



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SÜRÜ HALİNDE HAREKET EDEN
DÖNER KANATLI
İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ
İLE ANALİZİ**

BERKAY ÇETİN

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Ahmet Talat İNAN

İSTANBUL, 2025



MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



**SÜRÜ HALİNDE HAREKET EDEN
DÖNER KANATLI
İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ
İLE ANALİZİ**

BERKAY ÇETİN

(723218017)

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Makine Mühendisliği Programı

DANIŞMAN

Doç. Dr. Ahmet Talat İNAN

İSTANBUL, 2025

MARMARA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Öğrencisi Berkay ÇETİN'in "Sürü Halinde Hareket Eden Döner Kanatlı İnsansız Hava Araçlarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi" başlıklı tez çalışması, 30 Ocak 2024 tarihinde savunulmuş ve jüri üyeleri tarafından başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Ahmet Talat İNAN	(Danışman)	
Marmara Üniversitesi		(İMZA)
Prof. Dr. Mehmet Zafer GÜL	(Üye)	
Marmara Üniversitesi		(İMZA)
Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ	(Üye)	
İstanbul Ticaret Üniversitesi		(İMZA)
Doç. Dr. Mustafa YILMAZ	(Üye)	
Marmara Üniversitesi		(İMZA)
Doç. Dr. Murat ÇAKAN	(Üye)	
İstanbul Teknik Üniversitesi		(İMZA)

ONAY

Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 05.02.2025 tarih ve 2025/05-02 sayılı kararı ile Berkay ÇETİN'in Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Makine Mühendisliği Programı'nda Doktora derecesi alması onanmıştır.

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü
Prof. Dr. Bülent MERTOĞLU

ÖNSÖZ

Sürü Halinde Hareket Eden Döner Kanatlı İnsansız Hava Araçlarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi başlıklı bu çalışmada, dört rotorlu döner kanatlı insansız hava araçlarının oluşturduğu sürü dizilimleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir.

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesinde rehberlik eden, değerli bilgi ve geri bildirimleriyle araştırmamı yönlendiren danışman hocam Doç. Dr. Ahmet Talat İnan'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, değerli katkıların ötürü Prof. Dr. Zafer Gül ve Doç. Dr. Murat Çakan hocalarıma teşekkür ederim.

Doktora sürecimde, tüm fedakarlıklarıyla bana güç katan, her an yanımda olarak bana manevi güç veren, sabrı, anlayışı ve desteğiyle en büyük motivasyon kaynağım olan sevgili eşim Özlem Çetin'e sonsuz teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli babam Mustafa Çetin'e ve değerli annem Hülya Çetin'e şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) kapsamında sağlanan 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı desteğiyle gerçekleştirilmiştir. Sağladıkları değerli desteklerden dolayı TÜBİTAK'a ve emeği geçen tüm yetkililere teşekkür ederim.

Türkiye'de doktoralı insan kaynağını artırmak ve öncelikli alanlarda uzmanlaşmayı teşvik etmek amacıyla, Prof. Dr. M. A. Yekta Saraç'ın YÖK Başkanlığı döneminde başlatılan Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 Doktora Burs Programı kapsamında, bu çalışma İleri Robotik Sistemler ve Mekatronik tematik alanında desteklenmiştir. Bu programın hayata geçirilmesine öncülük eden Prof. Dr. M. A. Yekta Saraç'a ve o dönemdeki YÖK yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, bu çalışmada insansız hava araçlarının sürü içerisindeki aerodinamik etkileşimleri incelenmiştir. Sürü dizilimleri değerlendirilerek yakın İHA etkileşimleri tespit edilmiş ve literatüre katkı sağlanmıştır.

Ocak, 2025

Berkay ÇETİN

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
YENİLİK BEYANI.....	vii
SEMBOLLER	viii
KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
TABLO LİSTESİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması	2
1.2. Literatür Araştırması	5
2. SAYISAL YÖNTEMLER.....	37
2.1. Temel Akışkan Denklemleri	37
2.1.1. Kütlelerin Korunumu Denklemi	37
2.1.2. Momentum Korunumu Denklemleri	37
2.2. Hareketli Çerçevelerindeki Akışlar	39
2.2.1. Hareketli Referans Çerçevesi için Denklemler.....	39
2.3. Türbülans Modelleri.....	41
2.3.1. Standart k- ϵ Türbülans Modeli	42
2.3.2. Realizable k- ϵ Türbülans Modeli.....	43
3. SAYISAL MODELLEME	45
3.1. İHA Paketi Oluşturulması	45
3.2. İHA Sürüşünün Oluşturulması	46

3.3. Paketlerin Parametrik Konumlandırılması	49
3.3.1. HAD Geometrisi: Orta Dizilim.....	51
3.3.1. HAD Geometrisi: Dar Dizilim.....	53
3.3.2. HAD Geometrisi: Geniş Dizilim	54
3.3.3. Workbench Parametre Kodlarının Oluşturulması.....	56
3.4. Çözüm Ağı	60
3.4.1. Çözüm Ağı Bağımsızlık Testleri	61
3.4.2. Çözüm Ağı Ayarları.....	63
3.5. HAD Simülasyonlarının Oluşturulması	70
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	81
4.1. Orta Dizilimin HAD Sonuçları	82
4.2. Sürü Dizilimlerinin HAD Sonuçları.....	97
5. SONUÇLAR.....	127
6. KAYNAKÇA	129
6.1. Makaleler.....	129
6.1.1. Web of Science: Science Citation Index - Expanded (SCI-EXPANDED)	129
6.1.2. Web of Science: Emerging Sources Citation Index (ESCI)	135
6.1.3. Makaleler: Diğer	136
6.2. Bildiriler	136
6.2.1. WoS: Conference Proceedings Citation Index - Science (CPCI-S)	136
6.2.2. Bildiriler: Diğer.....	136
6.3. Kitap ve Kitap Bölümleri	137
6.4. Tezler.....	137
6.5. Çevrimiçi Kaynaklar	138

6.6. Elektronik Kaynaklar	138
EKLER	139
EK 1 - ACT Konsol: Parametrik Analizleri Otomatik Kaydeden Kod.....	139
EK 2 - Literatür Tablosu	140
EK 3 - Analiz Grafikleri.....	147
ÖZGEÇMİŞ.....	155



ÖZET

SÜRÜ HALİNDE HAREKET EDEN DÖNER KANATLI İNSANSIZ HAVA ARAÇLARININ HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE ANALİZİ

Bu çalışmada, dört rotorlu insansız hava araçlarından oluşan kare biçimindeki sürünün aerodinamik davranışları, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemiyle üç boyutlu olarak incelenmiştir. Sürü içerisinde farklı dizilim (geniş, orta ve dar mesafeli) tiplerinde bulunana insansız hava araçları analiz edilmiş ve sürü yapılarının aerodinamik etkileri ortaya konmuştur.

Sürü içerisinde dört adet insansız hava aracı kullanılmıştır. Bunlardan ikisi üst sırada diğer ikisi alt sırada yerleştirilmiş ve farklı yaklaşma mesafelerinde oluşan aerodinamik davranışları analiz edilmiştir. Pervanelerin döner ve sabit bölgeler arasındaki etkileşimleri modellemek için Hareketli Referans Çerçevesi yöntemi kullanılmış, analizler 10.000 devir/dakika hızında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, analizlerde parametrik yöntemler kullanılmış ve optimizasyon süreçlerinde Python, Perl, CEL ve CCL dillerinde kodlar yazılmıştır.

Sürü içerisindeki insansız hava araçlarının yatay ve dikey eksenlerde farklı mesafelerde konumlandırılmasının aerodinamik performans ve akış davranışları üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, basınç, hız ve türbülans kinetik enerjisi dağılımları grafiksel olarak görselleştirilmiştir. Özellikle, rotor merkezleri arasındaki 75 cm olan orta dizilim ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Bu çalışmada sürü uçuşları sırasında insansız hava araçları arasında meydana gelen aerodinamik etkileşimlerin önemi vurgulanmış ve “Yakın-İHA Fenomeni” olarak adlandırılan yeni bir kavram tanımlanmıştır. Bunun yanı sıra, aşağı yönlü akımların sürü performansı üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Sonuç olarak, sürü İHA’ların uçuş güvenliğinin artırılabilmesi için aerodinamik kararlılığın göz önünde bulundurulması gerektiği ortaya konulmuştur. İHA’ların sürü dinamiklerini daha iyi anlamaya ve dizilim stratejilerini geliştirmeye yönelik literatüre önemli katkılar sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları, İHA, Dört Rotor, Multirotor, Multicopter, Quadcopter, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, HAD, Hareketli Referans, HRÇ, Sürü, Dizilim, Kare Formasyon, Parametrik Analiz

ABSTRACT

COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS ANALYSIS OF ROTARY-WING UNMANNED AERIAL VEHICLES MOVING AS A SWARM

In this study, the aerodynamic behaviors of a square-formation swarm consisting of quadrotor unmanned aerial vehicles (UAVs) were examined three-dimensionally using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Unmanned aerial vehicles within the swarm were examined under different types of formations (wide, medium, and narrow spacing) and the aerodynamic effects of swarm configurations were revealed

The swarm consisted of four unmanned aerial vehicles, two of which were positioned on the upper row and the other two on the lower row. The aerodynamic behaviors at different proximity distances were analyzed. The Moving Reference Frame (MRF) method was employed to model the interactions between the rotating and stationary regions of the propellers, and the analyses were carried out at a rotational speed of 10 000 RPM. Additionally, parametric methods were utilized in the analyses, and codes were developed in Python, Perl, CEL, and CCL for optimization processes.

The effects of positioning the UAVs within the swarm at different distances on the horizontal and vertical axes on aerodynamic performance and flow behaviors were examined in detail. Based on the obtained data, the distributions of pressure, velocity, and turbulence kinetic energy were graphically visualized. Specifically, the medium configuration with a 75 cm spacing between rotor centers was examined in detail.

This study highlighted the significance of aerodynamic interactions occurring between UAVs during swarm flights and introduced a new concept referred to as the “Near-UAV Phenomenon”. Additionally, the effects of downward flows on swarm performance were identified. In conclusion, it has been demonstrated that aerodynamic stability must be considered to enhance the flight safety of swarm UAVs. The study has made significant contributions to literature by improving the understanding of swarm dynamics and developing formation strategies for UAVs.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, UAV, Quadrotor, Multirotor, Multicopter, Quadcopter, Computational Fluid Dynamics, CFD, Moving Reference Frame, MRF, Swarm, Formation, Square Formation, Parametric Analysis

YENİLİK BEYANI

Bu çalışmada, insansız hava araçlarının sürü halinde hareket ederken sürü dizilimleri içerisindeki aerodinamik etkileşimleri, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleriyle incelenmiştir. Dört rotorlu döner kanatlı insansız hava araçlarının belirli dizilimlerde (geniş, orta ve dar mesafeli) oluşturduğu aerodinamik etkiler sayısal olarak analiz edilmiştir. Araştırmada, özellikle sürü içerisindeki yaklaşma mesafelerinin akış davranışları ve aerodinamik performans üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

Literatürde, insansız hava araçları üzerine yapılan çalışmalar genellikle tek bir İHA'ya odaklanmış olup, sürü üzerine yapılan araştırmaların büyük bir kısmı rota algoritmaları ve kontrol stratejileri üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak, sürü İHA davranışlarına yönelik çalışmalarda aerodinamik etkiler genellikle göz ardı edilmiştir. Bu çalışma, sürü İHA'ların birbirlerine göre olan aerodinamik etkilerini farklı dizilimler ve yaklaşma mesafeleri üzerinden analiz edilip, basınç, hız ve türbülans kinetik enerjisi değerlerine ait sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur.

Literatürde ilk kez, dört rotora sahip döner kanatlı insansız hava araçlarının dört tanesinin bir araya gelerek oluşturduğu kare biçimindeki sürü formasyonu HAD ile parametrik olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda “Yakın-İHA Fenomeni” tanımlanmış ve aşağı yönlü akımların sürü performansı üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır.

Çalışmada, HAD altyapısında yer alan temel akışkan denklemleri, türbülans modelleri ile dönel cisimlerin modellenmesinde Hareketli Referans Çerçevesi yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde parametrik yaklaşımlar uygulanmış ve veri işleme, modelleme ile optimizasyon aşamalarında Python, Perl, CEL ve CCL gibi programlama dillerinden etkin bir şekilde faydalanılmıştır.

Sonuçlar, sürü içerisindeki insansız hava araçlarının aerodinamik davranışlarının dizilim mesafesine bağlı olarak belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Özellikle dar dizilimlerde türbülans etkilerinin arttığı ve bu durumun alt sıradaki insansız hava araçlarının performansını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Bu araştırma, insansız hava araçlarının sürü dinamiklerini anlamak ve optimize etmek adına yeni bir bakış açısı sunarak, literatürdeki benzer çalışmalara rehberlik edecek niteliktedir.

SEMBOLLER

ρ	: Yoğunluk
$\vec{v}$	: Hız Vektörü
S_m, S_k, S_ε	: Kaynak Terimler
p, P	: Statik Basınç
v_x	: Eksenel Hız
v_r	: Radyal Hız, Bağlı Hız
$\bar{\epsilon}$	: Gerilme Tensörü
$\vec{g}$	: Yer Çekimi İvmesi
$\vec{F}$	: Kuvvet, Harici Kuvvet
μ	: Vizkozite
I	: Birim Tensörü
∇	: Diverjans
v_z	: Girdap Hızı
$\vec{v}_t$	: Doğrusal Hız
$\vec{\omega}$	: Açısal Hız
$\vec{r}_0$	: Hareketli ve sabit koordinatlar arasındaki Uzaklık
$\hat{a}$	: Birim Vektör
k	: Türbülans Kinetik Enerjisi
ε	: Türbülans Dağılım Oranı
G_k	: Ortalama Hız Gradyanlarıyla Oluşan Türbülans Kinetik Enerjisi Üretimi
G_b	: Kaldırma Kuvvetiyle oluşan Türbülans Kinetik Enerjisi Üretimi
Y_M	: Genişlemenin Oranı
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_{3\varepsilon}, C_\mu$	: Sabitler

σ_k	: Türbülanslı Prandtl Sayısı (k)
σ_ε	: Türbülanslı Prandtl Sayısı (ε)
μ_t	: Türbülans (Eddy) viskozitesi
$\overline{\Omega}_{ij}$	: Dönel Sistemdeki Tensörün Ortalama Dönme Hızı
P1, P2...	: Workbench Parametreleri
İHA-1	: Birinci İHA
[G]	: Geometrik Parametreleri Bulunduran Matris
$g[i]$	: Grup Dizisi
$\vec{g}_1$	: Grup Vektörü
n	: Grup Sayısı
a	: Her Grubun Alt Eleman Sayısı
i, j	: Başlangıç Değerleri
b	: Workbench Parametreleri Başlangıç İndeksi

KISALTMALAR

6DOF	: Six Degrees of Freedom (Altı Serbestlik Derecesi)	
ACT	: Application Customization Toolkit	
ALE	: Arbitrary Lagrangian Eulerian	
AMI	: Arbitrary Mesh Interfaces	
ANN	: Artificial Neural Networks	[YSA]
AoA	: Angle of Attack (Hücum Acısı)	
AR	: Aspect Ratio (En-Boy Oranı)	
AYE	: Akışkan-Yapı Etkileşimi	[FSI]
BET	: Blade Element Theory	
BGK	: Bileşik Gövde Kanat (Bütünleşik Gövde Kanat)	[BWB]
BWB	: Blended Wing Body	[BGK]
CCL	: Command Control Language	
CEL	: Custom Expression Language	
CFD	: Computational Fluid Dynamics	[HAD]
CFL	: Courant-Friedrichs-Lewy	
CPAN	: Comprehensive Perl Archive Network	
DPM	: Discrete Phase Model	
EARSM	: Explicit Algebraic Reynolds Stress Model	
FEA	: Finite Element Analysis	[SEA]
FMG	: Full Multi Grid	
FSI	: Fluid-Solid Interaction	[AYE]
FVM	: Finite Volume Method (Sonlu Hacimler Yöntemi)	
FWH	: Ffowcs-Williams-Hawking	
GA	: Genetik Algoritma	

GCI	: Grid Convergence Index	
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği	[CFD]
HRC	: Hareketli Referans Çerçevesi	[MRF]
İHA	: İnsansız Hava Aracı	[UAV]
LBM	: Lattice Boltzmann Method	
LES	: Large Eddy Simulation (Büyük Girdap Simülasyonu)	
LHS	: Latin Hiper Küp Örnekleme	
LRF	: Local Rotor Frame	
LU-SGS	: Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel	
MALE	: Medium Altitude Long Endurance (Orta İrtifa Uzun Menzilli)	
MBD	: Multi Body Dynamics (Çoklu Cisim Dinamiği)	
MPI	: Message Passing Interface	
MRF	: Moving Reference Frame	
MRF*	: Multiple Reference Frame	
MUSCL-TVD	: Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws – Total Variation Diminishing	
NET	: Network Enabled Technologies (Ağa Uyarlanmış Teknolojiler)	
NTA	: Negatif Tork Açısı	
PBCS	: Pressure Based Coupled Solver	
PISO	: Pressure-Implicit with Splitting of Operation	
PIV	: Particle Image Velocimetry (Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü)	
PRESTO	: Pressure Staggering Option	
PSSDE	: Pseudo Searching Scheme of Donor Elements	
RANS	: Reynolds-Averaged Navier–Stokes	

RBFNN	: Radial Basis Function Neural Networks (Radyal Tabanlı Fonksiyon Sinir Ağı)	
RNG	: Renormalization Group	
RSM	: Reynolds Stress Model	
RSP	: Rotor Shaft Plane	
SEA	: Sonlu Elemanlar Analizi	[FEA]
SIMPLE	: Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations	
SIMPLEC	: Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent	
SST	: Shear Stress Transport	
TRUAV	: Tilt-Rotor UAV (Tilt-Rotor İHA)	
TKE	: Türbülans Kinetik Enerji	
UAV	: Unmanned Aerial Vehicle	[İHA]
UDF	: User Defined Function	
URANS	: Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes	
VBM	: Virtual Blade Model (Sanal Kanat Modeli)	
VLM	: Vortex Lattice Method	
VTOL	: Vertical Take-Off and Landing (Dikey Kalkış ve İniş)	
WALE	: Wall-Adapting Local Eddy Viscosity	
YSA	: Yapay Sinir Ağları	[ANN]

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Farklı Tasarımlardaki Döner Kanatlı Hava Araçlarının Çeşitleri ve Genel Özeti [16].....	4
Şekil 1.2. Helenic Sivil İHA'nın Görev Bölgeleri	30
Şekil 2.1. Sabit ve Hareketli Koordinat Sistemleri.....	39
Şekil 3.1. Paket İçerisindeki Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı	45
Şekil 3.2. Design Modeler Yazılımına Aktarılan İHA Paketi	46
Şekil 3.3. İHA Paketleri; a) Kopyalanan Paketler b) İHA Dizilimi	47
Şekil 3.4. Dış Akış Hacmi (a) ile İsimlendirmeler (b).....	48
Şekil 3.5. HAD Geometrisi ve Parametreleri	49
Şekil 3.6. Workbench Parametre Arayüzü	50
Şekil 3.7. Sürü İHA Dizilimi	51
Şekil 3.8. İHA'ların Konumlandırılması	52
Şekil 3.9. Geometri Tanımlama Parametreleri	56
Şekil 3.10. Workbench Parametre Betiği	60
Şekil 3.11. Eleman Sayısının Toplam Kaldırma Kuvveti Üzerindeki Etkisi	63
Şekil 3.12. ANSYS Mesh Yazılımı Arayüzü	64
Şekil 3.13. Çözüm Ağı Tanımlamaları; a) Aktarılan Geometriler b) Bağlantılar c) İsimlendirmeler.....	65
Şekil 3.14. Çözüm Ağı Bağlantıları.....	66
Şekil 3.15. Çözüm Ağı Görüntüleri.....	68
Şekil 3.16. Çözüm Ağı Kalite Değerleri; a) Çarpıklık (Skewness) b) Ortogonal Kalite c) En Boy Oranı d) Eleman Kalitesi.....	69
Şekil 3.17. Fluent Yazılımı Arayüzü	71
Şekil 3.18. Türbülans Modeli	72
Şekil 3.19. Akışkan Özellikleri	72

Şekil 3.20. Hücre Bölgesi Koşulları	73
Şekil 3.21. Parametre Arayüzü	74
Şekil 3.22. Fluent Parametre Betiği.....	75
Şekil 3.23. Workbench Parametreleri.....	76
Şekil 3.24. Arayüz Tanımlaması	77
Şekil 3.25. Çözüm Yöntemleri Paneli	78
Şekil 3.26. Ayırıklaştırma.....	79
Şekil 4.1. Sürü İHA'ların Dikey ve Yatay Veri Çizgileri	82
Şekil 4.2. Hız Konturları; a) Arka Düzlem b) İHA'ların Orta Düzlemi c) Ön Düzlem	83
Şekil 4.3. Dikey Düzlemlerdeki Hız Konturları	84
Şekil 4.4. Akım Çizgileri; a) Üstten Görünüş b) Önden Görünüş.....	85
Şekil 4.5. Yatay Çizgiler Üzerindeki Hızlar.....	86
Şekil 4.6. Dikey Çizgiler Üzerindeki Hızlar: Ön Pervane Eksenleri.....	87
Şekil 4.7. Toplam Basınç Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem	88
Şekil 4.8. Yatay Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Dağılımı	89
Şekil 4.9. Dikey Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Dağılımı	90
Şekil 4.10. Dikey Çizgiler Üzerindeki Basınç ve Dinamik Basınç Dağılımları.....	91
Şekil 4.11. Türbülans Kinetik Enerji Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem.....	92
Şekil 4.12. Yatay Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerjisi Dağılımları.....	93
Şekil 4.13. Dikey Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerjisi Dağılımı.....	94
Şekil 4.14. Hücre Reynolds Sayısı Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem.....	95

Şekil 4.15. Türbülans Reynolds Sayısı Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem.....	96
Şekil 4.16. Sürü Dizilimlerindeki Veri Düzlemleri	97
Şekil 4.17. Sürü Dizilimlerinin Dikey ve Yatay Veri Çizgileri.....	98
Şekil 4.18. Sürü Dizilimlerinin Hız Konturları; Ön Rotor Düzlemi (Z245)	99
Şekil 4.19. Sürü Dizilimlerinin Hız Konturları: Orta Düzlem (Z232,5)	99
Şekil 4.20. Sürü Dizilimlerinin Hız Konturları: Arka Pervane Düzlemi (Z220)	100
Şekil 4.21. Sürü Dizilimlerinin Akım Çizgileri.....	102
Şekil 4.22. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Hızları	104
Şekil 4.23. Sürü Dizilimlerinin Dikey Çizgiler Üzerindeki Hız Dağılımı; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim	106
Şekil 4.24. Sürü Dizilimlerinin Toplam Basınç Konturları; Ön Düzlem (Z245).....	107
Şekil 4.25. Sürü Dizilimlerinin Toplam Basınç Konturları; Orta Düzlem (Z232,5)	108
Şekil 4.26. Sürü Dizilimlerinin Toplam Basınç Konturları; Arka Düzlem (Z220).....	108
Şekil 4.27. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Değerleri; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim	110
Şekil 4.28. Sürü Dizilimlerinin Dikey Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Değerleri; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim	111
Şekil 4.29. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Kinetik Enerji Konturları; Ön Düzlem (Z245).....	113
Şekil 4.30. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Kinetik Enerji Konturları; Orta Düzlem (Z232,5).....	113
Şekil 4.31. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Kinetik Enerji Konturları; Arka Düzlem (Z220).....	114
Şekil 4.32. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim	115

Şekil 4.33. Sürü Dizilimlerinin Dikey Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim	117
Şekil 4.34. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Konturları; Ön Rotor Düzlemi (Z245)	118
Şekil 4.35. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Konturları; Orta Düzlem (Z232,5)	119
Şekil 4.36. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Lineer; Orta Düzlem (Z232,5)	119
Şekil 4.37. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı; Arka Düzlem (Z220)	120
Şekil 4.38. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları; Ön Düzlem (Z245)	121
Şekil 4.39. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları; Orta Düzlem (Z232,5)	121
Şekil 4.40. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları; Arka Düzlem (Z220)	122
Şekil 4.41. İHA'ların Toplam Kaldırma Kuvvetleri.....	124

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1. Dönen Cisimlerin Koordinat Değişkenleri.....	51
Tablo 3.2. Orta Dizilimin Referans Noktasına Göre Geometrik Değişkenleri	52
Tablo 3.3. Orta Dizilimin Referans Noktaları ve Dönen Akış Bölgeleri Koordinat Değişkenleri.....	53
Tablo 3.4. Dar Dizilimin Referans Noktasına Göre Geometrik Değişkenleri	53
Tablo 3.5. Dar Dizilimin Referans Noktaları ve Dönen Akış Bölgeleri Koordinat Değişkenleri.....	54
Tablo 3.6. Geniş Dizilimin Referans Noktaları ve Dönen Akış Bölgeleri Koordinat Değişkenleri.....	55
Tablo 3.7. ANSYS Workbench Parametre Yapısı	57
Tablo 3.8. Referans Noktasına Göre Bağlı Uzaklıklar.....	58
Tablo 3.9. Farklı Çözüm Ağı Yoğunluklarından Elde Edilen Kaldırma Kuvvetleri	62
Tablo 3.10. Genel Çözüm Ağı Ayarları	67
Tablo 3.11. Dizilimlerin Eleman ve Düğüm Sayıları.....	70
Tablo 4.1. Dizilimlerin Rotor Eksenleri	103
Tablo 4.2. Dizilimlere göre Kaldırma Kuvvetleri	123
Tablo 4.3. Üst ve Alt sıradaki İHA'ların Toplam Kaldırma Kuvveti	124
Tablo 4.4. Pervanelerin Toplam Kaldırma Kuvveti	125

1. GİRİŞ

Teknolojinin ilerlemesiyle beraber İnsansız Hava Araçlarının (İHA) kullanımı dünya genelinde giderek yaygınlaşmıştır. Son 50 yıl içerisinde İnsansız Hava Sistemleri (İHS) gelişen teknoloji ile güncellenerek farklı tasarım ve özellikleri ile kendilerine birçok alanda yer bulmuştur. İHA'lar, güvenlik, düşük maliyet ve kullanım gibi avantajlarından ötürü, başta silahlı kuvvetler tarafından tercih edilmiş olup gözetim ve veri toplama amacıyla kullanılmıştır [1-4].

İnsansız hava araçları, uzun yıllar boyunca “robotik uçaklar”, “uzaktan kumandalı araçlar” gibi isimlerle anılmıştır. 1990’lı yıllardan sonra bu isimler yerini “İHA” terimine bırakmış ve bu terim yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [5].

İnsansız hava araçları, kullanım kolaylığı, hızlı manevra yetenekleri, hafif olmaları, hava uzun süreli görev yapabilmeleri, seyrüsefer sırasında insan hayatını riske atmamaları, dikey iniş kalkış yapabilmeleri, bakım ve görev maliyetleri gibi çeşitli avantajları neticesinde birçok alanda kullanılmaktadır. Başta askeri görevler olmak üzere sivil, endüstriyel, afet yönetimi, tarım, arama kurtarma çevre denetimi ve bilimsel görevlerin yerine getirilmesinde tercih edilmektedir [3, 6-10].

Sivil alanlarda İHA'lar, fotoğrafçılık, tarım (ürün izleme ve ilaçlama), sahil güvenlik, çevre koruma (kirlilik ve ekosistem izleme), kaçakçılık denetimi, itfaiye ve ormancılık, balıkçılık, bilgi hizmetleri, kurtarma operasyonları, meteoroloji, trafik yönetimi, haritalama, su kontrolü ve bilimsel araştırma alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca, enerji ve enerji nakil hatlarının denetimi, altyapı kontrolleri ve sağlık hizmetleri de İHA'ların önemli uygulama alanları arasında yer almaktadır [4, 11]. İHA'ların askeri alanlarda kullanımları ise silahlı kuvvetlerde göre farklılık göstermektedir.

Deniz Kuvvetleri'nde, düşman filolarının izlenmesi, füzelerin şaşırtılması, elektronik istihbaratın elde edilmesi, radyo sinyallerinin yönlendirilmesi, limanların denizden gelebilecek saldırılara karşı savunulması, anti-denizaltı sistemlerinin (sonar şamandıralarının vb.) konumlandırılması ve izlenmesi gibi görevlerde kullanılmaktadır [4, 11, 12].

Kara Kuvvetleri'nde, keşif operasyonları, düşman hareketlerinin izlenmesi, nükleer, biyolojik veya kimyasal kontaminasyonların tespiti, elektronik istihbaratın toplanması, hedeflerin belirlenmesi ve izlenmesi ile kara mayınlarının tespiti ve imhası gibi çeşitli işlevleri yerine getirmektedir [4, 11, 12].

Hava Kuvvetleri'nde ise uzun menzilli ve yüksek irtifalı gözetleme, radar sistemlerinin karıştırılması ve devre dışı bırakılması, elektronik istihbaratın toplanması, hava üslerinin güvenliğinin temin edilmesi, hasarın değerlendirilmesi ve patlamamış bombaların etkisiz hale getirilmesi görevlerinde İHA'lar kullanılmaktadır [4, 11, 12].

1.1. İnsansız Hava Araçlarının Sınıflandırılması

Günümüzde birçok insansız hava aracı modeli bulunmaktadır. Bu modeller kendi içerisinde kategorilere ayrılmıştır. İHA'lar irtifa ve mesafe yönünden sınıflandırılabilirdiği gibi, ağırlıkları yönünden de gruplandırılabilir. İniş-kalkış özellikleri, kanat yapıları, döner kanatları ve rotor sayıları gibi özelliklerine göre her biri farklı olarak da sınıflandırılabilir.

İnsansız hava araçları başta sabit kanatlı ve çok rotorlu (döner kanatlı) İHA'lar olmak üzere iki geniş kategori altında incelenebilmektedir [10, 13]. Austin, İHA'ların sınıflandırmasını şu şekilde yapmaktadır [11]:

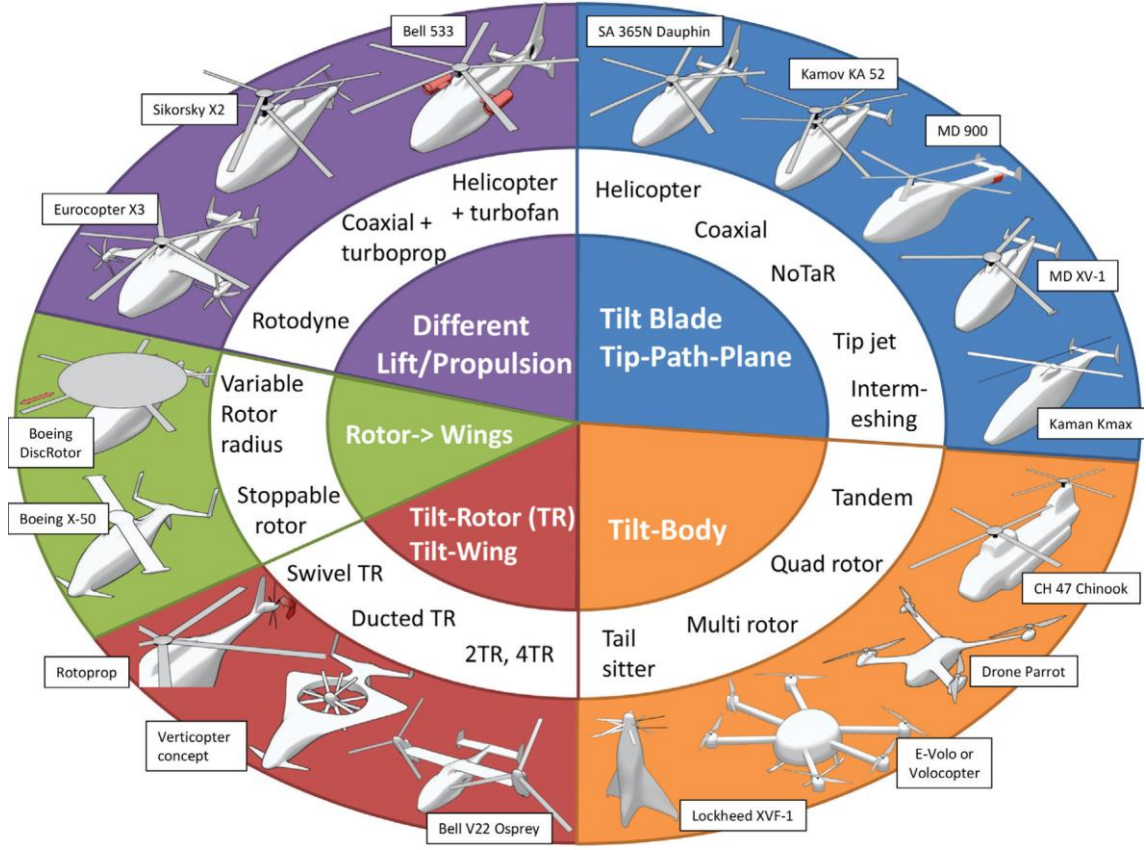
- **HALE** (High Altitude Long Endurance): Yüksek İrtifa Uzun Dayanıklılık; 1500 metre üzerinde irtifada, 24 saatten fazla görev yapabilme kapasitesine sahiptir ve küresel çapta menzili bulunmaktadır.
- **MALE** (Medium Altitude Long Endurance): Orta Yükseklik Uzun Dayanıklılık; 5000 metre ile 15000 metre arasında irtifalarda, 24 saatlik dayanıklılığa sahiptir ve menzili 500 km'yi aşmaktadır.
- **TUAV** (Tactical UAV – Medium Range): Taktiksel İHA; 100 km ile 300 km arasında menzile sahiptir.
- **Close-Range UAV**: Yakın menzilli İHA; yaklaşık 100 km'ye kadar menzili olup hem askeri hem de sivil alanlarda kullanılmaktadır.
- **MUAV** (Mini UAV): Mini İHA; genellikle 20 kg'dan daha hafif, elden fırlatılabilir ve 30 km'ye kadar menzilde görev yapabilir.

- **MAV** (Micro UAV): Mikro İHA; başlangıçta kanat açıklığı 15 cm'den küçük olan İHA'lar olarak tanımlanmıştır ve özellikle şehir içi operasyonlarda kullanılır.
- **NAV** (Nano Air Vehicles): Nano Hava Araçları.
- **RPH** (Remotely Piloted Helicopter) veya **VTUAV** (Vertical Take-off UAV): Uzaktan Kumandalı Helikopter veya Dikey Kalkışlı İHA.
- **UCAV** (Unmanned Combat Air Vehicle) veya **UCAR** (Unmanned Combat Rotorcraft): İnsansız Savaş Hava Aracı veya "İnsansız Silahlı Döner Kanatlı Hava Aracı.

Ayrıca, eski sınıflandırmaya göre, Uzun Menzilli İHA'lar, HALE ve MALE olarak; Orta Menzilli İHA'lar TUAV olarak yeniden tanımlanmış, Yakın Menzilli İHA'lar ise MUAV veya midi-İHA olarak adlandırılmıştır [11]. Literatürde bulunan diğer bir sınıflandırmaya göre İHA'lar şunlardır [14, 15]:

- **Sabit Kanatlı İHA'lar:** Gövdesinde kanatları bulunan, iniş ve kalkış için bir piste veya ilk hıza ihtiyaç duyan hava araçlarıdır. Kanatları sayesinde uzun süre havada kalabilir ve yüksek hızlarda uçabilirler.
- **Döner Kanatlı İHA'lar:** Rotorları sayesinde havada kalabilen, dikey kalkış ve iniş (VTOL) yapabilen ve yüksek manevra kabiliyeti sunan hava araçlarıdır. Rotorlu hava araçları olarak da bilinirler.
- **Balonlar:** Düşük hızlarda uçabilen ve havada uzun süre kalabilen hava araçlarıdır.
- **Çırpan Kanatlı İHA'lar:** Şekil değiştirebilen, salınım yapabilen ve hareketli kanatlara sahip hava araçlarıdır.
- **Hibrit Yapılandırmaları İHA'lar:** Dikey olarak kalkış ve iniş yapabilen, rotorlarını, kanatlarını veya gövdesini çevirerek uçabilen sistemlerdir.

Şekil 1.1'de döner kanatlı hava araçlarının farklı tasarım kriterlerine göre sınıflandırılması ve bu tasarımların altında yer alan çeşitli model tipleri gösterilmektedir [16].



Şekil 1.1. Farklı Tasarımlardaki Döner Kanatlı Hava Araçlarının Çeşitleri ve Genel Özeti [16]

Şekil 1.1’de gösterilen İHA sınıflandırmaları şunlardır:

- **Tilt Blade; Tip-Path-Plane:** Döner kanatlı hava araçları kategorisinde en yaygın ve bilinen yapı türlerinden biridir. Helikopterler bu sınıfın en öne çıkan örnekleri olarak kabul edilir. Bu sistemdeki ana rotorlar, aracın kaldırma kuvvetini oluşturmanın yanı sıra, itiş sağlamak ve yanlama (pitch) ile yuvarlanma (roll) hareketlerini kontrol etmek için kullanılır. Döngüsel kontrol mekanizmaları, rotor kanatlarının bıçak açılarını her dönüş sırasında belirli bir periyotta değiştirerek, rotor diski boyunca kaldırma kuvvetinin dağılımını ayarlar. Bu düzenleme, bıçakların farklı açılarda çırpma (flapping) hareketleri yapmasına yol açar, bu da aracın yönlendirilmesini ve stabilitesini sağlar [16].
- **Tilt-Body:** Bu konseptte, farklı rotorlar tarafından üretilen aerodinamik kuvvet, hava aracının tamamının veya rotorların monte edildiği bölümün hareketi

sağlanır. Bu sayede, hava aracının hareketi ve kontrolü sağlanır. Multi-Rotor'lar bunlar arasında en çok bilenenlerdir [16].

- **Tilt-Rotor:** Bu tasarım konseptinde, rotorların biri veya birkaçı tamamen döndürülebilir şekilde yapılandırılmıştır. Bu hareketli rotorlar, aracın aerodinamik performansını artırmak ve farklı uçuş modlarına uyum sağlamak için kullanılır [16].
- **Tilt-Wing:** Bu tasarımda, rotorlar ve bu rotorları taşıyan kanatlar birlikte hareket ederek tüm kanat yapısının döndürülmesi sağlanır. Bu sayede, dikey kalkış ve iniş (VTOL) modunda kanatlar yere dik konumdayken, ileri uçuş modunda kanatlar yatay konuma gelir.
- **Özel Durumlar:** Bu tür konseptlerde, döner kanatların sabit kanat işlevi görecektir şekilde dönüştürülmesi sağlanır [16].
- **Farklı Kaldırma/İtme Sistemleri:** Bu tasarım konseptinde, rotorlar kanatlar, pervaneler veya diğer yardımcı itme sistemleriyle bütünleşmiş bir biçimde çalışır. Düşük hızlarda kaldırma kuvveti ağırlıklı olarak rotorlar tarafından sağlanırken araç hızlandıkça bu görev kademeli olarak kısmen veya tamamen kanatlara geçer [16].

Bu çalışmada, döner kanatlı insansız hava araçları arasında yaygın olarak kullanılan ve en çok bilinen model olan dört rotorlu (quadrotor) İHA kullanılmıştır. İHA'ların sürü halinde hareketi ve birbirlerine yaklaşma durumları incelenmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen analizler ile döner kanatlı İHA'ların aerodinamik performansı incelenmiştir.

1.2. Literatür Araştırması

İnsansız hava araçları, robotik, aerodinamik, kontrol sistemleri, havacılık, algoritma ve modelleme gibi pek çok disiplini kapsayan ve bir araya getiren çok yönlü bir araştırma alanıdır. Literatürde İHA'lar üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, özellikle sürü İHA'lara yönelik araştırmaların genellikle rotalama algoritmalarının geliştirilmesine odaklandığı görülmüştür. Bu çalışmada, İHA'larla ilgili Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemlerini içeren çalışmalar detaylı bir şekilde ele alınmış ve kapsamlı bir literatür özeti sunulmuştur. Ayrıca, bu çalışma kapsamında oluşturulan

literatür tablosunda, kullanılan İHA türleri, uygulanan HAD yöntemleri, çalışmaların amaçları ve elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Guo, Q., Zhu, Y. ve diğerlerinin 2020 yılında yayınladıkları “CFD Simulation and Experimental Verification of the Spatial and Temporal Distributions of the Downwash Airflow of a Quad-Rotor Agricultural UAV in Hover” adlı çalışmalarında [17], tarımsal amaçlarla kullanılan dört rotorlu İHA’nın aşağı yönlü hava akışı hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. Araştırmada, İHA’nın altında oluşan hava akışını incelemek amacıyla deney düzeneği hazırlanmış ve İHA yerden yaklaşık 3,2 metre yüksekliğe yerleştirilmiştir. Hız dağılımları, bu yüksekliğin 0,5 ile 3 metre altındaki noktalardan ölçülmüştür. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizlerinde, pervane çapı 0,6 metre olan ZHKU-0404-01 model İHA’nın oluşturduğu aşağı yönlü hava akışının dağılımı, RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) denklemleri ve SST (Shear Stress Transport) $k-\omega$ türbülans modeli kullanılarak Fluent yazılımında incelenmiştir. Analizlerde toplam 5,8 milyon hücreye sahip çözüm ağı kullanılmış, hesaplamalar sırasında pervanelerin dönüş hızı 2500 rpm olarak belirlenmiş ve kayan çözüm ağı (sliding grid) yöntemi ile rotorların dönme hareketi simüle edilmiştir. Basınç-hız bağlantısı SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritması ile sağlanmış, simülasyonlarda zaman adımı 0.0001 saniye ve yakınsama kriteri 10^{-4} olarak ayarlanmıştır. Her zaman adımında 30 iterasyon yapılmış, toplamda 16 000 zaman adımı kullanılmıştır. Rotorların hemen altında, aşağı z-yönlü hızın maksimum değeri 8,96 metre/saniye olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, yer etkisi (ground effect) olarak bilinen ve hava akışının yerden yukarıya doğru yön değiştirmesine neden olan yukarı yönlü akışın (upwash) oluşumu da gözlemlenmiştir. Simülasyon verileri, deneysel sonuçlar karşılaştırıldığında sonuçların büyük ölçüde uyumlu olduğu saptanmıştır. Hava akışının 1,5 ile 4,5 saniye arasında stabil hale geldiği gözlemlenmiş ve simülasyon ile deneysel sonuçlar arasında %10’dan az hata oranı bulunmuştur.

Panagiotou, P., Kaparos, P. ve Yakinthos, K tarafından gerçekleştirilen (2014) “Winglet Design and Optimization for a MALE UAV Using CFD” başlıklı çalışmada [9], Orta İrtifa Uzun Menzilli (MALE; Medium Altitude Long Endurance) insansız hava aracının kanat ucu (winglet) optimizasyonları HAD yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Kanat uçlarının etrafındaki akışın analizi ANSYS CFX yazılımı ile yapılmış, bu analizler RANS ve Spalart-Allmaras türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın amacı, en uygun

kanat ucu tasarımını belirlemek ve bu tasarımın İHA'nın aerodinamik performansı üzerindeki etkilerini incelemektir. Araştırmada, altı farklı kanat ucu tasarımlarının etrafındaki akış analiz edilmiş ve bu tasarımların kaldırma-sürüklenme katsayıları ile kaldırma/direnç (L/D) oranı değerlendirilmiştir. Genel aerodinamik performansı artırmak amacıyla değerlendirilen kanat ucu tasarımı seyrüsefer halindeki İHA'ya uyarlanmış ve araç etrafında oluşan akış karakteristiği analiz edilerek incelenmiştir. Yapılan hesaplamalarda optimize edilen kanat ucu ile uçuş süresinin yaklaşık %10 oranında arttığı gösterilmiştir. Çalışmada, Yunanistan'daki dağların üzerinden geçebilmesi için yeterli olan 2000 metre irtifadaki koşullar kullanılmış ve serbest hız 140 kilometre/saat olarak alınmıştır. İHA'nın performansını değerlendirmek için, hücum açılarının -8 derece ile 20 derece arasında değiştiği durumlar ele alınmıştır. Kanat ucu tasarımı için yaklaşık 3 milyon düğüm sayısına sahip çözüm ağları oluşturulmuş, sabit kanatlı İHA'nın tamamı için yapılan simülasyonlarda ise yaklaşık 7 milyon düğüm sayısı ile hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sabit kanatlı Hellenic Sivil İHA modelinde dönen pervane modeli yerine, işlemleri basitleştirmek için basınç-disk bölgesi kullanılmıştır. Kanat ucu tasarımlarının, kanat uçlarındaki girdapları azaltarak indüklenmiş sürüklenmeyi düşürdüğü ve aerodinamik verimliliği artırdığı vurgulanmıştır. Kanat ucu yapılarının İHA'nın aerodinamik performansını iyileştirdiği ve uçuş süresini yaklaşık %10 oranında artırdığı gösterilmiştir. MALE sınıfı İHA'lar için kanat ucu optimizasyonunun önemi vurgulanmış ve HAD yöntemlerinin aerodinamik performansı artırma potansiyeli ortaya konmuştur.

Paz, C., Suárez, E. ve diğerlerinin (2020) gerçekleştirdikleri “CFD Analysis of the Aerodynamic Effects on the Stability of the Flight of a Quadcopter UAV in the Proximity of Walls and Ground” adlı çalışmada [7], dört rotorlu bir insansız hava aracının (quadrotor) duvarlar ve zemin gibi engellere yakın uçuşları sırasında oluşan aerodinamik etkiler detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, bu engellere yakın uçuşlarda meydana gelen dış kuvvetlerin İHA'nın stabilitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yapılan analizlerde, İHA'nın sürüklenme kuvvetinde azalma, kaldırma kuvvetinde ve yunuslama momentinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Yere yakın uçuşlarda, zemin etkisinin itkiyi artırdığı ve engellerin, özellikle ivme ve torklarda ani değişimlere neden olabileceği gösterilmiştir. Araştırmada, pervane çapı 24 cm olan dört rotorlu DJI Phantom 3 modeli kullanılmıştır. Çalışmada, farklı simülasyon konfigürasyonları ile İHA'nın aerodinamik

performansı ve stabilitesi değerlendirilmiştir. İlk simülasyonda, ağ yakınsama testi için 10 m/s yukarı yönlü hava akımı uygulanarak mesh çözünürlüğü değerlendirilmiştir. İkinci simülasyonda, pervanelerin dönme etkilerini analiz etmek için MRF (Moving Reference Frame) yöntemi kullanılmıştır. Üçüncü simülasyonda, zemin etkisinin İHA üzerindeki aerodinamik performansı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Son olarak, dördüncü simülasyonda, dinamik mesh kullanılarak İHA'nın engel üzerinden geçişi sırasında meydana gelen aerodinamik etkileri ve stabilite üzerindeki moment değişimleri analiz edilmiştir.

HAD simülasyonları, ANSYS 17.1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, Realizable k- ϵ türbülans modeli ve İHA'nın pervanelerini modellemek için MRF yöntemi kullanılmıştır. Pervanelerin dönüş hızı, motor gücünün maksimum değerinin %80'ine karşılık gelen 1000 rad/s (9550 rpm) olarak alınmıştır. Simülasyonlar hem zamana bağlı (transient) hem de zamandan bağımsız (steady-state) olarak gerçekleştirilmiş ve çözüm ağı en fazla 26 milyon elemandan oluşturulmuştur. İHA'nın engel üzerinden geçişi sırasında, 1 m/s, 5 m/s, 7.5 m/s ve 10 m/s hızlarla yapılan simülasyonlarda, yer etkisinin İHA üzerindeki aerodinamik etkileri incelenmiştir. Bu simülasyonlar, İHA engellere yaklaşırken veya uzaklaşırken dönme momentinde %60'a varan artışların meydana geldiğini ve bu artışların İHA stabilitesini olumsuz yönde etkileyerek İHA'nın öne doğru eğilmesine neden olabileceğini ortaya koymuştur. Ayrıca, zemin etkisi sırasında itki kuvvetinde %4,9 oranında bir artış, sürüklenme kuvvetinde ise %20,5 oranında bir azalma gözlemlenmiştir. Çalışma, İHA'ların güvenli uçuş performansı için önemli bulgular sunmakta ve bu tür uçuş koşullarında stabilitenin nasıl korunabileceğine dair değerli bilgiler sağlamaktadır.

Loli, M., Mitoulis, S. A. ve diğerleri (2022) tarafından gerçekleştirilen “Flood Characterization Based on Forensic Analysis of Bridge Collapse Using UAV Reconnaissance and CFD Simulations” başlıklı makalede [18], İHA teknolojilerinin doğal afetlerle mücadelede kullanımına ve bu teknolojilerin mühendislik analizlerindeki potansiyeline odaklanılmaktadır. Araştırmada, Yunanistan'da meydana gelen sel felaketi sonucunda çöken bir köprü, DJI Phantom 4 Professional İHA'nın üç boyutlu haritalandırma yetenekleri kullanılarak incelenmiştir. HAD yöntemleri ile köprüye zarar veren akışkan-yapı etkileşimi analiz edilmiştir. Çalışmada, köprü ayakları çevresindeki yerel aşınmaların ve artan akış hızının yapısal hasara neden olduğu tespit edilmiş ve bu

sonuçlar simülasyonlarla doğrulanmıştır. Simülasyonlarda RANS, Realizable k- ϵ türbülans modeli kullanılmış ve 11 milyon hücreli çözüm ağı oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçları, selin neden olduğu akış hızının köprü temellerine verdiği zararı ortaya koymuş ve İHA tabanlı haritalama ile HAD simülasyonlarının doğal afetlerle mücadelede kullanılabilirliği gösterilmiştir. Ayrıca, sel risklerini değerlendirmede ve altyapıların dayanıklılığını artırmada etkili olabileceğini belirtilmiştir. Bu alışma, gelecekte benzer altyapıların hasar analizinde İHA ve HAD tekniklerinin kullanımının önemi vurgulanmıştır.

Mazhar, F., Khan, A. ve diğerleri tarafından 2013 yılında yayınladıkları “On Using Neural Networks in UAV Structural Design for CFD Data Fitting and Classification” başlıklı makalede [19], sabit kanatlı İHA’ların yapısal tasarımında Akışkan-Yapı Etkileşimi (AYE, FSI) yöntemleri ele alınmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği verileri, Yapay Sinir Ağları (YSA) ile Sonlu Elemanlar Analizine (SEA) entegre edilerek tasarımıda doğruluk ve verimlilik artışı sağlanmıştır. Çalışma, İHA’ların kritik yapısal bölgelerinde basınç tahminlerini iyileştirmiş ve yapay sinir ağlarının geleneksel yöntemlere göre avantajlarını ortaya koymuştur.

Paz, C., Surez, E. ve diğerlerinin (2021) tarafından yapılan “Assessment of the Methodology for the CFD Simulation of The Flight of a Quadcopter UAV” adlı çalışmada [6], dört rotorlu bir İnsansız Hava Aracı’nın uçuş dinamikleri ve pervanelerin oluşturduğu hava akımları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmada, hava akımlarının yer etkisi altında nasıl davrandığı ve rotorların gövdeye göre konumlarının bu akış dinamikleri üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri, Multiple Reference Frame (MRF) ve Sliding Mesh yöntemleri kullanılarak üç boyutlu olarak ANSYS Fluent 17.1 yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve analizlere yer etkisi de dahil edilmiştir. Yer etkisinin, farklı mesafelerdeki değişimi ve pervane-akış ilişkileri, MRF ve Sliding Mesh yöntemleri ile kapsamlı bir şekilde ele alınmıştır. Bu çalışmada sadeleştirilmiş DJI Phantom 3 modeli kullanılmıştır. Öncelikle, bu modelde kullanılan pervanelerin performansı MRF ve Sliding Mesh yöntemleri ile incelenmiş, ardından İHA gövdesi ve dört pervane birlikte analiz edilmiştir. Pervanelerin dönüş hızı, maksimum dönüş hızının %80’i olan 1000 rad/s olarak ayarlanmış ve türbülans modeli olarak Realizable k- ϵ modeli kullanılmıştır. Ayrıca, Sliding Mesh’de, Courant sayısının 1’in altında tutulması hedeflenmiştir. Simülasyonlarda en fazla 26 milyon hücreden oluşan bir

çözüm ağı kullanılmıştır. Simülasyonların yüksek performanslı bilgisayar kümelerinde gerçekleştirildiği ve MRF yöntemi ile yapılan simülasyonların her işlemci için yaklaşık 1000 saat, Sliding Mesh yöntemi ile yapılan simülasyonların ise her işlemci için 8000-9000 saat sürdüğü belirtilmiştir. Çalışmada, yer etkisinin itki kuvvetini %9-12 oranında etkilediği bulunmuştur. MRF ile Sliding Mesh yöntemlerinin performansları karşılaştırıldığında, MRF yönteminin düşük hesaplama maliyeti nedeniyle tercih edilebilir bir seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. Bununla birlikte, Sliding Mesh yönteminin, yer etkisi ve pervaneler arası etkileşimleri incelendiğinde daha detaylı ve hassas sonuçlar elde ettiği vurgulanmıştır. Sonuç olarak, hesaplama süresinin kritik önem taşıdığı durumlarda MRF yönteminin tercih edilebileceği gösterilmiştir. MRF yöntemi düşük maliyetiyle bazı durumlarda uygun bir seçenek olduğu belirtilirken, daha detaylı analizler ve hassas sonuçlar gerektiren çalışmalar için Sliding Mesh yöntemi önerilmiştir.

Kapsalis, S., Panagiotou, P. ve Yakinthos, K.'nın (2021) gerçekleştirdikleri “CFD-Aided Optimization of a Tactical Blended-Wing-Body UAV Platform Using the Taguchi Method” başlıklı çalışmada [20], taktiksel bir Bileşik Gövde Kanatlı (BGK, BWB – Blended-Wing-Body) İHA'nın tasarımı, HAD analizleri ve Taguchi yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. RX-3 BWB İHA modeli temel alınarak yapılan analizlerde, kıvrım açısı (sweep angle- ϕ), en-boy oranı (aspect ratio-AR) ve koniklik oranı (taper ratio- λ) gibi parametreler üzerinde durulmuş ve toplamda dokuz farklı konfigürasyon değerlendirilmiştir. Simülasyonlar ANSYS CFX v18.1 yazılımında gerçekleştirilmiş, Spalart-Allmaras türbülans modeli ve 9,5 milyon düğüm içeren çözüm ağı kullanılmıştır. Hücüm açılarının (angle of attack- α), (-4° ile 12°) aerodinamik performansa etkileri incelenmiş ve düşük hücüm açılarının daha yüksek verimlilik sağladığı bulunmuştur. Taguchi yöntemi, deney sayısını üçte iki (%70) oranında azaltarak 135 yerine 45 simülasyon yapılmasını mümkün kılmıştır. Bu yaklaşım, İHA'nın aerodinamik performansını ve genel verimliliğini artırmada etkili olmuştur.

Hari, B., Brouwer, J. P. ve diğerlerinin (2019) “A Computational Fluid Dynamics and Finite Element Analysis Design of A Microtubular Solid Oxide Fuel Cell Stack for Fixed Wing Mini Unmanned Aerial Vehicles” başlıklı makalesinde, sabit kanatlı mini insansız hava araçları için yenilikçi mikro-tübüler katı oksit yakıt hücresi tasarlanmıştır. Çalışmada, yakıt hücresi içindeki akışkan ve termal dağılım, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ve Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) kullanılarak modellenmiş ve tasarım

sürecinde optimizasyonun önemi vurgulanmıştır. Tasarım sürecinin erken aşamalarında gerçekleştirilen hesaplamalı optimizasyonun, yakıt hücresi yığınının güvenilirliği ve sağlamlığı açısından kritik öneme sahip olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, termal streslerin yakıt hücresinin mekanik dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiş ve bu analizlerin, sabit kanatlı mini İHA'ların performansını optimize etmek için faydalı olabileceği ifade edilmiştir.

Yang, S., Tang, Q. ve diğerlerinin (2020) "Model Migration for CFD and Verification of a Six-Rotor UAV Downwash" başlıklı makalesinde [21], tarımsal amaçlarla kullanılan altı rotorlu JF01-10 model İHA'nın HAD simülasyonları yapılmış ve 1:10 ölçekli İHA modeli üzerinden doğrulamalar gerçekleştirilmiştir. JF01-10 model İHA'nın genişliği 1780 mm, pervane çapı ise 22 inç (558 mm) olarak belirtilmiştir. Pervanelerden kaynaklanan aşağı yönlü hava akışı ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve simülasyonların doğruluğu Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü (PIV - Particle Image Velocimetry) testi ile incelenmiştir. CFD modellerinde, çözüm ağı ANSYS Workbench'de curvature yöntemi ile oluşturulmuş ve 102 207 düğüm ile 518 834 elemandan meydana gelmiştir. Modeller, zamandan bağımsız, basınç tabanlı çözüm ve mutlak hız formülasyonu (Absolute Velocity Formulation) ile çalıştırılmış, türbülans modeli olarak SST k- ϵ tercih edilmiştir. Analizlerde, pervanelerin dönüş hızı 1500 rpm olarak belirlenmiş ve coupled çözücü ile 1000 iterasyon gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, JF01-10 model İHA, 2 ve 5 metre yüksekliklere yerleştirilmiş ve analiz sonuçları elde edilmiştir. Bu analizlerde, aşağı yönlü hava hızı yaklaşık 12,5 m/s olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde, 1:10 ölçekli İHA da 0,2 ve 0,5 metre yüksekliklerde incelenmiş ve aşağı yönlü hava hızı sırasıyla 1,9 m/s ve 1,8 m/s olarak ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar, deneysel verilerle karşılaştırıldığında, küçük ölçekli İHA için CFD modellerinin %12'den daha az bir hata payı ile doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak, gerçek İHA için bu hata oranı %34'e kadar çıkmış olup, karmaşık yapılar için daha fazla optimizasyon yapılması gerektiği belirtilmiştir. Ek olarak; makalede yer etkisinden söz edilmemekte fakat analiz sonuçları, yer etkisinin gözlemlenmiş olabileceğini işaret etmekte ve pervanelerin simülasyonunda MRF yöntemin de kullanıldığını düşündürmektedir.

Zhu, H., Li, H. Z ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan "Performance Characterization of the UAV Chemical Application Based on CFD Simulation" adlı makalede [22], tarımsal amaçla kullanılan İHA'ların püskürtme sistemleri detaylı bir

şekilde incelenmiştir. Çalışmada, ANSYS ICEM CFD 15.0 yazılımı kullanılarak İHA'nın akış modeli oluşturulmuştur. Hesaplama alanı, 10 m uzunluğunda, 4 m genişliğinde ve 1,5 m yüksekliğinde olup toplamda 228 000 grid alanından oluşturulmuştur. Bu alan içerisinde araç üzerindeki nozullar (püskürtme uçları) tanımlanmıştır. Nozulların konumları ayarlanarak püskürtme yüksekliği 0,8 m, 1 m ve 1,5 m olarak değiştirilmiştir. Çalışma 0,2 MPa; 0,3 MPa ve 0,4 MPa olmak üzere üç farklı basınç değeri ve 0, 1, 3, 5 m/s hızlarındaki rüzgâr hızları ile gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hızı, basınç ve püskürtme yüksekliği gibi değişkenlerin püskürtme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Simülasyonlar basınç tabanlı çözücü, Standard k- ϵ türbülans modeli ve yakınsama kriteri 10^{-5} ile zamana bağlı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, Euler-Lagrange yaklaşımı ile damlacık hareketlerinin modellenmesinde DPM (Discrete Phase Model) kullanılmıştır. Çalışmada, farklı rüzgâr hızları, püskürtme yüksekliği ve basınç koşulları altında damlacık sürüklenme mesafeleri analiz edilmiştir. Örneğin, 1,5 m püskürtme yüksekliği, 0,3 MPa basınç ve 5 m/s rüzgâr hızında damlacıkların 2,85 m'ye kadar sürüklendiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, tarımsal amaçlı İHA'ların püskürtme kalitesini artırmak, damlacık sapmasını minimize etmek ve verimliliği artırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Atmaca M., Çetin B. ve Yılmaz E.'nin 2019 yılında yayınladıkları “CFD Analysis of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Moving in Flocks” başlıklı makalede [3], insansız hava araçlarının sürü halinde hareket ederken birbirleri üzerindeki aerodinamik etkileşimleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleri kullanılarak simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, DJI Phantom 3 dört rotorlu İHA modeli kullanılmış ve iki İHA, biri diğerrinin 1 metre üstünde konumlandırılarak incelenmiştir. Bu yerleşim düzeniyle, havada asılı duran araçların çevresinde oluşan aerodinamik etkiler zamana bağlı simülasyonlar ile analiz edilmiştir. Özellikle, İHA'ların birbirlerine yakın uçmaları durumunda oluşabilecek türbülans etkileri ve basınç değişimleri incelenmiştir. Simülasyonlar, ANSYS Fluent v18.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, türbülans modeli olarak Realizable k- ϵ türbülans modeli seçilmiştir. İHA'ların dinamik hareketlerini modellemek için Sliding Mesh ve MRF (HRC: Hareketli Referans Çerçevesi) yöntemleri kullanılmıştır. Simülasyonlar, 0.01 saniyelik zaman adımları ile yapılmış ve her bir zaman adımı için maksimum 200 iterasyon gerçekleştirilmiştir. SIMPLE algoritması kullanılmış ve momentum, türbülans kinetik enerjisi, türbülans dağılımı için secondorder

upwind ayırıklaştırma uygulanmıştır. Çözüm ağı yaklaşık 6,5 milyon düğüm ve 4,7 milyon elemandan oluşmaktadır. Pervaneler, ± 10000 rpm dönüş hızında çalıştırılmış ve simülasyonların ikinci saniyesinde sistemin stabil hale geldiği gözlemlenmiştir. Sonuçlar, üstte bulunan İHA'nın, alttaki İHA'yı aerodinamik olarak etkilediğini ve bu etkinin, alttaki İHA'nın stabil hareketini bozabileceğini göstermiştir. Bu durum, İHA'ların yakın hareket etmeleri durumunda aerodinamik etkilerin minimize edilmesi gerektiğini, güvenli uçuş ve yaklaşma bölgelerinin belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Çalışma, İHA'ların sürü halinde güvenli bir şekilde hareket edebilmesi için, belirli bir mesafeden daha yakın uçmamaları gerektiğini, her bir İHA'nın otonom olarak çevresini algılayabilmesi ve diğer araçlarla olan mesafesini kontrol etmesini önermiştir.

Das, S. S., Páscoa, J. C. ve diğerlerinin (2015) "Computational Fluid Dynamic Study on a Novel Propulsive System: ACHEON and Its Integration with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV)" başlıklı makalesinde [23], Aerial Coanda yüksek verimli yönlendirici jet nozulu (ACHEON) adlı jet nozulu sisteminin, NIMBUS kanat yapılandırılmalı sabit kanatlı küçük bir İHA'da kullanımı değerlendirilmiştir. Fluent yazılımıyla gerçekleştirilen simülasyonlarda, SST k- ω türbülans modeli ve PBCS (pressure-based coupled solver) çözüm yöntemi ve FMG (Full Multi Grid) başlatıcı kullanılmıştır. Farklı çözüm ağları karşılaştırılarak 2,34 milyon hücreden oluşan ağ optimum sonuçlar için seçilmiş ve İHA simülasyonları için ise Multiblock çözüm ağı oluşturulmuştur. Çalışmada, ACHEON sisteminin dönme etkisinin, nozulun itki yönlendirme verimliliğini ve İHA'nın aerodinamik performansını olumsuz etkilediği gösterilmiştir.

Zhu, Y., Guo, Q. ve arkadaşları (2022) "CFD Simulation and Measurement of the Downwash Airflow of a Quadrotor Plant Protection UAV During Operation" adlı çalışmalarında [24], tarımsal amaçlarla kullanılan dört rotorlu İHA'nın farklı uçuş hızlarında oluşan aşağı yönlü hava akımının akış özellikleri ile püskürtme verimi araştırılmıştır. İHA'nın farklı hızlarda (1 m/s ile 5 m/s arasında) uçuşu durumunda aşağı yönlü hava akımının karakteristiklerini ve hız dağılımlarını hem deneysel hem de hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemleriyle incelenmiştir. HAD çalışmalarında RANS denklemlerinde, SST k- ω türbülans modeli ve coupled pressure-velocity çözücüsü ve basınç-hız denklemlerini çözmek için PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operation) yöntemi kullanılmıştır. Farklı çözüm ağlarını birleştirmek için Overset grid yöntemi tercih edilmiştir ve bu bağlamda özel bir yöntem olan PSSDE (Pseudo-Searching

Scheme of Donor Elements) kullanılmıştır. Çözüm ağı toplamda 80 milyon gridden oluşturulmuş, y^+ değeri en fazla 3,4 olarak belirlenmiş, rotorların dönme noktaları UDF (User-Defined-Function) ile birim zaman adımı içinde güncellenmiştir. Hesaplamalar, Fluent 19.2 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve simülasyonlarda birim zaman adımı $1,5 \times 10^{-4}$ saniye olarak belirlenmiştir. Maksimum iterasyon sayısı ise 80 olarak ayarlanmıştır.

Çalışmada, İHA'nın 3 metre yükseklikte gerçekleştirdiği uçuşlarda, rotorun aşağı yönlü hava akımının oluşturduğu yer etkisinin, İHA'nın güvenli uçuşunu etkilemediği gözlemlenmiş ve bu durum referanslarla desteklenmiştir [24, 25]. Uçuş hızı 2 m/s ile ilerleyen İHA'nın aşağı yönlü akışında zıt yönlerde doğru ayrılma ve at nalı biçiminde girdap (horseshoe vortex) oluşumu gözlemlenmiştir. Uçuş hızının 5 m/s'ye ulaştığı durumlarda, küçük damlacıkların havada uzun süre kalabileceği ve hedefe ulaşma olasılığının azalacağı ifade edilmiştir. 4 m/s ve üzeri hızlarda, vortekslerin eğiminde artış olduğu ve bunun damlacık performansını zorlaştırdığı belirtilmiştir. İHA'nın en uygun çalışma mesafesi, uçuş hızının 3 m/s'den az olduğu durumlar için belirlenmiş ve bitki örtüsüne 1,25 m ile 2 m arasında bir mesafe olarak önerilmiştir. Bunlara ek olarak deneysel sonuçlarda ve simülasyon verilerinde %15-23 arasında hata oranının olduğu da bulunmuştur.

Sandoval, P., Cornejo, P. ve Tinapp, F. tarafından (2015) yapılan “Evaluating the Longitudinal Stability of an UAV Using a CFD-6DOF Model” adlı çalışmada, sabit kanatlı bir İHA'nın boyuna stabilitesi, deneysel verileri ve CFD analizleri karşılaştırılmıştır. Giant III (KADET LT-40) modeli temel alınarak, 6DOF (Six Degrees of Freedom, Altı Serbestlik Derecesi) modülüyle yapılan simülasyonlarda, phugoid (uzun periyotlu) osilasyonları ve uzunlamasına dinamik tepkileri incelenmiştir. RSM (Reynolds Stress Model) türbülans modeli ve SIMPLE algoritması kullanılarak, y^+ değeri 30-300 arasında olan çözüm ağlarıyla gerçekleştirilen analizlerde, deneysel verilerle yaklaşık %6,8 hata payıyla uyum sağlanmıştır. Optimize edilen modelin pitch açısı, irtifa ve hız gibi parametrelerde doğruluğu kanıtlanmış ve boyuna stabilitenin başarılı bir şekilde öngörüldüğü belirtilmiştir.

Kim, C. ve Chung, J. tarafından 2006 yılında yapılan “Aerodynamic Analysis of Tilt-Rotor Unmanned Aerial Vehicle with Computational Fluid Dynamics” başlıklı çalışmada

[27], TR-E2S1 konfigürasyonuna sahip tilt-rotorlu İHA'nın aerodinamik özellikleri HAD simülasyonlarıyla incelenmiş ve rüzgâr tüneli testleri ile karşılaştırılmıştır. İki adet tilt-rotorlu olan İHA'nın, istikamet (rudder) ve irtifa (elevatör) dümenleri ile yunuslama (pitch), sapma (yaw) ve yuvarlanma (roll) açılarındaki kararlılıkları incelenmiştir. İHA modeli, Kore Havacılık Araştırma Enstitüsü (KARI) tarafından geliştirilmiş ve Bell Textron firmasının TR-E2 kombinasyonu önerilmiştir. İHA'nın kanat açıklığı 555,27 mm, kanat kord uzunluğu 103,1 mm, yatay kuyruk açıklığı 240 mm ve gövde uzunluğu 620,75 mm olarak verilmiştir. Ayrıca, kanatlarda NACA 64621 profili ve T tipi kuyruk, kanadın oluşturduğu downwash etkisini azaltmak amacıyla kullanılmıştır.

