

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**RÜZGAR TÜNELLERİNDE FARKLI HAVA HIZLARINDA PARÇACIK
GÖRÜNTÜLEME VE TOHUMLAMA SİSTEMİ TASARIMI VE
PERFORMANS ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

MİHCA ERDEM KÖKLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ANKARA – 2024

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**RÜZGAR TÜNELLERİNDE FARKLI HAVA HIZLARINDA PARÇACIK
GÖRÜNTÜLEME VE TOHUMLAMA SİSTEMİ TASARIMI VE
PERFORMANS ANALİZİ**

HAZIRLAYAN

MİHCA ERDEM KÖKLÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEZ DANIŞMANI

PROF.DR. TAHİR YAVUZ

ANKARA – 2024

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Mühendisliği Tezli Yüksek Lisansı çerçevesinde Mihca Erdem KÖKLÜ tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 15 / 04 / 2024

Tez Adı: Rüzgar Tünellerinde Farklı Hava Hızlarında Parçacık Görüntüleme ve Tohumlama Sistemi Tasarımı ve Performans Analizi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)

İmza

Prof. Dr. Tahir YAVUZ, Başkent Üniversitesi

.....

Doç. Dr. Özgür EROL, Başkent Üniversitesi)

.....

Doç.Dr. Nureddin DİNLER, Gazi Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 02 / 05 / 2024

Öğrencinin Adı, Soyadı: Mihca Erdem KÖKLÜ

Öğrencinin Numarası: 22020186

Anabilim Dalı: Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı: Enerji Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Prof. Dr. Tahir YAVUZ

Tez Başlığı: Rüzgar Tünellerinde Farklı Hava Hızlarında Parçacık Görüntüleme ve Tohumlama Sistemi Tasarımı Ve Performans Analizi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans/Doktora tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 54 sayfalık kısmına ilişkin, 02 / 05 / 2024 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 4'dür. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:.....

ONAY

Tarih: 02 / 05 / 2024

Öğrenci Danışmanı Unvan, Ad, Soyad, İmza:

Prof.Dr. Tahir YAVUZ

Türk Havacılığına...

Mihca Erdem KÖKLÜ

Ankara- 2024

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim süresince ve Tez aşamasında sabır ve iyi niyeti ile değerli desteğini esirgemeyen, kıymetli tez danışmanın Prof. Dr. Tahir YAVUZ'a manevi desteklerini hissettiğim Anne & Babam; Fatma Çiğdem KÖKLÜ & Bahri Semih KÖKLÜ'ye içten teşekkürü borç bilirim.

ÖZET

Mihca Erdem KÖKLÜ

RÜZGAR TÜNELLERİNDE FARKLI HAVA HIZLARINDA PARÇACIK GÖRÜNTÜLEME VE TOHURLAMA SİSTEMİ TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Enerji Mühendisliği Anabilim Dalı

2024

İlgili araştırma, bir Ses Altı Rüzgar Tüneline bağlı PIV (Particle Image Velocity) sisteminin ve PIV'nin doğası uygun tohumlama mekanizması ve izleme sistemi kurgulanmıştır. ilgili çalışmada birleşik mekanizmanın gereksinimleri üzerinde durulmuştur. İlgili araştırma, akış içerisinde izleme sisteminde yer alacak optimum besleme partiküllerine karar verilmesi, hava akışı bölümlerindeki parçacıkların, sabit hızda beslenen hava akışı ile optimum verimlilikle ve tatmin edici şekilde çalışmasının sağlanması hedefleri ile PIV için gerekli elemanların tahsisi değerlendirilmiş ve doğru sonuçların eldesi için nelere dikkat edilmesi gerektiği irdelenmiştir. Sonuç bölümünde halihazırda yapılan bir çalışmada kullanılan tünel ölçüm PIV sonuçları, ANSYS Fluent ile gerçekleştirilebilir k-ε modeline göre valide edilmiştir. Valide edilen modelde sonuçlar arasındaki ortalama tutarsızlık tüm akış alanı değerlendirildiğinde yaklaşık %15,08 ve akış hızının 0,6 m/s den büyük olduğu bölgelerde yapılan ölçüm noktalarının ortalaması alındığında tutarsızlık %5,42 seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Valide edilen akış koşulları ve sınır şartları, gelecekte devreye alınacak Rüzgar Tüneli'ne geometrisine aktarılmış ve ilgili tünelde test edilmesi planlanan CRM Uçak modeli, CFD Fluent hız vektörleri ile ön gövde ve kanat bölgelerinde hız değişimleri 0,05-0,40 Mach hız aralığında vektör görselleri elde edilmiştir. $\pm 0,5$ m/s hız aralığında, akış hızı arttıkça, vektörel hızların akış hızına oranla geometri yüzeyinde artmakta olduğu gözlemlenmiştir. CFD yazılımı aracılığıyla yapılan yaklaşımlar ile elde edilen sonuçlar, akış koşulları ve incelenen hız değerlerinde bir ön fikir vermekte, taslak geometrinin oluşturulması ve ön testlerinin gerçekleştirmesine aracı olmakta ancak deneysel veriler olmaksızın mevcut olgunluk seviyesinde tek başına tasarım girdisi olarak kabul edilmesinin risk barındırdığı tespit edilmiştir. CFD yazılımı aracılığıyla elde edilen veriler ile akış alanı, türbülans, girdap etkileri, dönüm noktaları, hız artış ve düşüş bölgelerinin tespitinde araç olarak ön tasarım faaliyetlerinde kullanılsa da mevcut olgunluk seviyesinde optimize edilen modelde nihai tasarımın dondurulması öncesi deneysel doğrulamanın gerekli olduğu görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELELER: parçacık hız görüntüleme (PIV), besleme mekanizması, rüzgar tüneli, akış görselleştirme

ABSTRACT

Mihca Erdem KÖKLÜ

DEVELOPMENT OF TRACE PARTICLES AND SEEDING OF WIND TUNNEL FLOW AT DIFFERENT AIR VELOCITIES AND PERFORMANCE ANALYSIS

Başkent University Institute of Science and Engineering

Department of Energy Engineering

2024

In the relevant research, the PIV (Particle Image Velocity) system connected to a Subsonic Wind Tunnel and the seeding mechanism and monitoring system appropriate to the nature of PIV were designed. In the relevant study, the requirements of the combined mechanism were emphasized. The relevant research has evaluated the allocation of the necessary elements for PIV, with the objectives of deciding on the optimum feed particles to be included in the flow monitoring system, ensuring that the particles in the air flow sections work with optimum efficiency and satisfactorily with the air flow fed at a constant speed, and what to pay attention to in order to obtain correct results. necessary has been examined. In the results section, tunnel measurement PIV results used in a current study have been validated according to the k- ϵ model that can be implemented with ANSYS Fluent. In the validated model, it was observed that the average discrepancy between the results was approximately 15.08% when the entire flow area was evaluated, and 5.42% when the average of the measurement points in regions where the flow speed was greater than 0.6 m/s. The validated flow conditions and boundary conditions were transferred to the geometry of the Wind Tunnel to be commissioned in the future, and the CRM Aircraft model, which is planned to be tested in the relevant tunnel, was used with CFD Fluent velocity vectors and velocity changes in the front fuselage and wing regions in the 0.05-0.40 Mach speed range. images were obtained. It has been observed that in the ± 0.5 m/s speed range, as the flow rate increases, the vectorial velocities increase on the geometry surface in proportion to the flow rate. The results obtained through approaches made through CFD software give a preliminary idea of the flow conditions and examined speed values, and are instrumental in creating the draft geometry and performing preliminary tests, but it has been determined that accepting it as a design input alone at the current maturity level without experimental data carries risks. Although the data obtained through CFD software was used in preliminary design activities as a tool for determining the flow field, turbulence, vortex effects, turning points, speed increase and decrease regions, it was seen that experimental verification was required before freezing the final design in the model optimized at the current maturity level.

KEYWORDS: particle image velocity (PIV), seeding mechanism, wind tunnel, flow visualization

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında; kurulması hususunda çalışma sürdürülen Ses Altı Rüzgar Tüneli'ne ait Parçacık Hız Görüntüleme “Particle Image Velocity (PIV)” Sistemi fonksiyonu için bir bakış açısı sağlanması hedeflenmiş ve çalışmanın devreye alınacak bir ses altı rüzgar tünelinde uygulanabilirliği incelenmek istenmiştir.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	viii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Tezin Önemi ve Motivasyonu	2
1.2.Literatür Araştırması.....	3
1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı.....	4
2. PIV UYGULAMA ALANLARI.....	6
2.1. PIV Desteği ile Yürütülen Geliştirme Faaliyetleri.....	6
2.2. PIV Uygulamasının Önemi	7
3. METODOLOJİ	8
3.1. Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV) Prensibi.....	8
3.2. PIV Sistemi Tohumlama Mekanizması	10
3.3. Hava Ortamında Tohumlama Partikülü Seçimi.....	11
3.4. Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV) Mekanizması	12
4. SAYISAL ANALİZ VE CFD DOĞRULAMA	15
4.1. Hız Ölçüm Noktaları	16
4.2. Nümerik Model:	19
4.3. Hesaplama Alanı ve Sınır Koşulları.....	21
4.4. Kafes (Ağ) Yapısı ve Hassasiyet Analizi	23
5. SONUÇ VE TARTIŞMA	28
5.1. Akış görselleştirmesi.....	28
5.2. Noktasal Ölçümler	30
5.3. Sonuçların Genel Değerlendirmesi.....	33
6. BULGULAR VE ÖNERİLER	52
6.1. Bulgular	52

6.2. Öneriler.....	53
KAYNAKLAR.....	55
EKLER	
EK 1: PIV Ansys Fluent 2024 Akış Hız Değerler	

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 5.1. Akış Alanı, Hava Akış Hızı ve Vektör Hız Ölçüm Aralıkları.....	13
---	----

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Mikro Kabarcık Jeneratörü BG-1000.....	1
Şekil 1.2. Yüksek hassasiyete sahip hareket yakalama kamerası.....	2
Şekil 3.1. Parçacık Görüntüleme Velosimetri (PIV) deney düzeneği	8
Şekil 3.2. Hava ortamında kullanılan farklı tip tohumlama partikülleri.....	12
Şekil 3.3. Bir filtrasyon akış hücresi ile birleştirilmiş PIV ekipman konfigürasyonu.....	13
Şekil 4.1. Validasyon Modeli Temel Ölçüler (a) Karşıdan Görünüm (b) Perspektif görünümü (c) Yan cephegörünümü.....	15
Şekil 4.2. Şema (a) koordinatlar ve (b) hız ölçümleri konumları.....	17
Şekil 4.3. PIV ölçümleri için kullanılan deney düzeneği.....	18
Şekil 4.4. CRM Uçak Modeli Temel Ölçüleri.....	18
Şekil 4.5. Belirlenen Akış Koşulları.....	20
Şekil 4.6. Hesaplama Alanı Mesh Yapısı ile Perspektif Görünümü.....	22
Şekil 4.7. Akış Ortamını Çevreleyen Taban Yüzeyi, Yan Yüzeyler, Giriş ve Çıkış bölgeleri.....	22
Şekil 4.8. Hesaplama alanı ağ yapısı model alt yüzey görünümü.....	24
Şekil 4.9. Hesaplama alanı ağ yapısı ve model yüzeylerinin ızgara perspektif görünümü.....	24
Şekil 4.10. Hesaplama alanı akış doğrultusu ve giriş çıkış düzlemleri perspektif görünümü.....	25
Şekil 4.11. CRM Uçak Modeli Hesaplama Alanı Mesh Yapısı ile Perfspektif Görünümü.....	25
Şekil 4.12. CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Perspektif Görünümü.....	26
Şekil 4.13. CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Karşıdan Görünümü.....	26
Şekil 4.14. CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Yan Cephe Görünümü.....	27

Şekil 5.1.	(a) Giriş Bölgesinde duman görselleştirmesi (b) CFD tarafından üretilen akış çizgilerinin konumlandırılması.....	29
Şekil 5.2.	(a) Çıkış Bölgesinde duman görselleştirmesi (b) CFD tarafından üretilen akış çizgilerinin konumlandırılması.....	29
Şekil 5.3.	Belirlenen noktalarda deneysel ölçümler ile CFD ile tahmin edilen hava hızı arasındaki karşılaştırma: (a) merkez hattı boyunca, 1 m yükseklikte rüzgar hızı 3m/s'ye ayarlanmışken ve (b) CFD- dikey simetri düzleminde öngörülen hız eğrisi.....	31
Şekil 5.4.	(a) Belirlenen noktalarda deneysel ölçümler ile CFD ile tahmin edilen hava hızı ve (b) 1 m yükseklikte (tam ölçek) yatay bir düzlemde CFD ile tahmin edilen hız eğrisi arasındaki karşılaştırma.....	32
Şekil 5.5.	Model giriş bölümündeki dikey simetri düzlemindeki hız vektör alanlarının karşılaştırılması: (a) CFD simülasyonları ve (b) PIV ölçümleri.....	34
Şekil 5.6.	Model çıkış bölümündeki dikey simetri düzlemindeki hız vektör alanlarının karşılaştırılması: (a) CFD simülasyonları ve (b) PIV Ölçümleri.....	34
Şekil 5.7.	Dikey simetri düzleminde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen vektör alanına sahip hız kontur grafiği.....	36
Şekil 5.8.	0,05 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri..	38
Şekil 5.9.	0,05 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	39
Şekil 5.10.	0,05 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	39
Şekil 5.11.	0,10 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri..	40

Şekil 5.12.	0,10 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	40
Şekil 5.13.	0,10 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	41
Şekil 5.14.	0,15 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri..	41
Şekil 5.15.	0,15 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	42
Şekil 5.16.	0,15 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	42
Şekil 5.17.	0,20 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri..	43
Şekil 5.18.	0,20 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	43
Şekil 5.19.	0,20 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	44
Şekil 5.20.	0,25 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri..	44
Şekil 5.21.	0,25 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	45
Şekil 5.22.	0,25 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	45
Şekil 5.23.	0,30 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri..	46
Şekil 5.24.	0,30 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	46

Şekil 5.25. 0,30 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	47
Şekil 5.26. 0,35 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri..	47
Şekil 5.27. 0,35 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	48
Şekil 5.28. 0,35 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	48
Şekil 5.29. 0,40 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörler..	49
Şekil 5.30. 0,40 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri.....	49
Şekil 5.31. 0,40 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri.....	50
Şekil 5.32. 0,4 Mach hızında X Doğrultusu Vektör Görünümü.....	50
Şekil 5.33. 0,4 Mach hızında X Doğrultusu Noktasal Hız Değerleri.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

C_{e1} , C_{e2}	Model Sabitleri
CRM	Common Research Model
$\mathbf{g}$	Yer Çekimi İvme Vektörü
H	Deneyisel Model Yüksekliği
k	Türbülans Kinetik Enerjisi
p	Basınç
P_k	Üretim Koşulu
Q	Akış Oranı
$\mathbf{u}$	Hız Vektörü
U	Hava Akış Hızı
U_{ref}	Referans Hava Akış Hızı
V	Hacim
z	Dikey Koordinat
z_{ref}	Referans Yükseklik
α	Güç İlkesi Sembolü
ε	Türbülans Dağılım Oranı
μ	Dinamik Viskosite
μ_T	Türbülans Viskositesi
ρ	Hava Yoğunluğu
σ_k , σ_ε	Model Sabitleri

1. GİRİŞ

PIV, Havacılık ve Uzay mühendisliğinde son derece önemlidir; çünkü hava akışı, türbülans ve uçakların ve ilgili sistemlerin tasarımı, geliştirilmesi ve optimizasyonu için kritik olan performans ölçümleri hakkında ayrıntılı bilgi sağlar. Bu teknoloji daha güvenli, daha verimli havacılık çözümlerine katkıda bulunmaktadır.

Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV), Havacılık ve Uzay mühendisliğinde uçak, motor ve diğer bileşenlerin etrafındaki akış hız alanını ölçmek ve analiz etmek için yaygın olarak kullanılan deneysel bir tekniktir. PIV tekniği havacılık & uzay sistemlerinin optimizasyonu, geliştirilmesi ve test edilmesinde önemli bir yardımcı olarak rol oynar.

PIV Sistemini oluşturan bazı temel elemanlar aşağıda özetlenmiştir:

- BG-1000 Modeli, Mikro Kabarcık Jeneratörü

BG-1000 Modeli Mikro Kabarcık Jeneratörü yardımıyla, hava akış ortamında yer alan partiküllerin hız ölçümlerinin, yüksek doğruluk ve mekansal çözünürlük ile gerçekleştirilmesini mümkün kılmaktadır.

İlave olarak jeneratörün sisteme besleyeceği küçük kabarcık boyutu kayma gerilmesi altında deformasyon riskini ve konumsal belirsizlikleri minimize eder. TSI Mikro Kabarcık Jeneratörü BG-1000 yardımıyla, hava akışı ölçümü çok yüksek doğruluk ve mekansal çözünürlükle gerçekleştirilmesi mümkün kılınmıştır.



Şekil 1.1. Mikro Kabarcık Jeneratörü BG-1000

- BG-1000 Modeli, Mikro Kabarcık Jeneratörü ile, hava akışı ölçümleri aracılığıyla ayrıca düşük işletme maliyetleri söz konusu olacaktır.

- OptiTrack Flex 13

İzleme sistemi, uçuş sahasının tavanına konumlandırmak üzere OptiTrack Flex 13, Natural Point Inc., Corvallis, OR, ABD önerilmiştir. Flex 13'ün 1,3 MP görüntüleyici kamera ile yüksek çözünürlük ile görüntü alınması mümkündür. 0,5 mm'den daha düşük bir tolerans dahilinde hareketleri algılayabilir. Flex 3. OptiTrack'in tescilli gerçek zamanlı işleme algoritmalarıyla birleştirilmesi mümkündür.



Şekil 1.2. Yüksek hassasiyete sahip hareket algılama kamerası

İzleme sistemi tarafından elde edilen çevrimiçi konum ve yönlendirme bilgileri, bir kablosuz bağlantı (WiFi) aracılığıyla yerleşik otopilot sistemine (Lisa/S otopilot) beslenir [9].

1.1. Tezin Önemi ve Motivasyonu

Rüzgar Tüneli faaliyetleri test düzeneği yapısı gereği büyük çapta ve yüksek güç ile çalışan fanlar dolayısıyla çok ciddi miktarlarda enerji tüketimi gerektirmektedir; örneklendirilecek olursa, bir uçak modelinin yalnızca Motor Alığı (Engine Intake) aerodinamik karakteristiğinin belirlenmesi için ~ 1 Mach seviyesi tüm ölçümlendirilecek koşulların test edilmesi, 1 milyon paund maliyetinde enerji tüketimi ve mühendislik eforu

birleşimi bir tutara karşılık gelmekle birlikte, oldukça yüksek tutarlı bir iştir. Dolayısıyla kullanılan belli yazılımlar, mühendislik yaklaşımları ve elde edilen geçmiş tecrübeler ışığında en azından test edilecek modelin final geometrisine getirilene kadar olan süreçte ön testlerinin CFD yazılımı ile test edilmesi paralelde belirli düzeltme kat sayıları aracılığıyla deneysel çalışmaların minimize edilerek ve aşağıda bahsedilen diğer iyileştirme adımları ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) desteği ile maliyet düşüm etkisi motivasyon kaynağı olmaktadır.

Tüm teknik koşullar ve iyileştirmeler yanında en büyük motivasyon ilgili rüzgar tüneli testlerinin yerli kaynaklar ile gerçekleştirilebilecek olmasıdır.

Yazılım kullanılarak Parçacık Görüntüleme Hızı (PIV) analizi için test çalıştırmalarının sayısının azaltılması, veri kalitesinden ödün vermeden verimliliği artırmak için deney kurulumunun, görüntü ediniminin ve işleme parametrelerinin optimize edilmesinin sağlanması motivasyon kaynakları olmuştur.

1.2. Literatür Araştırması

Günümüzde PIV birçok alanda uygulamada yer bulmakta ve deneysel veri doğrulama yöntemi olarak kabul görmektedir. Bu kapsamda literatürde örneklerine kolaylıkla ulaşılacak mühendislik uygulama çözümleri sunmaktadır. Bu kapsayıcılıkta Türbülanslı Akışlar; PIV, endüstriyel borular [2] ve nehir kanalları [6] gibi çeşitli ortamlardaki türbülanslı akışları araştırmak için kullanılmıştır. Mevcut araştırmada temel alınan ve validasyonda kullanılan Pakari ve arkadaşlarının gerçekleştirdiği Rüzgar Tüneli Deneyleri aracılığıyla PIV binalar[14], kara ve hava araçları [7] gibi farklı nesnelerin aerodinamik özelliklerini değerlendirmek için rüzgar tüneli deneylerinde sıklıkla kullanılır.

Literatür araştırması ile gelecekte mevcut uygulamanın, Makine öğrenimi algoritmaları [15] kullanılarak daha iyi doğruluk ve verimlilik elde edilmesi amacı ile veri analiziyle entegre edilmesi mümkün kılınacaktır. Böylelikle uygulama zorluklarının üstesinden gelerek uygulamalarını genişletmeyi amaçlayan sürekli gelişmelerle akışkanlar mekaniği araştırmalarında çok yönlü ve değerli bir araç olmaya devam edecektir. Çeşitli alanlardan örnekler, akışkanlar dinamiğinin anlaşılması ve optimize edilmesindeki önemini vurgulamaktadır.

Belirtilen referans çalışmalar Calautit ve Hughes [18,19] ve Calautit ve ark. [20] ticari bir rüzgar tünelinin performansını rüzgar tüneli deneyleri vasıtasıyla ve CFD simülasyonlarını kullanarak değerlendirmiştir. Bu çalışmalarda rüzgar profilini oluşturan çevresel etkiler dikkate alınmamış ve rüzgar profilinin üniform olduğu kabul edilmiştir.

CFD simülasyonları, bir odaya bağlı küçük ölçekli bir modeli kullanılarak gerçekleştirilen rüzgar tüneli deneyleri aracılığıyla doğrulanmıştır. Ölçülen yüzey basıncı katsayıları CFD tahminlerini %20 dahilinde karşıladığı görülmüştür[18], Diğer bir uygulamada [19], rüzgar kuleleri ile donatılmış bir alan içindeki hava akışı dağılımı CFD simülasyonlarından faydalanılarak incelenmiştir. CFD simülasyonlarını doğrulamak için belirli noktaların hız ölçümleri ve akışkan ortam içerisine beslenen duman akışı görselleştirmeleri kullanılmıştır. Hava akış yönüne paralel yerleştirilen model ön ve arka yüzeyleri arasındaki mesafe artırıldığında daha yüksek aerodinamik kuvvetlere maruz kaldığı görülmüştür. İlgili mesafenin artışı yine de nispeten küçük bir artışa neden olmuştur. Model ön ve arka bölümleri arasındaki mesafeyi arttırmanın ve bunları paralel veya kademeli bir düzenlemeye yerleştirmenin etkileri araştırılmıştır.

Montazeri ve Montazeri [21], üç boyutlu (3D) sabit CFD simülasyonları kullanarak, rüzgar kulesiyle donatılmış izole bir odanın rüzgarla çalışan havalandırma performansı üzerindeki çıkış açıklıklarının konumu ve geometrisinin etkilerini değerlendirilmiştir. Çalışma, sabit bir giriş rüzgar kulesi açıklık alanı için, çıkış açıklığının boyutunun sağlanan akış hızını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varmıştır; daha büyük bir çıkış açıklığı daha yüksek bir akış hızı oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Doğrulamada kullanılan PIV ölçümleri ile [14] tek yönde hava akışı için sabit hava akış hızı dikkate alınmıştır. Genel olarak, CFD sonuçları görselleştirilmiş akış modellerini yeniden üretirken, CFD tahminleri deneysel çalışma ile büyük oranda eşleşmiştir.

1.3. Tezin Amaç ve Kapsamı

Özetlenen uygulama alanları içerisinde kurulacak ve işletilecek bir ses altı rüzgar tüneli bünyesinde, Helikopter, Eğitim Uçakları, Muharip uçak ve gelecekte geliştirilecek yeni özgün ürünler ile birlikte geliştirme ürünlerinin de ilgili deneysel verilerini elde edilerek, tasarım geliştirme, iyileştirme ve optimizasyonlar yapılacaktır. Giriş bölümü, Tezin önemi ve motivasyonu kısmında da ifade edildiği gibi tasarım verilerine zemin oluşturacak hız alanlarının tespitinde yalnızca PIV'nin kullanılarak akış alanında hız vektörlerinin tespitinin eldesi, yüksek işletme giderleri dolayısıyla maliyet artışı oluşturmakta ve maliyet etkin bir çözüm olmaktan uzaklaşmaktadır.

Özetlenen gerekçeler dikkate alındığında akış alanları ve hız vektör büyüklüklerinin tespitinde uygun kuşullar oluştuğunda deneysel PIV verilerinin yerine, kullanılan br sonlu elemanlar yazılımı (Mevcut tez çalışmasında ANSYS Fluent 2024 kullanılmıştır) aracılığıyla tasarım girdilerine erişim ve hız verilerinin eldesi, tezin amacını

oluşturmaktadır.

İlgili amaç doğrultusunda halihazırda PIV hız ölçümlerinin elde edileceği bir tünel bulunmaması dolayısıyla PIV ölçümleri Katar Üniversitesi ASPIRE laboratuvarının kapalı devre rüzgar tüneline gerçekleştirilen [14] Pakari ve arkadaşları tarafından da referans alınmış olan PIV Modeli ve PIV Hız ölçüm değerleri kullanılmıştır.

Öncelikli olarak ASPIRE laboratuvarında PIV ölçüm sonuçlarına paralel olarak gerçekleştirilebilir $k - \epsilon$ türbülans modeline göre hız değerleri ANSYS Fluent 2024 ile valide edilmiştir. Valide edilen sonuçlar doğrultusunda kurulacak tünelde test edilecek olan ve açık kaynak olarak kolaylıkla erişilebilen NASA'ya ait Common Research Model (CRM) Uçak model geometrisi gelecekte devreye alınacak tünelin akış koşulları ve kesit özelliklerine uygun şekilde akış alanı belirlenmiştir. Modelin ve akış alanının ızgara (mesh) yapısı oluşturulmuş ve ölçümlenmesi gereken 0,05 Mach – 0,40 Mach aralığında vektörel hız değerleri elde edilmiştir. Vektörel hız değerleri burun ve kanat bölgelerinde incelenmiştir; sonrasında 0,4 Mach akış hızında, merkez çizgisi üzerinde 0,4m yükseklikte hız değerleri ölçümlenmiştir.

İlgili amaç ve kapsam ile tez şu şekilde organize edilmiştir. Başlangıçta PIV çözümünün farklı endüstri ve problem çözümlerinde hangi kapsamda ve ne şekilde kullanıldığı gözlemlenmesi amacıyla literatür taraması ile örnekler üzerinde durulmuş; mevcut tezi içerisine alacak problem tanımlanmış ve çalışmanın seçimi üzerinde önemli noktalar belirtilmiştir. Bölüm 2 ile PIV yöntemi genel uygulamaları ve önemi üzerinde durulmuştur. Takip eden aşamada Bölüm 3 kapsamında metodoloji üzerinde durulmuş; değerlendirilen parçacık görüntüleme hız ölçümü (PIV) temel prensipleri ortaya konulmuş ve hava akışı içerisinde görselleştirmede temel eleman olan tohumlama sistemi kurgusundan bahsedilmiş, hız ölçüm mekanizması tariflenmiş ve hangi koşullar sağlandığında doğruya en yakın PIV sonuçlarının elde edilebileceğinden bahsedilmiştir.

İlerleyen aşamada Bölüm 4 ile CFD doğrulama methodu ve mevcut numerik model ortaya konulmuş, 3 Boyutlu katı model harici olarak import edilmiş ve generate edilmek suretiyle temel üçgensel bölgelere ayrılan sıkı bir kafes (Mesh) yapısı elde edilmiştir. Sınır koşulları ve hesaplama alanı belirlenmiş, parametlerin girişleri yapılmıştır.

Devam eden süreçte Bölüm 5 ile yukarıda özetlenen girdiler değerlendirilerek PIV tünel ölçümleri ANSYS Fluent 2024 ile valide edilen ilk model ve paralelde CFD analizi gerçekleştirilen CRM Uçak modeli ile elde edilen hız vektörleri çözümleri ve noktasal ölçümler ile hız değerleri elde edilmiştir. Son olarak Bölüm 6 ile elde edilen bulgular ile çalışmanın kapsamı göz önüne serilmiş gelecek çalışmalara önerilerde bulunulmuştur.

2. PIV UYGULAMA ALANLARI

İlgili bölüm ile PIV uygulama alanları ve uygulamanın öneminden bahsedilmiştir.

2.1. PIV Desteği ile Yürütülen Geliştirme Faaliyetleri

Bu kapsamda bazı temel PIV önemli uygulama alanları aşağıda özetlenmiştir.

a. Aerodinamik Araştırma:

PIV, uçak yüzeyleri, kanatlar ve kontrol yüzeyleri etrafındaki akış düzenlerini ve türbülansı incelemek için kullanılır. Bu bilgi, mühendislerin aerodinamiği optimize ederek ve sürtünmeyi azaltarak daha verimli ve istikrarlı uçaklar tasarlamasına yardımcı olur.

b. Motor Geliştirme:

PIV, jet motorları ve diğer tahrik sistemleri içindeki akışı analiz etmek için kullanılır. Yanma sürecinin anlaşılmasına, yakıt verimliliğinin artırılmasına ve emisyonların azaltılmasına yardımcı olarak daha çevre dostu ve verimli motorlara katkıda bulunur.

c. Rüzgar Tüneli Testi:

Rüzgar tüneli testleri uçak geliştirmenin önemli bir parçasıdır. PIV, rüzgar tüneli deneylerinde yüksek çözünürlüklü hız alanı verileri sağlayarak mühendislerin çeşitli koşullar altında uçak modellerinin performansını ve stabilitesini değerlendirmesine olanak tanır.

Mevcut tez ile PIV'nin Rüzgar Tüneli uygulamasına odaklanılmıştır.

d. Akış Kontrolü ve Gürültü Azaltma:

PIV, araştırmacıların ve mühendislerin uçakların ürettiği gürültünün kaynaklarını anlamalarına ve bunu azaltmak için stratejiler geliştirmelerine yardımcı olur. PIV, hava akışını ve kontrol mekanizmalarını optimize ederek daha sessiz ve yakıt açısından daha verimli uçuşa katkıda bulunur.

e. Uçak Güvenliği:

PIV, iniş takımı, kanatlar gibi kritik uçak bileşenleri üzerindeki akışı incelemek için kullanılır. Bu bilgi, güvenli ve istikrarlı kalkış ve iniş operasyonlarının sağlanması için çok önemlidir.

f. Sınır Katmanı Analizi:

PIV, uçak yüzeyleri etrafındaki hava akışının sınır katmanını araştırmak için kullanılır. Sınır tabakasını anlamak, özellikle kalkış ve iniş sırasında kaldırma ve sürükleme özelliklerini optimize etmek için önemlidir.

g. Uçak Tasarımı ve Optimizasyonu:

PIV verileri, çeşitli uçak konfigürasyonlarının ve tasarım seçeneklerinin performansına ilişkin bilgiler sağlar. Daha iyi performans, stabilite ve yakıt verimliliği elde etmek için mühendislerin kanat şekillerini, motor yerleşimini ve diğer tasarım parametrelerini optimize etmesine olanak tanır.

2.2. PIV Uygulamasının Önemi

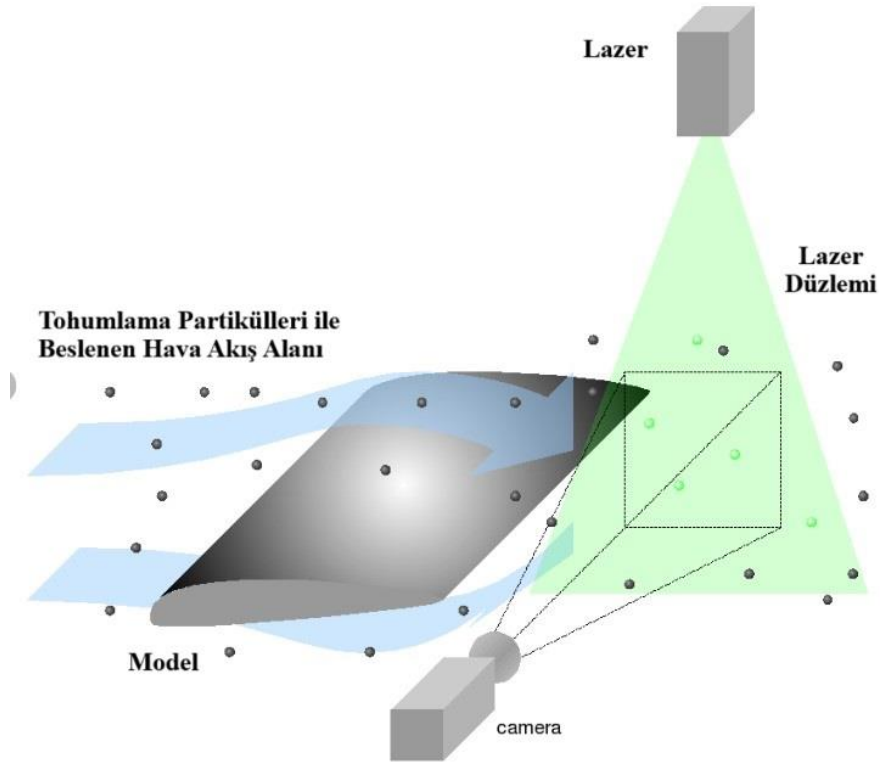
Havacılık endüstrisinde araştırma ve geliştirme için PIV değerli bir araçtır. Mühendislerin yeni teknolojileri ve yenilikleri test etmesine ve geliştirmesine olanak tanıyarak uçağın güvenliğini, verimliliğini ve performansını artırır.

