa}$  - Kırmızı:  $83042.508 \text{Pa}$ ).

Y eksenini 5 mikron üstünde:



**Şekil 50.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından 5  $\mu\text{m}$  yükseklikteki konum gösterimi

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta 10  $\mu\text{m}$  + 10  $\mu\text{m}$  + 5  $\mu\text{m}$  (zeminden 25  $\mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir.

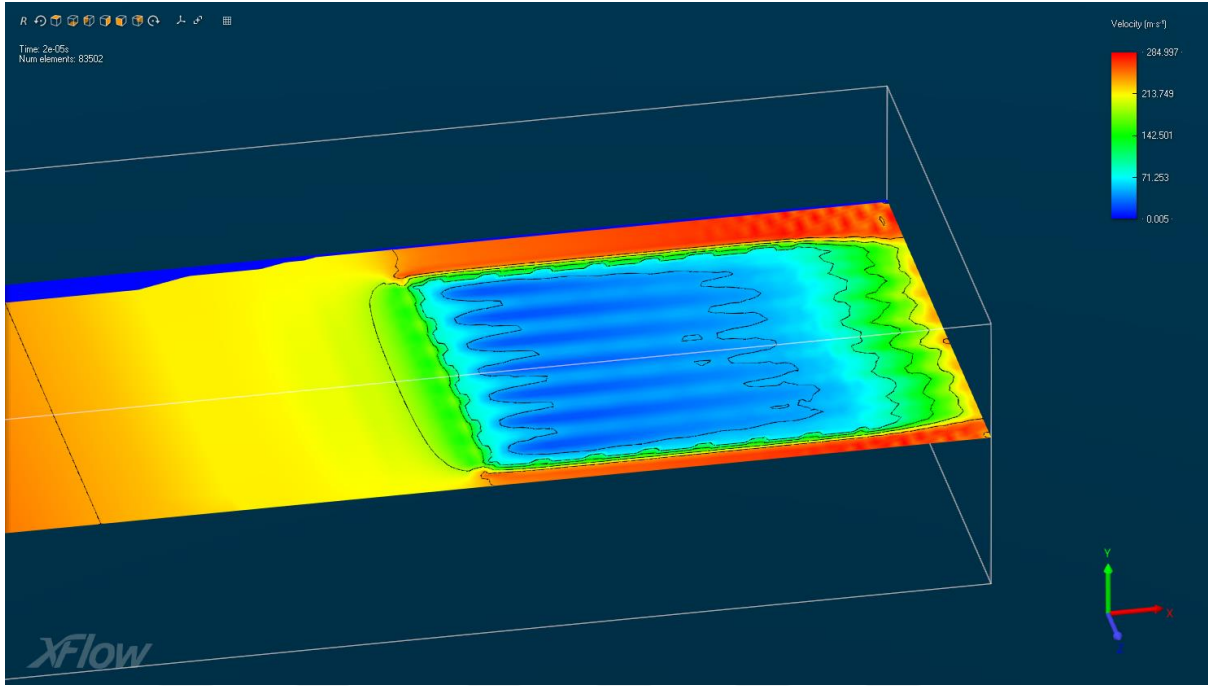


**Şekil 51.** Y ekseni kesit yüzeyi tepe noktasından 5  $\mu\text{m}$  yükseklikte 3D Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta 10  $\mu\text{m}$  + 10  $\mu\text{m}$  + 5  $\mu\text{m}$  (zeminden 25  $\mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi: 0.005 m/s-Kırmızı: 284.997 m/s).