HAD simülasyonları Fluent 6.1 yazılımı ile yapılmış, çözüm ağı Gambit ve Tgrid ile oluşturulmuştur. Çözüm ağı yaklaşık 5 milyon grid içermekte olup, yüzeylerdeki grid sayısı 190 000'dir İlk sınır tabaka yüksekliği 0,1 mm ve büyüme oranı 1,2 olan 10 inflation tabakası oluşturulmuştur. Similasyonlar, 400 km/saat hız ve 3 km yükseklik koşullarında gerçekleştirilmiştir. Far-field sınır koşulları olarak serbest akış Mach sayısı 0,34, basınç 70121 Pascal, sıcaklık 268K, türbülans yoğunluğu %2 ve uzunluğu 0,1 m olarak belirlenmiştir. RANS denklemlerinin çözümünde Spalart-Allmaras türbülans modeli kullanılmıştır. Başlangıçta first-order çözücüler kullanılmış, ardından second-order çözücülerle çözümler iyileştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, 0 ile 20 derece arasındaki hücum ve sapma açılarındaki kaldırma ve sürüklenme değerleri hesaplanmıştır. Simülasyonlar, %12 ölçekli rüzgâr tüneli testleri ile karşılaştırılmış ve benzer karakteristiklerin olduğu gösterilmiştir. Simülasyonların, rüzgâr tüneli testlerine göre daha yüksek kaldırma değerleri verdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, HAD'da 16°, rüzgâr tüneli testlerinde ise 20° açılarda stall meydana geldiği belirtilmiştir. Kanat hücum açısının 1°'den 4°'ye çıkarılması, kaldırma kuvvetinde 0,2 birimlik bir artış sağlamıştır. Rüzgâr tüneli testlerinde küçük ölçekli model kullanıldığı, doğruluğun sağlanması için daha büyük ölçekli modelle testlerin yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Götten, F., Havermann, M. ve diğerlerinin (2020) "Wind-Tunnel and CFD Investigations of UAV Landing Gears and Turrets – Improvements in Empirical Drag Estimation" başlıklı makalesinde [28], sabit kanatlı İHA'ların iniş takımları ve sensör taretlerinden kaynaklanan parazit sürüklenme, rüzgâr tüneli testleri ve HAD analizleriyle incelenmiştir. Üç boyutlu baskı teknolojisiyle üretilen modellerin HAD sonuçları, deneysel verilerle yüksek uyum göstermiştir. StarCCM+ v15.02 yazılımıyla yapılan simülasyonlarda, y+

değeri 0,5-0,8 aralığında tutulmuş ve SST türbülans modeli ile EARSIM (Explicit Algebraic Reynolds Stress Model) kullanılmıştır. Simülasyonlar, SIMPLE algoritmasıyla zamana bağlı olarak gerçekleştirilmiş ve 20 milyon hücrelik çözüm ağı yeterli bulunmuştur. Çalışma, aerodinamik şekillendirme ile iniş takımları ve taretlerden kaynaklanan sürüklemenin %60'a kadar azaltılabileceği gösterilmiştir.

Ni, M., Wang, H. ve diğerleri tarafından 2021 yılında yayınlanan “Design of Variable Spray System for Plant Protection UAV Based on CFD Simulation and Regression Analysis” başlıklı çalışmada [29], tarımsal amaçla kullanılan DJI MG1S model sekiz rotorlu insansız hava aracının HAD simülasyonları, püskürtme performansları ve deneysel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda İHA'nın gövdesi kutu biçiminde sadeleştirilmiş; kolları, iniş takımları ve diğer küçük yapılar kaldırılmış, ancak pervaneler, kontrol modülü ve su tankı korunmuştur. Ek olarak, 533 mm çapında ve 178 mm adım açısında olan sekiz adet 2170 pervanesi kullanılmıştır. İHA, 1 ile 4 metre arasında değişen yüksekliklerde konumlandırılmış ve püskürtme performansı incelenmiştir. Makalede yer alan bir referansa göre, LBM (Lattice Boltzmann Method) ve FVM (Finite Volume Method: Sonlu Hacimler Yöntemi) olmak üzere iki farklı HAD algoritmasından bahsedildiği; LBM'nin mikroskobik parçacıkların hareket ve çarpışma süreçlerini simüle ettiği, FVM'nin ise Navier-Stokes denklemlerini çözerek akışkan hareketini modellediği ifade edilmiştir [29, 30]. Ancak, bu çalışmada LBM'nin kullanılmadığı, yalnızca FVM'nin uygulandığı belirtilmiştir.

Simülasyonlar, yaklaşık 48 milyon düğüm içeren bir çözüm ağı kullanılarak. ANSYS Fluent 2019 R2 yazılımında, SST k- ω türbülans modeliyle zamandan bağımsız olarak gerçekleştirilmiştir. Makalede Sliding Mesh yöntemi olarak belirtilmesine rağmen, aslında zamandan bağımsız simülasyonlarda MRF yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem, her pervaneyi kapsayan hacme uygulanmış ve pervanelerin dönüş hızı analizlere bağlı olarak 3000-5000 RPM arasında değiştirilmiştir. Simülasyonlar second-order upwind çözücüler kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca, damlacıkların simülasyonlarında DPM kullanılmıştır. Yan rüzgârın ve yer etkisinin simülasyonlara dahil edildiği ve bu etkilerin tarımsal amaçlı İHA'ların püskürtme performansı üzerindeki etkilerini ortaya koyduğu belirtilmiştir. Simülasyon ve deneysel veriler kıyaslandığında, rüzgâr hızı hatasının rotor altı ve yere yakın bölgelerde 1-2 m/s aralığında, diğer bölgelerde ise 1 m/s sınırları

içerisinde kaldığı ve en fazla 2.88 m/s olarak tespit edildiği belirtilmiştir. Damlacık hatasının ise %10'un altında olduğu belirlenmiştir.

Hedworth, H., Page, J. ve diğerleri tarafından yapılan (2022) “Investigating Errors Observed during UAV-Based Vertical Measurements Using Computational Fluid Dynamics” başlıklı çalışmada , döner kanatlı İHA’lar kullanılarak dikey uçuş sırasında karşılaşılan hava kalitesi ölçüm hataları, HAD simülasyonlarıyla incelenmiştir. İHA rotorlarının özellikle iniş-alçalma sırasında oluşturduğu aşağı yönlü hava akımları nedeniyle, hava akışını düzensiz ve kaotik hale getirilerek ölçümlerde ciddi hatalara neden olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada altı rotorlu DJI Matrice 600 Pro modeli kullanılmıştır. İHA'nın pervanelerinin yaklaşık 53 cm çapında olduğu ve 6,5 kg yük taşıma kapasitesine sahip olduğu belirtilmiştir. Hesaplama hacminin 6x6x5 m boyutlarında olduğu ve çözüm ağının 23 milyon hücreden oluşturulduğu ifade edilmiştir. Simülasyonlar, paralel hesaplama yapabilen yüksek performanslı paralel HAD kodu olan Wasatch kullanılarak gerçekleştirildiği açıklanmıştır. Bu kodun Navier-Stokes denklemlerini FVM yöntemiyle ve LES (Large Eddy Simulation: Büyük Girdap Simülasyonu) türbülans modeliyle çözdüğü belirtilmiştir. İHA simülasyonlarında Dynamic Smagorinsky alt grid modeli kullanılmıştır. Dirichlet sınır koşullarının uygulandığı, zamana bağlı simülasyonların yapıldığı ve toplam simülasyon süresinin 30 saniye olarak ayarlandığı belirtilmiştir.

Daha önceki bir çalışmada [31, 33, 34], altı rotorlu bir İHA'nın çevresindeki hava akışının iki metre yukarısına ve sekiz metre aşağısına kadar etkili olduğu bulunmuş ve İHA’nın altından alınan örneklerin akış dinamikleri nedeniyle doğru sonuçlar göstermediği belirlenmiştir. Bu çalışmada ise, yükseliş sırasında rotorların altında oluşan hava akış hızının 15 m/s'ye kadar çıktığı tespit edilmiştir. İniş sırasında rotorların neden olduğu türbülanslı akım nedeniyle ölçümlerin ciddi şekilde etkilendiği ve yapılan ölçümlerde %100'den fazla hata alındığı belirtilmiştir. Bu nedenle, ölçümlerin iniş sırasında yapılmaması gerektiği ve yalnızca yükselme sırasında yapılan ölçümlerin daha doğru sonuçlar verdiği ortaya konmuştur. Ayrıca, sensörlerin İHA’nın altında konumlandırılmasının, rotorların oluşturduğu türbülans etkisini en aza indirdiği ve daha doğru sonuçlar verdiği ifade edilmiştir.

Siddiqi, Z. ve Lee, J. W. tarafından gerçekleştirilen (2019) “A Computational Fluid Dynamics Investigation of Subsonic Wing Designs for Unmanned Aerial Vehicle Application” başlıklı çalışmada [35], askeri amaçla kullanılan AAI RQ-7 Shadow İHA'nın farklı kanat tasarımlarının aerodinamik performansa etkileri HAD ile incelenmiştir. Beş kanat tasarımı (NACA 4415, EPPLER 559, konik planform, uzatılmış konik kanat ve kanatçık eklenmiş kanat) farklı hücum açıları ve hızlar altında değerlendirilmiştir. İki boyutlu analizlerde, Spalart-Allmaras, Realizable $k-\epsilon$ ve SST $k-\omega$ türbülans modelleri karşılaştırılmış ve mesh bağımsızlık testi uygulanmıştır. Üç boyutlu analizlerde ise SST $k-\omega$ modeli kullanılmış ve çözüm ağları 2,4 milyona kadar çıkarılmıştır. Sonuçlar, X-FOIL ve rüzgâr tüneli deneyleriyle doğrulanmıştır. Winglet eklenmiş kanat tasarımının kaldırma kuvvetini artırarak ve sürüklenme kuvvetini azaltarak genel aerodinamik performansı en iyi şekilde iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Chen, Q., Zhang, J. ve diğerlerinin (2023) “CFD Analysis and RBFNN-Based Optimization of Spraying System for a Six-Rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Sprayer” başlıklı makalesinde [36], tarımsal amaçlarla kullanılan altı rotorlu insansız hava aracının aşağı yönlü akımları ve püskürtme sistemlerinin performansı sayısal ve deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Optimizasyon sürecinde RBFNN (Radial Basis Function Neural Networks: Radyal Tabanlı Fonksiyon Sinir Ağı) ve GA (Genetik Algoritma) ile LHS (Latin Hiper Küp Örnekleme) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan altı rotorlu X-16 İHA'nın, maksimum rotor hızı 3600 rpm, rotor yarıçapı 207 mm, kol uzunluğu 533 mm, pervanelerin negatif tork açısının (NTA) 0° ve pervane açısının ise 6° olduğu belirtilmiştir. İHA'nın püskürtme performansı, 1, 2 ve 3 metre yüksekliklerinde değerlendirilmiştir. HAD simülasyonlarında İHA'nın yerden 2 metre yüksekliğe yerleştirildiği belirtilmiştir. Çalışmada, yer etkisi de gözükmemektedir.

Simülasyonlarda ANSYS Fluent 16.0 ve çözüm ağları için ise Ansys Meshing 16.0 yazılımları kullanılmıştır. Hesaplamalar, 8 metre çapında ve 6 metre yüksekliğinde, bir hesaplama hacmi ve R480x100 mm rotor hacmi ile gerçekleştirilmiştir. Farklı grid yoğunluklarıyla yapılan testlerde 9,26 milyon, 16,28 milyon ve 30,36 milyon grid sayıları incelenmiş, bu testler sonucunda 16,28 milyon gridin yeterli olduğu tespit edilmiştir. HAD simülasyonlarında SST $k\omega$ türbülans modeli, püskürtmeler için DPM, basınç tabanlı çözücü kullanılmış ve SIMPLE algoritması ile basınç-hız bağlantısı yapılmıştır. Basınç ayrıklaştırması için second-order scheme, momentum ve türbülans

büyükliklerinde ise second-order upwind scheme kullanılmış, yakınsama kriteri 10^{-4} olarak alınmıştır. Sliding Grid (Sliding Mesh) teknolojisi ile pervanelerin 3600 rpm hızında döndüğü durumlar incelenmiştir. Hesaplamalar zamana bağlı (unsteady-transient) yapılmış, birim zaman adımı 0,0001 saniye alınmış, her bir adımda da 30 iterasyon gerçekleştirilmiş ve toplamda 50 000 adım gerçekleştirilmiştir. Bu hesaplamalar sırasında yaklaşık 864 ile 1800(püskürtme) CPU saat harcanmıştır. İki metre yüksekliğe yerleştirilen İHA'nın rotor altında 14 ölçüm noktası belirlenmiş, ölçülen hava akımı hem deneysel sonuçlar hem de HAD sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel ve simülasyon sonuçları arasındaki hata oranı %15'in altında kalmış ve model doğrulanmıştır. Bu çalışmada, püskürtme sistemleri için nozul konumları belirlenmiş ve optimize edilmiştir. Optimizasyon sonucunda, çok rotorlu İHA'nın püskürtme sisteminin performansında 1 metrede %16,27, 2 metrede %23,25 ve 3 metrede %18, 24 oranında iyileştirmeler sağlanmıştır.

Nugroho G., Hutagaol Y. D. ve Zuliardiansyah G. tarafından 2022 yılında yapılan "Aerodynamic Performance Analysis of VTOL Arm Configurations of a VTOL Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation" başlıklı makalede [37], VTOL (Vertical Take-Off and Landing: Dikey Kalkış ve İniş) sabit kanatlı İHA'ların farklı kol ve kanat yapılandırmalarının aerodinamik performansı CFD ile analiz edilmiştir. Quadplane, Twintail boom, Tandem wing ve Transverse arm tasarımları, kaldırma-sürüklenme katsayıları, stall koşulları, uçuş stabilitesi ve enerji verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Modeller Autodesk Inventor Professional 2022 ile oluşturulmuş ve analizlerde SST $k\omega$ türbülans modeli kullanılmıştır. Çeşitli rüzgâr ve uçuş koşulları altında yan kayma (sideslip angle) (0° , 15° , 30°), hücum (0° - 24°) ve yatış (bank angle) (0° - 40°) açıları incelenmiştir. Çalışmada, Twintail boom'un düşük hız ve düşük hücum açılarında en iyi performansı gösterdiği; Tandem wing'in ise yüksek hücum açılarında daha verimli olduğu belirtilmiştir. Quadplane en düşük sürüklenme katsayısına sahipken, Transverse arm tasarımının stabilite sağladığı tespit edilmiştir. Bu farklı yapılandırmaların, görev ihtiyaçlarına göre VTOL İHA'ların performansını optimize edebileceği belirtilmiştir.

Dong, S. J., Gui, Q. H. ve diğerleri tarafından 2023 yılında yayınlanan "CFD-Based Pesticide Selection for a Nozzle Used in a Six-Rotor UAV in Hover Mode for Tea Spraying" başlıklı makalede [38], çay tarımında kullanılan altı rotorlu İHA'nın hover

modundaki püskürtme performansı ve aşağı yönlü akış yapısı HAD kullanılarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Makalede, İHA modelinin ZZ20-6X (Jining, Çin) olduğu belirtilmiştir. Bu İHA'nın rotor çapı 558 mm, boş ağırlığı 18 kg, maksimum ağırlığı 40 kg, uçuş süresi 10-15 dakika ve uçuş hızı en fazla 10 m/s olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, pervaneler 300 rad/s (2885 rpm) hızında döndürülmüş ve İHA, 2 metre sabit yükseklikte konumlandırılmıştır. Çözüm ağı üç farklı yoğunlukta (10,14 milyon, 12,39 milyon ve 45 milyon grid) oluşturulmuş olup, yapılan analizlerde 10,14 milyon grid'in yeterli olduğu bulunmuştur. Ancak daha yüksek doğruluk elde etmek için 12,39 milyon grid kullanılmış ve bu durumda hesaplama süresinin 170 saat sürdüğü belirtilmiştir. Ek olarak, 45 milyon grid için hesaplama süresinin 431 saat sürdüğü vurgulanmıştır. Simülasyonlar ANSYS Fluent 14.0 yazılımı ile yapılmış ve SST türbülans modeli kullanılmıştır. Türbülans yoğunluğu %5, hidrolik çapı 10 mm, CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) sayısı 0,5 ve yakınsama kriteri 10^{-4} olarak alınmıştır. Nozul simülasyonlarında makalenin tümünde implicit SIMPLE algoritması kullanıldığı ifade edilmiştir. Basınç tabanlı (coupled), coupled çözücü ile first-order upwind scheme (momentum, süreklilik, kinetik enerji ve dağılma) kullanılmıştır. Makalede fixed-rotational domain kullanıldığı ifade edilmiştir; ancak MRF yönteminin kullanıldığına dair doğrudan bir bilgi yer almamaktadır. Bu bağlamda, zamandan bağımsız bir analiz yapıldığı ve MRF yönteminin kullanılabilirdiği düşünülebilir, fakat CFL sayısı ile zamana bağlı olduğu izlenimi verebilir. Çalışma, hover modundaki tarımsal İHA'nın püskürtme verimliliği için nozul performanslarını değerlendirmiştir. Deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalar, simülasyonların büyük ölçüde uyumlu olduğunu ve sapmaların %5'ten düşük olduğunu göstermiştir.

Nugroho G., Zuliardiansyah G. ve Rasyiddin A. A.'nın (2022) "Performance Analysis of Empennage Configurations on a Surveillance and Monitoring Mission of a VTOL-Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation" başlıklı makalesinde [39], Dikey Kalkış ve İniş (VTOLPlane) özellikli bir İHA'nın farklı kuyruk (empennage) tasarımlarının aerodinamik performansı, HAD simülasyonları ile analiz edilmiştir. Çalışmada, U şekilli bom, ters U şekilli bom (kuyruk kirişi), ters V kuyruk ve yarı ters V kuyruk gibi dört farklı tasarım değerlendirilmiştir. Kanat profili NACA 4412, kuyruk profili ise NACA 0006 olarak belirlenmiştir. Analizler ANSYS 20.1 yazılımı kullanılarak SST kω türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sırasında, 0° ile 21°

arasındaki hücum açıları ve 0° , 15° , 30° yan rüzgâr açıları altında kaldırma ve sürüklenme katsayıları ile stall açıları incelenmiştir. Ters U şekilli kuyruk, 18° ’lik yüksek durma açısı ile stabilite ve aerodinamik verimlilikte en iyi sonuçları sağlamış; bu yapı, manevra kabiliyeti ve uzunlamasına stabilite açısından da diğer tasarımlardan üstün performans göstermiştir.

Wen, G., Wu, D. ve diğerlerinin (2020) “Coupled CFD/MBD Method for a Tilt Tri-rotor UAV in Conversion of Flight Modes” başlıklı makalesinde [40], üç rotorlu tilt rotor İHA’nın (tilt tri-rotor UAV) uçuş modları arasındaki geçişler sırasında gövde ve kanat hareketlerinin neden olduğu aerodinamik etkileri modellemek için HAD ve MBD (Multi Body Dynamics: Çoklu Cisim Dinamiği) yöntemleri birleştirilmiştir. Çalışmada, ADAMS ve Fluent yazılımları entegre edilerek çift yönlü veri aktarımı sağlanmış ve rotorcraft İHA’nın geçişleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, 3,04 m uzunluğunda, 3,8 m genişliğinde, 0,57 m yüksekliğinde ve 21,5 kg ağırlığında olan tilt-rotor İHA kullanılmıştır. Rotor çapı 0,36 m olup, pervanelerin dönüş hızı 2100 rpm olarak belirlenmiştir. Mesh hareketlerini yönetmek ve dinamik süreçleri simüle etmek için Fluent UDF kullanılmış, mesh hareketleri ise ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) yöntemi ile birleştirilmiştir. HAD simülasyonları, ANSYS Fluent yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve MPI (Message Passing Interface) paralel hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Yüksek gerilim oranları ve eğilimli akışlar için uygun olması nedeniyle RNG (Renormalization Group) $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Hesaplamalarda, second-order upwind çözücüler ile PRESTO (Pressure Staggering Option) basınç interpolasyonu kullanılmış, SIMPLEC (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations Consistent) algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Zaman adımları, HAD için 0,001 s, MBD içinse 0,005 s olarak belirlenmiştir. MBD çözücüsünde Runge-Kutta dördüncü mertebe yöntemi uygulanmıştır. Ayrıca; real blade model uygulandığı da belirtilmiştir. Çalışmada çok katmanlı grid sistemi kullanılmış ve dört farklı katmandan oluşturulmuştur. Çözüm ağı içerisindeki veri aktarımı AMI (Arbitrary Mesh Interfaces) aracılığıyla sağlanmıştır. İHA yüzeyinde, ilk katman tabaka yüksekliği 0,15 mm ve büyüme oranı 1,2 olarak belirlenmiştir. Çalışma, tilt rotor İHA’nın uçuş modları arasında geçiş yaparken gövde ve kanat hareketlerinin neden olduğu aerodinamik etkileri analiz etmekte başarılı sonuçlar sunmuş ve bu tür simülasyonların uygulanabilirliğini

doğrulamıştır. CFD ve MBD entegrasyonunun, tilt-rotor İHA'larının aerodinamik analizinde verimli bir yöntem olduğu ortaya konmuştur.

Feng, H., Xu, P. ve diğerlerinin (2024) “Back Pressure Generated by Downwash and Crosswind on Spatial Atomization Characteristics During UAV Spraying: CFD Analysis and Verification” başlıklı makalesinde [41], tarımsal amaçlar için kullanılan dört rotorlu İHA'nın HAD analizleri farklı devir hızlarında çalışan pervaneler ile değişken yan rüzgâr hızlarında incelenmiş ve spreyleme performansı değerlendirilmiştir. Çalışmada, İHA 3 metre yükseklikte konumlandırılmış ve 250 mm çapında pervaneler kullanılmıştır. Yan rüzgâr hızları 0, 3 ve 6 m/s olarak alınmış ve pervanelerin devir sayıları 2000, 2500 ve 3000 rpm olarak seçilmiştir. Çözüm ağı boyutu dönen alan için 0,1 mm, statik alan için ise 20 mm olarak alınmış ve toplamda 4 516 352 grid noktası oluşturulmuştur. Simülasyonlarda ANSYS 19.2 yazılımı, SST k- ϵ türbülans modeli ve DPM kullanılmıştır. Basınç-tabanlı çözücü, zamana bağlı çözümler, SIMPLE algoritması ve second-order upwind çözümler kullanılmıştır. Analizlerde dinamik grid (dinamik mesh) ve Sliding Grid (Sliding Mesh) yöntemleri kullanılmıştır. Hava, ideal gaz olarak kabul edilmiş; yakınsama kriteri 10^{-6} olarak seçilmiştir. Birim zaman adımı 0,002 saniye olarak alınmış, her bir birim zaman adımında 20 iterasyon yapılmış ve toplamda 2 000 zaman adımıyla simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Çalışmada aşağıya doğru hava akımı (downwash) ve yan rüzgârın birleşik etkisi gösterilmiş. Ayrıca, HAD sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu ve spreyleme performansını değerlendirmede etkili bir yöntem olduğu ortaya konmuştur. Rotor hızının artmasıyla, yan rüzgârdan kaynaklı olumsuz etkilerin azaldığı ve püskürtme dağılımı daha düzenli hale geldiği görülmüştür.

Frant, M., Kachel, S. ve Maślanka, W. tarafından 2023 yılında yapılan “Gust Modeling with State-of-the-Art Computational Fluid Dynamics (CFD) Software and Its Influence on the Aerodynamic Characteristics of an Unmanned Aerial Vehicle” başlıklı makalede [42], sabit kanatlı Rybitwa İHA'nın anlık gelişen rüzgârlara (gust) karşı aerodinamik tepkisi hem deneysel hem de CFD simülasyonlarıyla incelenmiştir. ANSYS Fluent 16.2 yazılımında gerçekleştirilen analizlerde, Realizable k- ϵ türbülans modeli ve SIMPLE algoritması kullanılmıştır. 10 m/s hızındaki aşağı yönlü hava patlaması (downburst) ve 11,11 m/s hızındaki eğik rüzgâr etkileri incelenmiş; downburst başlangıçta kaldırma kuvvetini artırırken sonrasında dalgalanmalara neden olurken, eğik rüzgâr ise hücum ve negatif kayma açılarında değişimler meydana getirmiştir. Çalışmada, ani rüzgâr

etkilerinin İHA'nın performansı üzerindeki etkileri ortaya konmuş ve deneysel sonuçların CFD analizleriyle uyumlu olduğunu gösterilmiştir.

Wang, H., Sun, W. ve diğerleri tarafından 2022 yılında yapılan “Dynamic Modeling and Control for Tilt-Rotor UAV Based on 3D Flow Field Transient CFD” başlıklı makalede [43], Tilt-Rotor İHA'nın (TRUAV: Tilt-Rotor UAV) geçiş modundaki gövde ve rotor aerodinamik etkileşimlerini değerlendirmek amacıyla HAD simülasyonları yapılmıştır. Hem VTOL hem de sabit kanatlı olarak uçabilen İHA'nın geçiş modundaki aerodinamik etkiler incelenmiştir. İHA'nın kanat açıklığı 3 m, rotor çapı 0,26 m'dir.

Çalışmada, çözüm ağı bağımsızlık testleri yapılmış ve sonuçların değişmediği noktada yaklaşık 10^8 (100 milyon) düğüm içeren çözüm ağı kullanılmıştır. Çözüm ağının; genel ağ boyutunun en fazla 0,1 m, en az 0,002 m olduğu, büyüme oranının 1,2 ve eğim açısının 9° olduğu, sınır tabakanın ilk katman kalınlığının 0,002 m olduğu ifade edilmiştir. Hesaplama hacminin uzunluğu 14 m, genişliği 9 m, yüksekliği 6,8 m olarak belirtilmiştir. Simülasyonlar ANSYS Fluent yazılımında gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalarda, SST $k\omega$ türbülans modeli ve SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Tilt-Rotor İHA'nın geçiş modunda aerodinamik etkileri incelemek için zamandan bağımsız çözümler için MRF ve zamana bağlı çözümler için ise Moving Mesh yöntemi kullanılmıştır. Yakınsama kriteri 10^{-3} olarak belirlenmiş, zamandan bağımsız simülasyonlarda 10 000 iterasyon hedeflenmiş, bazı durumlarda 500 iterasyonun altında yakınsama sağlanmıştır. Çalışmada, Fluent yazılımının varsayılan Courant sayısının 50 olduğu ifade edilmiş ve Courant sayısı 15 alınıp birim zaman hesabı yapılmıştır. Ağ boyutunun en az 0,002 m, hızın 25 m/s ile 5 m/s arasında olduğu değerlerde, birim zaman aralığı 0,0012 ile 0,0060 saniye olarak hesaplanmıştır. Birim zaman adımı 0,001 saniye yeterli kabul edilmiş ve toplamda 2000 zaman adımı ile simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, y^+ değeri yaklaşık olarak 1 olarak belirlenmiştir. Simülasyonlarda pervane hızları 2400 rpm ile 4000 rpm arasında değiştirilmiş ve geçiş modunda farklı açılardaki (0° ile 90°) Tilt-Rotor İHA'nın aerodinamik analizleri gerçekleştirilmiştir.

Makalede [43], fiskiye etkisi (fountain effect), rotorların ürettiği aşağı yönlü akımların (downwash) kanatlara veya gövdeye çarpıp geri dönmesi sonucu oluşan aerodinamik düzensizlik olarak tanımlanmıştır. Rotorlar tarafından tekrar emilen bu ters hava akımının İHA'nın stabilitesini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, geçiş modunda

rotorların kuyruk girdabı (wake) ve rotorlardan gelen spiral iz akımının (spiral slipstream–sarmal sürüklenme) da İHA’nın stabilitesini etkilediği belirtilmiştir. Tilt-Rotor İHA’nın geçiş modunda stabilitesinin ayarlamalar ile korunabileceği gösterilmiştir.

Ahmet Talat İnan ve Berkay Çetin’in (2024) “CFD Analysis of Aerodynamic Characteristics in a Square-Shaped Swarm Formation of Four Quadcopter UAVs” adlı çalışmasında [10], dört adet döner kanat insansız hava aracının kare formasyonunda sürü olarak hareketi sırasında meydana gelen aerodinamik davranışlar Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile detaylı olarak incelenmiştir. İHA modeli olarak DJI Phantom 3 kullanılmıştır. İHA’ların pervane eksenleri arasında 75 cm mesafe ile yerleştirilen bu formasyonda aerodinamik incelemeler yapılmıştır. Yakın mesafede uçan İHA’ların aerodinamik etkilerini açıklamak için “Yakın İHA Fenomeni (Near-UAV Phenomenon)” olarak adlandırılan yeni bir olgu tanımlanmıştır. Simülasyonlar, ANSYS Fluent v19 yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve MRF (Moving Reference Frame) yöntemi ile Realizable k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Simülasyonlarda, 16 milyon element ve 23 milyon düğüm içeren yüksek çözünürlüklü bir ağ oluşturulmuş ve çözüm ağı kalitesini artırmak için proximity ve curvature yakalama etkinleştirilmiş; büyüme oranı 1,1 ve en fazla çarpıklık değeri 0,8 olarak alınmıştır. Hesaplamalarda her bir İHA’nın pervanelerinin yerel koordinatları tanımlanarak ± 10.000 RPM hızla döndürülmüş, basınç-hız bağlantılarında SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Bu çalışma, döner kanatlı İHA sürülerinin aerodinamik davranışlarının bu kadar detaylı bir şekilde incelendiği ilk araştırma olarak öne çıkmaktadır. Analizlerde, İHA’ların alt ve üst sıralardaki pozisyonlarına göre oluşan basınç ve hız dağılımlarının kapsamlı bir şekilde incelendiği, üst sıradaki İHA’ların yarattığı hava akımlarının alt sıradaki İHA’lar üzerinde belirgin bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, sürü formasyon düzenlemeleri yapılırken aerodinamik etkilerin optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Çalışma, gelecekteki İHA tasarımlarının ve sürü uçuş planlamalarının daha verimli ve güvenli hale getirilmesine yönelik katkılar sağlamıştır.

Wang, Q., Ren, Y. ve diğerleri tarafından 2024 yılında yayınlanan “Research on UAV Downwash Airflow and Wind-Induced Response Characteristics of Rapeseed Seedling Stage Based on Computational Fluid Dynamics Simulation” adlı çalışmada [44], tarımsal amaçlar için kullanılan çok rotorlu insansız hava araçlarının oluşturduğu aşağı yönlü hava akımının, kanola fideleri üzerindeki etkileri HAD yöntemleriyle incelenmiş ve deneysel

verilerle karşılaştırılmıştır. Çalışmada İHA modeli olarak dört rotorlu DJI Mavic Pro kullanılmıştır. Simülasyonlarda İHA'nın pervaneleri, saat yönünde ve ters yönde 550 rpm hızında döndürülmüştür. Ayrıca farklı yüksekliklerde; 1,6 m, 2 m ve 2,4 m asılı kalma (hover modu) durumunda hava akımları incelenmiştir. HAD simülasyonlarında ke türbülans modeli kullanılmıştır. Tek yönlü FSI yöntemi ile hava akımının kanola fideleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çözüm ağında, pervanelerin bulunduğu hareketli bölge için 1,2 mm boyutunda, toplamda 70 102 hücreden oluşan bir ağ kullanılmış, hareketsiz bölgeler için ise 600 321 hücre oluşturulmuştur. Çalışmada Sliding Mesh yöntemi doğrudan belirtilmiş, ancak makalede ifade edilmese de zamandan bağımsız çözümlerin gerçekleştirilmiş olması MRF yöntemi kullanıldığını düşündürmektedir. Ek olarak, makalede yazılım adı verilmemekle birlikte, kullanılan yaklaşımlar ve şekiller, ANSYS yazılımının kullanıldığını düşündürmektedir. Tarımsal uygulamalarda, insansız hava araçlarının oluşturduğu hava akımının fidelerin gelişim evreleri üzerindeki etkileri, farklı yüksekliklerde incelenmiştir. Yapılan analizlerde, İHA'nın aşağı yönlü hava akımının fidelerin yaprak hareketlerini ve yer değiştirme miktarlarını etkilediği ve en verimli mesafenin 2 metre yükseklik olduğu bulunmuştur. Ayrıca, deneysel veriler ile HAD sonuçları arasındaki hata payının %10.5 altında kaldığı gözlemlenmiştir.

Zhang, J., Chen, Q. ve diğerlerinin 2024 yılında gerçekleştirdiği “Experiments and CFD Simulation of Downwash Airflow and Fog Distribution Discharged from a Single-Rotor UAV Fitted with a Pulse-Jet Thermal Fogging Machine” başlıklı çalışmada [45], tarımsal amaçlarla kullanılan Z-3N model tek rotorlu İHA kullanılmış ve üzerine monte edilen sisleme makinesiyle sis dağılımı ve aşağı yönlü hava akımı (downwash airflow) incelenmiştir. İHA'nın aşağı yönlü hava akımı ve sis dağılımı, HAD ile incelenmiş ve sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. Simülasyonlarda İHA'nın performansı farklı yüksekliklerde ve çeşitli rüzgâr koşullarında (karşı rüzgâr: 1-3 m/s; yan rüzgâr: 1 m/s) değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan Z-3N İHA'nın teknik özellikleri; uzunluğu 272 cm, genişliği 80 cm, yüksekliği 127 cm, boş ağırlığı 55 kg, maksimum kalkış ağırlığı 105 kg, en fazla uçuş süresi 60 dakika, rotor hızı 830 rpm, uçuş hızı ise 1 ile 10 m/s olarak belirtilmiştir. İHA'nın akış modellemesi için 12 m x 12 m x 8 m boyutlarında bir dikdörtgen akış hacmi oluşturulmuş ve bu hacim, ANSYS Meshing kullanılarak çözüm ağlarına ayrılmıştır. Bağımsızlık testleri, 9.24 milyon, 15.36 milyon ve 38.41 milyon hücre içeren üç farklı çözüm ağı ile yapılmış, 15.36 milyon hücreli çözüm ağı yeterli

bulunarak simülasyonlar bu ağ ile gerçekleştirilmiştir. HAD simülasyonları, ANSYS 19.2 yazılımıyla yapılmış, RANS denklemleri çözülmüş, basınç-tabanlı çözücü, RNG k-ε türbülans modeli ve DPM modeli de kullanılmıştır. Basınç-hız bağlantısı için SIMPLE algoritması, basınçta second-order, momentum ve türbülans büyüklüklerinde second-order upwind çözücüler kullanılmış, yakınsama kriteri 1×10^{-4} olarak belirlenmiştir. Simülasyonlarda dinamik grid* (*!makalede hatalı olarak yazılmış) yöntemi kullanıldığı belirtilmiş sliding grid yöntemiyle uygulanmış, zamana bağlı olarak hesaplamalar yapılmış ve her birim zaman adımıda yaklaşık 30 iterasyon gerçekleştirilmiştir. İHA, modelde 5 metre yükseklikte konumlanmış, çalışma yüksekliklerinde (2 m, 3 m, 5 m) ve 830 rpm rotor hızıyla benzetilmiştir. Simülasyon sonuçlarıyla deneysel veriler karşılaştırıldığında, hata oranlarının hava akımlarında %15'e kadar, sis dağılımında ise %20-30 arasında olduğu gözlemlenmiştir. Karşı rüzgâr etkisi altında, tek rotorlu İHA'nın 2 metre yükseklikte uçuşu, gövdenin altındaki aşağı yönlü hava akımının hızını önemli ölçüde azaltmıştır. Karşı rüzgâr ile yapılan simülasyonlarda, rüzgâr hızının arttıkça akış kararlılığının bozulduğu, uçuş yüksekliği arttıkça rüzgârın olumsuz etkilerinin azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma, yan rüzgârların olumsuz etkilerinden kaçınılması gerektiğini vurgulanmıştır.

Kostić, I., Simonović, A. ve diğerlerinin (2024) "Lateral-Directional Aerodynamic Optimization of a Tandem Wing UAV Using CFD Analyses" başlıklı makalesinde [46, 47], tandem kanata sahip İHA'nın yanal (lateral) ve yönsel (directional) performansı, ANSYS Fluent yazılımında gerçekleştirilen HAD analizleriyle değerlendirilmiştir. SST k- ω türbülans modeli, FMG başlatıcı ve Courant sayısı optimizasyonu kullanılarak farklı kanat konfigürasyonlarının etkileri incelenmiş; ön kanada dihedral açı uygulanması ve ters kanatçıkların eklenmesiyle stabilitenin iyileştirildiği belirtilmiştir. 160-250 km/s hız aralıklarında ve 0-5000 metre irtifala koşullarında yapılan analizlerde, kaldırma/sürüklenme oranının artırıldığı ve genel performansın optimize edildiği sonucuna varılmıştır.

Vijayalakshmi, S., Sekar, A. V. ve ekibinin (2023) yaptığı "Multi-Perspective Structural Integrity-Based Computational Investigations on Airframe of Gyrodyne-Configured Multi-Rotor UAV Through Coupled CFD and FEA Approaches for Various Lightweight Sandwich Composites and Alloys" başlıklı çalışmada [48], Gyrodyne (cayrocin, jiroplan) yapılandırılmalı çok rotorlu bir İHA'nın HAD ve Sonlu Elemanlar Analizi (FEA)

yöntemleriyle yapısal dayanıklılığı araştırılmıştır. Simülasyonlarda tek yönlü FSI yöntemi kullanılmış; HAD analizlerinden elde edilen basınç veriler yapısal analizlere aktarılmıştır. ANSYS Fluent 17.2 HAD yazılımında k- ϵ türbülans modeli ve enhanced duvar fonksiyonu kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Taşıma kapasitesi 25 kg olan İHA'nın serbest akış hızı 25 m/s olarak belirlenmiştir. Çeşitli malzemelerin yapısal dayanıklılığını optimize etmiş ve elde edilen FSI sonuçları, deneysel verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Çalışma, karbon dokuma malzemelerin yüksek dayanıklılığı ve hafifliği nedeniyle en uygun seçeneklerden biri olduğu belirlenmiştir.

Ganesan, T. ve Jayarajan, N tarafından 2023 yılında yayınlanan “Aerodynamic Analysis of Mathematically Modelled Propeller for Small UAV Using CFD in Different Temperature Conditions” başlıklı çalışmada [49], insansız hava araçları için matematiksel olarak modellenen pervanelerin farklı sıcaklık koşullarındaki aerodinamik performansları, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleriyle incelenmiştir. Eppler E63 airfoil kullanılarak tasarlanan pervanenin aerodinamik değerlendirmesi, APC Slow Flyer ve NACA 4412 pervaneleri ile yapılmıştır. Bu pervanelerin 10 inç çapında olduğu belirtilmiştir. HAD simülasyonları, ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak standart k- ω türbülans modeli ile gerçekleştirilmiştir. Çözüm ağı bağımsızlık testleri yapılmış ve simülasyonlarda 2,5 milyonun üzerinde elemandan oluşan tetrahedral yapıdaki çözüm ağları kullanılmıştır. Pervaneler; 4000, 6000 ve 6500 rpm hızlarında çalıştırılmış, basınç-hız bağlantısı için SIMPLE algoritması, gradyan hesaplamalarında Least squares cell based ve momentum için second-order upwind çözücüler kullanılmıştır. Simülasyonlarda, birim zaman adımı 0,015 saniye olarak alınmış, her bir birim zaman adımında 40 iterasyon uygulanmış ve toplamda 100 zaman adımı kullanılmıştır. Bu da toplam simülasyon süresinin 1,5 saniye olduğunu ifade etmektedir. İzobarik testlerde, sıcaklığa bağlı olarak hava yoğunluğu; -34,5°C'de 1,4221 kg/m³ ve 42,5°C'de 1,0924 kg/m³ olarak verilmiştir. Aynı şekilde basınç da 989 hPa ile 974 hPa arasında farklılık gösterilmiştir. Ancak, HAD simülasyonlarında hava yoğunluğunun sabit olarak 1,225 kg/m³ alındığı da görülmüştür. Deneysel sonuçlar ile HAD simülasyonları arasında, %6.5 ile %7.7 arasında fark bulunmuştur. Ek olarak, BET (Blade Element Theory) yöntemi ile pervanelerin performansı değerlendirilmiş ve yüksek devirlerde hata oranının arttığı, genel olarak %10-15 aralığında olduğu tespit edilmiştir.

Farklı sıcaklık koşullarında yapılan testlerde, E63 pervanesinin diğer pervanelere kıyasla genel olarak daha yüksek verimlilik ve itme gücü gösterdiği belirlenmiştir.

Dbouk, T. ve Drikakis, D. tarafından (2021) yapılan “Quadcopter Drones Swarm Aeroacoustics” başlıklı makalede [50], altı adet DJI Mavic Air model dört-rotorlu çoklu İHA’nın sürü halinde uçuşu sırasında farklı formasyonlardaki aeroakustik ve aerodinamik etkiler incelenmiştir. Çalışmada, 6.73 cm çapında pervanesi olan ve 9 m/s hızla hareket eden İHA’ların V-şekli ve U-şekli (dikdörtgen) sürü formasyonları karşılaştırılmıştır. İHA’lar arası mesafe; V-şekli formasyonda 0,3 m (60 derece açı), U-şekli formasyonda 0,4 m olarak belirtilmiştir. Tek bir İHA için GCI (Grid Convergence Index) yöntemine göre üç farklı çözüm ağı üretilmiştir: kaba (574 813 hücre), orta (915 059) ve ince (1 369 395). Bağımsızlık testleri sonucunda orta çözüm ağı yeterli bulunmuş ve bu parametreler kullanılarak yaklaşık 6 milyon hücre içeren bir çözüm ağı oluşturulmuştur. Simülasyonlarda, hesaplama hacmi $1.5 \times 1.5 \times 1.5 \text{ m}^3$ olarak belirlenmiştir.

HAD simülasyonları OpenFOAM yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Üç boyutlu, sıkıştırılabilir akış simülasyonları, FVM yöntemi ile URANS denklemlerinin çözümü gerçekleştirilmiş ve SST k- ω türbülans modeli kullanılmıştır. Pervanelerin simülasyonlarında VBM (Virtual Blade Model; Sanal Kanat Modeli) kullanılmış, RSP (Rotor Shaft Plane) ve LRF (Local Rotor Frame) gösterilmiştir. Ayrıca, serbest akış uygulanmış ve hareketli yüzeylerden kaynaklanan gürültünün belirlenmesinde, aeroakustikte özel bir yöntem olan FWH (Ffowcs-Williams-Hawking) yöntemi kullanılmıştır. Zamandan bağımsız olarak yapıldığı anlaşılan hesaplamalar, 256 çekirdekli (2,25 GHz) AMD işlemciler ve 512 GB bellek ile yürütülmüş ve her bir analiz 3 gün sürmüştür. V-şekilli formasyon, U-şekilli formasyona göre daha az gürültü ve %36 oranında daha az sürükleme kuvveti üretmiştir. Çalışmada, V diziliminin aerodinamik avantajlar sağlayarak enerji tasarrufu sağladığı ve gürültü seviyesini önemli ölçüde azalttığı ortaya konmuştur. Bu nedenle, V-şekilli formasyonun, gürültü ve enerji tasarrufu açısından tercih edilebileceğini göstermiştir.

Kontogiannis, G. S. ve Ekaterinaris, A. J. tarafından 2013 yılında yayınlanan “Design, Performance Evaluation and Optimization of a UAV” başlıklı çalışmada , elektrikle çalışan ve sabit kanatlı bir İHA’nın aerodinamik tasarımı ile performans analizleri ele alınmıştır. 1,9 kg ağırlığındaki bu İHA, 6 kg’a kadar yük taşıyabilir. Özellikle gözetim ile

fotoğrafçılık görevleri için geliştirilmiştir. Simülasyonlarda E420, NACA 5412 ve NACA 0012 kanat profilleri kullanılmış, analizler için FLUENT ve SU yazılımları kullanılmıştır. Türbülans modeli olarak SST k- ω tercih edilmiştir. Çözüm ağı bağımsızlık testleri sonucunda, iki boyutlu analizlerde 68 bin hücre, üç boyutlu analizlerde ise 4,5 milyon hücre ile yeterli doğruluk sağlanmıştır. İHA'nın aerodinamik verimliliği artırılarak, özellikle kanat uçlarında %14,36 oranında L/D artışı elde edilmiştir. HAD sonuçlarının, klasik teoriler ve deneysel verilerle uyumlu olduğu belirtilmiştir.

Fengbo, Y., Xinyu, X. ve diğerlerinin 2017 yılında yayınladığı “Numerical Simulation and Experimental Verification on Downwash Air Flow of Six-Rotor Agricultural UAV in Hover” başlıklı çalışmada [52], altı rotorlu SLK-5 model tarımsal insansız hava aracının hover (havada asılı) durumunda oluşturduğu aşağı yönlü hava akımı hem sayısal hem de deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Simülasyonlarda 4 m çapında ve 4,1 m yüksekliğinde silindirik akış hacmi oluşturulmuştur. Çözüm ağı bağımsızlık testleri kapsamında, sırasıyla 3,2 milyon, 5,6 milyon ve 720 milyon hücreden oluşan üç farklı çözüm ağı kullanılarak simülasyonlar yapılmıştır. Bağımsızlık testleri sonucunda 5,6 milyon hücre içeren ağ yeterli bulunmuş ve simülasyonlar bu çözüm ağı ile gerçekleştirilmiştir. HAD simülasyonlarda, RANS denklemleri çözülmüş; RNG k- ϵ türbülans modeli, dinamik mesh teknolojisi, FVM yöntemi ve coupling algoritması (double precision ile) kullanılmıştır. İHA'nın her bir rotorunun dönüş hızı 288 rad/s olarak belirlenmiştir. Simülasyonların zamana bağlı olarak çözüldüğü anlaşılmakta olup, aşağı yönlü hava akışının tam gelişimini 2,3722 saniyede tamamladığı görülmüştür. İHA, 3,55 metre yükseklikte asılı halde konumlandırılmış ve bu yükseklikten itibaren 1 ve 2 metre aşağıdaki mesafelerde, aşağı yönlü hava akışı deneysel ve sayısal olarak ölçülüp kıyaslanmıştır. Aşağı yönlü hava akışı en fazla 10 m/s olarak hesaplanmış, simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki hata oranı %12'den az bulunmuştur. Ayrıca, aşağı yönlü akışlarda rotorlar arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan kanat etkileşim fenomeni (wing interference phenomenon) gözlemlenmiş ve belirli bölgelerde hava akışının daralmasıyla büzülme karakteristiği (shrinkage characteristic) gözlemlenmiştir. Çalışmada, HAD sonuçlarının deneysel verilerle uyumlu olduğu görülmüş, İHA'nın aerodinamik performansı değerlendirilmiş ve aşağı yönlü hava akışının zeminle olan etkileşimleri detaylandırılmıştır.

Panagiotou, P., Kaparos, P., ve diğerlerinin (2016) “Aerodynamic Design of a MALE UAV” başlıklı çalışmada [53], Orta İrtifa Uzun Menzilli (MALE) bir İHA’nın aerodinamik tasarımı ve optimizasyonu, ANSYS CFX 15 yazılımıyla yapılan HAD simülasyonlarıyla değerlendirilmiştir. Şekil 1.2’de gösterilen Yunanistan’ın coğrafi özellikleri göz önüne alınarak, sivil görevler için geliştirilen Hellenic Civil İHA’nın tasarımında kanat profili, en-boy oranı ve kuyruk konfigürasyonları optimize edilmiştir. Dış akış analizlerinde SpalartAllmaras türbülans modeli ve Coupled algoritması kullanılmış; 7 milyon düğüm içeren çözüm ağları oluşturulmuştur. İHA’nın uçuş süresi ve aerodinamik verimliliği optimize edilmiş, toplam uçuş süresinde %30, kanatçık tasarımında ise %10 ek artış sağlanmıştır.



Şekil 1.2. Hellenic Sivil İHA'nın Görev Bölgeleri

Shin H.S., Antoniadis A.F. ve Tsourdos A. tarafından yapılan (2019) “Parametric Study on Formation Flying Effectiveness for a Blended-Wing UAV” başlıklı makalede [54, 55], ses hızına yakın (transonik) hızlarda uçan bütünleşik gövde kanat (BWB) İHA’ların formasyon uçuşlarındaki aerodinamik performansları CFD kullanılarak incelenmiştir. Çalışmada, lider-takip, elmas, yarım elmas, V ve kademeli (echelon) gibi farklı formasyon türleri değerlendirilmiş ve İHA sayısı 2 ile 10 arasında değiştirilmiştir. BAE Systems tarafından tasarlanan, 10 metre kanat açıklığına sahip BWB Corax/Raven modeli üzerinde yapılan analizlerde, formasyon uçuşlarının aerodinamik verimliliği artırabileceği gösterilmiştir. HAD analizleri için Cranfield Üniversitesi’nde geliştirilen özel bir çözücü kullanılmış, RANS denklemleri ve Spalart-Allmaras türbülans modeli uygulanmıştır. Ayrıca, ayrıklaşma için MUSCL-TVD (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws – Total Variation Diminishing) yöntemi ile zaman için

se Implicit LU-SGS (Lower-Upper Symmetric Gauss-Seidel) yöntemi uygulanmıştır. Simülasyonlar 0,7 Mach hızında gerçekleştirilmiş olup, sıkıştırılabilirlik etkisi de göz önünde bulundurulmuştur. İki boyutlu analizlerde, bir kanat açıklığı mesafesindeki sürüklenme %13,78 azalırken, bu mesafe üç kanat açıklığına çıktığında %26,45'e kadar düşmüştür. Dokuz İHA'nın elmas tipi formasyonunda sürüklenme %65'e kadar azalırken, en yüksek aerodinamik verimlilik bu formasyonda elde edilmiştir.

Hwang, J. Y., Jung, M. K. ve Kwon, J. O. tarafından 2015 yılında yapılan "Numerical Study of Aerodynamic Performance of a Multirotor Unmanned Aerial Vehicle Configuration" başlıklı çalışmada [56], dört rotorlu İHA'ların aerodinamik performansı hem hover hem de ileri uçuş durumlarında incelenmiştir. Bu uçuş koşullarında rotorlar arasındaki karşılıklı aerodinamik etkileşimler HAD simülasyonlarıyla araştırılmıştır. Rotorlar arasındaki aerodinamik etkileşimlerin İHA'nın kararlılığına ve kontrol algoritmalarına olan etkileri vurgulanmıştır. Çalışmada kullanılan İHA modelinde, toplam ağırlığın 8,5 N, rotorlar arasındaki mesafenin 0.48 m, pervane modelinin EPP1045 (çapı 10 inç, adımı 4,5 inç) olduğu ve her bir rotorun 300 rad/s hızında döndürüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca, İHA pervanelerinin elmas ve kare formasyonlarında dizildiği ve bu formasyonların aerodinamik etkilerinin de analiz edildiği ifade edilmiştir.

HAD simülasyonlarında, üç boyutlu sıkıştırılamaz RANS denklemleri yapay sıkıştırılabilirlik (artificial compressibility) yöntemi ile çözülmüş; Spalart-Allmaras türbülans modeli ve overset-mesh yöntemi kullanılmıştır. Çözüm ağları, yapısal olmayan (unstructured) ağlarla oluşturulmuş; rotorlar ve gövde çevresindeki akışların daha iyi hesaplanabilmesi için detaylandırılmıştır. Her bir rotor için 1,09 milyon düğüm (vertex) içeren dört alt blok ve İHA'nın gövdesi ve çevresini kapsayan ana blok için 1,68 milyon düğüm içeren bir ağ oluşturulmuştur. Toplamda 6,05 milyon düğüm ve 20,7 milyon hücre içeren çözüm ağı kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan HAD yazılımı, geleneksel yöntemlerden farklı olarak özel yöntemler ve algoritmalar ile donatılmıştır. Viskoz olmayan terimler için Roe's flux-difference splitting yöntemi ve viskoz terimler için modified central difference yöntemi kullanılmıştır. Zaman integrasyonu için linearized second-order Euler backward differencing algoritmasına dayanan implicit time-integration algoritması uygulanmıştır. Zamanla değişen (unsteady) hesaplamalar, implicit time-integration algoritmasıyla gerçekleştirilmiş ve her bir zaman adımında Gauss-Seidel yöntemi ile iterasyonlar yapılmıştır. Zamana bağlı hesaplamalar için dual-time-stepping

yöntemi uygulanmıştır. Riemann invariant kullanılarak karakteristik sınır koşulları uygulanmıştır. Ayrıca, paralel hesaplamalarda çözüm alanında yük dengeleme MeTiS kütüphaneleri kullanılmış, alt parçalar arasında veri transferi MPI (Message-Passing Interface) ile sağlanmıştır. Asılı duran İHA’da, rotorlar arası etkileşimlerin görece az olduğu ve itme kuvvetinde hafif dalgalanmalar olduğu görülmüştür. İleri uçuş durumunda ise, arka rotorların ön rotorların oluşturduğu akıştan etkilenecek itme kuvvetini azalttığı ve İHA’nın dengesini etkileyerek momentlerinde dengesizliklere yol açtığı bulunmuştur. Sonuç olarak, ileri uçuşta İHA performansını optimize etmek ve kontrol sistemlerini geliştirmek için rotorlar arası etkileşimlerin detaylı değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Qiao, N., Ma, T. ve diğerlerinin 2024 yılında gerçekleştirdikleri “An Approach for Formation Design and Flight Performance Prediction Based on Aerodynamic Formation Unit: Energy-Saving Considerations” başlıklı çalışmada [57], katlanabilir tandem kanatlı İHA’ların sürü formasyon uçuşları sırasında aerodinamik performansı ve enerji verimliliği incelenmiştir. Aerodinamik formasyon birimi kavramı çerçevesinde yapılan analizlerde, Vortex Lattice Method (VLM) ve RANS yöntemleri kullanılmış; SST $k\omega$ türbülans modeli uygulanmış ve at nalı şeklinde girdap (horseshoe vortex) oluşmuştur. MRF yöntemiyle yapılan incelemelerde, 3200 rpm hızında dönen pervanenin 33,3 N itki ürettiği tespit edilmiştir. Uzay haritalama (space mapping) yöntemi ile düşük çözünürlüklü ağdan elde edilen HAD sonuçları, yüksek çözünürlüklü ağ sonuçlarına yaklaştırılarak optimize edilmiş ve hesaplama süresi kısaltılmıştır. Kanat ucu girdaplarının, İHA’ların kaldırma/sürüklenme oranında %19’a varan iyileşmeler sağladığı; ikili formasyon uçuşlarında bu oranın %22,8, üçlü formasyonlarda ise %57,5’e ulaştığı belirtilmiştir. Çalışmada, formasyon uçuşlarının aerodinamik verimliliği artırdığı ortaya konmuştur.

Zhang, H., Qi, L. ve çalışma arkadaşlarının 2020 yılında yayınlamış olduğu “Numerical Simulation of Airflow Field from a Six-Rotor Plant Protection Drone Using Lattice Boltzmann Method” başlıklı makalede [58], tarımsal uygulamalarda kullanılan altı rotorlu (hexacopter) İHA’nın aerodinamik performansı LBM (Lattice Boltzmann Yöntemi) ile incelenmiştir. İHA’nın hem uçuş hem de püskürtme verimliliği, 1-5 m/s hız aralığında ve 1,5-3,5 metre arasında değişen yüksekliklerde gerçekleştirilen 11 simülasyon ile değerlendirilmiştir. Yere yakın uçuşlarda İHA’nın ürettiği hava akış

alanının dağılımı ve bu dağılımın püskürtme verimliliği üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada, rotorlar arası mesafesi 80 cm, pervane çapı 38,1 cm ve pervane adımı 13,97 cm olan İHA kullanılmıştır. Pervaneler saat yönünde ve saat yönünün tersine dönecek şekilde yerleştirilmiştir. Simülasyonlar, XFlow 2017x yazılımında, LES türbülans modeli, LBM ve WALE (Wall-Adapting Local Eddy Viscosity) modeli kullanılarak yapılmıştır. Simülasyonlarda periyodik sınır koşulları ve gelişmiş duvar koşulları tanımlanmış; bu sayede hava akışının daha doğru bir şekilde modellenmesi sağlanmıştır. Simülasyonlarda özel bir algoritma, Dynamic Wake Refinement algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma sayesinde çözüm ağı, türbülanslı izlerin (wake) daha doğru modellenmesi amacıyla dinamik olarak güncellenmiştir. Çözüm ağlarında, LBM D3Q27 kafes yapısı kullanılmış, uzak alan (far field) olarak tanımlanan bölgelerinde hücre boyutu 20 cm, rotorların çevresinde ise daha hassas çözünürlük sağlamak için hücre boyutu 0,625 cm olarak ayarlanmıştır. Wake iyileştirme 1,25 cm boyutunda ve $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ değerinde uygulanmıştır. Çözüm ağı, kullanılan algoritma sayesinde hesaplama süresi boyunca dinamik olarak güncellenmiş; başlangıçta 271 274 elemandan oluşurken çözüm ağı zamanla 16 885 151 elemana kadar genişletilmiştir ($t=2,5\text{s}$). Sonuçların detaylı görselleştirilmesi için Origin (OriginLab) yazılımı kullanılarak üç boyutlu renk haritaları oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçlarında, yerden 3 metre yükseklikte sabit duran İHA'nın, $t=1,5$ saniyede, aşağı yönlü akışın yere temas ettiği bölgede yüzeye yayılarak vorteks halkası oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu halkanın dışa doğru dağılması $t=2,5$ saniyede durmuş, sabit bir vorteks halkasına dönüştüğü tespit edilmiştir. Aynı yükseklikten, farklı hızlarda (1-5 m/s) hareket eden İHA'nın arkasında oluşan izler incelenmiş; 2 m/s hızda ters-V biçiminde simetrik ayrılma, 3 m/s hızda at nalı biçiminde (horseshoe vortices) türbülans oluşumu, 4 m/s ve üzeri hızlarda ise bu yapının daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. İHA'nın 1.5 metre irtifadaki yere yakın uçuşlarında geniş hava akış alanları ve yüksek hızlarda oluşan vorteks yapıları gözlemlenmiş; en homojen hava akışının 3 metre yükseklik ve 3 m/s hız ile elde edildiği belirtilmiştir. Ayrıca, etkileşimlerin fazla olması nedeniyle 1,5 metre irtifa ve 4-5 m/s hızlarda yapılan uçuşlardan kaçınılması gerektiği ifade edilmiştir. Çalışmada, simülasyon sonuçlarının deneysel verilerle %95'e oranında uyum gösterdiği ve simülasyonların doğruluğunu desteklediği vurgulanmıştır.

Wang, L., Xu, M ve diğerlerinin (2021) “Numerical Verification on Influence of Multi-Feature Parameters to the Downwash Airflow Field and Operation Effect of a Six-Rotor Agricultural UAV in Flight” başlıklı çalışmasında [59], tarımsal amaçlar için kullanılan altı rotorlu DJI M600 model İHA’nın uçuş esnasında oluşturduğu aşağı yönlü hava akımının simülasyonları LBM kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlarda, farklı uçuş parametrelerinin İHA üzerindeki etkileri incelenmiştir. İHA’nın farklı uçuş hızı (1-4 m/s arası), uçuş yüksekliği (1,5-3 m arası), yan rüzgâr hızı (0-5 m/s) ve yükü (1-5 L) gibi parametrelerin İHA’nın performansına olan etkisi araştırılarak, uygun uçuş parametreleri tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan DJI M600 model İHA’nın rotor yerleşim açısının 60 derece, rotor açıklığının 113 cm olduğu ve taşıma kapasitesinin 5 litre olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bu İHA’nın maruz kalabileceği en fazla yan rüzgâr hızının 8 m/s olduğu ifade edilmiştir. Tam ölçekli model üzerinde yapılan çalışmada, 32x12x5 m³’lük bir hesaplama hacmi kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuştur. Bu çözüm ağı, rotorların çevresinde 2,5 cm, gövde ve kolların çevresinde 10 cm, genel hesaplama alanında ise 20 cm olacak şekilde ayarlanmış ve D3Q27 lattice modeli kullanılmıştır. Ayrıca, simülasyonlarda zaman adımı 0,001 saniye olarak verilmiştir. Simülasyonlarda XFlow yazılımı ve sonuçların istatistiksel analizinde ise IBM SPSS Statistics 25 yazılımı kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçları, farklı uçuş hızlarında ve yüksekliklerinde aşağı yönlü hava akımının eğim açısında ve yayılımında değişiklikler olduğunu göstermiştir. En uygun uçuş hızının 4 m/s ve yüksekliğin ise 2-2,5 m arasında olduğu tespit edilmiştir. Yan rüzgâr hızının artması, hava akışının simetrisini bozmuş ve 3 m/s’yi aşan hızlarda verimlilikte düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Wen, S., Han, J. ve diğerlerinin (2019) “Numerical Analysis and Validation of Spray Distributions Disturbed by Quad-Rotor Drone Wake at Different Flight Speeds” başlıklı makalesinde [60], dört rotorlu, tarımsal amaçlar için kullanılan M234-AT model İHA’nın farklı yüksekliklerde ve uçuş hızlarında oluşturduğu aşağı yönlü akımı ile bu akımın püskürtme verimliliği üzerindeki etkisi HAD yöntemiyle araştırılmıştır. İHA’nın farklı hız ve yüksekliklerdeki performansı analiz edilerek rüzgâr tüneli testleri ile karşılaştırılmıştır. Çin yapımı M234-AT model dört rotorlu İHA’nın kullanıldığı çalışmada, İHA’nın ağırlığının 12,1 kg ve tank kapasitesinin 10 litre olduğu belirtilmiştir. Karbon fiberden yapılan pervaneler, saat yönünde ve saat yönünün tersinde dönecek şekilde yerleştirilmiş olup, pervanelerin çapı 766 mm, eğim açısı ise 8° olarak verilmiştir.

HAD simülasyonları XFlow yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, LBM, DPM ve LES türbülans modeli uygulanmıştır. Çalışmada, hesaplama süresi ve işlem verimliliğini arttırmak amacıyla Navier-Stokes denklemleri yerine LBM yöntemi tercih edilmiştir. Üç boyutlu D3Q27 lattice yapısı kullanılmıştır. Simülasyonlarda, dinamik olarak güncellenen ve $35 \times 8 \times 4 \text{ m}^3$ boyutlarında çözüm ağı kullanılmıştır. Bu ağda, genel çözünürlük 0,2 m; İHA gövdesi etrafında 0,05 m; pervaneler etrafında ise 0,025 m olarak ayarlanmıştır. Ayrıca, aşağı yönlü akışın hassas kısımlarında çözünürlük 0,00125 m ve wake iyileştirme eşiği $1 \times 10^{-5} \text{ m}$ olarak tanımlanmıştır. Dinamik olarak güncellenen bu ağ, girdapların doğru bir şekilde modellenebilmesi için hassas bir çözünürlük sağlamıştır. İHA'nın 1 ile 7 m/s arası hızlar ve 1 ile 2 metre yüksekliklerdeki performansı değerlendirilmiştir. Simülasyon sonuçlarında, İHA'nın 5 m/s ve üzeri hızlarda at nalı şeklindeki girdapların oluştuğu gözlemlenmiş ve bu sonuçların rüzgâr tüneli testleri ile büyük ölçüde uyumlu olduğu tespit edilmiştir. İHA'nın uçuş hızı 6 m/s olduğunda, damlacık sürüklenme oranının 4 m/s'ye göre %17,2; 2 m/s'ye göre %27,2 oranında arttığı bulunmuştur.

Literatürdeki çalışmalarda kullanılan yöntemler ve elde edilen sonuçlar, Ek 2'de yer alan literatür tablosunda detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu tablo, ilgili çalışmaların kapsamalarını, yöntemlerini ve sonuçlarını özetleyerek, araştırmanın literatürdeki yerini açıkça ortaya koymaktadır.

2. SAYISAL YÖNTEMLER

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri, akış problemlerinin çözümünü matematiksel algoritmalar aracılığıyla yapılmaktadır. Temel akışkanlar mekaniği denklemlerinin uygulanması ile karmaşık geometriler hesaplanmaktadır. HAD yöntemlerinde kullanılan matematiksel algoritmalar, kütle korunumu, momentum, enerji ve türbülans denklemleri üzerine dayanmaktadır.

2.1. Temel Akışkan Denklemleri

2.1.1. Kütle Korunumu Denklemi

Kütle korunumu ya da süreklilik denklemi genel olarak şu şekilde ifade edilmektedir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.1)$$

Bu denklem, sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz akışlar için kütle korunumu denkleminin olarak tanımlanmaktadır. Burada S_m , kaynak terimi olarak tanımlanmaktadır. Kaynak terimi, iki fazlı akışlarda bir fazdan (dağılmış faz) diğer faza (sürekli faz) aktarılan kütle miktarını ifade etmektedir. Sıvı-gaz karışımlarında dağılmış faz durumunda olan sıvının buharlaşıp, sürekli faza durumdaki gaz fazına kütle transferini belirtmektedir [61, 62].

İki boyutta eksenel simetriye sahip (silindir) geometriler için kütle korunumu denklemi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v_x) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v_r) + \frac{\rho v_r}{r} = S_m \quad (2.2)$$

Burada, eksen boyunca olan koordinat x , radyal koordinat r , eksen boyunca olan hızı v_x , radyal hız bileşenini ise v_r olarak ifade edilmektedir.

2.1.2. Momentum Korunumu Denklemleri

Sabit hızla hareket eden veya tamamen durağan olan, ivmesiz (eylemsiz) bir referans çerçevesine göre momentumun korunumu denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.3)$$

Momentum korunum denkleminde, statik basınç p , gerilme tensörü $\bar{\tau}$, yoğunluk ρ , yer çekimi ivmesi $\vec{g}$ ve harici kuvvetleri $\vec{F}$ ile tanımlanmaktadır. Harici kuvvetler, modele bağlı olarak eklenen veya kullanıcı tarafından tanımlanan kaynak terimlerini de içermektedir [61, 62].

Momentum denkleminde bulunan gerilme tensörü aşağıda belirtilmektedir.

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2.4)$$

Gerilme tensöründe moleküler viskozite μ , birim tensörü I ile ifade edilmektedir. Bu ifade de sağ taraf da bulunan terim hacimsel deformasyonunu (dilasyon) belirtmektedir. Hacimsel genişleme veya daralma, hız vektörünün diverjansı $(\nabla \cdot \vec{v})$ pozitif ise genişleme, negatif ise daralma olduğunu, sıfır olduğunda ise sıkıştırılmaz akış olduğunu belirtmektedir.

İki boyutta eksenel simetriye sahip geometriler için, momentum korunumu denklemleri (eksenel ve radyal) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_x) = \\ - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right] + F_x \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x}(r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r v_r) = \\ - \frac{\partial \rho}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[r \mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \mu \left(2 \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \vec{v}) \right) \right] \\ - 2\mu \frac{v_r}{r^2} - \frac{2\mu}{3r} (\nabla \cdot \vec{v}) + \rho \frac{v_z^2}{r} + F_r \end{aligned} \quad (2.6)$$

Buradaki terimlerde v_z dönme-girdap (swirl) hızıdır

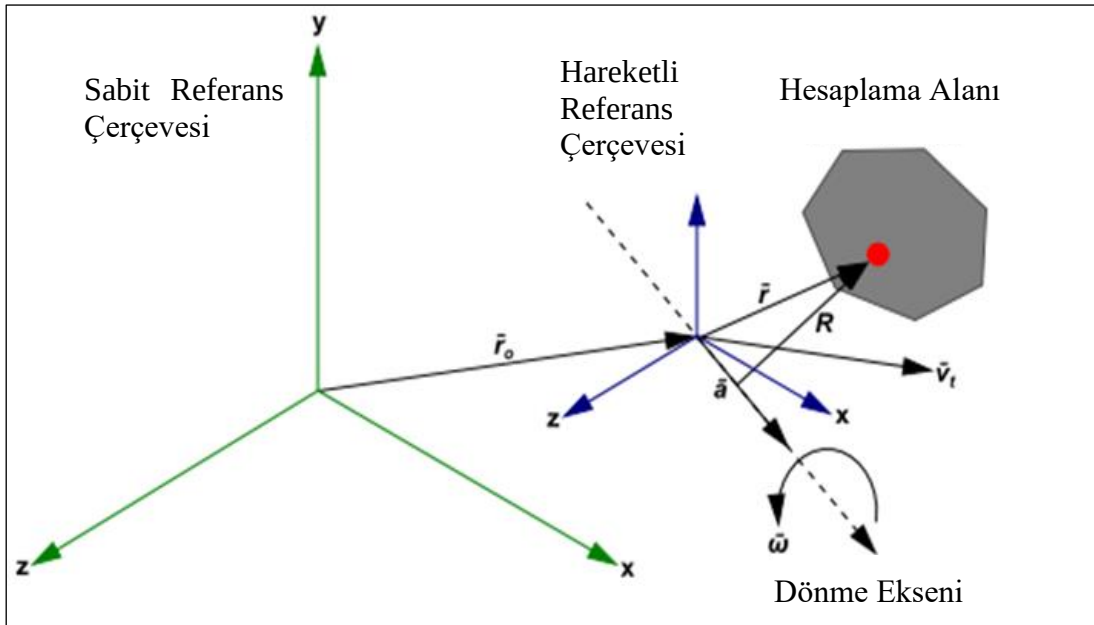
$$\nabla \cdot \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} \quad (2.7)$$

2.2. Hareketli Çerçevelerdeki Akışlar

ANSYS Fluent yazılımı yönetici denklemler çözerken arka planında bulunan varsayılan ayarlarında çözümleri sabit (veya eylemsiz) referans sistemlerine göre gerçekleştirmektedir. Bu çalışmada, döner cisimlerin modellenmesinde hareketli koordinat sistemleri kullanılmıştır.