PIV verileri, uçuş kontrol sistemlerini tasarlamak ve doğrulamak için kullanılır. Mühendislerin, kontrol yüzeylerinin uçuş sırasında uçağın davranışını ve dengesini nasıl etkilediğini anlamalarına yardımcı olur. Referans oluşturulması hedeflenen Rüzgar Tüneli ile tasarlanacak hava araçlarının tasarım optimizasyon çalışmalarının yürütülecektir.

3. METODOLOJİ

3.1. Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV) Prensibi

Parçacık görüntüleme hız ölçümü (PIV), optik bir akış görselleştirme yöntemi olup, Akış alanında, anlık hız ölçümleri ve ilgili özellikleri elde etmek için kullanılır [1]. Akışkanlar mekaniğinde, vektörlerin anlık alanlarının tamamını ölçmek için çeşitli akış görselleştirme teknikleri kullanılabilir [3]. Akışkan, yeterince küçük parçacıklar için akış dinamiklerini aslına uygun olarak takip ettiği varsayılan izleyici parçacıklarla tohumlanır. Parçacıkların sürüklendiği akışkan ortam, parçacıkların görülebilmesi için aydınlatılır. Tohumlama parçacıklarının hareketi, incelenmekte olan akışın hızını ve yönünü içeren hız alanını hesaplamak için kullanılır [4].



Şekil 3.1. Parçacık Görüntüleme Velosimetri (PIV) deney düzeneği

İlgili yöntem, tek dağılımlı granüler akışların karmaşıklığını bir adım daha basite indirgemek için kullanılan ön testlerin bir parçası olsa da, akış görselleştirme, deneysel aparat, sınır koşulları ve uygun mekaniğin oluşturulması arasında daha iyi bir değerlendirme zemini oluşturulmalıdır [2].

Test alıştırmalarının sayısını en aza indirmeye yardımcı olacak bazı stratejiler şunlardır:

a. n Deney:

Parçacık konsantrasyonu, tohumlama yoğunluğu ve aydınlatma koşulları gibi en uygun parametreleri belirlemek için bir n deney yapılır. CFD yazılımı ile yapılacak n deneyler, ana deneyin daha etkili bir şekilde kurulmasına yardımcı olabilir.

b. Görüntü Kalitesinin Optimize Edilmesi:

Pozlama süresi, diyafram açıklığı ve odaklama gibi kamera ayarlarını optimize ederek yüksek kaliteli görüntüler sağlanır. Yüksek kaliteli görüntüler daha doğru PIV sonuçlarına yol açabilir ve tekrarlanan deney ihtiyacını azaltabilir.

c. Parçacık Tohumlama Teknikleri:

Düzgün ve iyi dağılmış bir parçacık alanı elde etmek için etkili parçacık tohumlama tekniklerini kullanılır. Bu, hata olasılığını azaltabilir ve hız ölçümlerinin doğruluğunu artırabilir.

d. Kalibrasyon Prosedürleri:

Hem kamera hem de PIV sistemi için kalibrasyon prosedürlerini uygulanır. Doğru kalibrasyon, hata olasılığını azaltır ve tekrarlanan test ihtiyacını en aza indirir.

e. Otomatik Veri İşleme:

Analiz iç akışını kolaylaştırmak için otomatik veri işleme tekniklerini kullanılır. Otomatik algoritmalar büyük veri kümelerini hızlı bir şekilde işleyerek manuel müdahale için gereken süreyi ve yineleme sayısını azaltabilir.

f. İşleme Parametrelerini Optimize Edilir:

Sorgulama alanı boyutu, örtüşme ve korelasyon ayarları gibi işleme parametrelerine ince ayar yapılır; optimizasyon, analizin verimliliğini artırabilir ve tekrarlanan deneme ihtiyacını en aza indirebilir.

g. Çoklu Izgara Analizi:

Farklı uzamsal çözünürlüklerde PIV analizi gerçekleştirmek için çoklu ızgara analiz tekniklerini kullanılır. Bu, kritik alanlarda yüksek çözünürlüğü korurken, daha az ilgilenilen bölgelerde daha hızlı işlemeye olanak tanır.

h. Paralel İşleme:

PIV yazılımınızda paralel işleme özelliklerinden yararlanılır. Parallelleştirme, veri işlemeyi önemli ölçüde hızlandırarak her test çalıştırması için gereken süreyi azaltabilir.

i. Sorgulama Alanlarını Optimize Edilir:

Her test çalıştırmasında görüş alanının tamamını analiz etmek yerine belirli ilgi alanlarına odaklanılır; bu hedefe yönelik yaklaşım, işlem süresini ve kaynak gereksinimlerini azaltacaktır.

j. Test Sonuçlarını Gerçek Zamanlı Olarak Değerlendirilmesi:

Deney sırasında gerçek zamanlı veri değerlendirmesini uygulanır. Sonuçlar gerekli bilgilerin elde edildiğini gösteriyorsa daha fazla test çalıştırması gerekmeyebilir, bu da zamandan ve kaynaklardan tasarruf sağlar[11].

Her zaman herhangi bir optimizasyon önleminin PIV analizinin doğruluğundan ve güvenilirliğinden ödün vermediğinden emin olunmalıdır. Anlamlı sonuçlar elde etmek için verimlilik ile veri kalitesi arasında bir denge kurmak kritik seviyede önem arz etmektedir.

3.2. PIV Sistemi Tohumlama Mekanizması

PIV Tohumlama mekanizmasıyla ilgili olarak, özetleneceği üzere bir yaklaşım belirlenmiştir:

Önerilen hava akımı tohumlama mekanizması, izleyici parçacıklar olarak mikro kabarcıklar üretmek için bir sabun ve damıtılmış su karışımı ile birlikte havadan başka bir şey gerektirmeyecek şekilde kurgulanmıştır.

Sistemi daha uygulanabilir kılan ise PIV ile erken dönemlerde kullanılan büyük helyum kabarcıklarının aksine, mikro kabarcık işlemi, küçük çaplı hava dolu sabun köpükleri ile, hava akışını büyük kabarcıklardan daha hassas bir şekilde takip etmelerine ve sonuç olarak çok daha küçük yapıları ve sınır katmanlarını çözmelerine olanak tanır [11].

Bu amaca doğrultusunda uygulama için aşağıda yer alan hedefler önerilmiştir:

- (i) Bilinen tohumlama özelliklerine sahip sentetik görüntü üretmek için

izleyicilerin sayısal simülasyonlarını gerçekleştirmek;

(ii) Bu sentetik görüntüleri kullanarak, kontrollü koşullar altında tohumlama yoğunlukları, uzamsal kümeleme seviyeleri ve görüntü-velosimetri hataları arasında işlevsel bir ilişki elde etmek;

(iii) Tohumlama yoğunluğu ve izleyicilerin uzamsal kümelenmesi gibi tohumlama özelliklerindeki değişikliklerin bir ortamdaki görüntü-hız ölçümü hatalarını nasıl etkilediğini belirlemek için alınan görüntüleri analiz etmek.

Son olarak,

(iv) (ii)'de geliştirilen fonksiyonu akış ortamına uygulayarak optimum görüntü çerçevesi dizisinin seçilmesini sağlayarak hız hatalarını en aza indirmektir [6].

3.3. Hava Ortamında Tohumlama Partikülü Seçimi

- **HFSB sabun sıvısı:**

HFSB Sabun sıvısı, yüksek oranda sabun köpüğü oluşturmak için tercih edilen renksiz bir sıvıdır. İlgili görselleştirme sıvısı, genel itibarıyla büyük miktarda parçacığa ihtiyaç duyulduğu durumlarda kullanılır. Rüzgar tünelleri gibi büyük ölçekli PIV ölçümlerinde kullanılabilmesi adına sistemi besleyen uygun bir tohumlama jeneratörü gerekmektedir.

- **DEHS:**

DEHS rengi bulunmayan aynı zamanda kokusu olmayan bir sıvıdır. Uzun ömürlü olup suda çözünmemektedir. Parçacıklar üretmek için uygun bir tohumlama cihazına ihtiyaç vardır. 0,91 g/cm³'lük küçük yoğunluk ile bir tohumlama cihazı kullanarak partikül ortalama boyutu 1 µm'den küçük olarak elde edilir.

- **SİS SIVISI:**

Sis sıvısı kokusuz bir sıvıdır. Parçacıklar üretmek için uygun bir tohumlama cihazına ihtiyaç vardır. Sis sıvısı besleme jeneratörü ile yine sabun sıvısında da olduğu üzere rüzgar tünelleri gibi özellikle büyük miktarda parçacığın gerekli olduğu durumlarda kullanılır. Yaklaşık 1,05 g/cm³'lük bir yoğunluk değerine sahip olup kısa ömürlüdür.



Şekil 3.2. Hava ortamında kullanılan farklı tip tohumlama partikülleri

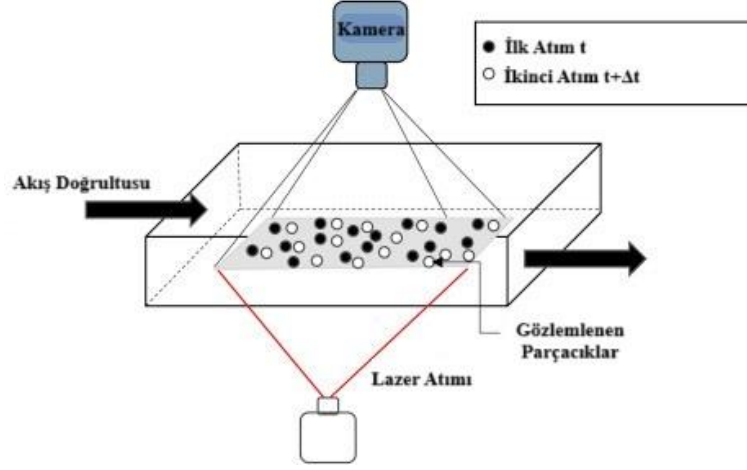
- **Duman Görselleştirme Testleri**

Referans alınan tünel testlerinde Model akış düzenlerini niteliksel olarak incelemek amacıyla akış görselleştirme testleri yapılmıştır [14]. Ölçekli model, 3 m/s serbest akışlı hava hızına sahip rüzgar tüneline yerleştirilmiştir. Giriş ve çıkış model bölümleri üzerinde akışlar, akışa duman verilerek görselleştirilmiştir.

Sis sıvısı SAFEX Fog Generator, Dantec Dynamics aracılığıyla akış ortamına salınmıştır. Akış modelleri, yüksek çözünürlüklü, FASTCAM SA4, Photron kullanılmış ve saniyede 250 kare hızında kayıt altına alınmıştır.

3.4. Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV) Mekanizması

Düzlemsel bir lazer ışığı tabakası iki kez atımlanır sisteme beslenen partiküllerin görüntüleri kamera tarafından kaydedilir. Parçacık görüntülerinin alanda yer değiştirmesi ölçülür. Yöntem parçacıkların akıştaki yer değiştirmesini belirlemek için kullanılır [5].



Şekil 3.3. Bir filtrasyon akış hücresi ile birleştirilmiş PIV ekipman konfigürasyonu

Parçacık Görüntülemeli Hız Ölçümü (PIV) akışkanların, akış alanlarını görselleştirmek ve ölçmek için kullanılan optik ölçüm tekniğidir. Akışkanlar mekaniği ve aerodinamik araştırma ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılır [7]. PIV, bir akışkan içindeki parçacıkların veya izleyici parçacıkların hız dağılımına ilişkin bilgiler sağlayarak araştırmacıların akışın dinamiklerini ve davranışını anlamalarına olanak tanır. PIV ölçümü, model test alanına girmeden önce operatör tarafından tetiklenmektedir [8]. PIV ölçüm yönteminin açıklaması aşağıda verilmiştir:

a. Kurulum ve Hazırlık:

İlgilenilen akışkanın tatbik edilmesinde rüzgar tüneli gibi bir deney düzeneği kullanılır. Genellikle nötr olarak yüzen partiküller veya floresan mikroküreler, helyum kabarcıkları gibi küçük tohum parçacıkları olan izleyici parçacıklar, akış alanının içine verilir. Bu parçacıklar akışı takip eder ve işaretleyici görevi görürler.

b. Aydınlatma:

İzleyici parçacıkları içeren sıvıyı aydınlatmak için tipik olarak darbeli bir lazer olan bir lazer ışık kaynağı kullanılır. Lazer ışık tabakası incelenen akış bölgesine yönlendirilir.

c. Görüntüleme:

Yüksek hızlı bir kamera, izleyici parçacıkların bulunduğu aydınlatılmış düzlemin görüntülerini yakalayacak şekilde konumlandırılmıştır. Kamera, belirli zaman aralıklarında görüntü yakalamak için lazerle senkronize edilir.

d. Görüntü işleme:

İzleyici parçacıklar sıvı akışıyla birlikte hareket ettikçe zaman içinde bir dizi görüntü elde edilir. Görüntüleri işlemek ve her karedeki parçacık konumlarını çıkarmak için özel yazılım kullanılır. Bu süreç genellikle parçacık yer değiştirmelerini belirlemek için [12] çapraz korelasyon gibi teknikleri içerir.

İki boyutlu iki bileşenli parçacık görüntülü hız ölçümüne (PIV) yönelik iyi değerlendirilmiş yüksek doğruluklu algoritmaların üç boyutlu (3D) veriler durumunda genişletilmesi, hesaplama maliyetinde önemli bir artışa neden olur. PIV, hız alanını tahmin etmek için 3 boyutlu çapraz korelasyona dayanarak bu sorundan büyük ölçüde etkilenir.

e. Hız Hesaplaması:

Parçacık yer değiştirme verileri, akış alanı içindeki hız vektörlerini hesaplamak için kullanılır. Parçacıkların ardışık çerçeveler arasında hareket ettiği mesafe ve yön, akışkanın hızı hakkında bilgi sağlar; Düzlemsel Parçacık Görüntülü Hız Ölçümü için başlangıç hız alanını hesaplamak amacıyla teknik önerilmiştir[13]. Önerilen teknik, ilk yinelemede küçük boyutlu sorgulama penceresi kullanılarak hesaplama prosedürünün hızlandırılmasına ve ölçülebilir hızın maksimum değerinin önemli ölçüde artmasına olanak tanıyan Paralel Projeksiyon Korelasyonu tekniğinin ilgilenilen bölge ile birlikte kullanılmasına dayanmaktadır.

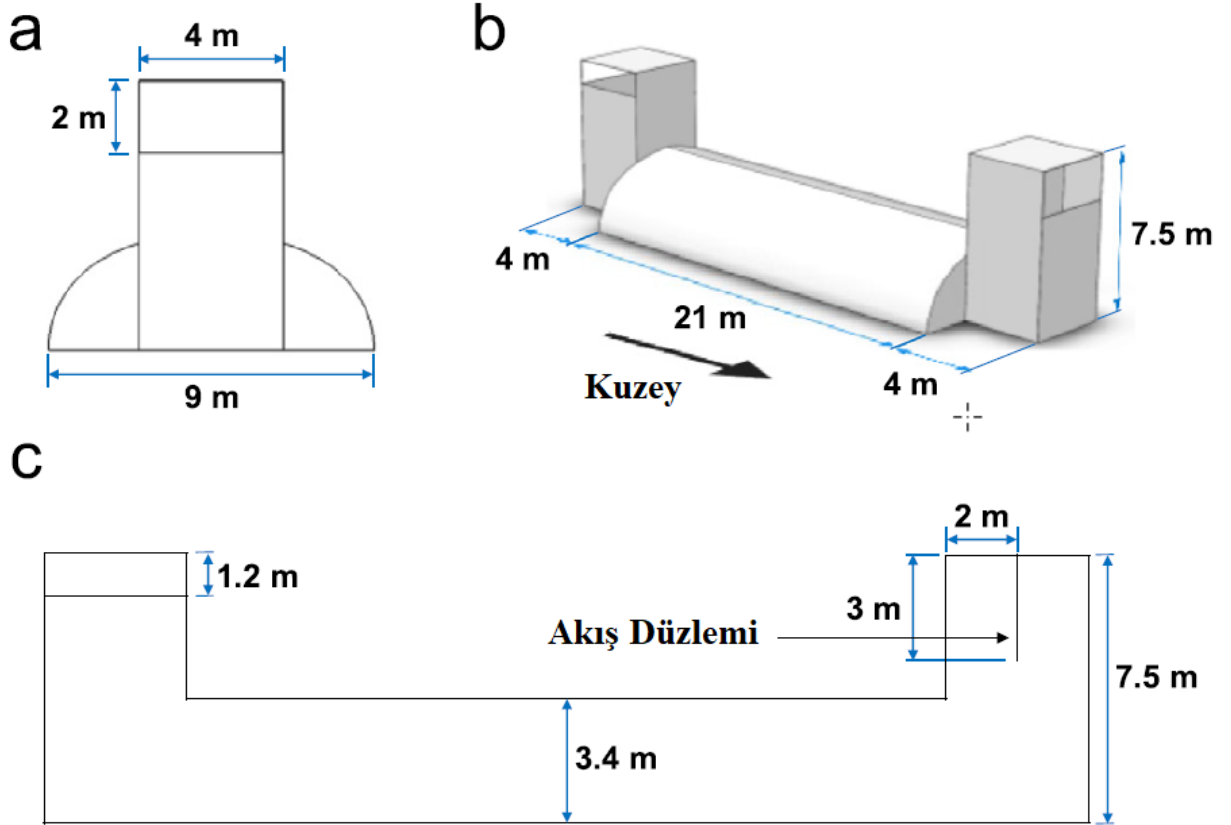
f. Veri görüntüleme:

Ortaya çıkan hız verileri, akışkandaki hız dağılımını temsil eden vektör alanları veya kontur grafikleri olarak görselleştirilir. Bu görselleştirmeler araştırmacıların akış düzenlerini ve özelliklerini anlamlandırmada yardımcı olur.

4. SAYISAL ANALİZ VE CFD DOĞRULAMA

Duman görselleştirilmesi, noktasal hızların elde edildiği PIV ölçümleri Katar Üniversitesi ASPIRE laboratuvarında kullanımda olan, kapalı devre rüzgar tüneline gerçekleştirilmiştir. Mevcut çalışmada, Rüzgar Tüneli Hız verileri validasyonda referans alınan [14] Pakari ve arkadaşlarının da yer verdiği üzere rüzgar tüneli test bölümü 2 m'ye 2 m'lik bir kesit alanına ve 3 m'lik bir uzunluğa sahiptir. Modelin ön alanının rüzgar tüneli test bölümünün kesit alanına oranını temsil eden blokaj oranı %1,14'e eşit olmuş; bu nedenle distorsiyon etkileri ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabulü yapılmıştır [24].

PIV ölçümleri yapılan ve validasyon için kullanılan modele ait temel ölçüler Şekil 4.1'de yer aldığı üzere paylaşılmıştır.



Şekil 4.1. Validasyon Modeli Temel Ölçüler (a) Karşıdan Görünüm (b) Perspektif Görünümü (c) Yan Cephe Görünümü

Modelin keskin kenarlar içermesi ve Reynolds sayısının 11,000'ı aşması nedeniyle akışın Reynolds sayısından bağımsız olduğu kabul edilmiş ve tam ölçekli dinamik benzerlik sağlanmıştır.

İlgili örnek çalışmada entegre bir deneysel yaklaşım benimsenmiştir. Duman görselleştirme deneyleri niteliksel sonuçlar alınmıştır, Hız ölçüm noktaları ile alınan değerler ile de niceliksel sonuçlar elde edilmiştir. elde edilen CFD modelini değerlendirmek ve doğrulamak için rüzgar tüneli deneyi yapılmıştır. Bu çalışmada ANSYS Fluent ile elde edilen hız değerleri, rüzgar tüneli hız değerleri ile karşılaştırılmıştır.

4.1. Hız Ölçüm Noktaları

Rüzgar Tüneli Hız verileri referans alınan [14] Pakari ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada da yer verilen Ölçekli model içindeki hava hızlarının niceliksel verilerini elde etmek için, Şekil 4.2'de gösterildiği gibi ölçüm noktalarına erişim sağlamak amacıyla model zeminine 13 mm çapında 19 delik açılmıştır.

Ölçekli model, rüzgar tüneline yerleştirildikten sonra deliklere probalar yerleştirilerek ölçümler alınmış ve Rüzgar tünelindeki serbest akışlı hava hızı 3 m/s'ye ayarlanmıştır. Her noktada hız 2 dakika boyunca ölçülmüş ve zaman ortalaması değeri kaydedilmiştir, böylece kararlı durum hız eşdeğeri elde edilmiştir.

Ölçekli model içindeki hava hızlarının niceliksel verilerini elde etmek için, Şekil 4.1'de gösterilen ölçüm noktalarının yerleşimi belirlenmiştir. hız probu 0635-1535, Testo kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Hız ölçümlerinin belirsizliği $\pm 0,03$ m/s olduğu belirtilmiştir.

Modelin giriş ve çıkış noktaları üzerinde zaman ortalamalı hız alanlarını elde etmek amacıyla, PIV deneyleri yapılmıştır.

PIV ölçümü deney düzeninin şeması Şekil 4.3'de sunulmaktadır. SAFEX Fog Generator, Dantec Dynamics ile EUROLITE duman sıvısı P Duman sıvısını ısıtmak ve duman üretmek için bir duman jeneratörü kullanılmıştır. Duman, rüzgar tüneline yerleştirilen ve ortalama 1 μ m damlacık boyutuna sahip bir duman besleyici aracılığıyla akışa girişi sağlanmıştır.

Rüzgar tünelindeki serbest akışlı hava hızı 3 m/s olarak ayarlanmıştır. Duman damlacıklarını aydınlatmak için DualPower 200-15, Dantec Dynamics 532 nm dalga boyuna sahip lazer tabakasına sahip lazer kullanılmıştır. İnce lazer tabakasını oluşturmak için bir optik kombinasyonu kullanılmış; iki lazer ışık atımı 500 μ s aralıklarla ve 7,4 Hz frekansta üretilmiştir. 2048 x 2048 piksel çözünürlüğe ve 60 mm CCD lense sahip bir Şarj

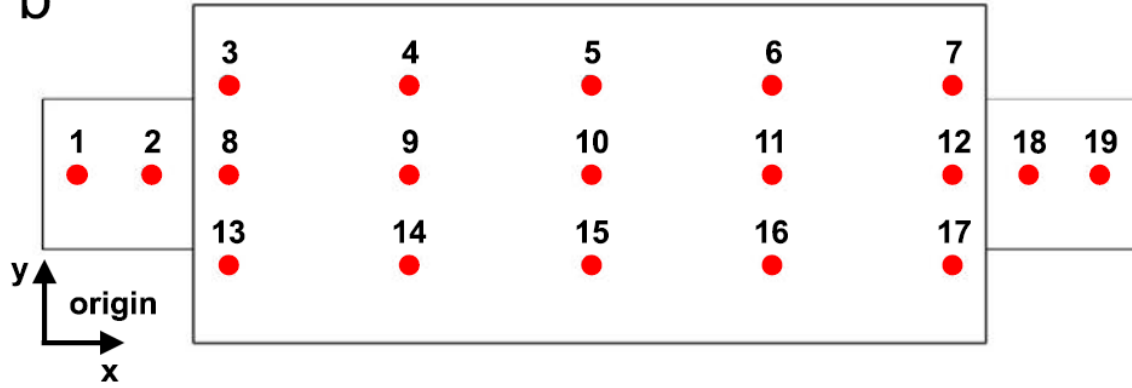
Bağlantılı FlowSense, Dantec Dynamics Cihaz kamerası oluşturulan lazer tabakasına dik olarak yerleştirilmiştir.

Kamera ve lazer sistemi DynamicStudio sürüm 3.30 yazılımı kullanılarak çalıştırılmış olup Dantec Dynamics zamanlayıcı kutusu aracılığıyla senkronize edilmiştir. Vektör alanı çözünürlüğü 32 x 32 pikseldir. PIV ile elde edilen hız ölçümlerinin istatistiksel olarak bağımsız olduğu ve normal dağılıma uyduğu kabul edilir [26].

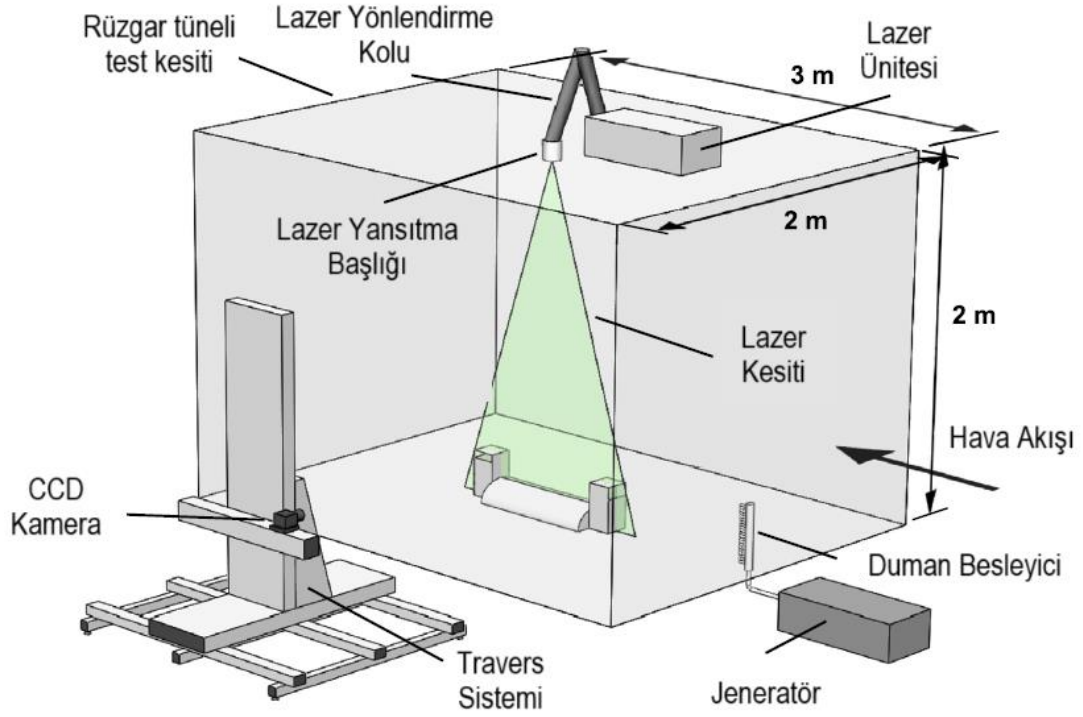
a

point number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
x (cm)	2.3	9.5	16.3	32.3	48.3	64.3	80.3	16.3	32.3	48.3	64.3	80.3	16.3	32.3	48.3	64.3	80.3	87.0	93.3
y (cm)	15	15	23	23	23	23	23	15	15	15	15	15	7	7	7	7	7	15	15

b

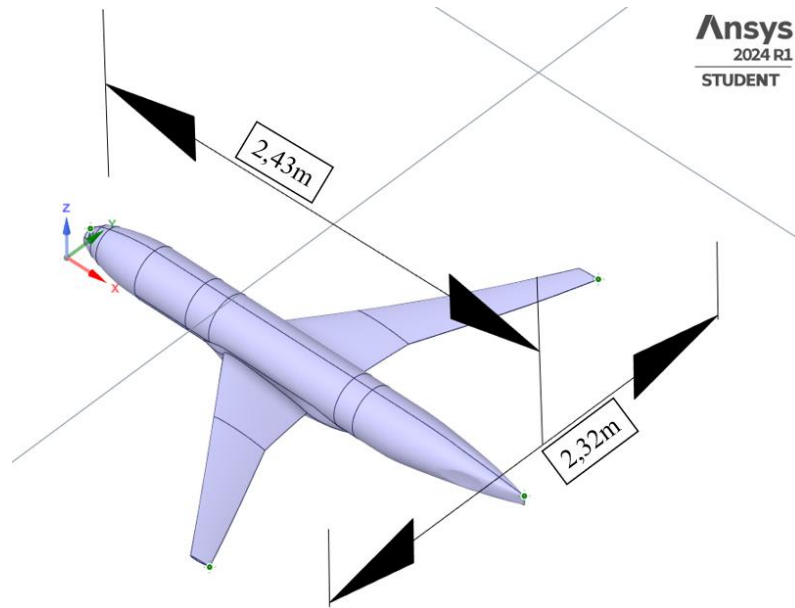


Şekil 4.2. Şema (a) koordinatlar ve (b) hız ölçümleri noktaları



Şekil 4.3. PIV ölçümleri için kullanılan deney düzeneği

Valide edilen model yardımıyla test edilecek CRM Uçak modeli 2,43m uzunluğunda ve 2,32 m kanat genişliğinde olup belirtilen temel ölçüler, Şekil 4.4 aracılığıyla yerleşimde gösterilmektedir.



Şekil 4.4. CRM Uçak Modeli Temel Ölçüleri

4.2. Nümerik Model:

CFD simülasyonları sonlu elemanlar yazılım paketi ANSYS Fluent 2024 ile gerçekleştirilmiştir. ANSYS Fluent, ürün performansını optimize edilmesi amacıyla karmaşık problemlerin bilgisayar simülasyonlarını, kısa zamanda çözümleme olanağı tanır ve maliyet kazanımı sağlar.

Çeşitli uygulamalarda birçok farklı akış modelleme seçeneği ile kapsamlı bir şekilde doğrulanmış bir yazılımla simülasyon sonuçları edinilmesine olanak sağlar. ANSYS Fluent ile akışkan alanlarında gelişmiş fizik modelleri oluşturabilir ve çeşitli akışkan olaylarını analiz edilebilir.

ANSYS Fluent aracılığıyla akış laminer, Sparat-Almeras, $k-\epsilon$, $k-\Omega$, transition $k-k\Omega$, Large Eddy Simulation seçenekleri dahil tanımlı bir çok farklı akış modeli kullanım opsiyonu sunulmuştur. Mevcut çalışmada Rüzgar Tüneli Hız verileri referans alınan [14] Pakari ve arkadaşlarını tarafından da çözümlemede kullanmış olan $k-\epsilon$ turbulence modeli ile akış analiz edilmiştir.

3 boyutlu sabit Reynolds ortalama Navier-Stokes (RANS) denklemleri, hava akışını simüle etmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntem olan standart $k-\epsilon$ türbülans modeliyle birlikte çözülmüştür. Standart $k-\epsilon$ modelinin, deneysel ölçümlerle karşılaştırıldığında hız tahmininde hava akışları için üstün performans sağladığını göstermiştir [22].

Gerçekleştirilebilir $k-\epsilon$ modelinin doğrudan faydası, hem düzlemsel hem de jet uçakların yüzeyleri gibi dairesel yüzeylerde yayılma hızına ilişkin gelişmiş tahminler sağlamasıdır. Aynı zamanda dönme, güçlü ters basınç gradyanları altındaki sınır katmanları, ayırma içeren akış gradyanları için üstün performans sergiler [28].

Model	Model Constants
☐ Inviscid ☐ Laminar ☐ Spalart-Allmaras (1 eqn) ☒ k-epsilon (2 eqn) ☐ k-omega (2 eqn) ☐ Transition k-kl-omega (3 eqn) ☐ Transition SST (4 eqn) ☐ Reynolds Stress (7 eqn) ☐ Scale-Adaptive Simulation (SAS) ☐ Detached Eddy Simulation (DES) ☐ Large Eddy Simulation (LES)	C2-Epsilon 1.9 TKE Prandtl Number 1 TDR Prandtl Number 1.2
k-epsilon Model ☐ Standard ☐ RNG ☒ Realizable	
Near-Wall Treatment ☒ Standard Wall Functions ☐ Scalable Wall Functions ☐ Non-Equilibrium Wall Functions ☐ Enhanced Wall Treatment ☐ Menter-Lechner ☐ User-Defined Wall Functions	User-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers TKE Prandtl Number none TDR Prandtl Number none
Options ☒ Curvature Correction ☐ Production Limiter	
Curvature Correction Options CCURV constant 1	

Şekil 4.5. Belirlenen Akış Koşulları

Belirtilen denklemler aracılığıyla manuel olarak herhangi bir analitik çözümleme yapılmamış olup k –ε modelinin matematiksel gösterimidir. Mevcut değişkenler Şekil 4.5’te yer aldığı üzere ANSYS Fluent programında tanımlı olup akış hız sonuçları böylelikle hesap edilmiştir.