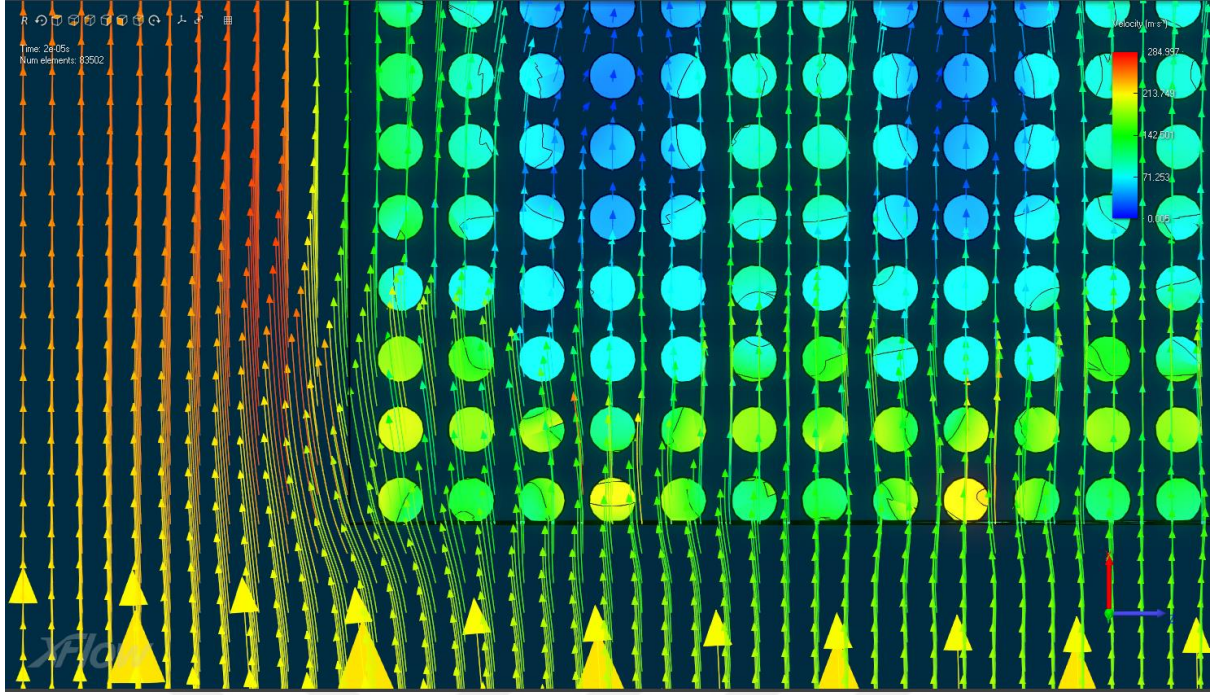
Şekilde sütun tepesinden 5  $\mu\text{m}$  daha yukarıda bir kesite baktığımızda sütunların tepesine denk gelen yerlerde hız hala çok düşük iken ara kısımlara deng gelen yerlerde artmaya başlamış ve bu sayede sütunların dizilimi şeklinde bir görsel ortaya çıkmıştır.





**Şekil 52.** Y eksen kesit yüzeyi tepe noktasından 5  $\mu\text{m}$  yükseklikte izohips hatlı 3D Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta 10  $\mu\text{m}$  + 10  $\mu\text{m}$  + 5  $\mu\text{m}$  (zeminden 25  $\mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. İzohips hatları hız katmanlarını ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını temsil etmektedir (Mavi: 0.006 m/s-Kırmızı: 284.997 m/s).

