

**HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ KULLANILARAK
YÜKSEK KAPASİTELİ HAVA TEMİZLEME CİHAZI TASARIMI**

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet UÇAR

Kütahya-2023

T.C.
KÜTAHYA DUMLUPINAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

**HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ KULLANILARAK
YÜKSEK KAPASİTELİ HAVA TEMİZLEME CİHAZI TASARIMI**

Danışman:
Prof.Dr. Ramazan KÖSE

Hazırlayan:
Mehmet UÇAR

Kütahya-2023

Kabul ve Onay

Makine Mühendisliği Ana bilim dalında, 20218537102 öğrenci numaralı, Mehmet Uçar'ın hazırlamış olduğu “Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak Yüksek Kapasiteli Hava Temizleme Cihazı Tasarımı” başlıklı yüksek lisans tez çalışması ile ilgili tez savunma sınavı jüri tarafından yapılmış ve adayın tezinin OY BİRLİĞİ ile kabul edilmesine karar verilmiştir.

24/08/2023

Tez Jürisi	İmza	
	Kabul	Red
Prof. Dr. Ramazan KÖSE (Danışman)		
Prof. Dr. Ahmet Fevzi SAVAŞ		
Doç. Dr. Oğuzhan ERBAŞ		

Onay

Doç. Dr. Eray ACAR
Enstitü Müdürü

Bilimsel Etik Bildirimi

Yüksek Lisans tezi olarak hazırladığım “*Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Kullanılarak Yüksek Kapasiteli Hava Temizleme Cihazı Tasarımı*” adlı çalışmanın öneri aşamasından sonuçlandığı aşamaya kadar geçen süreçte bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle uyduğumu, tez içindeki tüm bilgileri bilimsel ahlak ve gelenek çerçevesinde elde ettiğimi, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığımı, bu çalışmamda doğrudan veya dolaylı olarak yaptığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin kaynakçada gösterilenlerden oluştuğunu beyan ederim.

24/08/2023

Mehmet UÇAR

Özgeçmiş

İlkokul, Orta okul ve Liseyi Konya’da okudu.2005 yılında başladığı Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünden 2010 yılında mezun oldu.2012-2013 yılları arasında Esmaksan Makine sanayi, 2013-2016 yılları arasında Serin Treyler A.Ş, 2016-2021 yılları arasında Türk DemirDöküm Fabrikaları A.Ş Arge Merkezi,2021-2023 yılları arasında Esalba Metal Sanayi firmasında Makine Mühendisi olarak görev aldı. 2023 yılından Radim Radyatör firmasında Makine mühendisi olarak çalışmaya başladı ve halen devam etmektedir.



ÖZET

HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ KULLANILARAK YÜKSEK KAPASİTELİ HAVA TEMİZLEME CİHAZI TASARIMI

UÇAR, Mehmet

Yüksek Lisans Tezi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ramazan KÖSE

Ağustos, 2023, 82 sayfa

Bu çalışma kapsamında mevcutta kullanılan yüksek kapasiteli ($1000 \text{ m}^3/\text{h}$) bir geniş alan (200 m^2) hava temizleme cihazının verimini artırmak, güç tüketimini azaltmak ve ses konforunu artırmak amacıyla sayısal ve deneysel çalışmaları yapılarak performansı iyileştirilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında, Tasarım süreçlerinde Solidworks 3D yazılımı, Analiz süreçlerinde Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) programı olan Ansys Fluent ve Ansys Spaceclaim programlarından destek alınmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, Mevcut model üzerinden gerçekleştirilen testlerde sistemin $1062 \text{ m}^3/\text{h}$ debiye sahip olduğu, yapılan HAD analizlerinde ise $1133 \text{ m}^3/\text{h}$ sahip olduğu hesaplanmıştır. Yapılan testler ile simülasyon çalışmaları arasında %6'lık fark olduğu tespit edilmiştir. Mevcut ve yeni ürünün güç ve debi testleri yapılmış olup mevcut ürünün debi değeri $1062 \text{ m}^3/\text{h}$, yeni ürünün debi değeri $1256 \text{ m}^3/\text{h}$ olarak test edilmiştir. Test sonuçlarına göre %18 debi artışı sağlanmıştır. Ayrıca güç testleri sonucunda fan motoru üzerindeki direnç azaldığı için mevcut ürün 416 watt güç tüketirken yeni ürünün güç tüketimi 386 watt'a düşürülmüş olup %7.7'lik enerji tasarrufu sağlanmıştır. Ayrıca akustik testlerde mevcut ürünün ses basınç seviyesi (SPL) 62 dB olarak ölçülürken, hava akış yoku optimize edilmiş yeni tasarım hava temizleme cihazında 49 dB olarak ölçülmüştür. Yaklaşık 13 dB ses düşümüyle birlikte cihazın konut, sınıf gibi kapalı ortamlarda ses konforu yüksek olarak çalışması sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Hava temizleme cihazı, Vorteks, Türbülans, HAD

ABSTRACT**HIGH CAPACITY AIR PURIFICATION DEVICE DESIGN USING
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS****UÇAR, Mehmet****Master Thesis, Department of Mechanical Engineering****Supervisor: Prof. Dr. Ramazan KÖSE****August, 2023, 82 page**

Within the scope of this study, the performance of a high capacity (1000 m³/h) wide area (200 m²) air cleaner, which is currently used, has been improved by performing numerical and experimental studies in order to increase the efficiency, reduce power consumption and increase sound comfort. Within the scope of the studies, support was received from Solidworks 3D software in the design processes, Ansys Fluent and Ansys Spaceclaim programs, which are the Computational Fluid Dynamics (HAD) program in the analysis processes.

As a result of the studies, it was calculated that the system had a flow rate of 1062 m³/h in the tests performed on the current model, and 1133 m³/h in the CFD analyzes. It has been determined that there is a 6% difference between the tests and simulation studies. The current and new product's power and flow tests were carried out, and the current product's flow rate was 1062 m³/h and the new product's flow rate was tested as 1256 m³/h. According to the test results, an 18% increase in flow was achieved. In addition, as the resistance on the fan motor decreased as a result of the power tests, the current product consumed 416 watts of power, while the power consumption of the new product was reduced to 386 watts, resulting in 7.7% energy savings. In addition, in acoustic tests, the sound pressure level (SPL) of the current product was measured as 62 dB, while it was measured as 49 dB in the newly designed air cleaner with optimized no air flow. With a sound reduction of approximately 13 dB, the device is provided to operate with high sound comfort in indoor environments such as residences and classrooms.

Keywords: Air Purifier Device, Vortex, Turbulence, CFD

ÖNSÖZ

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, Esalba Metal Sanayi A.Ş. 'de Üniversite-sanayi iş birliği kapsamında Yüksek Lisans/Doktora tezlerinin desteklenmesi amacıyla, ARGE Merkezi bünyesinde kullanılan tasarım ve test olanaklarından yararlanılarak gerçekleştirilmiştir.

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve fikir alışverişinde çok anlayışlı olan değerli hocam Prof. Dr. Ramazan Köse'ye teşekkür ve şükranlarımı sunarım. Tüm eğitim hayatım süresince olduğu gibi lisansüstü eğitimim süresince de maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve benimle bu yola çıkan ve bana her zaman destek olan kıymetli eşim Özge Uçar'a çok teşekkür ederim. Yüksek lisans eğitimimi tamamlayabilmem için beni teşvik eden ve her aşamasında destek olan değerli yöneticim Esalba Metal Sanayi Ar-Ge Merkezi Direktörü Duygu Yalnızoğlu'na ve Ar-Ge Merkezi ailesindeki çalışma arkadaşlarıma değerli desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
KISALTMALAR.....	x
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM

ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLAMASI

1.1. ÇALIŞMADA ELE ALINAN PROBLEM	4
1.2. ÇALIŞMANIN AMACI.....	5
1.3. ÇALIŞMANIN PLANI	5

İKİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI SONUÇLARI.....	9
---	---

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

KURAMSAL TEMELLER

3.1. KURAMSAL TEMELLER.....	16
3.2. HAVA TEMİZLEME CİHAZLARI	16
3.3. HAVA TEMİZLEME CİHAZININ ÇALIŞMA PRENSİBİ	17
3.4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ	20
3.4.1. Korunum Denklemleri	20
3.4.2. Türbülansın Modellenmesi	22

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM

MATERYAL VE METOD

4.1. YÖNTEM.....	25
4.2. MEVCUT HAVA TEMİZLEME CİHAZININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ	25
4.2.1. Fan Motoru ve Filtrelerin Basınç-Debi Grafikleri	26
4.2.2. Debi ve Akustik Testlerinin Gerçekleştirilmesi.....	28
4.3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZLERİ	30
4.3.1. Fan Motor Debi-Basınç Grafiği Doğrulama Çalışması	31
4.4. MEVCUT HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZLERİ	35

4.4.1.	Sayısal Model.....	35
4.4.2.	Sayısal Ağ (Mesh).....	36
4.4.3.	Sınır Şartları ve Analiz Ayarları	37
4.5.	YENİ MODEL HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZLERİ	39
4.5.1.	Sayısal Modeller.....	39
4.5.2.	Sayısal Ağ (Mesh).....	42

BEŞİNCİ BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIRŞMA

5.1.	SAYISAL VE DENEYSEL BULGULAR.....	45
5.2.	MEVCUT GENİŞ ALAN HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	45
5.3.	YENİ MODEL GENİŞ ALAN HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ.....	48
5.3.1.	İç Kabin Tasarımı ve HAD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	48
5.3.2.	Susturucu Tasarımı ve HAD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	51
5.3.3.	Hava Çıkış Menfezi Tasarımı ve HAD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	55
5.4.	MEVCUT HAVA TEMİZLEME CİHAZI VE YENİ TASARIM HAVA TEMİZLEME CİHAZININ KIYASLANMASI	58
5.5.	YENİ MODELİN TESTLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	59
	SONUÇ.....	62
	KAYNAKÇA.....	64
	DİZİN.....	68

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1: HEPA Filtre Standartları.....	18
Tablo 4.1: Fan Motoru Teknik Özellikleri.....	28
Tablo 4.2: Filtrelerin Ses Seviyesine Etkisi	30
Tablo 4.3: Fan Motoru Dönüş Hızı ve Direnç Basınç Değerleri	33
Tablo 4.4: Ansys Fluent Analiz Ayarları	37
Tablo 5.1: Alt Susturucu Modellerinin Çıkış Hızı Kıyaslanması	53
Tablo 5.2: Kanatlar Arası Mesafenin Çıkış Hızına Olan Etkisinin Kıyaslanması	54
Tablo 5.3: Menfez Kanatlar Arası Parametrik Çalışması	55
Tablo 5.4: Kanatlar Arası Mesafe Çıkış Hızı ve Çıkış Debisi Kıyaslanması	57
Tablo 5.5: Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması	59
Tablo 5.6: Mevcut ve Yeni Modelin Sonuçlarının Kıyaslanması.....	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1: Hava Temizleme Cihazı (Esalba Metal Sanayi).....	17
Şekil 3.2: DC Diyagonal Fan (EBM Papst).....	17
Şekil 3.3: HEPA Filtre.....	18
Şekil 3.4: Karbon Filtre	19
Şekil 4.1: Hava Temizleme Cihazı (Esalba).....	25
Şekil 4.2: Motor Basınç-Debi Grafiği	26
Şekil 4.3: Filtre Gurubu Basınç-Debi Grafiği	27
Şekil 4.4: a) Balometre b) Ses, Hız, Işık Ölçer.....	29
Şekil 4.5: Motor Verimlilik Grafiği (EBMPAPST)	31
Şekil 4.6: Rüzgâr Tüneli Boyutları.....	32
Şekil 4.7: Rüzgâr Tüneli HAD Çalışması Sınır Şartları	33
Şekil 4.8: Meshten Bağımsızlık Çalışması	34
Şekil 4.9: Doğrulama Çalışması	35
Şekil 4.10: Hava Temizleme Cihazı a) 3D Model b) Sayısal Model	35
Şekil 4.11: Sayısal Ağ a) Tüm model b) Fan Etrafındaki Eleman Sayısı.....	36
Şekil 4.12: Sınır Koşulları	37
Şekil 4.13: Referans Düzlemler	38
Şekil 4.14: İç Kabin Tasarımı a) Düz b) Açılı Model 1 c) Açılı Model 2.....	39
Şekil 4.15: Alt Susturucu a) Susturucusuz b) Düz Kanat c) V Kanatlı d) Ters V Kanat.....	40
Şekil 4.16: V tipi Susturucu Kanat Aralığı a) 30 mm b) 10 mm c) 15 mm d) 20 mm ...	40
Şekil 4.17: Menfez Kanat Aralığı Parametrik Çalışması.....	41
Şekil 4.18: İç Kabin Sayısal Ağ a) Düz b) Açılı Model 1 c) Açılı Model 2.....	42
Şekil 4.19: Alt Susturucu Sayısal Ağ a) Susturucusuz b) Düz Kanat c) V Kanatlı d) Ters V Kanat	43
Şekil 5.1: Mevcut Geniş Alan Hava Temizleme Cihazı Üzerindeki Referans Düzlemleri	45
Şekil 5.2: Plane 1 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı	46
Şekil 5.3: Plane 2 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı	46
Şekil 5.4: Plane 3 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı	46

Şekil 5.5: Plane 4 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı	47
Şekil 5.6: Plane 5 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı	47
Şekil 5.7: İç Kabin Tasarımı a) Düz b) Açılı Model 1 c) Açılı Model 2 d) Referans Düzlemleri.....	48
Şekil 5.8 : Hız Kontörü Plane 1'a) Düz İç Kabin b) Açılı Kabin 1 c) Açılı Kabin 2	49
Şekil 5.9: Hız Kontörü Plane 2 a) Düz İç Kabin b) Açılı Kabin 1 c) Açılı Kabin 2	49
Şekil 5.10: Türbülans Kinetik Enerji Kontörü Plane 1'a) Düz İç Kabin b) Açılı Kabin 1 c) Açılı Kabin 2	50
Şekil 5.11: Türbülans Kinetik Enerji Kontörü Plane 2'a) Düz İç Kabin b) Açılı Kabin 1 c) Açılı Kabin 2	50
Şekil 5.12: Alt Susturucu a) Susturucusuz b) Düz Kanat c) V Kanatlı d) Ters V Kanat e) Referans Düzlemi.....	51
Şekil 5.13: Alt Susturucu Türbülans Kinetik Enerji Plane 1 a) Susturucusuz b) Düz Kanat c) V Kanatlı d) Ters V Kanat	52
Şekil 5.14: Alt Susturucu Türbülans Kinetik Enerji Plane 2 a) Susturucusuz b) Düz Kanat c) V Kanatlı d) Ters V Kanat	52
Şekil 5.15: V tipi Susturucu Kanat Aralığı a) 30 mm b) 10 mm c) 15 mm d) 20 mm ...	53
Şekil 5.16: Kanatlar Arası Mesafenin Hız Kontörüne Etkisi	54
Şekil 5.17: Hava Çıkış Bölgesi Tasarımı.....	55
Şekil 5.18: Referans Düzlemleri.....	56
Şekil 5.19: Plane 1 Üzerindeki Hız Dağılımı	56
Şekil 5.20: Plane 2 Üzerindeki Hız Dağılımı	56
Şekil 5.21: Hava Temizleme Cihazı a) Mevcut Tasarım b) Yeni Tasarım	58
Şekil 5.22: Hız Dağılımı Kıyaslanması a) Mevcut Tasarım b) Yeni Tasarım.....	58
Şekil 5.23: Yeni Model a) Prototip Hazırlanması b) Testlerin Yapılması	59
Şekil 5.24: Test Kuruluşu (İNTERTEK)	60