2.2.1. Hareketli Referans Çerçevesi için Denklemler

Hareketli referans çerçevesi analizlerinde, sabit ve hareket edebilen koordinat sistemleri kullanılmaktadır.



Şekil 2.1. Sabit ve Hareketli Koordinat Sistemleri

Şekil 2.1’de sabit ve hareketli koordinat sistemleri gösterilmiştir. Şekil 2.1’de sabit koordinat sistemine göre $\vec{v}_t$ doğrusal hızı ve $\vec{\omega}$ açısal hızı ile hareket eden hareketli koordinat sistemi verilmiştir. Hareketli ve sabit koordinat sistemlerinin merkez noktaları arasındaki mesafe $\vec{r}_0$ konum vektörü tanımlanmış ve hareketli koordinat sisteminin dönme eksenini birim vektör $\hat{a}$ ile ifade edilmiştir. Hesaplamalar hareketli koordinat sistemleri üzerinden yapılmıştır. Hesaplama bölgesinden herhangi bir noktanın hareketli koordinat sistemine olan uzaklığı $\vec{r}$ konum vektörü ile tanımlanmıştır [61, 62].

Akışkan hızları, sabit koordinat sisteminden hareketli koordinat sistemine dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm, hareketli koordinat sistemine göre akışın doğru şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi için aşağıdaki bağıntılar vasıtasıyla yapılmaktadır.

$$\vec{v}_r = \vec{v} - \vec{u}_r \quad (2.8)$$

$$\vec{u}_r = \vec{v}_t + \vec{\omega} \times \vec{r} \quad (2.9)$$

Bu bağıntılarda; bağıl hız $\vec{v}_r$, mutlak hız $\vec{v}$, hareketli koordinat sisteminin hızı $\vec{u}_r$, hareketli sistemin öteleme hızı $\vec{v}_t$, hareketli sistemin açısal hızı $\vec{\omega}$ olarak tanımlanmaktadır. Ek olarak hareketli koordinat sisteminin hem öteleme hızı hem de açısal hızı zamanla değişen büyüklükler olabileceği, yani zamanın bir fonksiyonu da olmaktadır. Bu bağıntılar doğrultusunda, sabit koordinat sistemine göre hareket denklemleri şu şekilde yazılmaktadır.

Kütle korunumu denklemi;

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{v}_r = 0 \quad (2.10)$$

Momentumun korunumu denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \vec{v} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r \vec{v}) + \rho [\vec{\omega} \times (\vec{v} - \vec{v}_t)] = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + \vec{F} \quad (2.11)$$

Enerjinin korunumu denklemi;

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho E + \nabla \cdot (\rho \vec{v}_r H + \rho \vec{u}_r) = \nabla \cdot (k \nabla T + \vec{\tau} \cdot \vec{v}) + S_h \quad (2.12)$$

Denklemlerde merkezci ivme ile koriolus ivmesi $([\vec{\omega} \times (\vec{v} - \vec{v}_t)])$ olarak birleştirilmiştir.

2.3. Türbülans Modelleri

Akışkanlar dinamiği analizlerinde türbülanslı akışların doğru ve etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi için ANSYS Fluent yazılımında çeşitli türbülans modelleri bulunmaktadır. Bu modelleme seçenekleri, türbülansın temel özelliklerini, geçiş süreçlerini ve akış alanında ortaya çıkan anizotropik etkileri kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Fluent yazılımında yer alan türbülans modelleri, çözüm hassasiyetlerine veya hesaplama maliyetlerine göre farklılık göstermektedir. Yazılımda yer alan türbülans seçeneklerin bazıları aşağıda sunulmuştur [61, 62].

RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) Modelleri:

- Spalart-Allmaras Modeli: Düşük hesaplama maliyetiyle aerodinamik uygulamalarda ve ince sınır tabakası akışlarında kullanılır ve tek denklemlilikli basit bir yapıya sahiptir [61, 62].
- k-ε Modelleri:
 - Standard k-ε Modeli: Türbülans enerjisi ve dağılımı denklemleri üzerinden çalışan klasik bir modeldir. Geniş bir uygulama alanı bulunmaktadır.
 - RNG k-ε Modeli: Standart k-ε modelinin daha hassas bir versiyonudur. Küçük ölçekli girdapları daha iyi modellemek için geliştirilmiştir.
 - Realizable k-ε Modeli: Karmaşık akışlarda gerçekçi sonuçlar vermekte ve fiziksel olarak daha anlamlı veriler sunan k-ε modelidir [61, 62].
- k-ω Modelleri:
 - Standard k-ω Modeli: Düşük Reynolds sayılı akışlarda ve sınır tabakası ayrılımlarında etkili bir modeldir.
 - BSL (Baseline) k-ω Modeli: Geçiş bölgelerinde dengeli bir performans sunmaktadır. k-ω ve k-ε modellerinin birleşmesiyle oluşturulan modeldir.
 - SST (Shear Stress Transport) k-ω Modeli: Sınır tabakası ayrılımlarını doğru şekilde modellemek için tercih edilmektedir. Hem k-ε hem de k-ω modellerinin avantajlarını birleştiren bir modeldir [61-64].

2.3.1. Standart k-ε Türbülans Modeli

Standart k-ε Türbülans Modeli, türbülansın uzunluk ve zaman ölçeklerini belirlemek amacıyla iki ayrı taşıma denklemini çözmektedir. Bu model, türbülans kinetik enerjisi k ve dağılım oranı ε denklemlerinin çözümüne dayanmaktadır [61, 62].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.13)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) \\ & - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.14)$$

Türbülans kinetik enerjisi k ve dağılım oranı ε sırasıyla denklem (2.14) ve denklem (2.13) da gösterilmektedir. Bu denklemlerde G_k , G_b ve Y_M sırasıyla; ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi üretimini, kaldırma kuvveti nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjisi üretimini, sıkıştırılabilir türbülans dalgalanan genişlemenin toplam dağılım oranına katkısını ifade etmektedir. Ayrıca bu denklemlerde; $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ sabitleri; S_k ve S_ε kullanıcıdan gelen kaynak terimleri; σ_k , k için türbülanslı Prandtl sayısını, σ_ε , ε için türbülanslı Prandtl sayısını belirtmektedir. Türbülans (Eddy) viskozitesi denklem (2.15)'de gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.15)$$

Ek olarak; Standart k-ε Türbülans Modelinde $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$ ve $\sigma_\varepsilon = 1,3$ sabit değerlerindedir.

2.3.2. Realizable k-ε Türbülans Modeli

Realizable k-ε Türbülans Modeli, Standart k-ε Türbülans Modelinden göre formülasyonda değişiklik göstermektedir. Realizable k-ε modeli, türbülanslı viskoziteyi hesaplamak için alternatif bir formülasyon içermektedir. Ayrıca, dağılım oranı ε için kullanılan taşıma denklemi, ortalama kare girdap dalgalanmalarının taşınımını açıklayan tam bir denkleme dayanarak yeniden oluşturulmuştur [61, 62].

Realizable k-ε Türbülans Modelinde kullanılan taşıma denklemleri:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \\ & + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, \quad S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (2.18)$$

Bu denklemlerde G_k ve G_b sırasıyla, ortalama hız gradyanlarına bağlı olarak türbülans kinetik enerjisi üretimini ve kaldırma kuvveti nedeniyle oluşan türbülans kinetik enerjisi üretimini belirtmektedir. Sıkıştırılabilir türbülansla dalgalanan genişlemenin, toplam dağılım oranına katkısını Y_M ile vurgulanmaktadır. Ayrıca bu denklemlerde; $C_{1\varepsilon}$ ve C_2 sabitleri; S_k ve S_ε kaynak terimleri belirtmektedir. Türbülanslı Prandtl sayısı σ_k için k ve σ_ε için ε ile gösterilmektedir.

Türbülans (Eddy) viskozitesinin (μ_t) hesaplanması;

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.19)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.20)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (2.21)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk}\omega_k \quad (2.22)$$

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk}\omega_k$$

Açısal hızı ω_k ile dönel hareketli referans sistemine göre tensörün ortalama dönme hızı $\overline{\Omega_{ij}}$ ile belirtilmektedir.

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \varphi \quad (2.23)$$

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad (2.24)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

Burada, C_μ 'nin; ortalama gerilme ve dönme oranları, açısal hız ve türbülans değerleri ile ilişkili olduğu görülmektedir. Bu model sabitleri $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_2 = 1,9$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,2$ olarak verilmektedir.

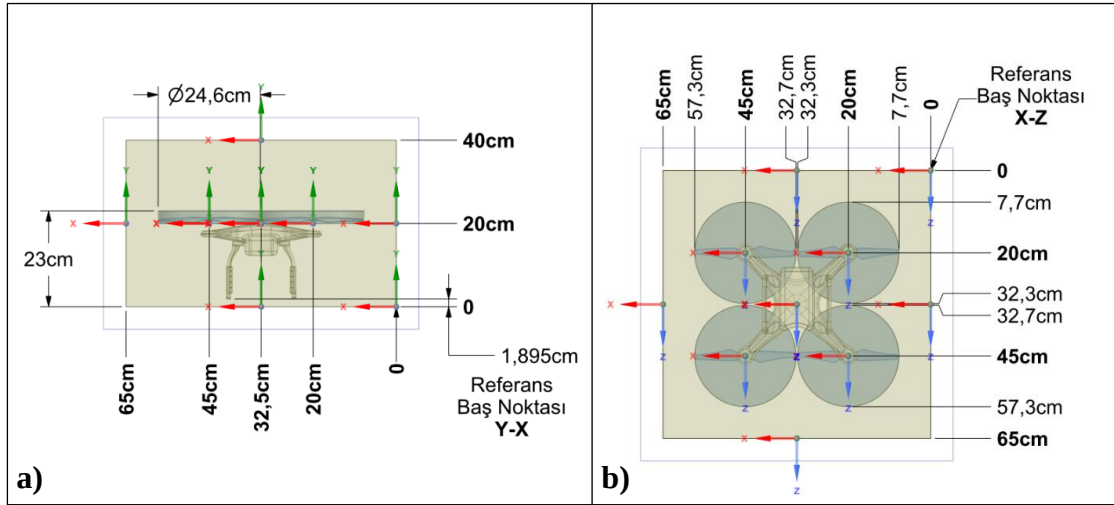
Hareketli çözüm ağı ve çoklu referans sistemlerinde $-2\varepsilon_{ijk}\omega_k$ terimi uyumsuzdur, Fluent varsayılan olarak bu terimi dahil etmemektedir [61, 62].

3. SAYISAL MODELLEME

3.1. İHA Paketin Oluşturulması

HAD çalışmaları, ANSYS yazılım grupları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HAD geometrisinin oluşturulmasında üç boyutlu modelleme yazılımlarından SpaceClaim ve Design Modeler kullanılmaktadır [65].

Dört rotorlu döner kanatlı İHA geometrisinin oluşturulmasında ANSYS-SpaceClaim üç boyutlu tasarım yazılımı kullanılmış ve İHA gövdesi ile dört adet pervanenin bulunduğu katı-geometrilere üzerinde gerekli yerlerde sadeleştirmeler yapılmıştır. Dönel cisim simülasyonlarının (benzetimlerinin) yapılabilmesi için her bir pervaneyi kapsayan dört adet silindir oluşturulmuştur. İHA gövdesi ve dört adet silindir, bir hacim içeresine alınmıştır. Modelin hacim içeresinde bulunduğu bu yapıya paket (nesne) denilmektedir. Şekil 3.1’de paket içeresine alınan bir adet insansız hava aracı modeli, Y-X ve X-Z eksenlerinden gösterilmiştir.



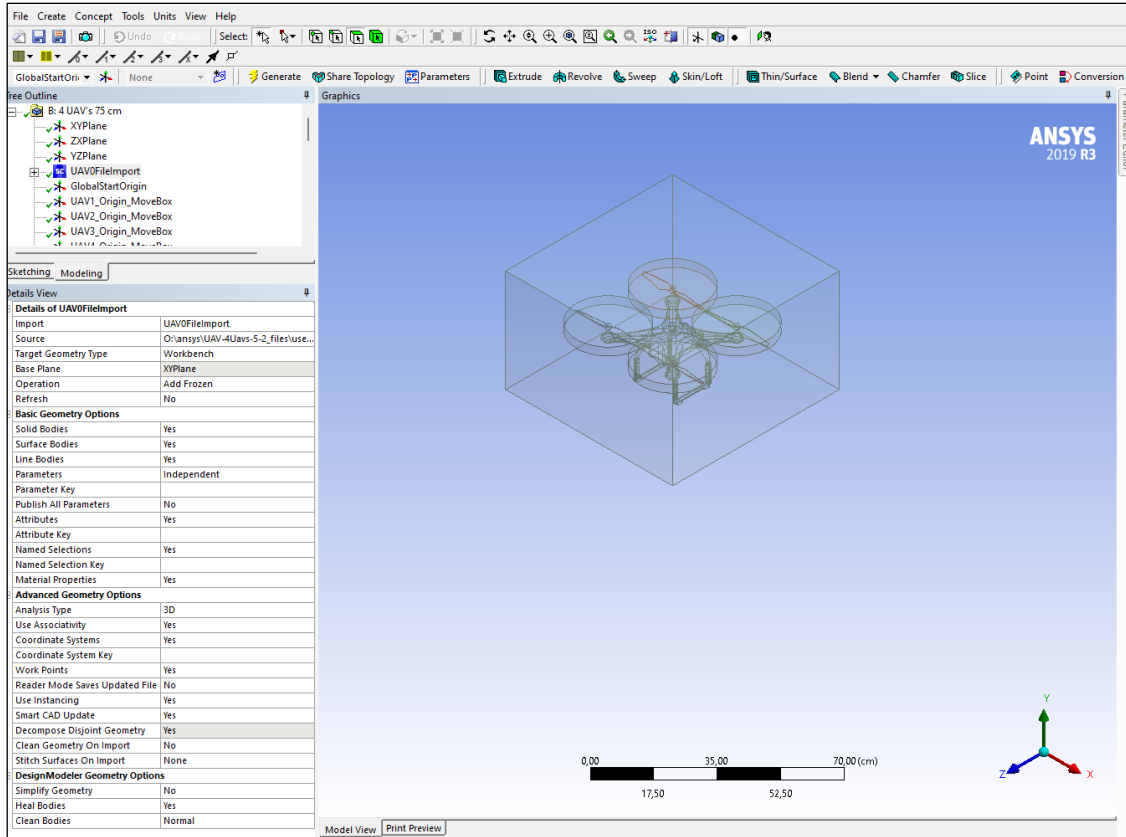
Şekil 3.1. Paket İçerisindeki Dört Rotorlu İnsansız Hava Aracı

İHA paketi içerisinde orijinler oluşturulmuş ve bu orijinlerden biri, referans noktası olarak seçilmiştir. Sürü konumlandırmaları ve pervanelerin konumları bu referans noktasına göre bağli olarak belirlenmiştir. Referans orijinin, global koordinatlar değeri SpaceClaim yazılımında düzenlenmiştir. Şekil 3.1-a’da referans orijin noktasına göre X-Y eksenlerinden uzaklıkları ve Şekil 3.1-b’de ise orijin noktasına göre X-Z eksenlerinden uzaklıkları, yerel koordinatları gösterilmiştir.

İHA sayısına ve sürü dizilimlerine göre denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerde, Dış-Akış bölgesinin parametreye bağlı olarak oluşturulmasında, SpaceClaim yazılımının verimli olmadığı görülmüştür. Bu durumda, yazılan kodlar yetersiz kalmıştır. SpaceClaim yazılımında, dış-akış hacmi içerisinde bulunan paketler parametrik olarak yeniden konumlandırılırken boşluklar oluşmuştur. Bu boşluklar parametrik olarak paketlerle birlikte taşınmadığından tasarım yazılımı değiştirilmiştir. Sürü yapısını oluşturmak için İHA geometrisinin bulunduğu paket, üç boyutlu tasarım programı Design Modeler'e aktarılmış ve sürü içerisinde belirlenen miktardaki İHA'ların dizilimleri yapılmıştır. Dörtgen dizlime uygun olması nedeniyle 4 adet İHA kullanılmıştır.

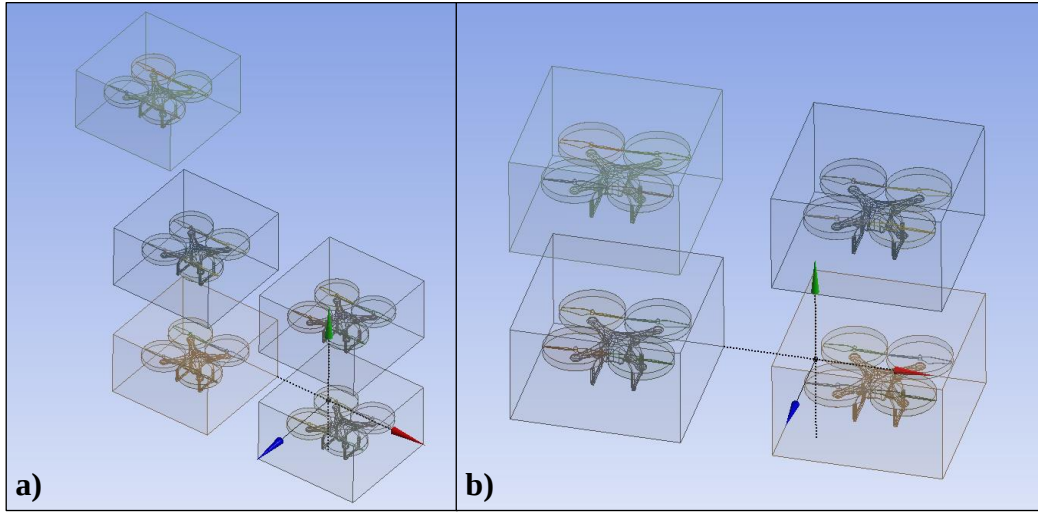
3.2. İHA Sürüsünün Oluşturulması

ANSYS-Design Modeler üç boyutlu tasarım yazılımı, sürü geometrisinin oluşturulmasında kullanılmıştır. SpaceClaim yazılımında düzenlenen İHA paketi bu yazılımın içersine aktarılmıştır. Şekil 3.2'de SpaceClaim yazılımından aktarılan İHA paketi gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Design Modeler Yazılımına Aktarılan İHA Paketi

Dört adet İHA paketini farklı noktalara yerleştirmek için dört adet yerel koordinat düzlemi oluşturulmuştur. Yerel koordinat eksenlerinin başlangıç noktalarının değişkenleri (x, y, z) harici parametrelere bağlanmıştır. İHA paketinin aktarılmasıyla SpaceClaim yazılımında oluşturulan yerel koordinatlar, Design Modeler yazılımına geçmiştir. Şekil 3.1’de gösterilen referans baş noktasını kullanarak İHA paketleri, oluşturulan bu yeni yerel koordinat düzlemlerine Şekil 3.3’te gösterildiği gibi kopyalanmıştır.

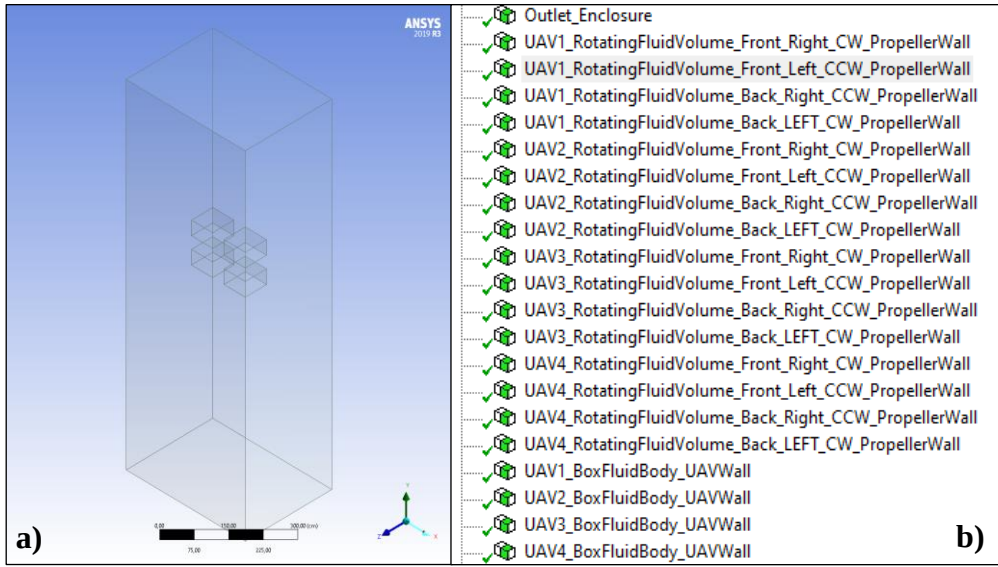


Şekil 3.3. İHA Paketleri; a) Kopyalanan Paketler b) İHA Dizilimi

Şekil 3.3-a’da aktarılan paket ve kopyalanan dört paket gösterilmiştir. Beş İHA paketinden, aktarılan ilk paket silinerek Şekil 3.3-b’de gösterilen sürü dizilimi yapılmış ve dizilim üzerine de dış-akış hacmi oluşturulmuştur. Dikdörtgen şeklindeki dış-akış hacminden 4 adet İHA paketi çıkartılmış ve fazlalık geometriler silinmiştir. Şekil 3.4-a’da, içerisinde 4 tane paket hacmi kadar boşluk olan, dış-akış hacmi gösterilmiştir. Böylelikle, İHA’ların parametrik olarak yeniden konumlandırmasında gerekli olan boşluklar, dış-akış hacim içerisinde kalmıştır. SpaceClaim yazılımında gerçekleştirilemeyen bu boşluklu yapı, Design Modeler yazılımının özelliği olan adım tabanlı yapı ile meydana getirilmiştir. Dış-akış hacminin değişkenleri, harici parametrelere aktarıldıktan sonra isimlendirme aşamasına geçilmiştir.

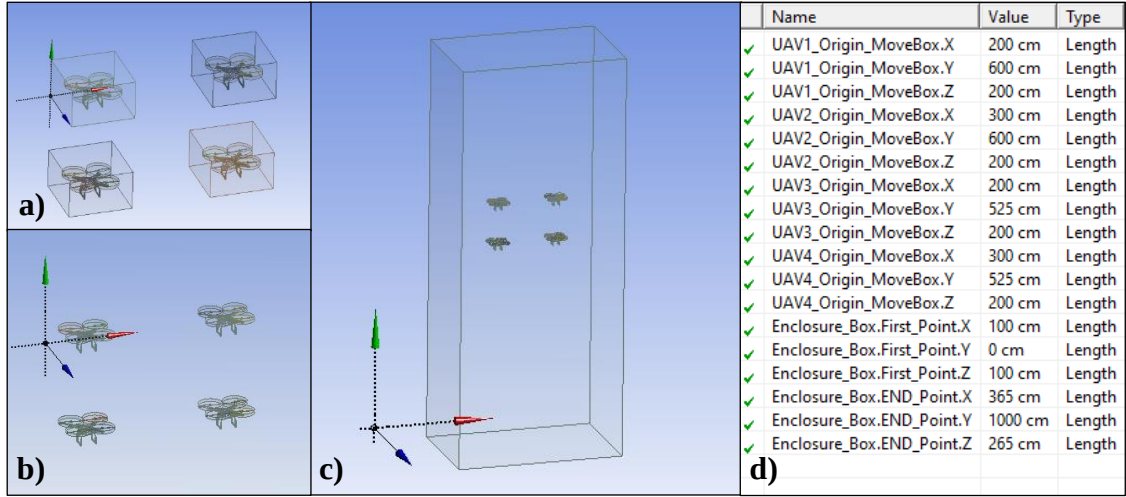
HAD geometrisinin tasarımında, her biri 4 dönen-akış bölgesine sahip 4 İHA paketi kullanılmış olup toplamda 16 tane dönen-akış bölgesi ve 1 adet dış-akış bölgesiyle beraber 17 akış-bölgesi tanımlanmıştır. Bu geometrik bölgeler tanımlandıktan sonra

HAD-geometrisi içerisinde bulunan önemli yüzeyler belirlenmiş ve pervaneler ile İHA gövdelerinin yüzeyleri ise özel olarak ayrı ayrı isimlendirilmiştir. Geometride bulunan 4 adet İHA gövdesinin yüzeyleri, dönen cisimlerin içerisinde yer alan 16 adet pervane yüzeyleri ve dış-akış hacminin dış-yüzeylerini temsil eden 1 adet outlet tanımlaması ile toplamda 21 bölge özel olarak isimlendirilmiştir. Şekil 3.4-b’de isimlendirilen bu yüzeyler gösterilmiştir. İsimlendirme aşamasından sonra İHA paketleri dış-akış hacmi ile birleştirilmiştir.



Şekil 3.4. Dış Akış Hacmi (a) ile İsimlendirmeler (b)

Şekil 3.5-a’da paketler ve yerel koordinat sistemi, b’de dış-akış hacmi ile birleştirilen İHA gövdeleri, c’de global koordinat sistemine göre HAD-geometrisi, d’de ise HAD-geometrisinde tanımlanan parametreler gösterilmiştir. Yapılan çalışmalarda, İHA’ların uçuş yüksekliğinin 3 metre ve üzerinde olduğu durumlarda, aşağı yönlü hava akımlarının neden olduğu yer etkisinin, İHA’nın güvenli uçuş performansı üzerinde olumsuz bir etkisi bulunmadığı belirtilmiştir [25]. Ayrıca, İHA pervaneleri tarafından üretilen hava akımlarının, İHA’nın iki metre yukarısına ve sekiz metre aşağısına kadar etkili olduğu ifade edilmiştir [34]. Bu doğrultuda, dış akış hacmi ölçüleri, yer etkisi senaryolarına gerek duyulmadan ayarlanmıştır.



Şekil 3.5. HAD Geometrisi ve Parametreleri

HAD-geometrisinde bulunan dış-akış hacminin yüksekliği 10 metre olarak tanımlanmış, genişlik ölçüleri ise her seferinde yüzeye en yakın pervanenin merkez ekseninden en az 100 cm uzaklığında olacak biçimde parametrik olarak ayarlanmıştır.

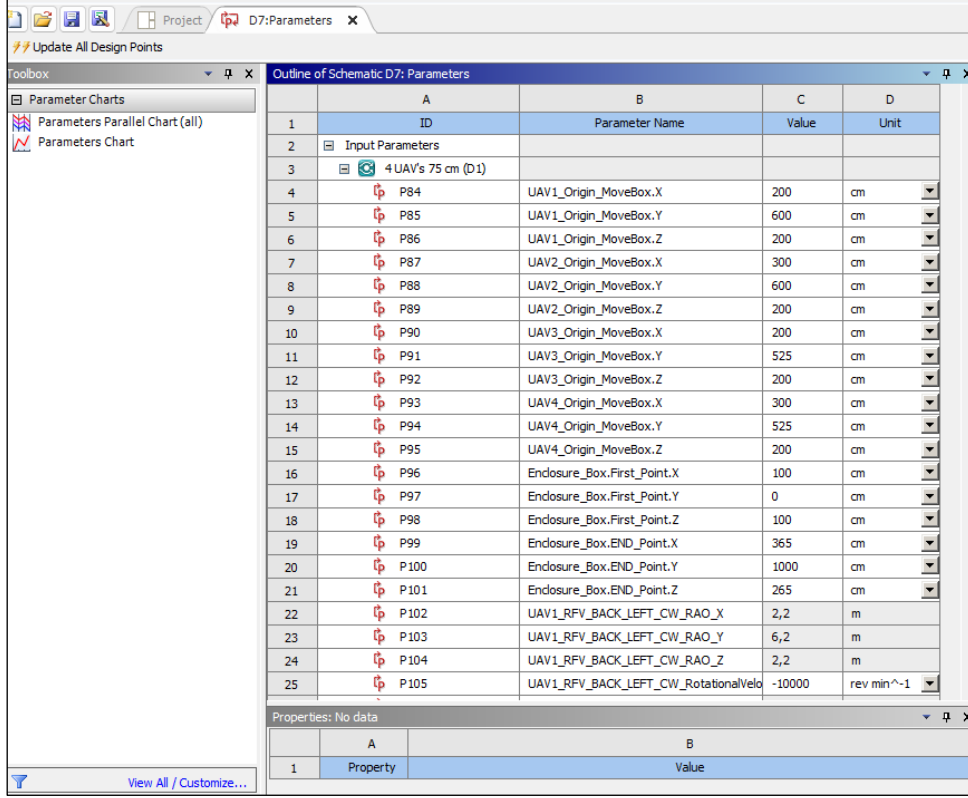
HAD geometrisinde kullanılan parametreler Şekil 3.5-d’de gösterilmiştir. İHA konumlandırmalarında 12 değişken ve dış-akış hacminde kullanılan 6 değişkenle birlikte. HAD-geometrisinde toplamda 18 parametre tanımlanmıştır. Şekil 3.5-d’de dış akış hacmi (Enclosure) parametresinde gösterilen ‘.First_Point.’, sabit koordinat sistemine göre başlangıç değerlerini, ‘.END_Point.’ ise uzunluklarını temsil etmektedir. Burada, sabit koordinat sistemi üzerinde dış akış hacmi; X: 100-510 cm; Y: 0-1000 cm; Z: 100-365 cm değerlerinde olup bu değerler dizilime göre değişmektedir.

3.3. Paketlerin Parametrik Konumlandırılması

Sürü İHA’ların konumlandırılması, parametrik yaklaşımla gerçekleştirilmiştir. Bu süreçte, ANSYS-Workbench yazılımının arayüzünde yer alan simülasyon şemalarındaki parametreler kullanılmıştır. Çalışmada farklı yaklaşma mesafeleri ele alınarak analizler gerçekleştirilmiş ve bu mesafelerin sürü dinamikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca, kullanılan parametreler, yazılıma özgü olarak dahili (içeriden erişilebilir) veya yazılımın dışında, Şekil 3.6’da gösterilen Workbench arayüzü üzerinden kullanılabilen harici (dışarıdan erişilebilir) parametreler şeklinde tanımlanmıştır.

Şekil 3.6’da ANSYS Workbench yazılımındaki “Parametreler” sekmesi gösterilmiştir. Bu sekmede, üç boyutlu modelleme aracı olan Design Modeler içerisinde kullanılan

HAD-geometrisinin yerel parametreleri, harici parametreler olarak tanımlanarak Workbench arayüzüne aktarılmıştır. Dışa aktarılan bu harici parametreler şekil üzerinde gösterilmiştir.



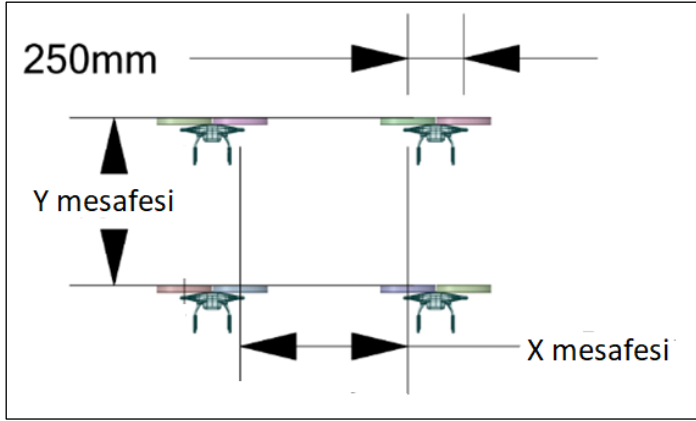
The screenshot shows the 'D7:Parameters' window in ANSYS Workbench. The 'Outline of Schematic D7: Parameters' table is visible, listing 25 parameters. The parameters are organized into two main sections: 'Input Parameters' (rows 4-25) and 'Output Parameters' (rows 1-3). The 'Input Parameters' section includes parameters for 4 UAVs (P84-P105) and an enclosure box (P96-P101). The 'Output Parameters' section includes parameters for the UAVs' movement (P102-P105) and the enclosure box's movement (P96-P101). The parameters are listed in a table with columns: ID, Parameter Name, Value, and Unit.

ID	Parameter Name	Value	Unit
1			
2			
3			
4	P84	200	cm
5	P85	600	cm
6	P86	200	cm
7	P87	300	cm
8	P88	600	cm
9	P89	200	cm
10	P90	200	cm
11	P91	525	cm
12	P92	200	cm
13	P93	300	cm
14	P94	525	cm
15	P95	200	cm
16	P96	100	cm
17	P97	0	cm
18	P98	100	cm
19	P99	365	cm
20	P100	1000	cm
21	P101	265	cm
22	P102	2,2	m
23	P103	6,2	m
24	P104	2,2	m
25	P105	-10000	rev min^-1

Şekil 3.6. Workbench Parametre Arayüzü

Şekil 3.7’de sürü İHA’ların dizilim şeması gösterilmiştir. Uzaklıklar adım adım artırılarak veya azaltılarak test edilmiştir. Çalışmada üç farklı dizilim kullanılmış olup, X ve Y mesafeleri her bir dizilim için farklı değerlerde belirlenmiştir:

- X ve Y mesafeleri 50 cm,
- X ve Y mesafeleri 75 cm,
- X mesafesi 120 cm, Y mesafesi ise 100 cm olarak tanımlanmıştır.



Şekil 3.7. Sürü İHA Dizilimi

Bu dizilimler, İHA'lar arasındaki etkileşimlerin farklı mesafe aralıklarına göre nasıl değiştiğini analiz etmek amacıyla seçilmiştir. Böylece, farklı dizilim mesafelerinin İHA'lar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

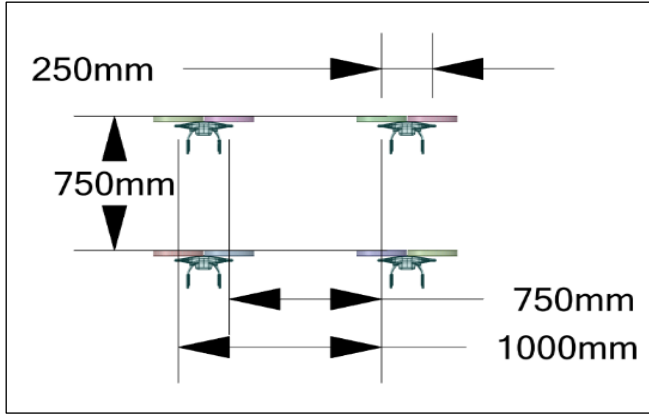
Tablo 3.1'de, referans noktasına göre dönen cisimlerin koordinat değişkenleri gösterilmiştir. Burada, “[1]” tanımlaması ilgili İHA'nın numarasını temsil ederken; R_x , R_y ve R_z değerleri, referans noktasının x, y ve z koordinat değişkenlerini ifade etmiştir. Her bir dönen cisim için, pervanelerin konumları referans noktasına göre bağlı olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.1. Dönen Cisimlerin Koordinat Değişkenleri

Değişkenler	X	Y	Z
Birim	cm	cm	cm
İHA [1] – Referans Noktası	R_x	R_y	R_z
İHA [1] Pervane Arka-Sol	$R_x + 20$	$R_y + 20$	$R_z + 20$
İHA [1] Pervane Arka-Sağ	$R_x + 45$	$R_y + 20$	$R_z + 20$
İHA [1] Pervane Ön-Sol	$R_x + 20$	$R_y + 20$	$R_z + 45$
İHA [1] Pervane Ön-Sağ	$R_x + 45$	$R_y + 20$	$R_z + 45$

3.3.1. HAD Geometrisi: Orta Dizilim

Şekil 3.8'de, İHA'ların konumlandırılması ve pervane eksenleri arasındaki mesafeler gösterilmiştir. Bu konumlandırmada, pervane eksenleri arasındaki mesafe 75 cm olan orta mesafeli dizilim belirlenmiştir. Referans noktası olarak, Şekil 3.1'de belirtilen referans baş noktası esas alınarak döner cisimlerin hesaplamaları için gerekli değişkenler yeniden düzenlenmiştir.



Şekil 3.8. İHA'ların Konumlandırılması

Tablo 3.2’de, İHA’ların paket referans noktalarına göre koordinat değişkenleri verilmiştir. Bu referans noktaları kullanılarak her paket içerisindeki dönen cisimlerin koordinat değişkenleri hesaplanmıştır. Dış akış hacminin uzunluğu, harici parametreler arasına dahil edilmiştir. Dış akış hacmi bitiş noktası, yalnızca burada gösterilmiş ve hesaplamalarda harici parametre olarak kullanılmamıştır.

Tablo 3.2. Orta Dizilimin Referans Noktasına Göre Geometrik Değişkenleri

Değişkenler	X	Y	Z
Birim	cm	cm	cm
İHA-1 – Referans Noktası (Üst-Sol)	200	600	200
İHA-2 – Referans Noktası (Üst-Sağ)	300	600	200
İHA-3 – Referans Noktası (Alt-Sol)	200	525	200
İHA-4 – Referans Noktası (Alt-Sağ)	300	525	200
Dış akış hacmi – Başlangıç noktası	100	0	100
Dış akış hacmi – Uzunluğu	365	1000	265
Dış akış hacmi – Bitiş noktası*	465	1000	365

Tablo 3.1’de belirtilen pervane değişkenleri ve Tablo 3.2’deki referans noktası koordinat bilgileri kullanılarak İHA’ların konumları hesaplanmıştır. Tablo 3.3’de ise hesaplanan konum değişkenleri verilmiştir.

Tablo 3.3’te, üst ve alt sıradaki pervaneler arasındaki yatay mesafenin 75 cm olduğu dizilime ait değişkenler verilmiştir. Bu düzenlemede, üst sırada İHA 1’in sağ tarafı ile İHA 2’nin sol tarafı yatayda bitişik olarak konumlandırılmıştır. Benzer şekilde, alt sırada İHA 3’ün sağ tarafı ile İHA 4’ün sol tarafı yatayda bitişik şekilde yerleştirilmiştir.

Tablo 3.3. Orta Dizilimin Referans Noktaları ve Dönen Akış Bölgeleri Koordinat Değişkenleri

Değişkenler	X	Y	Z
Birim	cm	cm	cm
İHA-1 – Referans Noktası	200	600	200
İHA-1 Pervane Arka-Sol	220	620	220
İHA-1 Pervane Arka-Sağ	245	620	220
İHA-1 Pervane Ön-Sol	220	620	245
İHA-1 Pervane Ön-Sağ – (Yatayda Bitişik 1)	245	620	245
İHA-2 – Referans Noktası	300	600	200
İHA-2 Pervane Arka-Sol – (Yatayda Bitişik 1)	320	620	220
İHA-2 Pervane Arka-Sağ	345	620	220
İHA-2 Pervane Ön-Sol	320	620	245
İHA-2 Pervane Ön-Sağ	345	620	245
İHA-3 – Referans Noktası	200	525	200
İHA-3 Pervane Arka-Sol	220	545	220
İHA-3 Pervane Arka-Sağ	245	545	220
İHA-3 Pervane Ön-Sol	220	545	245
İHA-3 Pervane Ön-Sağ – (Yatayda Bitişik 2)	245	545	245
İHA-4 – Referans Noktası	300	525	200
İHA-4 Pervane Arka-Sol – (Yatayda Bitişik 2)	320	545	220
İHA-4 Pervane Arka-Sağ	345	545	220
İHA-4 Pervane Ön-Sol	320	545	245
İHA-4 Pervane Ön-Sağ	345	545	245
Dış akış hacmi – Başlangıç noktası	100	0	100
Dış akış hacmi – Uzunluğu	365	1000	265

3.3.1. HAD Geometrisi: Dar Dizilim

Rotor eksenleri arasındaki uzaklığın 50 cm olduğu dar mesafeli dizilime ait referans noktaları ve dış hacim değerlerine ilişkin koordinat değişkenleri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4. Dar Dizilimin Referans Noktasına Göre Geometrik Değişkenleri

Değişkenler	X	Y	Z
Birim	cm	cm	cm
İHA-1 – Referans Noktası	200	600	200
İHA-2 – Referans Noktası	275	600	200
İHA-3 – Referans Noktası	200	550	200
İHA-3 – Referans Noktası	275	550	200
Dış akış hacmi – Başlangıç noktası	100	0	100
Dış akış hacmi – Uzunluğu	340	1000	265

İHA'ların koordinat değişkenleri, paket referans noktasına göre yeniden düzenlenmiştir. Tablo 3.5'te, referans noktalarına göre yatay uzaklığı 75 cm ve rotor eksenleri arasındaki uzaklığı 50 cm olan dizilime ait değerler verilmiştir.

Tablo 3.5, üst ve alt sıralardaki pervane eksenleri arasındaki yatay mesafenin 50 cm olan dar dizilime ait değişkenler verilmiştir. Bu yapılandırmada, üst sırada İHA 1'in sağ tarafı ile İHA 2'nin sol tarafı yatayda bitişik konumda yer alırken; alt sırada İHA 3'ün sağ tarafı ile İHA 4'ün sol tarafı yatayda bitişik olarak dizilmiştir.

Tablo 3.5. Dar Dizilimin Referans Noktaları ve Dönen Akış Bölgeleri Koordinat Değişkenleri

Değişkenler	X	Y	Z
Birim	cm	cm	cm
İHA-1 – Referans Noktası	200	600	200
İHA-1 Pervane Arka-Sol	220	620	220
İHA-1 Pervane Arka-Sağ	245	620	220
İHA-1 Pervane Ön-Sol	220	620	245
İHA-1 Pervane Ön-Sağ – (Yatayda Bitişik 1)	245	620	245
İHA-2 – Referans Noktası	275	600	200
İHA-2 Pervane Arka-Sol – (Yatay Bitişik 1)	295	620	220
İHA-2 Pervane Arka-Sağ	320	620	220
İHA-2 Pervane Ön-Sol	295	620	245
İHA-2 Pervane Ön-Sağ	320	620	245
İHA-3 – Referans Noktası	200	550	200
İHA-3 Pervane Arka-Sol	220	570	220
İHA-3 Pervane Arka-Sağ	245	570	220
İHA-3 Pervane Ön-Sol	220	570	245
İHA-3 Pervane Ön-Sağ – (Yatayda Bitişik 2)	245	545	245
İHA-4 – Referans Noktası	275	550	200
İHA-4 Pervane Arka-Sol – (Yatayda Bitişik 2)	295	570	220
İHA-4 Pervane Arka-Sağ	320	570	220
İHA-4 Pervane Ön-Sol	295	570	245
İHA-4 Pervane Ön-Sağ	320	570	245
Dış akış hacmi – Başlangıç noktası	100	0	100
Dış akış hacmi – Uzunluğu	340	1000	265

3.3.2. HAD Geometrisi: Geniş Dizilim

Tablo 3.6'da geniş mesafeli dizilim için İHA'ların koordinat değerleri verilmiştir. Bu dizilimde, rotorlar arasındaki X eksenini üzerindeki yatay uzaklık 120 cm, Y eksenini

üzerindeki dikey uzaklık ise 100 cm olarak belirlenmiştir. Geniş mesafeli dizilim, diğer dizilimlere kıyasla en uzak konumlandırma mesafesine sahiptir.

Tablo 3.6’da yatay eksenler arasındaki uzaklığın 120 cm ve dikey eksenler arasındaki uzaklığın 100 cm olarak tanımlandığı geniş dizilime ait koordinat değişkenleri verilmiştir. Bu dizilimde, üst sıradaki İHA 1’in sağ tarafı ile İHA 2’nin sol tarafı ve alt sıradaki İHA 3’ün sağ tarafı ile İHA 4’ün sol tarafı yatayda bitişik olup aralarında 120 cm mesafe bırakılarak konumlandırılmıştır. Ayrıca, İHA 1 ile İHA 3 ve İHA 2 ile İHA 4 arasında, rotor eksenlerinin başlangıç noktalarına göre uzaklığı 100 cm olarak belirlenmiştir. Referans noktalarına göre bu dizilimde yatay mesafe ise 145 cm olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.6. Geniş Dizilimin Referans Noktaları ve Dönen Akış Bölgeleri Koordinat Değişkenleri

Değişkenler	X	Y	Z
Birim	cm	cm	cm
İHA-1 – Referans Noktası	200	600	200
İHA-1 Pervane Arka-Sol	220	620	220
İHA-1 Pervane Arka-Sağ	245	620	220
İHA-1 Pervane Ön-Sol	220	620	245
İHA-1 Pervane Ön-Sağ – (Bitişik 1)	245	620	245
İHA-2 – Referans Noktası	345	600	200
İHA-2 Pervane Arka-Sol – (Bitişik 1)	365	620	220
İHA-2 Pervane Arka-Sağ	390	620	220
İHA-2 Pervane Ön-Sol	365	620	245
İHA-2 Pervane Ön-Sağ	390	620	245
İHA-3 – Referans Noktası	200	500	200
İHA-3 Pervane Arka-Sol	220	520	220
İHA-3 Pervane Arka-Sağ	245	520	220
İHA-3 Pervane Ön-Sol	220	520	245
İHA-3 Pervane Ön-Sağ – (Bitişik 2)	245	520	245
İHA-4 – Referans Noktası	345	500	200
İHA-4 Pervane Arka-Sol – (Bitişik 2)	365	520	220
İHA-4 Pervane Arka-Sağ	390	520	220
İHA-4 Pervane Ön-Sol	365	520	245
İHA-4 Pervane Ön-Sağ	390	520	245
Dış akış hacmi – Başlangıç noktası	100	0	100
Dış akış hacmi – Uzunluğu	410	1000	265

3.3.3. Workbench Parametre Kodlarının Oluşturulması

Simülasyonda kullanılan tüm parametreler harici parametre olarak tanımlanmıştır. ANSYS Workbench’de harici parametrelerin tanımlanması, ACT (Application Customization Toolkit) konsol ekranında kodlar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kullanılan ANSYS 19 R3 yazılımı, .NET (Network Enabled Technologies) Framework ile uyumlu IronPython 2.7.4 sürümünü (.NET 4.0.30319.42000) kullanmaktadır. Ayrıca, bu sürüm Python 2.7 dil özelliklerini desteklemektedir.

Şekil 3.9’da pervane eksenleri arasında 75 cm olan İHA diziliminde kullanılan parametreler gösterilmiştir. Harici parametrelere Workbench arayüzünden ulaşılmıştır. Dışarıdan erişilebilir olarak işaretlenen her parametreye, Workbench yazılımında ardışık numaralar verilmektedir. Parametreler, P1, P2, P3, P4... gibi bir dizilimle numaralandırılabilirdiği gibi, daha önce tanımlanmış parametre numaralarına da eklenerek devam etmektedir. Şekil 3.9’da gösterildiği üzere, önceki parametreler tanımlanmış olup, numaralandırmalar P84, P85, P86, P87... şeklinde başlamıştır.

3	 4 UAV's 75 cm (D1)			
4	 P84	UAV1_Origin_MoveBox.X	200	cm
5	 P85	UAV1_Origin_MoveBox.Y	600	cm
6	 P86	UAV1_Origin_MoveBox.Z	200	cm
7	 P87	UAV2_Origin_MoveBox.X	300	cm
8	 P88	UAV2_Origin_MoveBox.Y	600	cm
9	 P89	UAV2_Origin_MoveBox.Z	200	cm
10	 P90	UAV3_Origin_MoveBox.X	200	cm
11	 P91	UAV3_Origin_MoveBox.Y	525	cm
12	 P92	UAV3_Origin_MoveBox.Z	200	cm
13	 P93	UAV4_Origin_MoveBox.X	300	cm
14	 P94	UAV4_Origin_MoveBox.Y	525	cm
15	 P95	UAV4_Origin_MoveBox.Z	200	cm
16	 P96	Enclosure_Box.First_Point.X	100	cm
17	 P97	Enclosure_Box.First_Point.Y	0	cm
18	 P98	Enclosure_Box.First_Point.Z	100	cm
19	 P99	Enclosure_Box.END_Point.X	365	cm
20	 P100	Enclosure_Box.END_Point.Y	1000	cm
21	 P101	Enclosure_Box.END_Point.Z	265	cm
22	 P102	UAV1_RFV_BACK_LEFT_CW_RAO_X	2,2	m
23	 P103	UAV1_RFV_BACK_LEFT_CW_RAO_Y	6,2	m
24	 P104	UAV1_RFV_BACK_LEFT_CW_RAO_Z	2,2	m

Şekil 3.9. Geometri Tanımlama Parametreleri

Parametreler, belirli bir sıra ile oluşturulmuş ve dizesel bir yapıda saklanmıştır. Yeni tanımlamalar, mevcut diziye artan bir sıra ile eklenerek organize edilmiştir. Şekil 3.9’da

geometriden gelen harici parametrelerin numarası P84 ile başlamış ve P101 numarası ile bitmiştir. Tablo 3.7’de, bu parametre numaraları ve ilgili değişkenler verilmiştir.

Tablo 3.7. ANSYS Workbench Parametre Yapısı

g[i]	Değişkenler	P	X	P	Y	P	Z
	Birim	X	cm	Y	cm	Z	cm
g [1]	İHA-1 – Referans Noktası (Üst-Sol)	P84	200	P85	600	P86	200
g [2]	İHA-2 – Referans Noktası (Üst-Sağ)	P87	300	P88	600	P89	200
g [3]	İHA-3 – Referans Noktası (Alt-Sol)	P90	200	P91	525	P92	200
g [4]	İHA-4 – Referans Noktası (Alt-Sağ)	P93	300	P94	525	P95	200
g [5]	Dış akış hacmi – Başlangıç noktası	P96	100	P97	0	P98	100
g [6]	Dış akış hacmi – Uzunluğu	P99	365	P100	1000	P101	265

Tablo 3.7’de, geometrilerden gelen parametreler gösterilmiştir. İHA’ların referans noktaları ile dış akış hacminin başlangıç noktası ve uzunluğuna ait koordinat değerleri verilmiştir.

Geometrik yapıdaki bu parametreleri tanımlamak için G matrisi ve g vektörü kullanılmıştır.

$$[G] = \begin{bmatrix} \vec{g}_1 \\ \vec{g}_2 \\ \vec{g}_3 \\ \vec{g}_4 \\ \vec{g}_5 \\ \vec{g}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{84} & P_{85} & P_{86} \\ P_{87} & P_{88} & P_{89} \\ P_{90} & P_{91} & P_{92} \\ P_{93} & P_{94} & P_{95} \\ P_{96} & P_{97} & P_{98} \\ P_{99} & P_{100} & P_{101} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

G matrisinde, her bir satır geometrik bir yapıyı tanımlayıp, sütunlar ise sırasıyla X, Y ve Z koordinat değerlerini içermektedir. G matrisi içerisinde, P değişkeni 84 numarasıyla başlamıştır. Dizi, önceki değerlerinden bağımsız hale getirilmesiyle, aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir:

$$[G] = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^a G_{i,j} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^a P_{a(i-1)+j+b} \quad (3.2)$$

Burada, grup sayısı 6 olup n değeri ile ifade edilmiştir. Grup içerisinde bulunan $\vec{g}_1$ ’den $\vec{g}_4$ ’e olan vektörler, İHA-1’den İHA-4’e kadar olan referans noktalarını içermektedir. Diğer, $\vec{g}_5$ ve $\vec{g}_6$ vektörleri ise dış akış hacminin değerlerini barındırmaktadır. Her grubun alt elemanlarının sayısı 3 olup a değeri ile tanımlamıştır. Her simülasyonda değişen

parametrelerin başlangıç indeksi b değeri ile belirtilmiş olup, b değeri 83 olarak alınmıştır.

Referans noktalarına göre, İHA'nın bağıl tanımlaması gerçekleştirilmiştir. Her İHA'da bulunan dört pervanenin konumları, referans noktasına göre bağıl olarak tanımlanmış ve her bir pervanenin devir sayısı da bu parametreler arasına dahil edilmiştir. Tablo 3.8'de, referans noktasına göre bağıl uzaklıklar gösterilmiştir.

Tablo 3.8'de, referans noktası ile pervane konumları arasındaki bağıl uzaklıklar verilmiştir. Referans noktasından gelen değişkenleri içeren R vektörü oluşturulmuştur.

$$\vec{R} = [R_x \quad R_y \quad R_z] \quad (3.3)$$

Tablo 3.8. Referans Noktasına Göre Bağıl Uzaklıklar

Değişkenler	X	Y	Z
Birim	cm	cm	cm
İHA [i] Pervane Arka-Sol	$R_x + 20$	$R_y + 20$	$R_z + 20$
İHA [i] Pervane Arka-Sağ	$R_x + 45$	$R_y + 20$	$R_z + 20$
İHA [i] Pervane Ön-Sol	$R_x + 20$	$R_y + 20$	$R_z + 45$
İHA [i] Pervane Ön-Sağ	$R_x + 45$	$R_y + 20$	$R_z + 45$

Dönen dört cismin referans noktasına göre uzaklıkları, D matrisi ile belirlenmiştir. D matrisi, her bir cismin referans noktasına göre X, Y ve Z eksenlerindeki bağıl uzaklıklarını içermektedir:

$$[D] = \begin{bmatrix} 20 & 20 & 20 \\ 45 & 20 & 20 \\ 20 & 20 & 45 \\ 45 & 20 & 45 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

D matrisi, 4 satır ve 3 sütun içeren bir yapıda oluşturulmuştur. Bu matriste sütunlar sırasıyla X, Y ve Z eksenlerindeki uzaklıklarını belirtmiş, her satır ise dönen cisme ait bağıl uzaklıkları tanımlamıştır. Eleman sayısı 3 olan, satır birim vektörü ile aşağıdaki bağıntı elde edilmiştir:

$$[K] = [D] + \vec{R}^T \otimes \vec{1}_3 \quad (3.5)$$

K matrisine, her pervanenin devir sayısını tanımlayan P sütun dizisi eklenerek, K matrisi genişletilmiştir. Her satırın sonuna P dizisindeki değerlerin eklenmesiyle yeni bir matris elde edilmiştir:

$$[J] = [K \ P] \quad (3.6)$$

Dönen cisimlere ait başlangıç değerlerini (K) ve pervane devir sayılarını (P) içeren J matrisi oluşturulmuştur. Bu matris, dönen cisimlerin üç boyutlu uzaydaki başlangıç konumlarını tanımlarken, aynı zamanda her pervanenin devir sayısını da içeren ek bir parametre içermiştir. Hem geometrik değişkenler hem de devir sayısı tek bir matris içinde birleştirilmiştir.

Sürüdeki tüm İHA'lar için J matrisi aşağıdaki şekilde hesaplanabilmektedir:

$$\begin{aligned} R &= g_i, \quad i = 1, 2, 3..n \\ [K_i] &= [D] + \vec{R}^T \otimes \vec{1}_3 \\ [J_i] &= [K_i \ P] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Burada $g_1, g_2, g_3...$ gibi her vektör için $J_1, J_2, J_3...$ matrisleri oluşturulmuştur. Tüm g vektörleri için genel bağıntı şu şekilde ifade edilmektedir:

$$[J_i] = [(D + \vec{g}_i^T \otimes \vec{1}_3) \quad P] \quad (3.8)$$

Sürüdeki tüm İHA'ların pervanelerine ait başlangıç koordinat değişkenleri ile pervane devir sayılarını içeren genişletilmiş matrisleri tanımlamıştır.

ANSYS Workbench ortamında parametreler, dizi, vektör ve matris tanımlamaları kullanılarak kodlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. ACT konsol ekranında çalıştırılan kodlarla parametreler otomatik olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.10'da konsol ekranında kullanılan kodların bir bölümü gösterilmiştir.

Şekil 3.10'da tasarım noktasına ait parametreler (P84, P85, P86, P87...) tanımlanmış ve her bir parametreye uygun değerler atanmıştır. Çalışmada kullanılan bu yaklaşım, parametrelerin sistematik bir şekilde düzenlenmesine ve parametrelerin değiştirilebilir hale getirilmesini olanak sağlamıştır. Workbench parametre sekmesinde toplamda 338

tane parametre tanımlaması yapılmıştır. Ayrıca, Ek 1’de parametrik analizleri otomatik olarak kaydeden kod bloğu verilmiştir.

```
designPoint1 = Parameters.GetDesignPoint(Name="0");  
parameter84=Parameters.GetParameter(Name="P84"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter84,Expression="200 [cm]")  
parameter85=Parameters.GetParameter(Name="P85"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter85,Expression="600 [cm]")  
parameter86=Parameters.GetParameter(Name="P86"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter86,Expression="200 [cm]")  
parameter87=Parameters.GetParameter(Name="P87"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter87,Expression="300 [cm]")  
parameter88=Parameters.GetParameter(Name="P88"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter88,Expression="600 [cm]")  
parameter89=Parameters.GetParameter(Name="P89"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter89,Expression="200 [cm]")  
parameter90=Parameters.GetParameter(Name="P90"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter90,Expression="200 [cm]")  
parameter91=Parameters.GetParameter(Name="P91"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter91,Expression="525 [cm]")  
parameter92=Parameters.GetParameter(Name="P92"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter92,Expression="200 [cm]")  
parameter93=Parameters.GetParameter(Name="P93"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter93,Expression="300 [cm]")  
parameter94=Parameters.GetParameter(Name="P94"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter94,Expression="525 [cm]")  
parameter95=Parameters.GetParameter(Name="P95"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter95,Expression="200 [cm]")  
parameter96=Parameters.GetParameter(Name="P96"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter96,Expression="100 [cm]")  
parameter97=Parameters.GetParameter(Name="P97"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter97,Expression="0 [cm]")  
parameter98=Parameters.GetParameter(Name="P98"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter98,Expression="100 [cm]")  
parameter99=Parameters.GetParameter(Name="P99"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter99,Expression="365 [cm]")  
parameter100=Parameters.GetParameter(Name="P100"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter100,Expression="1000 [cm]")  
parameter101=Parameters.GetParameter(Name="P101"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter101,Expression="265 [cm]")  
parameter102=Parameters.GetParameter(Name="P102"); designPoint1.SetParameterExpression(Parameter=parameter102,Expression="+20 [cm]")
```

Şekil 3.10. Workbench Parametre Betiği

3.4. Çözüm Ağı

Sürü dizilimlerinin belirlenmesinin ardından, her bir dizilim için ayrı çözüm ağları (mesh) oluşturulmuştur. Farklı sürü dizilimlerinde, kullanılan dış akış hacminin boyutlarının değişkenlik göstermesi nedeniyle her bir simülasyon için özgün ağ yapıları düzenlenmiştir. Çözüm ağı oluşturma sürecinde ANSYS Mesh yazılımı kullanılmış ve bu yazılım aracılığıyla üretilen çözüm ağları üzerinden simülasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Analizlerin doğruluğunu artırmak için simülasyonlarda kullanılan çözüm ağları kademeli olarak iyileştirilmiştir. Çalışma kapsamında, farklı çözücü yöntemlerinin ve çözüm ağı yapılarının analiz sonuçlarına olan etkileri de incelenmiştir. Her sürü dizilimi için yeniden oluşturulan çözüm ağları, simülasyonların doğruluğunu ve güvenilirliğini sağlamak adına dikkatle yapılandırılmıştır.

3.4.1. Çözüm Ağı Bağımsızlık Testleri

Çözüm ağlarının simülasyon sonuçlarına olan etkisini değerlendirmek ve uygun çözüm ağı yoğunluğunu belirlemek amacıyla, her bir İHA üzerinde oluşan toplam kaldırma kuvveti hesaplanmıştır. Eksenler arası mesafenin 75 cm olarak belirlendiği sürü İHA diziliminde, farklı yoğunluklarda çözüm ağları oluşturulmuş ve bu ağlar üzerinden simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, farklı çözüm ağı yoğunluklarına sahip simülasyonlar karşılaştırılmış ve çözüm ağı bağımsızlık denemeleri gerçekleştirilmiştir.

Bağımsızlık denemeleri kapsamında, farklı yoğunluklu çözüm ağlarında kaldırma kuvveti değerlerinin dengelenmesi incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarında, düşük yoğunluklu çözüm ağlarının kullanıldığı durumlarda kaldırma kuvveti değerlerinde sapmaların meydana geldiği, ancak çözüm ağı yoğunluğunun artırılmasıyla bu sapmaların belirgin bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Ancak, çözüm ağı yoğunluğu belirli bir seviyenin üzerine çıktığında, elde edilen sonuçların birbirine yakınsadığı ve bu durumun analiz doğruluğunu etkilemediği görülmüştür. Bu durumla birlikte, daha yoğun çözüm ağlarının hesaplama süresi ve gereksinimlerini önemli ölçüde artırdığı tespit edilmiştir.

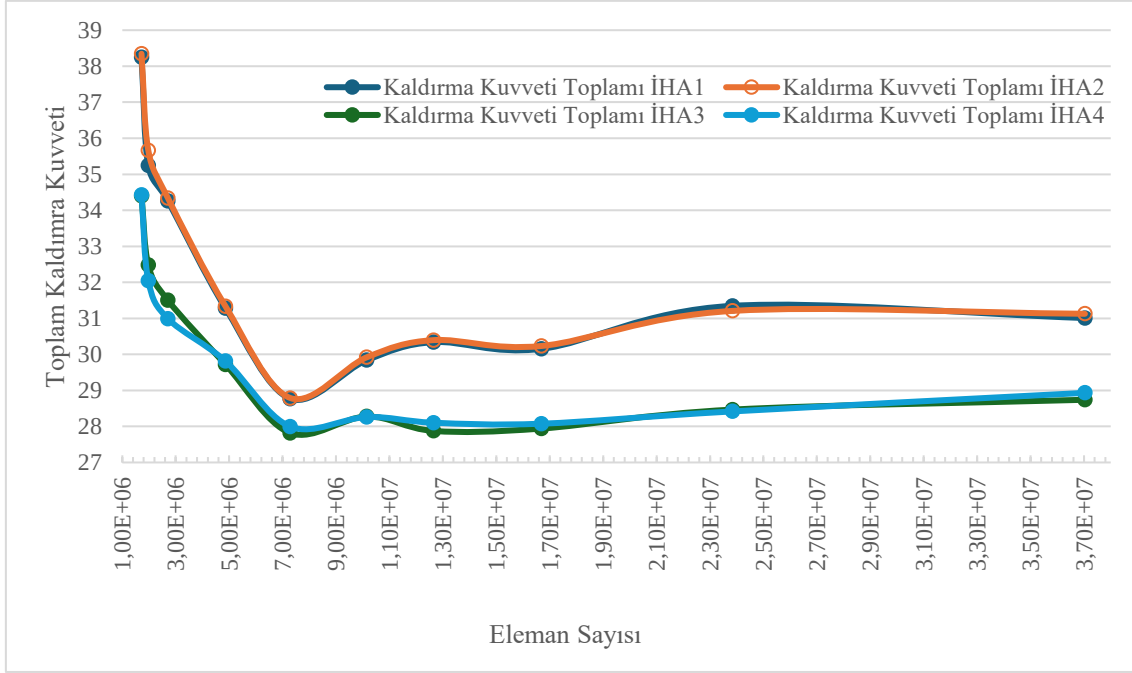
Tablo 3.9'da çözüm ağı yoğunluklarının (parametrik eleman boyutlarının) toplam kaldırma kuvvetine olan etkisini gösterilmiştir. Tablo, genel ağ ayarları üzerinden eleman boyutlarına bağlı oluşturulan düğüm ve eleman sayılarının, simülasyon sonuçlarına etkileri detaylandırılmıştır. Farklı çözüm ağı yoğunluklarında, her bir İHA'nın (İHA1, İHA2, İHA3, İHA4) toplam kaldırma kuvveti değerleri ayrı ayrı sunulmuş ve bu değerler arasındaki değişimler karşılaştırılmıştır.

Tablo 3.9. Farklı Çözüm Ağı Yoğunluklarından Elde Edilen Kaldırma Kuvvetleri

Genel Ağ Eleman Boyutu (mm)	Düğüm Sayısı	Eleman Sayısı	Kaldırma Kuvveti Toplamı İHA1	Kaldırma Kuvveti Toplamı İHA2	Kaldırma Kuvveti Toplamı İHA3	Kaldırma Kuvveti Toplamı İHA4
1200	2.366.532	1.718.780	38,25	38,35	34,40	34,43
1100	2.717.441	1.972.602	35,24	35,66	32,48	32,05
900	3.735.799	2.707.607	34,26	34,34	31,50	30,99
600	6.723.052	4.859.637	31,28	31,34	29,72	29,82
400	10.087.751	7.290.079	28,77	28,79	27,82	27,99
300	14.044.767	10.152.995	29,84	29,92	28,28	28,26
250	17.506.816	12.656.642	30,34	30,40	27,88	28,10
200	23.065.953	16.688.134	30,15	30,23	27,94	28,08
150	32.918.596	23.841.113	31,35	31,21	28,47	28,42
100	51.047.236	37.033.573	31,01	31,13	28,74	28,93

Çözüm ağı yoğunluğu arttıkça, yani eleman boyutu küçüldükçe, kaldırma kuvvetinde meydana gelen değişimler görülmüştür. Burada, eleman boyutunun kaldırma kuvveti değerlendirilmiş, çözüm ağı parametreleri incelenmiştir. Düşük çözünürlüklü ağlardan yüksek çözünürlüklü ağlara geçişte, kaldırma kuvvetinde değişimler görülmüş, çözüm ağı yoğunluğuna olan bağımlılığı ortaya konmuştur.

Şekil 3.11'deki çizelgede, İHA'ların toplam kaldırma kuvveti değişimi gösterilmiştir. Çözüm ağı yoğunluğunun artırılmasıyla birlikte, kaldırma kuvvetinin dengelenmeye başladığı görülmüştür.

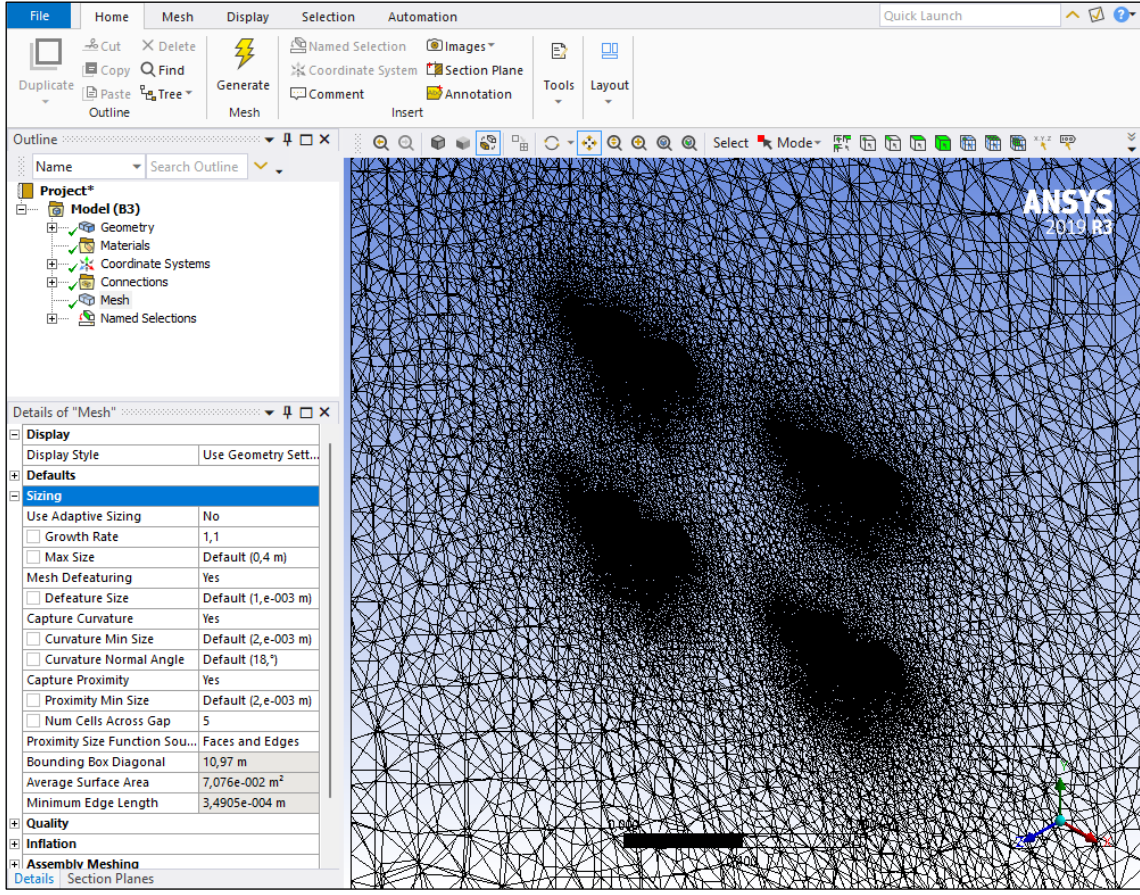


Şekil 3.11. Eleman Sayısının Toplam Kaldırma Kuvveti Üzerindeki Etkisi

Şekil 3.11'deki incelendiğinde, üst sıralarda konumlanan İHA'ların, alt sırada konumlanan İHA'ların toplam kaldırma kuvvetinin azalmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Sürü formasyonunda bulunan İHA'ların çözüm ağı yoğunluğu ile kaldırma kuvveti arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bağımsızlık testleri sonucunda, çözüm ağı yoğunluğu optimize edilmiştir.