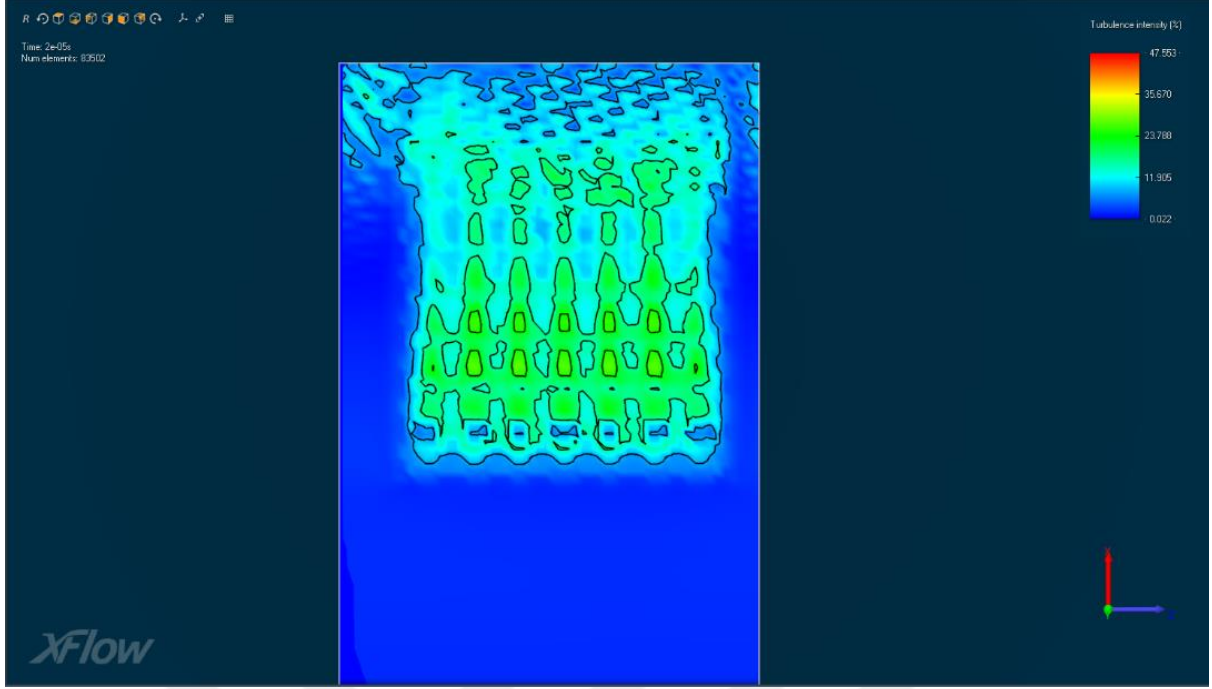


**Şekil 53.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından 5 µm yükseklikte vektörel Hız (Velocity) skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}$  (zeminden 25 mikron) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Hız (Velocity) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmektedir. Vektör yönleri ve renk dağılımı parça etrafındaki hız dağılımını ve yönünü temsil etmektedir (Mavi: 0.006 m/s- Kırmızı: 284.997 m/s).

Hava akımının vektörel gösteriminde hala az da olsa boşluk filminin etkileri görülürken hız vektörleri daha lineer hareket etmeye başlamıştır.

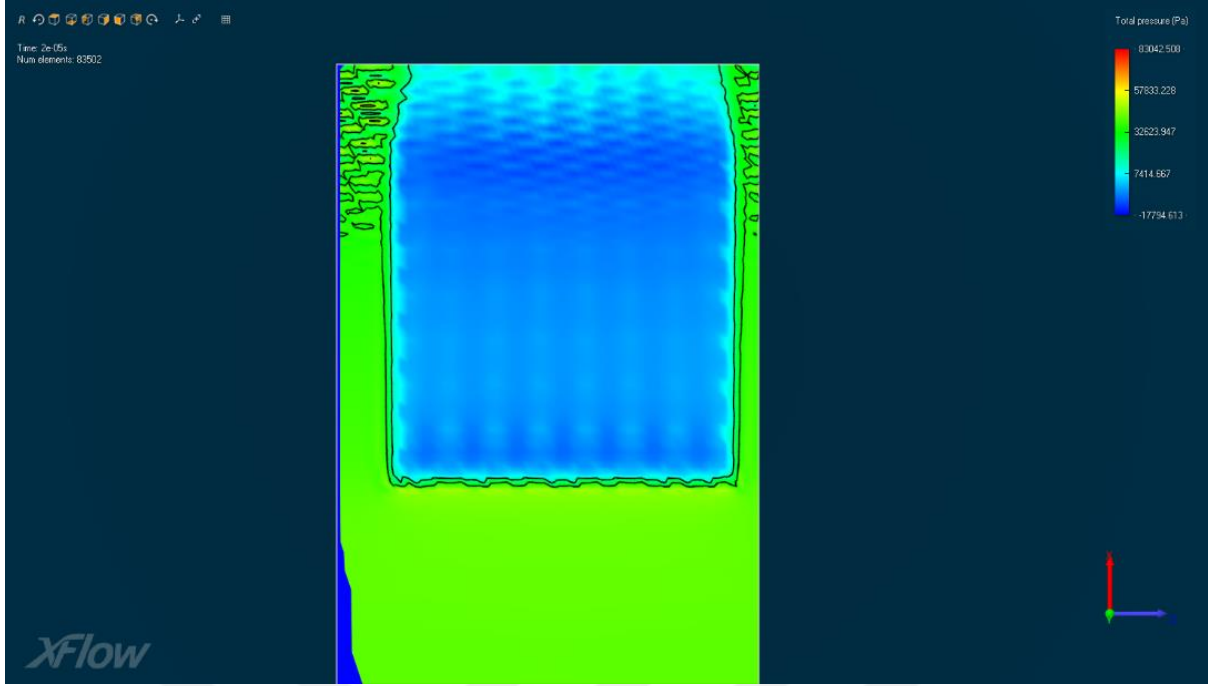




**Şekil 54.** Y eksenini kesit yüzeyi tepe noktasından 5  $\mu\text{m}$  yükseklikte tepe görünüm Türbülans yoğunluğu skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}$  (zeminden  $25 \mu\text{m}$ ) yüksekliktedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Türbülans yoğunluğu (Turbulence intensity) skalası yüzdelik oran olarak sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. İzohips hatları türbülans yoğunluğunun katmanlarını ve renk dağılımı parça etrafındaki türbülans yoğunluğu temsil etmektedir (Mavi: %0.022 - Kırmızı: %47.553).