SİMGELER VE KISALTMALAR

μ	Dinamik viskozite [Pa.s]
ρ	Akışkan Yoğunluğu [kg/m^3]
u_k	x_k yönünde hız bileşeni [m/s]
p	Basınç [Pa]
μ_t	Türbülans viskozitesi [Pa.s]
G_k	Kinetik Enerjisi Oluşumu [$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-3}$]
G_b	Türbülans Kinetik Enerji Oluşumu [$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-3}$]
Y_M	Genişleme Katkısı [$\text{kg.m}^{-1}\text{s}^{-3}$]
$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, C_s$	
C_μ, C_t, C_m	Katsayılar
a_k	Prandtl Sayısı (k için)
a_ε	Prandtl Sayısı (ε için)
C_t	t anındaki konsantrasyon
C_i	t=0 anındaki konsantrasyon
k_e	Partikül azalma oranı [1/dk]
k_n	Doğal partikül azalma oranı [1/dk]
V	Hacim [m^3]
τ	Ortalama Hava [s]
u	Akışkan hızı [m/s]
u_p	Partikül hızı [m/s]
ρ_p	Partikül yoğunluğu [kg/m^3]
g	Yerçekimi ivmesi [m/s^2]

THDO	Temiz Hava Dağıtım Oranı
EPA	Environmental Protection Agency
SARS	Severe Acute Respiratory Syndrome
MERS-CoV	Middle East Respiratory Syndrome Causing Coronavirus
CADR	Clean Air Delivery Rate
HEPA	High Performance Particulate Air
HVAC	Heating Ventilating and Air Conditioning
HAD	Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği
CFD	Computational Fluid Dynamics
EACR	Effective Air Cleaning Ratio
ERE	Exposure Reduction Effectiveness
RNG	Random Number Generator
VOC	Volatile Organic Compound
UOB	Uçucu Organik Bileşikler
HBS	Hasta Bina Sendromu
DPM	Discrete Phase Model
PM	Particulate Matter
PM2.5	Çapı 2.5 mikron ve altında olan partikül maddeler
PM10	Çapı 10 mikron ve altında olan partikül maddeler



TEZ METNİ

GİRİŞ

İnsanlar hava kirliliği denilince, ısınma yöntemlerinden, sanayi kuruluşlarından, termik santrallerden kaynaklı dış ortama atılan kükürtdioksit, azot oksitler, karbon monoksit, toz gibi yabancı maddelerin hava içerisindeki oranının artması olarak anlamakta ve iç ortam hava kalitesinin insan sağlığı üzerine olan potansiyel risklerinden de habersizdir. Günümüzde insanlar zamanlarının %80-%90'nını ofis, sınıf, spor salonları, alışveriş merkezleri gibi kapalı alanlarda geçirmektedir. Covid-19 pandemisiyle birlikte, bulaş riskinin azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar iç ortam hava kalitesinin önemini daha da artırmıştır.

Son dönemin en önemli konusu olan Covid-19 pandemisi insanların normal hayata dönüşü konusunda tedirginliklerinin artmasına neden olmuştur. Covid 19 virüsü ve bulaşıcı hastalıklara sebep olan diğer virüsler dışında havada sağlığını olumsuz yönde etkileyen başka kirlleticiler de bulunmaktadır. Bunlar; bakteriler, maya-küfler, mantarlar gibi mikro organizmalar, toz, polen, evcil hayvan tüyleri gibi alerjenler, sigara dumanı ve uçucu organik bileşikler (VoC) olarak adlandırdığımız zararlı gazlardır. Bu hava kirleticiler havada partikül madde (PM) olarak asılı kalmaktadır. Özellikle insan geçişlerinin çok olduğu alanlarda havanın özel havalandırma sistemleriyle sirküle edildiği ve standart olarak TC5.5 kalitede hava teminin olması gerektiği bilinmektedir. Ancak çoğu sistem bu düzeyde bir hava sirkülasyonunu garanti edememektedir. Bununla beraber sabit sirkülasyon sistemleri mekânın üst kısmından hava verip alarak çalışmakta, çoğu zaman bu sistemlerin etkisi zemine inmemektedir. Ancak özellikle virüslerin yayılımında; büyük partiküllerin zemine çökeldiğini, daha küçük partiküllerin ise ortamdaki hava sirkülasyonu ve hareketlilik sebebiyle havada asılı kaldığını ve sürüklendiğini bilinmektedir. Zemine çöken partiküller de kuruyarak daha küçük partiküllere dönüşmekte ve ortamdaki hareketliliğin etkisiyle yeniden havaya karışabilmektedir (EPA 2001).

Solunum, konuşma, şarkı söyleme öksürme ve hapşırma gibi ekspiratuar olaylardan üretilen aerosol partikülleri solunum yoluyla bulaşan hastalıkların yayılmasında önemli rol oynamaktadır. Özellikle hastane, okul, alışveriş merkezleri gibi yüksek riskli ortamlarda, aerosollerin mekân içerisinde ne kadar uzağa ve ne kadar sürede yayıldığının tespit edilmesi enfeksiyon kontrolü açısından önem arz etmektedir.

Normalde şartlarda büyük damlacıklar havadan hafif olduğu için, 2 metreden daha az yol alabilir ve yüzeylere yapışırlar. Ancak daha küçük damlacıklar (aerodinamik çapı $<5\mu\text{m}$) hava molekülleriyle birlikte hareket ederek solunum yoluyla vücuda nüfuz edebilmektedir (Bazant, Bush, 2021). Kapalı ortamlardaki hava kalitesini artırmak için birçok yöntem vardır. Bunlardan bazıları hava kalitesini olumsuz etkileyen etkenlerin kaynağını ortadan kaldırılması, kapalı alanların havalandırılması ve hava temizleme cihazı kullanmaktır. İç ortamdaki hava kalitesini olumsuz etkileyen partiküllerin bertaraf edilmesi, kirletici kaynağının kontrolünün sağlanabildiği durumlarda mümkündür. İç ortamların havalandırılmasında mekanik ve doğal havalandırma metotları kullanılmaktadır. Mekanik havalandırmada, fanlı sistemlerden, Doğal havalandırmada ise dış ortam havasından yararlanılmaktadır. Merkezi ısıtma, soğutma sistemleri ile entegre ya da bağımsız çalışabilen hava temizleme sistemleri/cihazları ortamda bulunan ve hava kalitesini olumsuz etkileyen partikülleri %99 oranında temizleyerek bulaş ve maruziyeti azaltmaktadır (Hammond, Khalid,2021).

Hava temizleme cihazlarının kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte cihazların debi, güç tüketim değerleri, fonksiyonelliği gibi özelliklerinin yanı sıra akustik özellikleri de önem arz etmektedir. Aerodinamik etkilerle birlikte akış alanı içerisinde zamana bağlı değişimlerden kaynaklanan rahatsız edici gürültünün tasarımsal değişikliklerle azaltılması son yıllarda üzerinde çalışılan önemli konulardandır (Neha, Bojan 2020).

Yapılan tez çalışmasında, mevcutta kullanılan yüksek kapasiteli geniş alan hava temizleme cihazı deneysel olarak incelenerek sistemin çıkış debisi, elektrik tüketimi ve akustik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen referans veriler dikkate alınarak sistemin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu yardımıyla akış analizleri gerçekleştirmiş olup sistem verimliliğine etki eden geliştirilebilir komponentler belirlenmiştir. Sayısal analizler yardımıyla tasarım optimizasyonu yapılmış olup çıkış debisi artırılmış, güç tüketimi azaltılmış ve ses seviyesi iyileştirilmiştir. Ayrıca prototipi yapılan model akredite laboratuvarlarda testleri gerçekleştirilmiş ve yapılan sayısal analizler doğrulanmıştır.



BİRİNCİ BÖLÜM
ÇALIŞMANIN AMACI VE PLANLAMASI

1.1. ÇALIŞMADA ELE ALINAN PROBLEM

İnsanların büyük bir bölümü günlük yaşamlarını okul, hastane, alışveriş merkezleri, çalışma ofisleri, spor salonları, toplu taşıma araçları gibi kapalı ortamlarda geçirmektedir. Kapalı ortamlarda iç ortam hava kalitesi insan sağlığı açısından oldukça önem arz etmektedir. Özellikle Covid-19 pandemisi ile birlikte insanların kapalı ortamlarda geçirdikleri süreler uzamış bundan dolayı bulaş riskleri artmıştır. Salgını kontrol altına almak ve bulaş riskini azaltmak amacıyla alışveriş merkezleri gibi birçok iş alanı kapatılmış, okullarda ise eğitime ara verilmiş olup bu durum sosya-ekonomik birçok problemi de beraberinde getirmiştir. Salgının insan sağlığına ve günlük yaşama olan olumsuz etkisi azaltmak amacıyla, kapalı ortamlarda iç hava kalitesinin kontrol edilmesi, küf, mantar, virüs bakteri gibi hastalık yapıcı etkenlerin bertaraf edilmesi konusunda hava temizleme cihazlarının kullanılmasını yaygınlaştırmıştır.

Almanya gibi Avrupa'nın birçok ülkesinde kapalı ortamlarda farklı kapasite ve güçlerde hava temizleme cihazının kullanılması özellikle okullarda yasal bir zorunluluk hale gelmiştir. Okul, hastane ve konutlarda cihaz kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, cihazların endüstriyel tasarımları, kullanıcı dostu olması, IoT özellikleri, portatif ve taşınabilir olması, kapasiteleri, etki alanları, güç tüketimleri ve akustik özellikleri cihaz seçiminde dikkat edilen önemli faktörler haline gelmiştir. Üretici firmalar bu faktörler arasında özellikle kapasiteyi artırmak için çalışmalar üzerinde yoğunlaşmışlardır. Kapasiteyi artırmada kullanılan en genel yöntem ise fan devrini yükseltmektedir. Bu durum sistem içerisinde fan kaynaklı türbülans ve vorteksleri artırmakta dolayısıyla akustik ses seviyesi de (SPL) olumsuz etkilemektedir. Daha sonra ses seviyesini iyileştirmek amacıyla sistemde fan ve etrafına ya da kabin içerisine akustik yalıtımlar kullanılmaktadır. Ancak bu durum fanın maksimum verimlikte çalışması için gereken alanı azalttığı için fan motoru üzerindeki akışkan direncini artırmakta olup fanın istenilen debiyi üretmesi için kullanması gereken güç tüketim miktarını arttırmaktadır. Bu olumsuzlukların ortadan kaldırılması için genelde cihaz boyutları artırılmaya çalışılmaktadır. Ancak bu durumda da cihaz bulunduğu ortam da çok fazla yer kaplayacağı için kullanıcı tarafından olumsuz karşılanmaktadır. Bu şartlar altında ürün boyutları, ürün kapasitesi, güç tüketimi ve akustik özellikleri birbiriyle ilişki durumları olup optimum şartları yakalamak oldukça zordur.

Yukarıda belirtilen bu durumla ilgili literatürde çok sınırlı çalışmalar yapılmıştır. Bu tez kapsamında ürün boyutları değiştirilmeden, ürün kapasitesi artırılmış, güç tüketimi azaltılmış ve akustik özellikleri iyileştirilmiş bir yüksek kapasiteli geniş alan hava temizleme cihazı üzerinde yapılan sayısal ve deneysel çalışmalar incelenmiştir.

1.2. ÇALIŞMANIN AMACI

Yapılan tez çalışmasında, mevcutta kullanılan yüksek kapasiteli geniş alan hava temizleme cihazı deneysel olarak incelenerek sistemin çıkış debisi, elektrik tüketimi ve akustik değerleri belirlenmiştir. Elde edilen referans veriler dikkate alınarak sistemin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu yardımıyla akış analizleri gerçekleştirmiş olup sistem verimliliğine etki eden geliştirilebilir komponentler belirlenmiştir. Sayısal analizler yardımıyla ürün boyutları değiştirilmeden tasarım optimizasyonu yapılmış olup çıkış debisi artırılmış, güç tüketimi azaltılmış ve ses seviyesi iyileştirilmiş yüksek kapasiteli geniş alan temizleme cihazı yapılması amaçlanmıştır. Ayrıca prototipi yapılan model akredite laboratuvarlarda testleri gerçekleştirilmiş ve yapılan sayısal analizler doğrulanmıştır.

1.3. ÇALIŞMANIN PLANI

Hesaplamalı Akışkan Dinamiği Yardımıyla Yüksek Kapasiteli Hava Temizleme Cihazı konu başlıklı tez çalışması 6 bölümden oluşmaktadır. Tezin birinci bölümünde teze konu olan problemin detaylı açıklanması yapılmış olup tezin amacı açıklanmıştır.

Tezin ikinci bölümünde, hava temizleme cihazı üzerine yapılan önceki çalışmalar özetlenmiştir. Yapılan literatür taramasında çalışmaların, özellikle cihazların etki alanı, partikül tutma kapasiteleri ve farklı ortamlardaki çalışma performansları, hava temizleme cihazı kullanımının önemi üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Hava temizleme cihazlarında kapasite, güç tüketimi ve akustik konuları ve bunların birbiriyle olan ilişkisi üzerine oldukça az çalışma yapıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca HAD analizleri ve deneysel çalışmaların genelde cihazın iç ortam hava kalitesi üzerine olan etkinin incelendiği çalışmalarda kullanıldığı belirlenmiştir. Bu amaçla bu tez kapsamında, cihazın iç yapısında yapılacak olan iyileştirmelerle, kapasitenin artırılması, güç tüketimin azaltılması ve akustik özelliklerin iyileştirmesi hedefleri konusunda HAD analizi ve

deneysel çalışmaların kullanılması literatüre yapacağı katkıdan dolayı önem arz etmektedir.