3.4.2. Çözüm Ağı Ayarları

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde kullanılan geometrilerin, çözüm ağını (mesh) oluşturmak için ANSYS Mesh yazılımı (Şekil 3.12) kullanılmıştır. Üretilen çözüm ağları kullanılarak gerçekleştirilen simülasyonlarda, ağ yoğunluğunun ve çözüm ağı parametrelerinin analiz sonuçları üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çözüm ağlarının kademeli olarak iyileştirilmesi ve her bir dizilim için optimize edilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.12. ANSYS Mesh Yazılımı Arayüzü

HAD çözücü yöntemlerinin veya çözüm ağı yapılandırmalarının simülasyon sonuçlarına olan etkisi bağımsızlık testleri ile değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmelerde, çözüm ağlarının kalitesi ile elde edilen sonuçların doğruluğu arasındaki ilişki ortaya konmuştur.

Her sürü dizilimi için, dizilimine uygun çözüm ağları yeniden oluşturulmuştur. Farklı sürü dizilimleri için yapılandırılan çözüm ağları, İHA'lar arası etkileşimlerin daha hassas bir şekilde modellenmesine olanak tanımıştır.

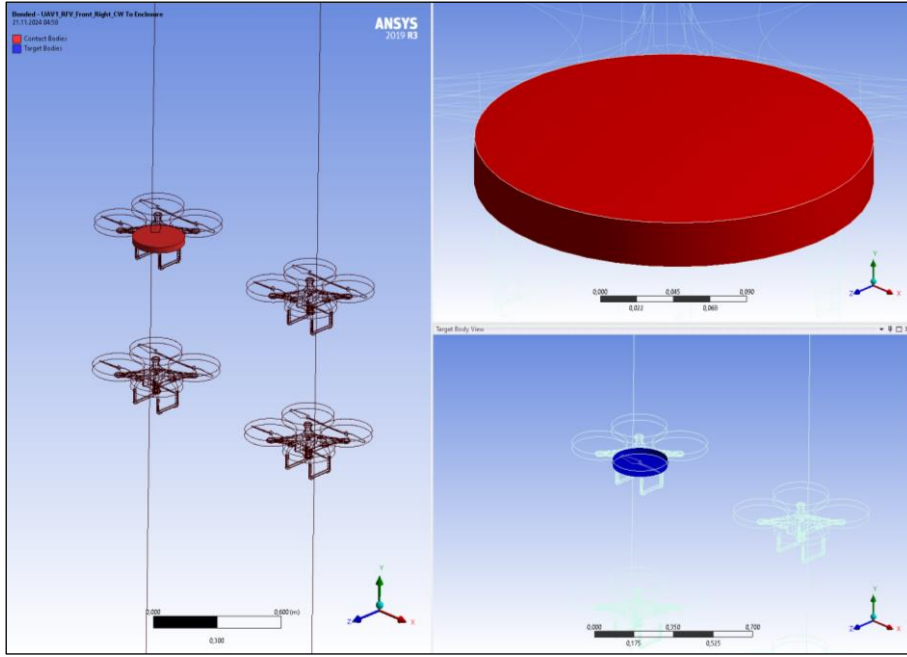
Design Modeler yazılımında oluşturulan sürü İHA geometrileri, çözüm ağı oluşturma süreci için ANSYS Mesh yazılımına aktarılmıştır. Aktarılan bu geometriler, simülasyon doğrultusunda akışkan olarak tanımlanmıştır. Bu geometrilerden 16'sı dönen akış bölgesi ve 1'i dış akış hacmi olmak üzere toplamda 17 bölge akışkan olarak tanımlanmıştır. Her bir bölgenin doğru tanımlanması, simülasyonlarda önemlidir. Şekil 3.13-a'da Design Modeler yazılımından Mesh yazılımına aktarılan geometriler gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Çözüm Ağı Tanımlamaları; a) Aktarılan Geometriler b) Bağlantılar c) İsimlendirmeler

Döner akış bölgeleri ile dış akış hacmi arasındaki bağlantılar, ANSYS yazılımının “Connection” sekmesi altında yapılandırılmıştır (Şekil 3.13-b). Parametrik analizlerin doğruluğunu sağlamak ve gereksiz oluşturulabilecek bağlantıların önüne geçmek amacıyla, bağlantı ayarlarında “Her yenilemede otomatik bağlantı oluştur” seçeneği devre dışı bırakılmıştır. Bu sayede çözüm ağı güncellemeleri sırasında oluşabilecek gereksiz bağlantıların önüne geçilmiş ve bu bağlantıların düzenli bir şekilde yapılandırılması sağlanmıştır.

Şekil 3.14’de dönen akış bölgelerinin dış yüzeyleri ile dış akış hacminin temas yüzeyleri arasında gerçekleştirilen bağlantılar gösterilmiştir. Bağlantılar oluşturulurken tolerans değeri yaklaşık 0,3 mm olarak belirlenmiş, bu sayede her bir dönen akış hacmi ile dış akış hacmi arasında düzgün bir bağlantı kurulmuştur.



Şekil 3.14. Çözüm Ağı Bağlantıları

Çözüm ağı içerisinde yer alan 4 adet İHA gövdesinin yüzeyleri, 16 adet pervanenin yüzeyleri ve dış akış hacminin dış yüzeyi olmak üzere toplamda 21 bölgenin isimlendirilmesi yapılmıştır (Şekil 3.13-c). Bu isimlendirmeler, çözüm ağı oluşturma sürecine, Design Modeler yazılımından Mesh yazılımına doğrudan aktarılmış ve sorunsuz bir şekilde kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Tablo 3.10’da çözüm ağlarının genel ayarları detaylı bir şekilde sunulmuştur. Çözüm ağı oluşturma sürecinde, Proximity ve Curvature yakalamalar aktif hale getirilmiş; büyüme oranı (growth rate) 1,1; boşluklar arasında hücre sayısı (num cells across gap) 5 ve çarpıklık oranı (target skewness) 0,8 olarak belirlenmiştir. Çözüm ağlarının hassasiyetini artırmak amacıyla bu parametreler yapılandırılmıştır.

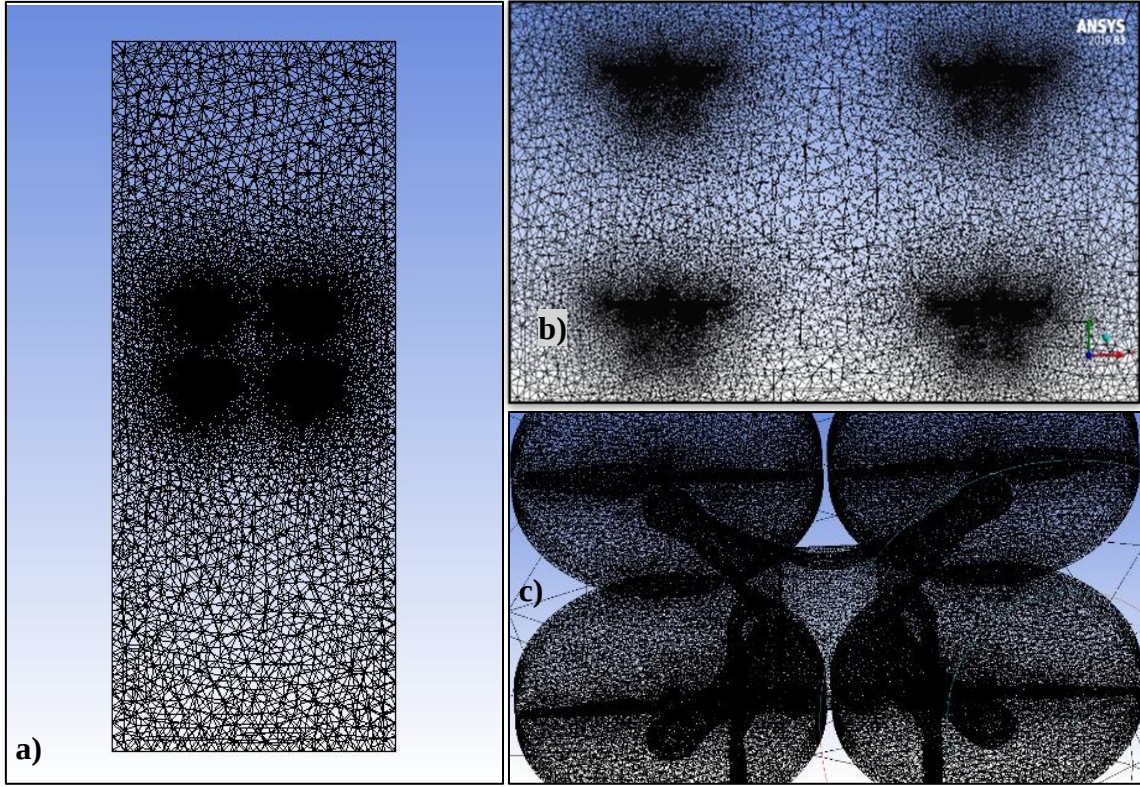
Tablo 3.10. Genel Çözüm Ağı Ayarları

Fizik ve Çözücü Tercihi	CFD-Fluent	Eğrilik ve Yakınlık Yakalama	Curvature & Proximity Açık
Eleman Tipi	Quadratic	Eğrilik Min. Boyutu	2 mm
Eleman Boyutu	0,2 m	Eğrilik Normal Açısı	18°
Büyüme Oranı	1,1	Yakınlık Min. Boyutu	2 mm
Maksimum Boyut	0,4 m	Boşluk Boyunca Hücre Sayısı	5
Ağ Detaylandırma Boyutu (Mesh Defeature Size)	1 mm	Yakınlık Boyut Fonksiyon Kaynakları	Yüzeyler ve Kenarlar
Hedef Eğrilik (Skewness)	0,8	Inflation Seçeneği	Yumuşak Geçiş
Yumuşatma	Yüksek	Inflation Geçiş Oranı	0,272
Ağ Metriği	Skewness	Maksimum Katman	5
Min(Skewness)	1,76E-09	Büyüme Oranı	1,2
Max (Skewness)	0,78179	Inflation Algoritması	Önce (Pre)
Ortalama (Skewness)	0,21746	Paralel CPU	8
Standart Sapma(Ske.)	9,48E-02	İstatistikler	
Topoloji Kontrolü	Evet	Düğümmler	~24 Milyon
Sıkıştırma (Pinch) Toleransı	1,8 mm	Elemanlar	~17 Milyon

Çözüm ağlarında, toplam düğüm sayısı yaklaşık 23 milyon, toplam eleman sayısı ise yaklaşık 17 milyon olarak elde edilmiştir. Bununla birlikte, düğüm ve eleman sayıları, dış akış hacminin boyutuna ve sürü dizilimlerine göre değişiklik göstermiştir.

Şekil 3.15’de oluşturulan çözüm ağının kesitleri gösterilmiştir. Şekil 3.15-a’da HAD geometrisinin kesit görüntüsünü; b’de İHA’ların dizilimini, c’de ise dört rotorlu modelin çözüm ağı gösterilmiştir.

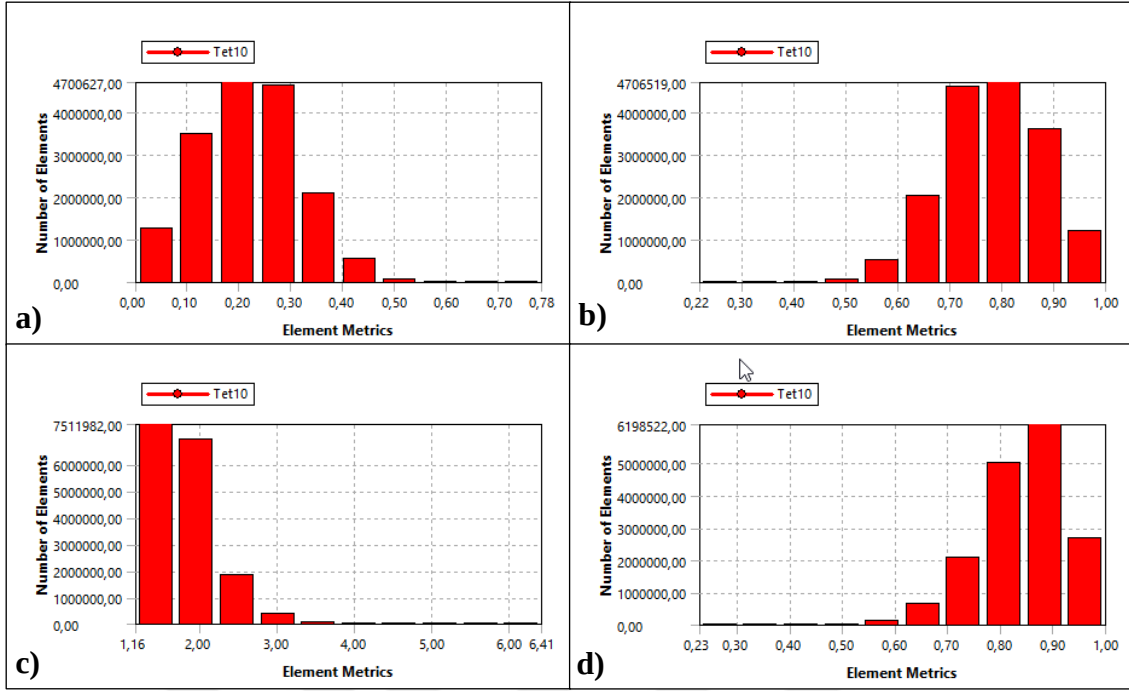
Fizik ve Çözücü Tercihi	CFD-Fluent	Eğrilik ve Yakınlık Yakalama	Curvature & Proximity Açık
Eleman Tipi	Quadratic	Eğrilik Min. Boyutu	2 mm
Eleman Boyutu	0,2 m	Eğrilik Normal Açısı	18°
Büyüme Oranı	1,1	Yakınlık Min. Boyutu	2 mm
Maksimum Boyut	0,4 m	Boşluk Boyunca Hücre Sayısı	5
Ağ Detaylandırma Boyutu (Mesh Defeature Size)	1 mm	Yakınlık Boyut Fonksiyon Kaynakları	Yüzeyler ve Kenarlar
Hedef Eğrilik (Skewness)	0,8	Inflation Seçeneği	Yumuşak Geçiş
Yumuşatma	Yüksek	Inflation Geçiş Oranı	0,272
Ağ Metriği	Skewness	Maksimum Katman	5
Min(Skewness)	1,76E-09	Büyüme Oranı	1,2
Max (Skewness)	0,78179	Inflation Algoritması	Önce (Pre)
Ortalama (Skewness)	0,21746	Paralel CPU	8
Standart Sapma(Ske.)	9,48E-02	İstatistikler	
Topoloji Kontrolü	Evet	Düğümmler	~24 Milyon
Sıkıştırma (Pinch) Toleransı	1,8 mm	Elemanlar	~17 Milyon



Şekil 3.15. Çözüm Ağı Görüntüleri

ANSYS Mesh yazılımında, üretilen çözüm ağlarının kalitesini değerlendiren çeşitli metrikler bulunmaktadır. Bu metrikler, çözüm ağının kalitesini analiz etmeye olanak tanımakta ve HAD simülasyonlarının doğruluğunu doğrudan etkileyen önemli faktörler arasında yer almaktadır. Çözüm ağı kalite metrikleri arasında çarpıklık (Skewness), Ortogonal Kalite (Orthogonal Quality), En-Boy Oranı (Aspect Ratio) ve Eleman Kalitesi (Element Quality) gibi parametreler, değerlendirme açısından büyük önem taşımaktadır [61, 66]. Şekil 3.16’te çözüm ağındaki bu değerler gösterilmiştir.

Şekil 3.16’te çözüm ağının kalite metrikleri detaylı bir şekilde sunulmuştur. Şekil 3.16-a’da, elemanların deformasyon düzeylerini ifade eden çarpıklık (Skewness), değeri gösterilmiştir. Çarpıklık değerinin, düşük olması, çözüm ağının kalite açısından daha iyi olduğunu göstermektedir.



Şekil 3.16. Çözüm Ağı Kalite Değerleri; a) Çarpıklık (Skewness) b) Ortogonal Kalite c) En Boy Oranı d) Eleman Kalitesi

Şekil 3.16-b’de, Ortogonal Kalite (Orthogonal Quality) gösterilmiştir. Ortogonal Kalite, elemanların akış doğrultusuna uyumunu göstermektedir ve yüksek değerler tercih edilmektedir.

Şekil 3.16-c’de, elemanların geometrik düzenini belirten En-Boy Oranı (Aspect Ratio) gösterilmiştir. Bu oran ne kadar düşükse, çözüm ağının düzenliliği o kadar iyi kabul edilmektedir.

Şekil 3.16-d’de, ağın genel doğruluğunu ifade eden Eleman Kalitesi (Element Quality) değeri gösterilmiştir. Eleman Kalitesi için yüksek değerler, analizlerin güvenilirliği açısından daha iyi kabul edilmektedir. Bu metrikler, çözüm ağının analiz doğruluğu üzerindeki etkilerini değerlendirmek ve güvenilir sonuçlar elde etmek açısından büyük önem taşımaktadır.

Tablo 3.11’de, sürü dizilimindeki insansız hava araçlarının hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri için oluşturulan çözüm ağlarına ait eleman ve düğüm sayıları verilmiştir. Bu çalışmada, rotor eksenleri arası uzaklığı 50 cm olan sürü dar mesafeli dizilim, 75 cm olan sürü orta mesafeli dizilim ve 100 cm olan sürü ise geniş mesafeli dizilim olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.11. Dizilimlerin Eleman ve Düğüm Sayıları

Dizilim Adı:	Dar Mesafeli	Orta Mesafeli	Geniş Mesafeli
Eksenler Arası Uzaklık:	50 cm	75 cm	100 cm
Düğüm Sayısı:	22 858 054	23 065 953	23 272 029
Eleman Sayısı:	16 532 165	16 688 134	16 841 588

Dar mesafeli dizilim için üretilen çözüm ağı 22.858.054 düğüm ve 16.532.165 elemandan oluşmuştur. Orta mesafeli dizilimde bu değerler sırasıyla 23.065.953 düğüm ve 16.688.134 eleman olarak belirlenmiştir. Geniş mesafeli dizilimde ise çözüm ağı, 23.272.029 düğüm ve 16.841.588 elemandan meydana gelmiştir.

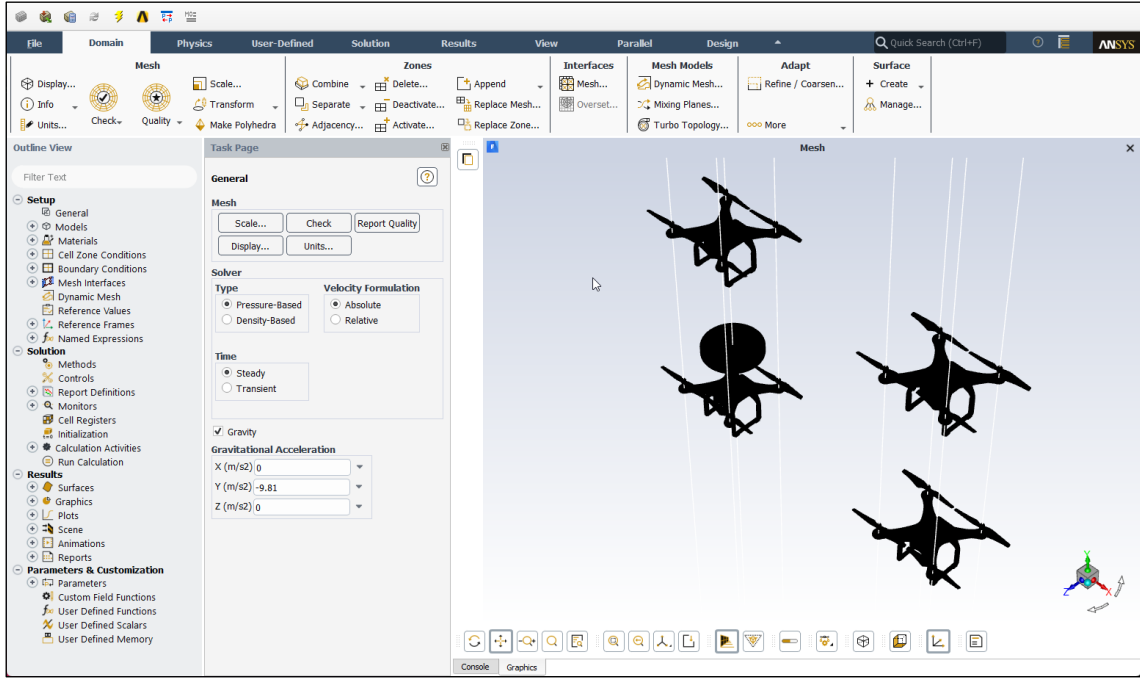
Dizilimlerin arasındaki uzaklıkların artmasıyla birlikte, çözüm ağlarının düğüm ve eleman sayılarında da bir artış gözlemlenmiştir. Her dizilimde, dış akış hacmi farklı boyutlarda tanımlanmış olup, çözüm ağlarında farklı yoğunluklarda eleman ve düğüm sayılarının oluşmasına yol açmıştır. Özellikle geniş mesafeli dizilim, diğer dizilimlere göre en büyük dış akış hacmine sahip olması nedeniyle çözüm ağında en yüksek eleman ve düğüm sayılarını barındırmıştır. Çözüm ağı sürecinin tamamlanmasının ardından, bir sonraki aşama olan Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonlarının sürecine geçilmiştir.

3.5. HAD Simülasyonlarının Oluşturulması

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyon süreci, çözüm ağlarının oluşturulmasının ardından başlatılmıştır. Bu çalışmada, HAD analizleri için ANSYS-Fluent (v19) yazılımı kullanılmıştır (Şekil 3.17).

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği simülasyonlarında, zamana bağımlı (unsteady, süreksiz) ve zamandan bağımsız (sürekli, steady-state) olarak iki temel analiz yöntemi bulunmaktadır. İnsansız Hava Araçları üzerine yapılan HAD çalışmalarında, süreksiz simülasyonlarda Hareketli Çözüm Ağı (Moving Mesh) yöntemi, sürekli simülasyonlarda Hareketli Referans Çerçevesi (Moving Reference Frame) yöntemi kullanılmaktadır.

Süreksiz analizler, birim zaman adımlarıyla gerçekleştirildiğinden, sürekli analizlere kıyasla daha uzun işlem süreleri gerektirir ve daha fazla veri saklama kapasitesine ve belleğe ihtiyaç duymaktadır.

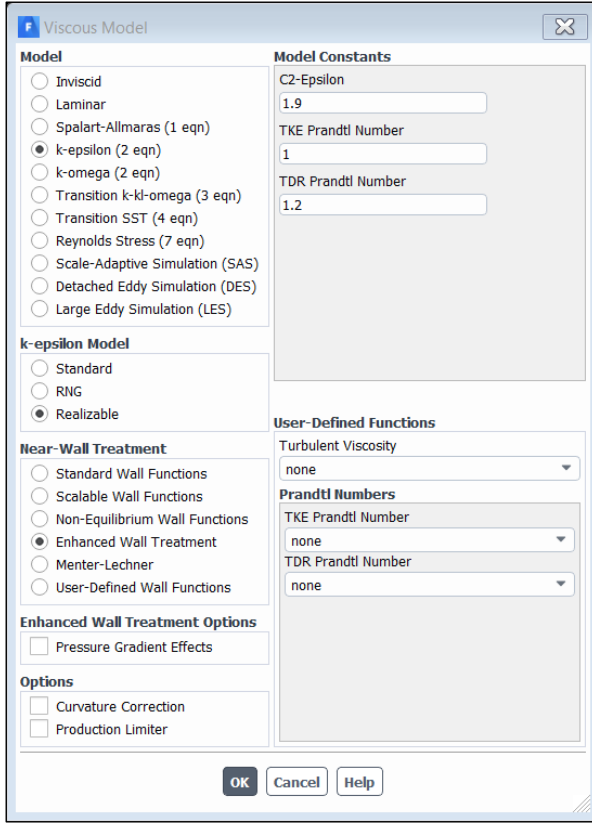


Şekil 3.17. Fluent Yazılımı Arayüzü

Bu çalışmada, teknik ve pratik kısıtlamalar göz önünde bulundurularak zamandan bağımsız simülasyon yöntemleri tercih edilmiştir. Böylelikle daha verimli ve hızlı sonuçların alınması hedeflenmiş ve hesaplama maliyetleri önemli ölçüde düşürülmüştür.

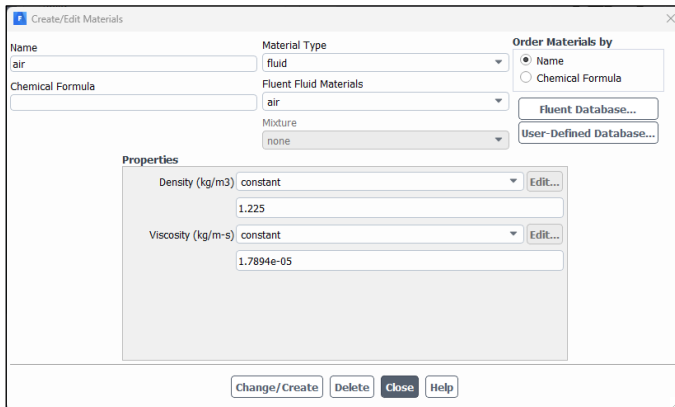
Şekil 3.17’de ANSYS-Fluent yazılımı içerisinde İHA gövdeleri ve pervaneleri gösterilmiştir. Simülasyonlarda yer çekimi ivmesi, y yönünde $-9,81 \text{ m/s}^2$ olarak alınmıştır. Literatürde dönen cisimler üzerine yapılan benzer çalışmalar incelenmiş ve analizlerde kullanılan parametrelerin bu çalışmalarla uyumlu olmasına özen gösterilmiştir. Böylelikle, çalışmada elde edilen sonuçlar, literatürdeki verilerle karşılaştırılabilir bir hale getirilmiştir.

Simülasyonlarda, k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır (Şekil 3.18) Literatürde, İHA’ların hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinde güvenilir sonuçlar sağlaması nedeniyle k-epsilon türbülans modeli tercih edilmiştir. Döner kanatlı araçların analizlerinde Realizable k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Sınır bölgelerinde türbülanslı akışın daha etkili ve doğru bir şekilde simüle edilmesi için Standart veya Geliştirilmiş Duvar Etkileşimi (Enhanced Wall Treatment) yöntemleri uygulanmıştır.



Şekil 3.18. Türbülans Modeli

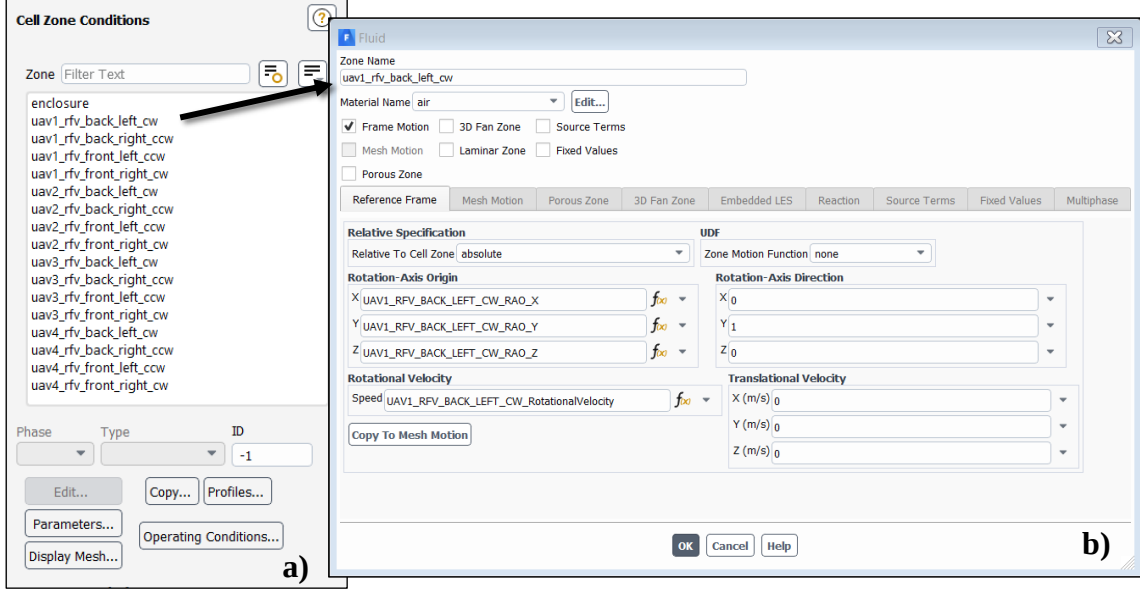
Şekil 3.19’da gösterilen arayüzde, simülasyonlarda kullanılan akışkanların seçimi ve fiziksel özelliklerinin tanımlanmıştır. Bu çalışmada, akışkan olarak hava kullanılmıştır. Havanın özellikleri standart değerlerde kullanılmış olup yoğunluğu $1,225 \text{ kg/m}^3$ ve viskozitesi $1,7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ olarak alınmıştır.



Şekil 3.19. Akışkan Özellikleri

Şekil 3.20’de Hücre Bölgesi Koşulları (Cell Zone Conditions) arayüzü gösterilmiştir. Fluent yazılımında akış bölgelerinin tanımlanması bu arayüz üzerinden yapılmıştır. Şekil

3.20-a'da, HAD geometrisinde tanımlanan toplam 17 akış bölgesi gösterilmiştir. Bu bölgelerin 16'sı dönen akış bölgesi, 1'i ise dış akış bölgesi olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.20-b'de ise dönen akış bölgelerine ait ayarlar ve hareket koşulları gösterilmiştir.



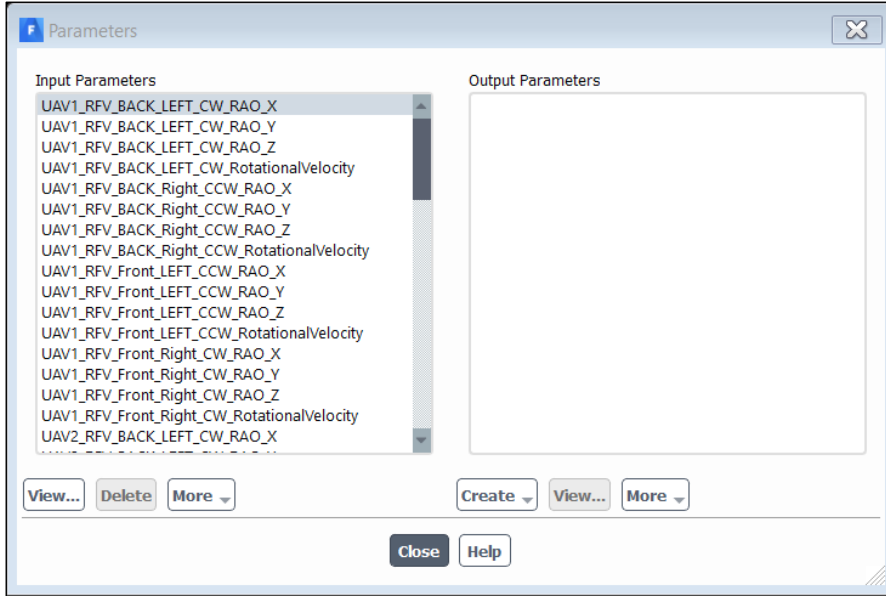
Şekil 3.20. Hücre Bölgesi Koşulları

Dönen akış bölgelerinin tanımlamaları, Hücre Bölgesi Koşulları altında gerçekleştirilmiş ve her bir bölge için uygun hareket modelleri atanmıştır. Hareketli Referans Çerçevesi (HRC) tanımlamaları Frame Motion, hareketli çözüm ağı tanımlamaları ise Mesh Motion olarak yapılmaktadır. Zamandan bağımsız simülasyonlarda, dönen akış bölgeleri HRC modeli kullanılarak yapılandırılmıştır. Bu yapılandırmalar sırasında, dönen akış bölgelerinin koordinat değerlerinin ve hareketlerinin doğru bir şekilde tanımlanması, analiz sonuçlarının doğruluğu açısından kritik bir öneme sahiptir.

Parametrelerin tanımlanmasında, yazılımın altyapısında erişim kısıtlayıcıları bulunmaktadır. Bu kısıtlayıcıları, parametrelerin türünü kontrol ederek, bunları dahili (içeriden erişilebilir) veya harici (dışarıdan erişilebilir) olarak ayarlanmasını sağlamaktadır. Dönen akış bölgelerinde parametrik bir yaklaşım uygulanabilmesi için ilgili değişkenler, harici parametreler olarak tanımlanmıştır. Bu sayede, her bir dönen akış bölgesinin global koordinat sistemine göre başlangıç noktaları, yönelim vektörleri ve dönüş hızlarının doğru bir şekilde tanımlanması mümkün hale getirilmiştir.

Şekil 3.21'de Fluent yazılımı içerisinde bulunan parametre arayüzü gösterilmiştir. Simülasyonlarda, her bir dönen akış bölgesi için toplam dört parametre tanımlanmıştır.

Bu parametrelerden üçü başlangıç noktasının x, y ve z eksenlerindeki koordinatlarını belirtirken, dördüncü parametre ise dönüş hızını temsil etmiştir. Yönelim vektörleri y-yönünde sabit olarak alındığı için harici parametrelere dahil edilmemiştir. Parametrik yapılandırma sayesinde, dönen akış bölgelerinin harici olarak kontrol edilebilmesi sağlanmıştır.



Şekil 3.21. Parametre Arayüzü

Dışarıdan erişilebilir parametrelerin sayısındaki artışla birlikte, ANSYS Fluent yazılımının performansında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle sekizinci veya onuncu parametreden itibaren, parametre tanımlama işlemlerinde yazılımın işlem hızında kayda değer bir yavaşlama meydana gelmiştir. Harici parametrelerin sayısındaki artış, tanımlama sürecinin daha fazla zaman almasına neden olmuştur. Bu durumu çözmek amacıyla, toplamda 64 parametreden (her biri 4 parametre olacak şekilde 16 dönen akış hacmi) oluşan yapı kodlar, betikler (scriptler) aracılığıyla tanımlanmıştır. Şekil 3.22’de gösterilen yapı esas alınarak dışarıdan erişilebilir parametrelerin oluşturulması sağlanmış, tanımlama süreci daha verimli hale getirilmiştir.

name	definitiondescription	parameter
"UAV1_RFV_BACK_LEFT_CW_RAO_X"	"2.2 [m]"	"#t"
"UAV1_RFV_BACK_LEFT_CW_RAO_Y"	"6.2 [m]"	"#t"
"UAV1_RFV_BACK_LEFT_CW_RAO_Z"	"2.2 [m]"	"#t"
"UAV1_RFV_BACK_LEFT_CW_RotationalVelocity"	"-1047.198 [radian s ⁻¹]"	"#t"
...(Devam Etmektedir..)		

Şekil 3.22. Fluent Parametre Betiği

Parametre isimlendirmesi belirli bir düzen çerçevesinde yapılmıştır. Şekil 3.22’de gösterilen ‘UAV1’ İHA numarasını, ‘RFV’ dönen akış hacmini, ‘BACK_LEFT’ ilgili pervaneyi, ‘CW’ pervanenin dönüş yönünü (saat yönü), ‘RAO’ dönen cismin başlangıç noktasını gösterirken ‘X-Y-Z’ ise koordinat değerlerini ifade etmektedir. Fluent yazılımında parametrelerin değerleri doğrudan kutucuklara girilebildiği gibi, kodlar aracılığıyla da atanabilmektedir. Buna ek olarak, ANSYS Workbench’in özel kodlar veya parametre sekme özelliği kullanılarak harici parametrelerin tanımlanması sağlanmıştır.

Dönen akış hacminin x, y, z koordinat değerleri ile dönüş hızı ilişkilendirilmiş ve ‘#t’ tanımlaması ile dışarıdan erişilebilir parametreler haline getirilmiştir. Şekil 3.1’de gösterilen referans noktasına göre belirtilen uzaklıklar ve Şekil 3.5-d’de gösterilen parametreler, dönen cisim tanımlamalarında referans noktaları olarak kullanılmıştır. Pervanelerin dönüş yönleri saat yönünde veya saat yönünün tersinde olacak şekilde 10 000 RPM olarak belirlenmiştir.

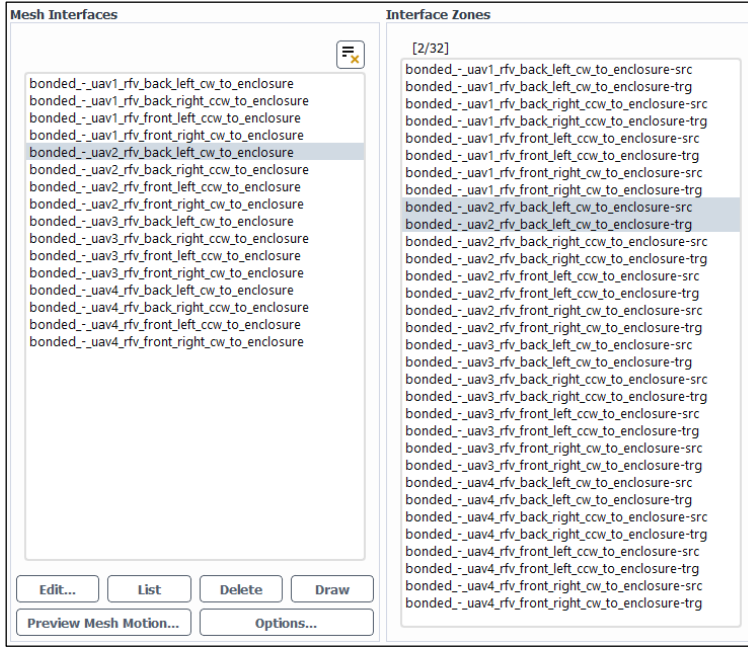
Şekil 3.23’te, ANSYS Workbench arayüzünde HAD çalışmasında kullanılan dışarıdan erişilebilir parametreler gösterilmiştir. Bu parametrelerden 18 tanesi, Şekil 3.5-d’de gösterilen HAD geometrisinden elde edilmiş; kalan 64 parametre ise Şekil 3.21’de gösterilen Fluent yazılımından elde edilmiştir. Analizlerde harici parametreler sayesinde farklı yaklaşma mesafeleri kolaylıkla denenebilmiştir.

Outline of Schematic B7: Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
3	4 UAVs 75 cm (B1)			
4	P84	UAV1_Origin_MoveBox.X	200	cm
5	P85	UAV1_Origin_MoveBox.Y	600	cm
6	P86	UAV1_Origin_MoveBox.Z	200	cm
7	P87	UAV2_Origin_MoveBox.X	300	cm
8	P88	UAV2_Origin_MoveBox.Y	600	cm
9	P89	UAV2_Origin_MoveBox.Z	200	cm
10	P90	UAV3_Origin_MoveBox.X	200	cm
11	P91	UAV3_Origin_MoveBox.Y	525	cm
12	P92	UAV3_Origin_MoveBox.Z	200	cm
13	P93	UAV4_Origin_MoveBox.X	300	cm
14	P94	UAV4_Origin_MoveBox.Y	525	cm
15	P95	UAV4_Origin_MoveBox.Z	200	cm
16	P96	Enclosure_Box.First_Point.X	100	cm
17	P97	Enclosure_Box.First_Point.Y	0	cm
18	P98	Enclosure_Box.First_Point.Z	100	cm
19	P99	Enclosure_Box.END_Point.X	365	cm
20	P100	Enclosure_Box.END_Point.Y	1000	cm
21	P101	Enclosure_Box.END_Point.Z	265	cm
22	P102	UAV1_RFY_BACK_LEFT_CW_RAO_X	2,2	m
23	P103	UAV1_RFY_BACK_LEFT_CW_RAO_Y	6,2	m
24	P104	UAV1_RFY_BACK_LEFT_CW_RAO_Z	2,2	m
25	P105	UAV1_RFY_BACK_LEFT_CW_RotationalVelocity	-10000	rev min ⁻¹
26	P106	UAV1_RFY_BACK_Right_CCW_RAO_X	2,45	m
27	P107	UAV1_RFY_BACK_Right_CCW_RAO_Y	6,2	m
28	P108	UAV1_RFY_BACK_Right_CCW_RAO_Z	2,2	m
29	P109	UAV1_RFY_BACK_Right_CCW_RotationalVelocity	10000	rev min ⁻¹
30	P110	UAV1_RFY_Front_LEFT_CW_RAO_X	2,2	m
31	P111	UAV1_RFY_Front_LEFT_CW_RAO_Y	6,2	m
32	P112	UAV1_RFY_Front_LEFT_CW_RAO_Z	2,45	m
33	P113	UAV1_RFY_Front_LEFT_CW_RotationalVelocity	10000	rev min ⁻¹
34	P114	UAV1_RFY_Front_Right_CW_RAO_X	2,45	m
35	P115	UAV1_RFY_Front_Right_CW_RAO_Y	6,2	m
36	P116	UAV1_RFY_Front_Right_CW_RAO_Z	2,45	m

Şekil 3.23. Workbench Parametreleri

Fluent yazılımında, farklı ağ bölgeleri arasında akışın doğru bir şekilde aktarılmasını sağlamak için kullanılan, Çözüm Ağı Arayüzleri (Mesh Interfaces) Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Bu arayüz ekranı bağlantıların tanımlanması, düzenlenmesi veya silinmesi için kullanılmıştır.

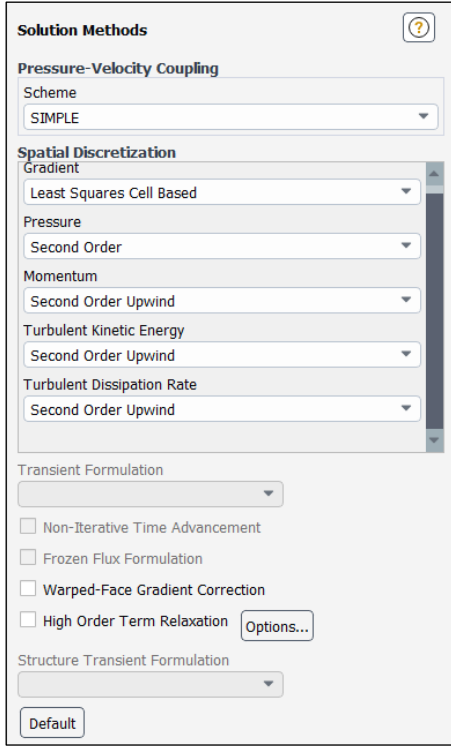
Çözüm ağından gelen bağlantılar kontrol edilmiş, dönen akış bölgeleri ile dış akış hacmi arasındaki bağlantılar Mesh Interfaces sekmesinde listelenmiştir. Interface Zones sekmesinde ise her bağlantının kaynak (src) ve hedef (trg) bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Arayüz Tanımlaması

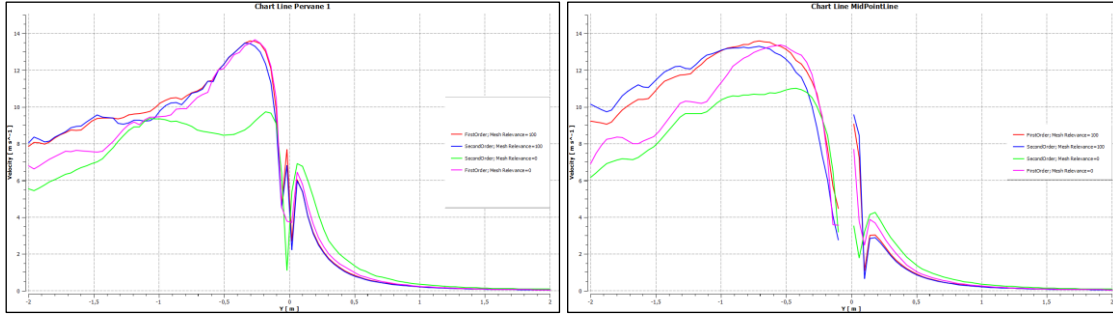
Simülasyonların çözüm yöntemlerini yapılandırmak ve çözüm algoritmalarını belirlemek için kullanılan Çözüm Yöntemleri (Solution Methods) paneli Şekil 3.25'te gösterilmiştir. Bu panel üzerinde basınç-hız bağlantısı (Pressure-Velocity Coupling) algoritması ile uzamsal ayrıklaştırma (Spatial Discretization) yöntemleri belirlenmiştir. Ayrıca, çözüm doğruluğunu ve yakınsama kararlılığını artırmaya yönelik ek ayarlar da bu panel üzerinden gerçekleştirilmektedir.

Çözüm yöntemlerinde basınç-hız bağlantısı olarak SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations), SIMPLEC (SIMPLE-Consistent) ve Coupled algoritmaları kullanılmıştır. Uzamsal ayrıklaştırma yöntemleri olarak First Order (Upwind) ve Second Order (Upwind) şemaları ile çeşitli denemeler gerçekleştirilmiştir. Denemeler sırasında, çözüm ağındaki eleman sayısının görece az olduğu durumlarda, second order çözümlerinin tercih edilmemesi gerektiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.25. Çözüm Yöntemleri Paneli

Ayrıştırma denemelerinde, çok yoğun ve az yoğun çözüm ağı ile First Order ve Second Order çözümler karşılaştırılmıştır. En iyi sonucu, çok yoğun ağ ile Second Order çözümler, en kötü sonucu Şekil 3.26'daki çizelgede yeşil renk ile gösterilen az yoğun ağ ve Second Order çözümler göstermiştir. Bu çalışmada, Tablo 3.9'da gösterilen çözüm ağı bağımsızlık testlerinde hesaplama kalitesini artırması nedeniyle yoğun ağlar tercih edilmiş ve bu nedenle Second Order çözümler kullanılmıştır. Bu nedenle, HAD simülasyonlarının oluşturulmasında, mesh özellikleri ve çözüm yöntemleri dikkatle değerlendirilmiştir. Ayrıca, HAD çalışmalarında mesh özellikleri ve çözüm yöntemlerinden kaynaklanan sayısal sapmaların da meydana gelebileceği göz önünde bulundurulmalıdır [21, 67]. Bu durum, sonuçların doğruluğunu etkileyen önemli bir faktör olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.26. Ayırıklaştırma

Her bir analizde, uygulanabilir ve pratik olması nedeniyle iterasyon sayısı 10.000 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, her 1000 veya 2000 iterasyon aralığında bir kaydedilmiş ve çözüm süreci boyunca animasyonlar da üretilmiştir. Tüm hesaplamalarda çift hassasiyet (Double Precision) kullanılmış ve çözümler paralel olarak gerçekleştirilmiştir. Dar, orta ve geniş mesafeli dizilimler için, eksenler arası uzaklıkları sırasıyla 50 cm (x2), 75 cm ve 100 cm olan İHA dizilimlerinin HAD simülasyonları yapılmıştır. HAD çözümleri yaklaşık 15 gün sürmüş ve bu süre boyunca bu analizler için toplamda 280 GB'lık veri üretilmiştir. Bunun yanı sıra, çözüm ağı bağımsızlık analizlerinde yaklaşık 200 GB ek veri oluşturulmuştur.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri için yüksek performanslı bilgisayar kullanılmıştır. Bilgisayarda 13. nesil Intel Core i9-13900 işlemci, Nvidia GeForce RTX 470 ekran kartı ve 4800 MHz hızında çalışan 64 GB DDR5 RAM bulunmaktadır. Bu işlemci, 8 performans ve 16 verimlilik çekirdeğiyle toplamda 24 çekirdekli olup 32 mantıksal işlem birimi sunmaktadır. Ayrıca, maksimum turbo frekansı ise 5.4 GHz'e kadar çıkabilmektedir [68-70].

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, sürü dizilimine sahip 4 insansız hava aracının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler grafik ortamında görselleştirilerek değerlendirilmiştir. HAD sonuçlarının işlenmesinde, “Post-Processing” olarak bilinen aşamada CFD Post (v19) yazılımı kullanılmıştır.

Çalışmada, CFD-Post yazılımına özgü kodlar geliştirilmiştir. Bu kodlar, Pearl, CCL (Command Control Language) ve CEL (Custom Expression Language) dilleri kullanılarak yazılmış ve kodlar aracılığıyla düzlemler, çizgiler ve benzeri veri setleri oluşturulmuştur. Bu veri setleri temel alınarak görselleştirmeler ve çizelgeler üretilmiştir.

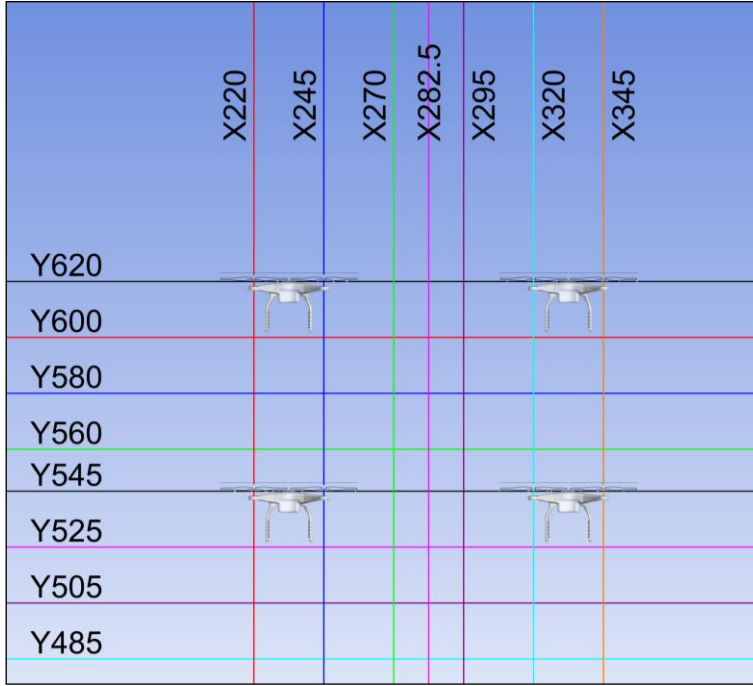
Çalışmada, PERL dili ile yazılan kodlar Visual Studio Code ortamında üretilmiş ve gerekli kütüphaneler Strawberry Perl aracılığıyla yüklenmiştir. Bu süreçte, CPAN (Comprehensive Perl Archive Network) hizmetlerinden yararlanılmıştır. Visual Studio Code ortamında Perl Debugger ve Perl Navigator eklentileri kullanılarak geliştirme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, geliştirme ortamını için IntelliJ IDEA, Komodo IDE 12, Geany ve VSCodium gibi yazılım araçları da kullanılmıştır.

Bölüm 4.1’de , pervane eksenleri arası 75 cm olan orta mesafeli dizilimin HAD sonuçları incelenmiştir. Bu bölümde hız, basınç, türbülans kinetik enerjisi, hücre Reynolds sayısı ve türbülans Reynolds sayısı değerleri verilmiş, akım çizgileri kullanılarak akış yapısı belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, orta mesafeli dizilimin aerodinamik özelliklerini ve akış karakteristiklerini net bir şekilde ortaya koymuştur.

Bölüm 4.2’de ise, rotor eksenleri arası 50 cm, 75 cm ve 120 cm (dikeyde 100 cm) olan dar, orta ve geniş mesafeli dizilimlerin hız, basınç, türbülans kinetik enerjisi, hücre Reynolds sayısı ve türbülans Reynolds sayısı değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Farklı mesafelerdeki dizilimlerin akış yapısına etkileri akım çizgileri yardımıyla incelenmiştir. Rotorların ürettiği akışın hem kendi hem de diğer İHA’lar üzerindeki etkileri görselleştirilmiştir. Sonuçlar, dizilim mesafesine bağlı olarak akış özelliklerindeki değişimi ortaya koymuştur.

4.1. Orta Dizilimin HAD Sonuçları

Bu sonuçlarda, farklı sürü yapıları arasında rotor eksenleri arası uzaklığı 75 cm olan orta yakınlıktaki sürünün HAD sonuçları verilmiştir. HAD simülasyonlarının sonuçlarını oluşturabilmek için veri çizgileri oluşturulmuştur. Şekil 4.1’de ön ve arka pervane eksenleri üzerinden alınan, yatay ve dikey çizgilerden elde edilen veri çizgileri gösterilmiştir.



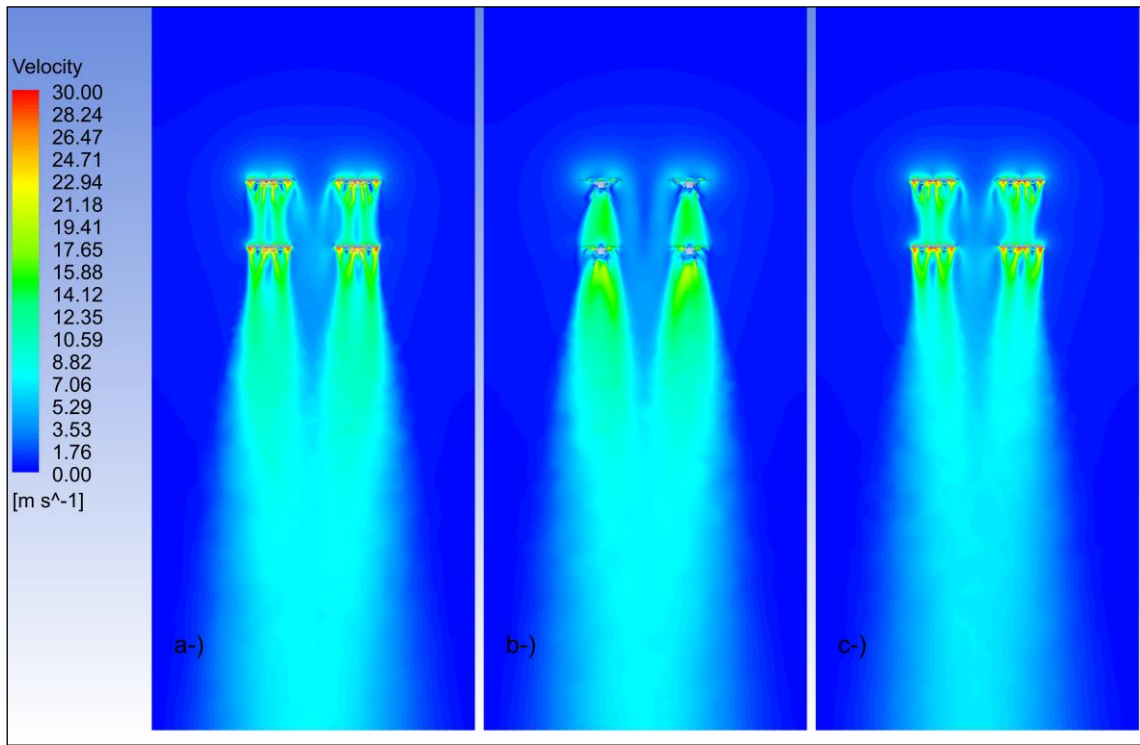
Şekil 4.1. Sürü İHA'ların Dikey ve Yatay Veri Çizgileri

Veri çizgilerinde, ön pervane eksenleri üzerinden elde edilen çiziler “F” tanımlayıcısı ile etiketlenirken, arka pervane eksenleri üzerinden elde edilen çiziler ise “B” tanımlayıcısı ile etiketlenmiştir. Ayrıca, veri çizgilerinde ve grafiklerde aynı renkler kullanılmıştır. Ön ve arka pervane eksenlerinden alınan veriler arasında farklılıklar bulunabilmektedir. Bu nedenle, genel yapıya uyumlu olduğu için, ön pervane eksenlerinden elde edilen veriler tercih edilmiştir.

Şekil 4.1’de, yatay ve dikey veri çizgiler gösterilmiştir. Yatay veri çizgileri; Y genel koordinat değerleriyle birlikte sunulmuş, X değerleri 100 cm ile 465 cm aralığında, Z değerleri ise 245 cm (F) veya 220 cm (B) olarak alınmıştır. Dikey veri çizgileri ise; X genel koordinat değerleriyle birlikte gösterilmiş, Y değerleri 0 cm ile 1000 cm aralığında, Z değeri ise 245 cm (F) veya 220 cm (B) olarak alınmıştır.

Şekil 4.1’de, sol üstte gösterilen X220 ve X245 eksenleri İHA-1 ve İHA-3 pervane eksenlerini; sağ üstte gösterilen X320 ve X345 eksenleri ise İHA-2 ve İHA-4 pervane eksenlerini belirtmektedir. Hız, basınç, türbülans, hücre Reynolds sayısı ve türbülans Reynolds sayısı konturları bu dizilime göre çıkartılmıştır.

İHA’ların ön ve arka pervane eksenleri üzerinde oluşturulan düzlem ile orta noktasında oluşturulan düzlemlerdeki hız dağılımlarının konturları Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekil 4.2-a’da arka pervane düzleminde, b’de orta düzleminde, c’de ise ön pervane düzleminde konturlar oluşturulmuştur.



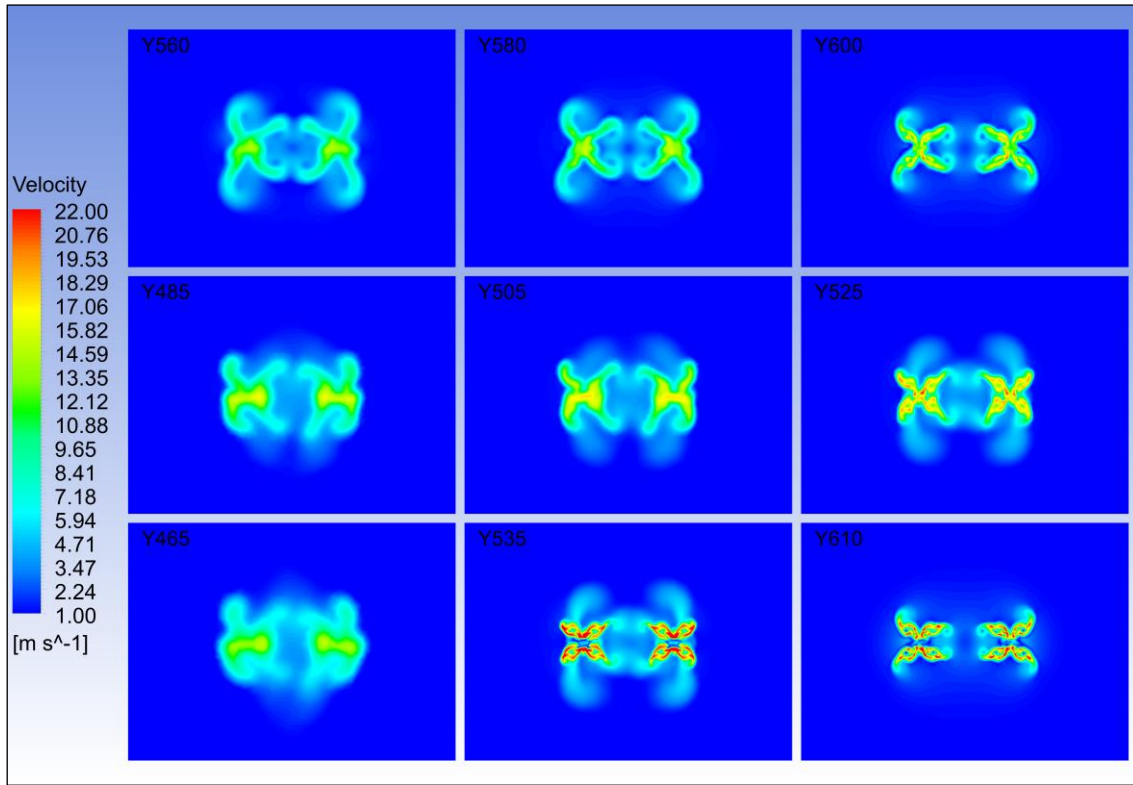
Şekil 4.2. Hız Konturları; a) Arka Düzlem b) İHA’ların Orta Düzlemi c) Ön Düzlem

Hız dağılımlarında, üst sırada bulunan İHA’lar tarafından üretilen hava akımlarından alt sırada bulunan İHA’ların etkilendiği gözlemlenmiştir. Hız konturları incelendiğinde, İHA’ların yaklaşık 2,5-3 metre altındaki hız dağılımlarının, pervane eksenleri boyunca ve İHA’lar arasındaki dikey eksenlerde de homojenlik gösterdiği görülmüştür.

Yatay çizgiler üzerinden oluşturulan hız dağılımları Şekil 4.5’te, dikey çizgiler üzerinden oluşturulan hız dağılımları ise Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Ayrıca, yakın jet akışlarda gözlemlenen “Yakın Alan Karışma Fenomeni (Near-Field Mixing Phenomenon)” olarak adlandırılan olguya benzer bir durumun, İHA’lar tarafından üretilen hava akışında da

meydana geldiği tespit edilmiştir [71]. Bu çalışmada, yakın İHA etkileri araştırılması sonucunda ortaya çıkan bu yeni olgu “Yakın-İHA Fenomeni” olarak tanımlanmıştır.

Şekil 4.3’te, dikey düzlemler üzerinden elde edilen hız konturları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca bu düzlemlerin konumları Şekil 4.1’de gösterilmiştir. Bu düzlemlerde gösterilen üst ve alt sırada konumlanan İHA’ların pervane düzlemlerine göre uzaklıkları, Y560 ve Y485 düzlemleri için 60 cm, Y580 ve Y505 düzlemleri için 40 cm, Y600 ve Y525 düzlemleri için 20 cm, Y535 ve Y610 düzlemleri için ise 10 cm olarak belirtilmiştir. Ayrıca bu konturlarda, hız değer aralıkları 1 m/s ile 22 m/s arasında alınmıştır.

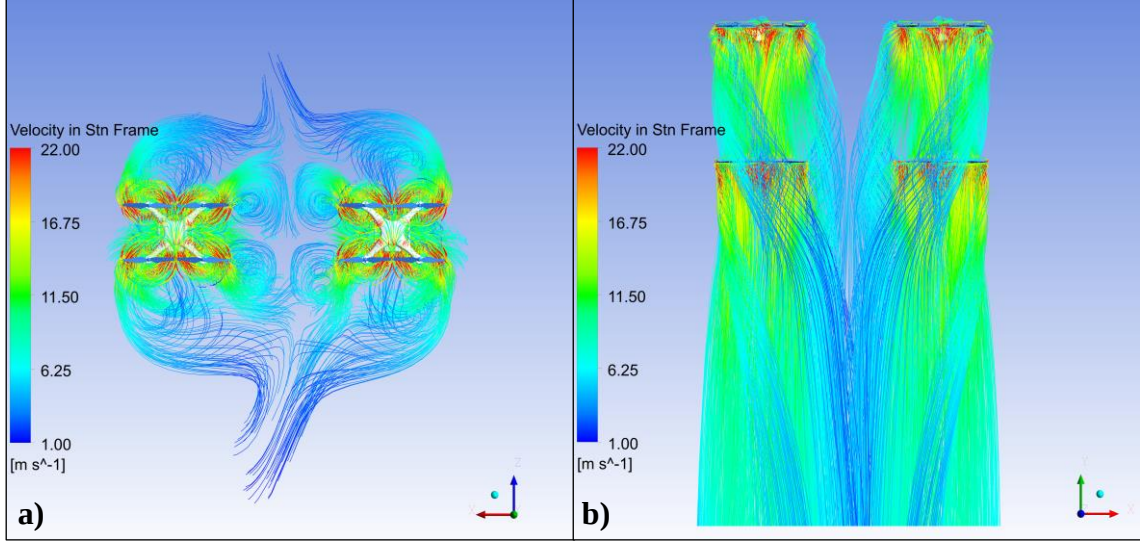


Şekil 4.3. Dikey Düzlemlerdeki Hız Konturları

Pervanelerin 20 cm altında bulunan Y600 ve Y525 dikey düzlemleri incelendiğinde, alt sırada bulunan İHA’ların ardından, Y525’te oluşan hız dağılımının Y600’e göre arttığı açıkça görülmüştür. Üst ve alt sırada bulunan İHA’ların arasında, Y610, Y600 ve Y580 dikey düzlemlerinde girdap oluşumu gözlenmiştir.

Üst sıradaki pervanelerin 60 cm altında bulunan Y560 konturunda, üst sırada konumlanan İHA’ların pervaneleri tarafından oluşturulan dışa doğru yönelen hava akımı, araçlar

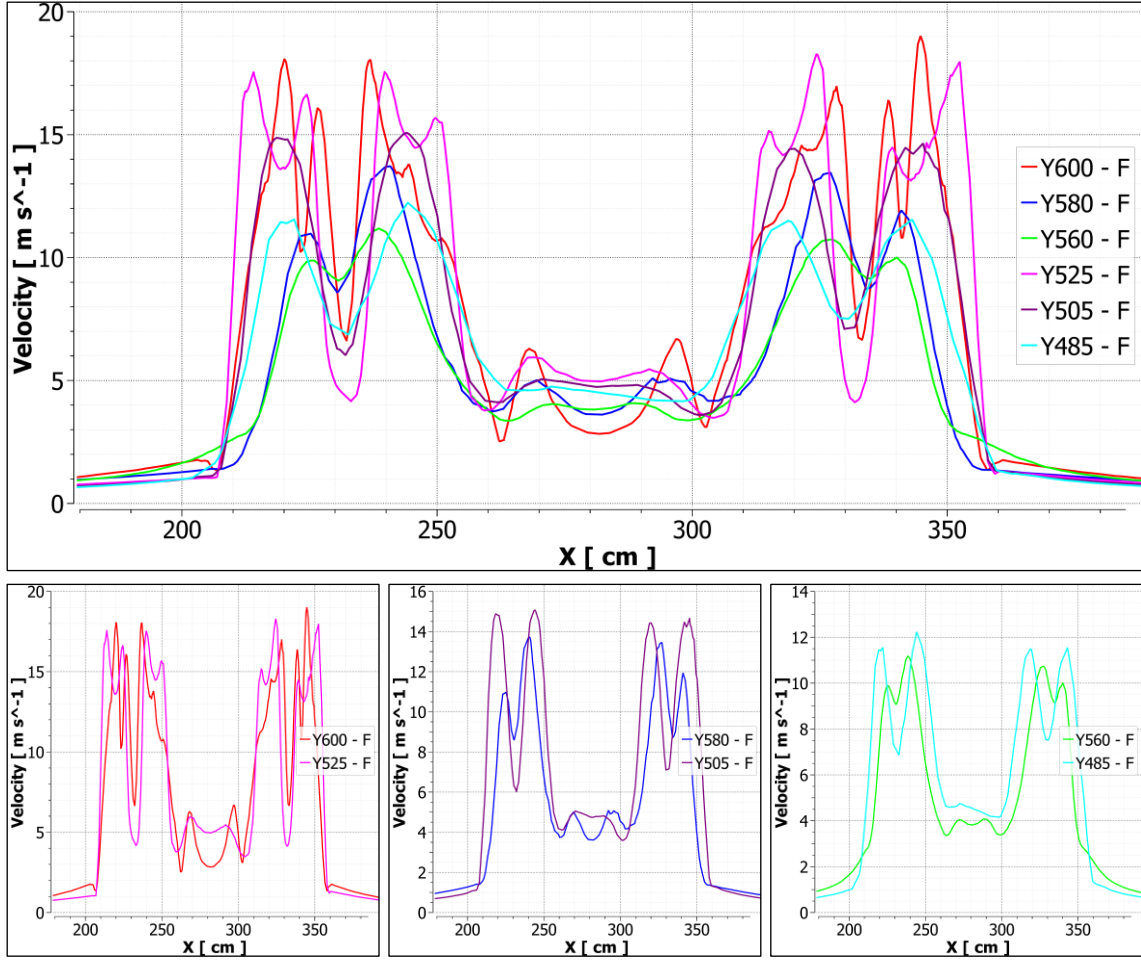
arasından geçerek alt sıradaki İHA'ların oluşturduğu hava akımıyla etkileşime girmiş ve bu süreçte Y505 düzlemine kadar dağılım gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 4.4'te akım çizgileri ile bu akış dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Akım Çizgileri; a) Üstten Görünüş b) Önden Görünüş

Şekil 4.4'te İHA'lar tarafından oluşturulan akım çizgileri gösterilmiştir. Şekil 4.4-a'da üstten görünüş, b'de ise akım çizgilerinin önden görünüşü sunulmuştur. İHA'ların çevresinde akım çizgileri oluşturulmuştur. Oluşturulan bu akım çizgilerinin izlediği yollar ve oluşan hareket izleri tespit edilmiştir. Aynı zamanda hareket izleri boyunca meydana gelen hız değişimleri de akım çizgileriyle birlikte gösterilmiştir. İHA'ların arasında gelişen türbülans oluşumu, Şekil 4.4-a'da üstten görünümde net bir şekilde gözlemlenmiştir. Ayrıca, akım çizgileri incelendiğinde, üstteki İHA'ların dış pervaneleri tarafından üretilen akışın araçlar arasından geçtiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.5'te yatay çizgiler üzerinden oluşturulan ön pervane düzlemine ait hız grafikleri gösterilmiştir. İHA pervanelerinin dönme merkezlerinden 20 cm altında bulunan Y600 ve Y525 yatay çizgileri üzerinde, ölçülen hız değerleri yaklaşık 18-19 m/s civarlarındadır. Pervanelere olan yakınlıktan ötürü bu bölgelerdeki hız dağılımları artmıştır.