Bu kesitte artık türbülans yoğunluğunun parça parça olarak azaldığını görmek mümkündür. Bu nedenle boşluk filminin etkisini azalttığı yorumu çıkarılmaktadır.



**Şekil 55.** Y eksenli kesit yüzeyi tepe noktasından 5  $\mu\text{m}$  yükseklikte tepe görünümü Toplam basınç skalası

Kesit yüzeyi; koordinat düzlemine göre konumu, Y ekseninde kestiği nokta  $10 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m}$  (zeminden  $25 \mu\text{m}$ ) yükseklikindedir ve parçanın üst yüzeyine temas etmemektedir. Toplam basınç (total pressure) skalası sağ üst kısımda renklendirme ile gösterilmiştir. İzohips hatları total basıncın katmanlarını ve renk dağılımı parça etrafındaki toplam basıncı temsil etmektedir (Mavi:  $-17794.613\text{Pa}$  - Kırmızı:  $83042.508\text{Pa}$ ).

Yapılan literatür araştırmasında geometrik yapının damla-yüzey temas açısına etki ettiği ve bu temas açı ölçüsünün de süperhidrofobik yüzeyler oluşumuna imkan sağlayabileceği anlaşıldı. Kullanım alanına göre farklı avantajlar ve/veya dezavantajlar gösterebilecek olan bu yüzeylerin kullanılacak koşulların sanal olarak oluşturması, gereken şartların hazırlanması ve istenilen testlere tabi tutulabilme imkanı incelenmiştir.

Geçmişten süre gelen uçak kanatlarında buz birikimi ve kristallenme sorununun klasik yöntemler yerine nanoteknolojik uygulamalar ile süperhidrofobik ıslanmaz bir yüzey kazandırarak ıslanmasını ve doğal olarak buz birikimi, kristallenme gibi sorunlarının önüne geçilebileceği saptanmıştır. Ancak uçak kanatları alçak basınç, düşük sıcaklık ve yüksek sürtünmeye mağruz kalma gibi birçok zorlu şartlarda çalıştıkları için bu durumlarda göz önüne alınarak düşünülen bu çözümün ideal bir çözüm olup olmadığını yada burdan kazanacağımız avantaj başka bir konuda daha büyük bir dezavantaja dönüşüp dönüşmeyeceğini tahlil edebilmek için sanal ortamda yüzeyin ve ortam koşullarının oluşturulup analiz edilme zorunluluğunu doğuruyor.

Yapılan bu çalışmada yüzeyimizi uçakların seyir yaptığı stratosfer şartları, uçağın hızı ve dünya etkileriyle sanal gerçeklik ortamda rüzgar analizini yapıldı.

Yaptığımız analizlerde daha önce bu geometrik yapıya sahip olan yüzeylerin süperhidrofobik olduğu kanıtlanması üzerine uçak kanatları üzerinde oluşan büyük bir kuvvet olan sürtünme kuvvetine de avantaj oluşturduğunu farkedildi. Şekil 13'de gösterildiği üzere parçanın alt kısmı düz pürüzsüz yüzeye sahipken orda oluşan hız 71.254 m/s dolaylarında iken parçanın üst kısmında oluşturduğumuz süperhidrofobik yüzeyde zeminden yüzeyin tepe noktasına kadar hatta 5 mikron üstüne kadar hızın 0,006 m/s gibi ihmal edilebilecek bir küçüklükte olduğu farkedilecektir.

Şekil 20'de ise yine bu fikri destekleyecek türbülans yoğunluğu analizi görülebilir. Parçanın pürüzsüz olan alt yüzeyinde türbülans yoğunluğu %18.854 civarındayken üsk kısımda yani süper hidrofobik kısımda bu oran %37.699 dolaylarındadır.