Tezin üçüncü bölümünde, geniş alan yüksek kapasiteli hava temizleme cihazının çalışma prensibi, sistemi oluşturan komponentler, problemin çözümü aşamasında destek alınan Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) metodu, türbülans modelleri ve kullanılan korunum denklemleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Tezin dördüncü bölümünde, hava temizleme cihazının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu yardımıyla sayısal olarak çözülmesi için deneysel çalışmalar, model ölçüleri, sınır şartları, modelin sayısal ağ (mesh) yapısı ve bunlarla birlikte çalışmada kullanılan çözüm parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir. Deneylerden elde edilen bulgular analiz çalışmalarında girdi oluşturmuştur. Deneylerde kullanılan ekipmanlar ve deney metodolojisi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde, mevcutta kullanılan geniş alan hava temizleme cihazı üzerinde gerçekleştirilen HAD analiz sonuçlarından elde edilen hız, basınç ve türbülans yoğunluğu şiddeti kontur grafikleri detaylı olarak incelenmiş ve referans düzlemleri yardımıyla vorteks bölgeleri tespit edilmiştir. Belirlenen kritik bölgeler üzerindeki vortekslerin azaltmak amacıyla iç kabin, susturucu ve menfez üzerinde HAD analizleri yardımıyla tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiş olup sonuçlar mevcut modelle kıyaslanmıştır. Ayrıca yeni model hava temizleme cihazının laboratuvar ortamında, güç, debi ve ses ölçümleri yapılmış mevcut model ile kıyaslanmıştır.

Tezin altıncı bölümünde, Mevcut ürün Test ve HAD analizlerinden elde edilen bilgiler ışığında iç kabin tasarımı, susturucu tasarımı ve menfez tasarımı çalışmaları yapılarak elde edilen yeni tasarım hava temizleme cihazına ait bulgular paylaşılmış olup mevcut model ile yapılan kıyaslanmalarına yer verilmiştir.



İKİNCİ BÖLÜM
LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI SONUÇLAR

Arnon vd. (2021), iç ortam hava kalitesini artırmak ve COVID-19 virüsünün bulaş riskini azaltmak amacıyla sulu filtrasyon sistemi içeren bir hava temizleme cihazı tasarımı üzerine çalışmışlardır. Bir oda içerine 10 saniye boyunca sigara dumanı verilmiş ve sistem çalıştırılarak PM (0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5 ve 10) değerleri ölçülmüştür. Yapılan testler 10 kez tekrarlanarak sonuçlar değerlendirmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda PM10 dışındaki partiküller arıtılamamıştır. Sisteme HEPA filtre eklenerek sulu filtrasyon sisteminin etkinliğinin artırılacağı önerilmiştir.

Sungwon vd. (2022), TiO₂/zeolit kompozitlerini kullanarak portatif bir hava temizleme cihazı geliştirmişler ve VOC'lerin fotokatalitik bozunmasını sağlayarak ortam hava kalitesini artırmayı amaçlamışlardır. Filtre içerisine büyük miktarlarda TiO₂/H-ZSM-5 kompozit boncuklar yerleştirilmiş ve ortamda bulunan formaldehitler başarılı bir şekilde temizlenebilmiştir.

Scott vd. (2020), Asya da her yıl 1 milyondan fazla gerçekleşen erken ölümlerin iç hava kalitesiyle ilişkili olduğunu belirttikleri çalışmada, HEPA filtreli hava temizleme cihazlarının yaygın kullanılmasına rağmen partikül türü, partikül boyutu ve partiküllerin uzaklaştırılma verimliliği arasındaki ilişkinin yeteri kadar bilinmediğini vurgulamışlardır. Bu amaçla 18-514 µm boyutlarında partiküller tanımlanmış ve Çin'in en büyük kapalı kontrollü oda laboratuvarında testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda bütün hava temizleme cihazlarının kendilerine ait partikül tutma profillerinin olduğunu ancak 200-250 µm arasında benzer partikül tutma verimliliklerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Mehdi vd. (2022), İran Tahran Tıp Bilimleri Üniversitesi yerleşkesi içerisinde bulunan öğrenci yurtlarının iç ortam havasındaki PM_{2.5}'in kimyasal bileşenlerinin uzaklaştırılmasında hava temizleyicilerin etkinliğini değerlendirmişlerdir. Seçilen 12 odanın yarısına gerçek hava temizleme cihazı diğer yarısına ise gerçek olmayan hava temizleme cihazı yerleştirilmiş olup 5 L/dk debilerde 24 saat boyunca çalışmışlardır. Yapılan incelemeler sonucunda gerçek hava temizleme cihazlarının %76 oranında sahte olanların ise %22 oranında temizleme verimliliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca

ortam sürekli sigara kullanılması ve cihazlarının temizleme verimliliğini olumsuz etkilediği gözlemlenmiştir.

Luis vd. (2022), asansör kabini içerisindeki hava kalitesinin artırılması ve bulaş riskinin azaltılması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Kabin içerisindeki optimum havalandırma şartlarını belirlemek amacıyla kabinin dolu ve boş olduğu durumlar için kabin büyüklüğü, havalandırma konumları ve havalandırma debisi parametrelerini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Yapılan CFD çalışmalarında k-epsilon RNG türbülans modelini kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda dikey yönlü havalandırmanın durumunun daha verimli olduğu ve kabin büyüklüğüne bağlı olarak optimum havalandırma debisinin 0.4-0.6 m³/dk olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kabin sızdırmazlığının filtrasyon verimini %10 oranında olumsuz etkilediği tespit edilmiştir.

Sebastian vd. (2021), COVID-19 pandemisi esnasında hava temizleme cihazı kullanılarak okullarda eğitim-öğretime devam edilemeyeceği konusu üzerinde çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bir sınıf ortamındaki aerosol miktarının hava temizleme cihazının kullanılmasıyla birlikte zamana bağlı değişimi sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Bir Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği programı olan Open FOAM programı yardımıyla sınıf ortamında virüs bulaşmış bir bireyin sınıf ortamında partikül yayma durumu sayısal olarak analiz edilmiştir. Hava temizleme cihazı kullanımının sınıf ortamındaki bulaş riskini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca özellikle soğuk havalarda hava temizleme cihazları ile ortam havalandırmasının yapılması cihaz verimliliğini artırdığı gözlemlenmiştir.

Jianguo vd. (2020), Çin'in Pekin kentinde bulunan 12 ofis ortamında HEPA filtrelerin bakteri tutma kabiliyetleri üzerine incelemeler yapmışlardır. Ofis ortamında 1 yıl boyunca çalışan hava temizleme cihazlarının HEPA filtreleri üzerinde biriken bakteri miktarı ve ofis tabanında bulunan tozlardaki bakteri miktarları kıyaslanmıştır. HEPA filtredeki baskın bakteri sınıfları Alphaproteobacteria ve Actinobacteria iken, tozdakiler Bacteroidia, Clostridia ve Bacilli olarak tespit edilmiştir. Hava temizleme cihazlarının sadece aerosol maddeleri değil aynı zamanda bakteri ve virüsleri de önemli ölçüde temizleyebildiği belirtilmiştir. Ayrıca filtre içerisinde bulunan bakteri yoğunluğunun

daha fazla olduğu ve filtre değişimleri esnasında dikkatli olunması gerektiğine vurgu yapılmıştır.

Senichi vd. (2009), kapalı ortamlarda bulunan bakteri, virüs gibi bulaş etkenlerini absorbe edebilmek amacıyla bir hava temizleme cihazı üzerine çalışmışlardır. Sistem içerisine elektrikli ve mini kıvrımlı yapıda bir ozon ayrıştırma katalizörü yerleştirilmiş olup uygulanan yüksek voltaj yardımıyla ortamda bulunan zararlı mikro organizmalarının bertaraf edilmesini sağlayarak etkin bir koruma sağlamışlardır. Ayrıca ortam bulunan çevre ya da insan kaynaklı amonyak, hidrojen sülfür gibi kötü kokuları yok ederek ortam hava kalitesini iyileştirmişlerdir.

Gursaran vd. (2021), fotokatalitik bir hava temizleme cihazı üzerine yaptığı çalışmada titanyum dioksit plaka üzerine yansıtılan UV ışığı yardımıyla koparılan elektronlar, ortamda bulunan su buharı ile etkileşime girer ve radikal haldeki hidroksil (OH) iyonlarına çevirmektedir. Yüksek oranda reaktif ve kararsız olan OH- iyonları virüs, bakteri gibi canlı organizmaların dış çeperlerine saldırarak onları parçalar ve karbon gibi zararsız maddelere dönüştürmektedir.

Angus vd. (2010), negatif iyonik hava temizleyicinin kapalı bir test odasında partikül konsantrasyonunu düşürmedeki etkinliğini araştırmıştır. Doğal çürüme yöntemiyle elde edilen farklı yoğunluk ve boyutlardaki partiküllerinin, farklı hava emiş yüksekliğinin hava temizleme cihazının verimine olan etkisi incelenmiştir. Hava emiş konumunun 600-800-1000-1200 mm yükseklikte, aerodinamik partikül madde çapının 0.1-0.2-0.3-0.5 µm boyutlarında ve CADR ölçümlerinin 60-120-180-240-300 dakika boyunca ölçüldüğü koşullarda testler gerçekleştirilmiş olup en verimli yüksekliğin 600 mm olduğu tespit edilmiştir.

Lip vd. (2022), iç mekân hava temizleme cihazlarının ortak kullanılan hastane koşullarındaki bulaş riskine olan etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla 10 hasta kapasiteli bir koğuş modellenmiş ve bir bölümü separatör ile ayrılarak aerosollerin hastalar arasındaki etkileşimi HAD programı kullanılarak analiz edilmiştir. Hava temizleme cihazının aktif olmadığı durumda difüzörler yardımıyla partiküllerin yaklaşık %37 temizlenirken separatörlü bölümde partikül geçişi olmuştur. Ancak yerden 1 metre

yüksekliğe konumlandırılan hava temizleme cihazlarının çalışması durumunda ortamda bulunan partiküllerin %60 temizlendiği ve separatörlü bölümde partikül olmadığı tespit edilmiştir.

Karl-Christian vd. (2017), iç ortam havasında bulunan polenlerin zararları ve hava temizleme cihazlarının polen temizleme performansını incelemişlerdir. Polenler dış ortamlarda bulunan alerjik etkenler olarak bilinmesine rağmen özellikle polen oluşum mevsimlerinde, iç ortamlarda hava kalitesini olumsuz etkilemektedir. Okul, ev, alışveriş merkezi gibi yeterli filtrasyon sistemlerine sahip olmayan kapalı ortamlarda kapı, pencere gibi bölümlerden girerek yüzeylere yapışmakta ve uzun süreli alerjik reaksiyonlara neden olmaktadır. Bir klinik içerisinde çimen poleni alerjisi üzerinde yapılan deneyde hava temizleme cihazının aktif ve aktif olmadığı durumlar incelenmiş olup cihazın çalışması durumunda ortamda bulunan çimen polenlerini önemli ölçüde filtre ettiği tespit edilmiştir.

Chuaiybamroong vd. (2023), fotokatalitik oksidasyon uygulamasının, havadaki mikroorganizmaların dezenfeksiyonu için kullanılan HEPA filtrenin verimliliğine olan etkisi incelemişlerdir. $45 \pm \%5$ ve $\%75 \pm 5$ nemli ortam koşullarında, $0,85 \pm 0,18$ veya $4,85 \pm 0,09$ mW/cm² yoğunluktaki HEPA filtre üzerine, 1870 ± 169 ve 3140 ± 67 mg/m² özelliklerinde UV ışını gönderilerek 2 farklı test gerçekleştirilmiş ve *Aspergillus niger*, *Penicillium citri* dahil olmak üzere dört mikroorganizmanın inaktivasyonu ve penetrasyonu test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda *Staphylococcus epidermidis* ve *Bacillus subtilis* mikro organizmalarının %60 oranında, *S. epidermidis* için %100 oranında filtrede tutulduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ışınım miktarı filtre verimini çok az etkilerken nem oranının artmasının verimi olumsuz etkilediği görülmüştür.

Jin vd. (2021), kapalı ortam içerisinde bulunan hava temizleme cihazının verimine, hava çıkış açısı (α), Oda taban alanı (η), oda en boy oranı (I), PM 2.5 başlangıç konsantrasyonu (p), Personel ile hava temizleme cihazı arasındaki açı (β) ve Personelin hava temizleme cihazına olan mesafesi (L) parametrelerinin etkisini sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. SPSS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen istatistiksel analizlerinde, hava temizleme cihazının temizleme süresi, oda alanı, PM2.5'in ilk konsantrasyonu, personel ile cihaz arasındaki açı ve mesafe ile doğru orantılı olarak

değiştii ancak üfleme açısı ile oda en boy oranı ile ters orantılı olarak değıştii tespit edilmiştir.

Vinit vd. (2020), okul bina içi hava kalitesini artırmak amacıyla geliştirdikleri hava temizleme cihazının aktif ve inaktif olma durumunda, ortam bulunan küf mantar vb. mikroorganizmalar ile partikül madde miktarına etkisini deneysel olarak incelemiştir. Bina içerisinde bulunan laboratuvar, kütüphane, kantin ve sınıf içerisinde yapılan mikrobiyolojik testlerden sonra cihazın çalışması durumunda, ortam içerisinde bulunan mantar miktarın azaldığı tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2021), bir flama plazma hava temizleyici cihazın kullanılmasının ofis ortamında çalışanların performansları üzerine etkisini incelemiştir. 32 kişi oluşan denek grubu bir ofis ortamında benzer bilgisayar görevleri verilerek 5 saat çalışması istenmiş olup hava temizleme cihazının çalışması ve çalışmaması durumundaki hava kalitesinin çalışanlar üzerindeki etkisi gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ortam hava kalitesinin iyileşmesinin özellikle göz kuruluğu üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir.

Paola vd. (2021), hava temizleme cihazı kullanımının ince parçacıklı madde (PM) ve birçok uçucu organik bileşiğin (VOC) üzerindeki etkisini incelemiştir. Taşınabilir bir optik parçacık sayacı (OPC) cihazı aracılığıyla, ev ortamında hava temizleme cihazının kullanımının PM_{1.0}, PM_{2.5} ve PM₁₀ partikül ve koku (VOC) üzerindeki etkileri ölçülmüştür. Yapılan çalışmalar sonucunda partikül madde miktarının %90 oranında gaz halindeki maddelerin %50 oranında ve VOC oranının da net bir şekilde azaldığı tespit edilmiştir.

Paolo vd. (2022), HEPA 14 filtreli bir hava temizleme cihazının dış tedavisi sırasında COVID-19 bulaşma riskini azaltmadaki etkinliğini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla 80 kişilik hasta grubu 2 ye bölünerek hava temizleme cihazının çalışması ve çalışmaması durumunda klinik işlemleri esnasında partikül madde miktarı değişim ölçülmüş olup SPSS yazılımı kullanılarak istatistiksel ölçümleri yapılmıştır. Hava temizleme cihazının kullanılması durumunda ortamdaki partikül kontaminasyonu %83 oranında azalttığı tespit edilmiştir.