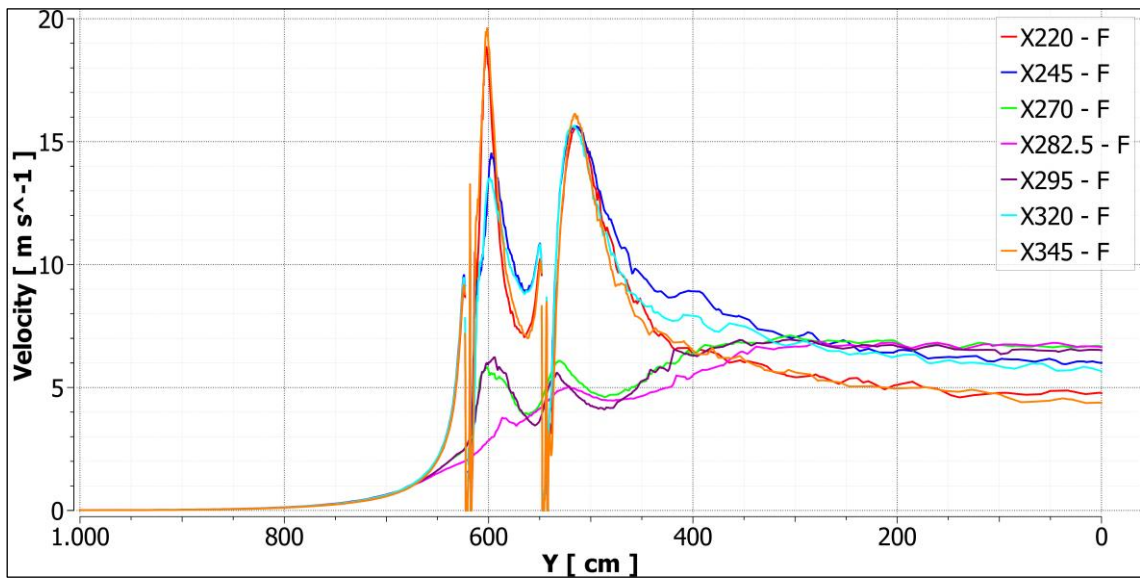
Şekil 4.5. Yatay Çizgiler Üzerindeki Hızlar

İHA pervanelerinin dönme merkezlerinden 40 cm altında yer alan Y580 ile Y505 çizgileri üzerinden ölçülen hız değerleri, üst sırada konumlanan İHA'larda yaklaşık 14 m/s olurken, alt sırada konumlanan İHA'larda ise yaklaşık 15 m/s olarak ölçülmüştür. Pervanelere yaklaştıkça hız dağılımında artış gözlenmiştir. Ayrıca, yatayda bitişik olan araçlar arasındaki hava akışı incelendiğinde (x: 250 ile 310 cm arasında), hız dağılımlarında artış tespit edilmiştir.

İHA pervanelerinin dönme merkezlerinden 60 cm altında yer alan Y560 ile Y485 çizgileri incelendiğinde; aşağı yönlü akışın etkisiyle Y485'teki hız dağılımının Y560'a kıyasla arttığı saptanmıştır. Y560 üzerinde ölçülen hız yaklaşık 11 m/s olur iken, Y485 üzerinde ölçülen hız yaklaşık 12 m/s'ye kadar yükselmiştir. Grafikteki tüm yatay çizgiler incelendiğinde, üst sırada konumlanan İHA'ların oluşturduğu hava akımından, alt sıradaki İHA'ların belirgin bir şekilde etkilediği gözlemlenmiştir. Bu durum, akım

izgilerinde ve akış dağılımlarında açıkça görülmüş ve ortalama hızlarda artışların meydana geldiği tespit edilmiştir.

şekil 4.6’da dikey veri çizgileri üzerindeki hız dağılımları gösterilmiştir. Dikey izgiler, X220 ile X345 arasında n pervane eksenleri üzerinden alınmıştır. Pervane eksenlerine X220, X245, X320 ve X345 dikey çizgileri karşılık gelirken, İHA ’ların ortasında bulunan dik çizgileri tanımlamak içinse, X270, X282.5 (orta nokta) ve X295 dikey çizgileri kullanılmıştır. Ayrıca, şekilde gösterilen hız grafiğinde Y değeri 620 cm ve 545 cm olduğu nokta, pervanelerin dönme merkezlerine karşılık gelmektedir.



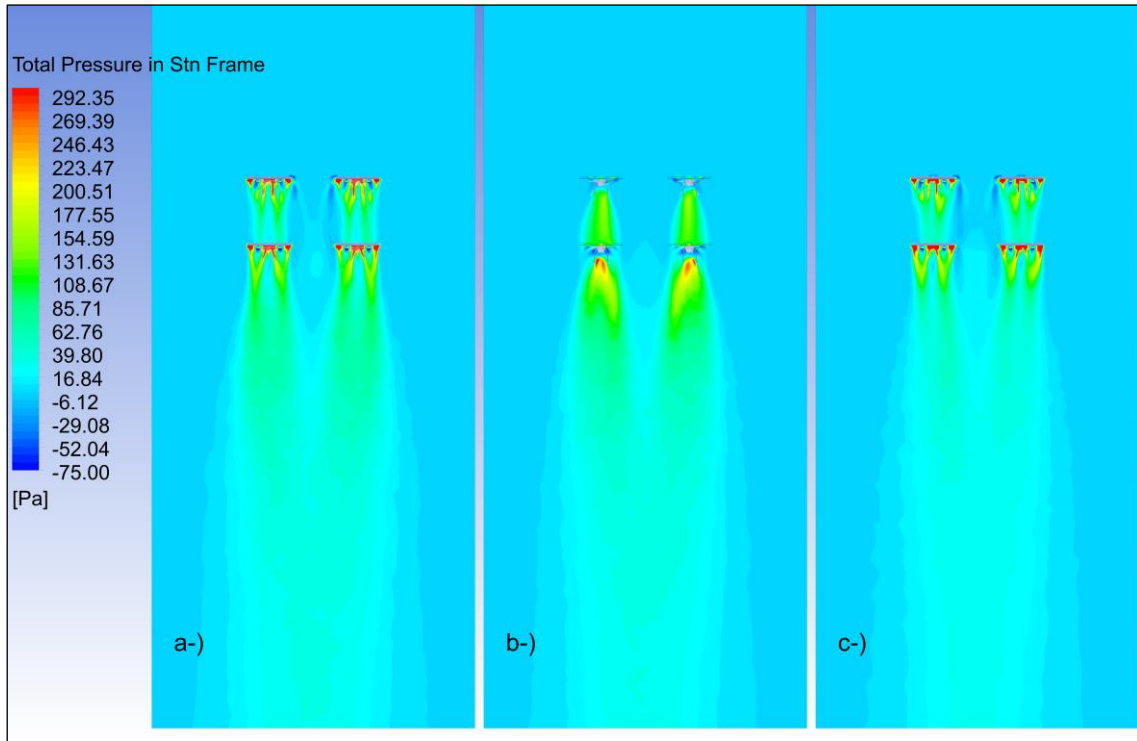
şekil 4.6. Dikey çizgiler zerindeki Hızlar: n Pervane Eksenleri

Dikey çizgilerden elde edilen hızların grafiği incelendiğinde (şekil 4.6); st sıradaki İHA ’ların 20 cm altındaki konumda, Y değeri 600 cm olduğu noktada, X220 ve X345 çizgileri üzerinde yaklaşık 19 m/s, X245 ve X320 çizgileri üzerinde ise yaklaşık 14 m/s’ye kadar ulaştığı grlmştir. Alt sıradaki İHA ’ların 20 cm altında, Y değerinin 525 cm olduğu noktada X220, X245, X320 ve X345 çizgileri üzerinde hız yaklaşık 15 m/s olurken, Y değeri yaklaşık 515 cm olduğu noktada hız en yüksek değere ulaşmış ve yaklaşık 15,5 m/s’ye kadar çıkmıştır.

şekil 4.5’te yatay olarak ve şekil 4.6’da ise dikey olarak incelendiğinde İHA ’ların arasında gelişen hız dağılımı, pervane eksenine yakın X270 ve X295 çizgileri üzerinde hızlar 7 m/s’ye, İHA ’ların tam ortası olan X282.5 çizgisinde ise 4 m/s’ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir. İHA sürüsünün yaklaşık 2,5 metre altında gelişen hava akımı,

Y değerinin 300 cm olduğu noktada, pervane eksenlerindeki akışa doğru yaklaşmış ve bu bölgede hız değerleri 7 m/s ile 8 m/s aralığına ulaşmıştır. Ek olarak, Y değeri 0 cm'e doğru yaklaşırken, dış eksenlerdeki (X345-X220) hızın, diğer çizgilerle karşılaştırıldığında yaklaşık 1 m/s daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular sonucunda; İHA sürülerinin yakın mesafeli uçuşlarının, hız dağılımları üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Şekil 4.7-a'da İHA'ların arka pervane düzenlemelerinden, b'de orta düzleminden, c'de ise ön pervane düzleminden elde edilen toplam basınç konturları karşılaştırılmalı olarak gösterilmiştir.

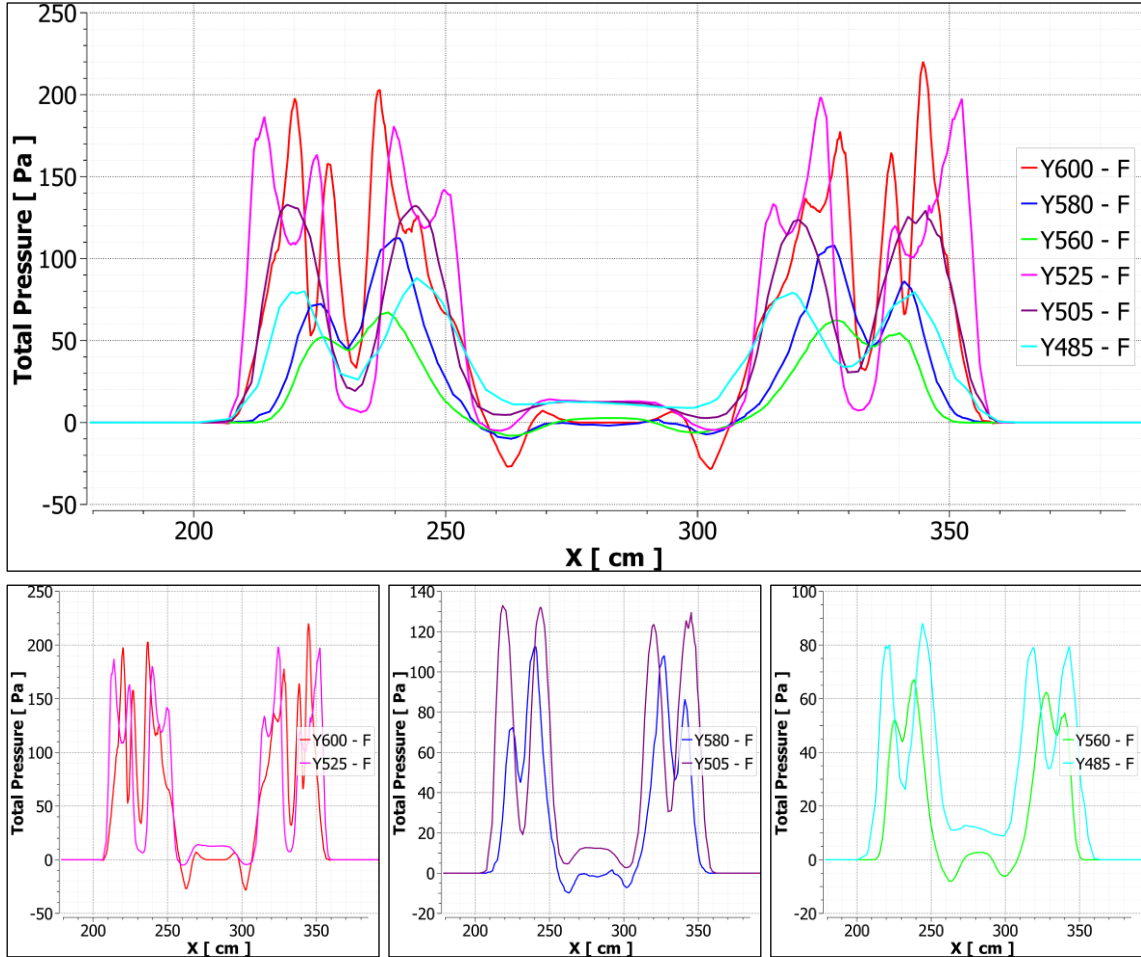


Şekil 4.7. Toplam Basınç Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem

Toplam basınç konturları incelendiğinde; İHA'ların ortasında düşük basınç alanlarının olduğu görülmüştür. Karşılıklı pervane yüzeyleri incelendiğinde, üst sırada bulunan İHA'ların yaklaşık -50 Pa değerinde bir basınç oluşturduğu gözlemlenmiştir.

Öngörüldüğü üzere, üst sırada konumlandırılan İHA'ların ürettiği hava akımlarından, alt sırada konumlandırılan İHA'ların etkilendiği bulunmuştur. Bununla birlikte İHA'ların, birbirlerine olan yatay yakınlıklarından ötürü, aralarında gelişen hava akışından da etkilendiği tespit edilmiştir.

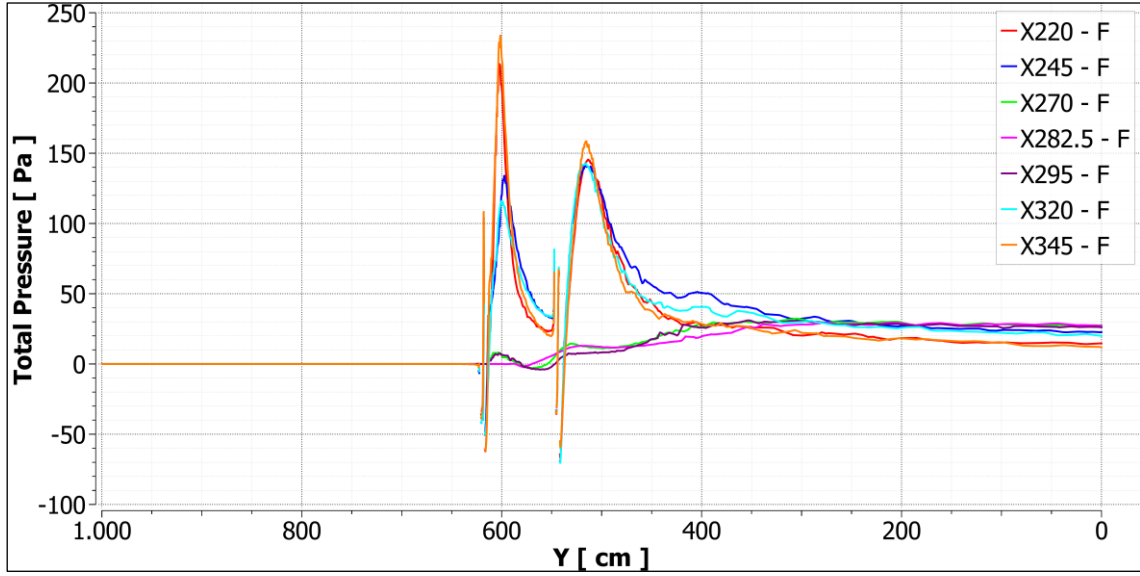
Sürü dizilimin yatay çizgiler üzerinde oluşan toplam basınç dağılımları Şekil 4.8’de gösterilirken, dikey çizgiler üzerinde, oluşan toplam basınç dağılımları ise Şekil 4.9’da gösterilmiştir. Toplam basınç değeri İHA’ların 2,5 metre altında yaklaşık 40 Pa olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.8. Yatay Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Dağılımı

Şekil 4.8’de yatay çizgiler üzerinden alınan değerler ile oluşturulan toplam basınç dağılımları gösterilmiştir. İHA pervanelerinin dönme merkezlerinden 20 cm altında bulunan Y600 ve Y525 yatay çizgileri incelendiğinde; X değeri 220 cm ve 345 cm olduğunda Y600 çizgisi üzerinde ölçülen basınç değeri 200 Pa üzerine çıkarken, Y525 çizgisinde ise ölçülen basınç değerinin yaklaşık 130 Pa olduğu kaydedilmiştir. X değerinin 245 cm ve 320 cm olduğunda, Y600 ve Y525 yatay çizgilerinde yaklaşık 120 Pa değeri ölçülmüştür. Pervanelerinin dönme merkezlerinden 40 cm altında bulunan çizgilerde toplam basınç değeri en fazla, Y580 çizgisinde 110 Pa, Y505 çizgisinde ise 130 Pa olarak ölçülmüştür. Aşağı yönlü akış ilerledikçe toplam basınç çizgilerinde,

dağılımların yayıldığı görülmüştür. Dönme merkezlerinin 60 cm altında bulunan Y560 ile Y485 çizgilerinde ise toplam basınç, üst sıradaki İHA'ların aşağısında bulunan Y560 çizgisinde 65 Pa basıncın altında okunurken, alt sıradaki İHA'ların aşağısında bulunan Y485 çizgisinde 85 Pa basınca kadar yükselmiştir.



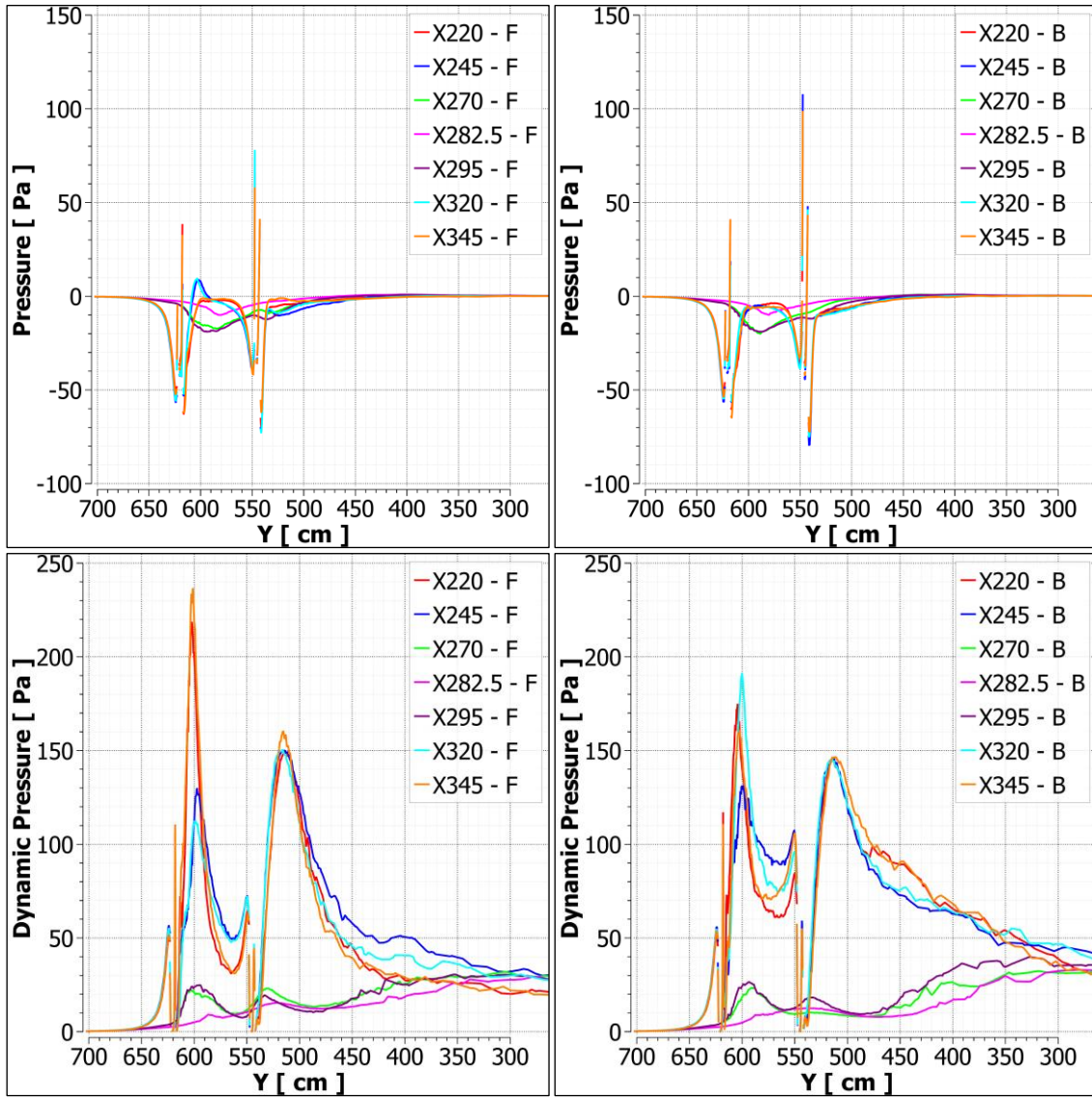
Şekil 4.9. Dikey Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Dağılımı

Şekil 4.9'da dikey çizgiler üzerinden elde edilen toplam basınç grafiği gösterilmiştir. Bu grafikte veri çizgilerinin konumları Şekil 4.1'de de belirtilen X220 ve X345 arasından alınmıştır. Üst sırada bulunan İHA'ların altında, toplam basınç değeri Y eksenini 620 cm ile 600 cm aralığında artış göstermiştir. Y ekseninin 600 cm olduğunda toplam basınç, dış pervane eksenleri olan X220 ve X345 çizgilerinde 210 Pa üstünde ölçülürken, iç pervane eksenleri olan X245 ve X320 çizgilerinde ise yaklaşık 125 Pa olarak ölçülmüştür. Y eksenini 580 cm seviyesinde toplam basınç 100 Pa değerinin altında kalırken 560 cm seviyesinde ise ~40 Pa seviyesine düşmüştür. Alt sırada konumlandırılan İHA'ların altında; 525 cm seviyesinde yaklaşık 120 Pa, 515 cm civarında ise yaklaşık 145 Pa okunmuştur. Sürü diziliminin altında, 300 cm seviyesinde ise pervane eksen çizgilerinde toplam basınç değerleri 30 ile 40 Pa aralığında değişiklik göstermiştir.

Orta eksenler; X270, X282.5, X295 çizgilerinde üst sırada konumlandırılmış İHA'ların altında, Y=600 cm seviyesinde olan basınç yaklaşık 10 Pa olarak ölçülmüş ve alt sırada konumlandırılan İHA'lara doğru gidildikçe oluşan vakum bölgeleri gözlemlenmiştir. Sürü diziliminin altında, Y değeri 300 cm seviyelerine doğru ilerledikçe, orta eksenler ile

pervane eksen çizgilerinin benzer değerlere yaklaştığı görülmüştür. Toplam basınç dağılımlarının sürüden uzaklaştıkça homojen hale geldiği görülmüştür.

Şekil 4.10’da ön ve arka pervane eksenleri boyunca oluşturulan basınç ve dinamik basınç grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu grafiklerde, ön düzlemlerden okunan değerleri belirtmek için “F”, arka düzlemlerden okunan değerleri belirtmek içinse “B” tanımlayıcısı kullanılmıştır. Ayrıca, Y ekseninin değer aralığı 700 cm ile 300 cm arasında alınmıştır.

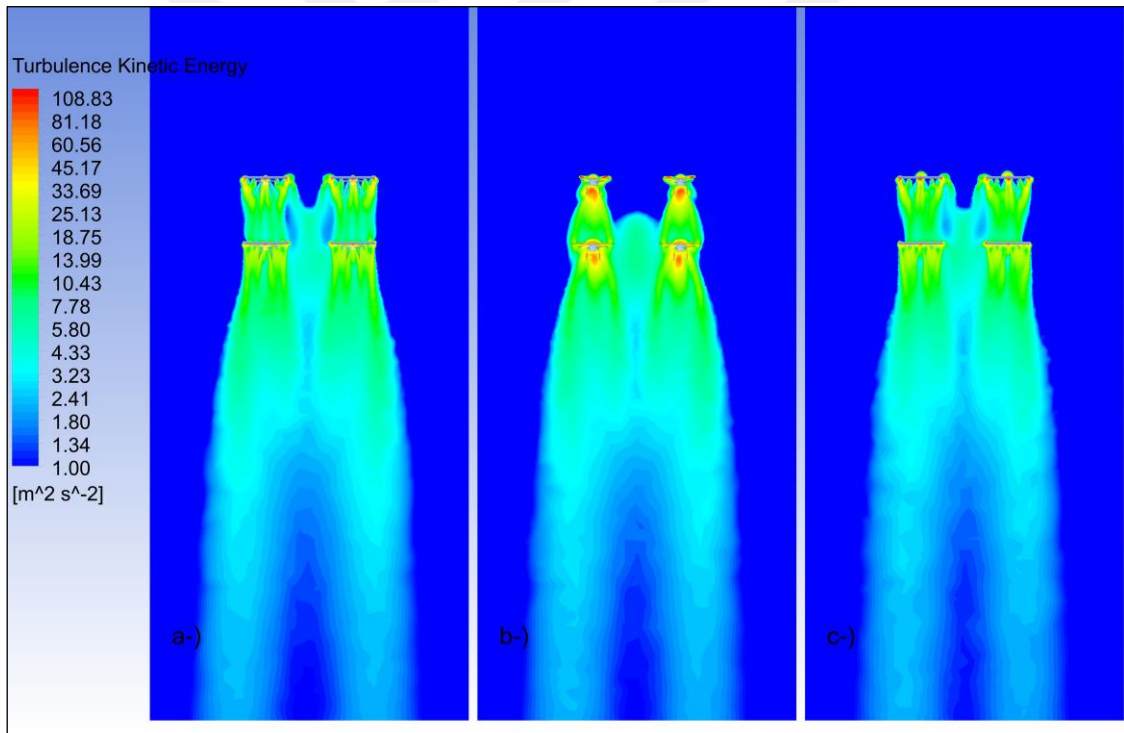


Şekil 4.10. Dikey Çizgiler Üzerindeki Basınç ve Dinamik Basınç Dağılımları

Dinamik basınç, Y=600 cm seviyesinde F çizgileri üzerinde 200 Pa üstüne çıkarken, B çizgilerinde ise 200 Pa altında seyretmiştir. Y, 520 cm değerinde, F çizgilerinde 150 Pa

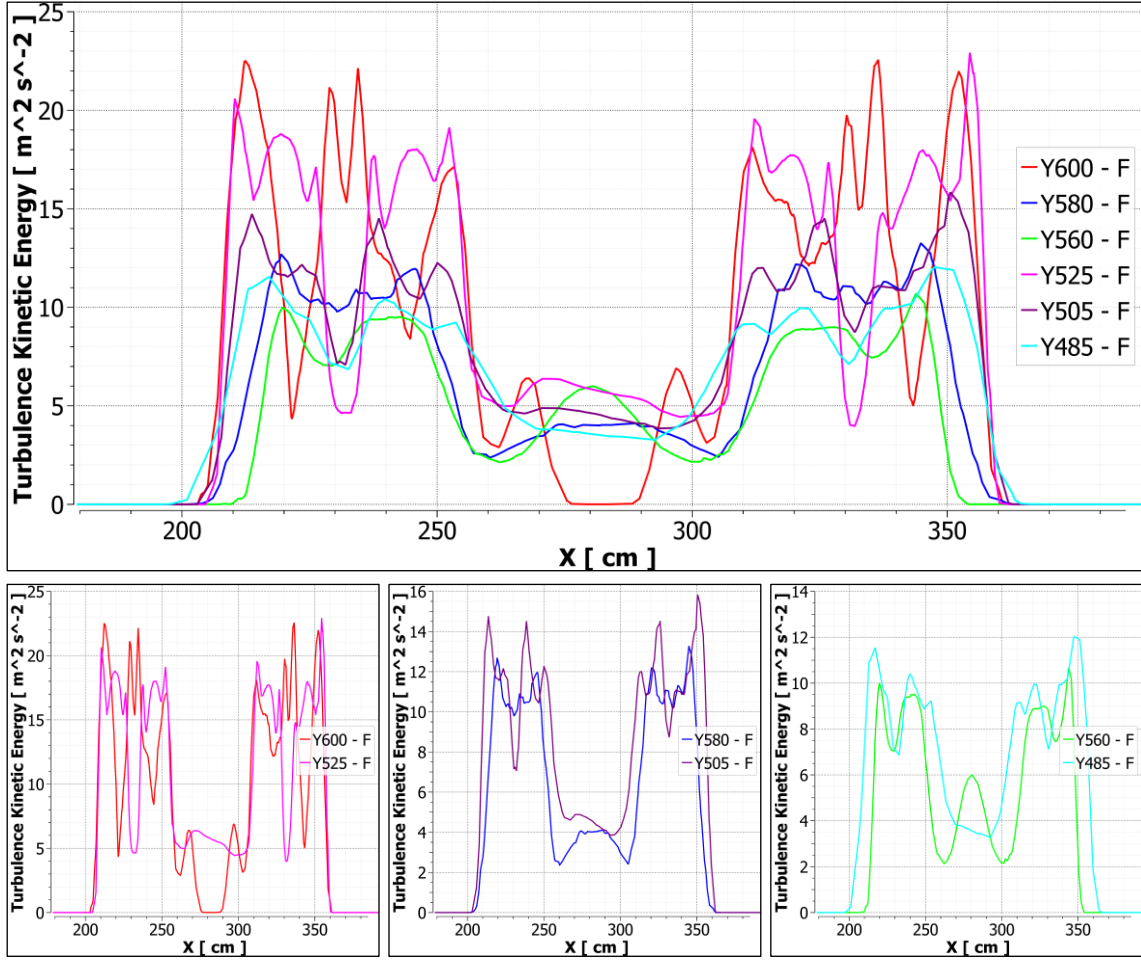
basınca kadar çıkarken, B çizgilerinde ise 150 Pa değerinin altında kalmıştır. 400 cm seviyesinde ise F çizgilerinde 50 Pa basıncın altıyken B çizgilerinde 50 Pa basıncın üstünde kalmıştır. Basınç grafiği incelendiğinde, ön ve arka eksen düzlemlerinde benzerlikler görünse de İHA'ların yapısal tasarımına bağlı olarak ön ve arka eksenlerde okunan değerler arasında, özellikle de arka eksen değerlerinde farklılıklar oluşmuştur.

Şekil 4.11-a'da arka rotor düzleminde, b'de İHA'ların orta düzleminde, c'de ise ön rotor düzleminde oluşturulan Türbülans Kinetik Enerji (TKE) konturları gösterilmiştir. Bu konturlarda, İHA'lar arasında türbülans kinetik enerjisinde artış görülmüştür. Orta düzlem üzerinden alınan konturda, İHA gövdelerine yakın bölgelerde türbülans kinetik enerjisinin $80 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye kadar çıkabildiği tespit edilmiştir. Özellikle, pervaneler altında gelişen akış dinamikleri nedeniyle türbülans kinetik enerjisinin en yüksek seviyelerine İHA gövdesi altında ulaşıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 4.11. Türbülans Kinetik Enerji Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem

İHA'ların yatay veri çizgileri üzerinden elde edilen türbülans kinetik enerjisi dağılımları Şekil 4.12'de, dikey veri çizgileri üzerinden elde edilen türbülans kinetik enerjisi dağılımları ise Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



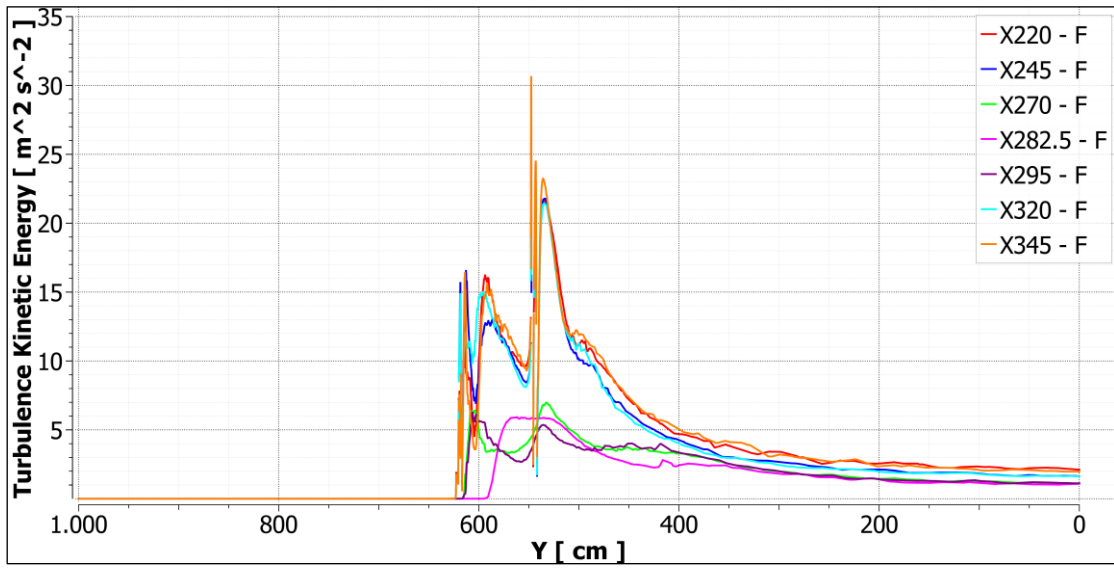
Şekil 4.12. Yatay Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerjisi Dağılımları

Şekil 4.12’de, yatay çizgiler üzerinden oluşturulan türbülans kinetik enerjisi dağılımı gösterilmiştir. Üst ve alt sırada bulunan İHA’ların pervane dönme merkezlerinden itibaren, Y600 ve Y525 çizgileri 20 cm, Y580 ve Y505 çizgileri 40 cm, Y560 ve Y485 çizgileri ise 60 cm aşağıda olacak şekilde tanımlanmıştır. Ayrıca, bu grafiklerde pervanelerin dönme merkezlerinin konumları X değerleri 220 cm ve 245 cm ile 320 cm ve 345 cm olan noktalar üzerinde tanımlanmıştır.

Türbülans kinetik enerji çizelgeleri incelendiğinde, İHA’ların tam ortasına denk gelen X değeri 282,5 cm noktasında türbülans kinetik enerji değerinin Y600 çizgisinde yaklaşık sıfır olduğu, Y580 çizgisinde $4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ’ye, Y560 çizgisinde ise $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ’ye kadar yükseldiği görülmüştür. Alt sıradaki İHA’ların altında ise, X değeri 282,5 cm olduğu noktada türbülans kinetik enerjisi Y525 çizgisinde $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Y505 çizgisinde yaklaşık $4,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$; Y485 çizgisinde ise tekrar $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ’ye kadar çıkmıştır. Ayrıca Y580 çizgisinde gelişen türbülans kinetik enerjisi dağılımının, Y560 çizgisine doğru yayıldığı ve X değerinin

260 cm ve 305 cm olduğu noktalarda benzer değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra, üst ve alt sıradaki İHA'ların 60 cm altındaki Y560 ve Y485 çizgilerinde, türbülans kinetik enerji genel dağılımının Y485'te, Y560'a göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.13'te dikey çizgiler üzerinden elde edilen türbülans kinetik enerjisi dağılımı gösterilmiştir. Üst sırada bulunan İHA'ların pervane dönme merkezlerinde, Y değeri 620 cm olarak tanımlanırken, alt sırada bulunan İHA'ların pervane dönme merkezlerinde, Y değeri 545 cm olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.13. Dikey Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerjisi Dağılımı

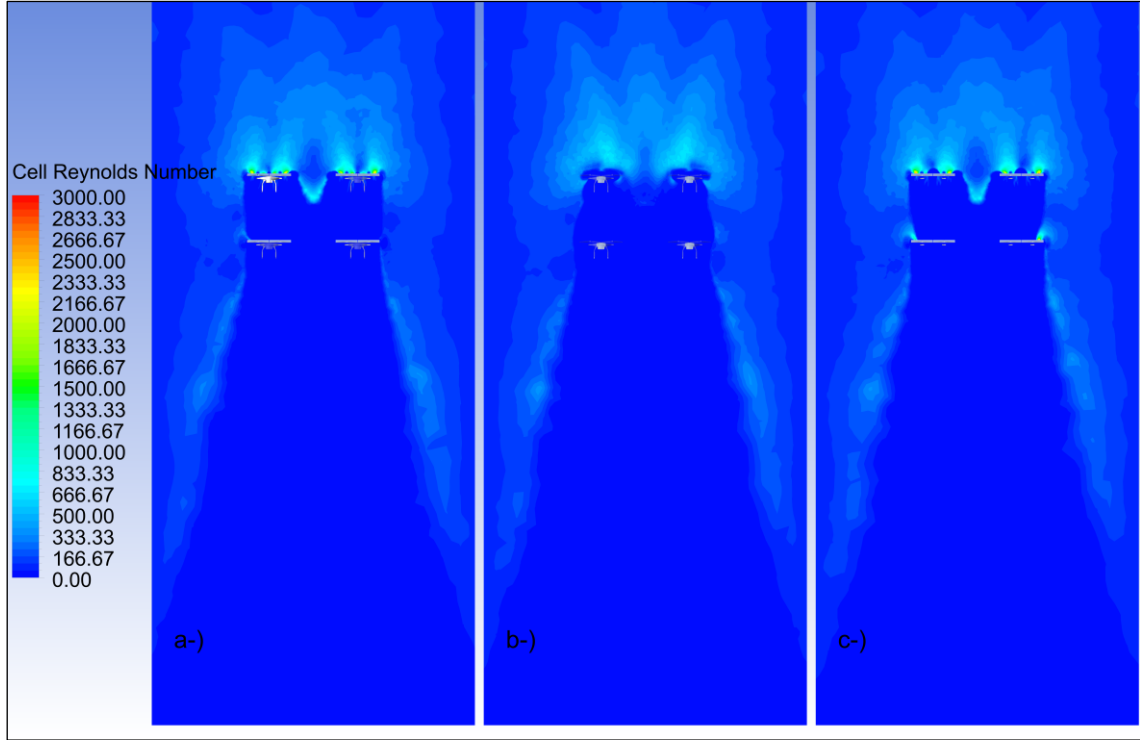
Üst sırada konumlanan İHA'ların ardından türbülans kinetik enerjisi 16 m²/s² değerine ulaşırken, alt sırada konumlanan İHA'ların ardından türbülans kinetik enerjisi 20 m²/s²'yi aştığı gözlemlenmiştir. İHA'lar arasındaki bulunan X270, X282.5, X295 çizgilerinde ise türbülans kinetik enerjisi 6 m²/s² değerine kadar ulaşmıştır. Ayrıca, sürü tarafından oluşan türbülans kinetik enerjisi, Y 400 cm seviyesinde 5 m²/s²'nin altına gerilediği görülmüştür.

Şekil 4.14'te, hücre Reynolds sayısı gösterilmiştir. Hücre Reynolds sayısı, her bir hücredeki (çözüm ağı içerisinde) yerel akış özelliklerini tanımlamaktadır [72, 73]. Hücre Reynolds sayısı şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$Re_{Hücre} = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu} \quad (4.1)$$

Bu bağıntıda, akışkanın hücre içerisindeki yoğunluğu ρ (kg/m³), hücredeki karakteristik hızı u (m/s), hücrenin karakteristik boyutu d ve akışkanın dinamik viskozitesi μ (Pa·s) olarak tanımlanmaktadır.

Hücrenin karakteristik boyutu, iki boyuta hücre hacminin karekökü alınarak bulunmakta, üç boyutlu veya eksenel simetri durumlarında ise hücre hacminin küp kökü alınarak hesaplanmaktadır.



Şekil 4.14. Hücre Reynolds Sayısı Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem

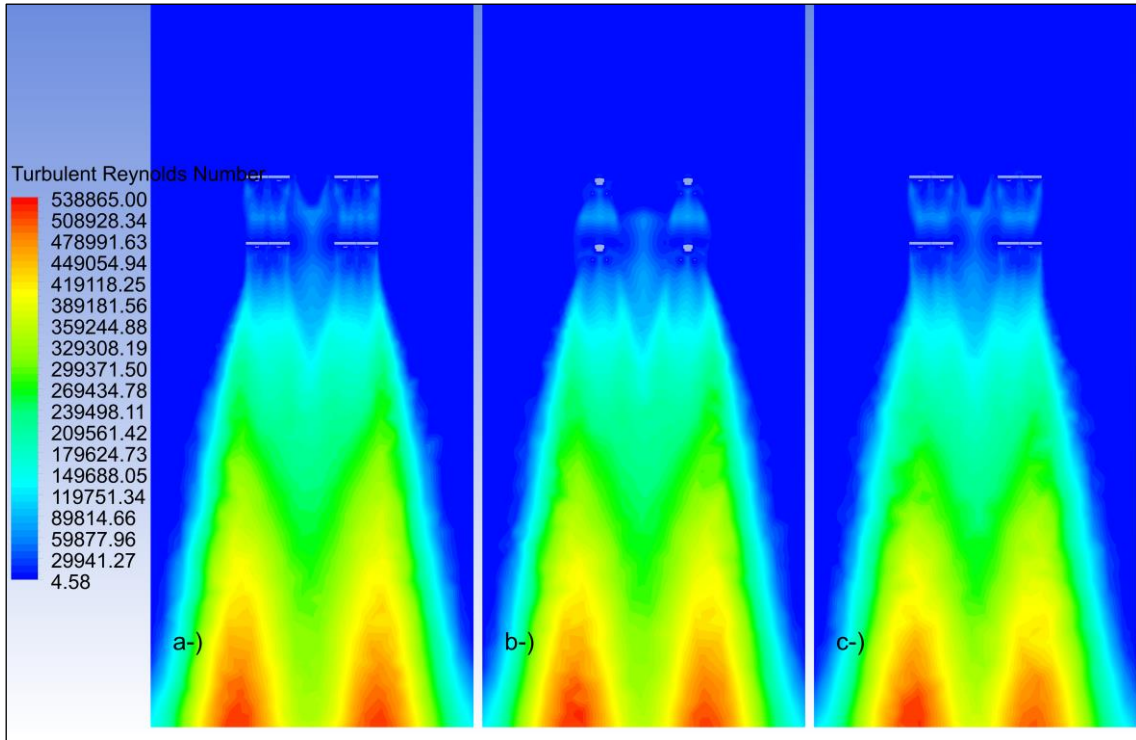
Şekil 4.14-a'da İHA'ların arka düzleminde, b'de orta düzleminde, c'de ise ön düzlem üzerinden oluşturulan hücre Reynolds sayısı, konturlar ile gösterilmektedir. Pervanelere doğru hücre Reynolds sayılarının arttığı görülmüştür. İHA'ların arasında ve alt sıradaki İHA'ların yanlarında gelişen hücre Reynolds sayısı yaklaşık 1800 olmuştur. Pervane uçlarına doğru ise yaklaşık 2800 olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.15'te Türbülans Reynolds sayısı gösterilmiştir. Türbülans Reynolds sayısının hesaplanmasında, standart k- ϵ türbülans modeli içerisinde yer alan iki terim, k ve ϵ terimleri kullanılmaktadır [73-75]. Bu model doğrultusunda, türbülans Reynolds sayısı, şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$Re_{Türbülans} = \frac{\rho \cdot u_t \cdot l}{\mu} \quad (4.2)$$

$$u_t = \sqrt{k} \quad , \quad l = \frac{k^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}$$

Burada; akışkanın yoğunluğu ρ (kg/m³), türbülanslı hız u_t , türbülans uzunluk ölçeği l ve dinamik viskozite (Pa·s) μ terimleriyle ifade edilmektedir.



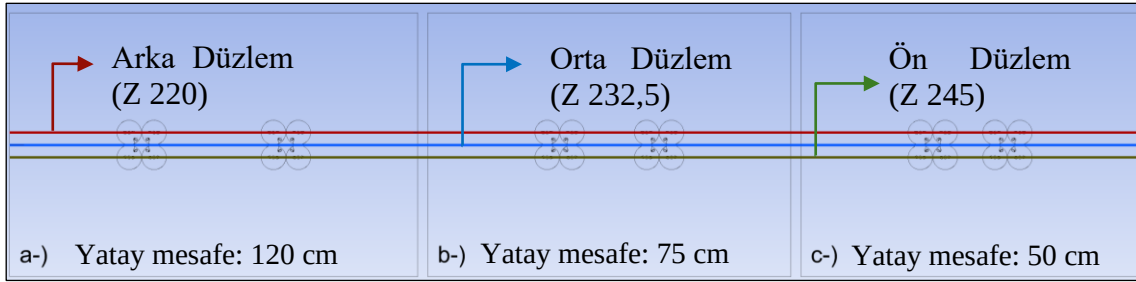
Şekil 4.15. Türbülans Reynolds Sayısı Konturları; a) Arka Düzlem b) Orta Düzlem c) Ön Düzlem

Şekil 4.15-a’da arka düzlemden, b’de orta düzlemden, c’de ise ön düzlemden oluşturulan türbülans Reynolds sayıları gösterilmiştir. İHA’ların üstünde türbülans kinetik enerjisinin düşük olduğu görülmüştür. Buna karşılık, İHA’ların altında ise TKE’nin artması veya ε ’nin azalması türbülans Reynolds sayısı da yükselmesine neden olmuştur.

4.2. Sürü Dizilimlerinin HAD Sonuçları

Bu bölümde, farklı geometrik dizilimlere sahip insansız hava araçları sürülerinin aerodinamik etkileri Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleri kullanılarak analiz edilmiş ve sonuçları incelenmiştir. Sürü dizilimleri, İHA'ların birbiriyle ve ortamdaki etkileşimleri değerlendirmiştir. Dizilimlerin birbirlerine göre yatay ve dikey mesafelerdeki yakınlıkları dikkate alınarak sürüler oluşturulmuştur. Bu çalışmada, sürüler arasında farklı yaklaşma mesafeleri araştırılmıştır.

Şekil 4.16'da her bir sürü diziliminin sonuçlarını değerlendirmek amacıyla ön, orta ve arka düzlemler üzerinden oluşturulan veri düzlemleri gösterilmiştir. Rotor eksenlerinde yatay uzaklıkları 50 cm, 75 cm ve 120 cm olan sürü dizilimleri kullanılmıştır. Bu sürülerden yatay mesafesi 50 cm ve 75 cm olan dizilimlerin, yatay ve dikey mesafeleri eşit olacak şekilde ayarlanmıştır. Yatay mesafesi 120 cm olan dizilim de ise dikey uzaklığı 100 cm olarak sabitlenmiştir. İHA'ların HAD sonuçları, bu düzlemler üzerinden görselleştirilmiştir.

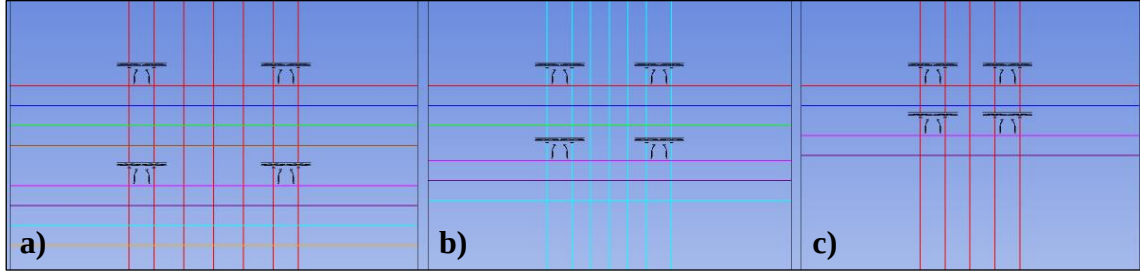


Şekil 4.16. Sürü Dizilimlerindeki Veri Düzlemleri

Şekil 4.16-a'da arka düzlem (Z 220) ile rotor eksenleri arasındaki yatay mesafesi 120 cm olan geniş mesafeli dizilim gösterilmiştir. Şekil 4.16-b'de orta düzlem (Z 232,5) ile rotor eksenleri arasındaki yatay mesafe 75 cm olan orta mesafeli dizilim sunulmuştur. Şekil 4.16-c'de ise ön düzlem (Z 245) ve rotor eksenleri arasındaki yatay mesafesi 50 cm olan dar mesafeli dizilim belirtilmiştir. Bu düzlemler üzerinden geniş, orta ve dar mesafeli dizilimlerin HAD sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Şekil 4.17'de sürü dizilimlerin yatay ve dikey veri çizgileri gösterilmiştir. Bu veri çizgileri, farklı mesafelerde konumlandırılmış İHA'ları incelemek için kullanılmıştır. Dikey veri çizgileri, İHA'ların rotor eksenlerini ve İHA'lar arasındaki akış yapısını değerlendirmek için oluşturulmuştur. Yatay veri çizgileri ise üst ve alt sıradaki İHA'ların

aşağı yönlü akışlarında meydana gelen değişimleri değerlendirmek amacıyla oluşturulmuştur.



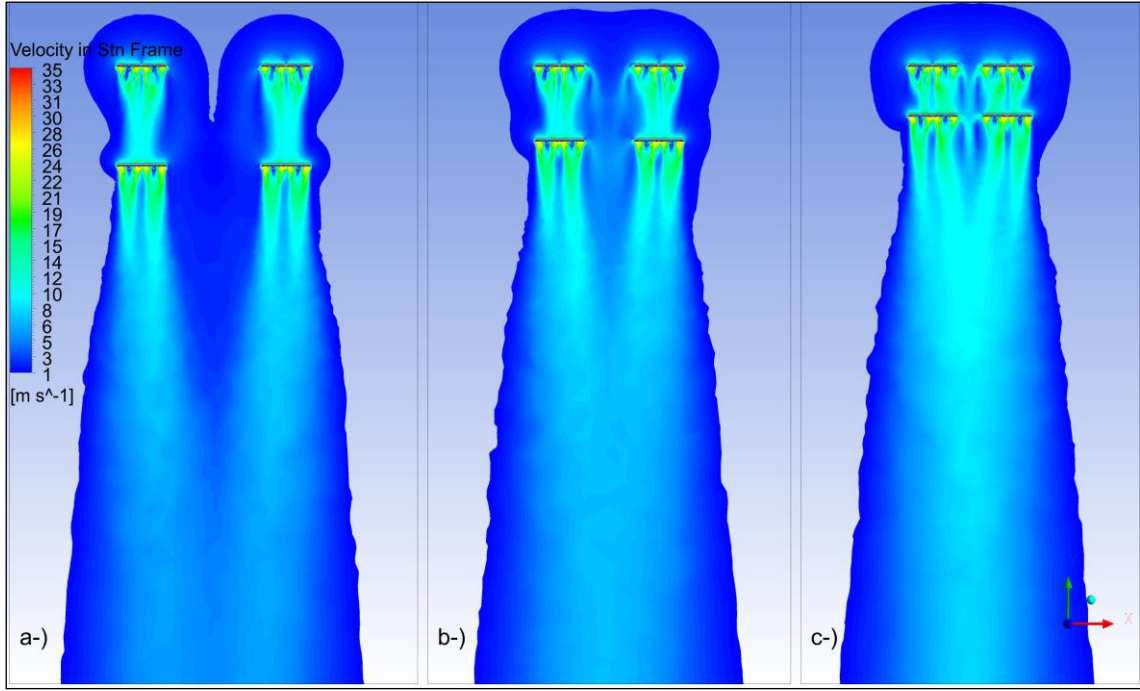
Şekil 4.17. Sürü Dizilimlerinin Dikey ve Yatay Veri Çizgileri

Geniş mesafeli dizilimde (Şekil 4.17-a), dikey veri çizgileri soldaki İHA'ların rotor eksenleri üzerinde X220 ve X245 çizgileri, sağdaki İHA'ların rotor eksenleri üzerinde ise X365 ve X390 çizgileri oluşturulmuştur. İHA'lar arasındaki yaklaşmayı değerlendirmek için X275, X305 (tam orta eksen) ve X335 veri çizgileri ile belirlenmiştir. Yatay veri çizgileri ise, üst sıradaki araçların altından alınan Y600, Y580, Y560 ve Y540 çizgileri ile alt sıradaki araçların altından alınan Y500, Y480, Y460 ve Y440 çizgilerinden elde edilmiştir.

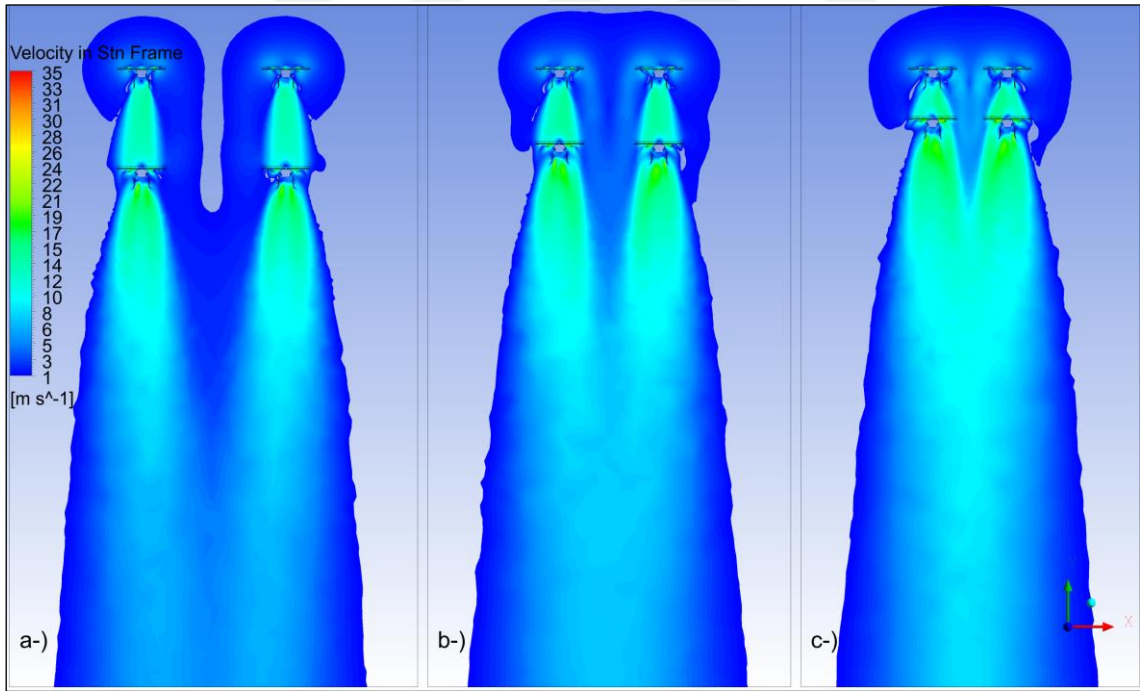
Orta mesafeli dizilimde (Şekil 4.17-b), dikey veri çizgileri rotor eksenleri üzerindeki X220, X245, X320 ve X345 çizgileri ile tanımlanmıştır. Araçlar arasındaki yaklaşmayı değerlendirmek için X263.75, X282.5 (orta eksen) ve X301.25 dikey veri çizgileri oluşturulmuştur. Yatay veri çizgileri ise üst sıradaki araçların altından alınan Y600, Y580 ve Y560 çizgileri ile alt sıradaki araçların altından alınan Y525, Y505 ve Y485 çizgilerinden elde edilmiştir.

Dar mesafeli dizilimde (Şekil 4.17-c), dikey veri çizgileri rotor eksenleri X220, X245, X295 ve X320 çizgileri üzerine yerleştirilmiştir. Araçlar arasındaki orta eksenini temsil eden X270 çizgisi de belirlenmiştir. Yatay veri çizgileri ise üst sıradaki araçların altından alınan Y600 ve Y580, alt sıradaki araçların altından alınan Y550 ve Y530 çizgilerinden oluşturulmuştur.

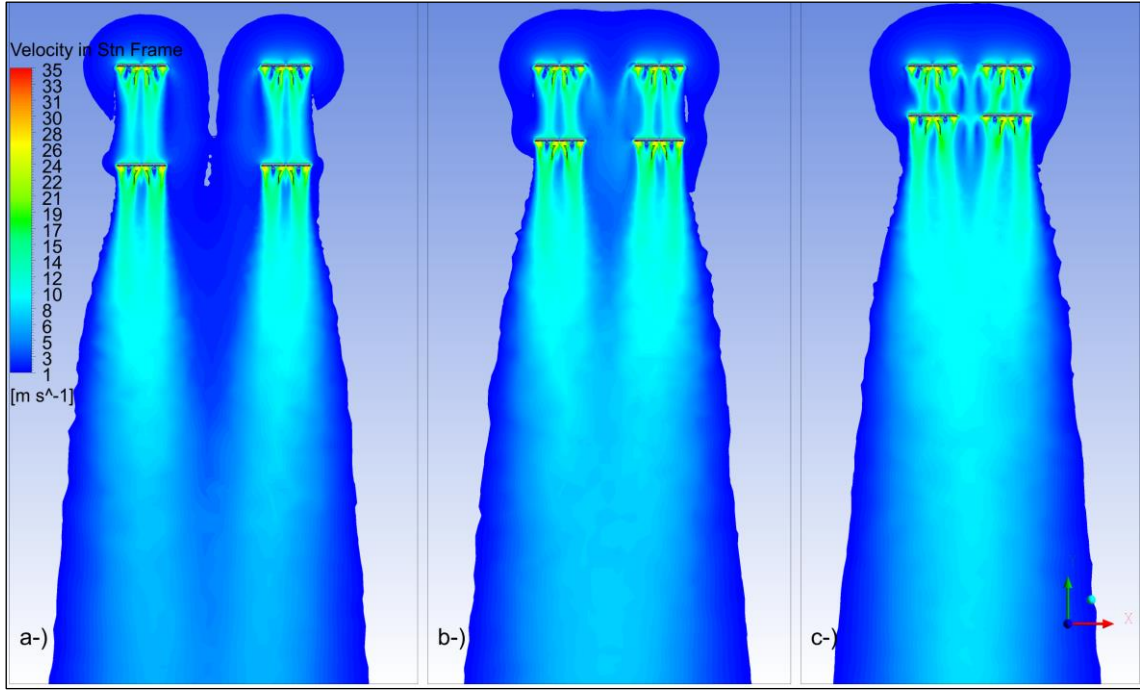
Üç farklı sürü dizilimde ait hız konturları Şekil 4.16'da gösterilen veri düzlemleri kullanarak oluşturulmuştur. Bu hız konturları, ön düzlemden (Şekil 4.18), orta düzlemden (Şekil 4.19) ve arka düzlemden (Şekil 4.20) gösterilmiştir. Her bir düzlemde, üç farklı sürü dizilime ait hız konturları birlikte değerlendirilmiş ve sunulmuştur.



Şekil 4.18. Sürü Dizilimlerinin Hız Konturları; Ön Rotor Düzlemi (Z245)



Şekil 4.19. Sürü Dizilimlerinin Hız Konturları: Orta Düzlem (Z232,5)



Şekil 4.20. Sürü Dizilimlerinin Hız Konturları: Arka Pervane Düzlemi (Z220)

Her bir düzlemde üç farklı sürü dizilimi a, b ve c alt başlıklarıyla tanımlanmıştır. Şekillerde, a alt başlığında rotor eksenleri arasında yatay mesafesi 120 cm olan geniş mesafeli dizilim, b alt başlığında rotor eksenleri arasında 75 cm olan orta mesafeli dizilim ve c alt başlığında rotor eksenleri arasında 50 cm olan dar mesafeli dizilim gösterilmiştir.

Üç düzlem üzerinden oluşturulan hız konturlarında, hız değerlerinin yaklaşık olarak en fazla 35 m/s olduğu tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, konturların değer aralıkları 1 m/s ile 35 m/s arasında belirlenmiş ve konturlar bu değer aralığında kırılmıştır. Şekillerin a alt başlıklarında gösterilen geniş mesafeli dizilimlerinde, İHA'ların yatay olarak birbirleri üzerine etkisinin 1 m/s'den az olduğu yakınlık düzeyi tespit edilmiştir. Geniş mesafeli dizilimin yakınlığı da bu doğrultuda oluşturulmuştur.

İHA'ların farklı sürü dizilimleri için oluşturulan ön, orta ve arka düzlemlerdeki akış davranışları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Hız konturlarında, İHA'ların etkileşim bölgeleri ve hız dağılımlarındaki değişimler net bir şekilde görülmüştür.

Şekillerin a alt başlıklarında, İHA'ların ürettiği hava akımlarının diğer dizilimlere kıyasla daha geniş bir alana yayıldığı görülmüştür. Üst sırada bulunan İHA'ların pervanelerinden çıkan akışın, alt sıradaki araçlara doğru inerken hem dikey hem de yatay doğrultuda homojen bir dağılım sergilemiştir.

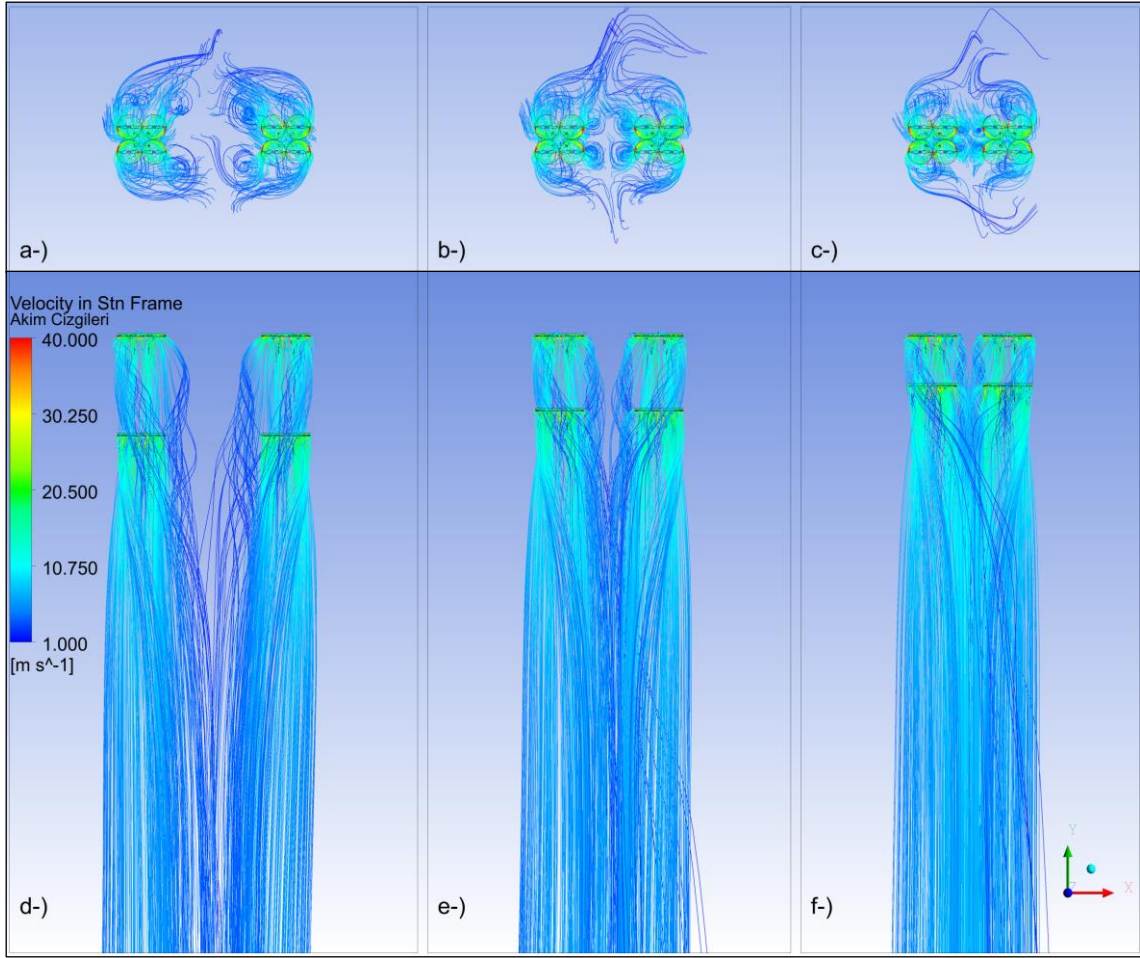
Pervane eksenleri arasındaki mesafenin fazla olması, akışın daha düzenli bir şekilde yayılmasına olanak sağlamıştır. Bununla birlikte, yatay doğrultudaki uzaklığı 120 cm olan İHA'ların birbirleri üzerindeki etkileşiminin, en az seviyede olduğu saptanmıştır. Bu yatay mesafenin azalmasıyla birlikte sürü etkileşiminin arttığı ve akış düzeninin bozulduğu tespit edilmiştir.

Geniş mesafeli dizilimde, ön ve arka düzlemler arasında belirgin bir fark görülmemiştir. Tüm düzlemlerde akışın düzenli ve homojen dağılım sergilediği gözlemlenmiştir. Rotor eksenleri arasındaki mesafenin fazla olması, İHA'ların aşağı yönlü hava akımlarının birbirinden bağımsız bir şekilde ilerlemesini sağlamıştır. Hız konturlarında, akışın geniş bir alana yayıldığı ve İHA'lar arasındaki olumsuz etkileşimlerin azaldığı tespit edilmiştir.

Orta mesafeli dizilimin hız konturlarında, akış düzeninin geniş dizilime kıyasla daha az homojen olduğu gözlemlenmiştir. Rotor eksenleri arasındaki mesafenin azalması, üst ve alt sıradaki İHA'ların hem yatay hem de dikey doğrultuda birbirleriyle etkileşime girmesine neden olmuştur. Ön düzlemden arka düzleme doğru ilerledikçe hız dağılımlarında hafif bir artış olduğu belirlenmiştir. Yatay doğrultuda İHA'ların arasında hız yoğunluğu oluşmuştur.

Dar mesafeli dizilimde, rotor eksenleri arasındaki yakınlık nedeniyle, türbülans etkilerinin arttığı gözlemlenmiştir. Eksenler arasındaki mesafenin azalmasıyla, üst ve alt sıradaki İHA'ların hava akımlarının birbirleriyle etkileşime girmiş ve akışın düzensiz bir yapı sergilemesine yol açmıştır. Ayrıca, yatay doğrultuda İHA'ların arasında belirgin bir hız yoğunluğu olduğu belirlenmiştir.

Şekil 4.21'de farklı sürü dizilimleri için oluşturulan akım çizgileri a, b ve c'de üst görünümünden; d, e ve f'de ise yan görünümünden gösterilmiştir. İHA'ların çevresinde oluşan akım çizgileri, hız dağılımlarıyla birlikte verilmiştir. Şekilde, yatay uzaklıkları, a ve d'de 120 cm, b ve e'de 75 cm, c ve f'de ise 50 cm olan sürüleri ifade etmektedir.



Şekil 4.21. Sürü Dizilimlerinin Akım Çizgileri

Şekil 4.21 a ve d’de, İHA’lar tarafından oluşturulan hava akışının diğer dizilimlere kıyasla daha geniş bir alana yayıldığı görülmüştür. Araçların ortasında yer alan bölgede hızın düştüğü, akışların birbirine karışmadığı ve türbülans etkilerinin en düşük seviyede olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.21 b ve e’de, İHA’lar arasındaki mesafenin azalması, akışlar arasında etkileşimlere neden olmuştur. Orta bölgede akışların karıştığı ve türbülans etkilerinin giderek yoğunlaştığı belirlenmiştir.

Şekil 4.21 c ve f’de, İHA’lar arasındaki mesafenin en düşük seviyede olması nedeniyle, İHA’lar tarafından oluşturulan akışların yoğun bir şekilde karıştığı görülmüştür. Bu durum, araçların çevresinde yoğun türbülans alanlarının oluşmasına ve akış düzeninin önemli ölçüde bozulmasına neden olmuştur.