Bir diğer destekleyici örnek ise Şekil 30, Şekil 31 ve Şekil 32'de havanın vektörel gösteriminde hava hareketlerinin süperhidrofobik yüzeyde, çukurlukların arasına girmeyip etrafından geçmesi olmuştur. Havanın bu refleksi parça ve haca arasında bir boşluk filmi oluşturuyor ve havanın yüzeye doğrudan temasına doğal olarak sürtünme ve etkilerine engel olmuş oluyor.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Buz tutmayan yüzey uygulamaları daha önce yararlanılan kaynaklara göre boyalarla ya da çeşitli kimyasal solüsyonlarla uygulanmaktadır. Bu tezde diğerlerinden farklı olarak nanoyüzey tasarımı yapılmıştır. Bu nanoyüzey sayesinde; su tutma ve buzlanma önleneceğinden, sürtünme etkilerini azaltacağından ve ekonomik olacağından birçok firma tarafından tercih edilebilir. Bu tasarım bu anlamda ülke ekonomisine de katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada tasarlanan yüzey geometrisinin, yüzeye süperhidrofobik özellik kazandıracacağı literatür araştırmalarıyla saptanmıştır. Ayrıca süperhidrofobikliğin yüzeye kazandıracığı ıslanmazlık özelliği buzlanmanın da önüne geçeceği, mevcut buzlanma önleyici ve giderici yöntemlere ideal bir alternatif olacağı düşünülmektedir.

Havacılık sektöründeki birçok problemin çözümü olabilecek bu yüzey tasarımlarının aynı şartlar altında daha başka hangi avantajlar ve/veya dezavantajlar doğuracağı, Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanan mühendislik programlarıyla modelleme ve analizleri yapılarak sonuçları değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgularda, tasarlanan yüzey geometrisinin ıslanmazlık ve buzlanma önleyici özelliğinin yanı sıra yapılan hız, türbülans ve basınç analizleri de yüzey ve hava akışı arasında ince bir film gibi boşluk oluşturduğunu ortaya koydu. Yüzey ve hava akışı arasındaki boşluk sürtünmeyi azaltırken buna bağlı olan problemlerinde önüne geçecek olduğunu gösterdi. Bu yeni yüzey geometrisi hava araçlarında buzlanma ve sürtünmeden doğan uçuş güvenliğinin tehlike altına girmesi, yakıt tüketiminin artması ve denge kontrolünün zorluğu gibi birçok önemli soruna çözüm sağlayabileceği saptanmıştır.

Yüzeyi imal etmeden önce sanal olarak oluşturulan çevre şartlarında, yüzeyi modelleyip analiz yapabilmemizi ve gerekli değişikliklere karar verip en iyi çözüm alternatiflerini oluşturmamızı sağlayan mühendislik programlarının bize sunabileceği çok önemli imkanların olduğu görülmektedir. Önümüzdeki süreçte birçok alanda kullanılacak ve birçok sektörün süregelen problemlerine çözüm olacak nanoteknolojinin, modern mühendislik programları ile modelleme ve analizinin gelişen teknoloji için vazgeçilmez bir enstrüman olacağı da oldukça açıktır.