Philomena vd. (2021), ses yalıtımlı hassas bir laboratuvar içerisinde sınıf ortamı oluşturularak hava temizleme cihazının hem veriminin hem de akustik performansını incelemişlerdir. Hava temizleme cihazının farklı devirlerde (800-1000-1200 m³/h), farklı konumlarda (0.2-1,1-1,8 m) ve kapının açık olması-pencerenin açık olması gibi çalışması durumu incelenmiş olup maksimum devirde (1200 m³/h) maksimum temizleme kapasitesine ulaştığı ancak ses basınç seviyesinin (SPL) rahatsız edici düzeye ulaştığı tespit edilmiştir.

Andreas vd. (2020), konferans salonu içerisinde bulunan 18 termal manken kullanarak aerosol salınımının hava temizleme cihazı kullanılması durumunda dağılımı ve kaynak mankenin maske takması durumunda incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda ortamda hava temizleme cihazı kullanılması durumu, düşük debili havalandırma sistemi kullanılması durumuna göre %90 oranında partikül madde temizlemiştir. Ayrıca hava temizleme cihazı düşük debili havalandırma sistemi ile kullanılması durumunda verimi %60 oranına düşmektedir. Kaynak mankenin maske kullanması durumunda aerosol salınım oranı düştüğü için hava temizleme cihazının ortam hava kalitesini istenilen seviye getirme süresini azalttığı tespit edilmiştir.

Yapılan literatür taramasında çalışmaların, özellikle cihazların etki alanı, partikül tutma kapasiteleri ve farklı ortamlardaki çalışma performansları, hava temizleme cihazı kullanımının önemi üzerinde yoğunlaştığı tespit edilmiştir. Hava temizleme cihazlarında kapasite, güç tüketimi ve akustik konuları ve bunların birbiriyle olan ilişkisi üzerine oldukça az çalışma yapıldığı tespit edilmiştir.



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
KURAMSAL TEMELLER

3.1. KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde, geniş alan yüksek kapasiteli hava temizleme cihazının çalışma prensibi, sistemi oluşturan komponentler, problemin çözümü aşamasında destek alınan Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) metodu, türbülans modelleri ve kullanılan korunum denklemleri hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

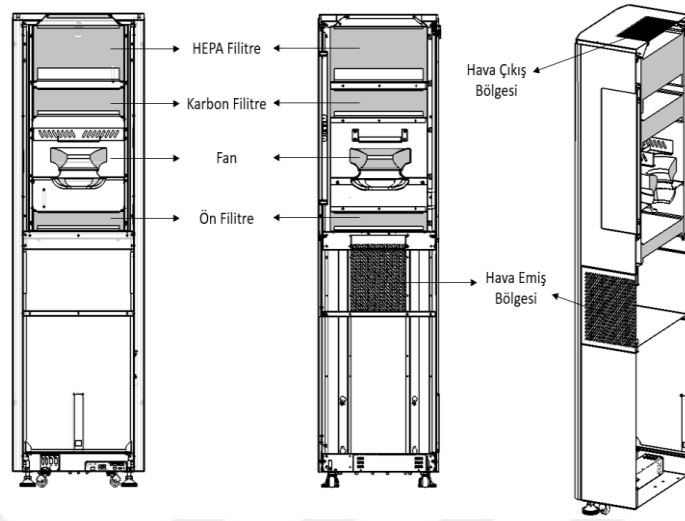
3.2. HAVA TEMİZLEME CİHAZLARI

Sağlığı olumsuz etkileyen partiküller sadece iç kapalı ortamda bulunan etkenlerden oluşmamaktadır. Özellikle sanayinin ya da trafiğin yoğun olduğu bölgelerde bulunan kapalı yaşam alanlarında, ortam da bulunan kapı ve pencereler kapalı olmasına rağmen bu partiküller iç ortama nüfuz edebilmektedir. Uzun süre bu partikül maddeler maruz kalmak alerji, kanser, kardiyovasküler gibi hastalıklara ve hatta ölümlere neden olabilmektedir. Bundan dolayı kapalı ortamlarda bulunan toz, alerjen maddeler, kötü koku oluşturan partikül gibi etken maddeleri içerisinde bulunan sistemler sayesinde tutan ya da farklı formlara çevirerek etkisini ortadan kaldıran hava temizleme cihazının kullanımı oldukça önemlidir.

Hava temizleme cihazları sadece ortamda bulunan kötü partikülleri ortadan kaldırarak sağlığımızı korumakla kalmaz aynı zamanda ortamda bulunan havanın tazelenmesiyle özellikle ofis ortamlarında bulunan çalışanların verimi üzerinde de önemli bir etkisi bulunmaktadır (Froumann Profesyonel Hava Temizleme Cihazlar,2023).

3.3. HAVA TEMİZLEME CİHAZININ ÇALIŞMA PRENSİBİ

Şekil 3.1: Hava Temizleme Cihazı (Esalba Metal Sanayi)

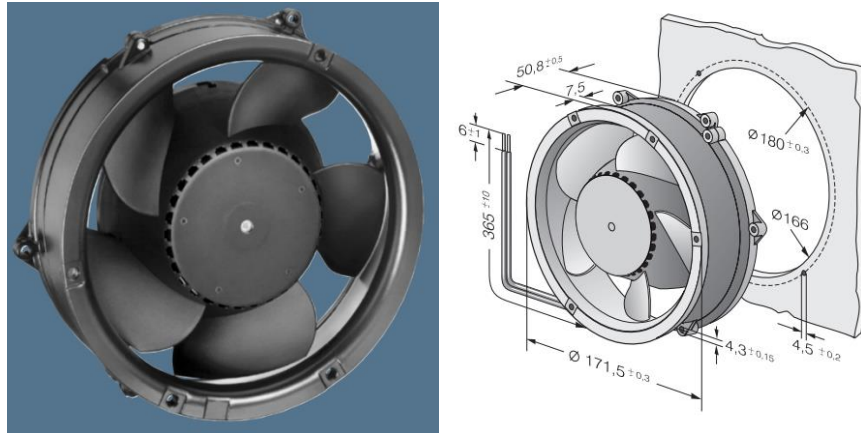


Kaynak: Esalba Metal Sanayi

Şekil-3.1’de gösterildiği gibi ortam içerisinde bulunan kirli hava; fan yardımıyla, emiş bölgelerinden sistem içerisine alınarak sırasıyla; ön filtre, karbon filtre ve HEPA filtreden geçirilerek temizlenir ve hava çıkış bölgesinden tekrar ortama atılır.

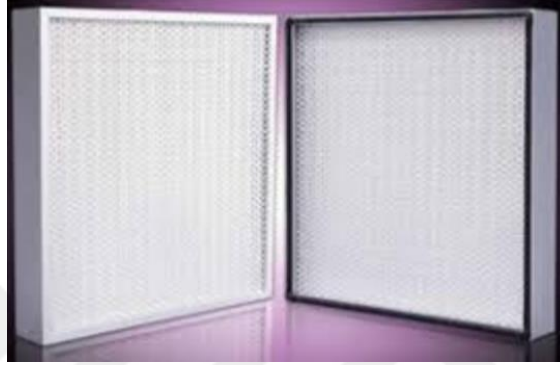
Fan: Law vd. (2007), Hava temizleme cihazlarında en çok kullanılan fan tipi santrifüj fanlardır. Fan havayı merkez bölümünden emer ve yönünü değiştirerek yanlardan dışarıya doğru atmaktadır.

Şekil 3.2: DC Diyagonal Fan (EBM Papst)



HEPA Filtre: Glover vd. (2022), selülozik, sentetik veya cam elyaf liflerinin akordeon şeklinde düzenlenerek üretilen ve 0,3 mikrondan daha büyük patojenleri tutma özelliği olan bir yapıdır. Darwin Technology, (2017), HEPA filtre kalıcı bir filtre değildir ve düzenli olarak değiştirilmesi gerekir. Havanın aşırı kirli olduğu yerlerde filtrenin daha sık değiştirilmesi gerekir. HEPA çok güvenilirdir ve PM 2.5'in %99,97'sine kadarını ortadan kaldırır.

Şekil 3.3: HEPA Filtre



Hepa filtreler, EN1822 test metoduna göre test edilerek verimleri hesaplanır. Bu test metoda göre filtrelerin verimi, belirli bir yüzey alanına ve geçirgenliğe sahip filtre kağıdı için belirli bir hava hızında en düşük verimlilik değerini veren tanecik boyutuna göre test edilirler. Burada en çok geçen tanecik boyutu (Most Penetrating Particle Size- MPSS) olarak ifade edilmektedir. EN1822 standartına göre MPSS değerleri tablo-2.1'te verilmiştir.

Tablo 3.1: HEPA Filtre Standartları

E% 0.3 μm	Hepa Filtreler (EN 1822)	E% 0.3 μm MPSS
≥ 95	H10	≥ 85
≥ 98	H11	≥ 95
≥ 99.99	H12	≥ 99.5
≥ 99.997	H13	≥ 99.95
≥ 99.999	H14	≥ 99.995

Karbon Filtre: Formaldehit, benzen ve metilen klorür gibi uçucu organik oda sıcaklığında havayla taşınarak böbrek, karaciğer, akciğer ve tüm sinir sisteminde hasara yol açmaktadır. Aktif karbon, yüksek emme kabiliyetine ve kimyasal bağlanmaya sahip

moleküler boyutlu birçok gözenekten oluşmaktadır. Gazlar, tütün dumanı, kötü kokular ve kimyasal emisyonlar gibi hava kirleticilerini etkili bir şekilde yakalamaktadır (Glover,2022, Darwin Technology,2017).

Şekil 3.4: Karbon Filtre



Ön Filtre: Toz, polen gibi büyük partikülleri tutarak HEPA ve Karbon filtrenin ömrünü uzatmaktadır.

3.4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Metodu (HAD), ısı transferi, kimyasal tepkimeler, newtonumsu veya newtonumsu olmayan akışlar, ileri türbülans modelleri, dönen parçaların analizleri, katı sıvı etkileşimleri gibi birçok mühendislik problemi olarak karşımıza çıkan durumların anlaşılması, çözümlenmesi ve geliştirilmesi konularında doğru ve hızlı sonuç alınmasını sağlayan bilgisayar tabanlı bir mühendislik yöntemidir (Uzol).

Bir HAD uygulaması genel olarak 3+1 aşamadan meydana gelmektedir (Uzol, Modi,2005, Uzol,2006, Uzol, Jindal,2004).

Bunlar;

- Ön-işlem, Model üzerinde gerekli düzenlemelerin yapılarak geometrisinin oluşturulması, modelin sayısal ağ (mesh) yapısının belirlenmesi ve oluşturulması, sınır şartlarının belirlenmesi süreçlerini kapsayan aşamadır.
- Çözüm, problemin türüne ve gerçek koşullara en uygun olacak şekilde bir yönetimin seçilmesi ve yaklaşık olarak hesaplanması aşamasıdır.
- Son-işlem, çözümden elde edilen bulguların değerlendirildiği ve yorumlandığı aşamadır.
- Deneysel doğrulama, analizlerden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla kıyaslandığı ve çözüm hassasiyetinin yeterli olup olmadığının anlaşıldığı aşamadır.

3.4.1. Korunum Denklemleri

Akışkanlar mekaniği ve ısı transferinde, akışkanın davranışını matematiksel olarak ifade edebilmek için kütlenin korunumu, momentumun korunumu ve enerji korunum denklemlerinden yararlanılmaktadır. Burada sistemin kapalı ve sürekli olduğu kabul edilerek yapılan hesaplamalarda aşağıda verilen denklemler kullanılmıştır.

Buna göre Süreklilik denklemi şu şekilde ifade edilir:

$$\nabla(\rho \vec{V}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

Akışın sürekli olduğu hallerde;

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \right) \quad (3.3)$$

x doğrultusundaki momentum denklemi:

$$\left(u \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho u)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} = \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3.4)$$

y doğrultusundaki momentum denklemi:

$$\left(u \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho v)}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial y} = \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g \beta (T - T_1) \quad (3.5)$$

z doğrultusundaki momentum denklemi:

$$\left(u \frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + v \frac{\partial(\rho w)}{\partial y} + w \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) + \frac{\partial P}{\partial w} = \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

Enerjinin korunumu eşitliği, ısı üretimi olmadığı durum dikkate alınarak, basınç ve dış kuvvetler ihmal edilirse,

$$\frac{DT}{Dt} = \frac{k}{\rho c_p} \text{div}(\text{grad} T) \quad (3.7)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.8)$$

Denklem 3.8 verilen ρ akışkan yoğunluğu, u , x yönündeki, v , y yönündeki ve w , z yönündeki hız bileşenleridir. k ısı iletim katsayısı, T sıcaklık, c_p ise özgül ısıdır.

3.4.2. Türbülansın Modellenmesi

Türbülans olgusu mühendislik problemlerinde anlaşılması ve modellenmesi oldukça zor bir mekanizmadır. Uygulamada akışkan kaynaklı problemlerin nerdeyse tamamı türbülanslarla ilgilidir. Türbülanslı akışta, akış içerisinde bulunan parçacıklarının farklı mesafe ve farklı yönlerdeki hareketlerinden dolayı, matematiksel olarak ifade edilmesi oldukça güçtür. Ancak akışkan parçacıklarının ortalama hareketleri dikkate alınarak matematiksel denklemler oluşturulabilir. Bu amaçla farklı özelliklere sahip türbülanslı akışları matematiksel olarak ifade edebilmek için aşağıda verilen türbülans modelleri geliştirilmiştir (Fluent User' Guide,1998)

- 1) Spalart-Allmaras modeli
- 2) $k-\varepsilon$ modelleri
 - Standart $k-\varepsilon$ modeli
 - Renormalization-group (RNG) $k-\varepsilon$ modeli
 - Realizable $k-\varepsilon$ modeli
- 3) $k-\omega$ modelleri
 - Standart $k-\omega$ modeli
 - Shear-stress transport (SST) $k-\omega$ modeli
- 4) Reynolds stress model (RSM)
 - Linear pressure-strain RSM modeli
 - Quadratic pressure-strain RSM modeli
 - Low-Re stress-omega RSM modeli
- 5) Detached eddy simulation (DES) modeli
- 6) Large eddy simulation (LES) modeli

3.4.2.1. Realizable $k-\varepsilon$ modeli

Realizable k-epsilon türbülans modelini açıklamadan önce Standard k-epsilon için türbülans denklemleri aşağıda verilmiştir (Uzol).