İlgili denklemler aşağıda yer almaktadır.

Akışkan sıkıştırılmaz kabul edilmiş olup süreklilik denklem aşağıda verilmiştir

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (4.1)$$

$\mathbf{u}$ hız vektörü olup momentumun korunumu denklemi:

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot ((\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) + \rho \mathbf{g} \quad (4.2)$$

Türbülans kinetik enerjisi k için taşıma denklemi şöyledir:

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot ((\mu + \mu_T / \sigma_k) \cdot \nabla k) + P_k - \rho \varepsilon \quad (4.3)$$

Üretim Koşulu denklemi:

$$P_k = \mu_T (\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)) \quad (4.4)$$

Türbülanslı dağılım hızı ε için taşıma denklemi ise şu şekildedir:

$$\rho \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot ((\mu + \mu_T / \sigma_\varepsilon) \cdot \nabla \varepsilon) + C_{\varepsilon 1} \varepsilon : k \cdot P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon^2 : k \quad (4.5)$$

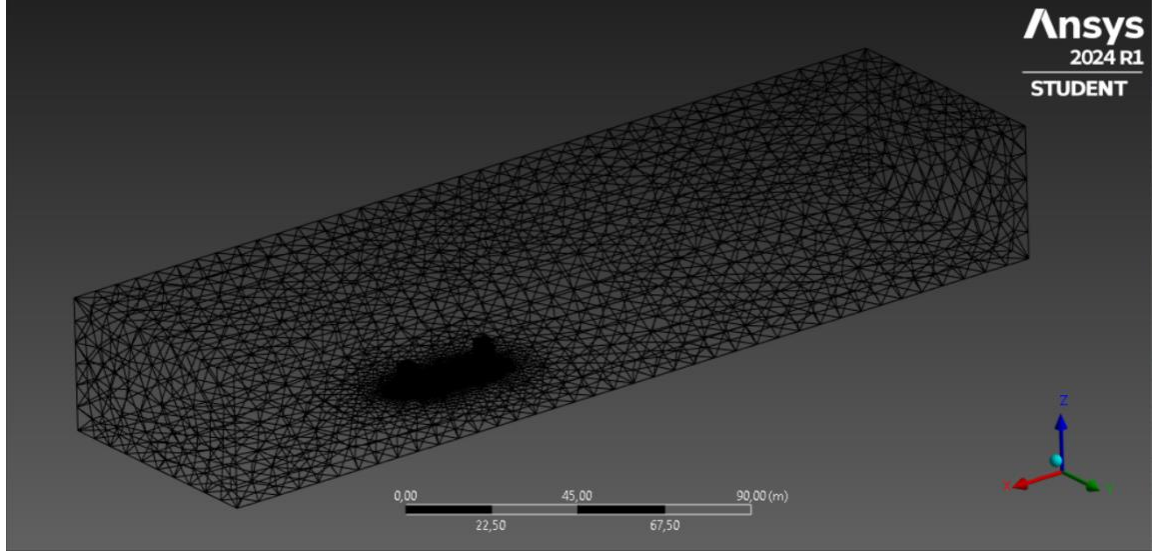
burada σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$ ve $C_{\varepsilon 2}$ model sabitleridir.

4.3. Hesaplama Alanı ve Sınır Koşulları

Hesaplama alanı, Mesh yapısı ile birlikte Şekil 4.6'da ve Yüzey tanımlamaları ve koordinat eksenleri üzerinde yerleşimi Şekil 4.7'de gösterilmektedir. Hesaplama alan boyutu en iyi uygulama model geometrisi alan boyutundan etkilenmemesi için her yönde yeterince uzak mesafede yer alacak şekilde alan genişletilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi alanın x eksenine bakan yönü hız girişi, karşı duvarı ise çıkış olarak ayarlanmıştır.

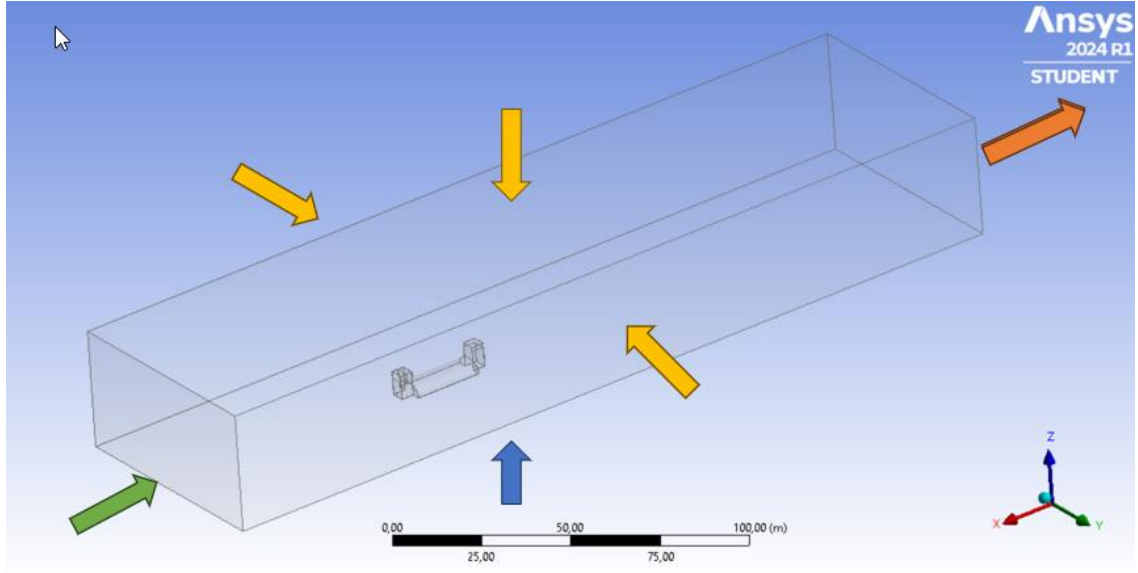
Deneylerin CFD simülasyonunu gerçekleştirmek için tutarlı sınır koşullarının tanımı önem arz etmektedir [10]. burada U_z yüksekliğindeki rüzgar hızıdır, U_{ref} , referans yüksekliğindeki referans rüzgar hızıdır ($z_{ref} = 10\text{m}$ rüzgar hızını ölçtüğü yüksekliktir ve α , güç yasasının üssüdür ve engel yüksekliği 9 m'den az olan açık bir alanı temsil eden 0,14 olarak ayarlanmıştır.)

$$U_z : U_{ref} = (z : z_{ref})^\alpha \quad (4.6)$$



Şekil 4.6. Hesaplama Alanı Mesh Yapısı ile Perspektif Görünümü

Şekil 4.7’de yer aldığı üzere akış ortamı ve çevreleyen Taban Yüzeyi, Yan Yüzeyler, Giriş & Çıkış bölgeleri tanımlanmış ve koordinat ekseninde yerleşimi sağlanmıştır. Hava akış ortamında distorsiyon etkilerinin oluşmasını engelleyecek seviyede akış alanı geniş tutulmuştur.



- Yan Yüzeyler, Paralel Duvar Düzlemi
- Giriş Yüzeyi
- Çıkış Yüzeyi
- Taban Yüzeyi, Duvar Düzlemi

Şekil 4.7. Akış Ortamını Çevreleyen Taban Yüzeyi, Yan Yüzeyler, Giriş ve Çıkış bölgeleri

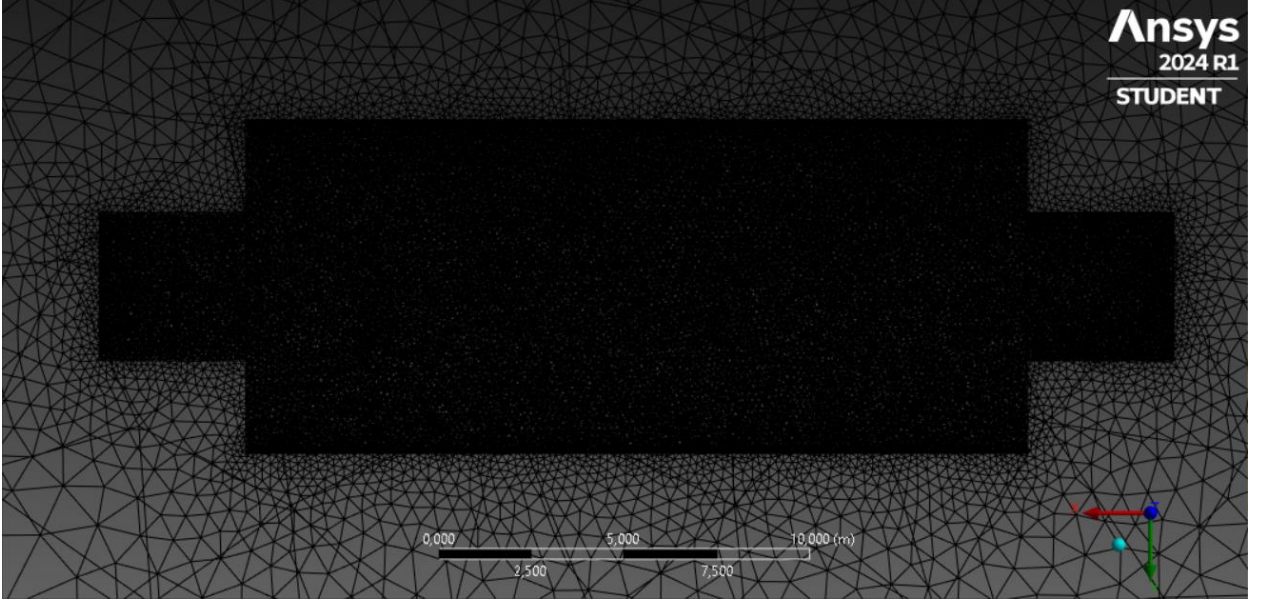
Alanın üst ve yan duvarları simetriktir, zemini düz yüzey, model yüzeyi ise ölçüm alanları olarak belirlenmiştir. Launder ve Spalding'in [23] Montazeri ve Montazeri [21] tarafından yürütülen çalışmaya benzer şekilde, rüzgar tüneli test bölümündeki yaklaşan akış profilinin dikey yönde üniform olduğu göz önüne alındığında, doğrulama için hesaplama alanının girişinde üniform bir giriş rüzgar profili uygulanmıştır.

CFD sonuçları ile rüzgar tüneli deneyleri arasındaki sınır koşullarının eşleşmesini irdeleyen CFD simülasyonları yer almıştır. Bununla birlikte, model üzerinde belirlenen rüzgar hızları ve yönünde elde edilen hava değişim hızı ve hava akışı dağılımının değerlendirilmesi Bölüm 4.4'te hesaplama alanının giriş rüzgar hızı profili, çevredeki etkileri dikkate alınarak tanımlanmıştır.

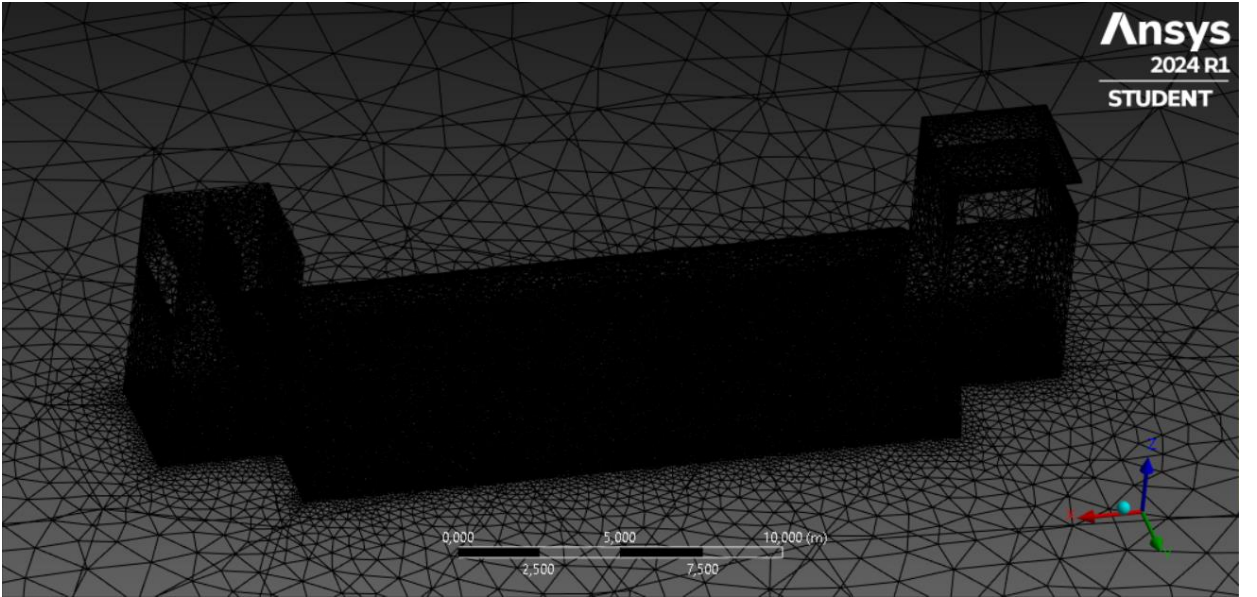
4.4. Kafes (Ağ) Yapısı ve Hassasiyet Analizi

Hesaplama alanı, Şekil 4.6'da gösterildiği üzere düzgün olmayan bir ağ kullanılmış üçgensel bölgelere bölünmüş olarak bir kafes yapısı oluşturulmuştur.

Yerleşimi sağlanan model Eğrilik normal açısı, (Bir öge yüzeyinin yayılmasına izin verilen maksimum açı) 18 derece olarak belirlenerek daha ince bir ağ yapısı oluşması sağlanmıştır. Proximity Gap Faktörü 6 olarak seçilmiş, böylelikle en ince katman üzerinde minimum öge sayısı en az 6 adet olacak şekilde Ağ yapısı sıklaştırılmış bir biçimde kurgulanmıştır, capture curvature fonksiyonu aktifleştirilmiş böylelikle eğimli yüzey bölgelerinde ölçüm hassasiyeti artırılmıştır; ince yüzeylerde ve köşe bölgelerinde üçgensel bölge yoğunluğu artmış ve havanın temas ederek akışın yön ve hız değiştireceği alanların kolaylıkla algılanarak daha gerçekçi sonuç alınması ve yakınsaması kolaylaşmıştır. Şekil 4.8. taban yüzeyi ve Şekil 4.9 perspektif yerleşimde gözlemlenebileceği gibi x,y,z koordinatında Izgara yapısı, uniform olmayan bir ağ kullanılarak 128.931 Düğüm ve 640.771 ayırık elemanın yer aldığı biçimde tanımlanmıştır. Model üzerinde akışın değişkenlik göstereceği bölgelerde üçgensel bölge yoğunluğu tanımlamalar doğrultusunda artmış ve CFD analizi setup ve çözümlemesinde kullanılmıştır.

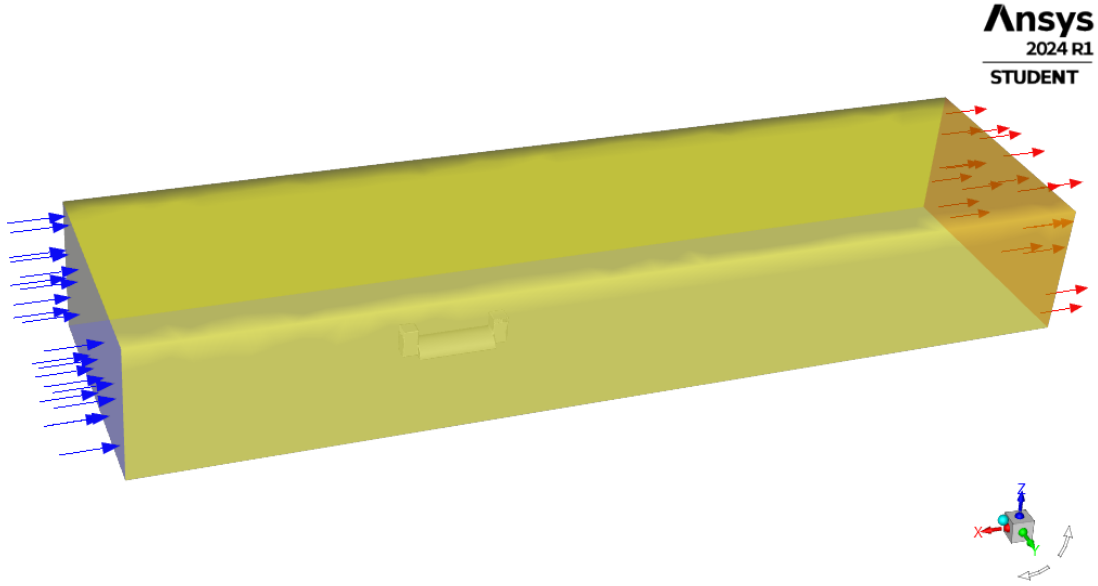


Şekil 4.8 Hesaplama alanı ağ yapısı model alt yüzey görünümü



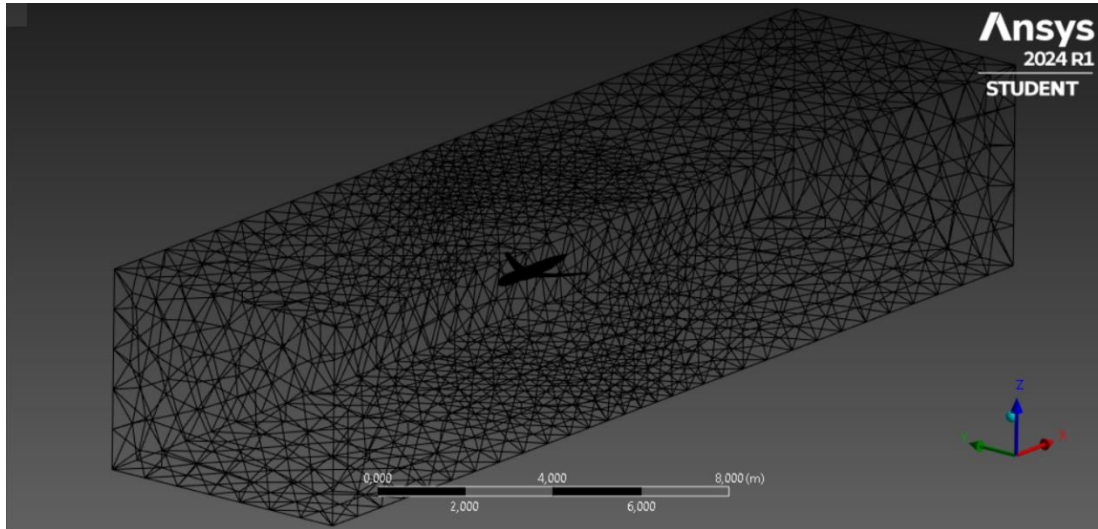
Şekil 4.9 Hesaplama alanı ağ yapısı ve model yüzeylerinin ızgara perspektif görünümü.

Ağ yapısı Şekil 4.9’da yer aldığı üzere kurgulanan modelin Sayısal analizi ve matematiksel modeli çözümlenmek üzere giriş ve çıkış düzlemleri tanımlanarak çözümleyici tipi basınç bazlı, sabit bir bir koordinat sistemine göre hız, mutlak hız olarak belirlenmiş, Şekil 4.10’da gösterilen yerleşim ve doğrultuda sabit hız ile akış değeri 3 m/s girişi yapılmış ve çıkış bölgesi kesiti basınç değeri 0 Pa olarak belirlenmiştir. İlgili çözüm enerji eşitliğinden bağımsız olarak hesap edilmiştir.



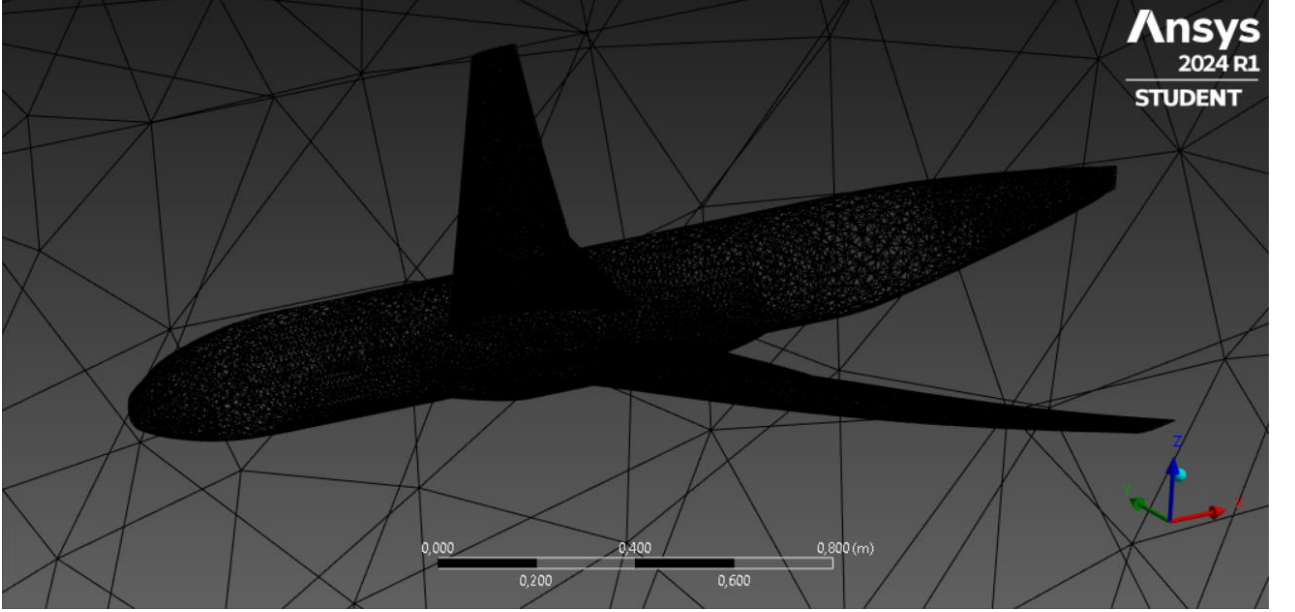
Şekil 4.10. Hesaplama alanı akış doğrultusu ve giriş çıkış düzlemleri perspektif görünümü

Doğrulamada kullanılan mevcut çalışmanın ışığında kurulacak rüzgar tüneline test edilecek modelin sınır şartları, aynı paralellikte belirlenmiş ve mesh yapısı oluşturulmuştur. İlgili çalışmada test edilecek tünel kesiti Şekil 4.11’de görülen yerleşim ile 6,4m x 4,8m olacak şekilde akış alanı belirlenmiştir.

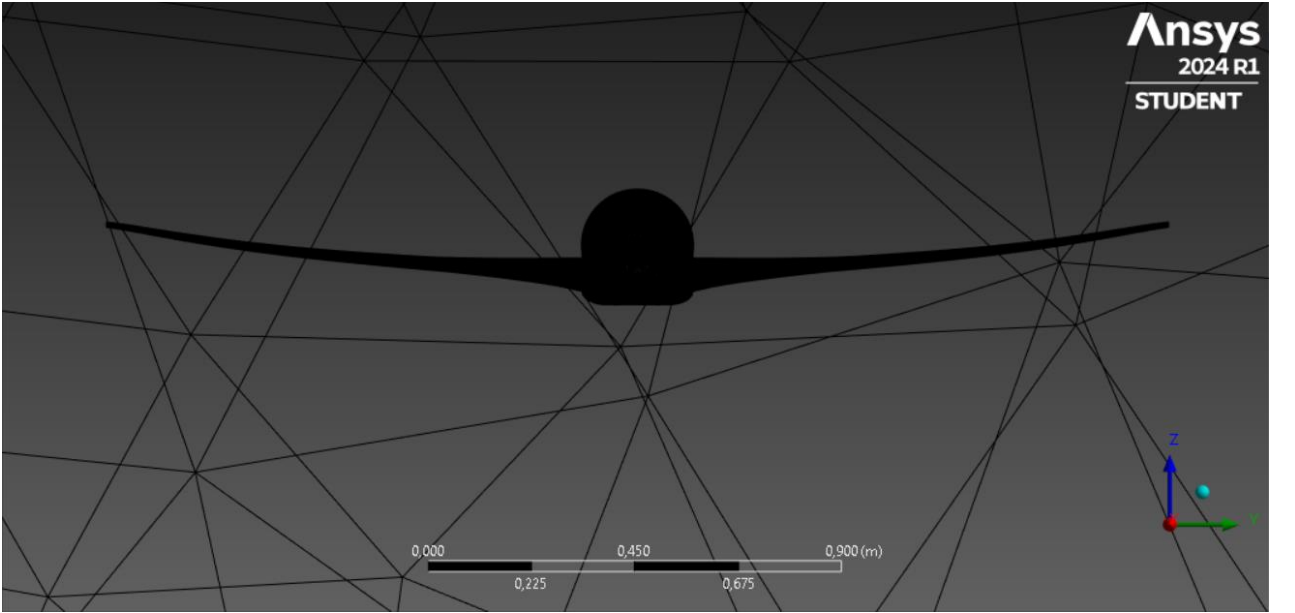


Şekil 4.11. CRM Uçak Modeli Hesaplama Alanı Mesh Yapısı ile Perfspektif Görünümü

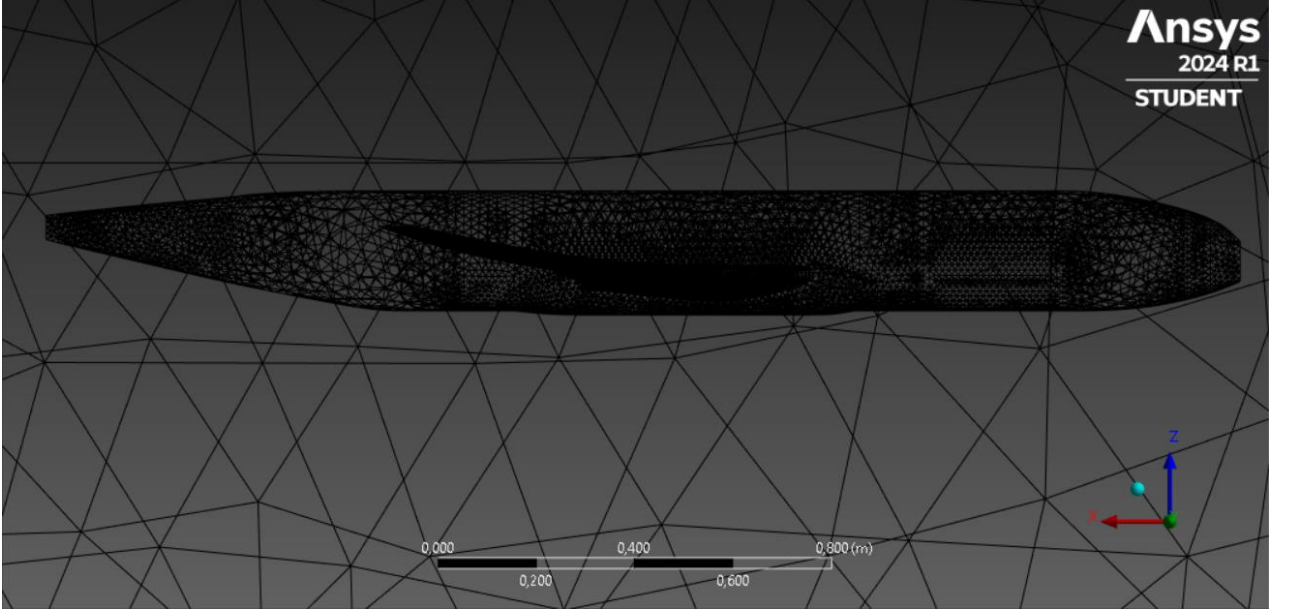
ANSYS 2024 CFD Simulasyonları elde edilen; Sırasıyla, Şekil 4.12. CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Perfspektif Görünümü, Şekil 4.13 CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Karşıdan Görünümü ve Şekil 4.14 CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Yan Cephe Görünümü görsellerde yer almaktadır.



Şekil 4.12. CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Perfspektif Görünümü



Şekil 4.13. CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Karşıdan Görünümü



Şekil 4.14. CRM Uçak Modeli Mesh Yapısı, Yan Cephe Görünümü

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu kısım üç bölüm olarak değerlendirilecektir. Bölüm 5.1'de Model üzerinde akış görselleştirilmiş hız noktası ölçümleri incelenecek ve Bölüm 5.2'de Model üzerinde hava akış hızının noktasal ölçümleri ortaya konacak ve Bölüm 5.3 ile CFD ile tahmin edilen sonuçların genel değerlendirmesi yapılacak olup sonuçlar tartışılacaktır.

Sayısal sonuçlar ile rüzgar tüneli deneysel verileri arasında genel bir uyum elde edilmiştir. Gözlemlendiği üzere çalışma, daha yüksek hava akış hızlarında daha uyumlu sonuçlar elde edildiği görülecektir,. Jones ve Kirby, Rüzgar hızının 2 m/s'den yüksek olduğu durumlarda kaldırma kuvveti etkilerinin ihmal edilebileceği sonucuna varılmıştır[17]. Rüzgar hızının 0,6 m/s'den büyük olduğu bölgelerde doğruluk derecesinin kayda değer bir artış gösterdiği gözlemlenmiştir.

5.1. Akış görselleştirmesi

Kamera tarafından yakalanan hava akışı içerisinde yer alan partiküllerin dağılımı model üzerinde, giriş kulesinde CFD modeli tarafından üretilen akış gösteren akım çizgileri arasındaki bir karşılaştırma, Şekil 5.1.'de gösterilmektedir. Şekilde gösterildiği gibi, simüle edilen akış modeli, görselleştirilen akışla eşleştiği gözlemlenmiştir; hava, model kesitine çarptıktan sonra hızlanmış ve aşağıya doğru yönlenmiştir.