Yatay çizgilerin grafikleri oluşturulmasında veri hizalama işlemi uygulanmıştır. Bu işlem, CFD Post yazılımında, “Expression” ve “Variables” sekmeleri kullanılarak tanımlanan değişkenler aracılığıyla gerçekleştirilmiş ve grafiklerin hizalanması sağlanmıştır. Sürü dizilimlerinde, İHA’ların yatayda orta düzlemleri veya eksenleri belirlenmiş olup geniş mesafeli dizilimde $X = 305$ cm, orta mesafeli dizilimde $X = 282.5$ cm, dar mesafeli dizilimde ise $X = 270$ cm değerlerinde olduğu bulunmuştur. Bu orta eksenler, yatay ve dikey veri çizgileri (Şekil 4.17) üzerinde de gösterilmiştir.

Grafiklerde, veri merkezileştirme işlemi için $X_n = 0$ değeri referans olarak alınmış ve tüm hız dağılımları bu nokta üzerinden normalize edilmiştir. X_n değerinin hesaplanabilmesi için, geniş mesafeli dizilimde 305 cm, orta mesafeli dizilimde 282,5 cm ve dar mesafeli dizilimde ise 270 cm ötelenmiştir. Bu yöntemle, farklı dizilimler arasındaki hız değişimleri değerlendirilmiştir.

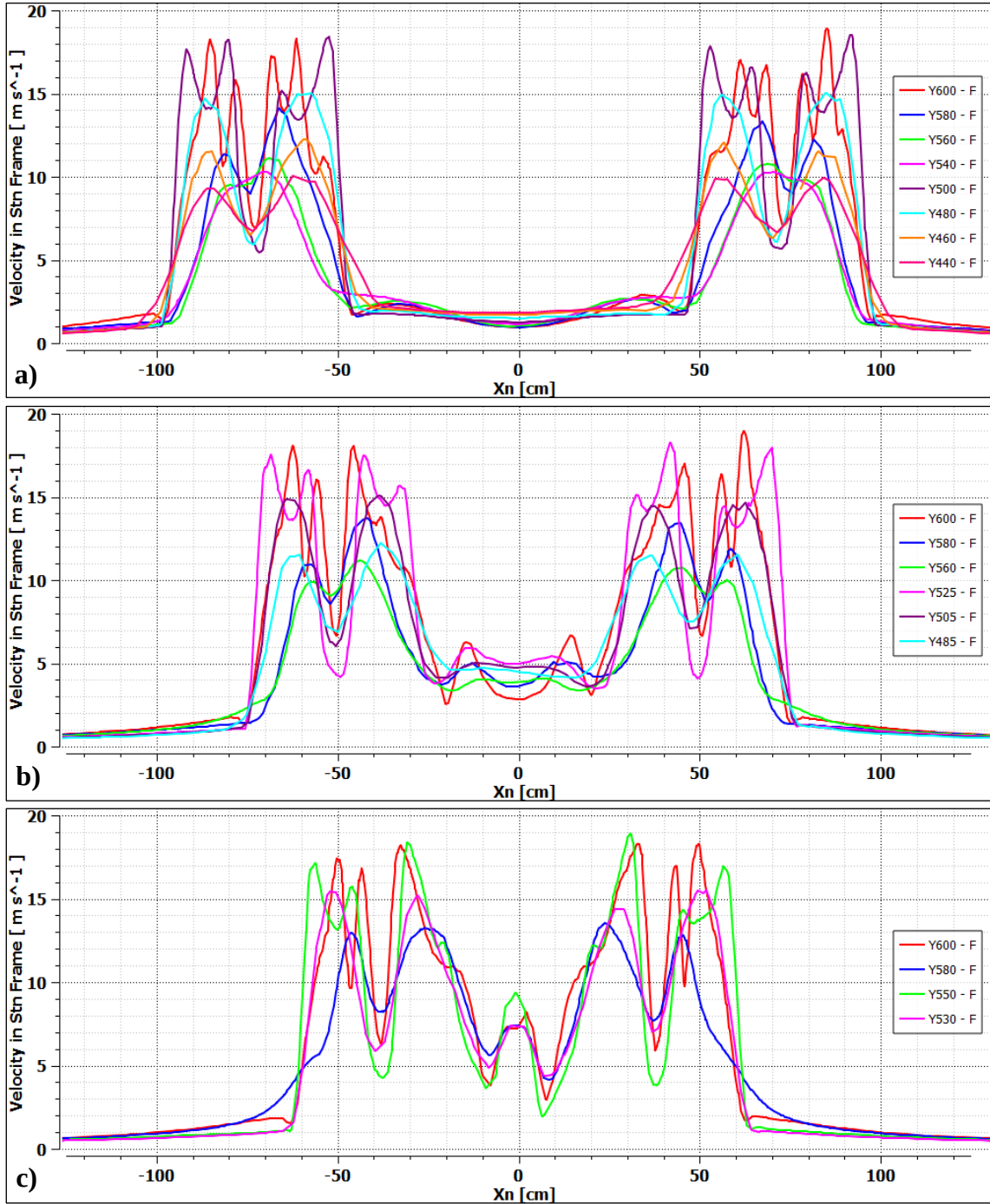
Her bir dizilimde, sol ve sağda konumlandırılan İHA’ların rotor eksenlerinin X_n değerleri yeniden hesaplanmıştır. Tablo 4.1’de, geniş, orta ve dar dizilimlere ait İHA’ların rotor eksenlerinin X ve X_n değerleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Dizilimlerin Rotor Eksenleri

Dizilim Türü	Sol İHA Sol Rotor Eksen [cm]	Sol İHA Sağ Rotor Eksen [cm]	Orta Eksen [cm]	Sağ İHA Sol Rotor Eksen [cm]	Sağ İHA Sağ Rotor Eksen [cm]
Geniş X	220	245	305	365	390
Geniş X_n	-85	-60	0	60	85
Orta X	220	245	282,5	320	345
Orta X_n	-62,5	-37,5	0	37,5	62,5
Dar X	220	245	270	295	320
Dar X_n	-50	-25	0	25	50

Şekil 4.22’de, üç farklı sürü dizilimine ait yatay çizgiler boyunca ölçülen hız dağılımları gösterilmiştir. Bu hız dağılımları, pervane dönme merkezlerinin altına yerleştirilen yatay çizgiler üzerinden elde edilmiştir. Her bir grafikte, pervane dönme noktaları referans alınarak, 20 cm aralıklarla yatay çizgiler oluşturulmuştur. Sürü dizilimine bağlı olarak yatay çizgi sayısı farklılık göstermiştir. Geniş mesafeli dizilimde, üst ve alt sıradaki İHA’lar arasındaki uzaklığın fazla olması nedeniyle dört adet yatay çizgi kullanılmıştır.

Dar mesafeli dizilimde ise üst ve alt sıradaki İHA'ların birbirine yakın olması nedeniyle iki adet yatay çizgi kullanılmıştır.



Şekil 4.22. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Hızları

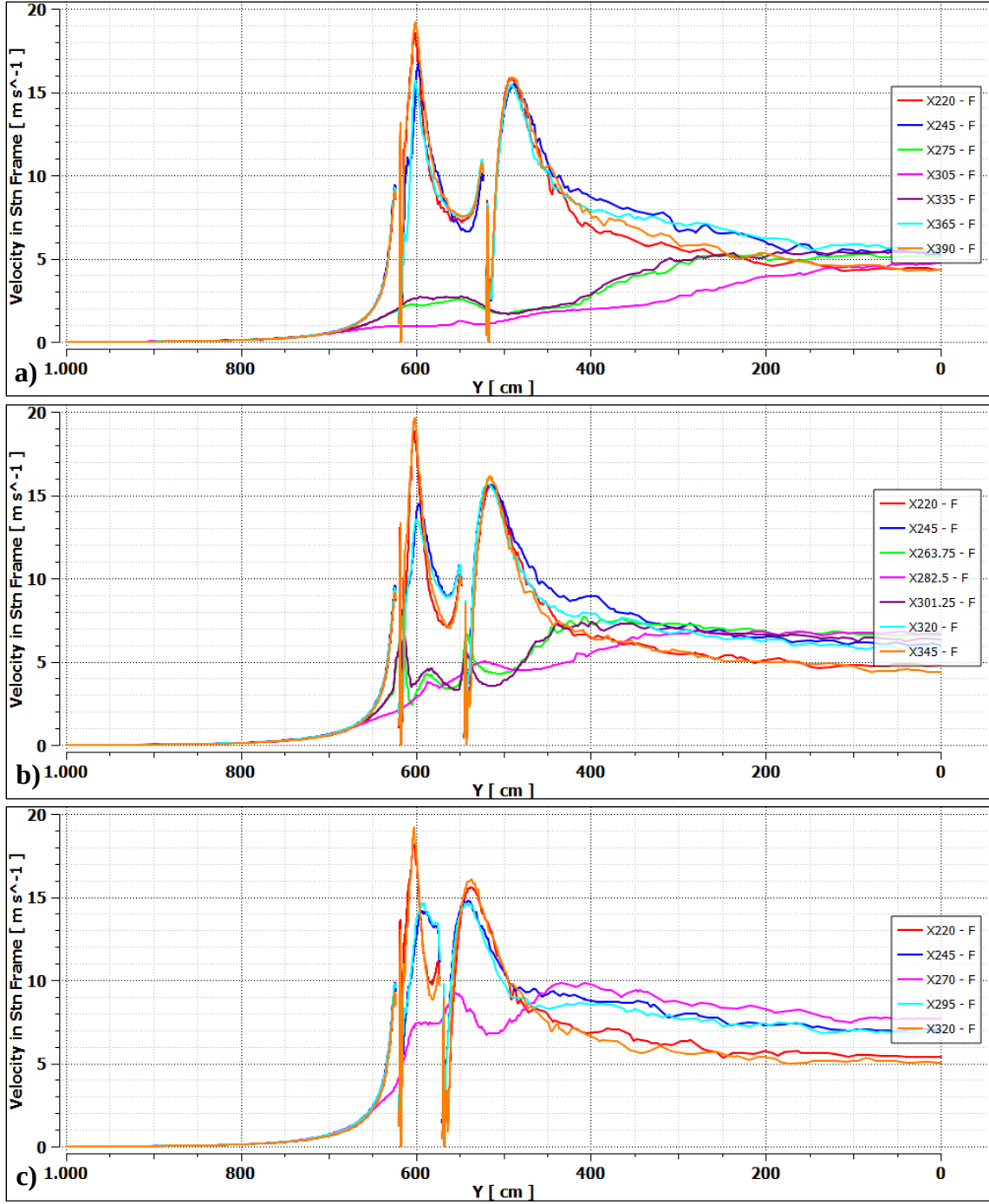
Şekil 4.22-a'da, eksenler arası yatay mesafe 120 cm olan geniş mesafeli dizilim, b'de eksenler arası 75 cm olan orta mesafeli dizilim, c'de ise eksenler arası 50 cm olan dar mesafeli dizilim gösterilmiştir. Her üç dizilimde de üst sıradaki İHA'ların ürettiği hava

akımının alt sıradaki araçları etkilediği gözlemlenmiştir. İHA'lar arasındaki yatay mesafe azaldıkça, araçların orta bölgesinde, $X_n = 0$ 'da oluşan hava akışında artış meydana gelmiştir. Dar mesafeli dizilimde, üst sıradaki İHA'lardan çıkan hava akışlarının alt sıradaki İHA'ları doğrudan etkilediği, bu durumun hız dağılımlarında düzensizliklere ve türbülans alanlarının oluşmasına neden olduğu tespit edilmiştir. Geniş mesafeli dizilimde, hava akışının daha düzenli bir yapıya sahip olduğu ve hız dağılımlarında homojen bir yapı sergilediği belirlenmiştir. Orta dizilimde ise bu iki durum arasında bir geçiş yapısı gözlemlenmiş, dar mesafelerde türbülansın arttığı ve hız dağılımının daha düzensiz hale geldiği belirlenmiştir.

Üç farklı dizilimin dikey çizgiler üzerinden elde edilen hız dağılımları Şekil 4.23'te gösterilmiştir. Geniş dizilimde üst ve alt sırada konumlandırılan İHA'ların pervane dönme merkezleri sırasıyla $Y = 620$ cm ve $Y = 520$ cm olarak tanımlanmıştır. Orta dizilimde bu değerler $Y = 620$ cm ve $Y = 545$ cm, dar dizilimde ise $Y = 620$ cm ve $Y = 570$ cm olarak belirlenmiştir.

Geniş mesafeli dizilimde (Şekil 4.23-a), üst sıradaki İHA'ların yakınında ($Y = 600$) hız değerleri X220 ve X390'da 18 m/s'ye, X245 ve X365'te ise 16 m/s'ye ulaşmıştır. Alt sıradaki İHA'ların yakınındaki ($Y = 500$), hız rotor eksenleri üzerinde 13 m/s seviyesine kadar düşmüştür. Alt ve üst sıradaki araçların arasında kalan bölgede akışın daha düzenli bir yapıya sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'ların arasında yer alan X305 çizgisinde, hız değerleri $Y = 620$ ile $Y = 520$ arasında yaklaşık 1 m/s seviyesinde kalırken, $Y = 200$ 'de bu değer 4 m/s'ye kadar yükselmiştir.

Orta mesafeli dizilimde (Şekil 4.23-b), üst sıradaki İHA'ların yakınındaki ($Y = 600$) hız değerleri X220 ve X345 eksen çizgileri üzerinde 19 m/s'ye ulaşmış, X245 ve X320 eksen çizgilerinde ise yaklaşık 14 m/s olarak tespit edilmiştir. Alt sıradaki İHA'ların yakınında ($Y = 500$), bu değer 13 m/s seviyelerine kadar gerilemiştir. Geniş dizilime kıyasla, alt ve üst İHA'lar arasındaki etkileşimlerin daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, İHA'ların arasında yer alan X282.5 çizgisinde, hız değerleri $Y = 620$ ile $Y = 545$ arasında 4 m/s'ye kadar yükselirken, $Y = 200$ seviyesinde bu değer yaklaşık 7 m/s'ye ulaşmıştır.



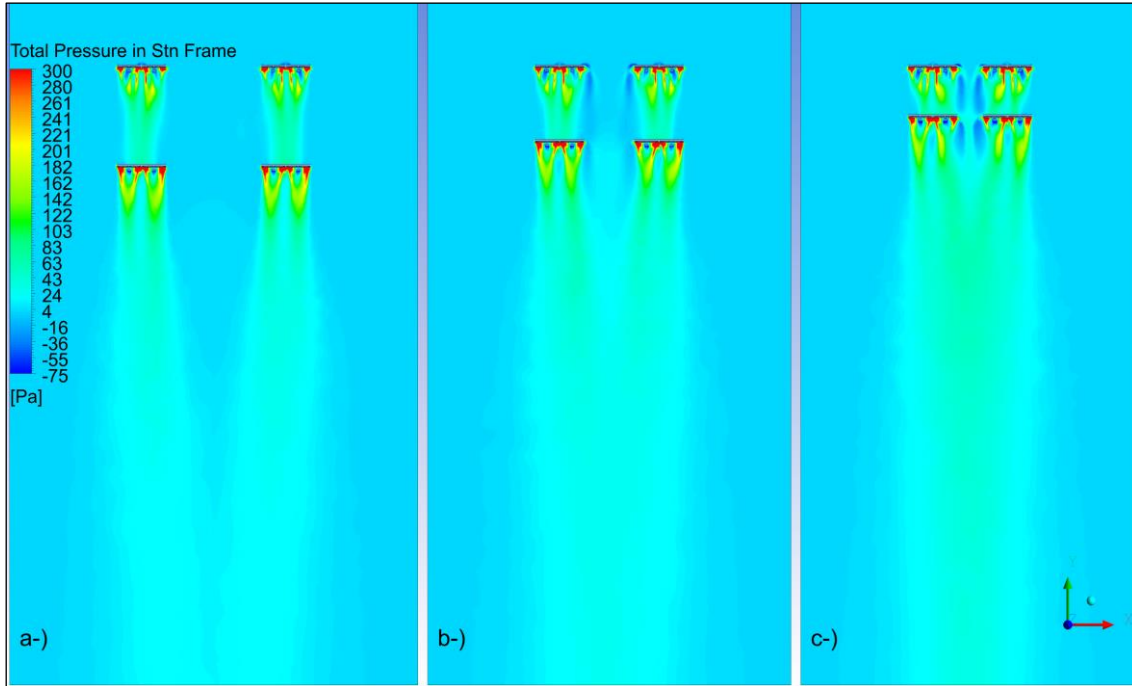
Şekil 4.23. Sürü Dizilimlerinin Dikey Çizgiler Üzerindeki Hız Dağılımı; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim

Dar mesafeli dizilimde (Şekil 4.23-c), üst sıradaki İHA'lerden çıkan hava akışlarının alt sıradaki İHA'ları doğrudan etkilediği ve bu durumun hız dağılımlarında düzensizliklere neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu dizilimde, üst sıradaki İHA'ların yakınındaki ($Y = 600$) hız değerleri X220 ve X320 dış rotor eksenleri üzerinde 18 m/s 'ye, X245 ve

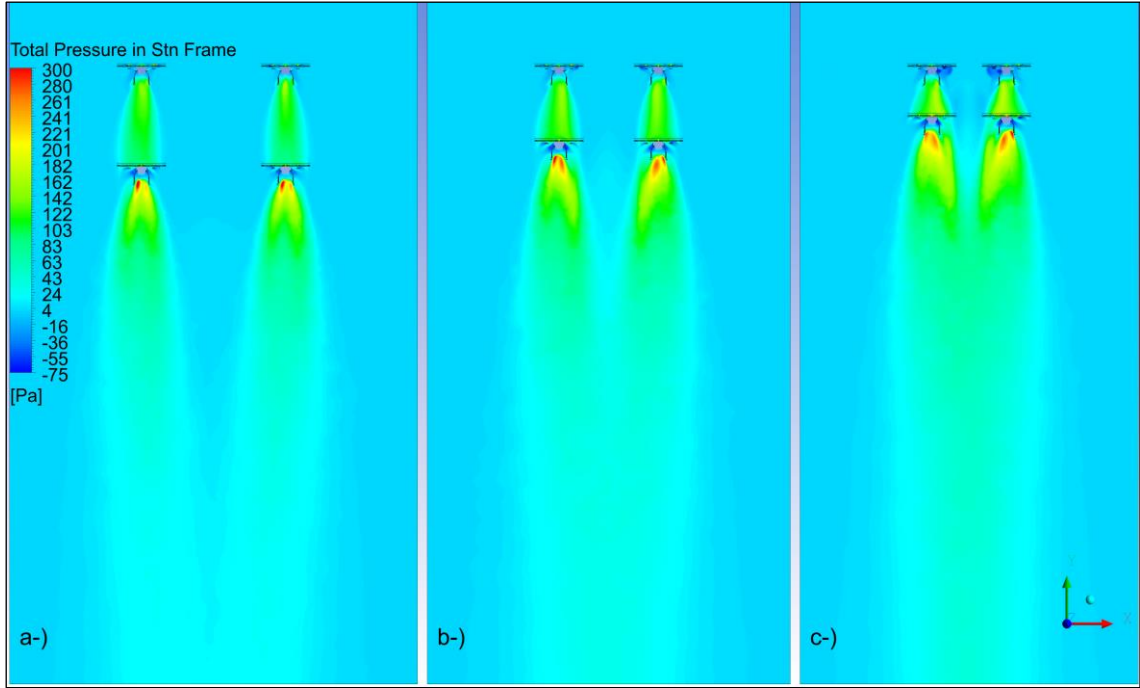
X295 çizgilerinde ise yaklaşık 14 m/s'ye kadar ulaştığı saptanmıştır. Alt sıradaki İHA'ların yakınlarında ($Y = 550$), hızın yoğun türbülans etkisiyle birlikte 15 m/s civarında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, İHA'ların arasında yer alan X270 çizgisinde, hız değerleri $Y = 620$ ile $Y = 570$ arasında yaklaşık 8 m/s, $Y = 400$ 'de bu değer yaklaşık 10 m/s'ye, $Y = 200$ 'de ise 8 m/s olarak ölçülmüştür.

Sürü konumlandırmalarına ait toplam basınç konturları, ön düzlem (Şekil 4.24), orta düzlem (Şekil 4.25) ve arka düzlem (Şekil 4.26) olmak üzere üç farklı düzlem üzerinden elde edilmiştir.

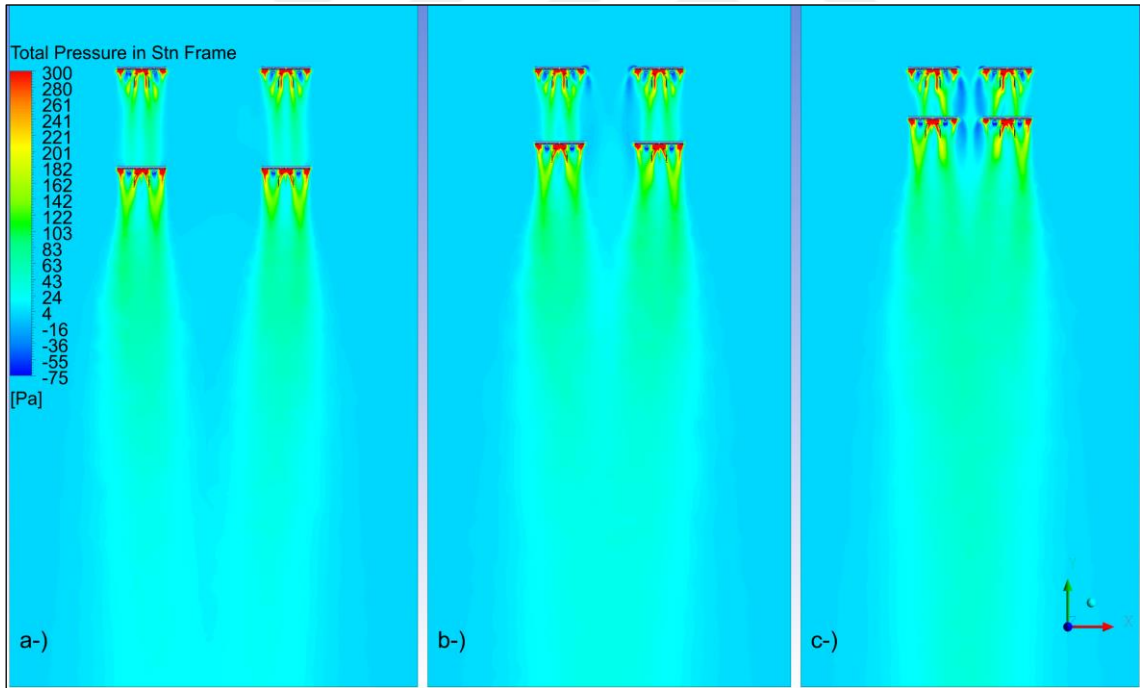
Bu düzlemlerde, farklı sürü dizilimlerine ait konumlandırmaları belirtmek için a, b ve c alt başlıkları kullanılmıştır. Konturlarda, rotor eksenleri arasındaki yatay mesafesi 120 cm olan geniş mesafeli dizilim a alt başlığıyla, eksenler arası 75 cm olan orta mesafeli dizilim b alt başlığıyla, yatay mesafesi 50 cm olan dar mesafeli dizilim c alt başlığıyla gösterilmiştir. Her bir düzlemde, sürü dizilimlerinin mesafeye bağlı değişimlerinin toplam basınç dağılımı üzerindeki etkileri sunulmuştur.



Şekil 4.24. Sürü Dizilimlerinin Toplam Basınç Konturları; Ön Düzlem (Z245)



Şekil 4.25. Sürü Dizilimlerinin Toplam Basınç Konturları; Orta Düzlem (Z232,5)



Şekil 4.26. Sürü Dizilimlerinin Toplam Basınç Konturları; Arka Düzlem (Z220)

Geniş mesafeli dizilimde, İHA'ların ürettiği hava akışının yayıldığı ve basınç dağılımının düzenli bir şekilde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Alt ve üst sıradaki İHA'lar arasında, etkileşim en düşük seviyede kalmıştır. Ayrıca, İHA'ların ürettiği toplam basınç aşağı

doğru birbirine karışmadan ilerlemiştir. Orta mesafeli dizilimde, İHA'lar arasında yaklaşma arttıkça basınç alanları arasındaki etkileşim artmış ve basınç alanlarında dalgalanmalar olmuştur. Dar mesafeli dizilimde ise İHA'lardan kaynaklanan basınç alanlarının birbirine karıştığı, hava akışlarının doğrudan etkileşime girdiği ve bu durumun basınç dağılımını düzensizleştirdiği tespit edilmiştir. Dar mesafeli dizilimde, birbirlerine yaklaşan İHA'ların arasında düşük basınç bölgelerinin oluştuğu gözlemlenmiştir.

Şekil 4.27'de üç farklı sürü dizilimine ait toplam basınç dağılımları gösterilmiştir. Bu dağılımlar, pervane merkez noktalarının 20 cm ve katları altındaki yatay çizgiler üzerinden elde edilmiştir.

Şekil 4.27-a'da eksenler arası 120 cm olan geniş mesafeli dizilim, b'de 75 cm olan orta dizilim ve c'de 50 cm olan dar dizilim tanımlanmıştır. Grafiklerde, yatay doğrultuda araçların orta düzlemi ($X_n=0$) referans alınarak veri hizalaması yapılmıştır. Eksen yeniden ölçeklendirme işleminde, geniş mesafeli dizilim 305 cm, orta dizilimde 282,5 cm, dar dizilimde ise 270 cm ötelenmiştir.

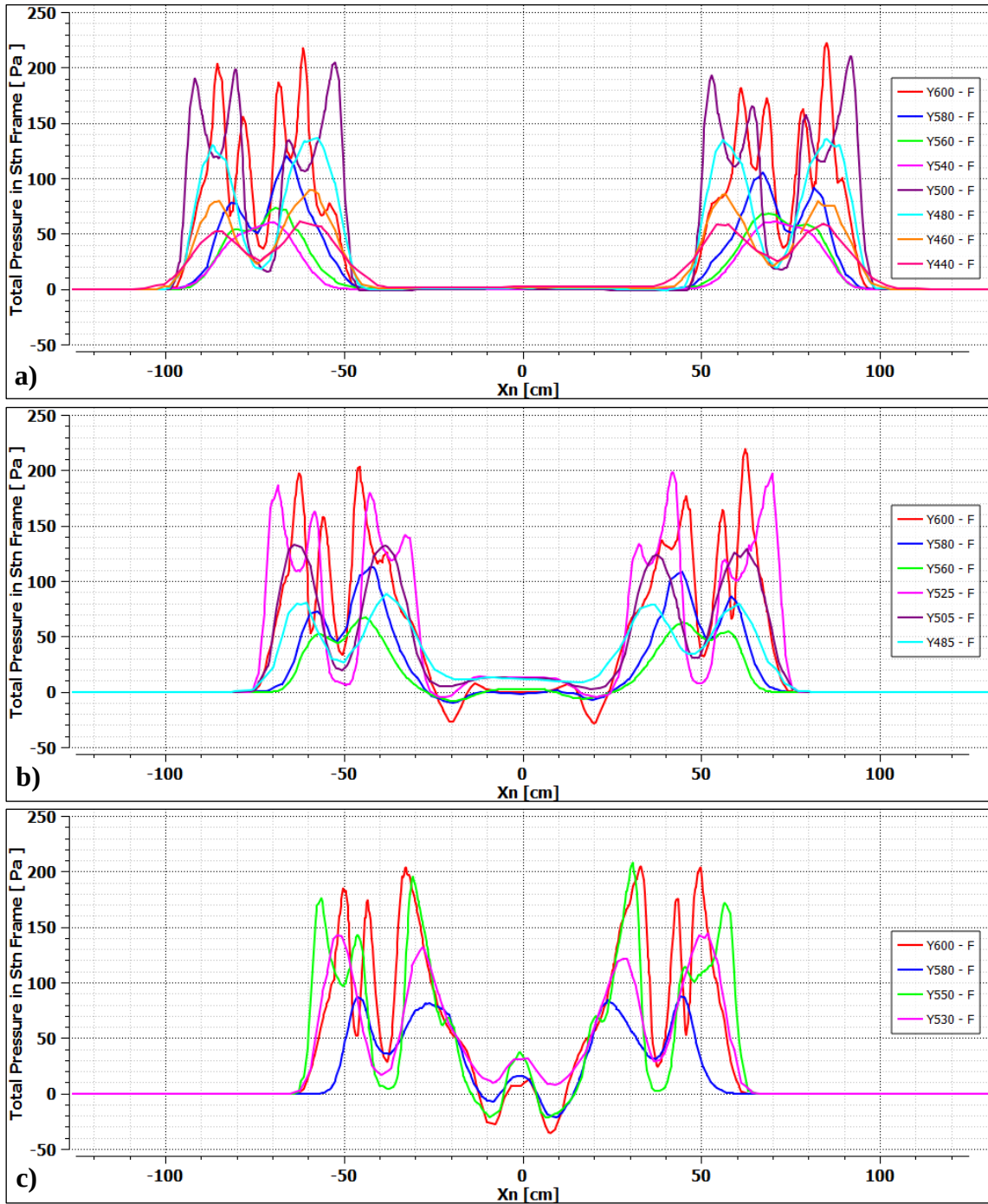
Veri hizalama işlemi sonucunda, karşılıklı rotor eksenleri şu şekilde tanımlanmıştır: Geniş mesafeli dizilimde rotor eksenleri $X = 245$ cm ve $X = 365$ cm, sırasıyla $X_n = -60$ cm ve $X_n = 60$ cm çizgilerine karşılık gelmiştir. Orta mesafeli dizilimde rotor eksenleri $X = 245$ cm ve $X = 320$ cm, sırasıyla $X_n = -37,5$ cm ve $X_n = 37,5$ cm çizgilerine denk gelmiştir. Dar mesafeli dizilimde ise rotor eksenleri $X = 245$ cm ve $X = 295$ cm, sırasıyla $X_n = -25$ cm ve $X_n = 25$ cm çizgileri olarak belirlenmiştir.

Üç farklı dizilimde, üst sırada konumlanan İHA'ların oluşturduğu akışların alt sıradaki İHA'ları etkilediği gözlemlenmiştir. Geniş dizilimde, Y600 ve Y580 çizgilerinde oluşan basınç değerlerinin, alt sıradaki İHA'lara doğru gidildikçe kademeli olarak azaldığı tespit edilmiştir. Yatay doğrultuda, $X_n = 0$ noktasında, araçlar arasındaki etkileşimin en düşük seviyede gerçekleştiği gözlemlenmiştir.

Orta dizilimde, mesafelerin azalmasıyla birlikte basınç alanlarının çakışmaya başladığı görülmüş ve bu durumun, yatay doğrultuda $X_n = 0$ çevresinde basınç dağılımlarının karışmasına ve düzensizliklerin oluşmasına yol açtığı belirlenmiştir.

Dar dizilimde ise araçlar arasındaki mesafenin en düşük seviyede olması, basınç alanlarının çakışmasına ve dağılımlardaki düzensizliğin belirgin şekilde artmasına neden olmuştur. $X_n = 0$ noktası yakınlarında araçların birbirine olan etkisinin yüksek olduğu

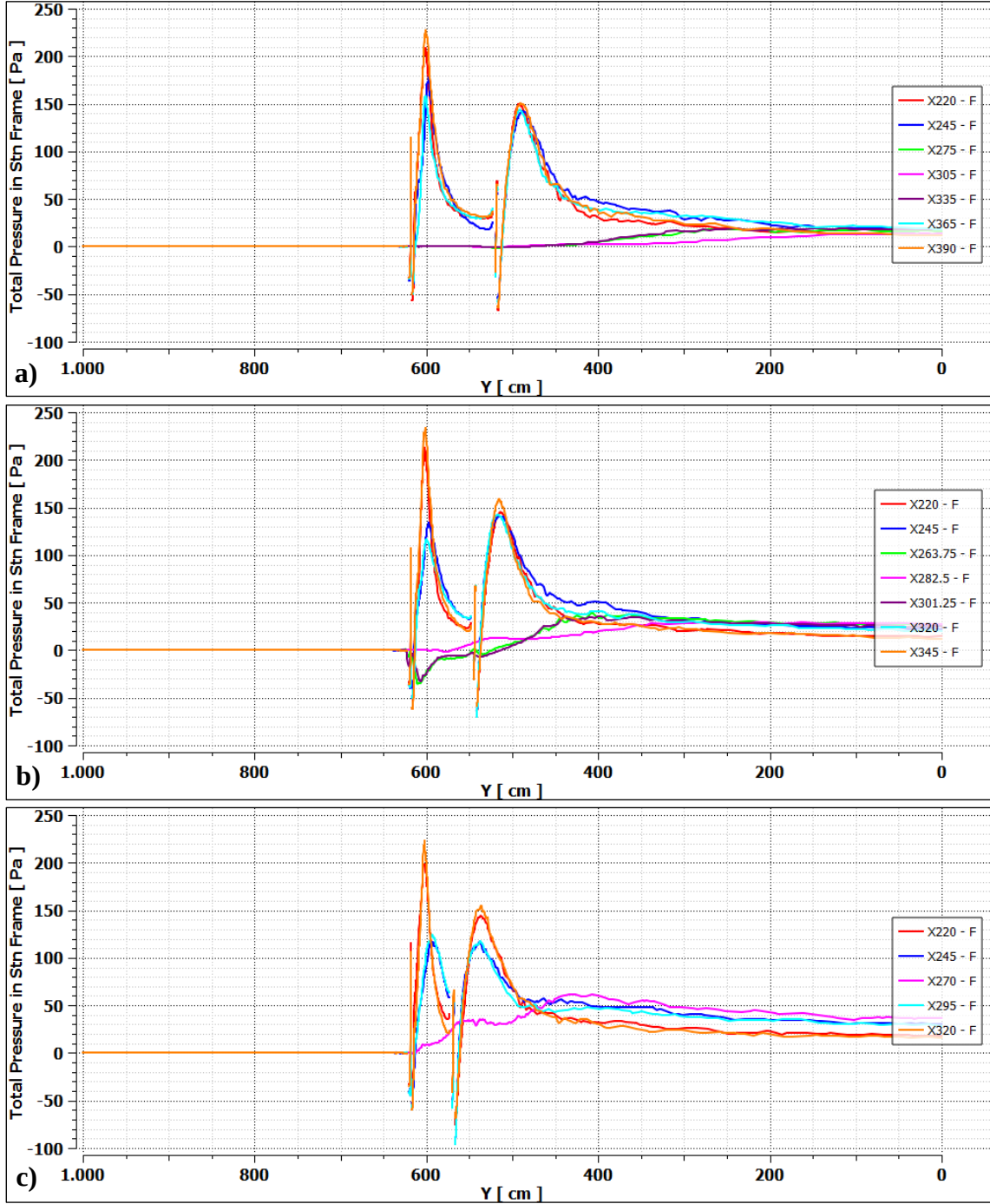
görülmüştür. Ayrıca, orta noktada gelişen basınç dağılımında rotorlara doğru düşüş yaşandığı, ardından tekrar artış gösterdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.27. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Değerleri;
a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim

Şekil 4.28’de, dizilimin dikey çizgiler üzerinden elde edilen toplam basınç dağılımları gösterilmiştir. Geniş dizilimde, üst sırada bulunan İHA’ların pervane dönme merkezleri

Y = 620 cm, alt sıradakilerin ise Y = 520 cm olarak tanımlanmıştır. Orta dizilimde bu değerler Y = 620 cm ve Y = 545 cm, dar dizilimde ise Y = 620 cm ve Y = 570 cm olarak belirlenmiştir.



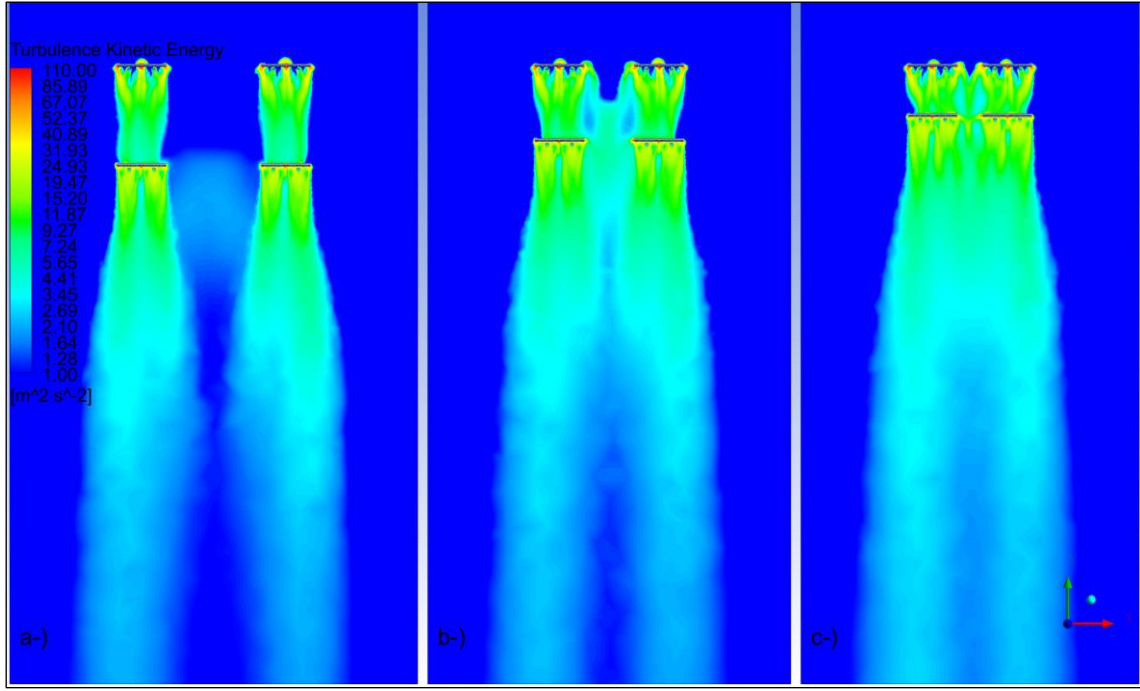
Şekil 4.28. Sürü Dizilimlerinin Dikey Çizgiler Üzerindeki Toplam Basınç Değerleri;
a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim

Geniş mesafeli dizilimde (Şekil 4.28-a), üst sıradaki İHA'ların altında ($Y \approx 600$ cm), X220 ve X390 çizgilerinde toplam basınç değerleri yaklaşık 200 Pa'ya kadar yükselmiş, X245 ve X365 çizgilerinde ise 150 Pa seviyelerine ulaşmıştır. Alt sıradaki araçların altında ($Y \approx 500$ cm) toplam basınç değerleri yaklaşık 100 Pa olarak ölçülmüştür. Ayrıca, İHA'ların arasında yer alan X305 çizgisinde toplam basınç değerlerinin sıfıra yakın bir değerde olduğu belirlenmiştir.

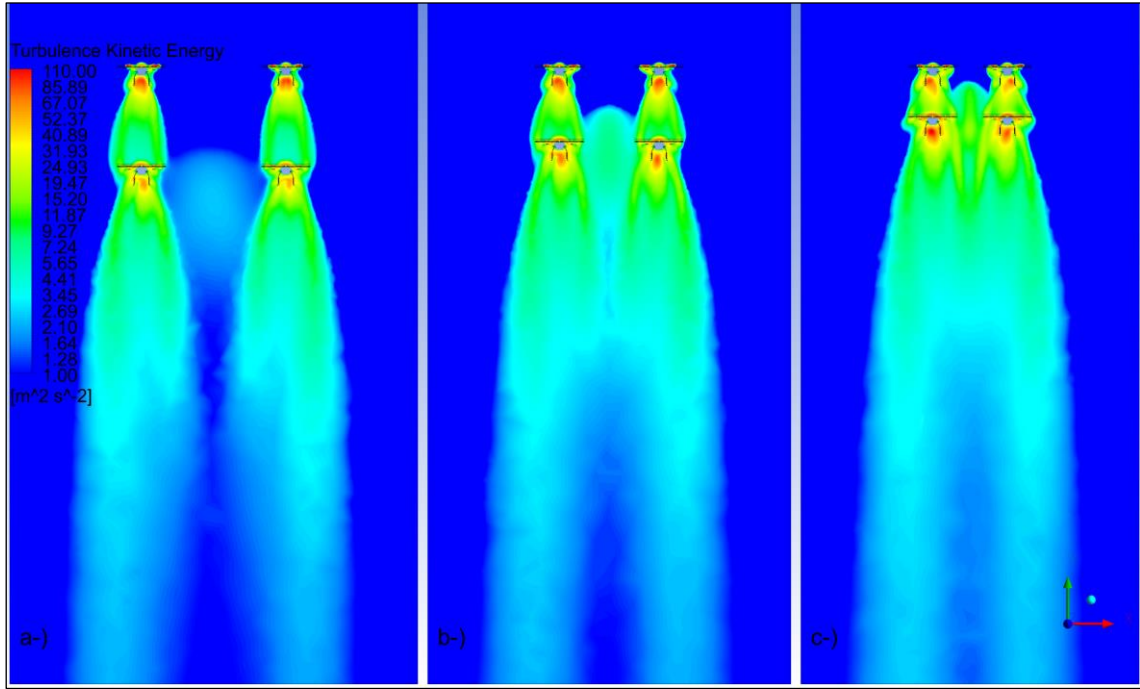
Orta mesafeli dizilimde (Şekil 4.28-b), üst sıradaki İHA'ların altında ($Y \approx 600$ cm), X220 ve X345 eksen çizgilerinde toplam basınç değerleri yaklaşık 200 Pa, X245 ve X320 eksen çizgilerinde ise 110 Pa olarak ölçülmüştür. Alt sıradaki İHA'ların yakınlarında ($Y \approx 520$ cm) toplam basınç yaklaşık 130 Pa olarak bulunmuştur. İHA'ların arasında yer alan X282.5 çizgisinde, toplam basınç $Y = 550$ cm'de 10 Pa, $Y = 400$ cm'de 20 Pa ve $Y = 200$ cm'de 30 Pa seviyesine kadar çıkmıştır. Ayrıca, X263.75 ve X301.25 çizgilerinde toplam basınç $Y \approx 600$ cm'de -20 Pa olarak bulunmuş, bu değer $Y = 400$ cm'de 40 Pa seviyelerine kadar yükselmiştir.

Dar mesafeli dizilimde (Şekil 4.28-c), üst sıradaki İHA'ların altında, X220 ve X320 çizgilerinde toplam basınç değerleri 200 Pa'ya, X245 ve X295 çizgilerinde ise 110 Pa'ya ulaşmıştır. Alt sıradaki İHA'ların yakınlarında ($Y \approx 550$ cm), eksen çizgilerinde toplam basınç değerleri 100 Pa seviyesine ulaşırken, $Y \approx 530$ cm'de X245 ve X295 çizgilerinde 120 Pa, X220 ve X320 çizgilerinde ise 140 Pa seviyelerine kadar yükselmiştir. Ayrıca, İHA'ların arasında yer alan X270 çizgisinde toplam basınç değerleri, $Y = 550$ cm'de 40 Pa, $Y = 400$ cm'de ise 60 Pa olarak ölçülmüştür.

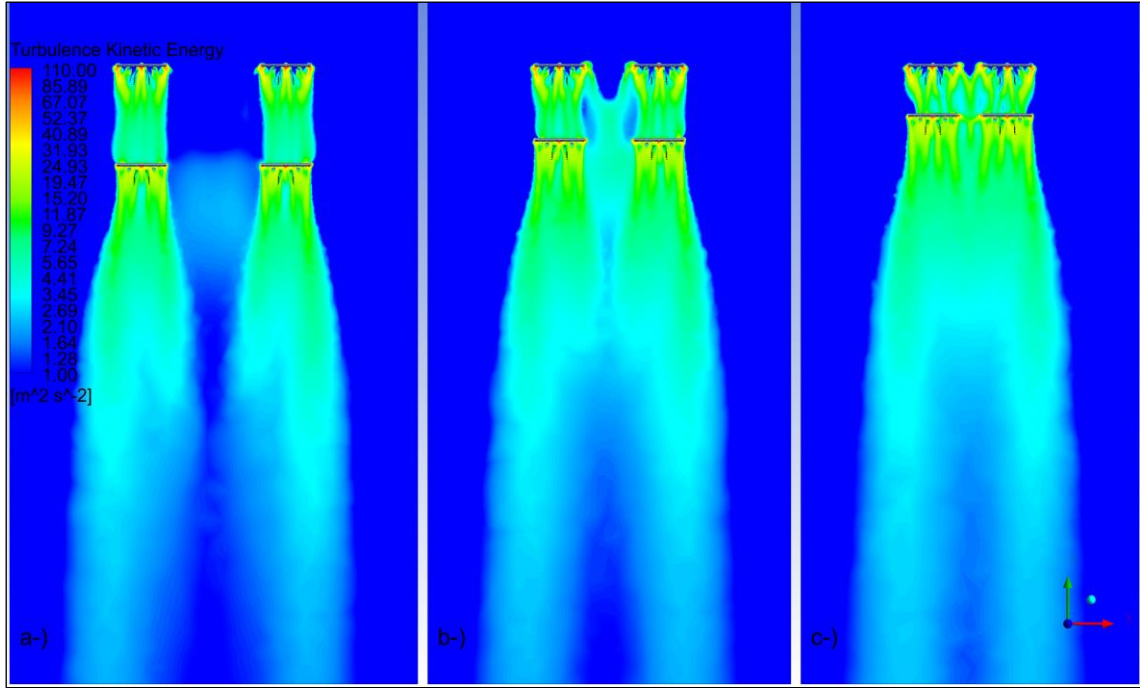
Sürü konumlandırmalarına ait türbülans kinetik enerjisi konturları, üç farklı düzlem üzerinden elde edilmiştir: ön düzlem (Şekil 4.29), orta düzlem (Şekil 4.30) ve arka düzlem (Şekil 4.31). Bu düzlemlerde, farklı mesafe konumlandırmalarını temsil eden geniş mesafeli dizilim (a), orta mesafeli dizilim (b) ve dar mesafeli dizilim (c) gösterilmiştir. Sürü dizilimlerindeki mesafe bağlı değişimlerinin, türbülans kinetik enerjisi dağılımına etkisi, her üç düzlem üzerinden detaylı bir şekilde sunulmuştur.



Şekil 4.29. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Kinetik Enerji Konturları; Ön Düzlem (Z245)



Şekil 4.30. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Kinetik Enerji Konturları; Orta Düzlem (Z232,5)

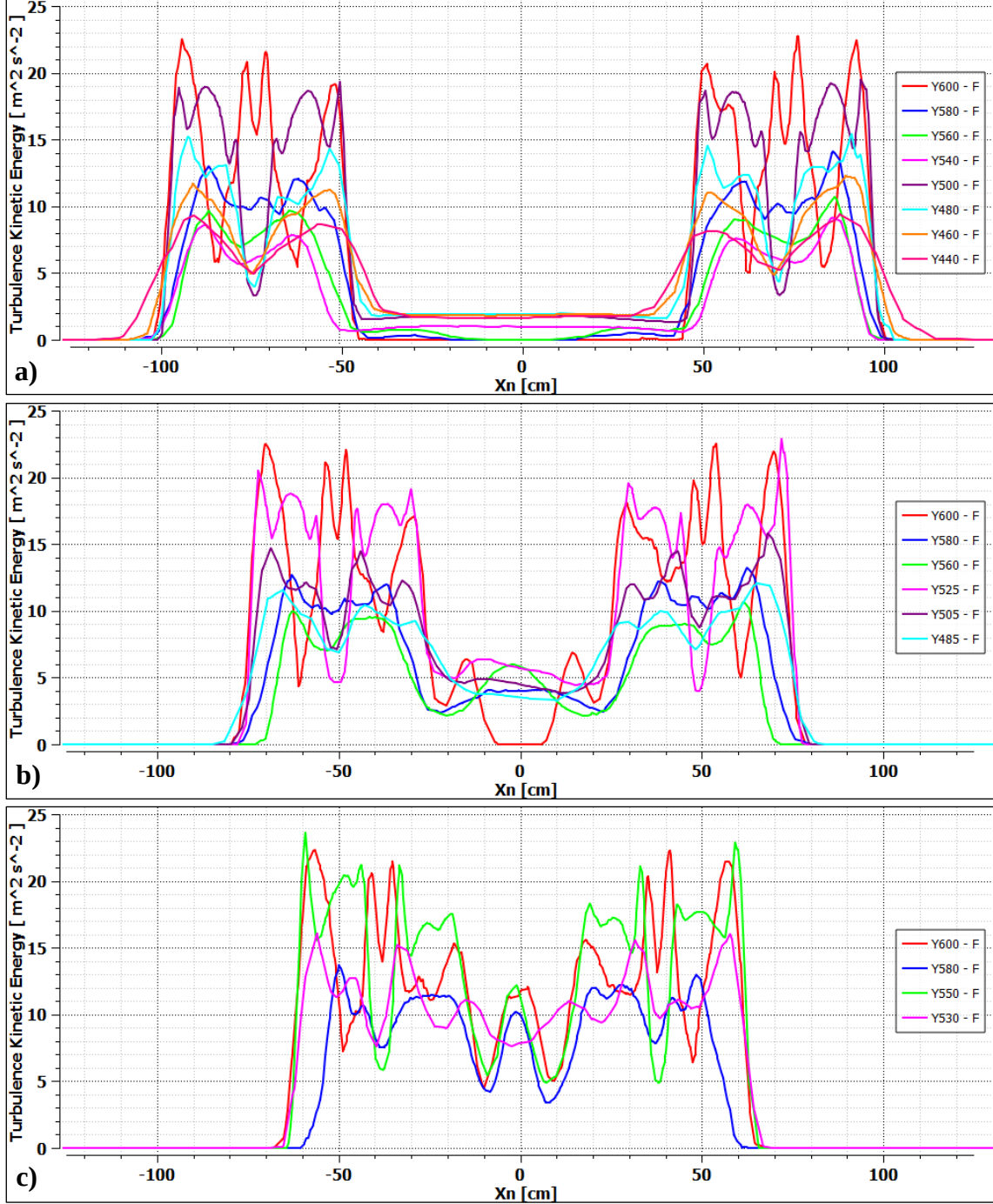


Şekil 4.31. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Kinetik Enerji Konturları; Arka Düzlem (Z220)

Geniş dizilimde türbülans kinetik enerji değerleri daha homojen bir dağılım sergilemiş olup dar mesafeli dizilimlerde türbülans kinetik enerji seviyelerinde belirgin bir artış ve düzensizlik gözlemlenmiştir. İHA'lar arasındaki bölge incelendiğinde, dar mesafeli dizilimde türbülans alanlarının birleştiği görülmüştür. Ayrıca $X_n = 0$ 'da türbülans kinetik enerji değerleri geniş dizilimde $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$, orta mesafeli dizilimde $8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ve dar dizilimde $16 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye kadar çıkmıştır. Ön ve arka düzlemde, geniş mesafeli dizilimlerde türbülans kinetik enerji dağılımının geniş alana yayıldığı, araçların arasında pervane uçlarına yakın bölgelerde dağılımın daha az olduğu tespit edilmiştir. Ancak, dar dizilimlerde, İHA'lar arasındaki mesafe azaldıkça, türbülans kinetik enerji yoğunluğunun artışı gözlemlenmiştir. Bununla beraber pervane uçlarına yakın bölgelerde dağılımın artarak birleştiği tespit edilmiştir.

Şekil 4.32'da pervane dönme merkezlerinin altlarından oluşturulan yatay çizgiler boyunca türbülans kinetik enerji dağılımı gösterilmiştir. Şekil 4.32-a'da pervane dönme merkezleri arasında 120 cm olan geniş dizilim, b'de dönme merkezleri arasında 75 cm olan orta dizilim ve c'de merkez arası 50 cm olan dar dizilim gösterilmiştir. Ayrıca grafiklerde, yatayda araçların tam ortasından geçen eksenler üzerinden hizalama yapılmış, geniş dizilim 305 cm, orta dizilim 282,5 cm, dar dizilim ise 270 cm ötelenmiştir. Rotor eksenleri geniş dizilimde X_n değerleri - 85 cm, - 60 cm ile 60 cm,

85 cm; orta dizilimde X_n değerleri - 62,5 cm; - 37,5 cm ile 37,5 cm; 62,5 cm ve dar dizilimde ise X_n değerleri - 50 cm, - 25 cm ile 25 cm, 50 cm noktaları üzerinde tanımlanmıştır.



Şekil 4.32. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim

Türbülans kinetik enerji dağılımı incelendiğinde; Şekil 4.32-a'daki geniş dizilimde, $X_n=0$ noktasında türbülans kinetik enerjisi üst sıradaki araçların altında Y600, Y580 ve Y560 çizgilerinde sıfıra yakın olduğu, Y540 çizgisinde ise yaklaşık $1 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olduğu belirlenmiş, alt sıradaki araçların altında ise Y500, Y480 Y460 ve Y440 çizgilerinde yaklaşık $2 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir.

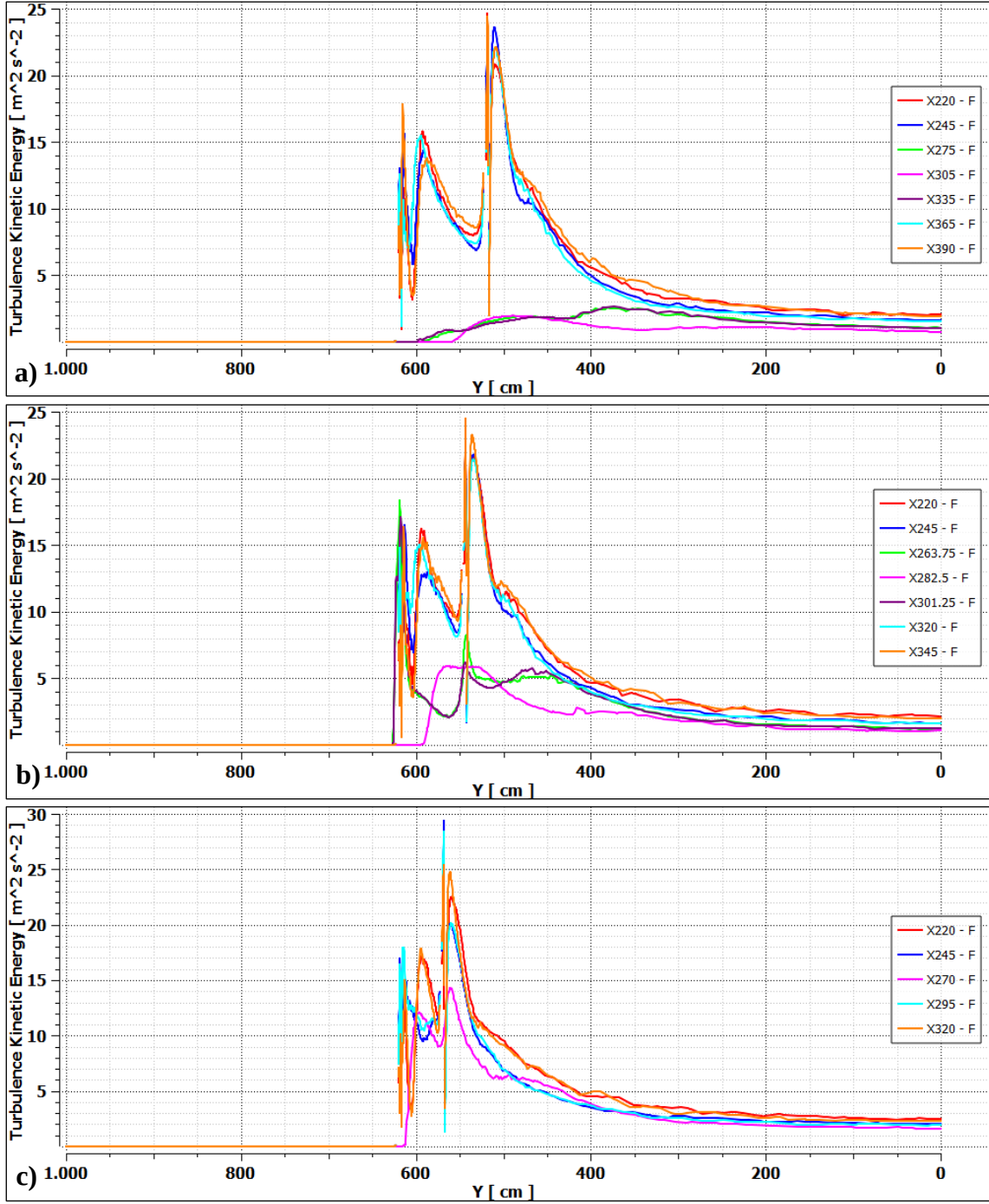
Orta dizilimde (Şekil 4.32-b), $X_n=0$ noktasında türbülans kinetik enerjisi üst sıradaki araçların altında Y600 çizgisinde yaklaşık sıfır, Y580 çizgisinde $4 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Y560 çizgisinde ise $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye ulaştığı belirlenmiş, alt sıradaki araçların altında ise Y525 çizgisinde $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Y505 çizgisinde yaklaşık $4,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Y485 çizgisinde ise yaklaşık $3,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir.

Dar dizilimde (Şekil 4.32-c), $X_n=0$ noktasında türbülans kinetik enerjisi üst sıradaki araçların altında Y600 çizgisinde $12 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Y580 çizgisinde $10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye ulaştığı belirlenmiş, alt sıradaki araçların altında ise Y550 çizgisinde $12 \text{ m}^2/\text{s}^2$, Y530 çizgisinde yaklaşık $8 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye kadar ulaştığı tespit edilmiştir.

Y580 çizgisinde gelişen türbülans kinetik enerjisi dağılımını, orta mesafeli dizilimde $X_n=0$ noktasında $4 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'e iken $X_n=\pm 20$ noktasında yaklaşık $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$ gerilemiş, dar mesafeli dizilimde ise $X_n=0$ noktasında $10 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'e iken, $X_n=\pm 10$ noktasında yaklaşık $4,5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerine gerilemiş, X_n değerleri rotorlara doğru gidildikçe bu değerler tekrar yükselmiştir. Bunların yanı sıra, üst ve alt sırada konumlandırılan İHA'ların türbülans kinetik enerjisinin genel dağılımının, dar mesafeli dizilimde daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 4.33'da dikey çizgiler üzerinden elde edilen türbülans kinetik enerjisi dağılımı, üç farklı dizilim üzerinden gösterilmiştir. Üst ve alt sırada konumlandırılan İHA'ların pervane dönme merkezlerinin, geniş dizilimde Y değerleri sırasıyla 620 cm ve 520 cm, orta dizilimde 620 cm ve 545 cm, dar dizilimde ise 620 cm ve 570 cm olarak tanımlanmıştır.

Geniş ve orta dizilimde, üst sırada konumlanan İHA'ların yakınlarında türbülans kinetik enerjisi $16 \text{ m}^2/\text{s}^2$ değerine ulaşırken, dar dizilimde ise bu değer $18 \text{ m}^2/\text{s}^2$ olmuş, alt sırada konumlanan İHA'ların yakınlarında geniş ve orta dizilimde bu değer $20 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ile $25 \text{ m}^2/\text{s}^2$ aralığına ulaşırken, dar dizilimde ise $29 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye kadar ulaşmıştır.

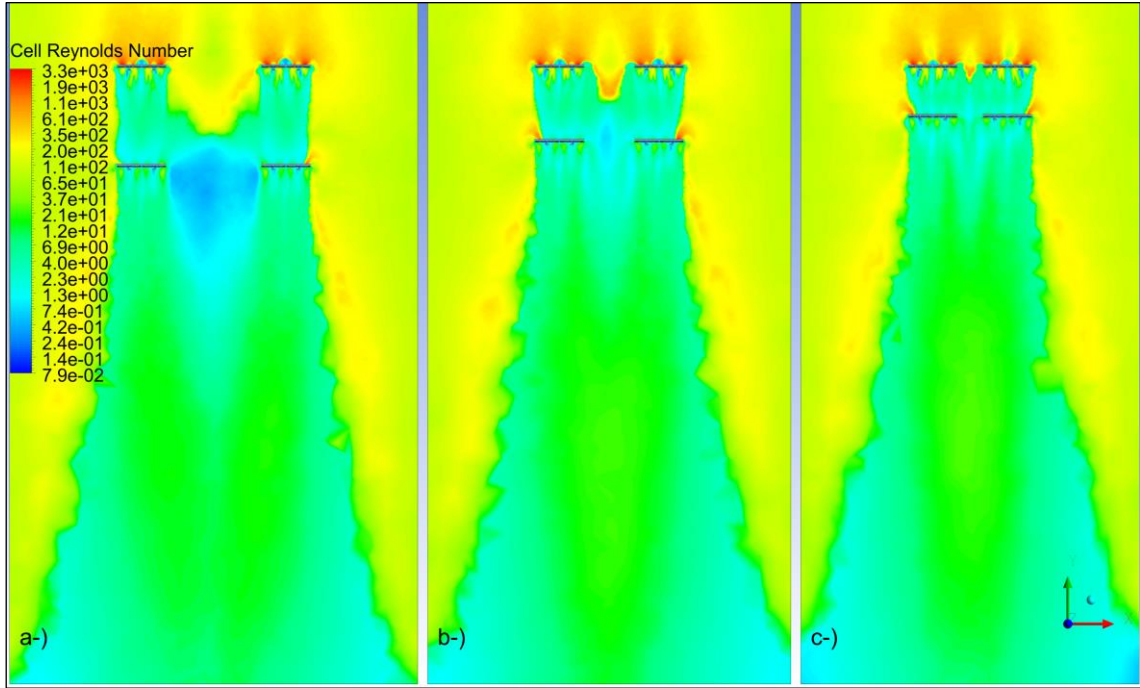


Şekil 4.33. Sürü Dizilimlerinin Dikey Çizgiler Üzerindeki Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı; a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim

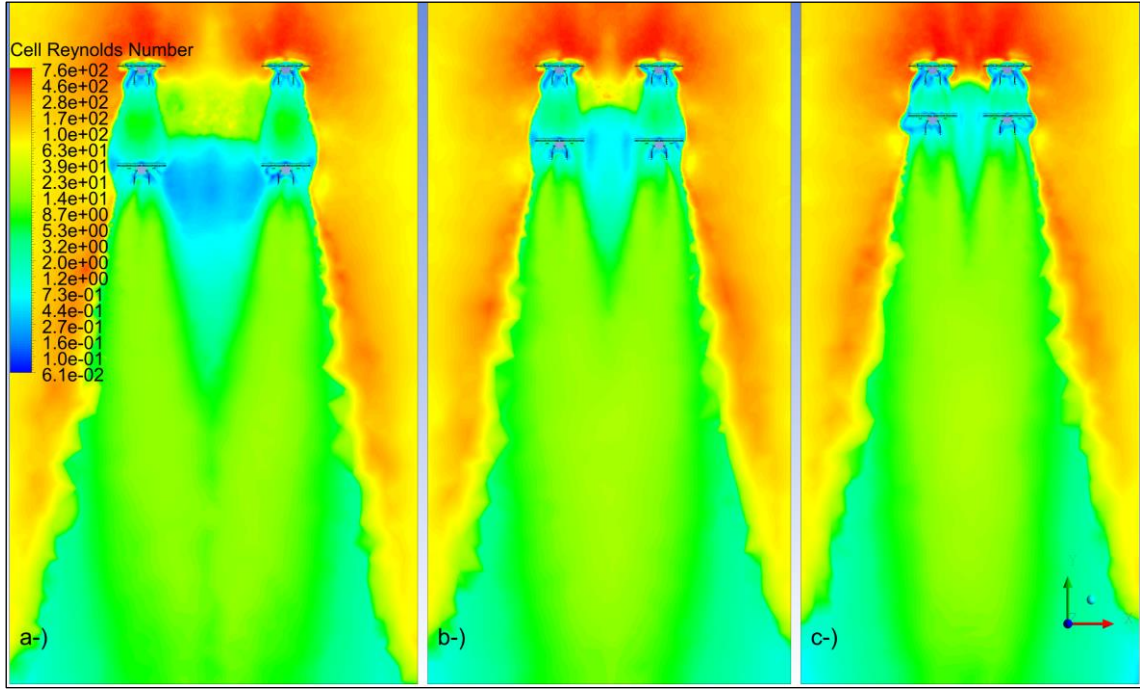
İHA'ların tam arasında bulunan dikey çizgileri üzerinde türbülans kinetik enerjisi en fazla, geniş dizilim için X305 çizgisi üzerinde $3 \text{ m}^2/\text{s}^2$, orta dizilim için X282.5 çizgisi üzerinde $6 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ve dar dizilimde X270 çizgisi üzerinde $14 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 'ye kadar ulaştığı

belirlenmiştir. Ayrıca Y 300 cm değerinde türbülans kinetik enerjisi her üç dizilimde de $5 \text{ m}^2/\text{s}^2$ altına düştüğü belirlenmiştir.

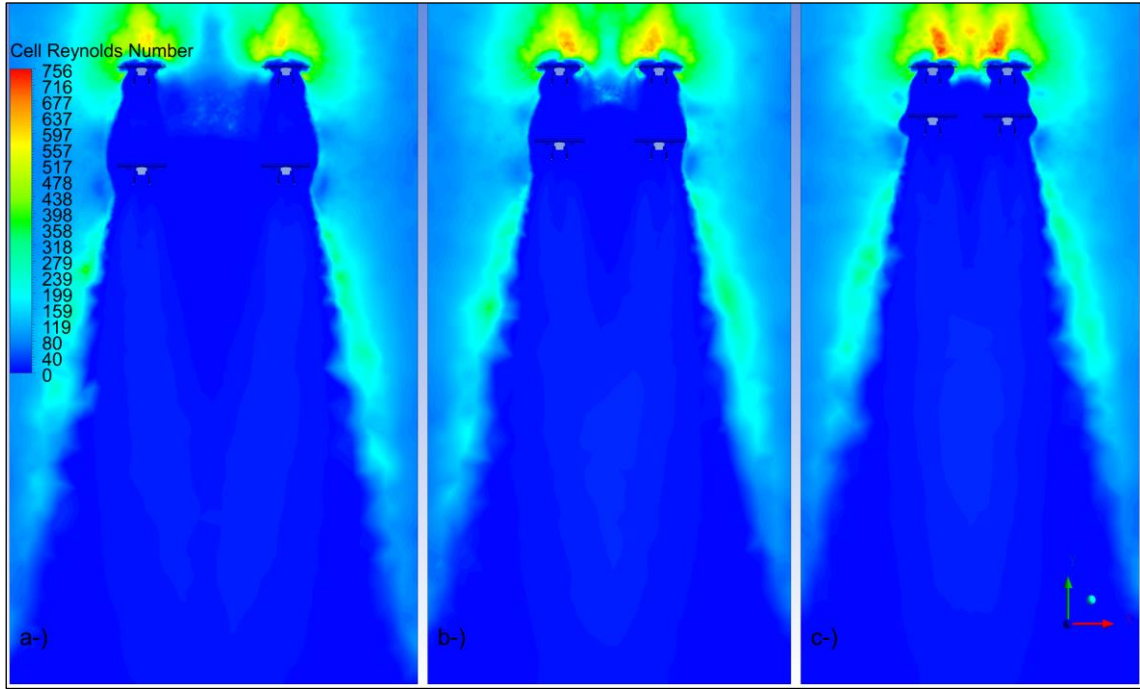
Hücre Reynolds sayılarına ait konturlar, üç farklı düzlem üzerinde gösterilmiştir. Ön düzlem (Şekil 4.34), orta düzlem (Şekil 4.35, Şekil 4.36) ve arka düzlem (Şekil 4.37) üzerinde yapılan incelemelerde, dizilimler arası mesafe değişimlerinin hücre Reynolds sayısı üzerindeki etkileri görülmüştür. Her bir düzlemde, İHA'ların konumlarına ve dizilim aralıklarına bağlı olarak hücre Reynolds sayısındaki farklılıklar gösterilmiştir.