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pk u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b + p\varepsilon - Y_M \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} p \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.10)$$

$$\mu_t = p C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.11)$$

Yukarıdaki denklemlerde, G_k ortalama hız gradyanından dolayı, G_b kaldırma kuvvetinden dolayı türbülans kinetik enerjinin üretimini ifade etmektedir. Ayrıca μ_t türbülans dinamik viskozitesi, Y_M sıkışabilirliğin türbülans üzerindeki etkisi; C_μ , $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ sabitler; σ_k ve σ_ε k ve ε için prandtl sayılarıdır.

Realizable k - ε için aktarım denklemleri şu şekildedir (Kotas,1995):

$$\frac{\partial}{\partial t}(pk) + \frac{\partial}{\partial x_i}(pk u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(p\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(p\varepsilon u_i) = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + p C_{1\varepsilon} S_\varepsilon + p C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A S \frac{kU}{\varepsilon}} \quad (3.14)$$

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \theta \quad (3.15)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \cos^{-1} \sqrt{6} W, \quad W = (S_{ij} S_{jk} S_{ki}) / (S^3), \quad S_{ij} = \frac{1}{3} \left(\frac{\delta u_j}{\delta x_i} + \frac{\delta u_i}{\delta x_j} \right) \quad (3.16)$$



DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
MATERYAL VE METOD

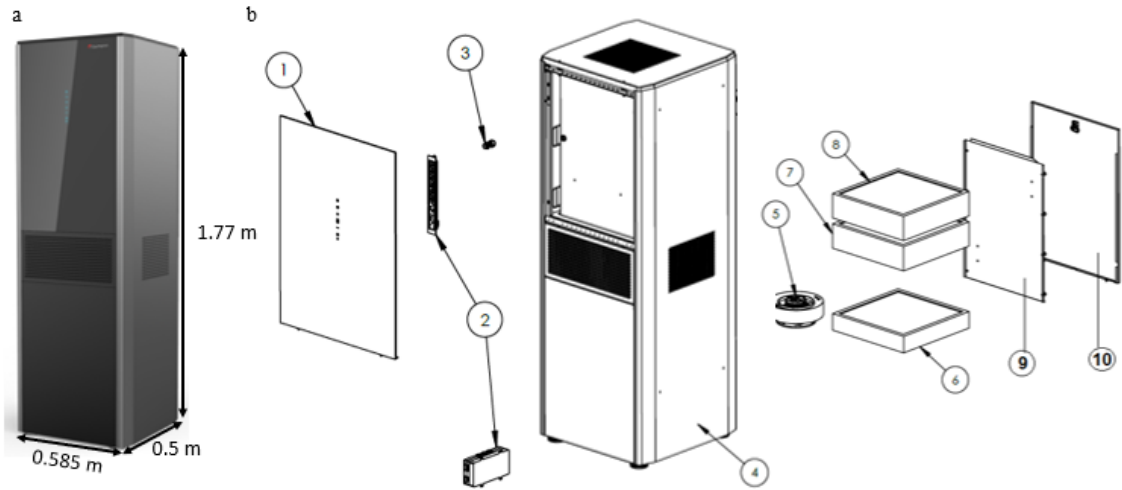
4.1. YÖNTEM

Bu bölümde, hava temizleme cihazının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) metodu yardımıyla sayısal olarak çözülmesi için deneysel çalışmalar, model ölçüleri, sınır şartları, modelin sayısal ağ (mesh) yapısı ve bunlarla birlikte çalışmada kullanılan çözüm parametreleri hakkında bilgiler verilmiştir. Deneylerden elde edilen bulgular analiz çalışmalarında girdi oluşturmuştur. Deneylerde kullanılan ekipmanlar ve deney metodolojisi hakkında detaylı bilgiler verilmiştir.

4.2. MEVCUT HAVA TEMİZLEME CİHAZININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Çalışma kapsamında şekil-6'da boyutlarına yer verilen, 1000 m³/h hacimsel debi (1000 m³ ortamı 1 saatte temizleyebilen) üretebilen bir hava temizleme cihazı ele alınmıştır. Hava temizleme cihazını oluşturan en önemli komponentler şekil-4.1'de gösterilmiş olup sırasıyla cam, kontrol kartı, kablo rakor takımı, gövde, fan motoru, ön filtre (F8), karbon filtre, HEPA filtre (H14), arka alt kapak ve arka üst kapaktır.

Şekil 4.1: Hava Temizleme Cihazı



Kaynak: Esalba Metal Sanayi

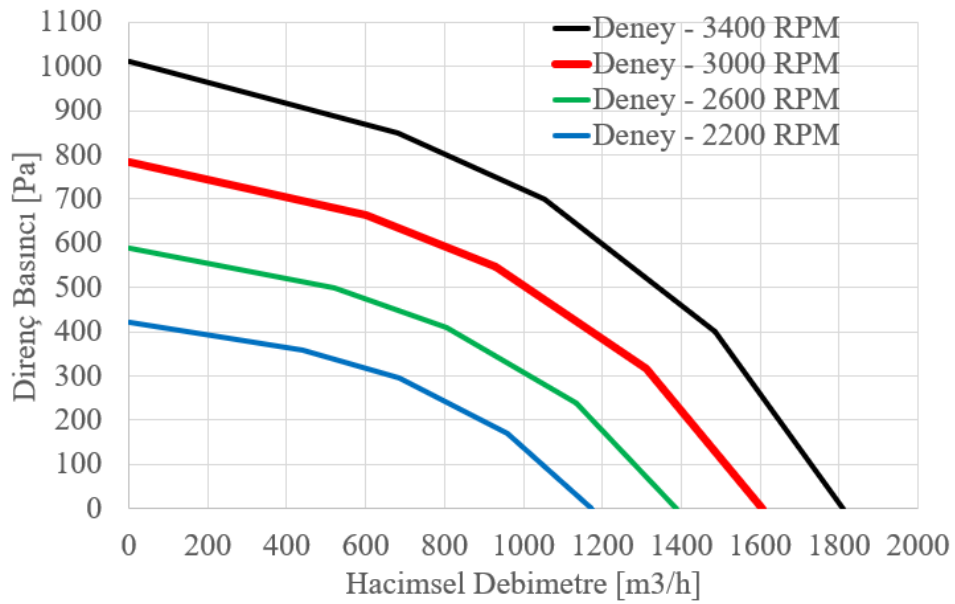
Camda bulunan dokunmatik ekran paneli kontrol kartı ile kullanılmaktadır. Kontrol kartında kademe yükseltme-azaltma butonu, cihaz aç-kapat butonu ve filtre

doluluk uyarı lambası yer almaktadır. 5 kademeden oluşan havalandırma cihazı istenen kademede çalıştırılabilmektedir. Kablo rakor takımı içinden motor ile kontrol kartı arasında köprü görevi gören kablo bağlantısı geçmekte ve sızdırmazlık bu noktada önemli hale gelmektedir.

4.2.1. Fan Motoru ve Filtrelerin Basınç-Debi Grafikleri

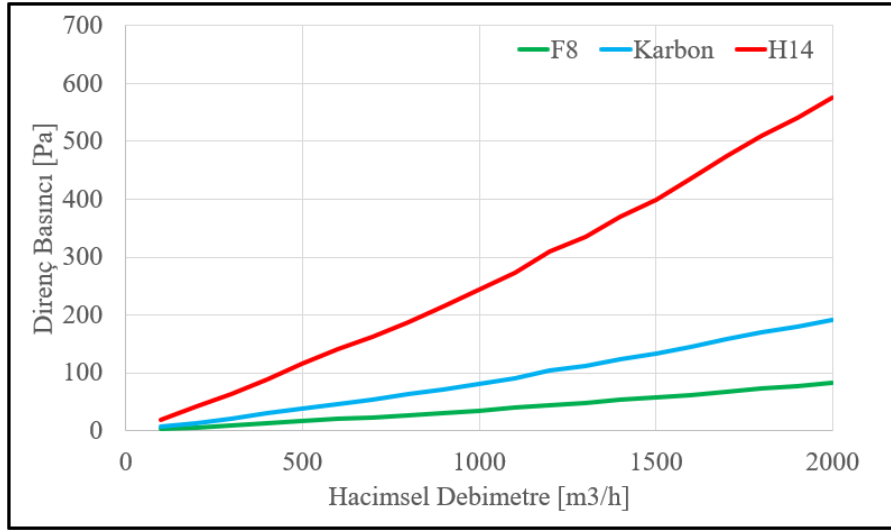
Fan motoru EBM PAPST marka ve R3G250RO0671 modelidir. Şekil-4.2’de gösterilen Motor debi – basınç grafiği, üretici firma tarafından 4 farklı motor RPM değerinde (3400-3000-2600-2200) ölçümlenmiştir. Buna göre fan motoru maksimum devirde 0 Pa direnç yükü altında 1810 m³/h debi üretebilmektedir. Direnç yükleri, cihaz içerisinde hava temizliğini sağlayan filtrasyon sistemi ve hava temizleme cihaz kabininden gelmektedir. Hava giriş bölgesinden hava çıkış bölgesine göre sırasıyla F8, Karbon filtre ve H14 olmak üzere 3 farklı filtre kullanılmaktadır. H14 filtre, F8 filtreye göre daha küçük boyutta partikülleri tutabilirken, karbon filtre ortamdaki kokuyu gidermek için kullanılmaktadır.

Şekil 4.2: Motor Basınç-Debi Grafiği



Bütün filtreler motor üzerinde direnç basıncı oluştururken motorun ürettiği debiyi belirli bir oranda azaltmakta ve bu oran motorun çalışma koşullarına göre değişmektedir. Şekil-4.3’te H14, Karbon ve F8 filtreye ait basınç-debi grafiği paylaşılmıştır.

Şekil 4.2: Filtre Gurubu Basınç-Debi Grafiği



Fan motorunun diğer önemli özellikleri ise tablo-4.1’de belirtilmekte ve buna göre kullanılan motor maksimum güçte 3400 RPM dönüş sağlarken 350 Watt güç çekmektedir. Motor kullanım ortam sıcaklığı -25 ile +55°C arasında değişmektedir. Motor çapı 250 mm, hava atış yüksekliği ise 84 mm’dir.

Tablo 4.1: Fan Motoru Teknik Özellikleri

Özellikler	D=250 mm
Hız (rpm)	3400
Güç, W	350
Akım, A	2,5
Min. Ortam Sıcaklığı, °C	-25
Mak. Ortam Sıcaklığı, °C	55
Debi @ 0Pa, m ³ /h	1810
Verimlilik, %	56,9
Verimlilik Puanı, N	71,8
Ağırlık, kg	3,9
Çap, mm	250
Motor boyutu	156,7
Kanat malzemesi	PA
Kanat sayısı	7
Yalıtım sınıfı	B

4.2.2. Debi ve Akustik Testlerinin Gerçekleştirilmesi

Detayları ayrıntılı olarak bahsedilen hava temizleme cihazında hem hacimsel debi hem de ses basınç seviyesi deneyleri yapılmaktadır. Deneyler ~20°C ortam sıcaklığı ve ~101325 Pa atmosfer koşullarında yapılmaktadır. Hacimsel debi değerleri hava temizleme cihazının çıkış bölgesinden şekil-9a'da gösterilen Testo marka balometre cihazı kullanılarak ölçümlenmektedir. Balometre, 610 x 610 mm hava giriş çapı, 360 x 360 mm hava çıkış çapı ve 100 mm uzunluğa sahiptir. Debi ölçüm noktası balometrenin başlangıcından 90 mm sonrasında 16 adet, 7 mm çaplı pitot tüpü ile yapılmaktadır. Ölçüm hassasiyeti 80-3500 m³/h aralığında olmakla birlikte akışın etkin bir biçimde düzenlemesini sağlamaktadır. Akış düzeltici, türbülanslı akışın geliş yönünü çıkışa doğru yönlendirir ve türbülanslı havayı pasifize eder. Hacimsel debi değerinin sürtünmelerden daha az etkilenmesi ve daha doğru sonuç elde edebilmek için balometre naylon bir malzeme ile kaplanmış 4 adet germe çubuğu ile montajlanarak kurulumu sağlanmaktadır.

Şekil 4.3: a) Balometre b) Ses, Hız, Işık Ölçer



Ses testleri ise PCE markalı el ölçüm mikrofonu ile yapılmakta olup tek mikrofonlu 1 metre mesafeden ölçülmektedir. Ölçüm hassasiyeti ± 2 dB (A)'dır. Ölçümler 32 dB(A) ses seviyesine sahip sessiz odada yapılmaktadır.

İyileştirme çalışmalarından önce mevcut ürün üzerinde bulunan filtrelerin ayrı ayrı sese olan etkileri incelenmiş ve tablo 4.2'de paylaşılmıştır. Cihaz boşken maksimum kademedeki 70,9 dB(A) ses üretirken bütün filtreler cihaz içerisindeyken 62,2 dB(A) ses seviyesi oluşmaktadır. Cihaz içerisinden karbon filtre çıkartıldığında ses seviyesi maksimumda değişmezken motorun bazı çalışma bölgelerinde arttırmaktadır. Diğer bir taraftan üründe sadece karbon filtre takılıyken ses değeri 0,8 dB(A) düşmüş, sadece F8 filtre takılıyken ses değeri 4,4 dB(A) düşmüş ve sadece H14 filtre takılıyken ses değeri 4,9 dB(A) düşmüştür. Sonuçlara göre karbon filtrenin takılı olması, H14 ve F8 filtrelerle oranla ses basınç seviyesini değiştirmemektedir.

Tablo 4.2: Filtrelerin Ses Seviyesine Etkisi

Kademe	Boşken	F8	Karbon	H14	H14+K	H14+F8	H14+K+F8	H14+K+F8
	Ses Basınç Seviyesi, [dB(A)]							Hacimsel Debimetre, [m ³ /h]
5	70,9	66,5	70,1	66	66,1	62,1	62,2	1062
4	60,4	55,8	59,3	53,9	54,2	51,2	51,1	600
3	55,4	52,8	55,5	51,5	51,9	50,2	49,1	400
2	51,2	47,8	50	46,8	46,1	44,4	44,6	365
1	49,5	45,1	46,5	43,3	43,6	42,6	43,5	271

4.3. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZLERİ

Bu bölümde öncelikle HAD analizlerinde kullanılacak olan fan motorunun basınç-debi grafikleri doğrulamaları gerçekleştirilecektir. Bu amaçla Solidworks ticari yazılımı yardımıyla 3 boyutlu olarak bir rüzgâr türbini modeli hazırlanmış olup içerisine fan motoru yerleştirilerek basınç-debi grafikleri elde edilmiş ve test sonuçlarıyla kıyaslanmıştır. Buradan elde edilen veriler kullanılarak Mevcut Hava Temizleme Cihazının HAD analizleri gerçekleştirmiş olup hız, basınç ve türbülans yoğunluğu grafikleri incelenmiştir. Grafiklerden elde edilen bilgiler ışığında Hava Temizleme Cihazı içinde verimliliğe olumsuz etki eden bölgeler tespit edilerek optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları kapsamında, hava çıkış menfezi tasarımı, iç kabin tasarımı ve fan emiş-atış bölgesine susturucu tasarımlarının hız, basınç ve türbülans grafikleri üzerine etkileri detaylı incelenmiştir.