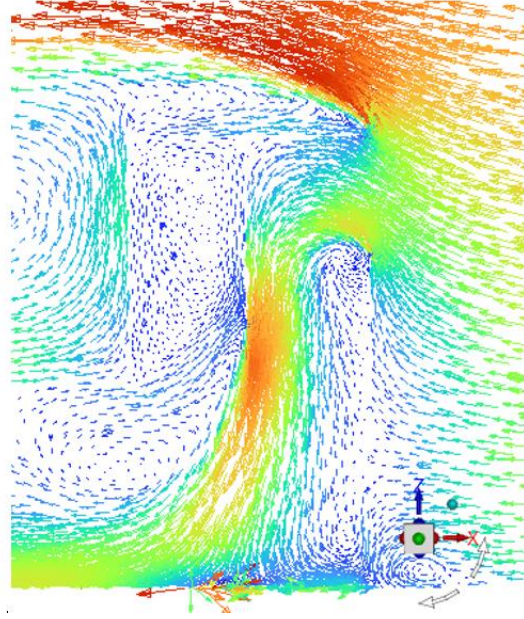
Benzer şekilde, çıkış bölgesinde görselleştirilmiş ve simüle edilmiş akış modelleri arasında niteliksel bir uyum sergilediği Şekil 5.2'de görülmüştür. (Gösterimin netliği için, model etrafındaki simüle edilmiş akım çizgilerinin ve düşük hızlara (devridaim) sahip akım hatlarının filtrelendiğine dikkat edilmelidir.) Görselleştirilmiş ve simüle edilmiş akış modelleri arasında, CFD modelinin geçerliliğini gösteren bir uyum gözlenmiştir.

a



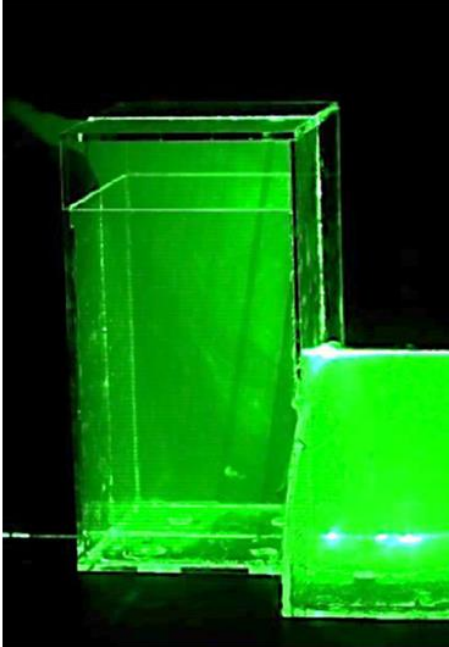
b

← Akış Yönü



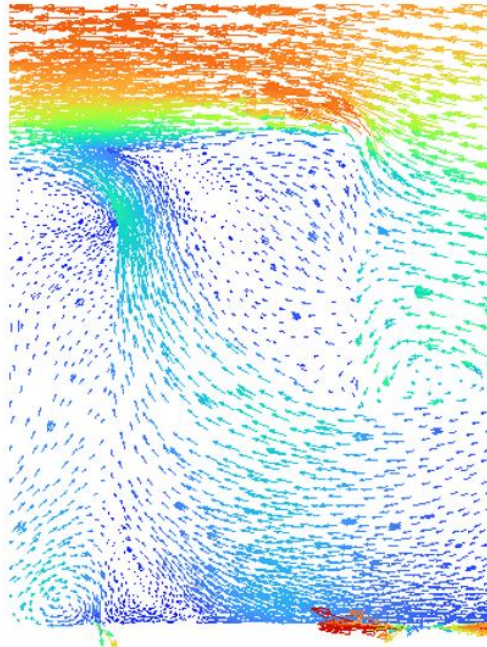
Şekil 5.1. (a) Giriş Bölgesinde duman görselleştirmesi (b) CFD Ansys Fluent tarafından üretilen akış çizgilerinin konumlandırılması

a



b

← Akış Yönü



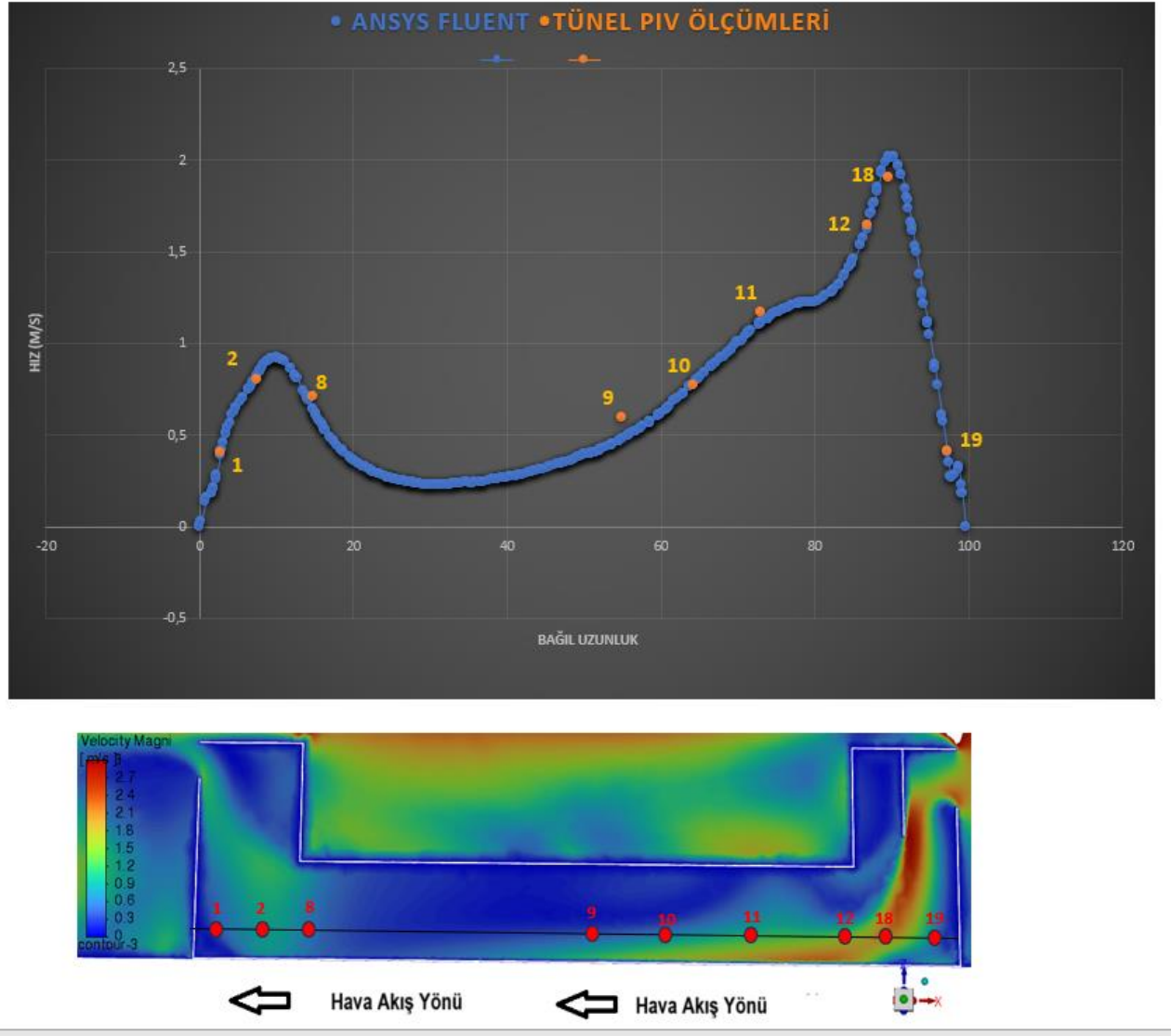
Şekil 5.2. (a) Çıkış bölgesinde duman görselleştirmesinin hareketsiz görüntüsü ve (b) CFD tarafından üretilen akış çizgilerinin konumlandırılması

5.2. Noktasal Ölçümler

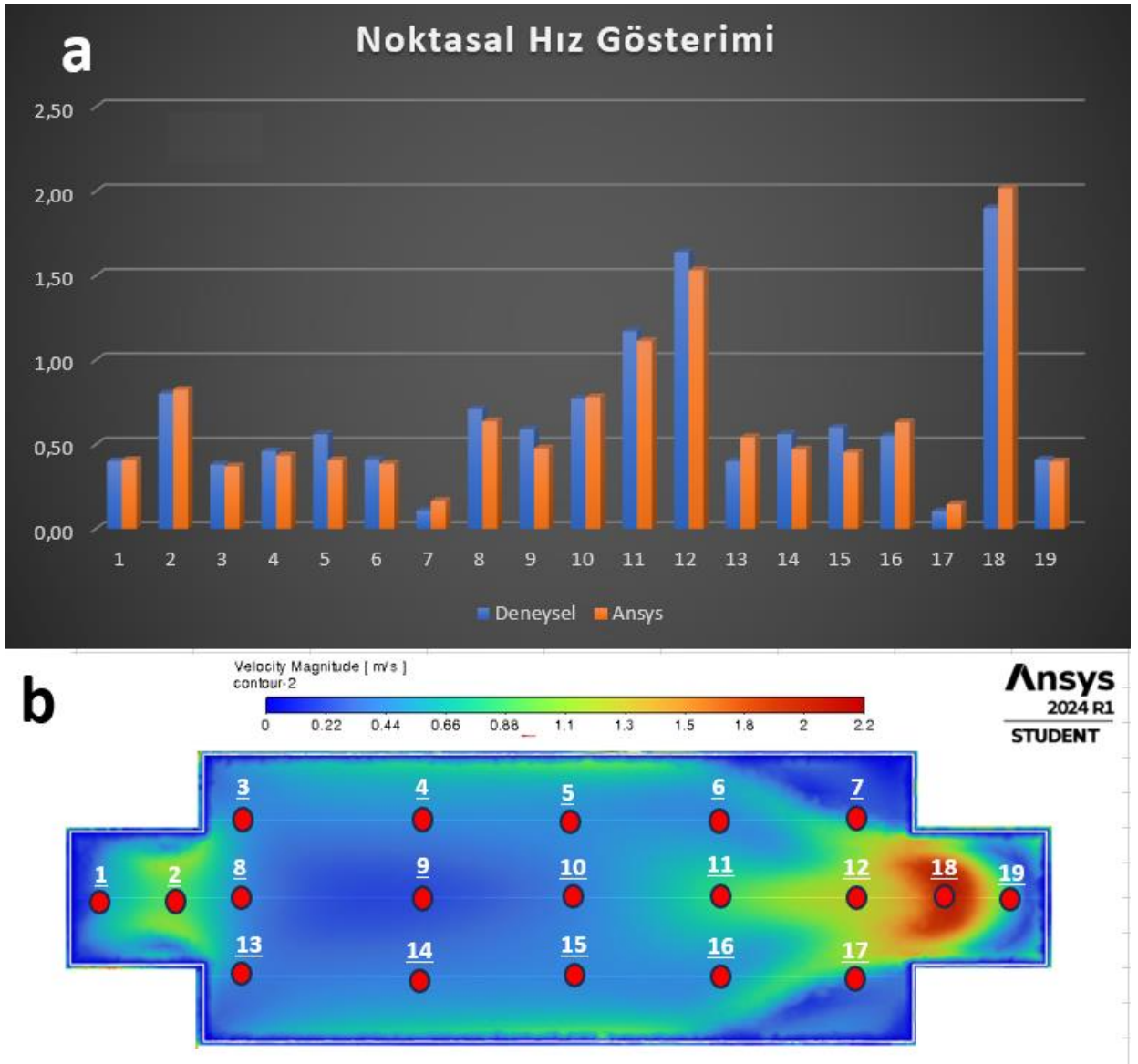
Model üzerinde hava akış hızının noktasal ölçümleri ve CFD ile tahmin edilen sonuçları, niceliksel bir karşılaştırması Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'te sunulmaktadır. Şekil 5.3. (a), 1 m yükseklikte merkez çizgisi boyunca hava hızının nokta ölçümlerini ve simüle edilmiş sonuçlarını karşılaştırmaktadır.

Simüle edilen sonuçlar ölçülen akış düzeniyle eşleşmiştir. Grafikte yer verilen noktalar, Şekil 4.2.'deki ölçüm konumunu temsil eder. Şekil 5.4 (b), hız noktası ölçümleri için kullanılan, hız kontur haritası üzerine yerleştirilmiş 19 noktayı gösterir ve Şekil 5.4. (a) bu konumlardaki hava hızı ölçümlerini karşılık gelen CFD ile tahmin edilen sonuçlarla karşılaştırır.

Hız tahminlerinin nokta ölçümleriyle iyi uyum sağladığı görülmüştür. Nokta ölçümleri ile tahmin edilen sonuçlar arasındaki ortalama tutarsızlık tüm akış alanı değerlendirildiğinde yaklaşık %15,08 ve akış hızının 0,6 m/s den büyük olduğu bölgelerde yapılan ölçüm noktalarının ortalaması alındığında ortalama tutarsızlık %5,42 seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum hata akış hızının en düşük olduğu 17. Noktada %42 ve minimum hata 10. noktada yaklaşık %1,31 olduğu görülmüştür.



Şekil 5.3. Belirlenen noktalarda deneysel ölçümler ile CFD ile tahmin edilen hava hızı arasındaki karşılaştırma: (a) merkez hattı boyunca, 1 m yükseklikte rüzgar hızı 3 m/s'ye ayarlanmışken ve (b) CFD- dikey simetri düzleminde öngörülen hız eğrisi



Şekil 5.4. (a) Belirlenen noktalarda deneysel ölçümler ile CFD ile tahmin edilen hava hızı ve (b) 1 m yükseklikte (tam ölçek) yatay bir düzlemde CFD ile tahmin edilen hız eğrisi arasındaki karşılaştırma

5.3. Sonuçların Genel Değerlendirmesi

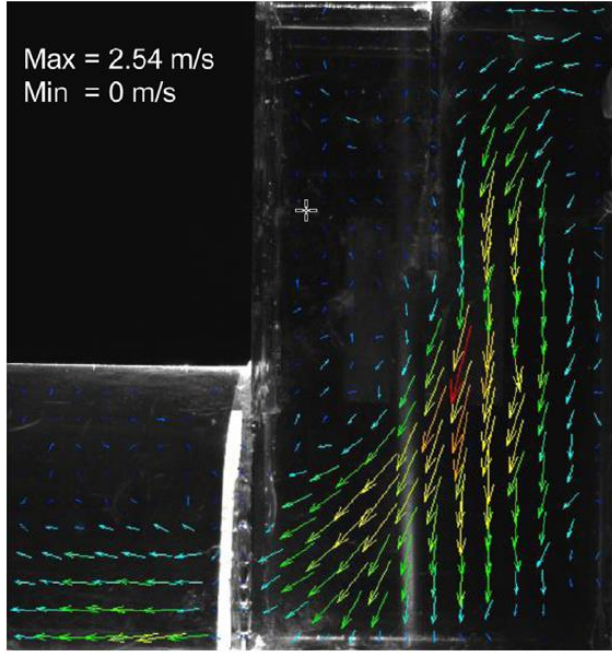
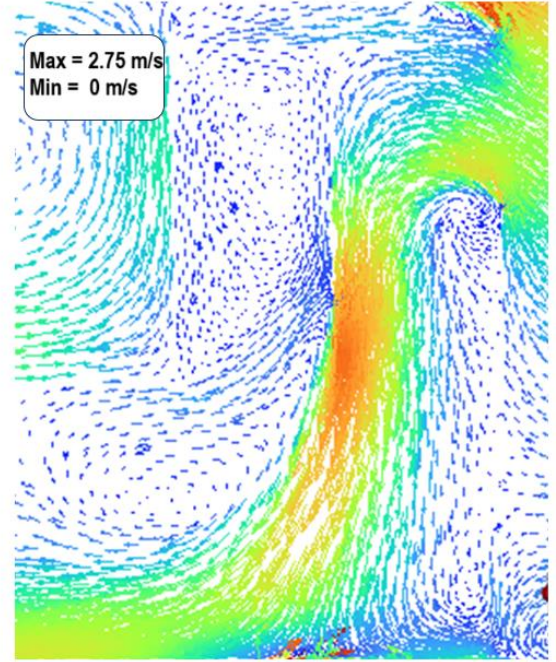
Mevcut tez çalışması ile Subsonic (Ses Altı) hızlarda hava akışı ile beslenen bir rüzgar tünelinin temel gereksinimleri üzerinde durulmuştur. Sistem için gerekli elemanlar inceleme altına alınmış ve sistem entegrasyonu amacı ile alt elemanların birbirleri ile uyumlu bir çalışma sağlaması ile uygulanabilir bir PIV sistemi dizayn önerisi oluşturulmuştur.

Model üzerinde PIV ile ölçülen ve CFD ile simüle edilen hızlar arasındaki niteliksel ve niceliksel sonuçlar bu bölümde tartışılmaktadır.

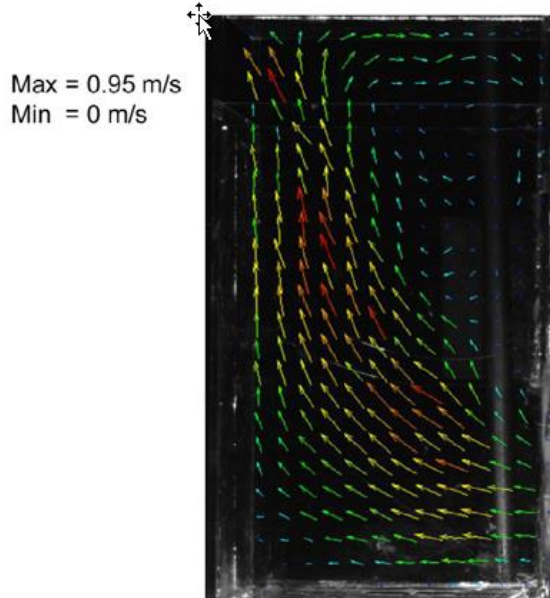
CFD simülasyonlarından ve PIV ölçümlerinden elde edilen model giriş bölümü dikey simetri düzlemindeki hız vektör alanları Şekil 5.5'te gösterilmektedir. CFD simülasyonları, model giriş bölümü üzerinde ölçülen akış modelleriyle eşleştiği görülmektedir; model yüzeyine çarpma sonraki akış ivmesi, model girişine doğru aşağı doğru yönlendirilmiş akış, model yüzeyindeki akış sirkülasyonu ve sağ alt köşedeki akış dolaşımı görselde yer aldığı üzere şekillenmiştir.

CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen maksimum hız büyüklüğü, PIV ölçümlerinden yaklaşık %7,6 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum hızın yüzey yakınında meydana geldiğine dikkat edilmelidir; bu nedenle duvar yansıma etkilerinden dolayı PIV ölçümleri bölme yakınında doğru tahminlerden uzaklaşmıştır.

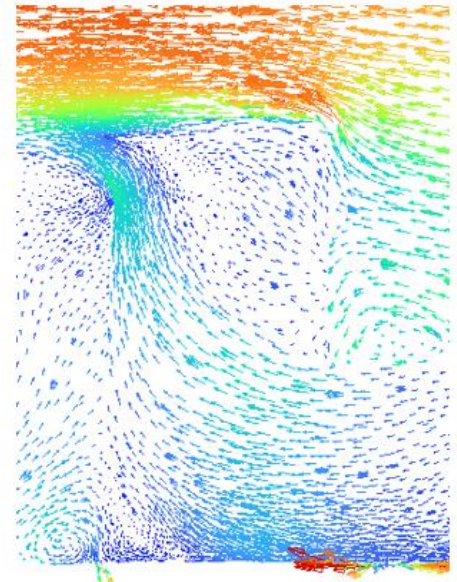
Şekil 5.6. CFD simülasyonlarından ve PIV ölçümlerinden elde edilen, model çıkış bölümü dikey simetri düzlemindeki hız vektör alanını göstermektedir. CFD simülasyonları akışın model çıkışında yukarıya doğru güçlü akışı doğru bir şekilde tahmin etmiştir. Simülasyonlar, sağ üst köşede meydana gelen büyük devridaimi öngörmüştür. CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen maksimum hız büyüklüğü, PIV ölçümlerinden yaklaşık %1 daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Validasyonda kullanılan model ve CRM uçak modeline ait ANSYS Fluent hız ölçüm değerleri Ek-1 ile paylaşılmıştır.

a**b****← Akış Yönü**

Şekil 5.5. Model giriş bölümündeki dikey simetri düzlemindeki hız vektör alanlarının karşılaştırılması: (a) PIV ölçümleri ve (b) CFD simülasyonları

a**b****← Akış Yönü**

Max = 0.94 m/s
Min = 0 m/s



Şekil 5.6. Model çıkış bölümündeki dikey simetri düzleminde hız vektör alanlarının karşılaştırılması: (a) PIV ölçümleri ve (b) CFD simülasyonlar

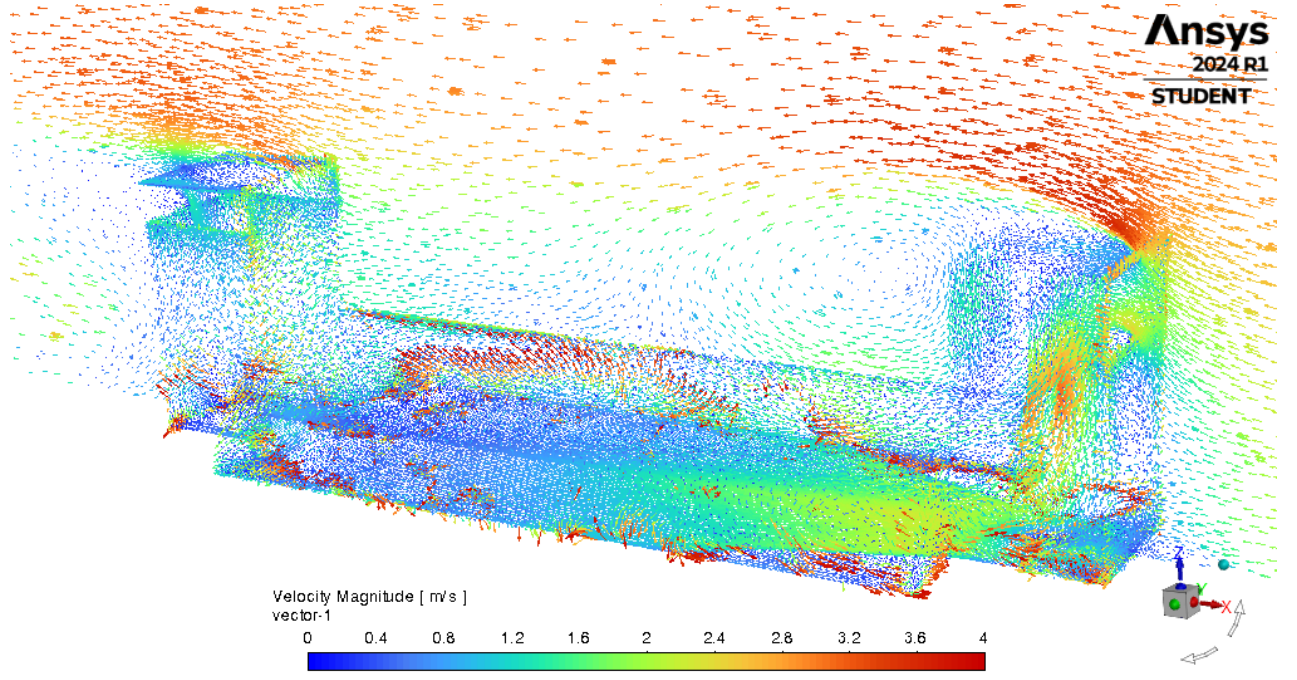
Giriş ve çıkış kulelerinin dikey simetri düzleminde 1 m yükseklikte yatay bir çizgi boyunca CFD simülasyonları ve PIV ölçümlerinden elde edilen hız büyüklükleri, noktasal ölçümleriyle birlikte Şekil 5.3.'te gösterilmektedir.

Karşılaştırma, ölçülen veriler ile CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğunu gösterir. PIV deneylerinde duvarların yakınındaki hız alanlarının ölçülmesinde, Şekil 5.6'da vektör grafiğinde görüldüğü üzere optik gürültü kaynaklarının ortaya çıkmasına neden olan duvarlardan gelen yansımalar nedeniyle genellikle zorluk ortaya çıkar[27].

Simüle edilen ve PIV ile ölçülen hava hızı profilleri, eşleşen ekstremumlarla aynı modelleri gösterme açısından birbirleriyle nitel uyumun yanında nicel olarak da uyumlu olduğu görülmüştür; ancak iki profil arasında niceliksel hesaplama sonuçları akışın ana eğilimini yakalarken, deneysel sonuçların bölge bazında biraz üzerinde ya da altında tahminlerde de bulunduğu Şekil 5.4 üzerinde görülebilmektedir.

Model giriş bölümünde ölçümler ve CFD tahminleri, PIV ölçümlerine göre hızı olduğundan fazla tahmin etmiştir. Ancak çıkış kulesinde noktasal ölçümleri ve CFD tahminleri PIV ölçümleriyle iyi bir uyum sergilediği görülmüştür.

Şekil 5.7'de Dikey simetri düzleminde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen vektör alanına sahip hız kontur grafiği ve Şekil 5.3'te, hava akış hızı 3 m/s iken 1 m yükseklikte yatay bir düzlemde hız kontur grafiği ve göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi modelin dört köşesi hariç olmak üzere 1 m yükseklikte model üzerindeki ortalama hava hızı 0,4 ila 2 m/s arasında değişmektedir, bu da dış hava akış hızının yaklaşık %13 ila %63'ü kadardır.



Şekil 5.7. Dikey simetri düzleminde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen vektör alanına sahip hız kontur grafiği.

İlgili örnek model PIV deneysel analizi ve CFD doğrulaması yapılmış; tünel giriş ve çıkış bölgelerinde akış görselleştirilmiş ve simüle edilmiş, akış modelleri arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Neticede hız noktaları üzerinde ölçümleri ile simüle edilen sonuçlar arasındaki karşılaştırma sunulmuştur. Giriş ve çıkış noktalarında PIV ile ölçülen ve CFD ile simüle edilen hız alanları arasındaki niteliksel ve niceliksel karşılaştırmalar yapılmıştır. Son olarak hava akış hızı noktasal olarak izlenmiş değerler ölçülerek karşılaştırılmıştır.

Validasyon için kullanılan ilk çalışmada CFD modeli, akış görselleştirmesi, hız noktası ölçümleri ve PIV ölçümleri dahil olmak üzere rüzgar tüneli testleri kullanılarak doğrulanmıştır. Görselleştirilmiş ve simüle edilmiş akış rejimleri arasında uyum gözlenmiştir. İlgili çalışmada akış hızının arttığı bölgelerde CFD ile PIV hız değerlerinin yakınsayarak daha iyi örtüştüğü görülmüştür.

Tüm akış alanı değerlendirildiğinde yüzde hata %15,08 ve akış hızının 0,6 m/s den büyük olduğu bölgelerde yapılan ölçüm noktalarının ortalaması alındığında ortalama tutarsızlık %5,42 seviyesinde olduğu gözlemlenmiştir.

Doğrulama sonrası CFD analizi yapılan CRM Uçak Modeli için hız ölçümü 0,05 Mach ve 0,40 Mach aralığında (17 m/s – 136 m/s aralığı) olması dolayısıyla düşük hızlarda

oluşan farkın Rüzgar tüneli PIV testi öncesi CFD analizi yapılarak elde edilen değerlere yakınsayacağını öngörülebilir olduğu değerlendirilmiştir. Uçak modellerinde 0,6 m/s'den düşük değerlerin araştırma alanına girmemesi sebebiyle, hesaplamalarda negatif bir etkisinin olmayacağı değerlendirilmiştir.

Referans alınan doğrulama verileri ve sınır şartları ile test edilen CRM uçak modeli hız değerleri 1 m/s'lik (+/-0,5m/s) aralıkta 0,05 Mach ile 0,40 Mach aralığında sabit hava akış hızlarında model yüzeyinde oluşan hız vektörleri, Şekil 5.8 ila Şekil 5.33 arasında paylaşılmış olup gözlemlenen sabit hava akış hızları ve karşılık gelen hız ölçüm aralıkları değerleri Tablo 6.1 de yer almaktadır.

Tablo 6.1. Akış Alanı, Hava Akış Hızı ve Vektör Hız Ölçüm Aralıkları

S.No	Akış Alanı, Hava Akış Hızı				Hız Ölçüm Aralığı (m/s)	
1	0,05	Mach	17,0150	m/s	16,5150	17,5150
2	0,10	Mach	34,0300	m/s	33,5300	34,5300
3	0,15	Mach	51,0450	m/s	50,5450	51,5450
4	0,20	Mach	68,0600	m/s	67,5600	68,5600
5	0,25	Mach	85,0750	m/s	84,5750	85,5750
6	0,30	Mach	102,0900	m/s	101,5900	102,5900
7	0,35	Mach	119,1050	m/s	118,6050	119,6050
8	0,40	Mach	136,1200	m/s	135,6200	136,6200

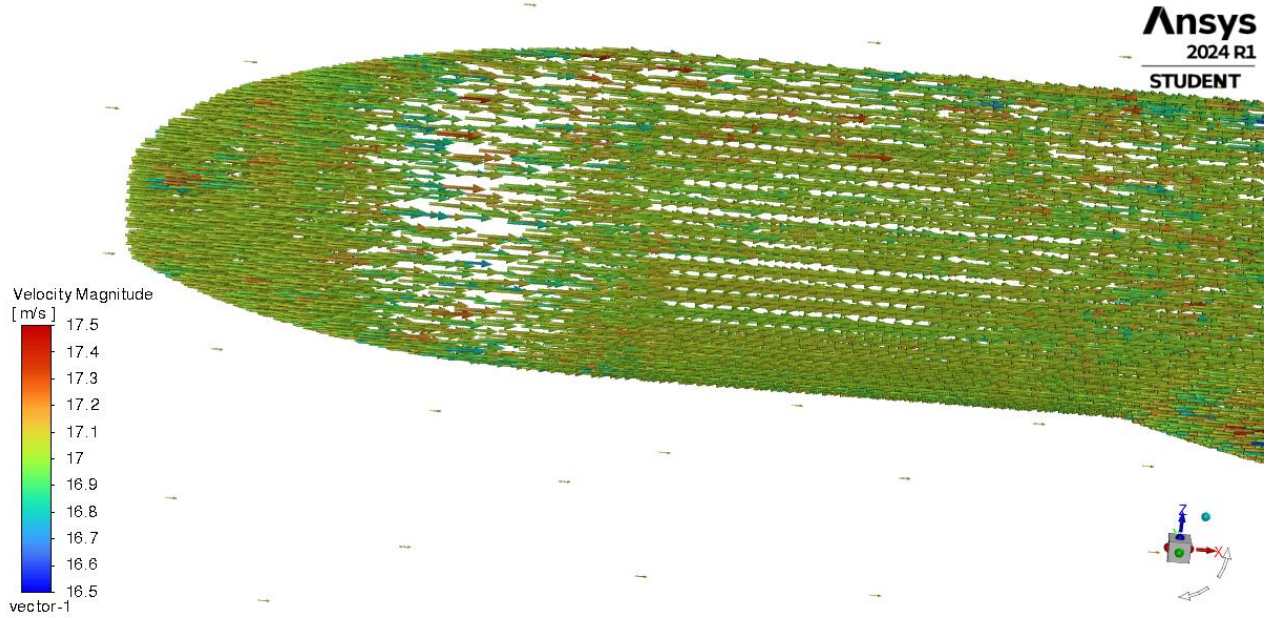
ANSYS Fluent ile testi gerçekleştirilen ilk koşul, 0,05 Mach hız değerinde yüzey bölgesinde vektörel hız değerleri akış hızına yaklaşık olarak yakın değerde olmakla birlikte Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 üzerinde görüleceği üzere harita üzerinde yeşil renge denk gelen akış hızına paralel ve yaklaşık değerler içerdiği görülebilmektedir.

Gözlemlenen 2. Koşul, 0,10 Mach hız değerinde, Şekil 5.11, Şekil 5.12 ve Şekil 5.13 üzerinde görüleceği üzere kısmi hız dalgalanmaları oluşmaya başlamıştır. Gözlemlenen 3. Koşul, 0,15 Mach hız değerinde, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16 üzerinde görüleceği üzere hız dalgalanmaları belirginleşmeye başlamış ve 4. Koşul, Şekil 5.17, Şekil 5.18 ve Şekil 5.19 ile verilen 0,20 Mach hava akış hızında özellikle gövde ile kanat bağlantısı ve kanadın hava ile ilk temas eden uç bölgelerinde kırmızı vektör yoğunluğunda artışı ile bariz bir şekilde görülmekte , hız değeri ve +/- yönde hız dalgalanması olduğu tespit edilmiştir.

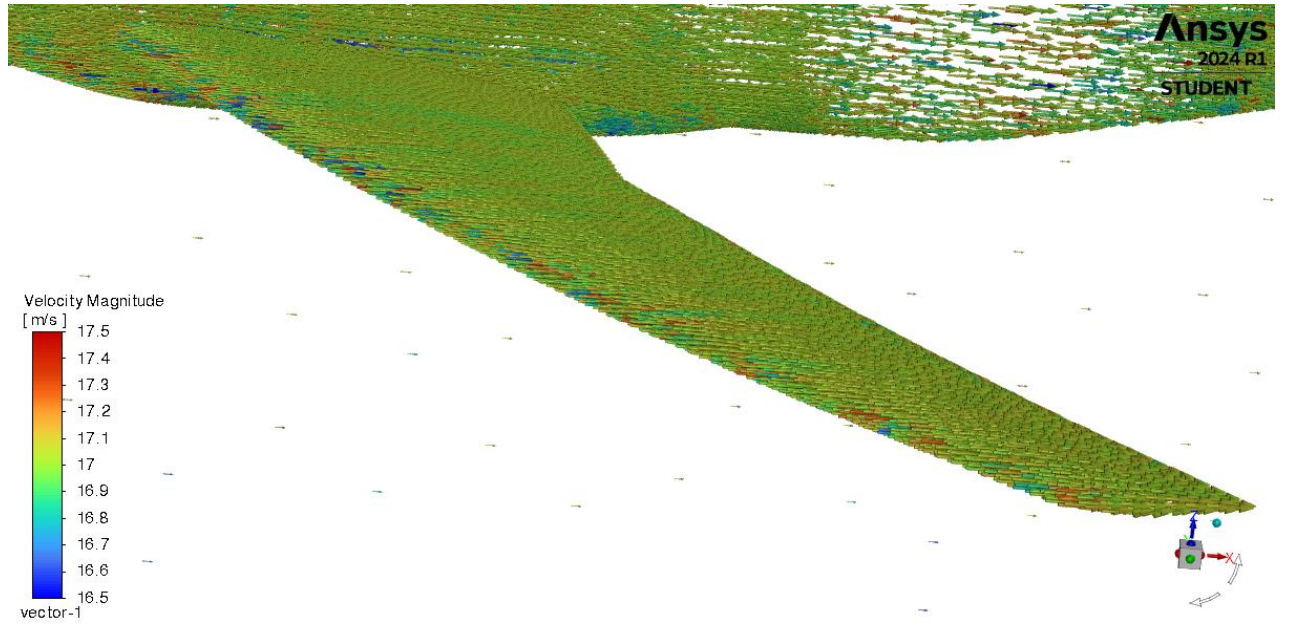
5. 6. Ve 7. Koşul ile verilen 0,25 Mach, 0,30 Mach ve 0,35 Mach hava akış hızlarında önceki paragrafta belirtilen uçak bölgelerinin yanı sıra, kalan tüm uçak yüzeyi

üzerinde net olarak gözlemlenecek şekilde hava akış hızının üzerinde hızların tespit edilmiş olup referans alınan kontur haritasında, kırmızı ile belirtilen bölgeler, net olarak hız artış miktarınca kırmızı vektör yoğunluk derecesinde artış ve benzer şekilde +/- yönde hız dalgalanması tespit edilmiştir. İlgili hız artış ve dalgalanmalar sırasıyla Şekil 5.20, Şekil 5.21, Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25, Şekil 5.26, Şekil 5.27, Şekil 5.28 ile gözlemlenebilir.