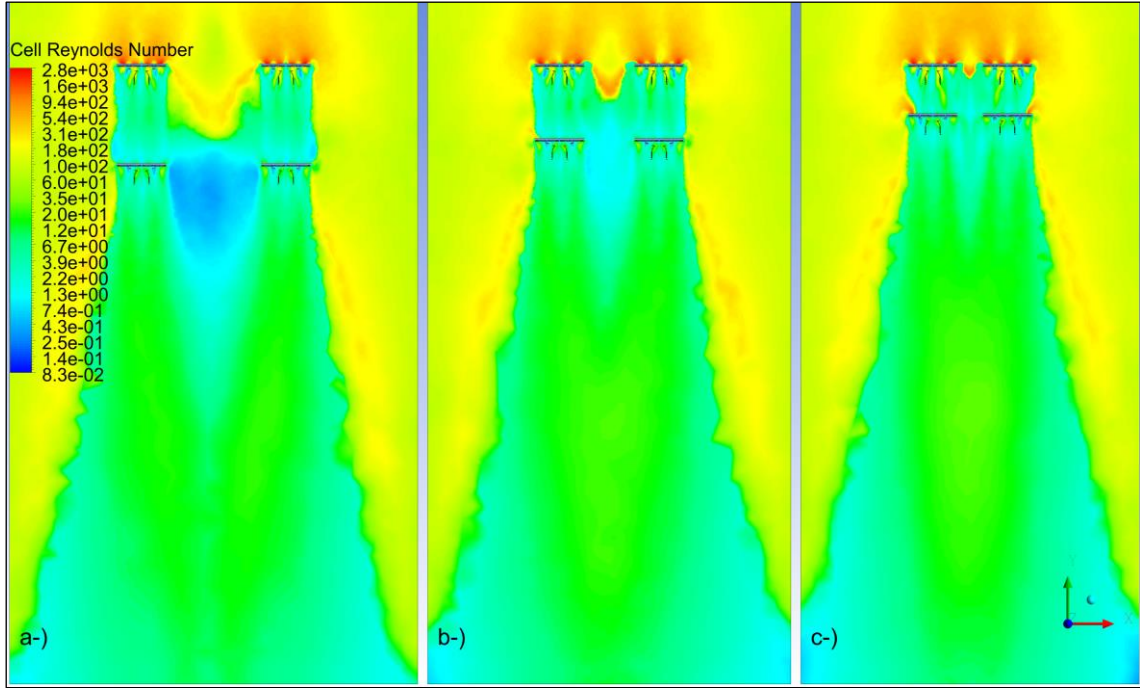
Şekil 4.34. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Konturları; Ön Rotor Düzlemi (Z245)



Şekil 4.35. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Konturları; Orta Düzlem (Z232,5)



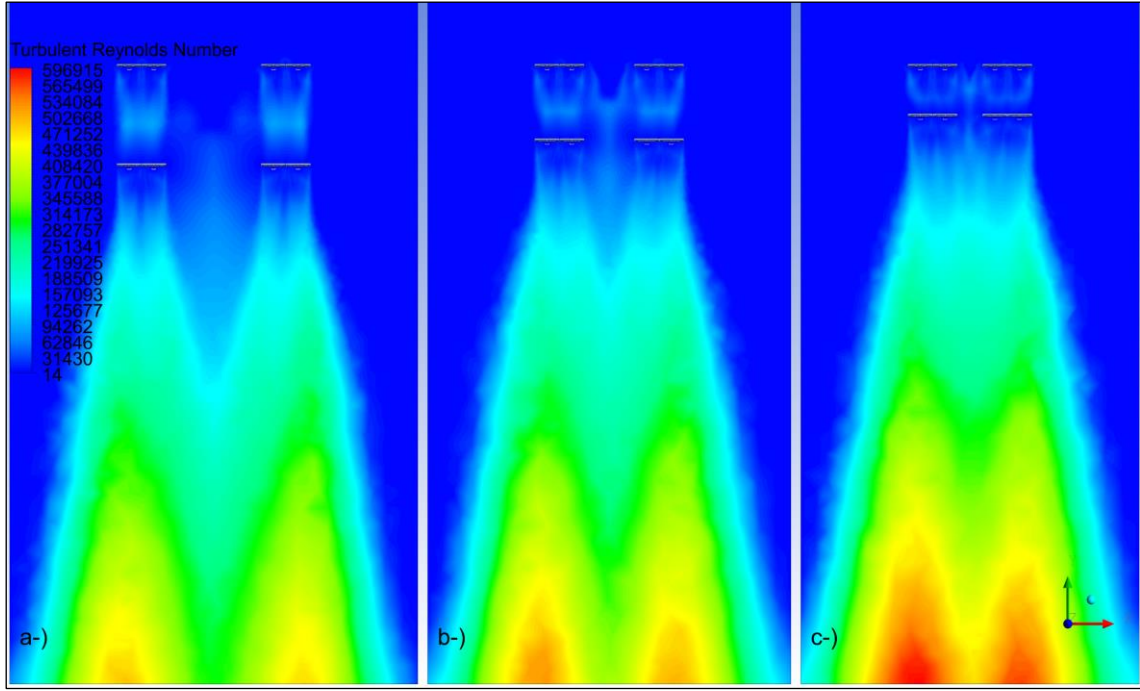
Şekil 4.36. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Lineer; Orta Düzlem (Z232,5)



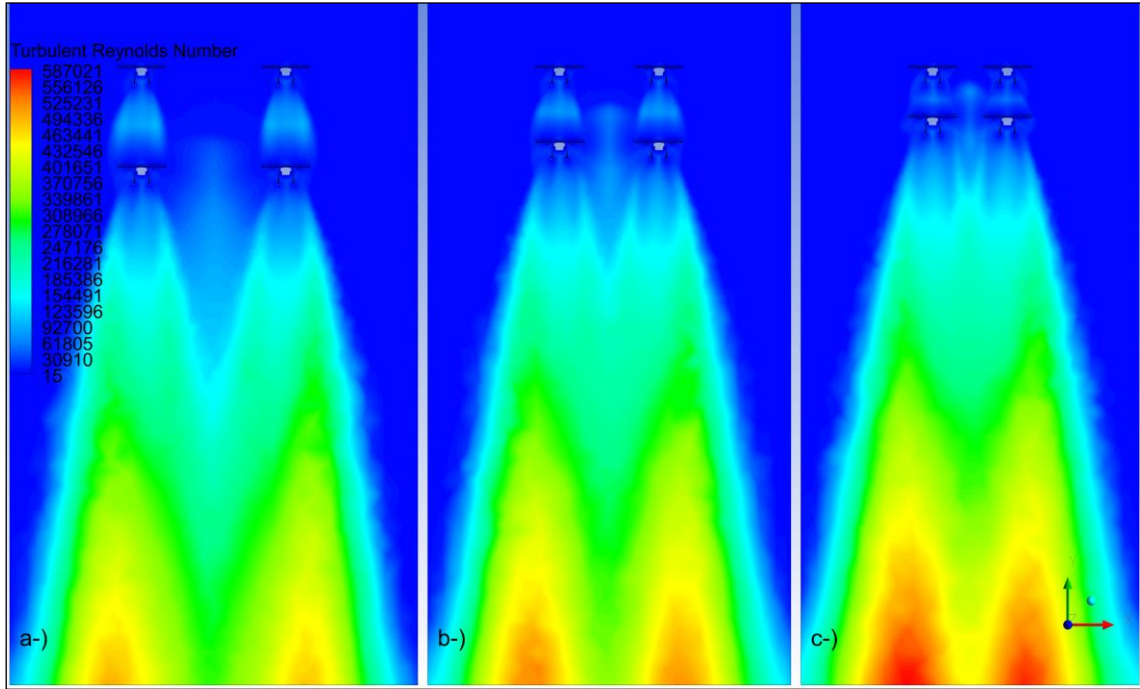
Şekil 4.37. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı; Arka Düzlem (Z220)

Geniş mesafeli dizilimde, hücre Reynolds sayılarının İHA'lar arasındaki bölgelerde minimum seviyede kaldığı gözlemlenmiştir. Orta mesafeli dizilimde, İHA'lar arasındaki mesafenin azalmasıyla birlikte hücre Reynolds sayılarında belirgin bir artış meydana gelmiştir. Dar mesafeli dizilimde ise ara bölgelerde hücre Reynolds sayılarının daha da arttığı ve yoğunluğun belirginleştiği tespit edilmiştir. Özellikle pervane uçlarına yakın bölgelerde hücre Reynolds sayılarının en yüksek değerlere ulaştığı görülmüştür.

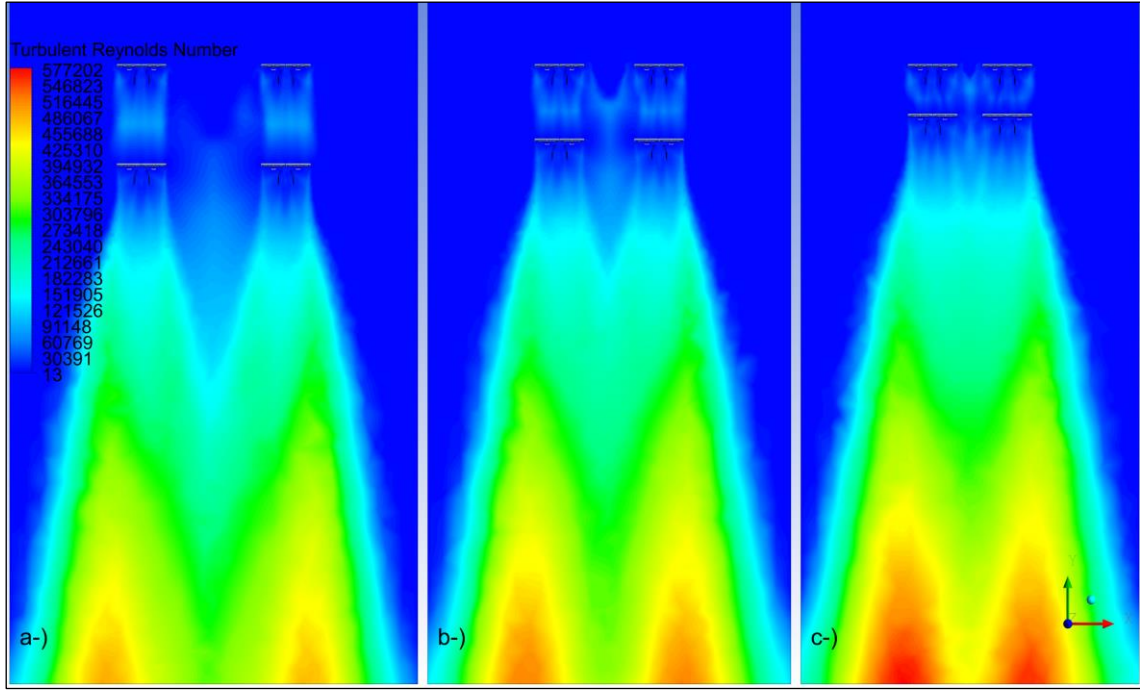
Türbülans Reynolds sayısına ait konturlar, geniş, orta ve dar dizilimler için üç farklı düzlem üzerinde incelenmiştir. Üç farklı dizilimdeki değişimlerin, ön düzlem (Şekil 4.38), orta düzlem (Şekil 4.39) ve arka düzlem (Şekil 4.40) üzerinde elde edilen türbülans Reynolds sayısı gösterilmiştir. Geniş dizilimde, İHA'lar arasındaki mesafeden dolayı türbülans Reynolds sayıları nispeten düşük kalmış ve mesafeler azaldıkça yoğunluk belirginleşmiştir.



Şekil 4.38. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları; Ön Düzlem (Z245)



Şekil 4.39. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları; Orta Düzlem (Z232,5)



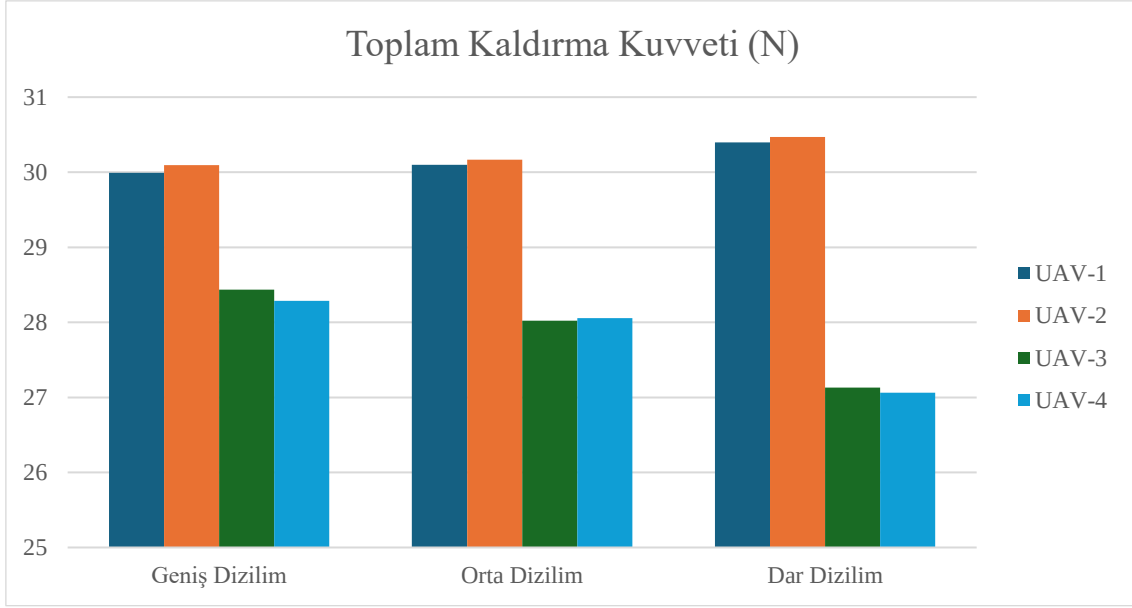
Şekil 4.40. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları; Arka Düzlem (Z220)

Tablo 4.2’de, üç farklı dizilimde, sürü içerisindeki insansız hava araçlarının toplam kaldırma kuvveti ve her bir pervanenin ürettiği kaldırma kuvveti verilmiştir. Dizilim türlerine bağlı olarak pervanelerin ürettiği kaldırma kuvvetinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Geniş, orta ve dar mesafeli dizilimlerde, İHA’ların birbirleriyle olan yakınlığından ötürü farklılıklar gösterdiği tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, dizilim mesafelerinin İHA’ların kaldırma kuvveti üzerindeki değişimleri ortaya konmuştur. Ayrıca Ek 3’de analizlerde elde edilen diğer grafikler sunulmuştur.

Tablo 4.2. Dizilimlere göre Kaldırma Kuvvetleri

Dizilim Türü	Geniş Dizilim	Orta Dizilim	Dar dizilim
Birim	N	N	N
İHA-1 Pervane Arka-Sol	7,4879623	7,4746967	7,5068076
İHA-1 Pervane Arka-Sağ	7,5353246	7,667418	7,7425344
İHA-1 Pervane Ön-Sol	7,4619733	7,4370526	7,4438548
İHA-1 Pervane Ön-Sağ – (Bitişik 1)	7,5072924	7,5173318	7,6095959
İHA-1 Toplam Kaldırma Kuvveti	29,992553	30,096499	30,395677
İHA-2 Pervane Arka-Sol – (Bitişik 1)	7,6303124	7,7127384	7,7861183
İHA-2 Pervane Arka-Sağ	7,4288352	7,412936	7,4267665
İHA-2 Pervane Ön-Sol	7,6182586	7,6441931	7,7437788
İHA-2 Pervane Ön-Sağ	7,4171563	7,396024	7,4184524
İHA-2 Toplam Kaldırma Kuvveti	30,094563	30,165891	30,467536
İHA-3 Pervane Arka-Sol	7,1785133	7,0639182	6,8068911
İHA-3 Pervane Arka-Sağ	7,0195264	6,8684909	6,728161
İHA-3 Pervane Ön-Sol	7,0713785	7,018592	6,6609138
İHA-3 Pervane Ön-Sağ – (Bitişik 2)	7,1668379	7,0709705	6,8197569
İHA-3 Toplam Kaldırma Kuvveti	28,436256	28,021972	27,13004
İHA-4 Pervane Arka-Sol – (Bitişik 2)	7,120528	7,0927439	6,8049641
İHA-4 Pervane Arka-Sağ	7,0546975	6,7913519	6,6190941
İHA-4 Pervane Ön-Sol	6,9691305	7,0629639	6,7757884
İHA-4 Pervane Ön-Sağ	7,141314	7,1077311	6,7495712
İHA-4 Toplam Kaldırma Kuvveti	28,28567	28,054791	27,064191

Şekil 4.41’de insansız hava araçlarının toplam kaldırma kuvvetleri, üç farklı dizilim için görselleştirilmiştir. Bu grafik, Tablo 4.2’de sunulan toplam kaldırma kuvveti değerleri kullanılarak oluşturulmuş olup geniş, orta ve dar dizilimlerde İHA’ların kaldırma kuvvetlerinde meydana gelen değişimler net bir şekilde ortaya konulmuştur. Özellikle alt sırada konumlandırılan İHA’ların kaldırma kuvvetlerinde belirgin azalmaların olduğu tespit edilmiştir. Dizilim mesafelerinin insansız hava araçları üzerindeki etkileri ve bu etkinin kaldırma kuvvetine yansımaları grafik üzerinden gösterilmiştir.



Şekil 4.41. İHA'ların Toplam Kaldırma Kuvvetleri

Tablo 4.3'te, üst ve alt sırada bulunan İHA'ların toplam kaldırma kuvvetleri sunulmuştur. Yapılan analizler sonucunda, üst sırada konumlandırılan İHA-1 ve İHA-2'nin toplam kaldırma kuvvetlerinin yakın değerlerde olduğu ve dizilim değişikliklerinden en az etkilendiği belirlenmiştir. Dar dizilimde, geniş dizilime göre toplam kaldırma kuvvetinde %0,98 oranında bir artış görülmüş, orta dizilimde ise bu artış %0,3 olarak kaydedilmiştir.

Tablo 4.3. Üst ve Alt sıradaki İHA'ların Toplam Kaldırma Kuvveti

Dizilim	Geniş Dizilim	Orta Dizilim	Dar Dizilim
Üst Sıradaki İHA'ların Toplam Kaldırma Kuvveti	60,09 N	60,26 N	60,68 N
Alt Sıradaki İHA'ların Toplam Kaldırma Kuvveti	56,72 N	56,08 N	53,97 N
Fark	5,76%	7,2%	11,7%

Alt sırada konumlandırılan İHA-3 ve İHA-4 için, özellikle dar dizilimde, toplam kaldırma kuvvetinde belirgin bir kayıp yaşandığı bulunmuştur. Üst sıradaki araçların oluşturduğu aşağı yönlü akımların, özellikle yakın mesafelerde, alt sıradaki araçların performansını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir.

Geniş dizilimde, alt sıradaki İHA'ların toplam kaldırma kuvveti, üst sıradakilere göre %5,76 oranında azalırken, bu oran orta dizilimde %7,2'ye, dar dizilimde ise %11,7'ye yükselmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, yüksek verimlilik sağlamak için geniş dizilimin tercih edilebileceğini göstermiştir. Ancak dar dizilim senaryolarında, alt sıradaki

İHA'ların motor gücünün artırılmasıyla bu kayıpların telafi edilebileceği öngörülmüştür. Sonuç olarak, dizilim türleri arasında kaldırma kuvveti dengesi ve aşağı yönlü akımlar açısından önemli farklılıkların olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 4.4'te sürü içerisinde yer alan insansız hava araçlarının her bir pervanesinde oluşan kaldırma kuvvetleri geniş, orta ve dar dizilimlere göre verilmiştir.

Tablo 4.4. Pervanelerin Toplam Kaldırma Kuvveti

Geniş Dizilim							
		Sol	Sağ		Sol	Sağ	
İHA1	Arka	7,488	7,535		7,630	7,429	Arka
	Ön	7,462	7,507		7,618	7,417	Ön
İHA3	Arka	7,179	7,020		7,121	7,055	Arka
	Ön	7,071	7,167		6,969	7,141	Ön
Orta Dizilim							
		Sol	Sağ		Sol	Sağ	
İHA1	Arka	7,475	7,667		7,713	7,413	Arka
	Ön	7,437	7,517		7,644	7,396	Ön
İHA3	Arka	7,064	6,868		7,093	6,791	Arka
	Ön	7,019	7,071		7,063	7,108	Ön
Dar Dizilim							
		Sol	Sağ		Sol	Sağ	
İHA1	Arka	7,507	7,743		7,786	7,427	Arka
	Ön	7,444	7,610		7,744	7,418	Ön
İHA3	Arka	6,807	6,728		6,805	6,619	Arka
	Ön	6,661	6,820		6,776	6,750	Ön

Tablo 4.4 incelendiğinde, her üç dizilim türünde de üst sırada konumlanan İHA'ların kaldırma kuvvetlerinin alt sıradakilere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Geniş dizilimde kaldırma kuvvetleri daha dengeli bir dağılım gösterirken, orta ve dar dizilimlerde özellikle alt sıradaki İHA'larda kaldırma kuvvetlerinde düşüşler meydana gelmiştir. Alt sıradaki İHA'ların kaldırma kuvvetlerindeki bu düşüş, üst sıradaki İHA'ların oluşturduğu aşağı yönlü akımların etkisiyle ortaya çıkmıştır.

Sürü uçuşlarında stabilitenin sağlanabilmesi için kaldırma kuvvetlerinin stabilitesi kritik öneme sahiptir. Özellikle dar dizilim senaryolarında, alt sıradaki İHA'ların kaldırma kuvvetleri dengelenmelidir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, sürü halinde hareket eden insansız hava araçlarının oluşturabileceği dizilimler, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleriyle detaylı bir şekilde incelenmiştir. Toplamda dört adet insansız hava aracı kullanılmış; bu araçlar, ikisi üst sırada, ikisi alt sırada olacak şekilde rotor eksenlerine hizalanarak konumlandırılmıştır.

Dört insansız hava aracından oluşan bir sürü, farklı yaklaşma mesafeleri dikkate alınarak analiz edilmiştir. Geniş mesafeli dizilimde yatayda pervane eksenleri arasında 120 cm ve dikeyde 100 cm mesafe bırakılmıştır. Orta mesafeli dizilimde yatay ve dikey rotor eksenleri arasındaki mesafe 75 cm olarak belirlenirken, dar mesafeli dizilimde bu mesafe 50 cm'ye düşürülmüştür. Her bir dizilimde, İHA pervaneleri 10.000 devir/dakika hızında döndürülerek, İHA'ların çevresindeki ve sürü içerisindeki akış profilleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu sayede sürü içerisindeki İHA'ların birbirlerine olan aerodinamik etkileri kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Çalışma süresince, üst sırada konumlandırılan İHA'ların alt sıradaki İHA'lara olan etkileri ve bu etkinin sürü dinamikleri üzerindeki rolü ele alınmıştır. Ayrıca, yatay düzlemde İHA'lar arasındaki yaklaşma mesafesine bağlı olarak oluşabilecek etkileşimler incelenmiş ve bu etkileşimlerin sürü davranışları üzerindeki etkileri ele alınmıştır.

Farklı sürü dizilimlerinde hız, basınç ve türbülans kinetik enerjisi üzerindeki değişimler incelenmiştir. Akım çizgileri yardımıyla türbülanslı bölgeler tespit edilmiş; geniş dizilimde türbülans etkisinin daha homojen bir dağılım sergilediği, dar dizilimde ise daha yoğun ve düzensiz bir yapı oluşturduğu tespit edilmiştir.

İHA'ların aerodinamik performansı, sürü yapısına göre farklılık göstermiştir. Geniş dizilimde, alt sıradaki İHA'ların toplam kaldırma kuvveti, üst sıradakilere kıyasla %5,76 oranında daha düşük bulunmuştur. Bu fark, orta dizilimde %7,2'ye, dar dizilimde ise %11,7'ye kadar artmıştır. Dar dizilimde, üst sıradaki İHA'ların oluşturduğu aşağı yönlü akımların alt sıradaki İHA'ların kaldırma kuvvetinde belirgin kayıplara yol açtığı tespit edilmiştir.

Bu çalışma, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemleriyle İHA sürülerinin aerodinamik davranışlarını inceleyen öncü bir araştırma olarak öne çıkmaktadır.

Çalışmada, sürü uçuşları sırasında “Yakın-İHA Etkisi” tanımlanmış ve bu etkileşimin sürü performansı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur. Elde edilen bulgular, İHA’lar arasındaki yaklaşma mesafelerinin belirlenmesi ve optimize edilmesinin, güvenli ve verimli uçuşlar için kritik önem taşıdığını göstermiştir. Ayrıca bu araştırma, İHA sürüleri üzerine yapılacak gelecekteki çalışmalara önemli bir katkı sunmaktadır.



6. KAYNAKÇA

6.1. Makaleler

6.1.1. Web of Science: Science Citation Index - Expanded (SCI-EXPANDED)

3. Atmaca, M., Çetin, B., Yılmaz, E., (2019). CFD Analysis of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Moving in Flocks. *Acta Physica Polonica A*, 135 (4), ss. 694-696, WOS:000481717100038, DOI: 10.12693/APhysPolA.135.694.
6. Paz, C., Suárez, E. P., Gil, C., Vence, J., (2021). Assessment of the Methodology for the CFD Simulation of the Flight of a Quadcopter UAV. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 218, ss. 12, (104776), WOS:000701911700003, DOI: 10.1016/j.jweia.2021.104776.
7. Paz, C., Suárez, E., Gil, C., Baker, C., (2020). CFD Analysis of the Aerodynamic Effects on the Stability of the Flight of a Quadcopter UAV in the Proximity of Walls and Ground. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206, ss. 13, (104378), WOS:000580638300053, DOI: 10.1016/j.jweia.2020.104378.
8. Hari, B., Brouwer, J. P., Dhir, A., Steinberger-Wilckens, R., (2019). A Computational Fluid Dynamics and Finite Element Analysis Design of A Microtubular Solid Oxide Fuel Cell Stack for Fixed Wing Mini Unmanned Aerial Vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44 (16), ss. 8519-8532, WOS:000463688600058, DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.170.
9. Panagiotou, P., Kaparos, P., Yakinthos, K., (2014). Winglet Design and Optimization for a Male UAV Using CFD. *Aerospace Science and Technology*, 39, ss. 190-205, WOS:000347743100020, DOI: 10.1016/j.ast.2014.09.006.
10. İnan, A. T., Çetin, B., (2024). CFD Analysis of Aerodynamic Characteristics in a Square-Shaped Swarm Formation of Four Quadcopter UAVs. *Applied Sciences-Basel*, 14 (15), ss. 18, (6820), WOS:001286977800001, DOI: 10.3390/app14156820.
13. Abichandani, P., Lobo, D., Ford, G., Bucci, D., Kam, M., (2020). Wind Measurement and Simulation Techniques in Multi-Rotor Small Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Access*, 8, ss. 54910-54927, WOS:000524750000020, DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2977693.

17. Guo, Q., Zhu, Y., Tang, Y., Hou, C., He, Y., Zhuang, J., Zheng, Y., Luo, S., (2020). CFD Simulation and Experimental Verification of the Spatial and Temporal Distributions of the Downwash Airflow of a Quad-Rotor Agricultural UAV in Hover. *Computers and Electronics in Agriculture*, 172, ss. 11, (105343), WOS:000525324700038, DOI: 10.1016/j.compag.2020.105343.
18. Loli, M., Mitoulis, S. A., Tsatsis, A., Manousakis, J., Kourkoulis, R., Zekkos, D., (2022). Flood Characterization Based on Forensic Analysis of Bridge Collapse Using UAV Reconnaissance and CFD Simulations. *Science of the Total Environment*, 822, ss. 19, (153661), WOS:000766809200001, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.153661.
19. Mazhar, F., Khan, A. M., Chaudhry, I. A., Ahsan, M., (2013). On Using Neural Networks in UAV Structural Design for CFD Data Fitting and Classification. *Aerospace Science and Technology*, 30 (1), ss. 210-225, WOS:000326361900022, DOI: 10.1016/j.ast.2013.08.005.
20. Kapsalis, S., Panagiotou, P., Yakinthos, K., (2021). CFD-Aided Optimization of a Tactical Blended-Wing-Body UAV Platform Using the Taguchi Method. *Aerospace Science and Technology*, 108, ss. 12, (106395), WOS:000605592900001, DOI: 10.1016/j.ast.2020.106395.
21. Yang, S., Tang, Q., Zheng, Y., Liu, X., Chen, J., Li, X., (2020). Model Migration for CFD and Verification of a Six-Rotor UAV Downwash. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 13 (4), ss. 10-18, WOS:000562155500002, DOI: 10.25165/j.ijabe.20201304.5569.
22. Zhu, H., Li, H., Zhang, C., Li, J., Zhang, H., (2019). Performance Characterization of the UAV Chemical Application Based on CFD Simulation. *Agronomy-Basel*, 9 (6), ss. 15, (308), WOS:000475329400041, DOI: 10.3390/agronomy9060308.
23. Das, S. S., Páscoa, J. C., Trancossi, M., Dumas, A., (2016). Computational Fluid Dynamic Study on a Novel Propulsive System: ACHEON and Its Integration with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Journal of Aerospace Engineering*, 29 (1), ss. 16, (04015015), WOS:000366752900008, DOI: 10.1061/(asce)as.1943-5525.0000498.
24. Zhu, Y., Guo, Q., Tang, Y., Zhu, X., He, Y., Huang, H., Luo, S., (2022). CFD Simulation and Measurement of the Downwash Airflow of a Quadrotor Plant Protection

UAV During Operation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 201, ss. 11, (107286), WOS:000841737500001, DOI: 10.1016/j.compag.2022.107286.

26. Sandoval, P., Cornejo, P., Tinapp, F., (2015). Evaluating the Longitudinal Stability of an UAV Using a CFD-6DOF Model. *Aerospace Science and Technology*, 43, ss. 463-470, WOS:000356754300044, DOI: 10.1016/j.ast.2015.04.009.

27. Kim, C., Chung, J., (2006). Aerodynamic Analysis of Tilt-Rotor Unmanned Aerial Vehicle with Computational Fluid Dynamics. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 20 (4), ss. 561-568, WOS:000236626500014, DOI: 10.1007/bf02916487.

28. Götten, F., Havermann, M., Braun, C., Marino, M., Bil, C., (2020). Wind-Tunnel and CFD Investigations of UAV Landing Gears and Turrets - Improvements in Empirical Drag Estimation. *Aerospace Science and Technology*, 107, ss. 15, (106306), WOS:000596568900015, DOI: 10.1016/j.ast.2020.106306.

29. Ni, M., Wang, H., Liu, X., Liao, Y., Fu, L., Wu, Q., Mu, J., Chen, X., Li, J., (2021). Design of Variable Spray System for Plant Protection UAV Based on CFD Simulation and Regression Analysis. *Sensors*, 21 (2), ss. 27, (638), WOS:000612073600001, DOI: 10.3390/s21020638.

30. Rutkowski, M., Gryglas, W., Szumbariski, J., Leonardi, C., Łaniewski-Wołk, Ł., (2020). Open-loop Optimal Control of a Flapping Wing Using an Adjoint Lattice Boltzmann Method. *Computers & Mathematics with Applications*, 79 (12), ss. 3547-3569, WOS:000531076600018, DOI: 10.1016/j.camwa.2020.02.020.

31. Hedworth, H., Page, J., Sohl, J., Saad, T., (2022). Investigating Errors Observed during UAV-Based Vertical Measurements Using Computational Fluid Dynamics. *Drones*, 6 (9), ss. 11, (253), WOS:000858145800001, DOI: 10.3390/drones6090253.

32. Saad, T., Sutherland, J. C., (2016). Wasatch: An Architecture-Proof Multiphysics Development Environment Using a Domain Specific Language and Graph Theory. *Journal of Computational Science*, 17 (3, Special Issue), ss. 639-646, WOS:000390625900014, DOI: 10.1016/j.jocs.2016.04.010.

33. McKinney, A. K., Wang, D., Ye, J., Fouchier, D. J.-B., Guimarães, C. P., Batista, E. C., Souza, F. A. R., Alves, G. E., Gu, D., Guenther, B. A., Martin, T. S., (2019). A Sampler for Atmospheric Volatile Organic Compounds by Copter Unmanned Aerial

Vehicles. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12 (6), ss. 3123-3135, WOS:000471598000002, DOI: 10.5194/amt-12-3123-2019.

35. Siddiqi, Z., Lee, J. W., (2019). A Computational Fluid Dynamics Investigation of Subsonic Wing Designs for Unmanned Aerial Vehicle Application. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 233 (15), ss. 5543-5552, WOS:000490896900005, DOI: 10.1177/0954410019852553.

36. Chen, Q., Zhang, J., Zhang, C., Zhou, H., Jiang, X., Yang, F., Wang, Y., (2023). CFD Analysis and RBFNN-Based Optimization of Spraying System for a Six-Rotor Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Sprayer. *Crop Protection*, 174, ss. 8, (106433), WOS:001084436200001, DOI: 10.1016/j.cropro.2023.106433.

37. Nugroho, G., Hutagaol, Y. D., Zuliardiansyah, G., (2022). Aerodynamic Performance Analysis of VTOL Arm Configurations of a VTOL Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation. *Drones*, 6 (12), ss. 27, (392), WOS:000902707000001, DOI: 10.3390/drones6120392.

38. Dong, S. J., Gui, Q. H., Zhu, L., Zou, X. R., Zhou, W. X., Hou, R. Y., Moray, P. J., Yin, C. L., (2023). CFD-Based Pesticide Selection for a Nozzle Used in a Six-Rotor UAV in Hover Mode for Tea Spraying. *Pest Management Science*, 79 (5), ss. 1963-1976, WOS:000930839200001, DOI: 10.1002/ps.7371.

39. Nugroho, G., Zuliardiansyah, G., Rasyiddin, A. A., (2022). Performance Analysis of Empennage Configurations on a Surveillance and Monitoring Mission of a VTOL-Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation. *Aerospace*, 9 (4), ss. 32, (208), WOS:000785222800001, DOI: 10.3390/aerospace9040208.

40. Wen, G., Wu, D., Yin, H., Zhang, D., (2020). Coupled CFD/MBD Method for a Tilt Tri-rotor UAV in Conversion of Flight Modes. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 34 (5), ss. 363-379, WOS:000544582000001, DOI: 10.1080/10618562.2020.1778169.

41. Feng, H., Xu, P., Yang, S., Zheng, Y., Li, W., Liu, W., Zhao, H., Jiang, S., (2024). Back Pressure Generated by Downwash and Crosswind on Spatial Atomization Characteristics During UAV Spraying: CFD Analysis and Verification. *Pest Management Science*, 80 (3), ss. 1348-1360, WOS:001121666500001, DOI: 10.1002/ps.7865.

- 42.** Frant, M., Kachel, S., Maślanka, W., (2023). Gust Modeling with State-of-the-Art Computational Fluid Dynamics (CFD) Software and Its Influence on the Aerodynamic Characteristics of an Unmanned Aerial Vehicle. *Energies*, 16 (19), ss. 19, (6847), WOS:001083337800001, DOI: 10.3390/en16196847.
- 43.** Wang, H., Sun, W., Zhao, C., Zhang, S., Han, J., (2022). Dynamic Modeling and Control for Tilt-Rotor UAV Based on 3D Flow Field Transient CFD. *Drones*, 6 (11), ss. 18, (338), WOS:000883856900001, DOI: 10.3390/drones6110338.
- 44.** Wang, Q., Ren, Y., Wang, H., Wang, J., Zhou, G., Yang, Y., Xie, Z., Bai, X., (2024). Research on UAV Downwash Airflow and Wind-Induced Response Characteristics of Rapeseed Seedling Stage Based on Computational Fluid Dynamics Simulation. *Agriculture-Basel*, 14 (8), ss. 20, (1326), WOS:001305467900001, DOI: 10.3390/agriculture14081326.
- 45.** Zhang, J., Chen, Q., Liu, J., Wang, Y., Zhou, H., Yang, F., Ru, Y., (2024). Experiments and CFD Simulation of Downwash Airflow and Fog Distribution Discharged from a Single-Rotor UAV Fitted with a Pulse-Jet Thermal Fogging Machine. *Biosystems Engineering*, 240, ss. 142-151, WOS:001216388700001, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2024.03.007.
- 46.** Kostić, I., Simonović, A., Kostić, O., Ivković, D., Tanović, D., (2024). Lateral-Directional Aerodynamic Optimization of a Tandem Wing UAV Using CFD Analyses. *Aerospace*, 11 (3), ss. 20, (223), WOS:001191410400001, DOI: 10.3390/aerospace11030223.
- 47.** Kostić, I., Tanović, D., Kostić, O., Abubaker, A. A. I., Simonović, A., (2023). Initial Development of Tandem Wing UAV Aerodynamic Configuration. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95 (Special Issue - 3), ss. 431-441, WOS:000844757500001, DOI: 10.1108/AEAT-06-2022-0149.
- 48.** Vijayalakshmi, S., Sekar, A. V., Hassan, A. M., Arputharaj, B. S., Jayakumar, S. S., Al-Bonsrulah, H. A. Z., Rajendran, P., Madasamy, S. K., Karuppasamy, A., Raja, V., (2023). Multi-Perspective Structural Integrity-Based Computational Investigations on Airframe of Gyrodyne-Configured Multi-Rotor UAV Through Coupled CFD and FEA Approaches for Various Lightweight Sandwich Composites and Alloys. *Reviews on*

Advanced Materials Science, 62 (1), ss. 49, (20230147), WOS:001117063500001, DOI: 10.1515/rams-2023-0147.

49. Ganesan, T., Jayarajan, N., (2023). Aerodynamic Analysis of Mathematically Modelled Propeller for Small UAV Using CFD in Different Temperature Conditions. *Strojniski Vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 69 (11-12), ss. 444-454, WOS:001110754300003, DOI: 10.5545/sv-jme.2023.601.

50. Dbouk, T., Drikakis, D., (2021). Quadcopter Drones Swarm Aeroacoustics. *Physics of Fluids*, 33 (5), ss. 10, (057112), WOS:000696798700010, DOI: 10.1063/5.0052505.

51. Kontogiannis, G. S., Ekaterinaris, A. J., (2013). Design, Performance Evaluation and Optimization of a UAV. *Aerospace Science and Technology*, 29 (1), ss. 339-350, WOS:000323806800034, DOI: 10.1016/j.ast.2013.04.005.

52. Fengbo, Y., Xinyu, X., Ling, Z., Zhu, S., (2017). Numerical Simulation and Experimental Verification on Downwash Air Flow of Six-Rotor Agricultural Unmanned Aerial Vehicle in Hover. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 10 (4), ss. 41-53, WOS:000406939700005, DOI: 10.25165/j.ijabe.20171004.3077.

53. Panagiotou, P., Kaparos, P., Salpingidou, C., Yakinthos, K., (2016). Aerodynamic Design of a MALE UAV. *Aerospace Science and Technology*, 50, ss. 127-138, WOS:000371650000013, DOI: 10.1016/j.ast.2015.12.033.

54. Shin, H. S., Antoniadis, A. F., Tsourdos, A., (2019). Parametric Study on Formation Flying Effectiveness for a Blended-Wing UAV. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 93 (1-2), ss. 179-191, WOS:000456791900013, DOI: 10.1007/s10846-018-0842-4.

56. Hwang, J. Y., Jung, M. K., Kwon, J. O., (2015). Numerical Study of Aerodynamic Performance of a Multicopter Unmanned-Aerial-Vehicle Configuration. *Journal of Aircraft*, 52 (3), ss. 839-846, WOS:000354751400010, DOI: 10.2514/1.C032828.

57. Qiao, N., Ma, T., Wang, X., Wang, J., Fu, J., Xue, P., (2024). An Approach for Formation Design and Flight Performance Prediction Based on Aerodynamic Formation Unit: Energy-Saving Considerations. *Chinese Journal of Aeronautics*, 37 (3), ss. 77-91, WOS:001205388500001, DOI: 10.1016/j.cja.2024.01.002.

58. Zhang, H., Qi, L., Wu, Y., Musiu, E. M., Cheng, Z., Wang, P., (2020). Numerical Simulation of Airflow Field from a Six-Rotor Plant Protection Drone Using Lattice Boltzmann Method. *Biosystems Engineering*, 197, ss. 336-351, WOS:000572932700012, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2020.07.018.
59. Wang, L., Xu, M., Hou, Q., Wang, Z., Lan, Y., Wang, S., (2021). Numerical Verification on Influence of Multi-Feature Parameters to the Downwash Airflow Field and Operation Effect of a Six-Rotor Agricultural UAV in Flight. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, ss. 10, (106425), WOS:000703547400003, DOI: 10.1016/j.compag.2021.106425.
60. Wen, S., Han, J., Ning, Z. H., Lan, Y. B., Yin, X. C., Zhang, J. T., Ge, Y. F., (2019). Numerical Analysis and Validation of Spray Distributions Disturbed by Quad-Rotor Drone Wake at Different Flight Speeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, ss. 21, (105036), WOS:000497247500042, DOI: 10.1016/j.compag.2019.105036.
64. Menter, F. R., (1994). 2-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications. *Aiaa Journal*, 32 (8), ss. 1598-1605, WOS:A1994NZ34200006, DOI: 10.2514/3.12149.
67. Tyson, C. W., Roy, J. C., (2019). A Higher-Order Error Estimation Framework for Finite-Volume CFD. *Journal of Computational Physics*, 394, ss. 632-657, WOS:000478572700031, DOI: 10.1016/j.jcp.2019.06.017.
71. Zheng, X., Jian, X., Wei, J., Wenzheng, D., (2016). Numerical and Experimental Investigation of Near-Field Mixing in Parallel Dual Round Jets. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2016, ss. 1-12, (7935101), WOS:000385496800001, DOI: 10.1155/2016/7935101.
72. Thompson, D. H., Webb, W. B., Hoffman, D. J., (1985). The Cell Reynolds Number Myth. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 5 (4), ss. 305-310, WOS:A1985AHS8000001, DOI: 10.1002/flid.1650050402.

6.1.2. Web of Science: Emerging Sources Citation Index (ESCI)

25. Zheng, Y., Yang, S., Liu, X., Wang, J., Norton, T., Chen, J., Tan, Y., (2018). The Computational Fluid Dynamic Modeling of Downwash Flow Field For A Six-Rotor

UAV. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 5 (2), ss. 159-167, WOS:000441079700001, DOI: 10.15302/j-fase-2018216.

6.1.3. Makaleler: Diğer

14. Ekmekçioğlu, A., Yıldız, M., (2018). İnsansız Hava Araçlarının Askeri ve Sivil Alanlarda Kullanımı: ABD ve Türkiye Örnekleri ve Bazı Politika Önerileri. *Türk İdare Dergisi*, 1 (486), ss. 169-227.

16. Basset, P.-M., Tremolet, A., Lefebvre, T., (2014). Rotary Wing UAV pre-sizing : Past and Present Methodological Approaches at Onera. *Aerospace Lab*, (8), ss. 1-12, DOI: 10.12762/2014.AL08-10.

75. Launder, B. E., Spalding, D. B., (1974). The Numerical Computation of Turbulent Flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3 (2), ss. 269-289, DOI: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.

6.2. Bildiriler

6.2.1. WoS: Conference Proceedings Citation Index - Science (CPCI-S)

55. Shin, H.-S., Antoniadis, A. F., Tsourdos, A., (2017). Parametric Study on Efficient Formation Flying For A Blended-Wing UAV. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2017-06-13; 2017-06-16, Miami, FL, USA. IEEE, ss. 1657-1664. WOS:000425255200206, DOI: 10.1109/ICUAS.2017.7991453.

6.2.2. Bildiriler: Diğer

1. Sarris, Z., (2001). Survey Of UAV Applications In Civil Markets. 9th IEEE Mediterranean Conference on Control and Automation (MED '01), 2001-06-27, 2001-06-29, Dubrovnik, Croatia. IEEE, ss. 1-11.

34. Haas, P. Y., Balistreri, C., Pontelandolfo, P., Triscone, G., Pekoz, H., Pignatiello, A., (2014). Development of an Unmanned Aerial Vehicle UAV for Air Quality Measurement in Urban Areas. 32nd AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2014-06-16, 2014-06-20, Atlanta, GA, USA. American Institute of Aeronautics and Astronautics, ss. 2272. DOI: 10.2514/6.2014-2272.

63. Menter, F. R., (1993). Zonal Two Equation k-w Turbulence Models for Aerodynamic Flows. 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, 1993-07-06, 1993-07-09, Orlando, FL , USA. AIAA, 96N72446, DOI: 10.2514/6.1993-2906.

6.3. Kitap ve Kitap Bölümleri

5. Shkarayev, S. V., Ifju, P. G., Kellogg, J. C., Mueller, T. J. (2007). Introduction to the Design of Fixed-Wing Micro Air Vehicles Including Three Case Studies, American Institute of Aeronautics and Astronautics, New York, USA.

11. Austin, R. (2010). Unmanned Aircraft Systems: UAVS Design, Development and Deployment, (Vol. 54) John Wiley and Sons, Chichester, West Sussex, U.K.

15. Angelov, P. (2012). Sense and Avoid in UAS : Research and Applications, (2 ed.) John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA.

65. Matsson, J. E. (2023). An Introduction to Ansys Fluent 2023, SDC Publications, USA.

74. Launder, B. E., Spalding, D. B., (1983). The Numerical Computation of Turbulent Flows (Paper 8), Numerical Prediction of Flow, Heat Transfer, Turbulence and Combustion, sf. 96-116, Pergamon, UK, USA.

6.4. Tezler

2. Özdemir, U., (2015) Dikey İniş Kalkış Yapabilen Sabit Kanatlı İnsansız Hava Aracı Tasarım, Üretimi ve Uçuş Testleri. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Uçak ve Uzay Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 206.

4. Çetin, B., (2018) İnsansız Hava Araçlarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 133.

12. Kaya, N., (2015) Hidrojen Kullanan Turbofanlı Bir İnsansız Hava Aracının Ekserjetik Sürdürülebilirlik Analizi. Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı, Eskişehir, Türkiye, 255.

73. Kartal, M. A., (2023) Bir Isı Değiştiricisinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Modellemesi. Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 171.

6.5. Çevrimiçi Kaynaklar

68. Intel Corporation, (2023). Intel® Core™ i9-13900HX CPU. <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/232171/intel-core-i913900hx-processor-36m-cache-up-to-5-40-ghz/specifications.html> (Son Erişim Tarihi: 21.12.2024).

69. Notebookcheck, (2024). Intel Core i9-13900HX. <https://www.notebookcheck.net/Intel-Core-i9-13900HX-Processor-Benchmarks-and-Specs.671451.0.html> (Son Erişim Tarihi: 21.12.2024).

70. Notebookcheck, (2024). NVIDIA GeForce GTX 470M. <https://www.notebookcheck.net/NVIDIA-GeForce-GTX-470M.35971.0.html> (Son Erişim Tarihi: 21.12.2024).

6.6. Elektronik Kaynaklar

61. ANSYS® Inc, (2019). ANSYS Fluent Theory Guide, Release 19 R3. Canonsburg, PA, USA,

62. ANSYS® Inc, (2024). ANSYS Fluent Theory Guide, Release 2024 R2. Southpointe, Canonsburg, PA, USA, (2024-07-01).

66. ANSYS® Inc, (2009). Appendix A: Mesh Quality – ANSYS Meshing Application Introduction (Training Manual). Canonsburg, PA, USA,

EKLER

EK 1 - ACT Konsol: Parametrik Analizleri Otomatik Kaydeden Kod

```
# Toplam tasarım noktası sayısını al
dp_count = len(Parameters.GetAllDesignPoints())

for dp_index in range(dp_count):
    try:
        # Tasarım noktasını al
        design_point = Parameters.GetDesignPoint(Name=str(dp_index))

        # Eğer design_point zaten temel tasarım noktası değilse ayarla
        if Parameters.GetBaseDesignPoint() != design_point:
            Parameters.SetBaseDesignPoint(DesignPoint=design_point)

        # Projeyi güncelle
        Update() # Update Project işlemini gerçekleştir

        # Projeyi kaydet
        Save(Overwrite=True) # Mevcut projeyi kaydeder

    except Exception as e:
        # Hata durumunda mesaj yazdır ve bir sonraki tasarım noktasına geç
        print "Tasarım Noktası {0} sırasında hata oluştu: {1}".format(dp_index, e)
        continue # Bir sonraki tasarım noktasına geç
```

Bu kod, her bir tasarım noktasında projeyi güncelledikten sonra, otomatik olarak projeyi kaydedip bir sonraki tasarım noktasına geçmek üzere tasarlanmıştır.

EK 2 - Literatür Tablosu

Makale Başlığı	Yıl	İHA Bilgisi	Kullanılan Yöntemler	Amacı ve Konu	Sonuçlar
CFD Simulation and Experimental Verification of the Spatial and Temporal Distributions of the Downwash Airflow of a Quad-Rotor [17].	2020	Dört rotorlu ZHKU-0404-01, Pervane Çapı: 0.6m	Fluent; RANS, SST k- ω , SIMPLE, Sliding Grid; Transient, Zaman adımı: 0.0001 s, Pervane 2500 RPM, 5.8 milyon hücre, Deneysel doğrulama	Tarımsal amaçlarla kullanılan dört rotorlu İHA'nın aşağı yönlü hava akışının uzaysal ve zamansal dağılımını analiz etmek	Z-yönünde hız 2.5-3 metre arasında hızlandığı, maksimum hızın 8.96 m/s olduğu, yer etkisi ve yukarı yönlü akışın gözlemlendiği, simülasyon ve deney sonuçlarının %10 hata payı ile doğrulandığı, aşağı yönlü hava akışının 1.5-4.5 saniye arasında stabil hale geldiği ve yer etkisi nedeniyle hız dağılımında genişleme meydana geldiği tespit edilmiştir.
Winglet Design and Optimization for a MALE UAV using CFD [9].	2014	Sabit Kanatlı MALE-Winglet Kanat açıklığı: 6.3 m, Maks. Hız: 190 km/h, Maks. Ağırlık: 210 kg	ANSYS CFX, RANS, Spalart-Allmaras Kanat ucu 3 milyon hücre, tam İHA 7 milyon hücre, PSU 94-097 airfoil, [Steady-State**]	Winglet tasarımını optimize ederek MALE İHA'nın aerodinamik performansını artırmak, seyir ve loiter (düz içuş, min yakıt, maks uçuş) koşulları için L/D oranını iyileştirmek	Optimize edilen kanat ucu tasarımı, İHA'nın aerodinamik performansını %10 artırmış, indüklenmiş sürüklenmeyi azaltmış ve uçuş süresini yaklaşık %10 oranında uzatmıştır.
CFD Analysis of the Aerodynamic Effects on the Stability of the Flight of a Quadcopter UAV in the Proximity of Walls and Ground [7].	2020	Dört rotorlu DJI Phantom 3, Pervane Çapı 24 cm	ANSYS 17.1, Realizable k- ϵ , MRF, transient ve steady-state. Çözüm ağı 26 milyon eleman, Pervane dönüş hızı 1000 rad/s (9550 RPM), Çözüm süresi ~2 hafta.	İHA'nın duvar ve zemin gibi engellere yakın uçuşları sırasında oluşan aerodinamik etkileri ve stabilitesi üzerindeki değişiklikleri incelemek.	Yer etkisiyle itki kuvvetinde %4.9 artış ve sürüklenme kuvvetinde %20.5 azalma gözlemlenmiştir. Dönme momentinde %60'a varan artışın stabiliteyi olumsuz yönde etkileyeceğinden bahsedilmiş. Yere yakınlık itkiyi artırır, sürüklenmeyi azaltır. Yer etkisinin direnci azalttığı, kaldırma kuvvetinin arttığı göstermiştir.
Flood Characterization Based on Forensic Analysis of Bridge Collapse Using UAV Reconnaissance and CFD Simulations [18]	2022	Dört rotorlu DJI Phantom 4 Professional, İHA'ların Örnek Kullanımı.	ANSYS Fluent, Realizable k- ϵ , Steady-state (RANS) ve unsteady (URANS). Hücre Sayısı 11 milyon.	İHA ile köprü hasarının 3D haritalandırılması ve CFD ile köprüye zarar veren akışkan-yapı etkileşimi analiz edilmiştir.	Sel akış hızı köprü temellerine ciddi zarar vermiştir. İHA tabanlı haritalama ve CFD simülasyonları, doğal afetlerle mücadelede kullanılabildiği gösterilmiştir.
On Using Neural Networks in UAV Structural Design for CFD Data Fitting and Classification [19]	2013	Sabit kanatlı İHA	Fluent, FE, ANSYS, FSI, Steady-State, neural network-based, Hücüm açısı: -5° ile 20, 0.1 Ma	İHA'nın yapısal tasarımında CFD verilerinin ANN kullanılarak FE analizine entegrasyonu, bir yönlü FSI yöntemi kullanılarak incelenmiştir.	ANN ile basınç fonksiyonlarının oluşturulması, CFD ve FEA yazılımları arasındaki mesh uyumsuzlukları giderilmiştir. Neural network'ler, basınç verilerini yüksek doğrulukla tahmin etmiştir.
Assessment of the methodology for the CFD simulation of the flight of a quadcopter UAV [6]	2021	Dört rotorlu DJI Phantom 3	ANSYS-Fluent 17.1, MRF, Sliding Mesh, Realizable k- ϵ , steady-stateve, transient, Pervane dönüş hızı 1000 rad/s (9550 RPM), Courant sayısı <1, 9000 saat. 26 milyon hücre.	Quadcopter modelinin yere olan uzaklığının pervane itki kuvvetine etkisi araştırılmıştır. Ayrıca MRF ve Sliding Mesh yöntemlerinin hesaplama süreleri karşılaştırılmıştır.	MRF ve Sliding Mesh yöntemlerinin performansları karşılaştırılmıştır. MRF yöntemi daha düşük hesaplama maliyeti sunarken, Sliding Mesh daha hassas sonuçlar sağlamıştır. Yer etkisinin itki kuvvetini %9-12 oranında etkilediği bulunmuştur.
CFD-aided optimization of a tactical Blended-Wing-Body UAV platform using the Taguchi method [20]	2021	Sabit kanatlı, BWB Blended-Wing-Body Taktiksel RX-3 İHA, Kanat açıklığı: 7.15 m, Maks. Hız: 190 km/h, Maks. Ağırlık: 190 kg.	ANSYS-CFX 18.1, RANS, Spalart-Allmaras, Steady-state, Çözüm Ağı: 9.5 milyon düğüm noktası.	Taktiksel BWB İHA'nın aerodinamik optimizasyonun gerçekleştirilmiş ve performans kriterlerinin iyileştirilmesi için CFD tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir.	Taguchi yöntemi ile deney sayısı %70 azaltılmış. Maksimum hız, kalkış mesafesi ve brüt kalkış ağırlığı optimize edilmiş. Her bir tasarım parametresinin performans üzerindeki katkı oranları belirlenmiştir. Kalkış mesafesi: 136 m'den, kalkış pisti 113 metreye kadar azaltılmıştır. BWB İHA'nın tasarım parametrelerinin değiştirilmesiyle performansın artırmanın mümkün olduğunu gösterilmiştir.

A Computational Fluid Dynamics and Finite Element Analysis Design of a Microtubular Solid Oxide Fuel Cell Stack for Fixed Wing Mini Unmanned Aerial Vehicles [8]	2019	Sabit Kanatlı Mini İHA. Yakıt Hücresi.	ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, RANS, FEA Çözüm ağı: 1,638,809 Eleman.	Sabit kanatlı mini İHA'lar için mikro-tübüler katı oksit yakıt hücresi (SOFC) yığınının CFD ve FEA ile modellenmesi, yakıt hücresi içindeki akış ve ısıl dağılımın analizi	Yüksek sıcaklık nedeniyle hücresinin verimliliğini etkilediği, bu nedenle daha iyi soğutma için tasarımda düzenlemeler yapılması gerektiğini vurgulanmıştır. Yakıt hücresi yığınının termal stresler nedeniyle deformasyona uğradığı görülmüş ve tasarım önerileri verilmiştir.
Model Migration for CFD and Verification of a Six-Rotor UAV Downwash [21]	2020	Altı rotorlu JF01-10 Genişlik: 178 cm Pervane Çapı 22 inç (558 mm); 1:10 ölçekli İHA'da kullanılmıştır.	ANSYS Fluent, SST k- ϵ , Steady-state, Pressure-based, Coupled solver, Absolute Velocity Formulation, [MRF**], Pervane dönüş hızı 1500 rpm. Çözüm ağı: 518834 Eleman	Tarımsal İHA'ların downwash CFD modellerini model göçü yöntemiyle doğrulama. Amaç, downwash hızını ve akış yönünü incelemek ve doğrulamaktır.	Gerçek İHA için aşağı yönlü hava hızı: 12,5 m/s, -1:10 ölçekli model için hava hızı: 1,9 m/s ve 1,8 m/s, Küçük İHA'nın PIV testleri ile CFD modelleri arasındaki göreceli hata %12'den az. Gerçek boyutlu İHA için %34 hata oranı. CFD modellerinin optimize edilmesi gerektiği belirtilmiştir.
Performance Characterization of the UAV Chemical Application Based on CFD Simulation [22]	2019	Nozüller Altı rotorlu	ANSYS ICEM CFD 15, DPM, Standart k- ϵ , Pressure-based, Transient, Euler-Lagrange, Toplam Grid Alanı: 228 000	Tarımsal İHA'ların püskürtme kalitesini artırmak ve damlacık sapmasını minimize ederek verimliliği artırmak.	Farklı rüzgâr hızları, püskürtme basınçları ve yükseklikler için yapılan simülasyonlarda damlacıkların sürüklenme mesafelerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Rüzgâr hızının artışı, damlacıkların sürüklenme mesafesini belirgin şekilde artırmıştır. 5 m/s hızda damlacıklar 2.85 m'ye kadar sürüklenmiştir.
CFD Analysis of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Moving in Flocks [3]	2019	Sürü, Formasyon, Dört Rotorlu Phantom 3 Rotor eksen mesafesi: 25 cm	ANSYS Fluent v18.2, Realizable k ϵ , MRF, Sliding Mesh, Pressure-based, Transient, zaman adımı: 0,01s; SIMPLE, 2nd order, 6,5 milyon düğüm, 4,7 milyon eleman, Pervane:10K rpm. Sürü, Formasyon	Sürü halinde hareket eden insansız hava araçlarının birbirleri üzerindeki aerodinamik etkilerini HAD ile analiz etmektedir. Bu sayede İHA'lar arasındaki güvenli mesafelerin belirlenmesine çalışılmıştır.	Üstte bulunan İHA'nın, alttaki İHA üzerinde aerodinamik olarak etkilediği, bu nedenle alttaki İHA'nın stabilitesini bozabileceği ön görülmüştür. Ayrıca, İHA'ların birbirine yakın uçmaları durumunda aerodinamik etkilerin minimize edilmesi gerektiği ve güvenli uçuş mesafelerinin belirlenmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.
Computational Fluid Dynamic Study on a Novel Propulsive System: ACHEON and Its Integration with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) [23]	2015	Sabit kanatlı İHA Canard (kanatçık) yapılandırılmış Nimbus Prototip İHA	Fluent 6.3, RANS, SST k- ω , pressure based coupled solver (PBCS), FMG, SIMPLE, Mesh Bağımsızlık Testi, Çözüm ağı:914K Grid node, Multiblock	ACHEON itki sisteminin Nimbus İHA'ya entegrasyonu, bu sistemin aerodinamik performansı ve itki yönlendirme verimliliğini sayısal olarak incelemek.	Swirl (dönme) etkisinin, nozulun itki yönlendirme verimliliğini azaltmış, akıştaki düzensizlikler performansı olumsuz etkilemiştir. Nozulun çıkış açısının artması, İHA'nın kaldırma kuvvetini artırmış ancak sürüklenme kuvvetini de yükseltmiştir.
CFD Simulation and Measurement of the Downwash Airflow of a Quadrotor Plant Protection UAV During Operation [24]	2022	Dört rotorlu Bitki Koruma İHA	Fluent 19.2; RANS, SST k- ω , pressure based, transient, PISO, coupled pressure-velocity, Overset Grid, 8×10^7 grid, Y+ :3,4; timestep: 1.5×10^{-4} s, Pseudo-Searching Scheme of Donor Elements,	Tarımsal amaçlarla kullanılan İHA'ların püskürtme verimini artırmak için aşağı yönlü hava akımının karakteristiklerinin incelenmesi	3 m yükseklikte uçuş yapan İHA'nın, yer etkisinin güvenli uçuşu etkilemediği belirtilmiştir. 4 m/s ve üzeri hızlarda at nalı vortekslerin oluşumu görülmüş. En uygun uçuş hızı 1-3 m/s arasında olduğu bulunmuştur. Simülasyon ve deneysel veriler %15-23 hata oranı ile uyumlu bulunmuştur.
Evaluating the Longitudinal Stability of an UAV Using a CFD-6DOF Model [26]	2015	Sabit Kanatlı Giant III (KADET LT-40) Ağırlık: 11,5kg, Kanat açıklığı: 2,2m; Pervane: APC 16 inç, Motor gücü 1HP, Uçuş hızı 21,6 m/s	ANSYS Fluent (v.14), pressure based, RSM, 6DOF, SIMPLE, Non-equilibrium Wall Functions, Transient, Least Squares Cell Based First Order, Dinamik Mesh, Spring-Based Smoothing, Local Cell Remeshing, Schlichting, Pervane Hızı 6510 RPM, Y+ :30-300, Zaman adımı 0.05-0.25s, Hücre Boyutları 1-5 mm (Hermann Schlichting sınır tabaka kitabı)	İHA'nın boyuna stabilitesini değerlendirmek ve phugoid (uzun periyot osilasyonu) hareketlerini incelemek için uçuş sırasında elde edilen deneysel veriler ile HAD (6DOF) sonuçlarını karşılaştırmaktır.	Simülasyon sonuçları ile deneysel veriler arasında güçlü uyum bulunmuştur. Phugoid hareketi için frekans, genlik ve sönüm oranları sırasıyla %6,75, %20.31 ve %10,97 hata oranı ile doğrulanmıştır. Simülasyonlar, pitch açısı, irtifa ve hız ile örtüşmüştür. Ayrıca, sürüklenme kuvveti %6,84 hata oranı ile deneysel verilerle uyumlu bulunmuştur. Boyuna stabilize başarılı bir şekilde öngörülmüştür.

Aerodynamic Analysis of Tilt-Rotor Unmanned Aerial Vehicle with Computational Fluid Dynamics [27]	2006	Tilt-Rotor İHA TR-E2S1, Kanat Açıklığı: 555 mm, Kord Uzunluğu 103 mm, Kuyruk Açıklığı 240 mm, Gövde Uzunluğu 620 mm, NACA64621, T-Tipi Kuyruk	Fluent v.6.1, RANS, Spalart-Allmaras, First Order, Second Order, Çözüm ağı: 5M grid, Inflation ilk katman 0,1mm, büyüme oranı 1,2; katman10, Mach sayısı 0.34, Hücum açısı 1°- 20° arası.	TR-E2S1 konfigürasyonuna sahip tilt-rotorlu İHA'nın aerodinamik özelliklerini HAD yöntemleriyle incelemek ve sonuçları rüzgâr tüneli testleri ile karşılaştırmak.	HAD sonuçları, %12 ölçekli rüzgâr tüneli testleriyle karşılaştırılmış, benzer karakteristikler tespit edilmiştir. HAD analizinde stall açısı 16°, rüzgâr tüneli testinde ise 20° olarak belirlenmiştir. HAD, rüzgâr tüneline kıyasla daha yüksek kaldırma kuvveti göstermiştir. Kanat hücum açısının 1°den 4°'ye çıkarılması, kaldırma kuvvetinde 0,2 birim artış sağlamıştır. Küçük ölçekli rüzgâr tüneli modelinin yetersiz olduğu ve daha büyük ölçekli testlerin yapılması gerektiği belirtilmiştir.
Wind-Tunnel and CFD Investigations of UAV Landing Gears and Turrets - Improvements in Empirical Drag Estimation [28]	2020	Sabit Kanatlı İHA İniş takımları ve taret tasarımları	StarCCM+ v15.02, RANS, SIMPLE, unsteady, SST, EARS, upwind scheme, central difference schemes. Zaman adımı 2.5×10^{-4} s; 4000 Adım Çözüm ağı: 18-45 milyon hücre, 30 katmanlı sınır tabakası, y^+ 0,5-0,8; Mesh bağımsızlık testi.	Sabit kanatlı İHA'larda iniş takımları ve sensör taretlerinin parazitik sürüklemeye üzerindeki etkilerini incelemek ve HAD sonuçlarını deneysel verilerle kıyaslamak	Akış ayrılmaları sebebiyle taret sürüklemesinin arttığı ve sensör yüzeylerinin büyük oranda drag oluşturduğu belirtilmiştir. HAD ve deneysel sonuçların %10'dan az sapma gösterdiği, %60'a varan sürüklemeye kuvvetinin azaltılabileceği tespit edilmiştir. İniş takımları ve taretler incelenmiştir
Design of Variable Spray System for Plant Protection UAV Based on CFD Simulation [29]	2021	Sekiz Rotorlu DJI MG-1S, 533 mm çapında ve 178 mm adım açısında 2170 pervaneler	ANSYS Fluent 2019 R2, SST k- ω , MRF** (Makalede Sliding Mesh! yanlış yazılmış), Steady, second order upwind, DPM, 48 milyon düğüm, Pervane Hızı: 3000-5000 RPM, İki fazlı akış. (Regresyon Analizi: BPNN, KKT, SVR, PLSR).	Tarımsal İHA'ların değişken püskürtme performansını HAD ile incelemek. Püskürtme performansını iyileştirmek için püskürtme sisteminin tasarımı.	Püskürtmenin rüzgâr hızı ve uçuş yüksekliğinden etkilendiğini göstermiştir. Rüzgâr hızı hatası rotor altı ve yere yakın bölgelerde 1-2 m/s aralığında, diğer bölgelerde 1 m/s sınırları içinde; maksimum hata 2.88 m/s olarak tespit edilmiştir. Damlacık hatası ise %10'un altında olarak belirlenmiştir.
Investigating Errors Observed during UAV-Based Vertical Measurements Using CFD [31]	2022	Altı Rotorlu DJI Matrice 600 Pro, Pervane Çapı: 53 cm, Yük Kapasitesi: 6,5 kg	Wasatch, FVM, Navier-Stokes, LES, Dynamic Smagorinsky alt grid modeli, Dirichlet, transient, Toplam süre: 30 saniye, 23 milyon hücre	Dikey uçuş sırasında döner kanatlı İHA'lar kullanılarak hava kalitesi ölçümlerinde karşılaşılan hataları incelemek.	İniş sırasında rotorların neden olduğu türbülanslı akım nedeniyle ölçümlerde ciddi hatalar tespit edilmiş, %100'den fazla hata oranı bulunmuştur. Yükseliş sırasında ise hatalar düşük seviyelerde kalmıştır. Ölçümlerin iniş sırasında yapılmaması gerektiği önerilmiştir.
A Computational Fluid Dynamics Investigation of Subsonic Wing Designs for Unmanned Aerial Vehicle Application [35]	2019	Sabit Kanatlı AAI RQ-7 Shadow, K. açıklığı 4,3m; Uzunluk 3,4m; Ağırlık 170kg, Seyir hızı 103mph; maks hız 135mph	ANSYS Fluent, Spalart-Allmaras, k- ϵ , SST k- ω , Green-Gauss cell-based gradient, coupled, pressure-velocity, coupling. Y^+ Değeri 15-40, eleman sayısı: 7,5K(2D C-mesh); 1,8-2,4M(3D)	Sabit kanatlı İHA'nın kanat tasarımında yapılan değişikliklerin, aerodinamik performans üzerindeki etkilerinin HAD yöntemleriyle incelenmesi.	NACA 4415 ve EPPLER 559 hava profilleri arasında EPPLER 559; düşük hücum açılarında daha iyi performans gösterirken, yüksek hücum açılarında sürüklemeye kuvveti artmıştır. Winglet eklenmiş kanat ise 12°'ye kadar kaldırma kuvvetini artırmıştır. Winglet eklemeleri ve konik kanat tasarımı ile aerodinamik performans iyileştirilmiştir.
CFD Analysis and RBFNN-based Optimization of Spraying System for a Six-Rotor Unmanned Aerial Vehicle Sprayer [36]	2023	Altı Rotorlu X-16 (Çin), P.çapı 207mm, P.Acısı 6°; P.NTA 0°; Kol uzunluğu: 533mm	ANSYS Fluent 16.0; pressure based, SST k- ω , DPM, SIMPLE, unsteady-transient, Sliding Mesh (Grid), second-order scheme, second-order upwind scheme, (50bin adım; 0,0001 s, 30 iterasyon/adım), Mesh bağımsızlık testi, Grid Testi, 16,28 milyon hücre; yakınsama k. 10^{-4} , pervane hızı 3600 rpm, (CFD: 864; püskürtme 1800 CPU saati)	Tarımsal amaçla kullanılan altı rotorlu İHA'nın aşağı yönlü akımları ve püskürtme performansının CFD ve deneysel yöntemlerle incelenmesi; RBFNN ve GA ile püskürtme sisteminin optimize edilmesi.	HA'nın püskürtme performansında 1 metrede %16,27, 2 metrede %23,25, 3 metrede %18,24 oranında iyileşmeler sağlanmıştır. CFD modeli, deneysel verilerle doğrulanmış ve hata oranı %15'in altında kalmıştır.