Sayısal analizlerde kullanılan yöntemler ve kabuller aşağıda verilmiştir;

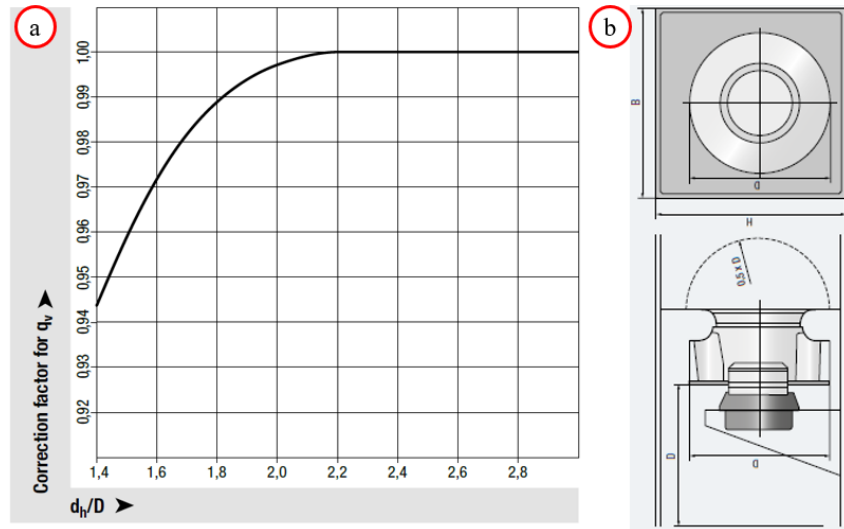
- Yapılan HAD analizlerinde aynı sınır şartları uygulanarak hız, basınç ve türbülans yoğunluğu dağılımları incelenmiştir.
- Tüm sayısal analizlerde sınır şartları deneylerden elde edilen verilen girdi olarak kullanılmıştır.
- Yapılan analizde sayısal model olarak 3 boyutlu modeller kullanılmıştır.

4.3.1. Fan Motor Debi-Basınç Grafiği Doğrulama Çalışması

Çalışma kapsamında ele alınan hava temizleme cihazı akış yolu optimizasyonu için öncelikle mevcut ürünün deneysel çalışmaları ortam şartlarında yapılmış olup hava çıkış bölgesindeki hacimsel debi değerleri ve motor RPM değeri elde edilmiştir. Elde edilen debi değerleri HAD sayısal çalışmasını doğrulamak için kullanılmış ve optimizasyon çalışmasında doğrulanan ağ yapısı ve model kullanılmıştır. Deneyde kullanılan fan motorunun doğru modellenmesi HAD sayısal çalışması için kritik bir öneme sahiptir. Hava temizleme cihazının konumlandırıldığı ortamda bulunan hava, fan motoru aracılığı ile sirküle edilmekte ve ortama filtrasyon sistemi sayesinde temiz havayı göndermektedir. Motor sayesinde oluşan bu hava sirkülasyonu, motorun basınç-debi grafiğinin HAD sayısal çalışmasında doğru tahmin edilmesiyle sağlanmaktadır.

Teknik detaylarından bahsedilen fan motoru 20°C – 1 atm koşullarda bir rüzgâr tüneli ortamında farklı RPM’lerde ve farklı direnç basınçlarında testleri üretici firma tarafından yapılmış olup şekil-4.5’de gösterilen basınç-debi grafiğini oluşturmuşlardır. Rüzgâr tüneli boyutlarının detayları verilmezken HAD sayısal çalışmasında motor üzerine ek direnç basıncı oluşturmayacak ve veriminin maksimumda olacağı bir rüzgâr tüneli tasarlanmıştır.

Şekil 4.5: Motor Verimlilik Grafiği (EBMPAPST)

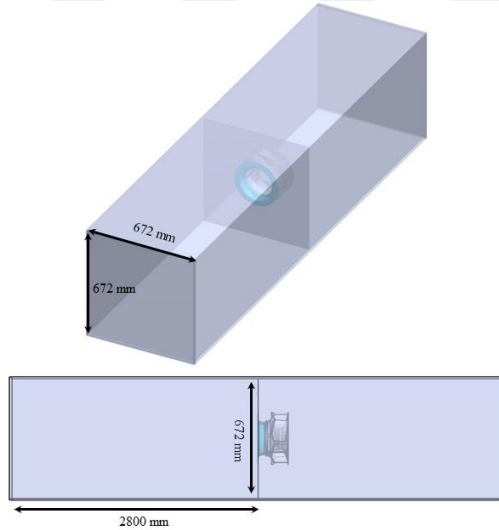


Tasarlanan rüzgâr tüneli şekil-4.5’de gösterilen motor verimlilik grafiğine göre tasarlanmıştır. Bu grafiğe göre motorun bulunduğu kabinin boyutları genişledikçe verimlilik artmakta ve belirli bir boyuttan sonra verimlilik değişmemektedir.

$$D_h = 2xBxH/(B + H) \quad (4.1)$$

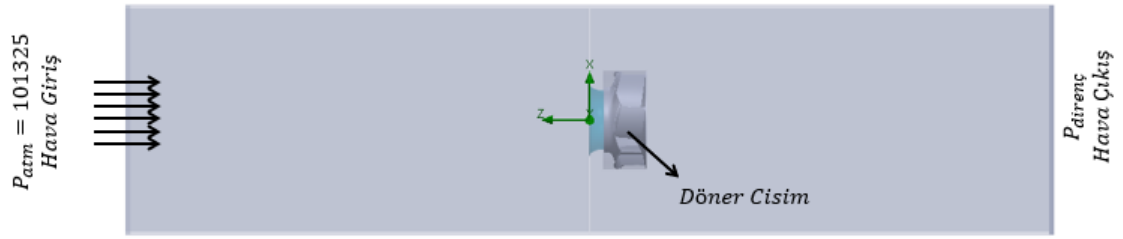
Denklem 4.1’e göre rüzgâr tüneli kare olarak düşünülmüş ve şekil-11’de gösterilen B ve H kenarları 672 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Buna göre, d_h hidrolik çapı, H ve B tünelin kenarlarını ve D ise fanın çapını temsil etmektedir. Tasarım güvenlik faktörü ve kullanılabilecek motor çapları düşünülerek yapılmış ve 280 mm çapında bir motora göre oluşturulmuştur.

Şekil 4.6: Rüzgâr Tüneli Boyutları



Şekil-4.6’da gösterildiği HAD sayısal çalışmasında rüzgâr tünelinin yan yüzeyleri duvar, giriş bölgesi atmosfer olarak tanımlanmıştır. Motorun dönüş hızı ve rüzgâr tüneli çıkış basıncı (direnç basıncı) değişken olup Tablo-4.3’te belirtilen değerler sırasıyla tanımlanmıştır. Hava giriş bölgesi atmosfere açık bir ortam olduğu için sürekli sabit tutulmuştur.

Şekil 4.7: Rüzgâr Tüneli HAD Çalışması Sınır Şartları

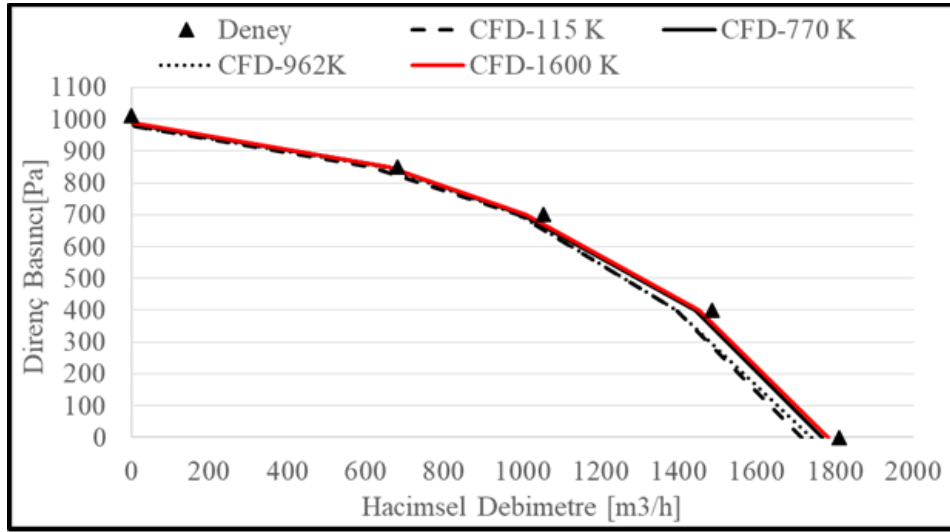


Tablo 4.3: Fan Motoru Dönüş Hızı ve Direnç Basıncı Değerleri

RPM	Hacimsel Debimetre, m ³ /h	Direnç Basıncı, Pa	RPM	Hacimsel Debimetre, m ³ /h	Direnç Basıncı, Pa
3400	1810	0	3000	1605	0
	1485	400		1310	315
	1055	700		930	546
	680	850		600	663
	0	1010		0	785
RPM	Hacimsel Debimetre, m ³ /h	Direnç Basıncı, Pa	RPM	Hacimsel Debimetre, m ³ /h	Direnç Basıncı, Pa
2600	1390	0	2200	1175	0
	1135	237		960	170
	805	410		685	294
	520	498		440	357
	0	590		0	420

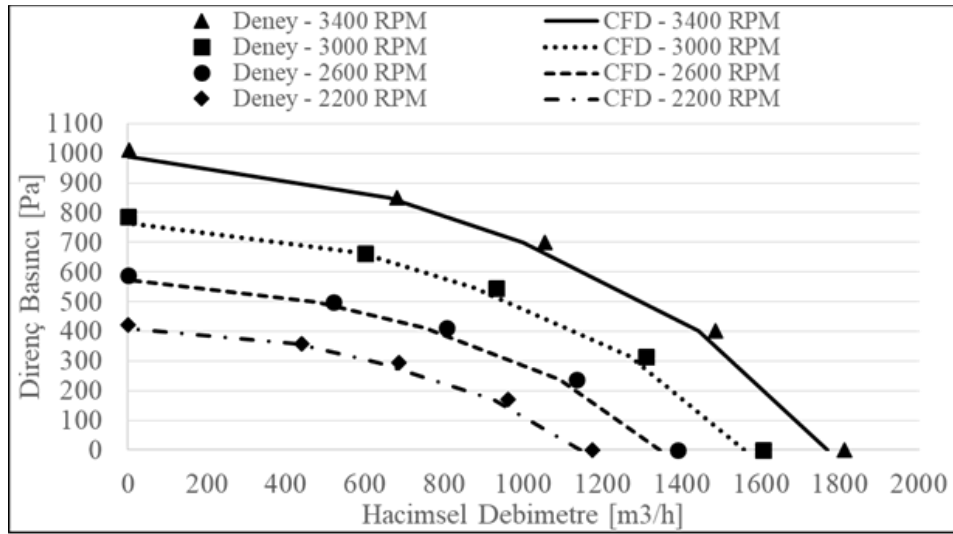
HAD sayısal çalışmalarının doğruluğunun sağlanabilmesi için 3400 RPM motor dönüş hızında 5 farklı direnç basıncı altında ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.8: Meshten Bağımsızlık Çalışması



Çalışma kapsamında şekil-4.8'te gösterilen 115 bin, 770 bin, 962 bin ve 1,6 milyon eleman sayısı olacak şekilde 4 farklı ağda ağdan bağımsızlık çalışması gerçekleştirilmiştir. 770 bin ve 1,6 milyon eleman sayısı ile en fazla %5,3 hata oranı sağlamış, sayısal çalışmaları devam ettirirken bilgisayar gücünü verimli kullanmak adına 770 bin eleman sayısı doğrulanan eleman sayısı olarak seçilmiştir. En ince eleman boyutu 8 mm'dir. HAD sayısal çalışmaları Solid Flow Simulation ticari yazılımı ile gerçekleştirilmiş olup yazılım kapsamında k-ε türbülans modeli seçilmiştir. Seçilen türbülans modeli ve ağ yapısı ile diğer motor dönüş hızlarında yapılan doğrulama çalışması şekil 4.9'da gösterilmiş olup deneye göre HAD sayısal çalışmalarında hata oranı en fazla %8,5 olarak tespit edilmiştir.

Şekil 4.9: Doğrulama Çalışması

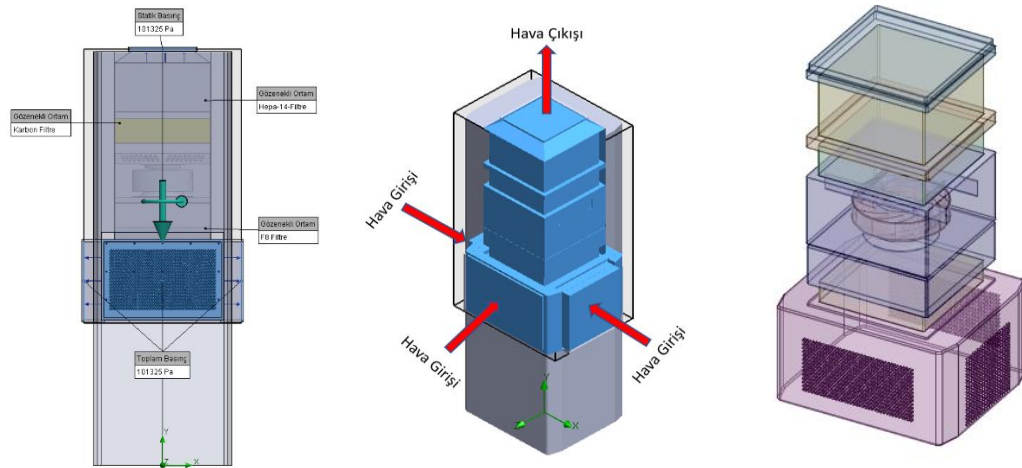


Bundan sonraki çalışmalarda yukarıda verilen datalar HAD analizlerinde girdi olarak kullanılacaktır.