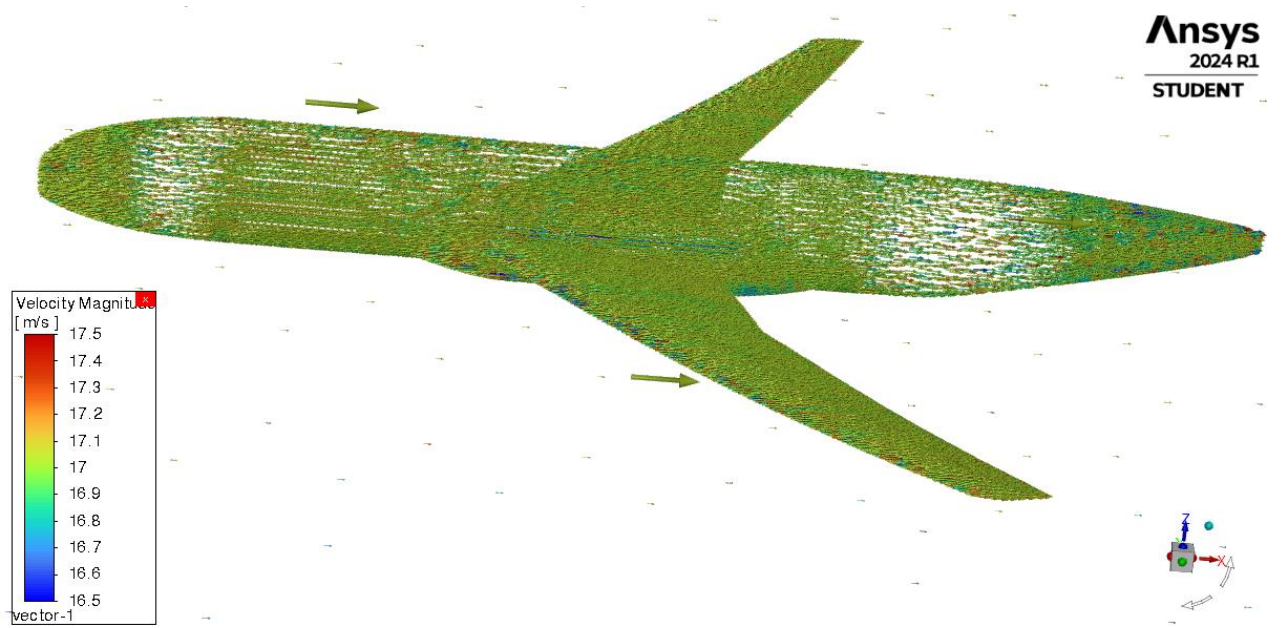
Son olarak ölçümlenen son ve 8. Koşul için de Şekil 5.29, Şekil 5.30 ve Şekil 5.31’de de benzer eğilimin devam ettiği görülmüştür. Belirtilen son koşul için ilave olarak Şekil 5.32’de belirtilmiş X doğrultusu üzerinde hız değerlerinin CFD sonuçları elde edilmiş olup Şekil 5.33’de grafik üzerinde bu değerler paylaşılmıştır.



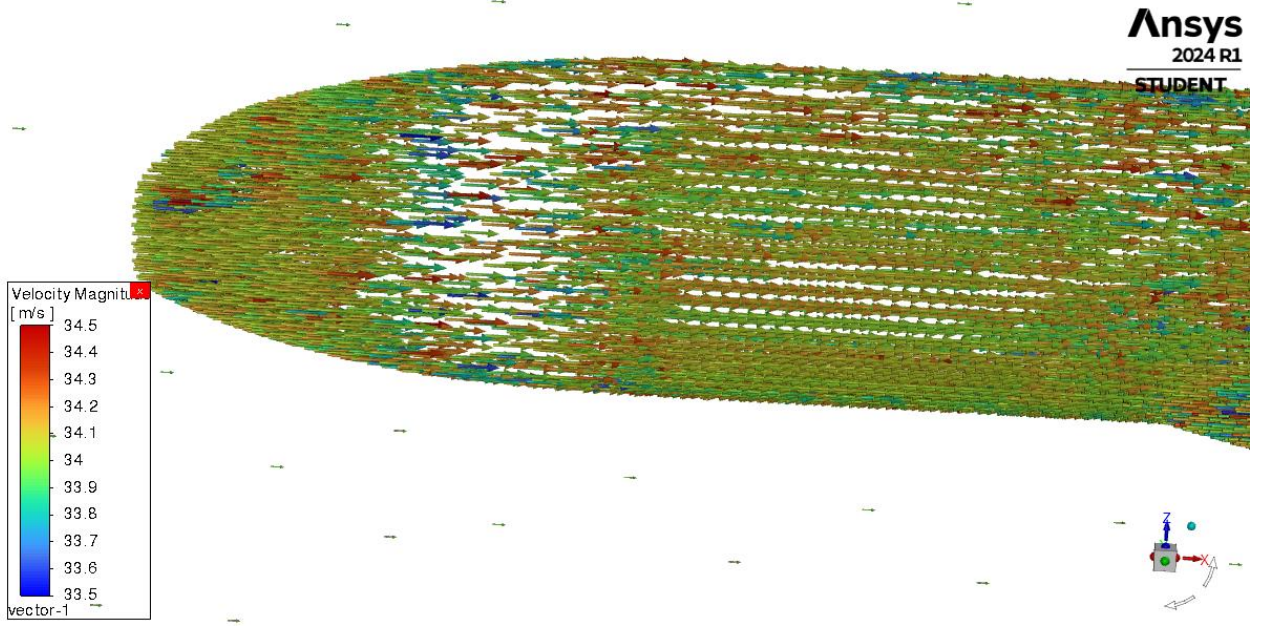
Şekil 5.8. 0,05 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri



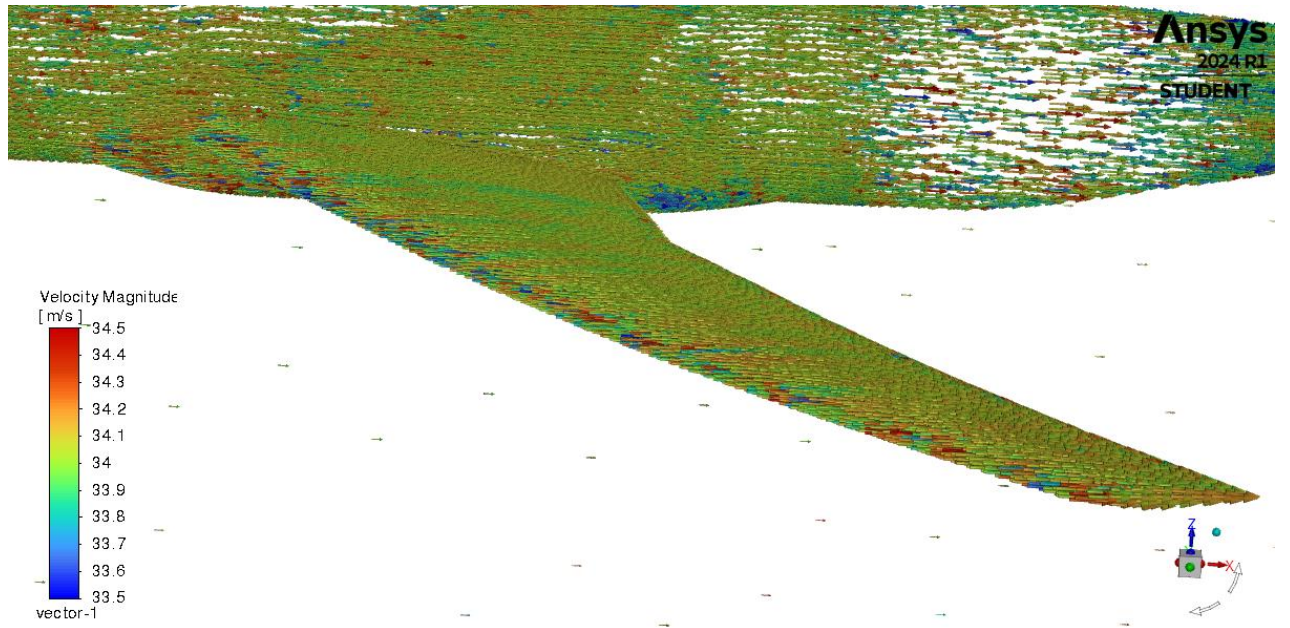
Şekil 5.9. 0,05 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri



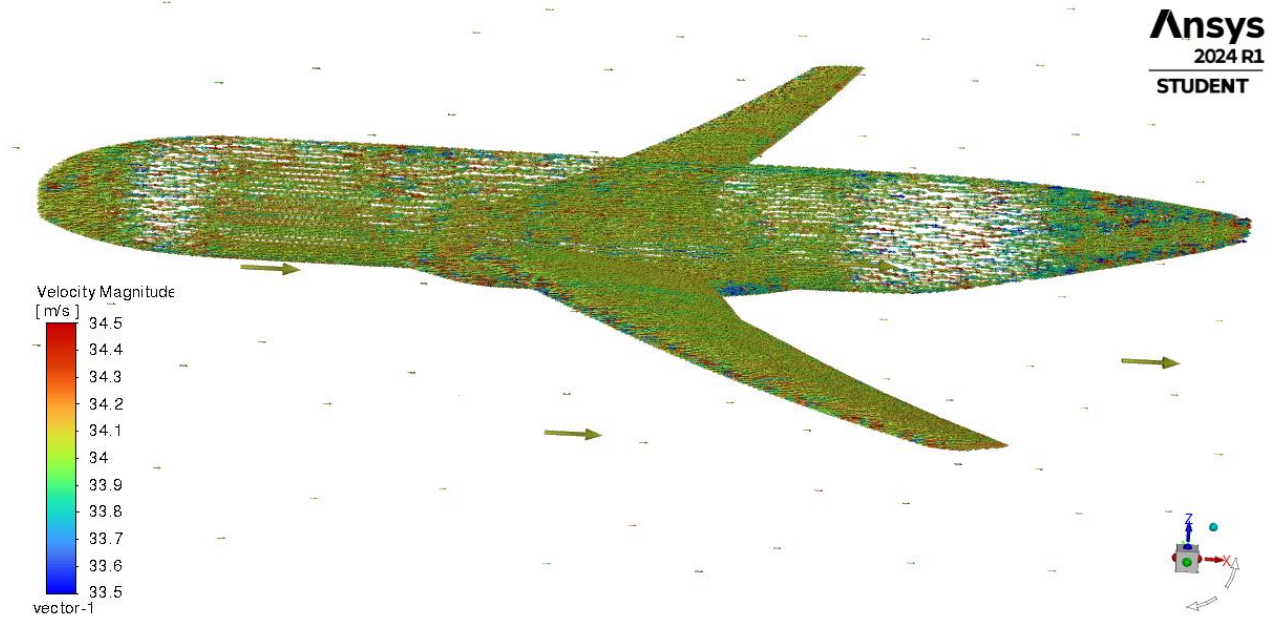
Şekil 5.10. 0,05 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri



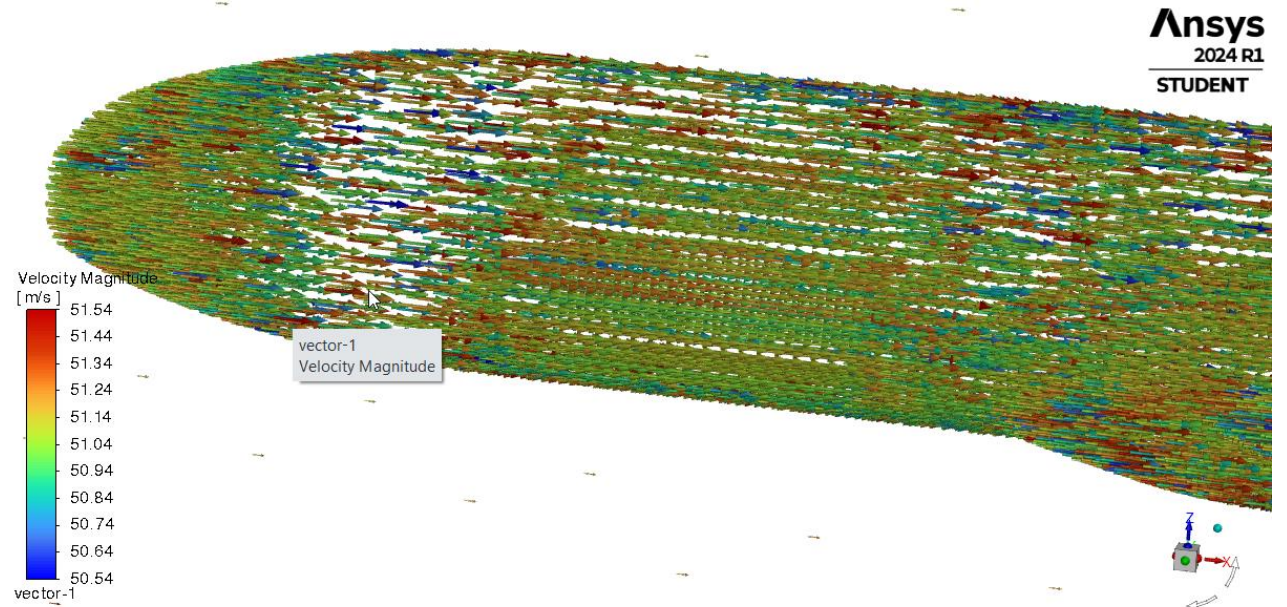
Şekil 5.11. 0,10 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri



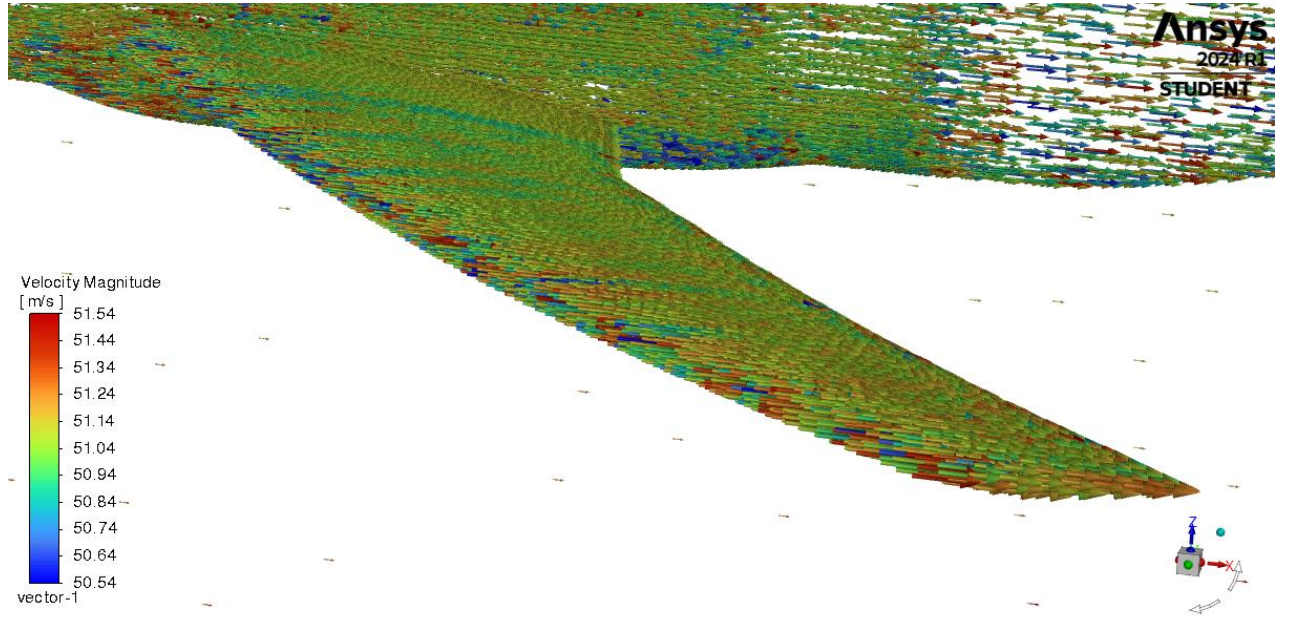
Şekil 5.12. 0,10 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri



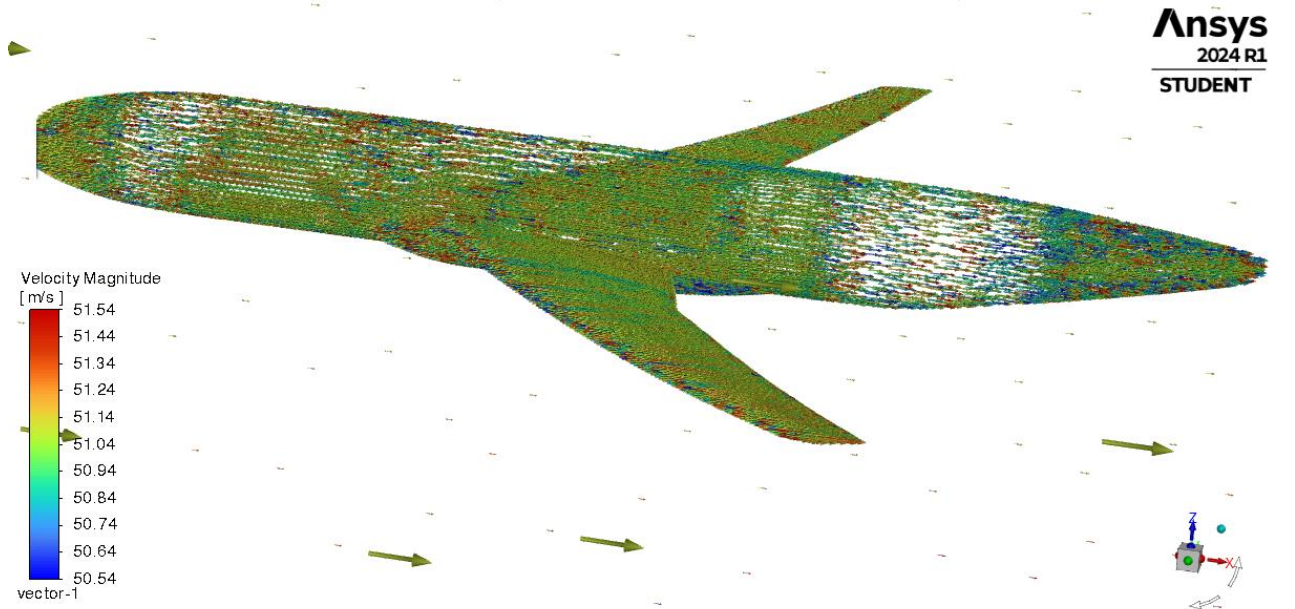
Şekil 5.13. 0,10 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri



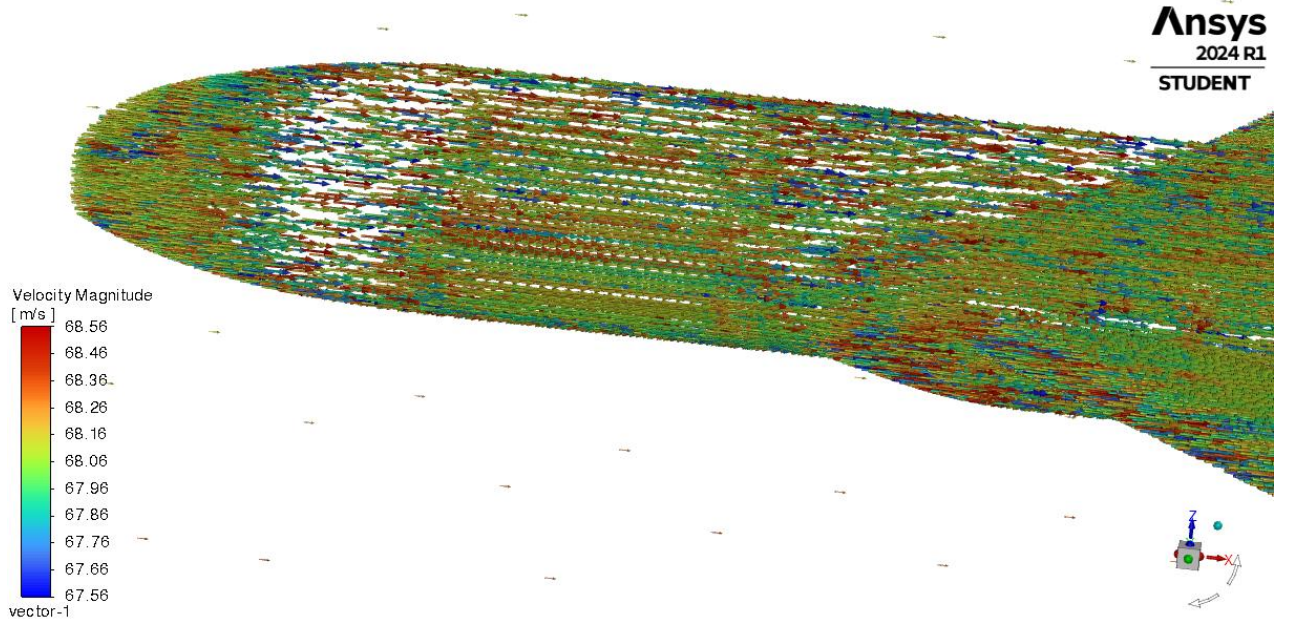
Şekil 5.14. 0,15 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri



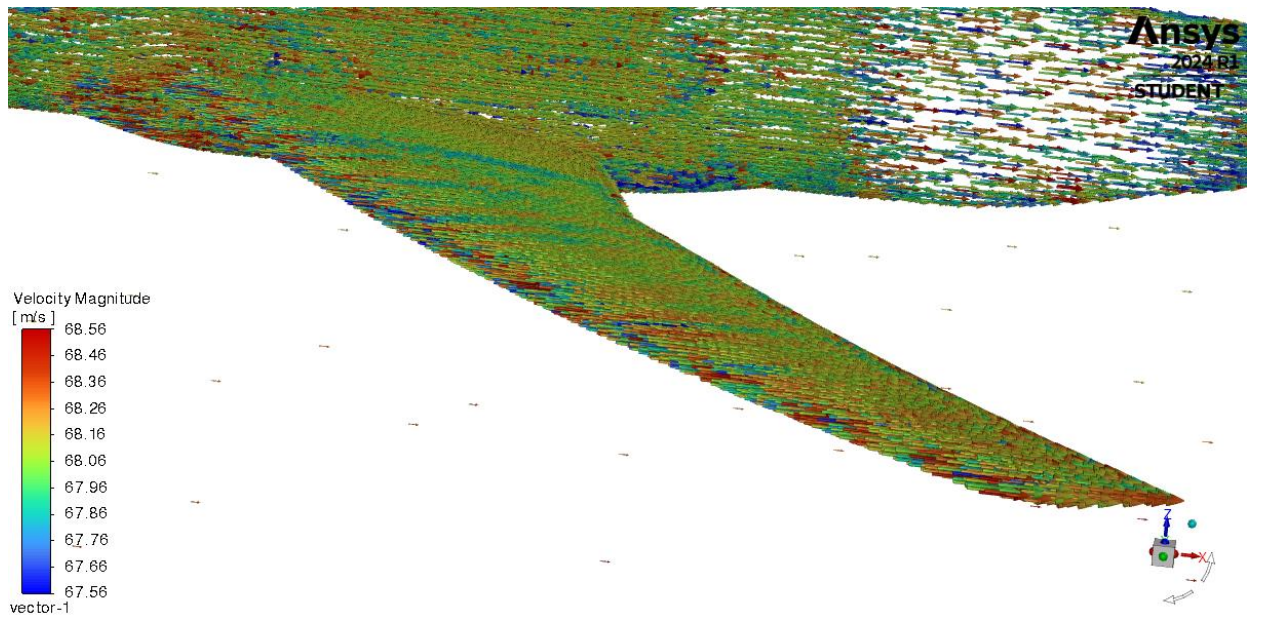
Şekil 5.15. 0,15 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri



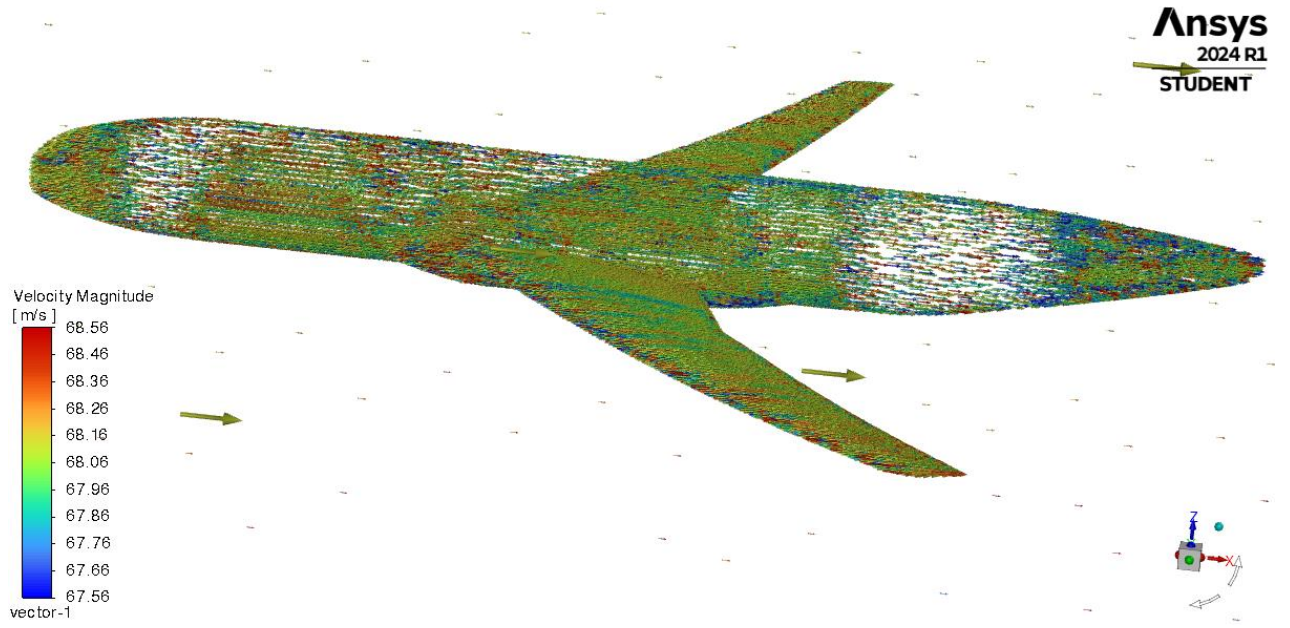
Şekil 5.16. 0,15 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri



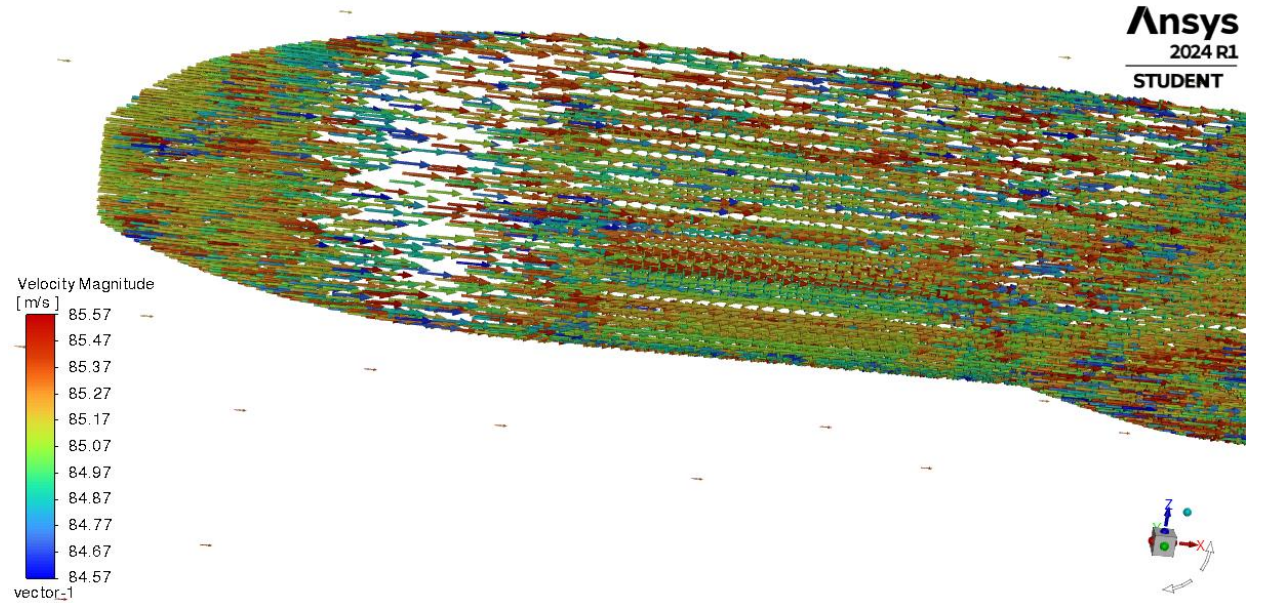
Şekil 5.17. 0,20 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri



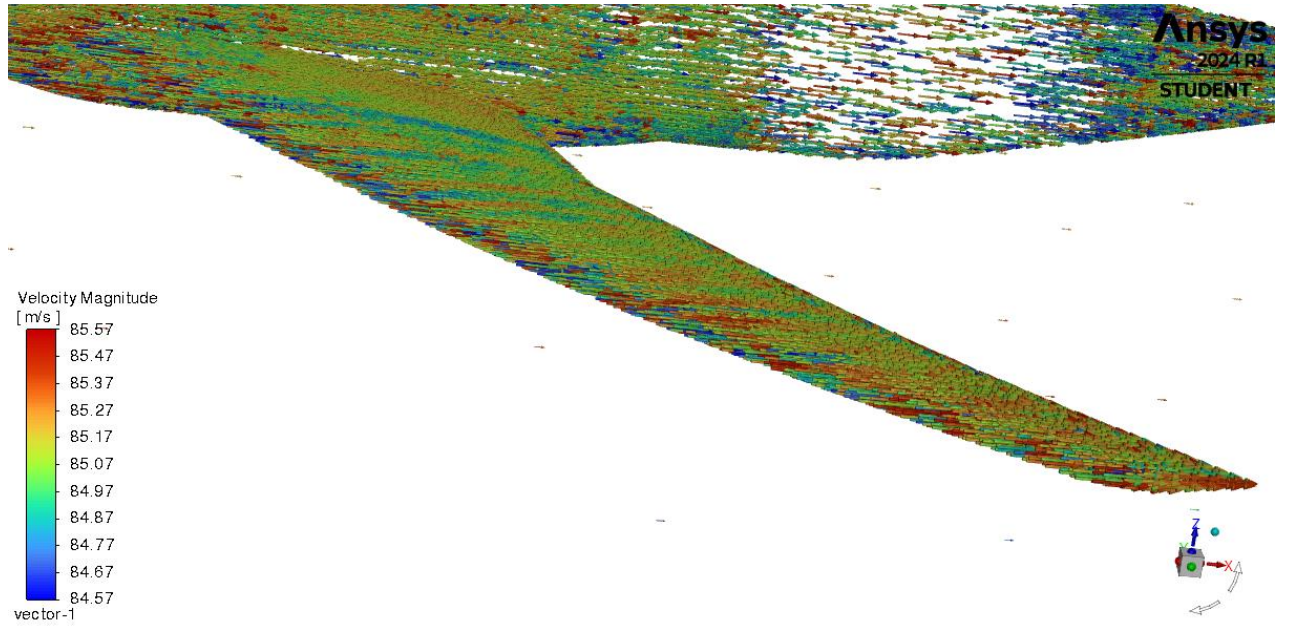
Şekil 5.18. 0,20 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri