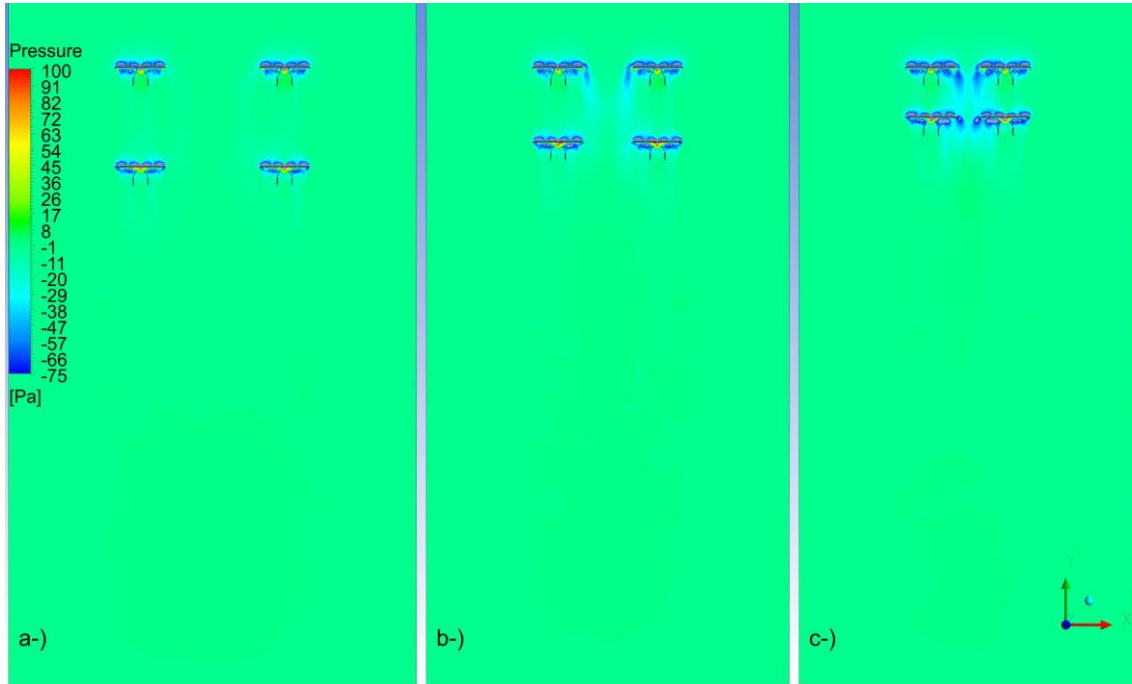
Aerodynamic Performance Analysis of VTOL Arm Configurations of a VTOL Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation [37],	2022	VTOL-Sabit kanatlı Kanat açıklığı 2m; seyir hızı: 23m/s, yük.300m, maks. ağırlık 10kg, stall hızı 14m/s, uçuş süresi 6saat, Kanat NACA4412, Kuyruk NACA0006, Pervane16 inç	[ANSYS] SST k- ω , steady-state, Rüzgâr hızı 23m/s, Mesh boyutu 0.8m, Inflation, first layer 8×10^{-5} m. Yan kayma açısı 0,15,30; Hücum açısı 0-24 (karşı) ve 0-15 (yan), Yatış açısı (bank angle): 0-40	Farklı VTOL kol konfigürasyonlarının aerodinamik performansını HAD ile karşılaştırmak; kaldırma, sürüklenme, uçuş verimliliği ve stabilite açısından analiz yapılması	Twin-tail boom konfigürasyonu düşük hız ve düşük hücum açılarında en iyi performansı sergilemiştir. Tandem wing, yüksek hücum açılarında daha verimli sonuçlar sağlarken, Quad-plane düşük sürüklenme katsayısına sahip, enerji verimliliği açısından en iyi performansa sahip olmuştur. Transverse arm ise stabilite sağlamasına rağmen aerodinamik verimlilik açısından zayıf kalmıştır.
CFD-based pesticide selection for a nozzle used in a six-rotor UAV in hover mode for tea spraying [38]	2023	Altı Rotorlu ZZ20-6X, Rotor çapı 558mm, boş ağırlık 18kg, Maks ağırlık 40kg, Uçuş süresi 10-15dk;	ANSYS Fluent 14.0; Pressure-based, SST, Implicit SIMPLE, Coupled Solver, First-order upwind scheme, CFL 0.5, Yakınsama: 10^{-4} ;300rad/s, 2885rpm, 10M,12M,45M grid;	Tarımsal İHA'nın hover modundaki püskürtme performansını ve aşağı yönlü akış yapısını HAD ile analiz etmek, nozul ve pestisit ilişkisini incelemek	Pervane hızı ve yükseklik ayarlarının, püskürtme performansı ve türbülans stabilitesi üzerinde önemli etkisi olduğu; CFD modelinin, pestisit ve nozul ilişkisinin incelenmesinde etkili olduğu bulunmuştur. Deneysel verilerle yapılan karşılaştırmalar büyük ölçüde uyumlu olup, sapmalar %5'ten düşük bulunmuştur.
Performance Analysis of Empennage Configurations on a Surveillance and Monitoring Mission of a VTOL-Plane UAV Using a Computational Fluid Dynamics Simulation [39].	2022	VTOL-Sabit Kanatlı Kanat açıklığı 3m; seyir hızı: 23m/s, yük.300m, maks. ağırlık 14-15kg, stall hızı 14m/s, uçuş süresi 6saat, gövde uzunluğu 1,3m, Kanat NACA4412, Kuyruk NACA0006	ANSYS 20.1, SST k- ω , steady-state, 1000 iterasyon, yakınsama 10^{-3} , Global mesh 800mm, inflation ilk katman 0,1mm, body size 160mm, face size 10mm	Farklı kuyruk yapılandırmalarının VTOL-Plane İHA'larının aerodinamik performansı üzerindeki etkilerinin HAD ile analiz edilmesi	Ters U şekilli bom yapı en yüksek durma açısına 18° sahip, yüksek kaldırma kuvveti ve düşük sürüklenme kuvveti sağlıyor, L/D oranı artırılmış, uçuş verimliliğini ve stabilitesini iyileştiriyor, Yüksek stabilite ve iyi manevra kabiliyeti sağlıyor
Coupled CFD/MBD Method for a Tilt Tri-rotor UAV in Conversion of Flight Modes [40]	2020	Tilt-Rotor, Tilt Tri-Rotor Uzunluk 3,04m, Genişlik: 3,8m, Yükseklik 0,57m, Ağırlık 21,5kg, Rotor çapı 0,36m,	ANSYS Fluent, RNG k- ϵ , SIMPLEC, Second order upwind, MPI, PRESTO, real blade model, dinamik grid, Mesh katmanları, Multi-layer grid Zaman Adımı CFD 0,001s, MBD 0,005s; CFD-MBD, ALE, AMI, Runge-Kutta, Pervane 2100rpm	Tilt tri-rotor İHA'nın gövde ve kanat hareketlerinin neden olduğu aerodinamik etkileri analiz edilmesi ve çift yönlü CFD-MBD entegrasyonu ile uçuş modları arasındaki geçişlerin etkilerini incelemesi	Gövde/kanat hareketlerinin uçuş modları arasında geçiş sırasında aerodinamik karakteristikler üzerinde önemli etkileri olduğu doğrulanmıştır. CFD-MBD entegrasyonu başarıyla gerçekleştirilmiştir. CFD ve MBD entegrasyonunun tilt-rotor İHA'ların aerodinamik analizinde başarılı sonuçlar verdiği doğrulanmıştır
Back Pressure Generated by Downwash and Crosswind on Spatial Atomization Characteristics During UAV Spraying: CFD Analysis and Verification [41],	2024	Dört rotorlu Pervane çapı 250mm, Pervane hızı: 2000, 2500, 3000 RPM	ANSYS 19.2, SST k- ϵ , pressure based solver, SIMPLE, DPM,Dinamik grid, Dinamik Mesh, Sliding Grid, Sliding Mesh, second-order upwind, zaman adımı:0,002s,20 iterasyon, toplam 2000adım. Yakınsama 10^{-6} , Hücre sayısı: 4.516.352	İHA püskürtme işlemlerinde downwash ve yan rüzgâr etkilerinin püskürtme damlacıklarının üzerindeki etkilerini araştırmak, nasıl etkilendiğini incelemek.	Downwash küçük damlacıkları yoğunlaştırırken, yan rüzgâr büyük damlacıkları daha uzak mesafelere taşımıştır. 6 m/s yan rüzgâr hızı püskürtme sürüklenmesini 1 metreye kadar artırmıştır. Deneysel veriler CFD sonuçlarıyla uyumlu bulunmuştur. Rotor hızı arttıkça negatif basınç genişlemiştir.

Gust Modeling with State-of-the-Art Computational Fluid Dynamics (CFD) Software and Its Influence on the Aerodynamic Characteristics of an Unmanned Aerial Vehicle [42]	2023	Sabit kanatlı Rybitwa, kanat açıklığı 0,636m, boyuna uzunluğu 0,476m, yüksekliği 0,102m, T-tipi kuyruk	ANSYS Fluent 16.2, FVM, RANS pressure-based solver, SIMPLE, Realizable k-ε, steady-state, transient, 0,001s, , yakınsama 10^{-3} , 2.069.466 hücre, y+: ~1, Downburst	Çalışma, rüzgâr patlamalarının (gust) etkilerini deneysel ve HAD incelemek, HAD doğruluğunu değerlendirmek.	Downburst ile hücum açısında düşüş ve kaldırma kuvvetinde azalma-dalgalanma gözlemlendi Eğik rüzgâr altında hücum ve kayma açılarında eşzamanlı değişim, aerodinamik performansı üzerindeki etkileri incelendi. HAD sonuçları ve deneysel veriler genel uyum gösterdi.
Dynamic Modeling and Control for Tilt-Rotor UAV Based on 3D Flow Field Transient CFD [43]	2022	Tilt-Rotor UAV (TRUAV) Sabit Kanatlı, VTOL Kanat açıklığı 3m, rotor çapı 0,26m	ANSYS Fluent, MRF, Sliding Mesh, Moving Mesh, SST k-ω, pressure-based, SIMPLE, steady-state, transient, Courant 15, Mesh (0,002-0,1m, büyüme 1,2, 9°), Y+ ~ 1, ilk katman 0,002 m, 10^8 hücre, zaman adımı 0,001 s, 2000adım, 10000 iterasyon, 2400-4000rpm	Tilt-Rotor İHA'nın geçiş modundaki gövde ve rotor aerodinamik etkileşimlerini değerlendirmek, HAD yöntemleri ile analiz etmek, modlardaki stabilite sorunlarını belirlemek.	Tilt-Rotor İHA'nın geçiş modunda fiskeye etkisi, kuyruk girdabı ve spiral iz akımının İHA stabilitesi üzerindeki etkileri incelenmiş, rotor ve kanat etkileşimleri sonucunda fiskeye etkisinin (fountain effect) olduğu bu durumun olumsuz etkilediği gözlemlenmiş, stabiliteyi koruyucu önlemler önerilmiştir. PID kontrol stratejisi ile maksimum 20°de stabil kalabileceği gösterilmiştir.
CFD Analysis of Aerodynamic Characteristics in a Square-Shaped Swarm Formation of Four Quadcopter UAVs [10]	2024	Sürü, Formasyon Dört Rotorlu DJI Phantom 3, Rotor mesafesi 25cm 10 000 RPM	ANSYS Fluent, MRF, Realizable k-ε modeli, steady-state, pressure-based solver, 23 M düğüm, 16 M eleman Sürü, Formasyon. Büyüme oranı 1,1	Dört quadcopter'in kare formasyonda sürü uçuşu sırasında oluşan aerodinamik davranışların HAD ile incelenmesi.	Alt ve üst sıradaki İHA'lar arasındaki basınç ve hız dağılımlarının etkisi belirgin. Üst sıradaki İHA'ların yarattığı hava akımlarının alt sıradaki İHA'lar üzerinde etkili olduğu ve formasyon düzenlemelerinin optimize edilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Yakın İHA Fenomeni tanımlanmıştır.
Research on UAV Downwash Airflow and Wind-Induced Response Characteristics of Rapeseed Seedling Stage Based on Computational Fluid Dynamics Simulation [44]	2024	Dört rotorlu DJI Mavic Pro, boyutları 83×83×198mm, rotor mesafesi 335mm.	[ANSYS, MRF, Steady-state], (Sliding Mesh yanlış kullanılmış 5s) Tek yönlü FSI, k-ε, Reynolds Navier–Stokes, Hareketli 70 102 Hücre, Hareketsiz 600,321 hücre, Deneysel Doğrulama, pervane hızı 550rpm	Bu çalışma, çok rotorlu İHA'ların oluşturduğu aşağı yönlü hava akımının, kanola fideleri üzerindeki etkilerini HAD ile analiz etmek.	İHA 2 metre yükseklik en verimli sonuçları vermiştir. HAD simülasyonları %10.5 hata payı ile deneysel verilerle doğrulanmıştır. Kanola fidelerinin yaprak uçlarındaki yer değiştirme hareketlerini, elastik modülüne bağlı olarak değişiklik göstermiştir.
Experiments and CFD Simulation of Downwash Airflow and Fog Distribution Discharged from a Single Rotor UAV Fitted with a Pulse Jet Thermal Fogging Machine [45]	2024	Tek Rotorlu (Helikopter) (Z-3N), Uzunluk 272cm, genişlik 80cm, yükseklik 127cm, (ağırlık; boş 55kg, mak.105kg), uçuş 60 dk, hız 1-10 m/s	ANSYS 19.2, RANS, RNG k-ε, DPM, pressure-based, Sliding Grid (Sliding Mesh), unsteady, transient, SIMPLE, Second Order, Second Order Upwind, Mesh testi (9.24M, 15,36M, 38,41M hücre), 15,36M hücre, 30 iterasyon /adım, Rotor Hızı: 830 rpm, [*Dinamik grid-*Hatalı]	Tarımsal amaçlı Z-3N model tek rotorlu İHA'nın aşağı yönlü hava akımını ve sis dağılımının incelemek, rüzgâr ve yüksekliğin etkisini araştırmak, HAD ve deneysel olarak incelemek	İHA ve sisleme makinesi ile yapılan simülasyonlarda rüzgârın dağılım üzerindeki etkisi görülmüştür. Karşı rüzgârları ile uçuş yüksekliği arttıkça dağılımın stabilitesi artmıştır. Yan rüzgârların olumsuz etkileri belirlenmiş ve kaçınılması gerektiği vurgulanmıştır. Simülasyonlar deneysel verilerle uyumlu; hata oranları hava akımlarında %15'e kadar, sis dağılımında %20-30 arasında değişiklik göstermiştir.
Lateral Directional Aerodynamic Optimization of a Tandem Wing UAV Using CFD Analyses [46, 47]	2024	Tandem Kanatlı İHA Gövde uzunluğu: 3,8m, Mak ağırlık 400kg, seyir hızı 250km/saat, Ekonomik 160km/saat	ANSYS Fluent, RANS, SST k-ω, pressure-based, FMG, Full Multi Grid, 4 seviye, Courant sayısı optimizasyonu, Reverse Cuthill McKee, Bağımsızlık Testi, 1,6-2M (simetrik), 3M (asimetrik) hücre, [Zaman türü ??]	Tandem kanatlı İHA'nın yanal ve yönsel(dönel) aerodinamik performansını ve stabilitesini optimize etmek için farklı konfigürasyonlarla HAD simülasyonlarının yapılması	Dihedral açı ve wingletler sayesinde yanal ve yönsel stabilitenin iyileştiği, kaldırma/sürüklenme oranının arttığı, genel performansın iyileştiği gösterilmiştir. Kaldırma katsayısı (%7,2 artış) ve kaldırma/sürüklenme oranı (%5,4 artış) tespit edilmiş.

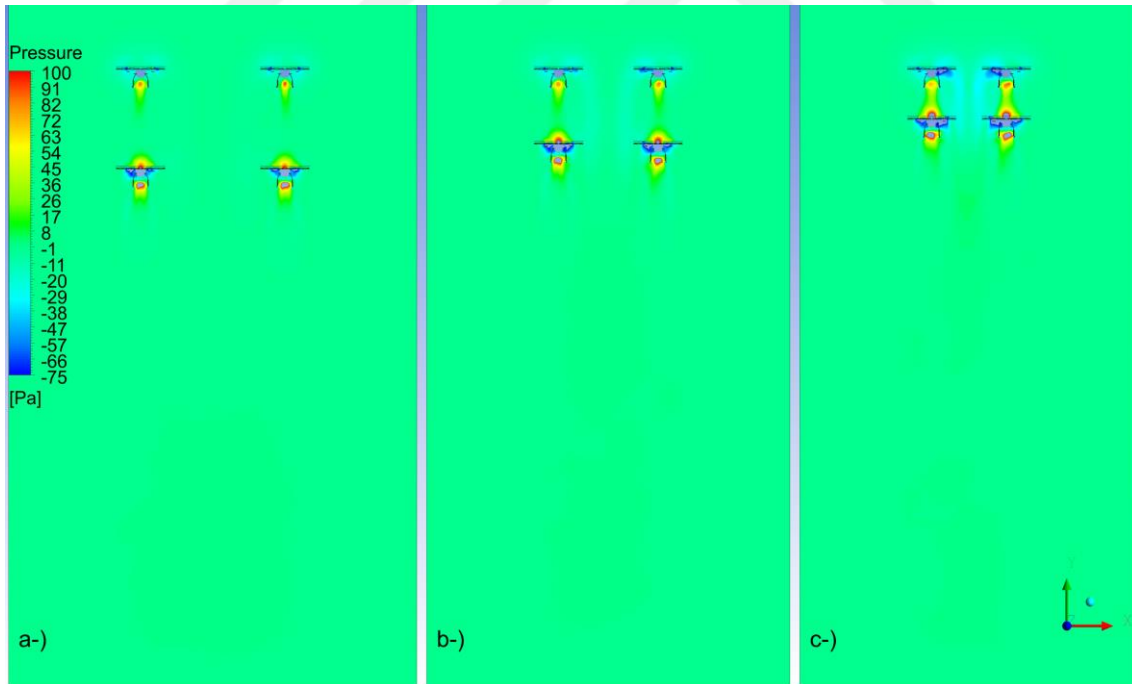
Multi-Perspective Structural Integrity-Based Computational Investigations on Airframe of Gyrodyne-Configured Multi-Rotor UAV Through Coupled CFD and FEA Approaches for Various Lightweight Sandwich Composites and Alloys [48]	2023	Çok Rotorlu, Gyrodyne İHA, taşıma kapasitesi 25kg, serbest akış hızı 25m/s	ANSYS Fluent 17.2, Tek yönlü FSI, k-ε, One-Way FSI	Çalışma, Gyrodyne yapılandırılmalı İHA'nın yapısal dayanıklılığını ve FSI analizleriyle değerlendirilmiş.	Karbon malzemelerinin dayanıklılık açısından en uygun seçenekler olduğu bulunmuştur.
Aerodynamic Analysis of Mathematically Modelled Propeller for Small UAV Using CFD in Different Temperature Conditions [49]	2023	İHA Pervaneleri APC Slow Flyer, NACA 4412 ve E63 Pervaneler. Pervane Çapı10 inç	ANSYS Fluent, Standart k-ω, SIMPLE, Least squares cell based gradient, Second-order upwind, Transient, Zaman adımı 0,015s x100, 40 iterasyon/adım, Mesh bağımsızlık testi, (yaklaşık 2.5 milyon hücre), hava 1,225 kg/m³, 4-6.5Krpm.	Farklı sıcaklık koşullarında, matematiksel olarak modellenen pervanelerin aerodinamik performanslarının HAD ile incelenmesi.	E63 pervanesinin diğer pervanelere göre farklı sıcaklıklarda daha yüksek itme ve verimlilik sağladığı, BET yöntemiyle yapılan incelemede yüksek devirlerde %10-15 hata oranı, HAD ve deneysel sonuçlar arasında %6.5 ile %7.7 fark olduğu bulunmuştur.
Quadcopter Drones Swarm Aeroacoustics [50]	2021	Sürü, Formasyon Dört Rotorlu, DJI Mavic Air, Pervane çapı 6, 73 cm	OpenFOAM, RANS, URANS, SST k-ω, steady-state, transient, unsteady, VBM, Virtual Blade Model, FWH, Ffowcs-Williams-Hawking, GCI, Grid Convergence Index, Hücre Sayısı 6M, Mesh Bağımsızlık Testi. 3 gün (256 çekirdek, 512 GB RAM.	İHA'ların sürü uçuşları sırasında farklı formasyonların (V ve U) aeroakustik ve aerodinamik etkilerini incelemek, gürültü seviyelerini azaltmak ve enerji verimliliğini artırmak.	V şekilli formasyon, U şekilli formasyona göre daha düşük gürültü ve %36 daha az sürüklenme kuvveti üretmiştir. Enerji tasarrufu ve gürültü azaltımı konusunda V şekli formasyonun daha avantajlı olduğu gösterilmiştir.
Design, Performance Evaluation and Optimization of a UAV [51]	2013	Sabit kanatlı, Elektrikli, küçük, boş ağırlık 1,9kg; faydalı yük kapasitesi 6kg, stall hızı <12m/s, E420, Winglet, T-Kuyruk	FLUENT, SU2, SST k-ω, Spalart-Allmaras, Mesh bağımsızlık testi, ilk katman, 68K(2D Y+ 0,2-0,4), 2M(kanat), 4,5M(tam gövde Y+<1); E420, X-Foil, JAVA Prop, Prandtl-Lanchester teorisi, NACA5412, NACA0012, E387	Hafif ve elektrikle çalışan sabit kanatlı İHA'nın aerodinamik performansını optimize etmek ve kullanılabilirliğini artırmak	İHA'nın aerodinamik verimliliği HAD analizleri ile iyileştirilmiş; HAD sonuçları Prandtl-Lanchester teorisi, deneysel veriler ile uyumlu; kanat uçlarında %14.36'lık kaldırma/sürüklenme oranı artışı sağlanmıştır.
Numerical Simulation and Experimental Verification on Downwash Air Flow of Six-Rotor Agricultural Unmanned Aerial Vehicle in Hover [52]	2017	Altı rotorlu SLK-5 model, tarımsal 288 rad/s pervane hızı, 3d tarama: Geomagic yazılım	FVM, RANS, RNG k-ε, Coupling algoritması, (coupled solver, double precision), unsteady, Mesh bağımsızlık testi (3,2M; 5,6M, 720M hücre), 2,3722s bitmiş. [! Dinamik mesh teknolojisi].	Altı rotorlu tarımsal İHA'nın hover durumunda aşağı yönlü hava akışı, sayısal ve deneysel yöntemlerle incelenmesi	Aşağı yönlü hava akışının maksimum 10 m/s olduğu, simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki hata oranının %12'den az olduğu; kanat etkileşim fenomeni (wing interference phenomenon) ve büzülme karakteristiği (shrinkage characteristic) gözlemlenmiştir. Optimal çalışma yüksekliği olarak 0.6 m önerilmiştir.
Aerodynamic Design of a MALE UAV [53]	2016	Sabit Kanatlı, MALE Maks. Ağırlık 185kg Kanat Açıklığı 4,9m, 5,1m, 6,4 m, Kanat profilleri: SG6042, NLF0215, SA7038, NLF1015	ANSYS CFX 15, RANS, Spalart-Allmaras, SST, Coupled Solver, Çözüm Ağı (dış7M; iç4M düğüm), 20x(2,5x10 ⁻⁶ m), pervane (Momentum source disk), 140km/s, Hücüm açısı -8°ile27°,	Yunanistan'daki uygulamalar için MALE sınıfı İHA'nın aerodinamik tasarımı ve optimizasyonu	Aerodinamik optimizasyon sonucunda, İHA'nın uçuş süresi %30 oranında artmıştır. Kanatçık optimizasyonu ile toplam uçuş süresinde ek %10'luk bir artış sağlanmıştır.
Parametric Study on Formation Flying Effectiveness for a Blended-Wing UAV [54, 55]	2019	Sürü, Formasyon Sabit kanatlı, BWB Blended-Wing-Body, Corax/Raven modeli, BAE Systems, Kanat açıklığı 10m	Cranfield Üniversitesi'ne ait özel geliştirilmiş Blended-Wing-Body, Corax/Raven modeli, BAE Systems, Kanat açıklığı 10m	Transonik hızlarda orta büyüklükteki BWB İHA formasyonlarının aerodinamik performansı HAD ile incelenmesi, farklı formasyonları değerlendirilmesi	Kanat ucu girdapları nedeniyle indüklenmiş sürüklenmenin azaltıldığı, en yüksek verimliliği sürüklemeye %65 oranında azaltmayla elmas formasyon göstermiş, üç kanat açıklığı mesafesi lider-takip sırasında kullanılmış. V-tip, elmas ve yarım elmas formasyonları, sürtünmede önemli bir azalma sağlamış.

Numerical Study of Aerodynamic Performance of a Multirotor Unmanned Aerial Vehicle Configuration [56]	2015	Dört Rotorlu 8,5N Ağırlık, Rotorlar Arası 0,48m, EPP1045 Pervane (Çap 10, Adım 4,5 inç), Pervane Hızı 300 rad/s	RANS; unsteady; Artificial Compressibility; Spalart-Allmaras; Overset-Mesh; 20,7M hücre; 6,05M vertex; Roe's flux-difference splitting; Modified Central Difference; linearized second-order Euler backward differencing, Implicit Time-Integration; Gauss-Seidel; Dual-Time-Stepping; Riemann invariant; MeTiS, MPI.	Dört rotorlu İHA'nın hover ve ileri uçuş durumlarında aerodinamik performansının incelenmesi, rotorlar arasındaki aerodinamik etkileşimlerin İHA kararlılığına ve kontrol algoritmalarına etkisini değerlendirmesi	Hover modunda rotorlar arası etkileşimlerin nispeten az olduğu ve itme kuvvetinde hafif dalgalanmalar gözlenmiştir. İleri uçuşta, arka rotorların ön rotorların oluşturduğu aşağı akıştan etkilenerek itme kuvvetinde azalma ve denge kaybı meydana geldiği bulunmuştur. Bu durum İHA'nın denge ve momentlerinde dengesizliklere neden olmuştur. İleri uçuşlarda kontrol sistemlerini geliştirmek için rotor etkileşimlerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmıştır.
An Approach for Formation Design and Flight Performance Prediction Based on Aerodynamic Formation Unit: Energy-Saving Considerations [57],	2024	Sürü, Formasyon, Sabit Kanatlı-Tandem Kanatlı (Katlanabilir), Seyir hızı 30m/s, irtifa 300m, ağırlık 36kg, kanat açıklığı 2,68m, kanat alanı 1,2m ² , pervane çapı 0,3m; dönüşü 3200rpm	RANS; VLM; SST k- ω ; MRF; Mesh bağımsızlık testi (2,94M; 6,28M; 10,98M; 17,23M-hücre); y+(5; 1; 0,5; 0,3); 6,28M hücre; Kutta koşulu; Kutta Joukowski; Biot-Savart; Neumann; space mapping	Sürü formasyon uçuşlarında İHA'ların aerodinamik performansı ve enerji verimliliği optimize edilmiştir; aerodinamik formasyon birimi kullanımıyla enerji verimliliği incelenmiştir.,	Kanat ucu girdaplarından kaynaklanan yukarı yönlü akımlar, İHA'ların L/D oranında %19 ve üzerinde bir iyileşme sağlamıştır; ikili formasyonlarda %22,8, üçlü formasyonlarda %57,5 L/D oranı iyileşmesi sağlanmıştır. Formasyon uçuşlarında yukarı akımlar sayesinde aerodinamik verimliliği arttırmıştır.
Numerical Simulation of Airflow Field from a Six-Rotor Plant Protection Drone Using Lattice Boltzmann Method [58]	2020	Altı rotorlu Tarımsal İHA Rotorlar arası 80cm; Pervane çapı 38,1cm; adımı 13,97cm, maks 5kg	XFlow 2017x; LBM, LES, WALE, transient, LBM D3Q27 kafes yapısı, hücre boyutu (far field 0,2m; rotor çevresi 0,625 cm), Çözüm ağı (başlangıç 271B, son t=2.5 s 16.8M), Dinamik Wake Refinement, Wake iyileştirme (1,25cm; $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), enhanced wall-function.	Altı rotorlu tarımsal İHA'nın hava akışının analiz edilmesi, aerodinamik performansının ve püskürtme verimliliğinin incelenmesi	Yere yakın uçuşlarda vorteks yapıları gözlemlenmiştir. Homojen hava akışı 3 m irtifa ve 3 m/s hızda olduğu tespit edilmiş, 4-5 m/s ve 1.5 m uçuşlardan kaçınılması gerektiği belirlenmiştir. Deneysel verilerle %95 oranında uyum bulunmuştur.
Numerical Verification on Influence of Multi-Feature Parameters to the Downwash Airflow Field and Operation Effect of a Six-Rotor Agricultural UAV in Flight [59]	2021	Altı Rotorlu DJI M600 Rotor açısı 60°, rotor açıklığı 1133mm, taşıma kapasitesi 5L, Maks. Rüzgar hızı 8m/s	XFlow; LBM; D3Q27; hesaplama hacmi 32x12x5m ³ ; zaman adımı 0,001s; çözüm ağı (rotor çevresi 0,025m; gövde-kollar 0,1m; genel alan 0,2m; hava akımı 0,0125m); IBM SPSS Statistics 25	Altı rotorlu tarımsal İHA'nın aşağı yönlü hava akışının farklı uçuş parametreleri (uçuş hızı, yüksekliği, yan rüzgâr hızı, yük kapasitesi) ile incelenmesi, uygun çalışma koşullarını belirlenmesi.	Farklı uçuş hızları ve yüksekliklerde aşağı akış alanının eğim açısı ve yayılımında değişiklik gözlenmiştir. Uygun uçuş hızı 4 m/s ve uygun yükseklik 2-2,5 m olarak belirlenmiştir. Yan rüzgâr hızının 3 m/s'yi aşmasıyla birlikte simetriyi bozulmuş ve verimlilikte düşüşüne neden olmuştur.
Numerical Analysis and Validation of Spray Distributions Disturbed by Quad-Rotor Drone Wake at Different Flight Speeds [60]	2019	Dört Rotorlu M234-AT, Ağırlık 12,1kg, tank kapasitesi 10L, pervane (çapı 766mm, eğim açısı 8°)	XFlow, LBM, LES, DPM, D3Q27 lattice, genel çözünürlük 0,2m; gövde etrafında 0,05m; pervaneler etrafında 0,025m; wake (iyileştirme $1 \times 10^{-4} \text{ m}$, wake 0.00125m) çözünürlük	İHA'nın farklı yüksekliklerde ve uçuş hızlarda aşağı yönlü akımların incelenmesi ve sprey dağılımına etkisi, HAD ve rüzgar tüneli testleriyle incelenmesi	İHA'nın 5 m/s üzeri hızlarda at nalı şeklindeki vortexlerin oluştuğu; HAD ve rüzgâr tüneli sonuçlarının uyumlu olduğu tespit edilmiş; 6 m/s hızda 4 m/s'ye göre %17,2; 2 m/s'ye göre %27,2 oranında sürüklenme arttığı bulunmuştur.

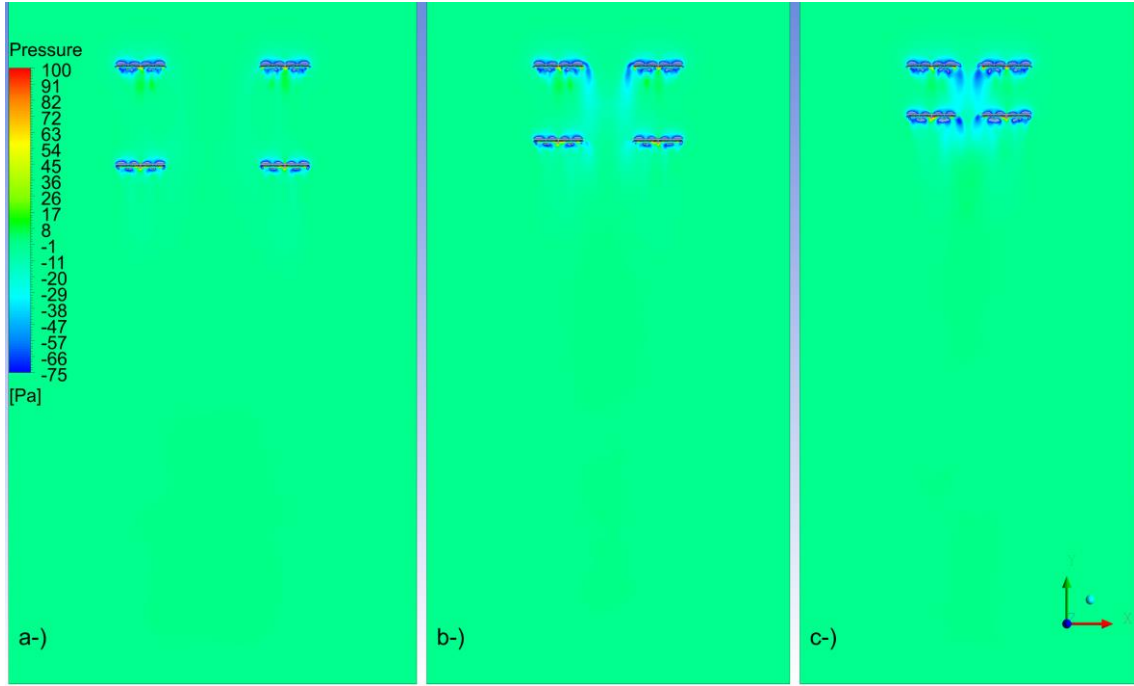
EK 3 - Analiz Grafikleri



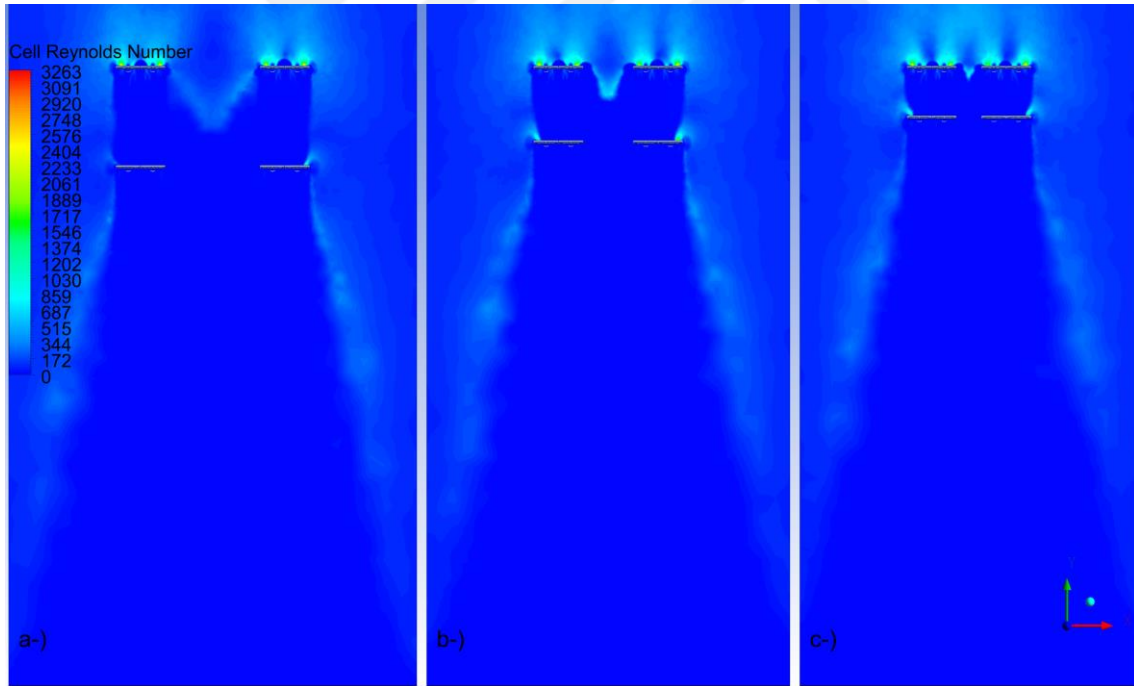
Şekil 1. Sürü Dizilimlerinin Basınç Konturları; Arka Düzlem (Z220)



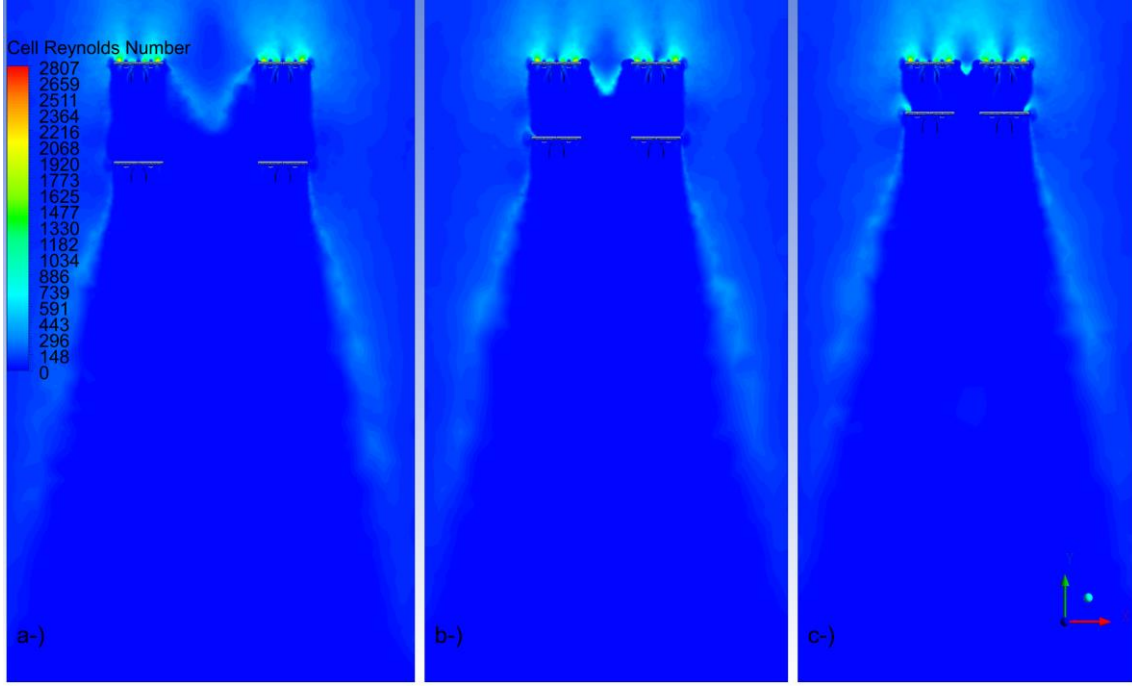
Şekil 2. Sürü Dizilimlerinin Basınç Konturları; Orta Düzlem (Z232.5)



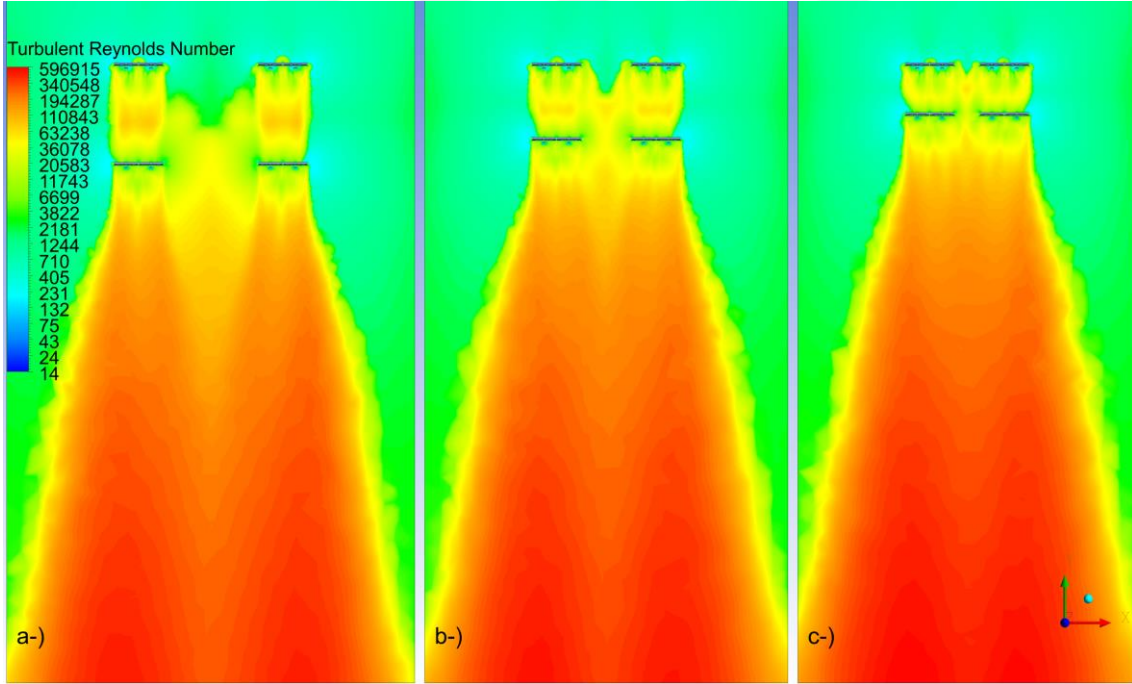
Şekil 3. Sürü Dizilimlerinin Basınç Konturları; Ön Düzlem (Z245)



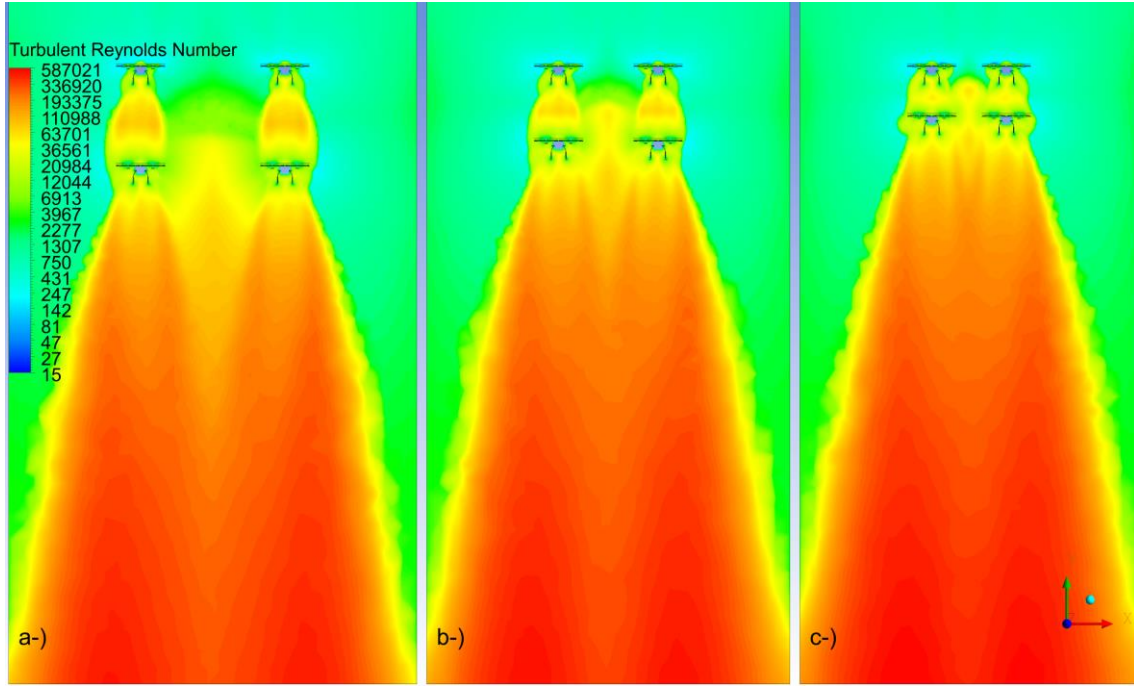
Şekil 4. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Lineer; Ön Düzlem (Z245)



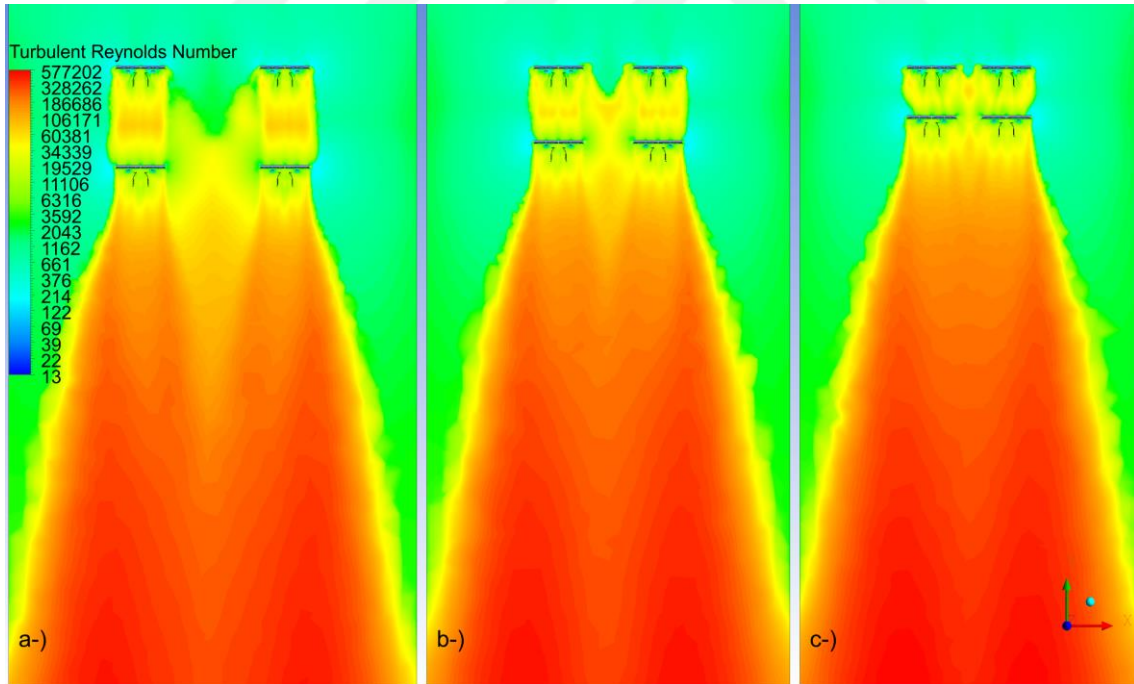
Şekil 5. Sürü Dizilimlerinin Hücre Reynolds Sayısı Lineer; Arka Düzlem (Z220)



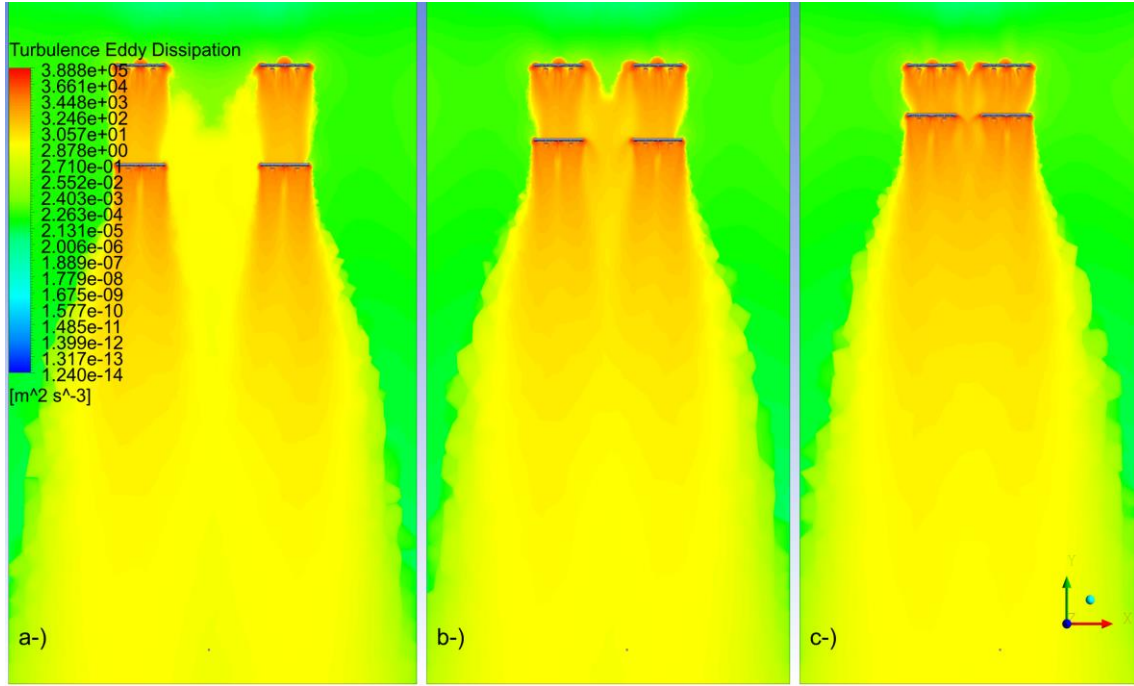
Şekil 6. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları Logaritmik; Ön Düzlem (Z245)



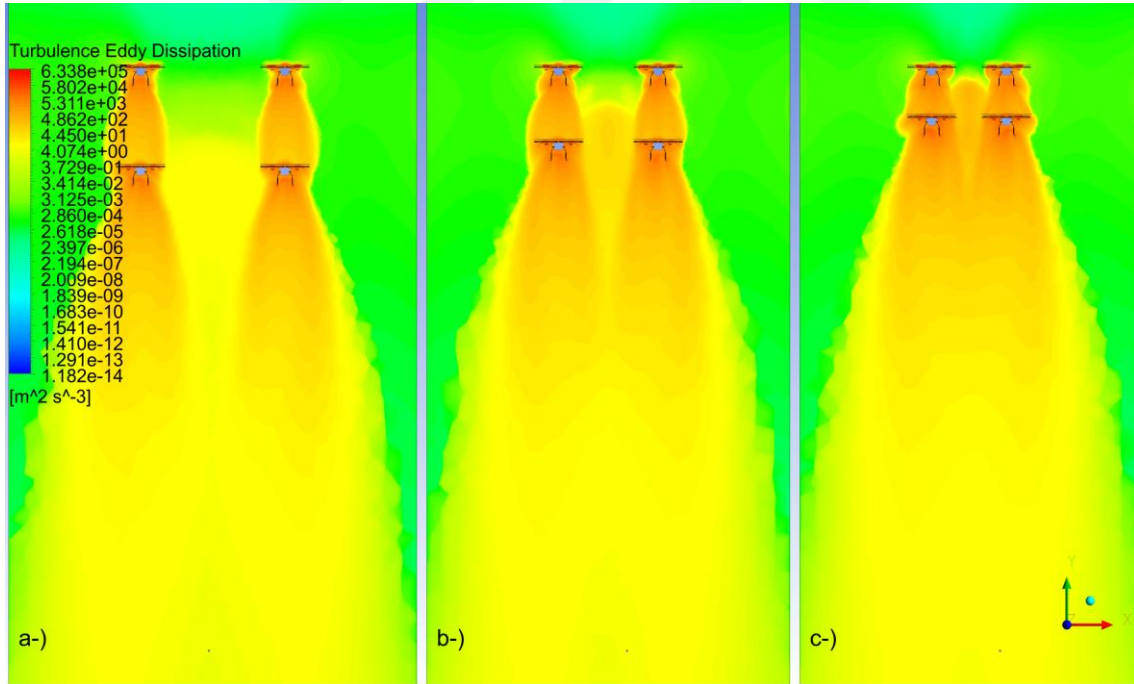
Şekil 7. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları Logaritmik; Orta Düzlem (Z232,5)



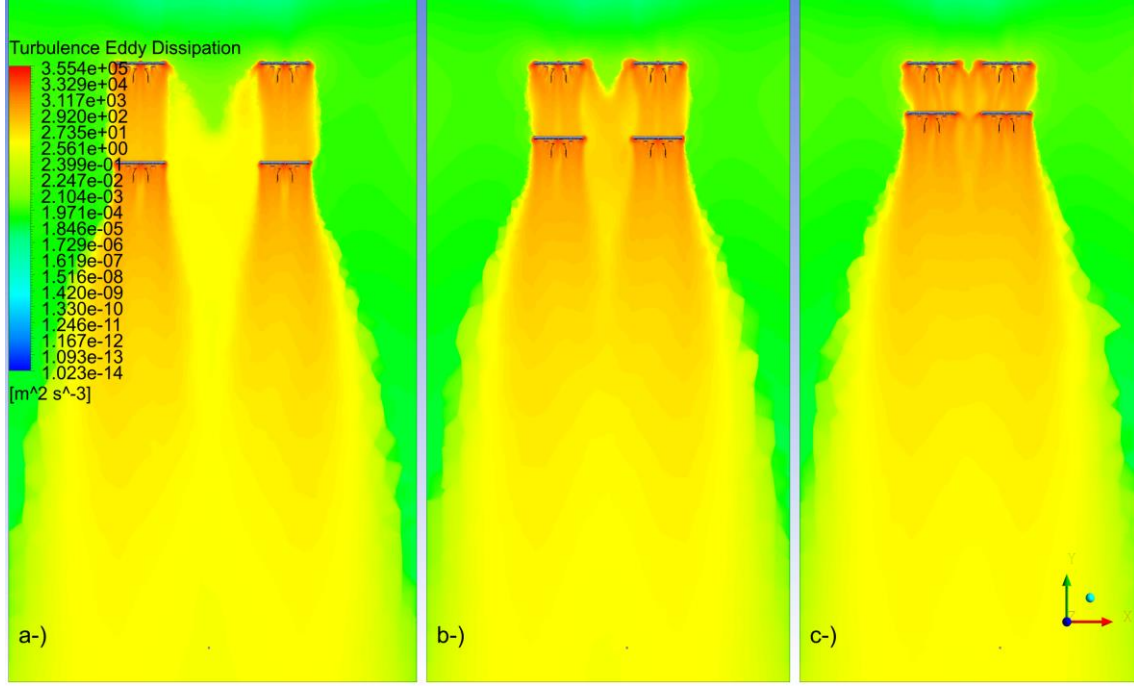
Şekil 8. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Reynolds Sayıları Logaritmik; Arka Düzlem (Z220)



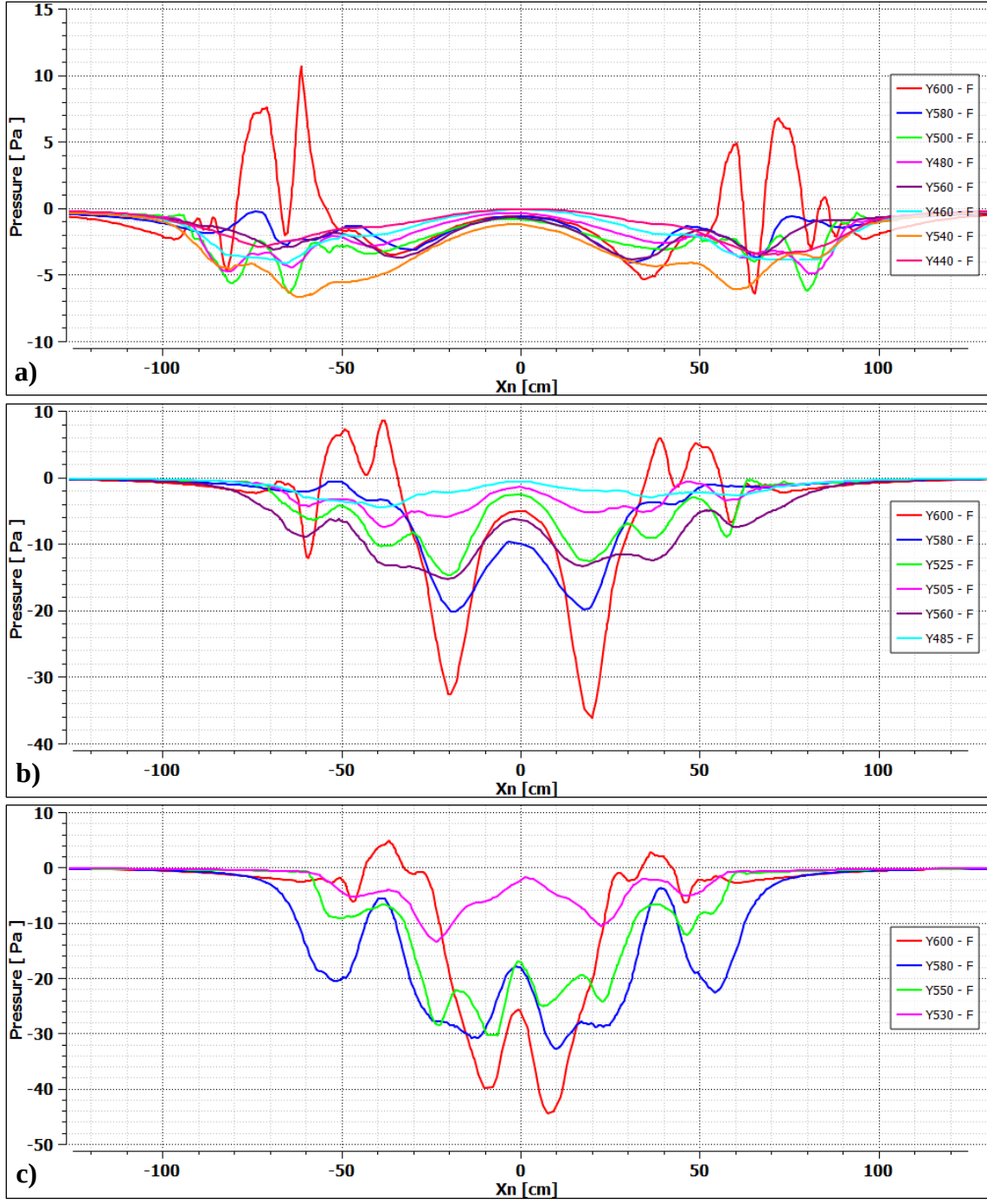
Şekil 9. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Eddy Dağılımı Logaritmik; Ön Düzlem (Z245)



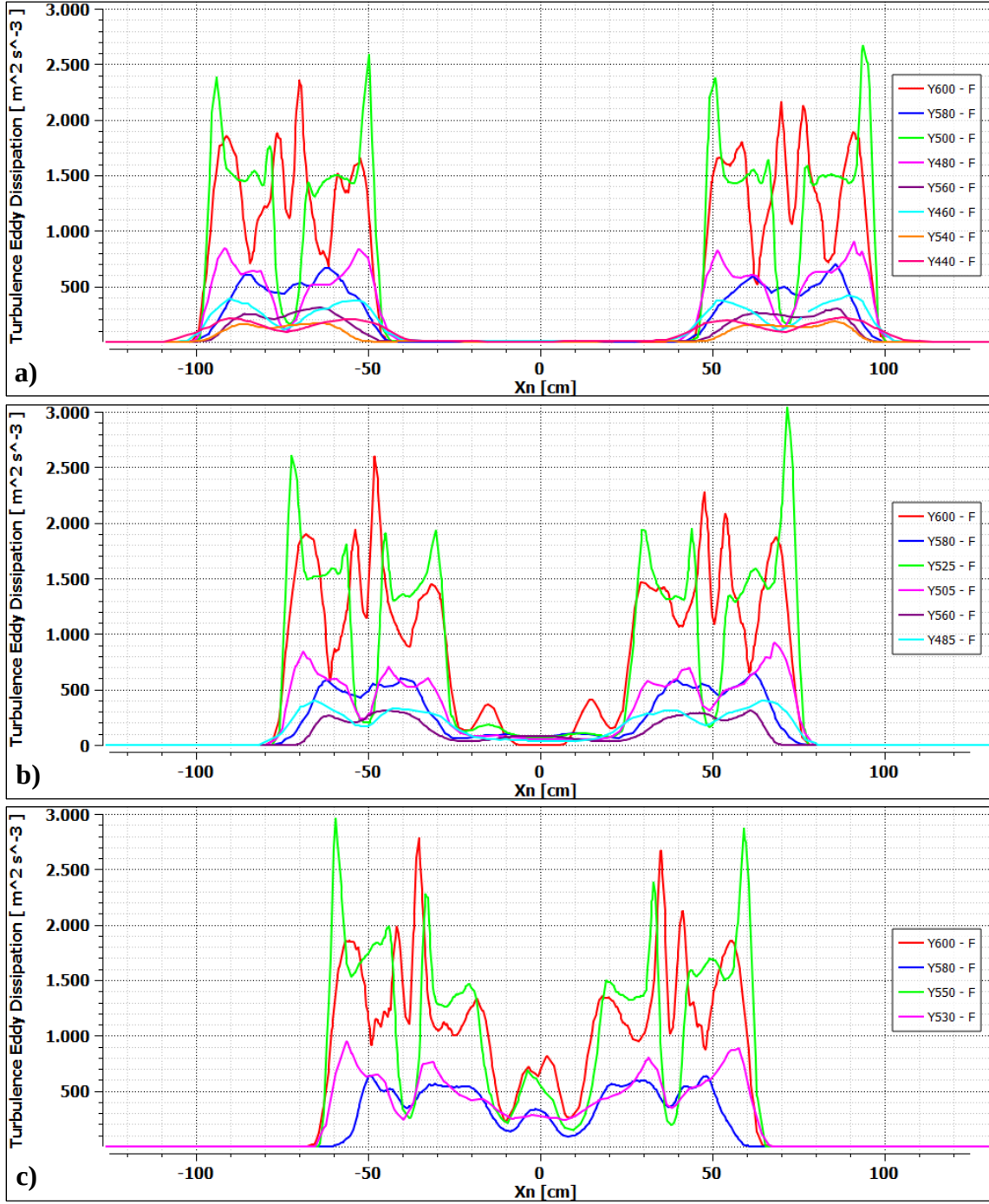
Şekil 10. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Eddy Dağılımı Logaritmik; Orta Düzlem (Z232.5)



Şekil 11. Sürü Dizilimlerinin Türbülans Eddy Dağılımı Logaritmik; Arka Düzlem (Z220)



Şekil 12. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Basınç Değerleri;
a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim



Şekil 13. Sürü Dizilimlerinin Yatay Çizgiler Üzerindeki Türbülans Eddy Dağılımı;
a) Geniş Dizilim b) Orta Dizilim c) Dar Dizilim

ÖZGEÇMİŞ

BERKAY ÇETİN

Öğrenci Numarası 723218017

Eğitim Durumu

- 2019 – 2025** **Doktora:** Marmara Üniversitesi, İstanbul
Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı.
- 2015 – 2018** **Yüksek Lisans:** Marmara Üniversitesi, İstanbul
Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı (84,6/100).
- 2010 – 2015** **Çift Ana Dal:** Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü (75,8/100; 2,58/4).
- 2007 – 2014** **Lisans:** Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
Mekanik Tasarım (80,7/100; 3,07/4).
- 2010 – 2011** **Erasmus:** M.P: Lodz University of Technology, Łódź / Polonya
International Faculty of Engineering,
Mechanical Engineering and Applied Computer Science.
- 2003 – 2007** **Lise:** Fatih Anadolu Lisesi, Manisa Fen Bilimleri (85,47/100).

Yetenekler ve Uzmanlık Alanları

- 05.2019** **İnsansız Hava Aracı Ticari Pilot Sertifikası** (190510İHA1105081),
İHA-1, Flycam Akademi, İstanbul.
- 2017 – 2018** **Microsoft Yazılım Uzmanlığı,**
Microsoft Sertifikası (G627-6240)
Smart Pro Bilgisayar Akademisi, İstanbul

İnsansız Hava Araçları, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Hesaplamalı Bilim ve Mühendislik, Matematiksel Programlama, Bilgisayar ve Bilişim Teknolojileri, Mühendislikte Sanal Gerçeklik, 3D Modelleme, MS Office, SpaceClaim, Mesh, CFD/Fluent, CFD-Post, ANSYS, C, C#, Scheme, Matlab, Mathematica.

Akademik Çalışmalar

- Ahmet Talat İnanc ve Berkay Çetin (2024). CFD Analysis of Aerodynamic Characteristics in 1-) a Square-Shaped Swarm Formation of Four Quadcopter UAVs. Applied Sciences-Basel, 14 (15), ss. 18, (6820), WOS:001286977800001, DOI: 10.3390/app14156820.
- Mustafa Atmaca, Berkay Çetin, Cüneyt Ezgi, Ergin Kosa (2021). CFD Analysis of Jet Flows Ejected From Different Nozzles. International Journal of Low-Carbon Technologies, 16.03.2021, ISSN 1748-1325, Oxford University Press. ctab022, 2-) <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab022>, Link: <https://academic.oup.com/ijlct/advance-article/doi/10.1093/ijlct/ctab022/6172073>

- Mustafa Atmaca, Berkay Çetin, Ender Yılmaz (2019). CFD Analysis of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Moving in Flocks. Acta Physica Polonica A, 01.04.2019, 135(4), 694-696. DOI: 10.12693/APhysPolA.135.694. Link: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AcPPA.135..694A>
- 3-) Hasan Savat, Berkay Çetin, Mustafa Atmaca (2019). Isı Değiştiricisi Analizinde Çözüm Ağının Sonuç Etkileri. HEZARFEN Uluslararası Fen Matematik ve Mühendislik Bilimleri Kongresi, 8-10 Kasım 2019, İzmir, Türkiye. [Link](#):
- 4-) Mustafa Atmaca, Berkay Çetin, Ender Yılmaz (2018). Sürü Halinde Hareket Eden İHA'ların Aerodinamik Özelliklerinin Sayısal Olarak İncelenmesi. II. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi, 04-05 Mayıs 2018, Adana, Türkiye. [Link](#):
- 5-) Ender Yılmaz, Mustafa Atmaca, Berkay Çetin (2018). Su Kanallarında Elektrik Üretimi. II. Uluslararası Multidisipliner Çalışmaları Kongresi, 04-05 Mayıs 2018, Adana, Türkiye. [Link](#).
- 6-) Berkay Çetin, (2018) İnsansız Hava Araçlarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi (Computational Fluid Dynamics Analysis of Unmanned Aerial Vehicles). Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 133.
- 7-)

Teşekkür Aldığım Çalışmalar

- Mustafa Ceylan, (2025) Sabit Düz Kanatlı İnsansız Hava Araçlarının Sürü Hareketlerinin Aerodinamik Analizi (Aerodynamic Analysis of Flat Fixed-Wing Unmanned Aerial Vehicles Moving in Flocks). Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye
- 1-) Mehmet Akif Kartal, (2023) Bir Isı Değiştiricisinin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Modellemesi (Modeling of a Heat Exchanger with Computational Fluid Dynamics). Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 171.
- 2-) Koray Karşıl原因, (2022) Aksiyomatik Tasarım Metodu Yaklaşımıyla Torna Tezgâhı Seçimi (Axiomatic Design Method Approach in Industrial Lathe Selection). Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 147.
- 3-) Ahmet Demirkaya, (2021) Basınçlı Su Dağıtım Sistemlerinde Enerji Geri Kazanımına Yönelik Adaptif Hat Tipi Türbin Tasarımı (Adaptive in-line Turbine Design for Energy Recovery in Pressure Water Distribution Systems). Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Programı, İstanbul, Türkiye, 136.
- 4-) Hasan Savat, (2020) Plakalı Tip Havadan Havaya Çapraz Akışlı Isı Değiştiricilerinde Geometrinin Verime Etkisinin İncelenmesi (Research Of Geometry Effect On Plate Type Air To Air Cross Flow Heat Exchangers). Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı Makine Mühendisliği Bilim Dalı, İstanbul, Türkiye, 71.
- 5-)

Projeler ve Destekler

- TÜBİTAK 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Programı, (649B032209721). “Sürü Halinde Hareket Eden Döner Kanatlı İnsansız Hava Araçlarının
- 1-) Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi” başlıklı Doktora Tez çalışması, (01.10.2022 / 28.02.2025).
 - 2-) YÖK 100/200 Öncelikli Alanlar Doktora Projesi, İleri Robotik Sistemler ve Mekatronik, tematik alanı (03.2019-03.2023).
- İnsansız Hava Araçlarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Analizi, Lisansüstü Tez
- 3-) Projeleri – Yüksek Lisans [C-YLP], FEN-C-YLP-070617-0363, (Bitiş Tarihi:07.06.2018), Marmara Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

Diğer Aktiviteler

VRBoxx Sanal Gerçeklik Teknolojileri, İzmir (2016-2017)
Proje: Robot Kol Tasarım ve Kontrolü 05/2013; SDU- Isparta
Kraków University - AEGEE; 07/2011 – 08/2011; Krakow/ Polonya
Polish Language; 09/2010; (5 ay) Lodz/Polonya
Erasmus Student Mobility Program; 09/2010 – 02/2011; Lodz / Polonya
Japanese Language; 2010 (8 ay); SDU- Isparta
Autocad Eğitimi; 2009; SDU- Isparta

Bu Tez Kapsamında Yayımlanan Makaleler

- Ahmet Talat İnvan ve Berkay Çetin (2024). CFD Analysis of Aerodynamic Characteristics in
- 1-) a Square-Shaped Swarm Formation of Four Quadcopter UAVs. Applied Sciences-Basel, 14 (15), ss. 18, (6820), WOS:001286977800001, DOI: 10.3390/app14156820.