## KAYNAKLAR

- [1]. Nosonovsky, M., Bhushan, B. (2008). Lotus effect an water repellent surfaces in nature. *Multiscale Dissipative Mechanisms and Hierarchical Surfaces*, Part III. Springer: Berlin.
- [2]. Whyman, G., Bormashenko, E., Stein, T. (2008). The rigorous derivation of young, cassie baxter and wenzel equations and the analysis of the contact angle hysteresisphenomeno. *Chemical Physics Letters*, 450, 355-359.
- [3]. Özdoğan, E., Demir, A., Seventekin, N. (2006). Lotus Etkili Yüzeyler. *Tekstil ve Konfeksiyon Dergisi*, 16 (1), 287-290.
- [4]. Chen, J., Li, K., Wu, S., Liu, J., Liu, K. and Fan, Q. (2017). Durable Anti Icing Coatings Based on Self Sustainable Lubricating Layer. *ACS Omega Journal*, 2, 2047-2054.
- [5]. Mishchenko, L., Hatton, B., Bahadur, V., Taylor, A., Krupenkin, T. and Aizenberg, J. (2010). Design of Ice Free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets. *ACS Nano Journal*, 4 (12), 7699-707.
- [6]. Dou, R., Chen, J., Zhang, Y., Wang, X., Cui, D. and others (2014). Anti icing Coating with an Aqueous Lubricating Layer. *ACS Applied Materials and Interfaces Journal*, 6 (10).
- [7]. Boinovich, B. L., Emelyanenko, A. M. (2013). Anti-icing potential of superhydrophobic coatings (2013). *Mendeleev Communications Journal*, 23 (1), 3-10.
- [8]. Farhadi S., Farzaneh, M., Kulinich, S. A. (2011). Anti-icing performance of superhydrophobic surfaces. *Applied Surface Science*, 257 (14), 6264-6269.
- [9]. Si, Y., Guo, Z. (2015). Superhydrophobic nanocoatings: from materials to fabrications and to applications. *Nanoscale science journal*. 14.
- [10]. Kim, P., Wong, T. S., Alvarenga, J., Kreder, M. J. (2012) Liquid-Infused Nanostructured Surfaces with Extreme Anti-Ice and Anti-Frost Performance. *Journal of ACS Nano*, 6(8):6569-77.
- [11]. Çıracı, S. (Nanoteknoloji Strateji Grubu) (2004). *Nanobilim ve Nanoteknoloji Stratejileri. TÜBİTAK Vizyon 2023 Projesi*.  
24.08.2019 tarihinde [http://www.emo.org.tr/ekler/118806694c9d9b1\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/118806694c9d9b1_ek.pdf) adresinden erişildi.
- [12]. Özdoğan, E., Demir, A., Seventekin, N. (2006). Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları. *Tekstil ve Konfeksiyon*, 3, 159-167.
- [13]. Ramsden, J. (2005). What is Nanotechnology? *Nanotechnology Perceptions* 1 (1), 3-17.
- [14]. Feynman, R. P. (1995). *There's Plenty of Room at the Bottom*.  
24.08.2019 tarihinde <http://www.phy.pku.edu.cn/~qhcao/resources/class/QM/Feynman%27s-Talk.pdf> adresinden erişildi.
- [15]. Bozkaya, Y. (2006). *Nanoteknoloji nedir?*  
24.08.2019 tarihinde <http://www.itab.anadolu.edu.tr/itab/pdf/nylp.pdf> adresinden erişildi.
- [16]. Turgut, O., Keskin, H. L., Avşar A.F. (2011). Nanoteknoloji nedir? *Turkish Medical Journal*, 5 (1), 45-49.
- [17]. Direk-Taşbaş, S. (2014). *Polyester dokumanın çok katmanlı nanokompozit süperhidrofobik yüzey ile kaplanması ve islanmazlık özelliklerinin incelenmesi*. Yayınlanmış yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [18]. Üreyen, M.E. (2006). Nanoteknoloji ve Tekstil Uygulamaları. *Gemsan Teknik Bülten*, 2-7.
- [19]. Frankenstein, S., Tuthill, A.M. (2002). Ice Adhesion to Locks and Dams: Past Work; Future Directions. *Journal of Cold Regions Engineering*, 16, 83-96.
- [20]. Reehorst, A.L., Choo, Y., Chung, J., Potapczuk. (2000). Study of icing effects on performance and controllability of an accident aircraft. *Journal of Aircraft*, 37 (2), 253-259.
- [21]. Dow, J.P. (2005). Understanding the Stall-Recovery Procedure for Turboprop Airplanes in Icing Conditions. *Flight Safety Digest*, 24 (4), 1-17.
- [22]. Bell, L. (2006). *ColdFacts: WingContamination*.  
20.08.2019 tarihinde <http://download.aopa.org/epilot/2007/SB02.pdf> adresinden erişildi.
- [23]. Mishchenkoyet, L. (2000). Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets. *Journal of ACS Nano*, 4(12), 7699-7707.