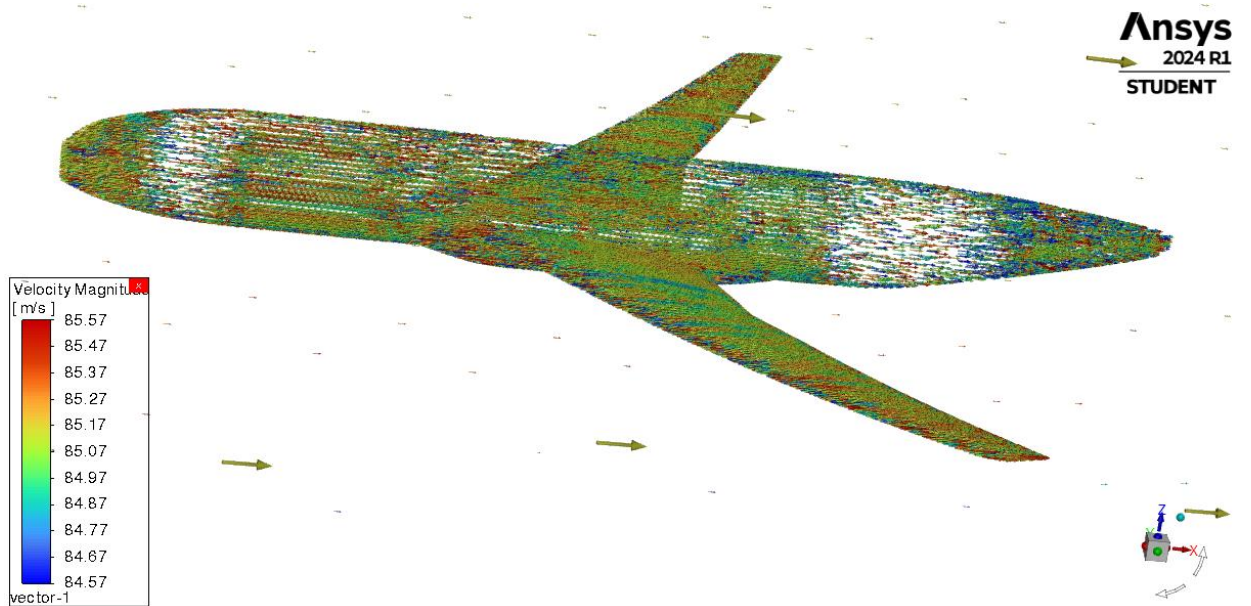
Şekil 5.19. 0,20 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri



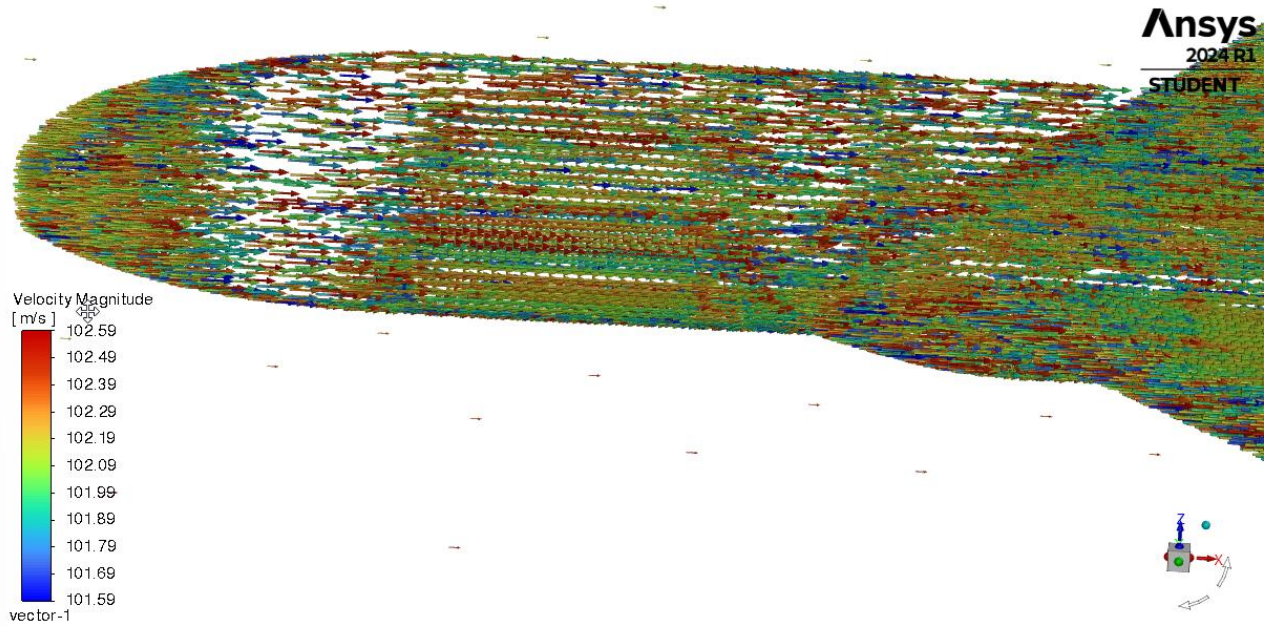
Şekil 5.20. 0,25 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri



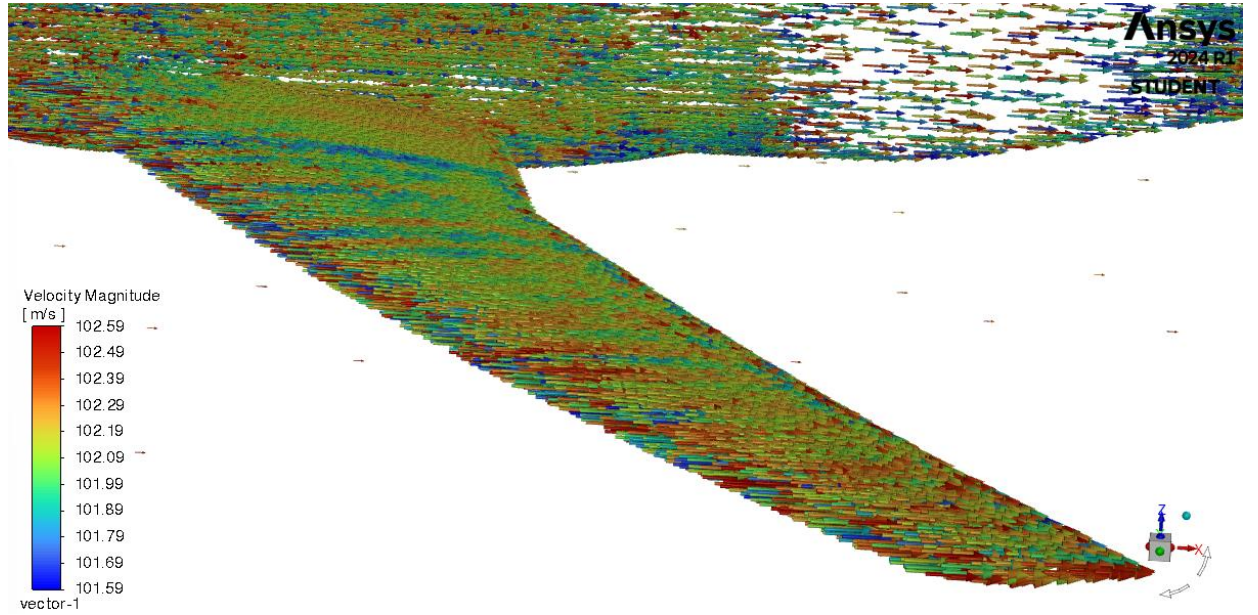
Şekil 5.21. 0,25 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri



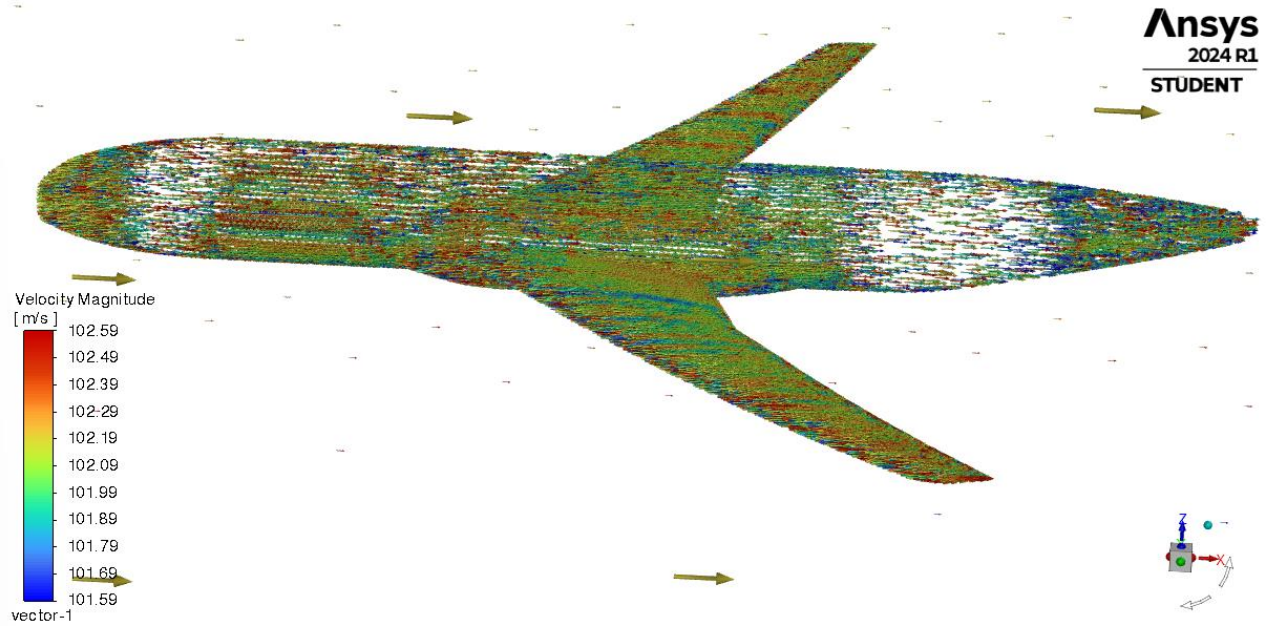
Şekil 5.22. 0,25 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri



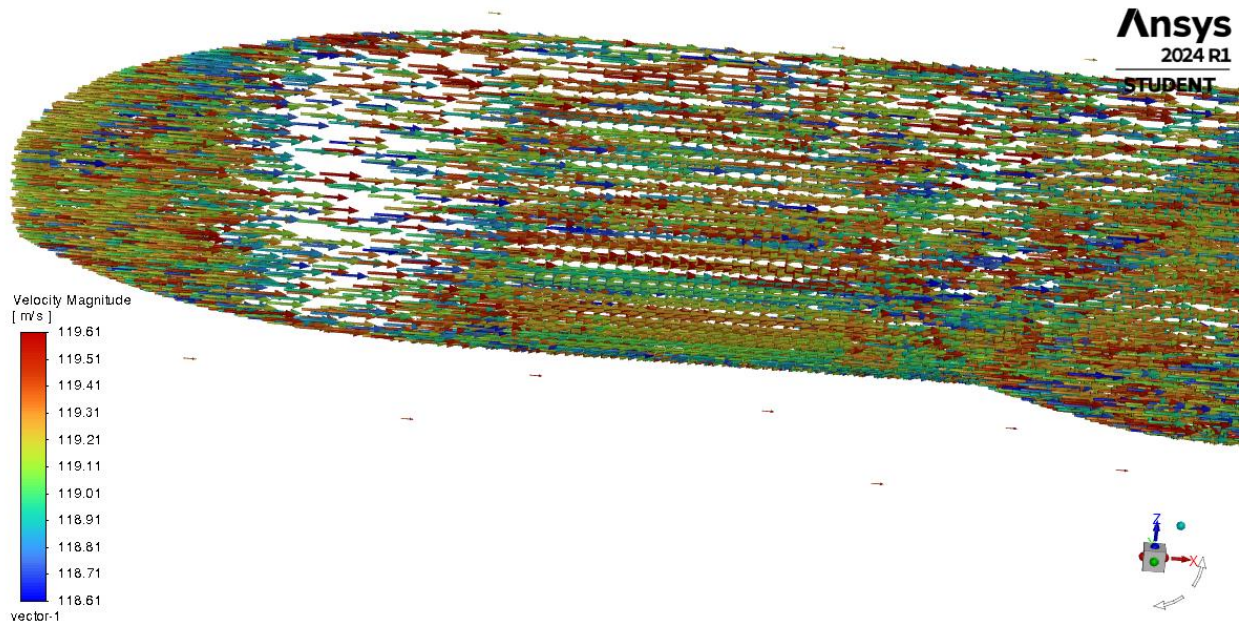
Şekil 5.23. 0,30 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri



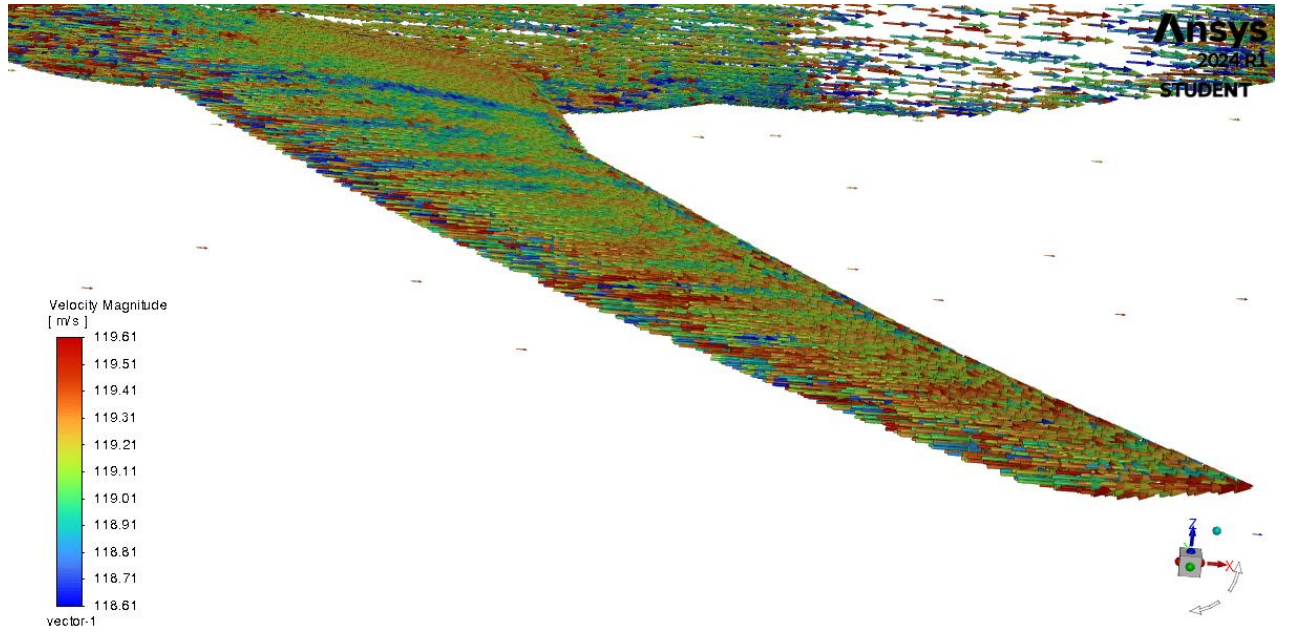
Şekil 5.24. 0,30 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri



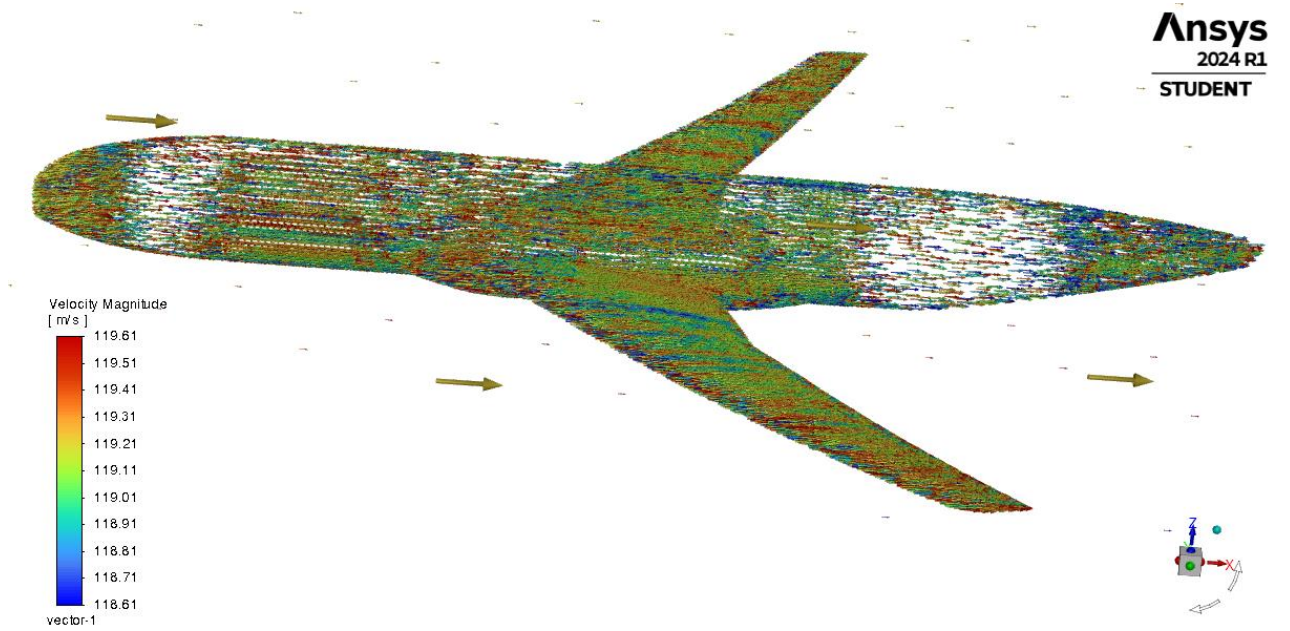
Şekil 5.25. 0,30 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri



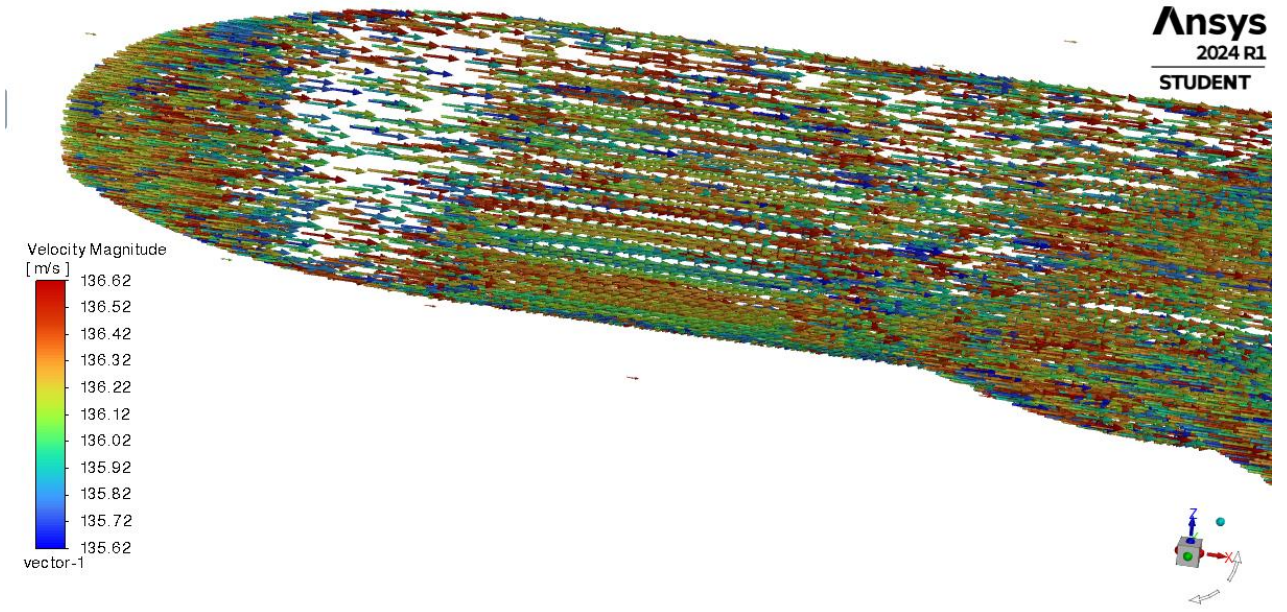
Şekil 5.26. 0,35 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri



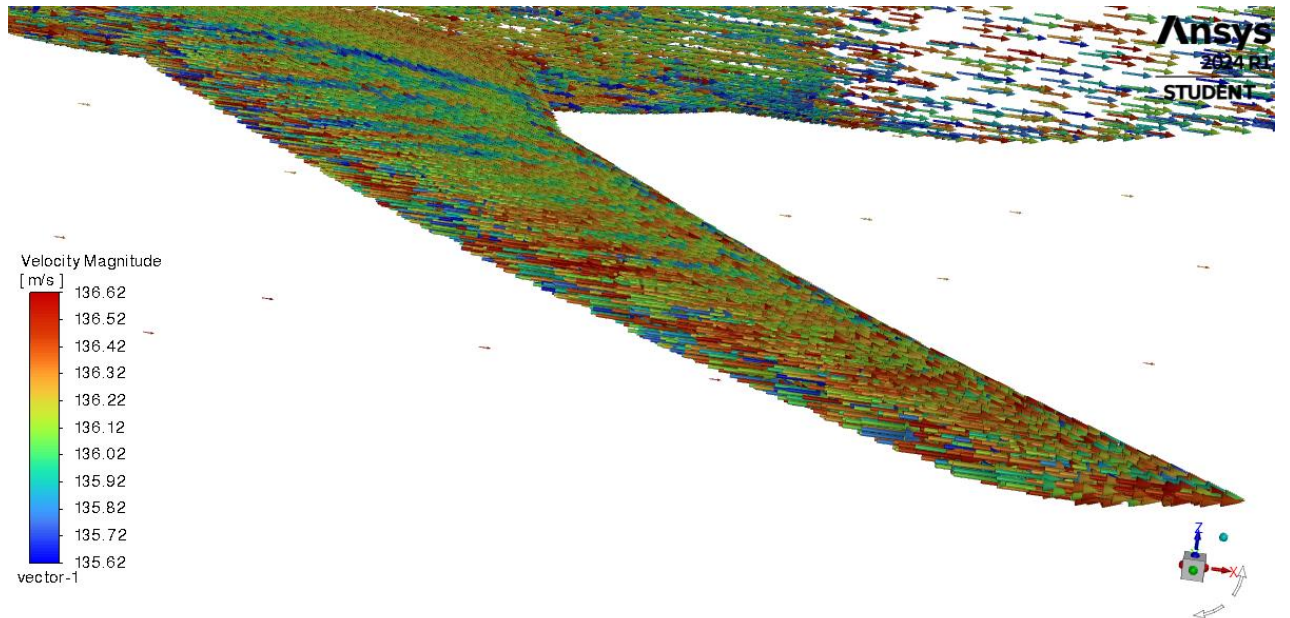
Şekil 5.27. 0,35 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri



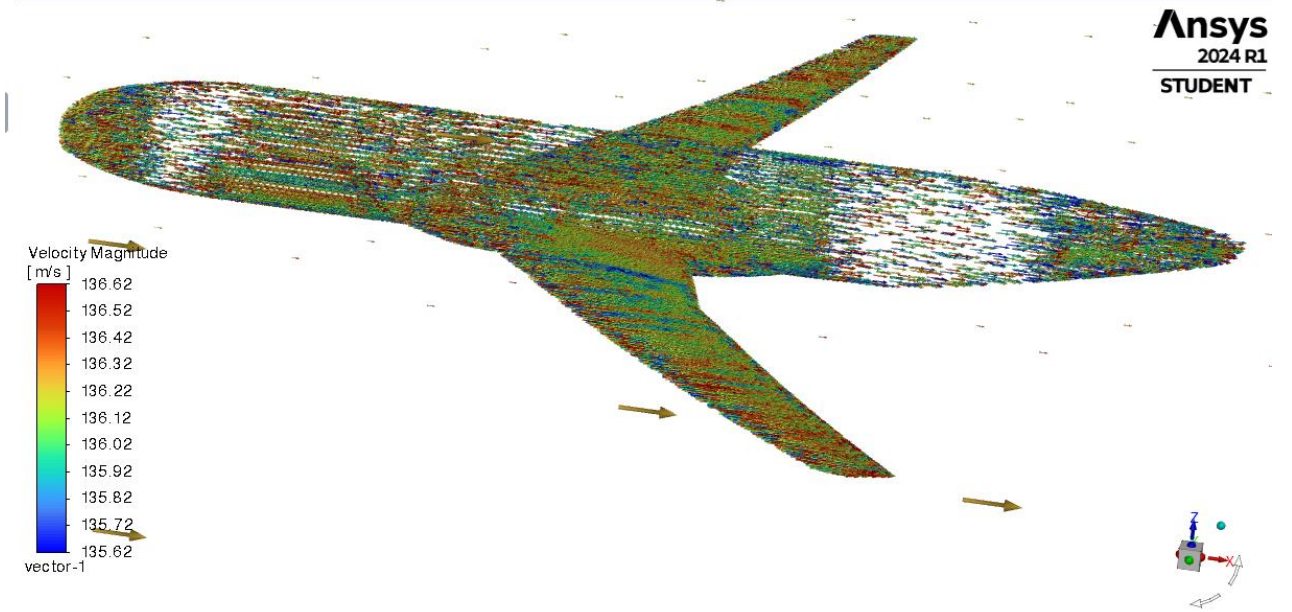
Şekil 5.28. 0,35 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri



Şekil 5.29. 0,40 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Ön gövde hız vektörleri

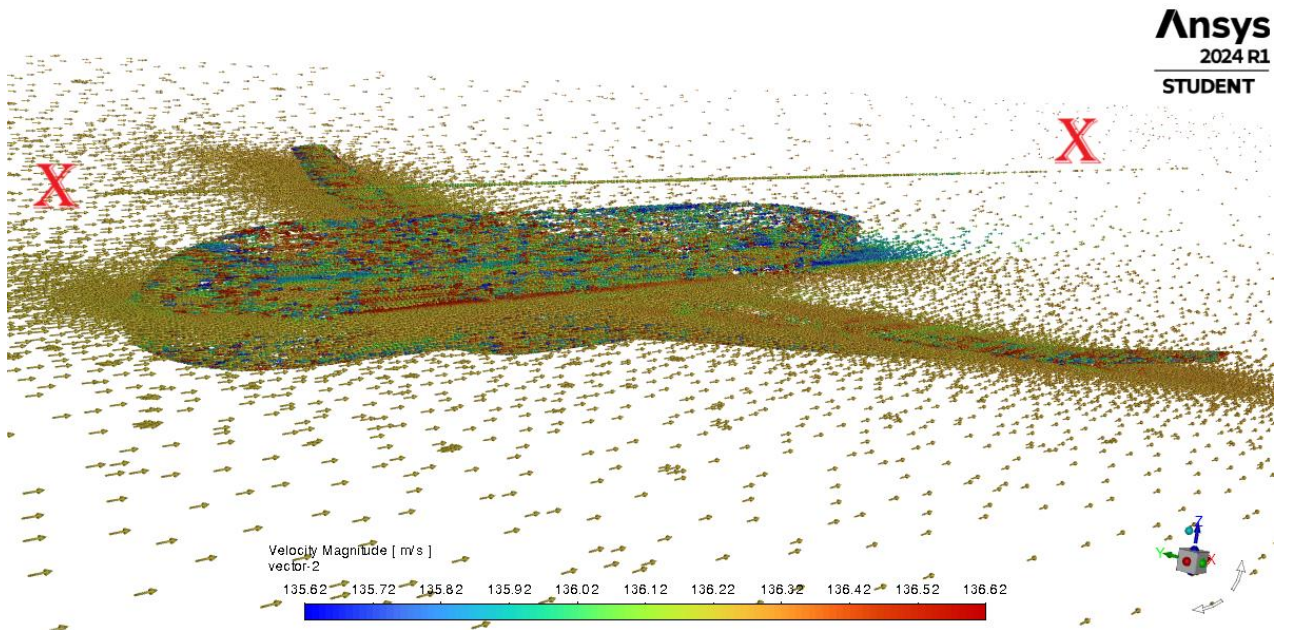


Şekil 5.30. 0,40 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli Kanat hız vektörleri

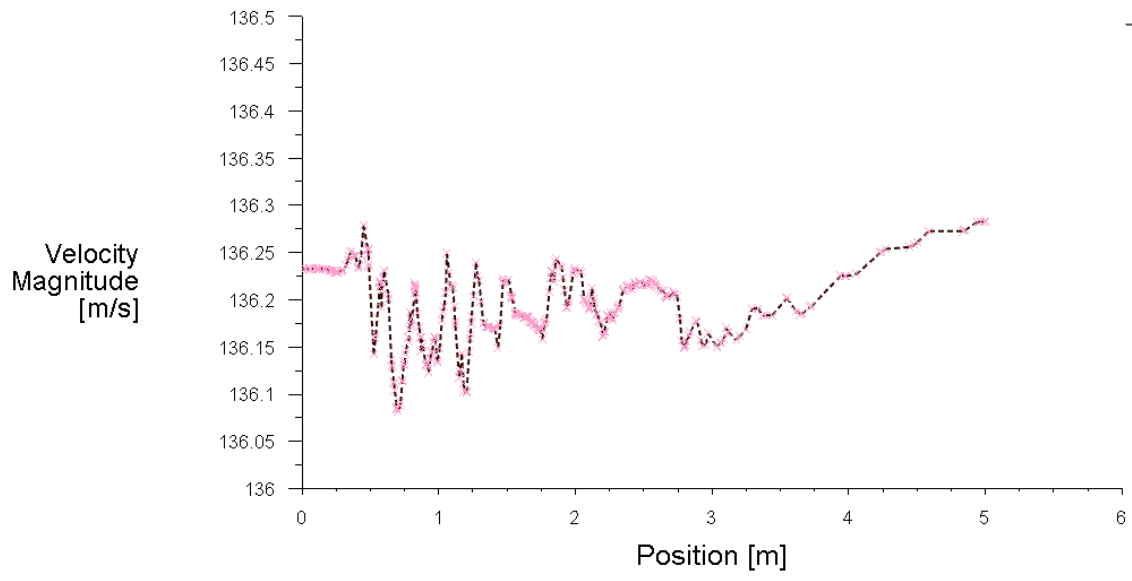


Şekil 5.31. 0,40 Mach hava akış hızında model üzerinde CFD simülasyonları tarafından tahmin edilen CRM Uçak Modeli perspektif görünüm hız vektörleri

Şekil 5.32 üzerinde görselde yer alan CRM Uçak Modeli, 0,4 Mach sabit hava akış hızında, model merkez çizgisi boyunca, 0,4 m yükseklikte X doğrultusu üzerinde vektörler ile görselleştirilen referans değerlendirmesi için hız değerlerinin CFD sonuçları elde edilmiş olup Şekil 5.33’de grafik üzerinde paylaşılmıştır.



Şekil 5.32: 0,4 Mach hızında X Doğrultusu Vektör Görünümü



Şekil 5.33: 0,4 Mach hızında X Doğrultusu Noktasal Hız Değerleri

6. BULGULAR VE ÖNERİLER

Rüzgar Tüneli ile 0 – 0,8 Mach hızlarında ölçüm yapma kapasitesine sahip bir sistem kurgulanmaktadır; kurulması planlanan Rüzgar Tünelinde ön testlerde (dry-run) ilk test edilecek CRM Uçak modeli, hız aralıkları 0 – 0,4 Mach kademesinde olacaktır. Belirtilen aralığına girecek şekilde CRM Uçak Modeli ile 0 – 0,4 Mach hız aralığında ölçüm sonuçları elde edilmiştir.

İlgili tez çalışmasında bahsi geçen ekipmanların yerleşik Rüzgar Tüneline entegre edilmesi ile, sistem henüz test edilememiş olması dolayısıyla bu tez çalışmasında Validasyon ile değerlendirmesi yapılan PIV ölçümleri Katar Üniversitesi ASPIRE laboratuvarının kapalı devre rüzgar tünelinden elde edilen verilere dayandırılmıştır. İlgili çalışmada hava akış hızı ve dağılımı, 3 m/s sabit hız dikkate alınarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ANSYS Fluent simülasyonları kullanılarak analiz edilmiştir.

Test edilen hız aralığı, kurulması hedeflenen tünel hava akış değerlerinin altında olmakla birlikte, sistemin fonksiyonunu yerine getirdiğini gözlemlemek maksadıyla bir temel ve referans noktası olarak incelemeye alınmıştır.