4.4. MEVCUT HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZLERİ

4.4.1. Sayısal Model

Şekil 4.10: Hava Temizleme Cihazı a) 3D Model b) Sayısal Model

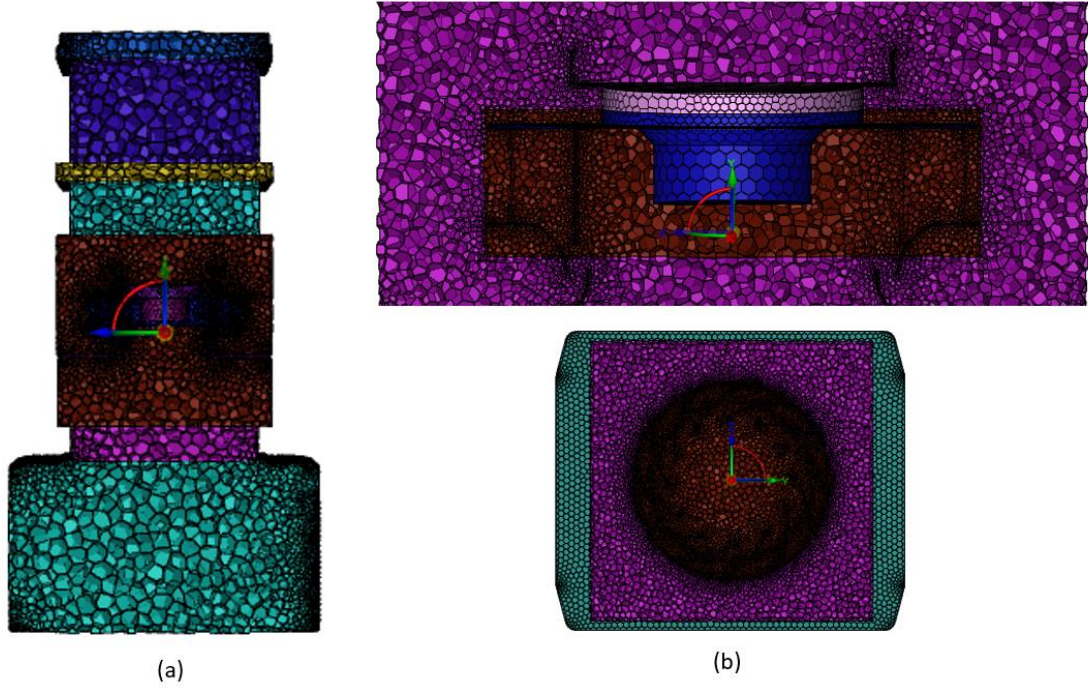


Şekil-4.10-a'da Solidworks programı kullanılarak, içerisinde fan motoru ve hava filtreleri bulunan, 3 yönden kirli hava girişine ve üst tarafından temiz hava çıkışına sahip olacak şekilde tasarlanan ve mevcutta kullanılan geniş alan hava temizleme cihazının 3 boyutlu modeli gösterilmektedir. Bu model baz alınarak Ansys Spaceclaim programı

yardımıyla iç akış hacmi ve geometrik düzenleme ön hazırlığı yapılmış olup şekil-4.10-b’de gösterildiği sayısal modeli hazırlanmıştır.

4.4.2. Sayısal Ağ (Mesh)

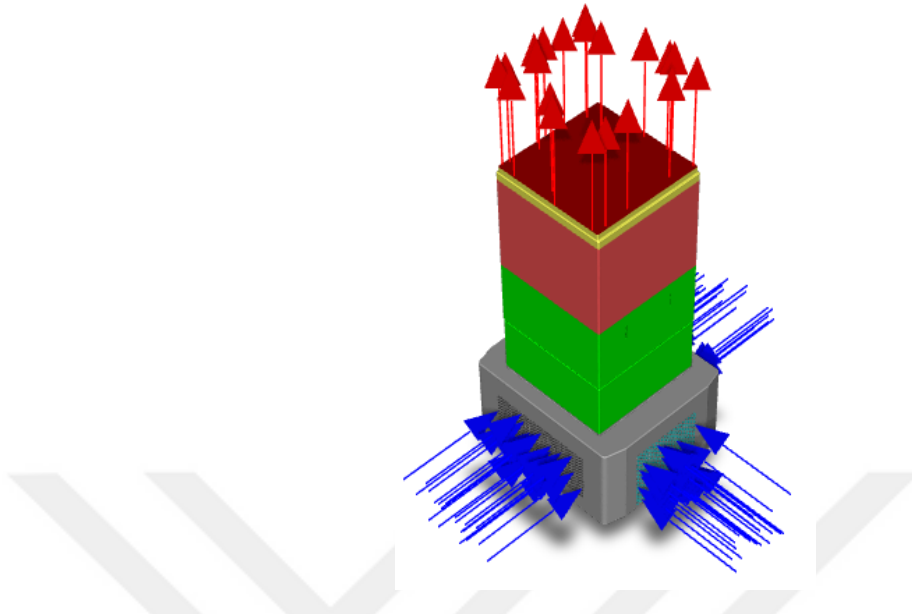
Şekil 4.11: Sayısal Ağ **a)** Tüm model **b)** Fan Etrafındaki Eleman Sayısı



Ansys Fluent 2022 R1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ticari yazılımı watertight geometry modülü kullanılarak polyhedral mesh yapısı ile sayısal ağ (mesh) oluşturulmuştur. Şekil-4.11-a’da tüm model üzerindeki polyhedral mesh dağılımı gösterilmiş olup 1,5 milyon eleman sayısı kullanılmıştır. Ayrıca şekil-4.11-b’de gösterildiği gibi türbülansın yoğun fan ve etrafına daha yoğun mesh atılarak çözüm hassasiyeti artırılmıştır.

4.4.3. Sınır Şartları ve Analiz Ayarları

Şekil 4.12: Sınır Koşulları



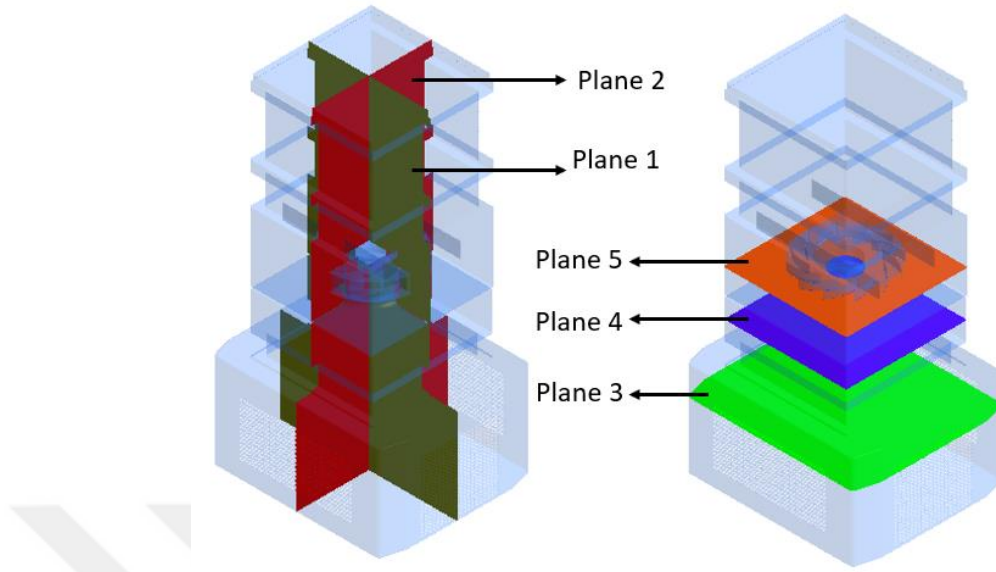
Atmosferik basınç çalışma koşulları altında (20°C ve 101325 Pa), ticari Ansys Fluent Hesaplamalı Akışkan Dinamiği programı kullanılarak hava temizleme cihazı şekil-4.12’de gösterildiği gibi modellenmiştir. 230 voltta, 3400 rpm de dönen EC fan sayesinde ortam içerisinde bulunan hava, 3 farklı yönden sistem içerisine emilmekte ve hava çıkış bölgesinden dış ortama atılmaktadır. Sistem içerisinde bulunan; ön filtre, karbon filtre ve HEPA filtrenin debi basınç grafikleri sistem çalışma koşulları altında deneysel olarak tespit edilmiş ve ayrı ayrı program içerisine tanımlanmıştır.

Tablo 4.4: Ansys Fluent Analiz Ayarları

Energy	Off
Model	k-epsilon(2 eqn)
k-epsilon model	Realizable
Near-Wall Treatment	Enhanced Wall Treatment
Enhanced Wall Treatment Options	-Pressure Gradient Effects
	-Full Buoyancy Effects
Options	-Curvature Corrections
	-Production Limiter
General	-Steady
	-Gravity
Material	Air

Hava temizleme cihazı içindeki hız, basınç ve türbülans yoğunluğu dağılımını bulabilmek için tablo-4.4’te verilen analiz ayarları kullanılmıştır.

Şekil 4.13: Referans Düzlemler



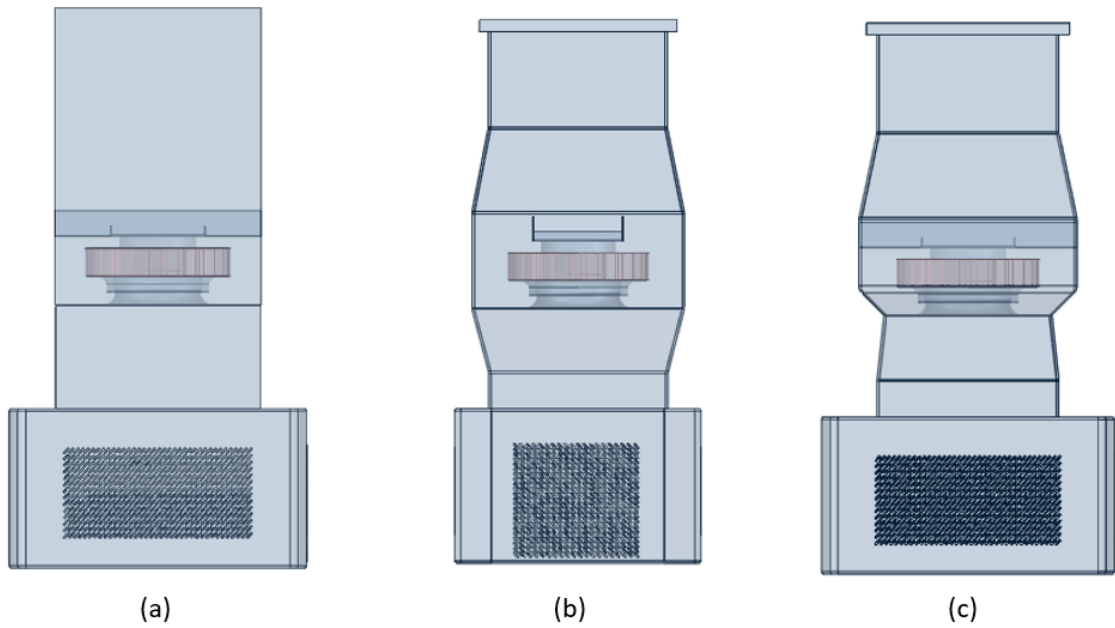
Mevcut hava temizleme cihazının HAD analizleri yukarıda belirtilen ayarlar kullanılarak gerçekleştirilmiş olup sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi konusunda şekil-4.13’de verilen referans düzlemleri kullanılmıştır.

4.5. YENİ MODEL HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZLERİ

Mevcut Hava temizleme cihazının HAD analizi sonuçlarından elde edilen bilgiler ışığında, ürünün dış tasarımı değiştirilmeden ve üretilebilirlik kısıtları da dikkate alınarak, ürün iç kabin tasarımı, vorteks bölgelerinin ortadan kaldırılması için fan emiş bölgesine susturucu eklenmesi ve hava çıkış bölgesi için menfez yapı kullanılması durumları analiz edilmiştir.

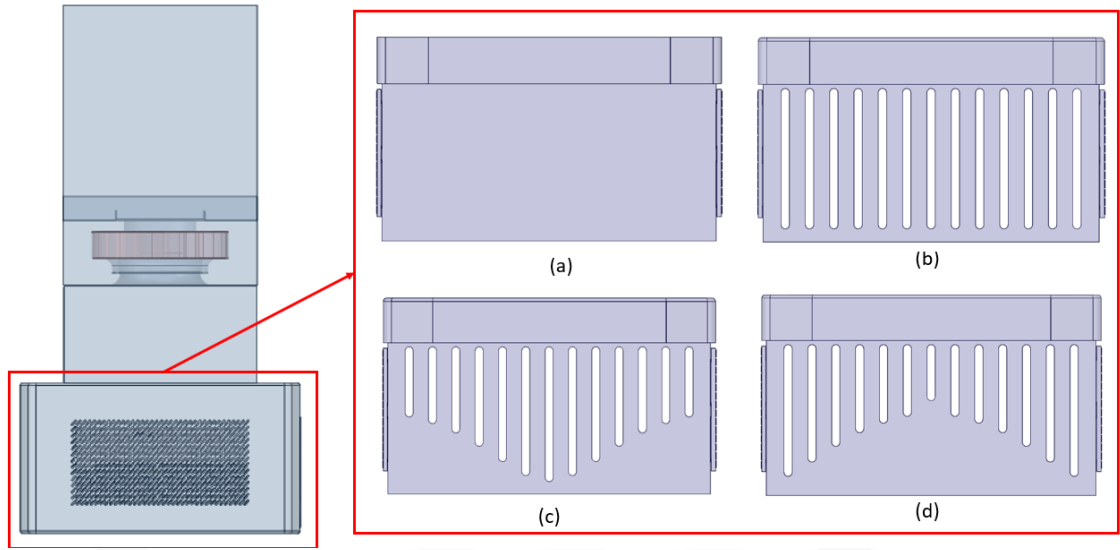
4.5.1. Sayısal Modeller

Şekil 4.14: İç Kabin Tasarımı a) Düz b) Açılı Model 1 c) Açılı Model 2



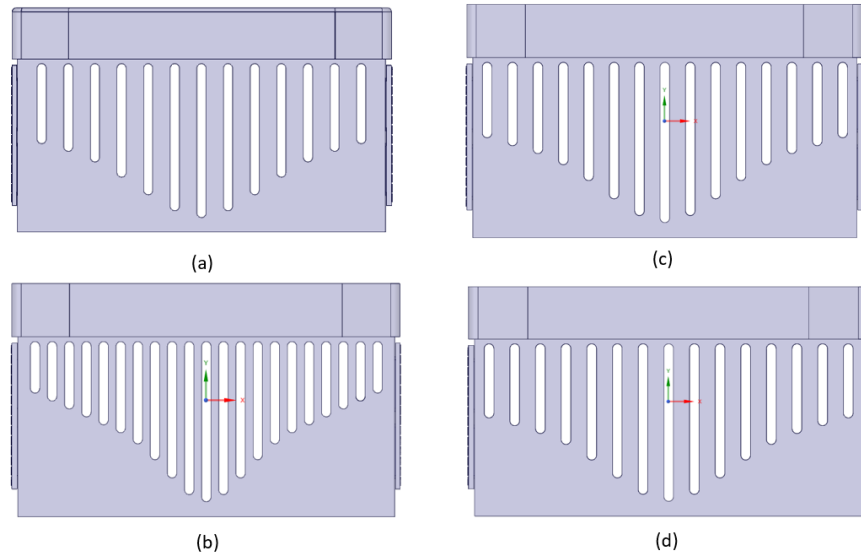
Hava temizleme cihazının iç kabin tasarımının düz ve açılı olması durumlarının hız ve basınç dağılımına olan etkisini incelemek amacıyla şekil-4.14’de verilen sayısal modeller hazırlanmıştır.