- [24]. American Eagle Flight 4184 kazası haberi. 20.08.2019 tarihinde <http://www.aviation-safety.net/> adresinden erişilmiştir.
- [25]. Australian Government. (2016). Advisory Circular , AC 145-04 Control and delivery of training by a Part 145 AMO, Civil Aviation Safety Authority, 1-63.
- [26]. Karaözbeç, V. (1980). *Aeronotik meteoroloji kurs notları*. Devlet Meteoroloji Genel Müdürlüğü. 20.08.2019 tarihinde [https://books.google.com.tr/books/about/Aeronotik\\_meteoroloji\\_kurs\\_notlar%C4%B1.html?id=Trb0nQEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.tr/books/about/Aeronotik_meteoroloji_kurs_notlar%C4%B1.html?id=Trb0nQEACAAJ&redir_esc=y) adresinden erişilmiştir.
- [27]. Carré, A., Mittal, K.L. (ed.). (2009). *Superhydrophobic Surfaces*. Boston: WSP.
- [28]. Roach, P., Shirtcliffe, N.J., Newton, M.I. (2008). Progress in superhydrophobic surface development. *Journal of Soft Matter*, 7, 224-240.
- [29]. Sharma, R.K. (2011). *Elementary Chemistry*. Discovery. Publishing:England.
- [30]. He, B., Patankar, N.A., Lee, J. (2003). Multiple Equilibrium Droplet Shapes and Design Criterion for Rough Hydrophobic Surfaces, *Langmuir*, 19, 4999-5003.
- [31]. Kim, S.H. (2008). Fabrication of Superhydrophobic Surfaces, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22, 235-250.
- [32]. Bhushan, B. (Ed.). (2011). *Nanotribology and Nanomechanics II*. Berlin: Springer.
- [33]. Barthlott, W., Neinhuis, C. (1997). Purity of the sacred lotus or escape from contamination in biological surface. *Journal of Planta*, 202, 1-8.
- [34]. Gennes, P.G., et al. (2004) *Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves*. Berlin: Springer.
- [35]. Kim, S.H. (2008). Fabrication of Superhydrophobic Surfaces. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 22, 235-250.
- [36]. Hirvi, J.T., Pakkanen, T.A. (2007). Wetting of Nanogrooved Polymer Surfaces. *Journal of Langmuir*, 23, 7724-7729.
- [37]. Wenzel, R.N. (1936). Resistance of Solid Surfaces to Wetting by Water. *Journal of Industrial Engineering Chemistry*, 28 (8), 988-994.
- [38]. Jiang, L., Feng, L. (2010). *Bioinspired intelligent nano-structured interfacial materials*. Chemical Industry Press.
- [39]. Bhushan, B. et al. (2009). Micro, nano and hierarchical structures for superhydrophobicity, self cleaning and low adhesion. *Journal of Phil. Trans. R. Soc. A*, 367, 1631-1672.
- [40]. Cassie, A.B.D., Baxter, S. (1944). Wettability of Porous Surfaces. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, 40 (8), 546-551.
- [41]. Gao, L., McCarthy, T.J. (2009). Wetting 101°. *Journal of Langmuir*, 25 (24), 14105-14115.
- [42]. Alper, M.G. (2003). Alüminyum sürekli döküm yöntemi ile üretilmiş 5052 - 5182 alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik kabiliyetlerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- [43]. Arıkan, M.A.S. (2002). Sonlu Elemanlar Metodunun Mühendislikte Uygulamaları, O.D.T.Ü. Makina Mühendisliği Bölümü, Ankara, 3-7.
- [44]. Bedir, S. (2007). Çift Yönlü Asansör Fren Bloklarının Modellenmesi ve Sonlu Elemanların Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [45]. Larcher, A., Değirmenci, N.C. (2013). *Lecture Notes: The Finite Element Method*. 15.09.2019 tarihinde <https://www.kth.se/social/upload/5261b9c6f276543474835292/main.pdf> adresinden erişildi.
- [46]. Brecher, W.L. (2013). Evaluation of tool path quality. User-assisted CAM for complex milling, in: CIRP. Journal of Manufacturing Science and Technology, 6, 233-245.
- [47]. Dubovska, R. (2012). The quality control of machining process with CAD/CAM systems support, in: Annals of 8th International DAAAM Baltic Conference - Industrial Engineering, Tallin, Estonia, 27-32.
- [48]. Bar-Meir, G. (2013). *Basics of Fluid Mechanics*. Potto Project: Chicago.

## ÖZGEÇMİŞ

**Adı ve Soyadı** :Serhat AKINCI

**Doğum Tarihi** :22.11.1991

**E-mail** :serhatakinci1903@gmail.com

**Öğrenim Durumu** :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2012-2016
Yüksek Lisans	Nanoteknoloji ve İleri Malzemeler Anabilim Dalı	Mersin Üniversitesi	2017-...
Doktora	-	-	-

**Görevler** : T.C. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı

Görev Ünvanı	Görev Yeri	Yıl
Makine Mühendisi	Mersin	2019