6.1. Bulgular

Yapılan çalışma neticesinde elde edilen bulgular aşağıda sıralanmıştır;

- I. Validasyonda kullanılan model ile CFD ölçümleri ile elde edilen hız değerleri yaklaşık olarak 0 - 0,6 m/s arasında doğru sonuçlar vermediği, çok düşük hızlarda (0,6 m/s altı değerler) sonucun ırsadı olduğu gözlenmiştir.
- II. Valide edilen modelde sonuçlar arasındaki ortalama tutarsızlık tüm akış alanı değerlendirildiğinde yaklaşık %15,08 ve akış hızının 0,6 m/s den büyük olduğu bölgelerde yapılan ölçüm noktalarının ortalaması alındığında ortalama tutarsızlık %5,42 seviyesinde olduğu tespit edilmiştir.
- III. CFD yazılımı aracılığıyla yapılan yaklaşımlar ile elde edilen sonuçlar, akış koşulları ve incelenen hız değerlerinde bir ön fikir veriyor, taslak geometrinin oluşturulması ve ön testlerinin gerçekleştirmesine aracı oluyor olsa da deneysel veriler olmaksızın mevcut olgunluk seviyesinde tek başına tasarım girdisi olarak kabul edilmesi ve referans alınmasının risk barındırdığı tespit edilmiştir. Öneriler kısmında belirtilen riskin nasıl bertaraf edilebileğinden de bahsedilmiştir.

- IV. CFD yazılımı aracılığıyla elde edilen veriler ile akış alanı, türbülans, girdap etkileri, dönüm noktaları, hız artış ve düşüş bölgelerinin tespitinde araç olarak ön tasarım faaliyetlerinde kullanılsa da mevcut olgunluk seviyesinde optimize edilen modelde nihai tasarımın dondurulması öncesi deneysel doğrulamanın gerekli olduğu görülmüştür.
- V. Benzeri şekilde CRM Uçak modeli hız ölçümlerine dayandırılarak, akış hızı 0,05 Mach seviyesinden 0,40 seviyesine yaklaştıkça yüzeydeki vektörel hız değerlerinin hava akış hızına oranla gözlenebilir bir artış tespit edilmiştir.
- VI. Çalışma sonunda CRM Uçak Modeli, 0,4 Mach sabit hava akış hızında, model merkez çizgisi üzerinde, 0,4 m yükseklikte X doğrultusunda vektörler ile görselleştirilen hız büyüklüklerinin, referans değerlendirmesi için hız değerlerinin CFD sonuçları elde edilmiştir.

6.2. Öneriler

ANSYS Fluent CFD ile elde edilen hız değerleri, Uçak CRM Modelinin kurulan PIV düzeneği ile tam fonksiyonel testlerinin yapılabilmesi ve gelecekte tesisin devreye alınması ile mümkün kılınabilecektir; dolayısıyla elde edilen hız vektör değerlerinin doğruması gelecek çalışmalar ile yapılabilecek, ihtiyaç duyulan koşullar ile testler gerçekleştirilecek, ölçümlenerek karşılaştırılacaktır.

İlgili çalışma başlangıcı, giriş bölümünde de belirtildiği üzere temel amaç yüksek tünel işletme maliyetleri dolayısıyla belirli model tiplerinde (özellikle ön tasarım aşamasında taslak geometrilerde) tanımlanan akış özelliklerinde elde edilmek istenilen verilerin kabul edilebilir doğrulukta sağlanabildiği taktirde tünel testleri yapılmaksızın CFD sonuçlarına dayandırılmasıdır. elde edilen hız değerleri ile tasarım referans girdilerinin sağlanabilirliği görülmüş ve kullanımı önerilmektedir.

CFD ile çözümlenen sonuçların doğruluk derecesinin artırılabilmesi adına ağ yoğunluğunun (üçgensel bölgelerin sayısının) artırılması ile gerçeğe daha yakın sonuçlar alınabileceği değerlendirilmektedir; gelecek çalışmalarda ağ yoğunluğu ile gerçek sonuca yakınsama miktarının, etken olarak incelenmesi önerilmektedir.

Yüksek doğruluk hedefine ulaşmak için belli model tiplerinde tekrarlı testler sonrasında farklar gözlenerek, farklı hızlarda yüzde sapmanın tespit edilmesi ve düzeltme katsayıları ile sonucun yakınsaması sağlanabilir. İlgili öngörünün oluşması tekrarlı testler ve mühendislik verileri (engineering judgment) tecrübe edilerek oluşacaktır.

Tekrarlı testler ile ıraksamanın oransal olarak tespiti ile belli düzeltme katsayıları üretilmesi mümkündür. Doğru sonuçların eldesi için CFD'nin yanı sıra belli model tiplerinde yapılacak tekrarlı testler sonrası akış fenomeninin bağlı olduğu faktörleri değiştirip, çıkan sonuçlar ve faktörler arasında sayısal bağlantı kurma yoluyla en doğru sonuca yakınsanacağı ve bunun gelecek çalışmalara konu olabileceği değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] 2 D PIV Reference manual (2006) Skovlunde, Denmark DantecDynamics A/S, 142, 126-132.
- [2] Zhengbai Chang & Jin Jiang (2022) Experimental Investigation of the Steady State Flow Field with Particle Image Velocimetry on a Nozzle Check Valve and Its Dynamic Behaviour on the Pipeline System Energies, MDPI, Energies 15(15), 5393.
- [3] Kevin T. Du Clos, Ian T. Jones, Tyler J. Carrier, Damian C. Brady and Peter A. Jumar (2017) Model assisted measurements of suspension feeding flow velocities J Exp Biol (2017) 220 (11): 2096–2107.
- [4] Devis Gollin (2017) An investigation on the collisional behaviour of granular flows, The University of Sheffield, Doctor of Philosophy.
- [5] Measurement of Velocity Profiles by Using Particle Image Velocimeter, Onur Kemalli (2009) Adaptive PIV Processing Based on Ensemble Correlation, METU the degree of Master of Science thesis.
- [6] Christian E Willert (2020) Identifying the optimal spatial distribution of tracers for optical sensing of stream surface flow, HESS, 24, 5173–5185.
- [7] Alejandro Del Estal Herrero, Mustafa Percin, Matej Karasek (2018) Flow Visualization around a Flapping Wing Micro Air Vehicle in Free Flight Using Large Scale PIV Aerospace Aerospace, 5(4), 99, 5(4), 99.
- [8] Scarano, F Ghaemi, S Caridi, G C A Bosbach, J Dierksheide, U Sciacchitano, A (2015) On the use of helium filled soap bubbles for large scale tomographic PIV in wind tunnel experiments Exp Fluids 56 42.
- [9] Remes, B D W Esden Tempski, P van Tienen, F Smeur, E De Wagter, C de Croon, G C H E Lisa S (2014) Autopilot for GPS based flight of MAVs In Proceedings of the IMAV International Micro Air Vehicle Conference and Competition 2014 Delft, The

Netherlands, 12 August 2014.

- [10] Computers in Biology and Medicine 146 (2022) 105358 Paul Roger Leinan a,*, Thomas Grønli c, Paal Skjetne a, Morten Smedsrud Wigen c, Stig Urheim d,e, Lasse Lovstakken c, Sigrid K. Dahl b Comparison of ultrasound vector flow imaging and CFD simulations with PIV measurements of flow in a left ventricular outflow trackt phantom -Implications for clinical use and in silico studies.
- [11] Airflow Measurements Using PIV/LDV are Characterized by Accuracy and Low Operation Costs when Utilizing Air-Filled Soap Bubble Seeding, TSI Ali Pakari, Saud Ghani (2019) Airflow assessment in a naturally ventilated greenhouse equipped with wind towers: numerical simulation and wind tunnel experiments, Energy & Buildings.
- [12] ..S.Discetti (2012) Fast 3D PIV with direct sparse cross-correlations Experiments in ...Fluids volume 53, pages 1437–1451.
- [13] D I Zaripov¹, Renfu Li² (2017) High-performance technique for initial velocity field calculation based on PIV images processing, TPH, Journal of Physics: Conf. Series 899 (2017) 062007.
- [14] Ali Pakari *, Saud Ghani (2019) 1–11 Airflow assessment in a naturally ventilated greenhouse equipped with wind towers: numerical simulation and wind tunnel experiments Energy & Buildings 199.
- [15] Ghasem Akbari, Nader Montazerin, (2021) Flow based features and validation metric for machine learning reconstruction of PIV data Measurement Science and Technology, 33 (1) (2022) 015203.
- [16] L. Li, C.M. Mak, The assessment of the performance of a windcatcher system using computational fluid dynamics, Build. Environ. 42 (3) (2007) 1135–1141, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.12.015.

- [17] B.M. Jones, R. Kirby, Quantifying the performance of a top–down natural ventilation windcatcher, *Build. Environ.* 44 (2009) 1925–1934, doi: 10.1016/j. buildenv.2009.01.004.
- [18] J.K. Calautit, B.R. Hughes, Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower, *Build. Environ.* 80 (2014), doi: 10.1016/j.buildenv.2014.05.022.
- [19] J.K. Calautit, B.R. Hughes, Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower, *Energy Build.* 84 (2014) 367–377, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.08.015.
- [20] J.K. Calautit, D.O. Connor, B.R. Hughes, Determining the optimum spacing and arrangement for commercial wind towers for ventilation performance, *Build. Environ.* 82 (2014) 274–287, doi: 10.1016/j.buildenv.2014.08.024.
- [21] H. Montazeri, F. Montazeri, CFD simulation of cross-ventilation in buildings using rooftop wind-catchers: impact of outlet openings, *Renewable Energy* 118 (2018) 502–520, doi: 10.1016/j.renene.2017.11.032.
- [22] T. van Hooff, B. Blocken, Y. Tominaga, On the accuracy of CFD simulations of cross-ventilation flows for a generic isolated building: comparison of RANS, LES and experiments, *Build. Environ.* 114 (2017) 148–165, doi: 10.1016/j. buildenv.2016.12.019.
- [23] B.E. Launder, D.B. Spalding, The numerical computation of turbulent flows, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3 (1974) 269–289, doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
- [24] *Wind Tunnel Studies of Buildings and Structures*, American Society of Civil Engineers, 1999, doi: 10.1061/9780784403198.
- [25] M. Raffel, C.E. Willert, S.T. Wereley, J. Kompenhans, *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*, second ed., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, doi: 10.

1007/978- 3- 540- 72308- 0.

- [26] N.E. Murray, L.S. Ukeiley, An application of Gappy POD for subsonic cavity flow PIV data, *Exp. Fluids* 42 (2007) 79–91, doi: 10.1007/s00348- 006- 0221- y.
- [27] P. Karava, T. Stathopoulos, A.K. Athienitis, Airflow assessment in cross- ventilated buildings with operable façade elements, *Build. Environ.* 46 (2011) 266–279, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.07.022.
- [28] Larsson, I. A. S.; Lindmark, E. M.; Lundström, T. S.; Nathan, G. J. (2011), "Secondary Flow in Semi Circular Ducts" (PDF), *Journal of Fluids Engineering*, 133 (10): 101206–101214, doi:10.1115/1.4004991, hdl:2263/42958.

EK 1

(title "Velocity Magnitude")
(labels "Position" "Velocity Magnitude")

((xy/key/label "Merkez-hatti-boyunca-1m-yuksekklikte-hiz")

Merkez		iç		Dış			
-14,45	0				0	0	0
-14,4472	0,001422				0,0028	0,009655	0,001422
-14,3946	0,027838				0,0554	0,191034	0,027838
-14,2147	0,131652				0,2353	0,811379	0,131652
-14,1697	0,157621				0,2803	0,966552	0,157621
-13,9843	0,178111				0,4657	1,605862	0,178111
-13,9673	0,182461				0,4827	1,664483	0,182461
-13,9568	0,185122				0,4932	1,70069	0,185122
-13,9226	0,204435				0,5274	1,818621	0,204435
-13,9114	0,210737				0,5386	1,857241	0,210737
-13,8371	0,258054				0,6129	2,113448	0,258054
-13,8082	0,279721				0,6418	2,213103	0,279721
-13,6632	0,388233				0,7868	2,713103	0,388233
-13,6371	0,406818				0,8129	2,803103	0,406818
-13,6225	0,41608				0,8275	2,853448	0,41608
-13,5537	0,452177				0,8963	3,09069	0,452177
-13,4611	0,50071				0,9889	3,41	0,50071
-13,4476	0,507591				1,0024	3,456552	0,507591
-13,3685	0,538432				1,0815	3,72931	0,538432
-13,3031	0,563956				1,1469	3,954828	0,563956
-13,2111	0,610878				1,2389	4,272069	0,610878
-13,1395	0,626414				1,3105	4,518966	0,626414
-13,0781	0,644123				1,3719	4,73069	0,644123
-13,0647	0,646744				1,3853	4,776897	0,646744
-12,921	0,674882				1,529	5,272414	0,674882
-12,7975	0,700215				1,6525	5,698276	0,700215
-12,791	0,701599				1,659	5,72069	0,701599
-12,7818	0,703591				1,6682	5,752414	0,703591
-12,59	0,745317				1,86	6,413793	0,745317
-12,5751	0,748546				1,8749	6,465172	0,748546
-12,5509	0,754756				1,8991	6,548621	0,754756
-12,5007	0,76571				1,9493	6,721724	0,76571
-12,434	0,78267				2,016	6,951724	0,78267
-12,3892	0,792185				2,0608	7,106207	0,792185
-12,3777	0,794916				2,0723	7,145862	0,794916
-12,2528	0,824545				2,1972	7,576552	0,824545
-12,1918	0,840514				2,2582	7,786897	0,840514
-12,168	0,84616				2,282	7,868966	0,84616
-12,1662	0,846643				2,2838	7,875172	0,846643
-12,1351	0,855069				2,3149	7,982414	0,855069
-12,0838	0,867157				2,3662	8,15931	0,867157
-12,0138	0,883701				2,4362	8,40069	0,883701

-11,9041	0,896666					2,5459	8,778966	0,896666
-11,8491	0,903162					2,6009	8,968621	0,903162
-11,8147	0,907993					2,6353	9,087241	0,907993
-11,7722	0,91437					2,6778	9,233793	0,91437
-11,7502	0,914893					2,6998	9,309655	0,914893
-11,7013	0,916383					2,7487	9,478276	0,916383
-11,5362	0,922556					2,9138	10,04759	0,922556
-11,4679	0,91757					2,9821	10,2831	0,91757
-11,4544	0,917012					2,9956	10,32966	0,917012
-11,3104	0,911067					3,1396	10,82621	0,911067
-11,3098	0,911048					3,1402	10,82828	0,911048
-11,309	0,910925					3,141	10,83103	0,910925
-11,3089	0,910909					3,1411	10,83138	0,910909
-11,2171	0,898137					3,2329	11,14793	0,898137
-11,0078	0,860208					3,4422	11,86966	0,860208
-10,9968	0,857838					3,4532	11,90759	0,857838
-10,8363	0,822951					3,6137	12,46103	0,822951
-10,8252	0,820328					3,6248	12,49931	0,820328
-10,773	0,808038					3,677	12,67931	0,808038
-10,759	0,80429					3,691	12,72759	0,80429
-10,5279	0,741105	-10,5	0	-10,5	0	3,9221	13,52448	0,741105
-10,4263	0,713336	-10,4666	0,064428	-10,4822	0,023902	4,0237	13,87483	0,713336
-10,3828	0,701343	-10,4249	0,144925	-10,4811	0,02538	4,0672	14,02483	0,701343
-10,3583	0,694525	-10,3564	0,300903	-10,3489	0,208632	4,0917	14,10931	0,694525
-10,3233	0,685192			-10,3228	0,249703	4,1267	14,23	0,685192
-10,1607	0,640012	-10,2402	0,570577	-10,2471	0,368644	4,2893	14,79069	0,640012
-10,1464	0,636115	-10,0683	0,543092	-10,1748	0,369744	4,3036	14,84	0,636115
-10,0625	0,614161			-10,0162	0,371406	4,3875	15,12931	0,614161
-10,0589	0,613242	-9,99572	0,531479	-10,0154	0,371906	4,3911	15,14172	0,613242
-10,0552	0,612278	-9,97616	0,527803	-10,0085	0,376209	4,3948	15,15448	0,612278
-10,0497	0,610842	-9,9632	0,52537	-10,0079	0,376012	4,4003	15,17345	0,610842
-9,99121	0,595565	-9,95534	0,524496	-10,0028	0,374385	4,45879	15,37514	0,595565
-9,93167	0,580022	-9,9461	0,524158	-9,86457	0,401671	4,51833	15,58045	0,580022
-9,89403	0,571324	-9,93636	0,523108	-9,78261	0,406082	4,55597	15,71024	0,571324
-9,84509	0,559753	-9,91964	0,521303			4,60491	15,879	0,559753
-9,81238	0,552017	-9,62436	0,514288	-9,7423	0,421735	4,63762	15,99179	0,552017
-9,77999	0,544093	-9,56818	0,505632	-9,68421	0,444286	4,67001	16,10348	0,544093
-9,71423	0,528005	-9,53047	0,500936	-9,62285	0,465648	4,73577	16,33024	0,528005
-9,70395	0,525609	-9,469	0,49328	-9,57412	0,464044	4,74605	16,36569	0,525609
-9,69707	0,524064			-9,54759	0,463171	4,75293	16,38941	0,524064
-9,5142	0,486706			-9,44913	0,463736	4,9358	17,02	0,486706
-9,48916	0,481868	-9,37062	0,48377	-9,44289	0,463772	4,96084	17,10634	0,481868
-9,37977	0,462795	-9,29255	0,476223	-9,29296	0,538607	5,07023	17,48355	0,462795
-9,37644	0,462215	-9,28715	0,475454	-9,28478	0,53752	5,07356	17,49503	0,462215
-9,37099	0,461226	-9,28396	0,475078	-9,163	0,501358	5,07901	17,51383	0,461226
-9,23662	0,43882	-9,22666	0,468297	-9,13997	0,494521	5,21338	17,97717	0,43882
-9,11718	0,420826	-9,18387	0,465148	-9,07437	0,501242	5,33282	18,38903	0,420826
-9,09336	0,417451	-9,13165	0,461305	-8,95818	0,565513	5,35664	18,47117	0,417451

-9,07267	0,414525	-9,05591	0,452379	-8,84402	0,600096	5,37733	18,54252	0,414525
-9,02553	0,407837	-8,91791	0,439017	-8,76151	0,591374	5,42447	18,70507	0,407837
-9,01246	0,405982	-8,79412	0,433418	-8,73783	0,589424	5,43754	18,75014	0,405982
-8,7781	0,377746	-8,69015	0,428714	-8,64795	0,582022	5,6719	19,55828	0,377746
-8,75165	0,374443	-8,667	0,427213	-8,61489	0,58064	5,69835	19,64948	0,374443
-8,74384	0,373468	-8,61477	0,424236	-8,57175	0,600157	5,70616	19,67641	0,373468
-8,6768	0,365357	-8,58449	0,42308	-8,45585	0,652604	5,7732	19,90759	0,365357
-8,6258	0,360051	-8,48338	0,420848	-8,39117	0,67582	5,8242	20,08345	0,360051
-8,58179	0,355471	-8,37618	0,419113	-8,3763	0,677217	5,86821	20,23521	0,355471
-8,44878	0,340765	-8,26457	0,417509	-8,35125	0,690379	6,00122	20,69386	0,340765
-8,41606	0,337655	-8,26363	0,417495	-8,24926	0,706082	6,03394	20,80669	0,337655
-8,29558	0,328918	-8,22991	0,416805	-8,15116	0,721184	6,15442	21,22214	0,328918
-8,22145	0,323542	-8,18549	0,416934	-8,04546	0,748678	6,22855	21,47776	0,323542
-8,21737	0,323244	-8,17343	0,417263	-7,97892	0,740315	6,23263	21,49183	0,323244
-8,1502	0,319141	-8,09498	0,417728	-7,91619	0,774093	6,2998	21,72345	0,319141
-8,01499	0,307377	-8,05015	0,418006	-7,83086	0,777979	6,43501	22,18969	0,307377
-7,99004	0,305486	-7,8981	0,419303	-7,80805	0,779017	6,45996	22,27572	0,305486
-7,94428	0,30259	-7,85627	0,418093			6,50572	22,43352	0,30259
-7,92724	0,301425	-7,80706	0,418721			6,52276	22,49228	0,301425
-7,88456	0,298505	-7,67025	0,419355			6,56544	22,63945	0,298505
-7,87726	0,297965	-7,64771	0,419651	-7,75742	0,783181	6,57274	22,66462	0,297965
-7,86167	0,296809	-7,5442	0,42101	-7,74528	0,784179	6,58833	22,71838	0,296809
-7,747	0,288087	-7,49451	0,421757	-7,69334	0,792892	6,703	23,11379	0,288087
-7,68412	0,284914	-7,48554	0,42187	-7,62572	0,813029	6,76588	23,33062	0,284914
-7,57778	0,279548	-7,47711	0,421974	-7,55547	0,833952	6,87222	23,69731	0,279548
-7,43052	0,270874	-7,46977	0,421961	-7,49723	0,850665	7,01948	24,2051	0,270874
-7,35197	0,267095			-7,44918	0,840161	7,09803	24,47597	0,267095
-7,34848	0,266927			-7,39647	0,828641	7,10152	24,488	0,266927
-7,33648	0,266449			-7,33082	0,848012	7,11352	24,52938	0,266449
-7,29405	0,265082					7,15595	24,67569	0,265082
-7,27574	0,264428	-7,28682	0,421637	-7,26789	0,86658	7,17426	24,73883	0,264428
-7,24535	0,26258	-7,20258	0,422618	-7,18481	0,88438	7,20465	24,84362	0,26258
-7,2324	0,261792	-7,16379	0,423309			7,2176	24,88828	0,261792
-7,15153	0,259815	-7,16113	0,423356			7,29847	25,16714	0,259815
-7,08349	0,258152			-7,13307	0,893599	7,36651	25,40176	0,258152
-7,07393	0,257921			-7,03271	0,891816	7,37607	25,43472	0,257921
-7,0277	0,256083	-7,03049	0,427676	-7,00391	0,886403	7,4223	25,59414	0,256083
-6,90716	0,25129	-6,90321	0,42896	-6,85299	0,858033	7,54284	26,00979	0,25129
-6,82507	0,247496	-6,89189	0,429074	-6,82085	0,857127	7,62493	26,29286	0,247496
-6,76276	0,247055	-6,83598	0,428283	-6,75796	0,855355	7,68724	26,50772	0,247055
-6,71577	0,246116	-6,74595	0,428529	-6,74816	0,852914	7,73423	26,66976	0,246116
-6,64211	0,244643	-6,73478	0,428428	-6,73354	0,849907	7,80789	26,92376	0,244643
-6,5112	0,239209	-6,72724	0,428359	-6,51549	0,805068	7,9388	27,37517	0,239209
-6,48299	0,238662	-6,6949	0,428191			7,96701	27,47245	0,238662
-6,46556	0,239171	-6,56961	0,428393			7,98444	27,53255	0,239171
-6,41038	0,238251	-6,48094	0,428537	-6,41737	0,784972	8,03962	27,72283	0,238251
-6,39074	0,237924	-6,47846	0,428577	-6,32092	0,759203	8,05926	27,79055	0,237924
-6,37427	0,237218	-6,47591	0,428654	-6,20761	0,728932	8,07573	27,84734	0,237218

-6,33603	0,236388	-6,3662	0,43194	-6,19783	0,726175	8,11397	27,97921	0,236388
-6,24437	0,234398	-6,2434	0,432634	-6,18206	0,721773	8,20563	28,29528	0,234398
-6,12374	0,231221	-6,19395	0,432582	-6,06643	0,684623	8,32626	28,71124	0,231221
-6,0419	0,229588	-6,14663	0,432532	-5,89784	0,648929	8,4081	28,99345	0,229588
-5,94101	0,230066	-6,03129	0,433052	-5,76968	0,617556	8,50899	29,34134	0,230066
-5,93978	0,230072	-6,01671	0,433418	-5,72078	0,602806	8,51022	29,34559	0,230072
-5,89415	0,229961	-5,82143	0,436361	-5,68667	0,594296	8,55585	29,50293	0,229961
-5,7586	0,225312	-5,80994	0,436534	-5,65882	0,587349	8,6914	29,97034	0,225312
-5,72763	0,224423	-5,76724	0,436922	-5,64842	0,585028	8,72237	30,07714	0,224423
-5,64827	0,225479	-5,674	0,437864	-5,63581	0,581102	8,80173	30,35079	0,225479
-5,61179	0,22565	-5,64934	0,438113	-5,46705	0,563209	8,83821	30,47659	0,22565
-5,55365	0,225838	-5,55389	0,436771	-5,34669	0,550447	8,89635	30,67707	0,225838
-5,42981	0,226119	-5,45718	0,437133	-5,29535	0,541399	9,02019	31,1041	0,226119
-5,34985	0,2263	-5,43769	0,437205	-5,28185	0,539019	9,10015	31,37983	0,2263
-5,27578	0,227001	-5,37869	0,436751	-5,23826	0,532911	9,17422	31,63524	0,227001
-5,20361	0,227617	-5,33447	0,436933	-5,22765	0,531326	9,24639	31,8841	0,227617
-5,18112	0,227656	-5,30527	0,438046	-5,21571	0,529999	9,26888	31,96166	0,227656
-5,00259	0,227972	-5,30274	0,438142	-5,15924	0,519743	9,44741	32,57728	0,227972
-4,97483	0,22901	-5,19476	0,438565	-5,14105	0,51644	9,47517	32,673	0,22901
-4,90291	0,231701	-5,16486	0,438332	-4,96895	0,506637	9,54709	32,921	0,231701
-4,8073	0,231278	-5,04145	0,438628	-4,85552	0,491562	9,6427	33,25069	0,231278
-4,77275	0,233598	-5,01379	0,438555	-4,83178	0,488408	9,67725	33,36983	0,233598
-4,75567	0,23311	-4,96017	0,439569	-4,82145	0,48767	9,69433	33,42872	0,23311
-4,74165	0,232709	-4,81575	0,439211	-4,61082	0,477971	9,70835	33,47707	0,232709
-4,58647	0,236498	-4,77083	0,439415	-4,6053	0,477626	9,86353	34,01217	0,236498
-4,57746	0,236718	-4,63827	0,442198	-4,58651	0,476452	9,87254	34,04324	0,236718
-4,44056	0,240128	-4,60319	0,443733	-4,5251	0,474908	10,00944	34,51531	0,240128
-4,32688	0,239876	-4,58196	0,443755	-4,47072	0,468948	10,12312	34,90731	0,239876
-4,3174	0,239855	-4,54404	0,443521	-4,45903	0,468584	10,1326	34,94	0,239855
-4,20458	0,235344	-4,40048	0,443158	-4,33218	0,46464	10,24542	35,32903	0,235344
-4,15898	0,236528	-4,39226	0,443065	-4,193	0,460886	10,29102	35,48628	0,236528
-4,11781	0,237597	-4,33666	0,442431	-4,13511	0,459102	10,33219	35,62824	0,237597
-4,0616	0,239017	-4,31158	0,442517	-4,06642	0,458043	10,3884	35,82207	0,239017
-3,83388	0,241557	-4,28287	0,442644	-3,91589	0,464301	10,61612	36,60731	0,241557
-3,81695	0,241746	-4,27804	0,442696	-3,81888	0,459635	10,63305	36,66569	0,241746
-3,81066	0,241982	-4,27706	0,442697	-3,75477	0,456551	10,63934	36,68738	0,241982
-3,78413	0,242278	-4,2327	0,442739	-3,65198	0,451699	10,66587	36,77886	0,242278
-3,77587	0,242499	-4,07856	0,443565	-3,6234	0,451952	10,67413	36,80734	0,242499
-3,77389	0,242471	-4,0595	0,443706	-3,5765	0,451357	10,67611	36,81417	0,242471
-3,7735	0,242466	-3,95663	0,446303	-3,57152	0,451202	10,6765	36,81552	0,242466
-3,52028	0,250716	-3,85469	0,448876	-3,57152	0,451202	10,92972	37,68869	0,250716
-3,37805	0,25436	-3,83641	0,449308	-3,34945	0,456082	11,07195	38,17914	0,25436
-3,37121	0,254535	-3,82072	0,449211	-3,25522	0,457473	11,07879	38,20272	0,254535
-3,25117	0,255635	-3,70217	0,44798	-3,23914	0,457508	11,19883	38,61666	0,255635
-3,23605	0,255836	-3,65797	0,449069	-3,13139	0,45463	11,21395	38,66879	0,255836
-3,2276	0,255535	-3,54593	0,451829	-3,06058	0,452739	11,2224	38,69793	0,255535
-3,06272	0,26258	-3,53053	0,451997	-3,01531	0,452472	11,38728	39,26648	0,26258
-2,94998	0,26462	-3,50159	0,451759	-2,93423	0,452618	11,50002	39,65524	0,26462

-2,93887	0,264975	-3,28912	0,450017	-2,8902	0,451005	11,51113	39,69355	0,264975
-2,88402	0,266724	-3,21599	0,449954	-2,85012	0,449537	11,56598	39,88269	0,266724
-2,87593	0,267208	-3,1932	0,450241	-2,74412	0,452845	11,57407	39,91059	0,267208
-2,86128	0,268086	-3,15742	0,449993	-2,62874	0,45455	11,58872	39,9611	0,268086
-2,77297	0,269973	-3,08882	0,450743	-2,58022	0,455267	11,67703	40,26562	0,269973
-2,74657	0,270559	-2,83549	0,453904	-2,51798	0,454866	11,70343	40,35666	0,270559
-2,71025	0,271242	-2,82128	0,453904	-2,47864	0,455901	11,73975	40,4819	0,271242
-2,69545	0,27152	-2,78376	0,453818	-2,40045	0,45661	11,75455	40,53293	0,27152
-2,48508	0,275872	-2,74709	0,453317	-2,34946	0,455514	11,96492	41,25834	0,275872
-2,44362	0,277907	-2,65894	0,452111	-2,30252	0,454396	12,00638	41,40131	0,277907
-2,42423	0,278942	-2,55515	0,453657	-2,17285	0,451306	12,02577	41,46817	0,278942
-2,39438	0,280534	-2,53167	0,452357	-2,10279	0,448437	12,05562	41,5711	0,280534
-2,37273	0,281242	-2,50058	0,452497	-1,91512	0,446332	12,07727	41,64576	0,281242
-2,34163	0,282049	-2,41733	0,454659	-1,90201	0,446553	12,10837	41,753	0,282049
-2,29448	0,283271	-2,39066	0,455129	-1,89496	0,446429	12,15552	41,91559	0,283271
-2,10002	0,289188	-2,29333	0,456843	-1,88207	0,44662	12,34998	42,58614	0,289188
-2,02596	0,292918	-2,09203	0,457209	-1,86366	0,446697	12,42404	42,84152	0,292918
-1,95302	0,296154	-2,0426	0,458505	-1,84041	0,445899	12,49698	43,09303	0,296154
-1,91226	0,297962	-1,99083	0,458223	-1,80175	0,447392	12,53774	43,23359	0,297962
-1,83466	0,300568	-1,97569	0,457694	-1,66278	0,450013	12,61534	43,50117	0,300568
-1,7892	0,303016	-1,90531	0,455231	-1,53523	0,452418	12,6608	43,65793	0,303016
-1,74527	0,305382	-1,83284	0,455925	-1,33079	0,446284	12,70473	43,80941	0,305382
-1,61427	0,310073	-1,80877	0,456155	-1,32701	0,44617	12,83573	44,26114	0,310073
-1,60035	0,310829	-1,68652	0,459779	-1,32075	0,4458	12,84965	44,30914	0,310829
-1,50058	0,313344	-1,57125	0,462057	-1,31025	0,445962	12,94942	44,65317	0,313344
-1,3154	0,318916	-1,54717	0,462533	-1,30088	0,446037	13,1346	45,29172	0,318916
-1,24657	0,322188	-1,48067	0,461991	-1,29343	0,445683	13,20343	45,52907	0,322188
-1,23403	0,322561	-1,35102	0,460538	-1,28386	0,445195	13,21597	45,57231	0,322561
-1,04758	0,334795	-1,26503	0,463562	-1,27711	0,445087	13,40242	46,21524	0,334795
-0,97286	0,33909	-1,21402	0,463702	-1,24751	0,444829	13,47714	46,4729	0,33909
-0,87676	0,338489	-1,21057	0,463712	-1,02694	0,442909	13,57324	46,80427	0,338489
-0,83255	0,338014	-1,14666	0,460745	-0,99952	0,441795	13,61745	46,95672	0,338014
-0,77512	0,341487	-1,12104	0,460487	-0,98772	0,441316	13,67488	47,15477	0,341487
-0,71995	0,344993	-1,0306	0,459576	-0,84843	0,44115	13,73005	47,345	0,344993
-0,70244	0,345785	-0,97869	0,45983	-0,69158	0,442499	13,74756	47,40537	0,345785
-0,69605	0,346205	-0,94125	0,459723	-0,6911	0,442503	13,75395	47,42743	0,346205
-0,63023	0,350526	-0,78614	0,459279	-0,69033	0,442497	13,81978	47,6544	0,350526
-0,45166	0,357658	-0,70162	0,460343	-0,44627	0,444172	13,99834	48,27014	0,357658
-0,43383	0,358802	-0,66513	0,459593	-0,41149	0,444001	14,01617	48,33162	0,358802
-0,30079	0,367659	-0,57969	0,463141	-0,32039	0,442252	14,14921	48,79038	0,367659
-0,27243	0,369547	-0,45078	0,464329	-0,2773	0,441429	14,17757	48,88817	0,369547
-0,14213	0,378649	-0,40719	0,464132	-0,24692	0,439801	14,30787	49,33747	0,378649
-0,12945	0,379394	-0,33969	0,463828	-0,18011	0,43622	14,32055	49,3812	0,379394
-0,11333	0,380341	-0,125	0,462441	-0,10045	0,435916	14,33668	49,43681	0,380341
-0,01137	0,385471	-0,0588	0,463559	-0,0308	0,437959	14,43863	49,78839	0,385471
0,002896	0,38646	-0,05419	0,463636	0,081018	0,437339	14,4529	49,83757	0,38646
0,07858	0,391703	-0,04553	0,464062	0,116673	0,43644	14,52858	50,09855	0,391703
0,21039	0,396033	-0,03053	0,464468	0,12929	0,436107	14,66039	50,55307	0,396033

0,239698	0,396818	-0,01495	0,463805	0,228613	0,433482	14,6897	50,65413	0,396818
0,298307	0,398386	0,021625	0,46407	0,287889	0,434326	14,74831	50,85623	0,398386
0,320007	0,398751	0,022443	0,464072	0,300757	0,434834	14,77001	50,93106	0,398751
0,468977	0,4033	0,335985	0,465094	0,423859	0,439697	14,91898	51,44475	0,4033
0,488281	0,404163	0,336417	0,465078	0,526843	0,436105	14,93828	51,51131	0,404163
0,500998	0,404951	0,36263	0,464103	0,658286	0,434343	14,951	51,55517	0,404951
0,631322	0,413032	0,455863	0,464769	0,686172	0,434074	15,08132	52,00456	0,413032
0,63559	0,413303	0,554177	0,466307	0,739059	0,433564	15,08559	52,01928	0,413303
0,641816	0,414086	0,589963	0,46642			15,09182	52,04074	0,414086
0,641971	0,414106	0,603169	0,466461			15,09197	52,04128	0,414106
0,706406	0,419883	0,644272	0,465502			15,15641	52,26347	0,419883
0,769454	0,422723	0,683202	0,465838	0,755804	0,432632	15,21945	52,48088	0,422723
0,908513	0,432702	0,776452	0,466643	0,789408	0,430763	15,35851	52,96039	0,432702
1,04487	0,437763	0,948491	0,46789	0,980562	0,42754	15,49487	53,43059	0,437763
1,05395	0,438505	0,982919	0,469759	0,98363	0,427597	15,50395	53,4619	0,438505
1,0948	0,44201	1,02285	0,46948	0,98448	0,427627	15,5448	53,60276	0,44201
1,1295	0,445442	1,06553	0,469183	1,11691	0,432298	15,5795	53,72241	0,445442
1,13315	0,445858	1,06946	0,468808	1,23868	0,432083	15,58315	53,735	0,445858
1,14088	0,446022	1,11844	0,46898	1,24682	0,431856	15,59088	53,76166	0,446022
1,35535	0,464344	1,30588	0,469533	1,27891	0,430961	15,80535	54,50121	0,464344
1,37892	0,467061	1,33128	0,470532	1,35193	0,432994	15,82892	54,58248	0,467061
1,40874	0,468626	1,43807	0,471643	1,38797	0,433609	15,85874	54,68531	0,468626
1,49954	0,47566	1,60126	0,470935	1,39527	0,433734	15,94954	54,99841	0,47566
1,54698	0,479335	1,60335	0,47084	1,53582	0,428	15,99698	55,162	0,479335
1,6969	0,494246	1,6332	0,469483	1,557	0,427136	16,1469	55,67897	0,494246
1,7257	0,496848			1,62689	0,424652	16,1757	55,77828	0,496848
1,75562	0,49955	1,75792	0,467427	1,68401	0,424506	16,20562	55,88145	0,49955
1,88194	0,507681	1,77154	0,467203	1,75516	0,4229	16,33194	56,31703	0,507681
1,94749	0,513463	1,8328	0,466477	1,76465	0,422793	16,39749	56,54307	0,513463
2,00066	0,516662	1,90952	0,467152	1,76553	0,422783	16,45066	56,72641	0,516662
2,03379	0,518655	1,94214	0,470372	1,97048	0,424118	16,48379	56,84066	0,518655
2,15645	0,530337	1,98478	0,474582	2,05979	0,422955	16,60645	57,26362	0,530337
2,16852	0,531502	2,03268	0,473182	2,07562	0,422721	16,61852	57,30524	0,531502
2,19837	0,534383	2,07226	0,470338	2,10494	0,422287	16,64837	57,40817	0,534383
2,23393	0,538901	2,13806	0,465609	2,1924	0,420729	16,68393	57,53079	0,538901
2,27739	0,544421	2,19613	0,466098	2,34259	0,418855	16,72739	57,68066	0,544421
2,47232	0,561552	2,21848	0,466287	2,36512	0,419088	16,92232	58,35283	0,561552
2,52594	0,566264	2,24879	0,467767	2,3728	0,418956	16,97594	58,53772	0,566264
2,5263	0,566303	2,40165	0,465636	2,50518	0,418707	16,9763	58,53897	0,566303
2,53616	0,567797	2,48163	0,46532	2,62627	0,417111	16,98616	58,57297	0,567797
2,542	0,568672	2,50763	0,465218	2,73748	0,416919	16,992	58,5931	0,568672
2,54225	0,568699	2,56117	0,466629	2,76528	0,416871	16,99225	58,59397	0,568699
2,54331	0,568781	2,56619	0,466761	2,78209	0,417177	16,99331	58,59762	0,568781
2,56629	0,570557	2,60275	0,467049	2,81812	0,416701	17,01629	58,67686	0,570557
2,84071	0,600755	2,64863	0,466326	2,82729	0,416326	17,29071	59,62314	0,600755
2,88032	0,606305	2,69478	0,464988	2,83169	0,416146	17,33032	59,75972	0,606305
2,91236	0,610794	2,76936	0,465864	3,05066	0,414888	17,36236	59,87021	0,610794
2,91609	0,611234	2,79863	0,46615	3,05227	0,414864	17,36609	59,88307	0,611234

2,92553	0,612371	2,9543	0,46767	3,06544	0,414667	17,37553	59,91562	0,612371
2,96743	0,616949	2,99576	0,466063	3,07498	0,414525	17,41743	60,0601	0,616949
3,12831	0,634526	3,10128	0,461972	3,11998	0,413857	17,57831	60,61486	0,634526
3,15757	0,638383	3,12977	0,461117	3,20051	0,412948	17,60757	60,71576	0,638383
3,18924	0,642324	3,14221	0,460614	3,31553	0,41602	17,63924	60,82497	0,642324
3,19638	0,643213	3,22095	0,459475	3,31884	0,415934	17,64638	60,84959	0,643213
3,23257	0,648144	3,37786	0,46019	3,48054	0,411771	17,68257	60,97438	0,648144
3,24104	0,649299	3,43327	0,460904	3,51055	0,41178	17,69104	61,00359	0,649299
3,30539	0,657162	3,46362	0,461295	3,51337	0,41178	17,75539	61,22548	0,657162
3,46135	0,683405	3,50445	0,460928	3,55973	0,410855	17,91135	61,76328	0,683405
3,47084	0,684359	3,55701	0,459353	3,66195	0,411457	17,92084	61,796	0,684359
3,55667	0,692982	3,59818	0,458119	3,73032	0,411033	18,00667	62,09197	0,692982
3,61001	0,698941			3,75286	0,410894	18,06001	62,2759	0,698941
3,7367	0,717357	3,70287	0,458893	3,8309	0,411993	18,1867	62,71276	0,717357
3,81942	0,726573	3,81235	0,45736	3,87033	0,41177	18,26942	62,998	0,726573
3,81971	0,726609	3,92765	0,456539	3,92452	0,412699	18,26971	62,999	0,726609
3,82029	0,726706	3,94702	0,457067	3,97098	0,413496	18,27029	63,001	0,726706
4,01662	0,760282	3,95561	0,457302	4,06177	0,411672	18,46662	63,678	0,760282
4,05244	0,764844	3,97608	0,455969	4,09185	0,410265	18,50244	63,80152	0,764844
4,11798	0,773189	3,98384	0,455463	4,12879	0,408536	18,56798	64,02752	0,773189
4,19612	0,780112	4,1216	0,452716	4,21872	0,406985	18,64612	64,29697	0,780112
4,31461	0,796956	4,18813	0,451052	4,33092	0,406124	18,76461	64,70555	0,796956
4,31945	0,797497	4,24186	0,452129	4,36173	0,405887	18,76945	64,72224	0,797497
4,34951	0,800855	4,29401	0,450949	4,41673	0,405485	18,79951	64,8259	0,800855
4,36304	0,802481	4,43174	0,455105	4,54202	0,406292	18,81304	64,87255	0,802481
4,37154	0,805187	4,46974	0,454414	4,56814	0,40646	18,82154	64,90186	0,805187
4,45314	0,817553	4,5086	0,453709	4,57969	0,406563	18,90314	65,18324	0,817553
4,59506	0,839059	4,56554	0,451376	4,59407	0,406749	19,04506	65,67262	0,839059
4,6182	0,84221	4,66607	0,453264	4,60731	0,40683	19,0682	65,75241	0,84221
4,83536	0,869081	4,8475	0,449135	4,6856	0,407312	19,28536	66,50124	0,869081
4,85359	0,871514	4,85979	0,44966	4,71351	0,406622	19,30359	66,5641	0,871514
4,89186	0,875014	4,86891	0,450859	4,73912	0,40599	19,34186	66,69607	0,875014
4,90862	0,876546	4,88787	0,45192	4,82128	0,403511	19,35862	66,75386	0,876546
5,00828	0,888906	4,96637	0,456311	4,93016	0,402159	19,45828	67,09752	0,888906
5,02424	0,890887	5,09314	0,450543	4,93771	0,402118	19,47424	67,15255	0,890887
5,04197	0,892285	5,09672	0,450652	4,99757	0,404967	19,49197	67,21369	0,892285
5,18843	0,91346	5,21111	0,454146	5,06641	0,406096	19,63843	67,71872	0,91346
5,20157	0,914921	5,23915	0,456023	5,24308	0,402691	19,65157	67,76403	0,914921
5,2667	0,920659	5,30019	0,45637	5,26204	0,402326	19,7167	67,98862	0,920659
5,33207	0,926419	5,36039	0,463558	5,27631	0,401943	19,78207	68,21403	0,926419
5,46435	0,94386	5,45299	0,478468	5,35127	0,402664	19,91435	68,67017	0,94386
5,48616	0,94661	5,51381	0,488259	5,36337	0,402539	19,93616	68,74538	0,94661
5,59551	0,960401	5,62687	0,491668	5,40995	0,401564	20,04551	69,12245	0,960401
5,60021	0,961393	5,75771	0,491364	5,47476	0,400207	20,05021	69,13866	0,961393
5,60034	0,96142	5,77542	0,491323	5,62964	0,399729	20,05034	69,1391	0,96142
5,70837	0,980764	5,87183	0,494779	5,71953	0,398957	20,15837	69,51162	0,980764
5,834	1,00216	5,9603	0,510384	5,74978	0,398201	20,284	69,94483	1,00216
5,84072	1,00331	5,96062	0,510514	5,78645	0,397285	20,29072	69,968	1,00331

5,89447	1,00608			5,89308	0,395752	20,34447	70,15334	1,00608
5,96811	1,00467	5,97951	0,518245	5,93998	0,39582	20,41811	70,40728	1,00467
6,03392	1,01372	6,01389	0,525007	6,01387	0,395431	20,48392	70,63421	1,01372
6,16118	1,03858	6,239	0,54909	6,06056	0,394363	20,61118	71,07303	1,03858
6,22462	1,05007	6,31114	0,556808	6,1021	0,393413	20,67462	71,29179	1,05007
6,25696	1,05592	6,32403	0,558347	6,18764	0,393303	20,70696	71,40331	1,05592
6,26339	1,05639	6,37055	0,571748	6,3232	0,390917	20,71339	71,42548	1,05639
6,27156	1,0584	6,38693	0,574437	6,37769	0,390719	20,72156	71,45366	1,0584
6,27838	1,05883	6,45801	0,589115	6,41081	0,390598	20,72838	71,47717	1,05883
6,31545	1,06113			6,45614	0,391107	20,76545	71,605	1,06113
6,3596	1,06555			6,48974	0,390693	20,8096	71,75724	1,06555
6,65147	1,10238			6,49672	0,390682	21,10147	72,76369	1,10238
6,6627	1,10369	6,58933	0,612291	6,57094	0,390559	21,1127	72,80241	1,10369
6,6868	1,10727	6,6726	0,627542	6,59958	0,390055	21,1368	72,88552	1,10727
6,69446	1,10769	6,6729	0,627624	6,67233	0,388776	21,14446	72,91193	1,10769
6,72359	1,10928	6,69741	0,634403	6,802	0,386589	21,17359	73,01238	1,10928
6,72744	1,10978	6,79519	0,630215	6,81	0,386495	21,17744	73,02566	1,10978
6,74247	1,11173	6,80649	0,631011	6,94064	0,38565	21,19247	73,07748	1,11173
6,96657	1,12634	6,80809	0,631124	6,96234	0,385554	21,41657	73,85024	1,12634
6,97033	1,12674	6,81306	0,63109	6,96331	0,38555	21,42033	73,86321	1,12674
7,00025	1,12992			6,98587	0,385131	21,45025	73,96638	1,12992
7,01661	1,13104			7,03342	0,384894	21,46661	74,02279	1,13104
7,10841	1,14668	7,05105	0,696389	7,04454	0,38435	21,55841	74,33934	1,14668
7,13405	1,15105	7,0737	0,702604	7,04703	0,384311	21,58405	74,42776	1,15105
7,20104	1,16011	7,09435	0,701549	7,09292	0,38452	21,65104	74,65876	1,16011
7,31621	1,16795	7,12588	0,70333			21,76621	75,0559	1,16795
7,36091	1,16872	7,20881	0,711542	7,13418	0,384345	21,81091	75,21003	1,16872
7,40016	1,17007	7,26099	0,71671	7,28526	0,383706	21,85016	75,34538	1,17007
7,46123	1,17669	7,43403	0,733135	7,30457	0,383921	21,91123	75,55597	1,17669
7,56	1,18046	7,49711	0,735521	7,34402	0,382414	22,01	75,89655	1,18046
7,5769	1,1824	7,58227	0,73685	7,485	0,381161	22,0269	75,95483	1,1824
7,58351	1,18269	7,68569	0,738465	7,6327	0,37991	22,03351	75,97762	1,18269
7,73127	1,18905	7,69233	0,736887	7,64294	0,379868	22,18127	76,48714	1,18905
7,73808	1,19018	7,77691	0,727263	7,65638	0,379801	22,18808	76,51062	1,19018
7,74327	1,19074	7,8689	0,733845	7,79144	0,375891	22,19327	76,52852	1,19074
7,84959	1,20218			7,89443	0,37291	22,29959	76,89514	1,20218
7,918	1,20583	7,92489	0,724511	7,90167	0,37277	22,368	77,13103	1,20583
8,08749	1,21219	7,96373	0,717017	8,03631	0,371789	22,53749	77,71548	1,21219
8,12976	1,21226	8,05132	0,700117	8,05819	0,371376	22,57976	77,86124	1,21226
8,19662	1,21239	8,10839	0,694437	8,1853	0,368978	22,64662	78,09179	1,21239
8,22871	1,21835	8,19443	0,676817	8,19372	0,368889	22,67871	78,20245	1,21835
8,25128	1,22255	8,23957	0,667572	8,20604	0,368671	22,70128	78,28028	1,22255
8,30943	1,22192	8,2655	0,669083	8,21081	0,368587	22,75943	78,48079	1,22192
8,35157	1,22176			8,28806	0,368016	22,80157	78,6261	1,22176
8,42785	1,22145	8,43705	0,636079	8,37627	0,368798	22,87785	78,88914	1,22145
8,52423	1,21767	8,51744	0,620613	8,42342	0,369215	22,97423	79,22148	1,21767
8,5767	1,22073	8,53498	0,613545	8,49146	0,369828	23,0267	79,40241	1,22073
8,61011	1,2205	8,59093	0,61196	8,61843	0,367914	23,06011	79,51762	1,2205

8,72458	1,21972	8,59138	0,611988	8,65591	0,369162	23,17458	79,91234	1,21972
8,76359	1,2207	8,81154	0,649055	8,7388	0,371922	23,21359	80,04686	1,2207
8,84017	1,22567	8,85442	0,573786	8,87169	0,371508	23,29017	80,31093	1,22567
8,87207	1,22554	8,881	0,527119	8,88247	0,371671	23,32207	80,42093	1,22554
9,05456	1,24667	9,0094	0,464027	9,05719	0,377698	23,50456	81,05021	1,24667
9,0875	1,25049	9,01898	0,460434	9,14284	0,383561	23,5375	81,16379	1,25049
9,15225	1,25747	9,03714	0,452601	9,36847	0,400199	23,60225	81,38707	1,25747
9,39812	1,27287	9,22021	0,480217			23,84812	82,2349	1,27287
9,40973	1,27461	9,29649	0,480225	9,36966	0,400287	23,85973	82,27493	1,27461
9,44184	1,27922	9,37261	0,457878	9,40385	0,40177	23,89184	82,38566	1,27922
9,44345	1,27945	9,63871	0,349629	9,52454	0,412606	23,89345	82,39121	1,27945
9,44853	1,28043	9,64104	0,349375	9,52599	0,412736	23,89853	82,40872	1,28043
9,47255	1,28661	9,692	0,343828	9,69117	0,425881	23,92255	82,49155	1,28661
9,47435	1,28688					23,92435	82,49776	1,28688
9,65712	1,31376	9,69265	0,343072	9,69891	0,42645	24,10712	83,128	1,31376
9,69461	1,31984	9,70666	0,326828			24,14461	83,25728	1,31984
9,70259	1,32088	9,71209	0,32534			24,15259	83,28479	1,32088
9,86108	1,35873	9,78478	0,3054	9,75628	0,43304	24,31108	83,83131	1,35873
9,92638	1,3717	9,79626	0,301581			24,37638	84,05648	1,3717
10,0605	1,41016	9,8616	0,303984	9,87008	0,446113	24,5105	84,51897	1,41016
10,0695	1,4125	9,98871	0,308658	9,93731	0,454354	24,5195	84,55	1,4125
10,1441	1,43181	10,2067	0,287912	10,0807	0,499931	24,5941	84,80724	1,43181
10,1633	1,43496	10,2126	0,287356	10,0914	0,503345	24,6133	84,87345	1,43496
10,166	1,43573	10,2475	0,292583	10,1808	0,533779	24,616	84,88276	1,43573
10,1934	1,44353	10,2538	0,293039	10,2417	0,55846	24,6434	84,97724	1,44353
10,2382	1,45934	10,2609	0,283224	10,3277	0,364776	24,6882	85,13172	1,45934
10,4679	1,53165	10,3528	0,16422	10,4308	0,145543	24,9179	85,92379	1,53165
10,4855	1,53619	10,4926	0,008239	10,4676	0,067278	24,9355	85,98448	1,53619
10,5075	1,53718	10,5	0	10,5	0	24,9575	86,06034	1,53718
10,6081	1,57559					25,0581	86,40724	1,57559
10,7295	1,62194					25,1795	86,82586	1,62194
10,8488	1,70283					25,2988	87,23724	1,70283
10,8942	1,70941					25,3442	87,39379	1,70941
10,9839	1,76042					25,4339	87,7031	1,76042
10,99	1,76393					25,44	87,72414	1,76393
10,9984	1,76734					25,4484	87,7531	1,76734
11,0989	1,82656					25,5489	88,09966	1,82656
11,1351	1,84792					25,5851	88,22448	1,84792
11,2665	1,92565					25,7165	88,67759	1,92565
11,281	1,93534					25,731	88,72759	1,93534
11,2937	1,94333					25,7437	88,77138	1,94333
11,4584	1,98507					25,9084	89,33931	1,98507
11,521	2,0178					25,971	89,55517	2,0178
11,6323	2,01245					26,0823	89,93897	2,01245
11,6643	2,01233					26,1143	90,04931	2,01233
11,7286	2,01648					26,1786	90,27103	2,01648
11,7588	2,01842					26,2088	90,37517	2,01842
11,8882	1,97025					26,3382	90,82138	1,97025

11,9237	1,9637	26,3737	90,94379	1,9637
12,0399	1,91635	26,4899	91,34448	1,91635
12,042	1,91514	26,492	91,35172	1,91514
12,1704	1,84207	26,6204	91,79448	1,84207
12,2364	1,79611	26,6864	92,02207	1,79611
12,2612	1,77725	26,7112	92,10759	1,77725
12,3064	1,73729	26,7564	92,26345	1,73729
12,4072	1,65691	26,8572	92,61103	1,65691
12,4298	1,63697	26,8798	92,68897	1,63697
12,4625	1,60806	26,9125	92,80172	1,60806
12,5496	1,52556	26,9996	93,10207	1,52556
12,584	1,49917	27,034	93,22069	1,49917
12,7087	1,37697	27,1587	93,65069	1,37697
12,8195	1,27189	27,2695	94,03276	1,27189
12,8362	1,25597	27,2862	94,09034	1,25597
12,8921	1,21144	27,3421	94,2831	1,21144
13,0207	1,11722	27,4707	94,72655	1,11722
13,0227	1,11555	27,4727	94,73345	1,11555
13,0275	1,11155	27,4775	94,75	1,11155
13,0303	1,10891	27,4803	94,75966	1,10891
13,0361	1,10342	27,4861	94,77966	1,10342
13,0947	1,04358	27,5447	94,98172	1,04358
13,2692	0,882044	27,7192	95,58345	0,882044
13,2937	0,859447	27,7437	95,66793	0,859447
13,3894	0,767926	27,8394	95,99793	0,767926
13,5562	0,608556	28,0062	96,5731	0,608556
13,5645	0,599696	28,0145	96,60172	0,599696
13,5907	0,572597	28,0407	96,69207	0,572597
13,7632	0,398861	28,2132	97,2869	0,398861
13,8094	0,351106	28,2594	97,44621	0,351106
13,8817	0,268897	28,3317	97,69552	0,268897
13,9415	0,261105	28,3915	97,90172	0,261105
14,0142	0,282073	28,4642	98,15241	0,282073
14,1694	0,321829	28,6194	98,68759	0,321829
14,1696	0,321894	28,6196	98,68828	0,321894
14,1784	0,323991	28,6284	98,71862	0,323991
14,1788	0,323631	28,6288	98,72	0,323631
14,1898	0,313182	28,6398	98,75793	0,313182
14,277	0,228544	28,727	99,05862	0,228544
14,3229	0,177183	28,7729	99,2169	0,177183
14,3233	0,176683	28,7733	99,21828	0,176683
14,45	0	28,9	99,65517	0

(title "Velocity Magnitude")
(labels "Position" "Velocity Magnitude")
((xy/key/label "merkez-cizgis-uzerinde-0.4m-yukseklkte-hiz-degisimi")

5	136.283
4.99178	136.283
4.96673	136.283
4.94408	136.282
4.85118	136.274
4.84547	136.273
4.83909	136.273
4.58856	136.273
4.50399	136.26
4.47631	136.258
4.4474	136.256
4.26977	136.254
4.24289	136.251
4.23252	136.25
4.05471	136.227
3.98044	136.225
3.97271	136.225
3.94436	136.226
3.72813	136.193
3.72757	136.193
3.71836	136.192
3.65658	136.185
3.65498	136.185
3.64448	136.184
3.61423	136.187
3.6128	136.188
3.54805	136.202
3.54604	136.202
3.44157	136.183
3.388	136.183
3.36925	136.183
3.33873	136.191
3.29171	136.19
3.24882	136.169
3.20093	136.161
3.17748	136.157
3.1181	136.166
3.1144	136.166
3.10534	136.171
3.08664	136.158
3.06813	136.155
3.0616	136.154
3.03689	136.15
3.03355	136.15
2.97344	136.165
2.95525	136.152
2.93173	136.151
2.92258	136.157
2.89143	136.177
2.88842	136.177
2.88749	136.177
2.88387	136.178
2.84337	136.166
2.83146	136.162
2.81231	136.156
2.80451	136.152
2.80153	136.149
2.79853	136.15
2.77779	136.156

2.76537	136.18
2.74495	136.204
2.72768	136.206
2.72357	136.206
2.71775	136.209
2.70362	136.205
2.6752	136.203
2.66999	136.203
2.66904	136.203
2.66315	136.203
2.65956	136.205
2.65855	136.206
2.64384	136.21
2.6267	136.21
2.61665	136.211
2.60106	136.214
2.59147	136.215
2.58307	136.218
2.57987	136.216
2.57977	136.216
2.57552	136.22
2.56285	136.22
2.54633	136.221
2.54237	136.22
2.53321	136.218
2.53092	136.215
2.52797	136.215
2.52744	136.215
2.52643	136.217
2.5251	136.217
2.51748	136.216
2.49503	136.215
2.49199	136.217
2.47562	136.219
2.46947	136.219
2.46834	136.218
2.4661	136.219
2.4653	136.218
2.44407	136.216
2.43755	136.215
2.43212	136.218
2.42422	136.214
2.41801	136.21
2.41714	136.21
2.41576	136.21
2.40631	136.212
2.39421	136.215
2.38648	136.213
2.38062	136.213
2.37786	136.213
2.36045	136.211
2.35451	136.21
2.35383	136.21
2.34985	136.21
2.32378	136.195
2.31856	136.192
2.31723	136.192
2.3162	136.191
2.31486	136.191
2.30932	136.19
2.2907	136.186
2.28376	136.186

2.28132	136.185
2.27383	136.178
2.26957	136.18
2.2657	136.182
2.25838	136.187
2.2479	136.181
2.24716	136.181
2.24614	136.182
2.24543	136.181
2.2379	136.183
2.2353	136.183
2.21356	136.166
2.21263	136.165
2.21026	136.163
2.20372	136.161
2.20311	136.161
2.20269	136.162
2.18491	136.176
2.18192	136.177
2.17067	136.177
2.16405	136.185
2.16345	136.185
2.15659	136.185
2.14172	136.191
2.13422	136.198
2.13076	136.201
2.12121	136.213
2.11669	136.203
2.11151	136.192
2.10695	136.19
2.10083	136.191
2.08319	136.196
2.07681	136.197
2.06668	136.2
2.06544	136.201
2.06441	136.2
2.04322	136.229
2.03439	136.231
2.03319	136.231
2.02923	136.231
2.00411	136.231
1.99553	136.233
1.99007	136.231
1.98388	136.228
1.95395	136.2
1.94955	136.197
1.94208	136.192
1.93753	136.192
1.92135	136.21
1.9083	136.224
1.90117	136.235
1.8877	136.236
1.88713	136.236
1.88693	136.236
1.88664	136.236
1.86582	136.244
1.85525	136.24
1.8454	136.223
1.84257	136.219
1.83161	136.23
1.82895	136.23
1.827	136.229

1.82078	136.223
1.80979	136.209
1.78913	136.179
1.78192	136.175
1.78187	136.175
1.77707	136.177
1.77238	136.174
1.76674	136.168
1.75895	136.158
1.74468	136.169
1.7407	136.168
1.73988	136.168
1.73042	136.169
1.72392	136.17
1.71837	136.171
1.70234	136.173
1.70085	136.173
1.69994	136.173
1.69294	136.175
1.69176	136.175
1.687	136.176
1.68403	136.177
1.68068	136.177
1.67339	136.177
1.66879	136.178
1.66687	136.179
1.66431	136.178
1.6628	136.177
1.65827	136.182
1.65408	136.182
1.64433	136.182
1.63699	136.182
1.63699	136.182
1.62957	136.181
1.62589	136.181
1.62198	136.181
1.62198	136.181
1.60907	136.184
1.60372	136.184
1.59045	136.184
1.58465	136.186
1.58363	136.186
1.58286	136.187
1.57509	136.184
1.57505	136.184
1.57396	136.184
1.5634	136.184
1.56156	136.186
1.55971	136.188
1.53849	136.201
1.53739	136.202
1.53698	136.202
1.53574	136.202
1.53255	136.203
1.53106	136.205
1.51367	136.222
1.489	136.22
1.48108	136.22
1.47692	136.222
1.4718	136.219
1.46956	136.218
1.4504	136.173

1.43481	136.149
1.43475	136.149
1.4107	136.169
1.40956	136.17
1.40467	136.17
1.39699	136.17
1.37504	136.172
1.36641	136.172
1.36628	136.172
1.36546	136.172
1.3625	136.171
1.35114	136.171
1.35056	136.171
1.32785	136.175
1.32637	136.176
1.32597	136.176
1.31084	136.198
1.29519	136.22
1.28132	136.226
1.27413	136.239
1.25306	136.203
1.24087	136.183
1.23686	136.175
1.23324	136.164
1.23058	136.16
1.22364	136.145
1.20409	136.103
1.20358	136.102
1.18625	136.104
1.18291	136.111
1.16924	136.143
1.15952	136.127
1.15757	136.123
1.14974	136.118
1.12155	136.173
1.11941	136.177
1.11499	136.193
1.10276	136.213
1.10184	136.216
1.08477	136.214
1.07697	136.229
1.05943	136.249
1.05261	136.208
1.03903	136.193
1.03331	136.188
1.02365	136.178
1.00669	136.148
0.992144	136.135
0.989933	136.133
0.973665	136.159
0.972362	136.161
0.97111	136.161
0.96418	136.156
0.951592	136.146
0.94861	136.144
0.943302	136.144
0.939263	136.137
0.925301	136.122
0.91899	136.132
0.918055	136.133
0.906154	136.132
0.905781	136.131

0.90513 136.13
0.884027 136.151
0.884024 136.151
0.88393 136.152
0.871227 136.16
0.869316 136.145
0.86555 136.16
0.857964 136.171
0.843499 136.186
0.836261 136.202
0.832208 136.21
0.831135 136.212
0.829421 136.216
0.829013 136.218
0.828518 136.215
0.828249 136.214
0.826076 136.208
0.798998 136.175
0.798534 136.173
0.79497 136.179
0.790471 136.187
0.786154 136.168
0.7835 136.156
0.780083 136.16
0.761253 136.146
0.755961 136.142
0.751939 136.132
0.751246 136.13
0.74383 136.135
0.734313 136.115
0.733492 136.113
0.721783 136.092
0.716725 136.087
0.702033 136.082
0.696705 136.085
0.69414 136.086
0.69366 136.086
0.678645 136.104
0.67198 136.111
0.670517 136.113
0.657591 136.128
0.655774 136.13
0.655734 136.13
0.65556 136.13
0.653241 136.138
0.632519 136.201
0.631085 136.206
0.601713 136.23
0.600262 136.232
0.596256 136.222
0.584564 136.211
0.581854 136.192
0.576378 136.216
0.573311 136.218
0.571107 136.22
0.568485 136.213
0.539142 136.162
0.536985 136.159
0.524475 136.142
0.48937 136.235
0.488532 136.237
0.486746 136.248

0.485984	136.253
0.485792	136.254
0.485464	136.254
0.484332	136.254
0.481594	136.254
0.450145	136.279
0.432632	136.247
0.419176	136.236
0.414188	136.233
0.408108	136.235
0.391223	136.246
0.389572	136.247
0.38104	136.247
0.36478	136.252
0.35593	136.251
0.345519	136.246
0.335919	136.242
0.324662	136.236
0.322258	136.236
0.299437	136.231
0.296284	136.231
0.294727	136.23
0.287383	136.23
0.267785	136.229
0.267172	136.229
0.265603	136.229
0.259319	136.229
0.256181	136.229
0.249312	136.229
0.241728	136.229
0.241038	136.229
0.240521	136.229
0.239415	136.229
0.226273	136.231
0.216061	136.231
0.213813	136.231
0.212603	136.231
0.207374	136.231
0.204255	136.231
0.190769	136.232
0.180123	136.232
0.174118	136.232
0.166515	136.232
0.156935	136.233
0.132775	136.233
0.132437	136.233
0.13007	136.233
0.125801	136.233
0.12548	136.233
0.114058	136.233
0.113605	136.233
0.108369	136.233
0.0940268	136.233
0.0938324	136.233
0.0934855	136.233
0.0915405	136.233
0.0644416	136.233
0.0560572	136.233
0.0365192	136.233
0.0359655	136.233
0.0249471	136.232
4.85892e-10	136.232)