Şekil 4.15: Alt Susturucu a) Susturucusuz b) Düz Kanat c) V Kanatlı d) Ters V Kanat



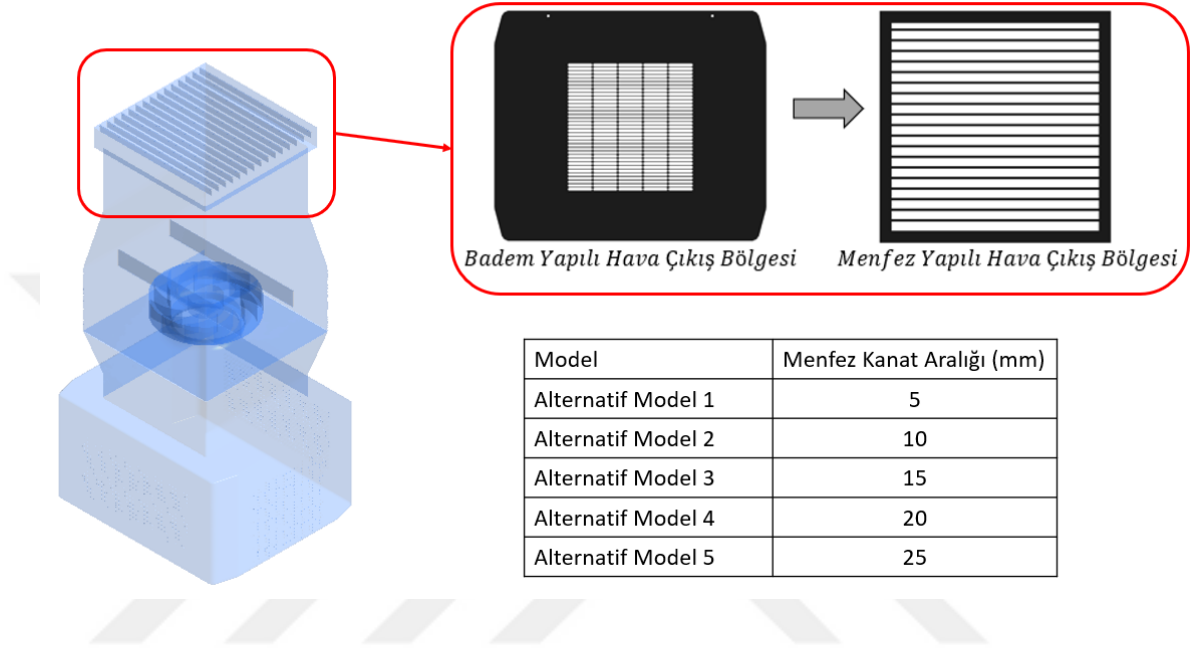
Hava temizleme cihazında özellikle fan ile hava emiş tarafı arasında kalan bölgede meydana vortekslerin azaltılması amacıyla susturucu kullanılması düşünülmüştür. Şekil-4.15'te gösterildiği gibi susturucu kullanılmaması, 30 mm kanat aralığına sahip olan düz kanatlı susturucu, V tipi susturucu ve Ters V tipi susturucu kullanılmasının hız, basınç ve türbülans şiddeti yoğunluğu dağılımına olan etkisini incelemek amacıyla analizleri gerçekleştirilmiştir.

Şekil 4.16: V tipi Susturucu Kanat Aralığı a) 30 mm b) 10 mm c) 15 mm d) 20 mm



Yapılan HAD analizleri sonucunda V tipi kanatlı susturucunun vortekslerin azaltılmasında en uygun tasarım olduğu tespit edilmiştir. Optimum kanatlar arası mesafenin belirlenmesi amacıyla şekil-4.16’de gösterildiği kanatlar arası mesafenin 10-15-20-30 mm olması durumlarının analizleri gerçekleştirilmiştir.

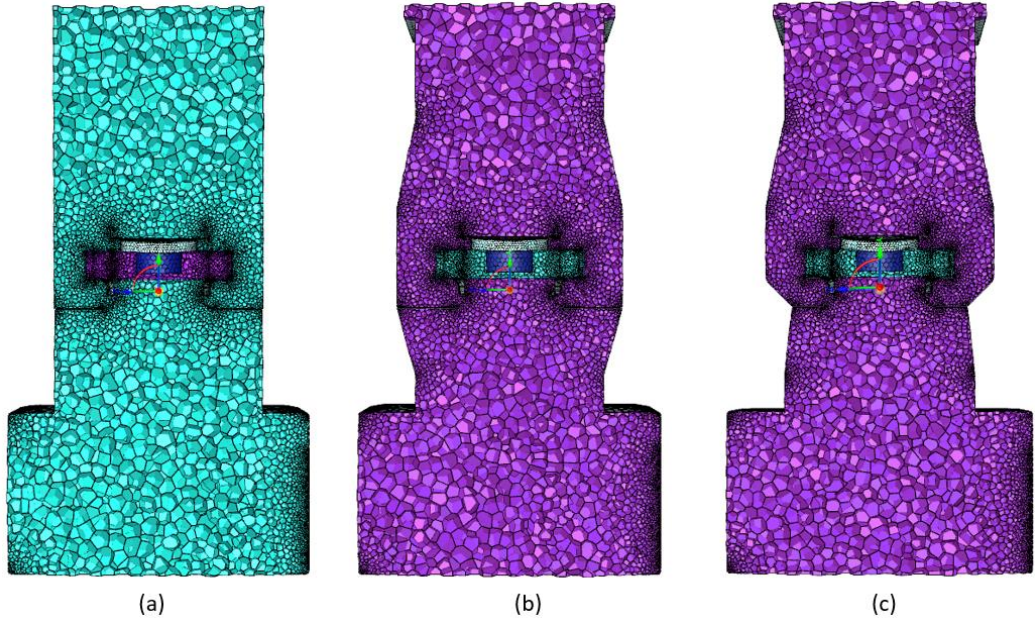
Şekil 4.17: Menfez Kanat Aralığı Parametrik Çalışması



Yapılan testler sonucunda mevcut hava temizleme cihazında badem yapılı hava çıkışı kullanılması durumunda akışa karşı direnç oluşturduğu ve debiyi azalttığı tespit edilmiştir. Yeni tasarım hava temizleme cihazında bademli yapı yerine şekil-4.17’de gösterildiği gibi çıkış açısı ayarlanabilir menfez kullanılmasına karar verilmiştir. Burada optimum kanat aralığının belirlenmesi için kanatlar arası mesafenin 5-10-15-20-25 mm olması durumunun debi çıkışına olan etkisi incelenmiştir.

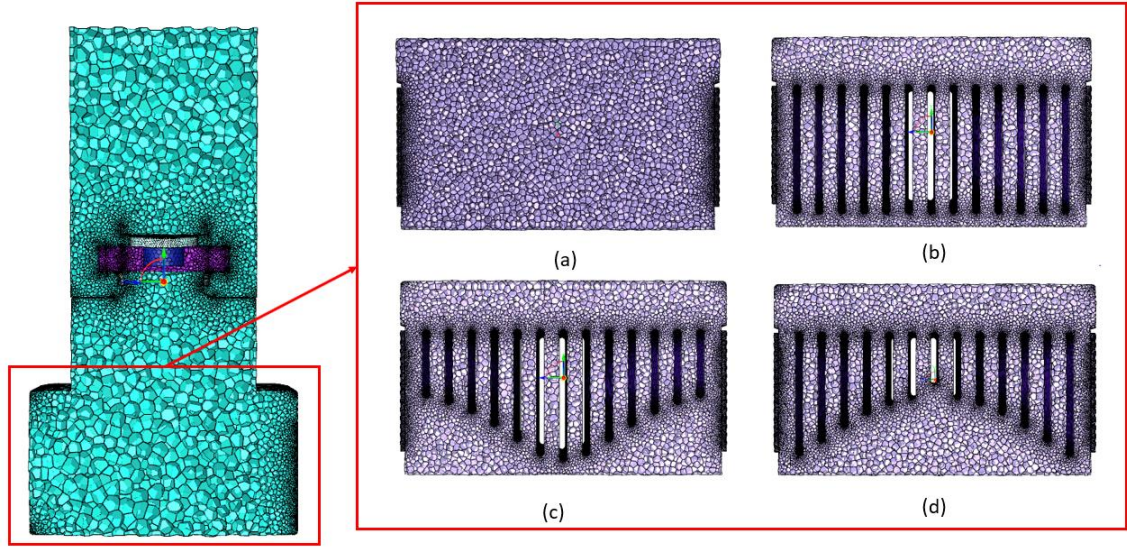
4.5.2. Sayısal Ağ (Mesh)

Şekil 4.18 İç Kabin Sayısal Ağ a) Düz b) Açılı Model 1 c) Açılı Model 2



Ansys Fluent 2022 R1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ticari yazılımı watertight geometry modülü kullanılarak pollyhedral mesh yapısı ile sayısal ağ (mesh) oluşturulmuştur. Şekil-4.18 ve Şekil-4.19’da tüm model üzerindeki pollyhedral mesh dağılımı gösterilmiş olup ortalama 1,5 milyon eleman sayısı kullanılmıştır. Ayrıca modeller üzerinde yapılan tasarım değişikliğinin etkisini daha net görebilmek için özellikle susturucu kanatları ve menfez kanatları arasında kalan bölümlere yoğun mesh atılmıştır.

Şekil 4.19: Alt Susturucu Sayısal Ağ **a)** Susturucusuz **b)** Düz Kanat **c)** V Kanatlı **d)** Ters V Kanat



Yukarıda belirtilen tasarım değişikliğinin etkilerini analiz edebilmek amacıyla Mevcut hava temizleme cihazının HAD analizlerinde kullanılan aynı sınır şartları kullanılmıştır. Analizlerden elde hız, basınç ve türbülans şiddeti yoğunluğunun mevcut model ile kıyaslanabilmesi için aynı bölgelerden oluşturulan referans düzlemler üzerinden sonuçlar incelenmiştir.



BEŞİNCİ BÖLÜM
BULGULAR VE TARTIRŞMA

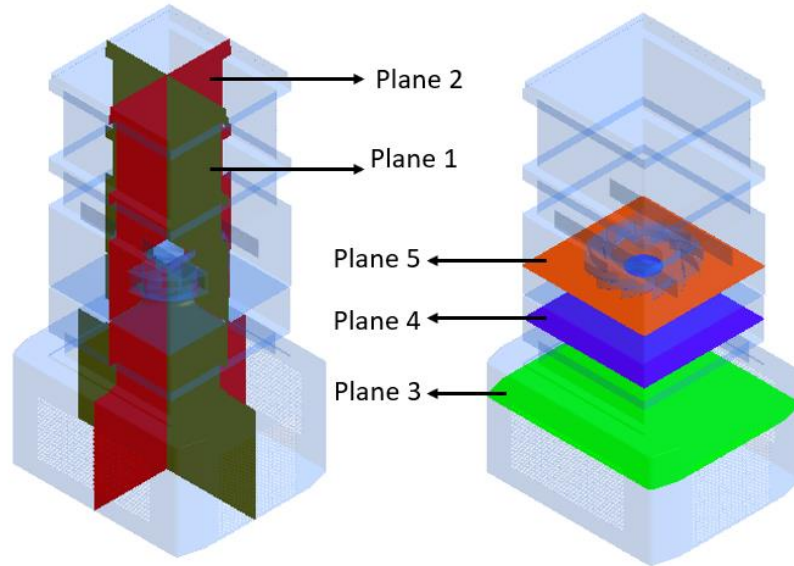
5.1. SAYISAL VE DENEYSEL BULGULAR

Bu bölümde mevcutta kullanılan geniş alan hava temizleme cihazı üzerinde gerçekleştirilen HAD analiz sonuçlarından elde edilen hız, basınç ve türbülans yoğunluğu şiddeti kontur grafikleri detaylı olarak incelenmiş ve referans düzlemleri yardımıyla vorteks bölgeleri tespit edilmiştir. Belirlenen kritik bölgeler üzerindeki vortekslerin azaltmak amacıyla iç kabin, susturucu ve menfez üzerinde HAD analizleri yardımıyla tasarım optimizasyonu gerçekleştirilmiş olup sonuçlar mevcut modelle kıyaslanmıştır. Ayrıca yeni model hava temizleme cihazının laboratuvar ortamında, güç, debi ve ses ölçümleri yapılmış mevcut model ile kıyaslanmıştır.

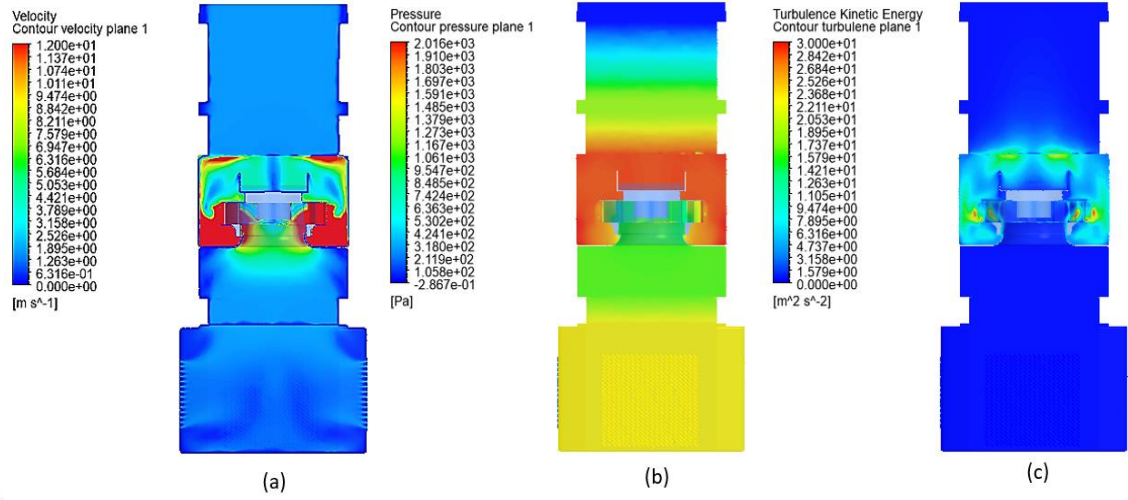
5.2. MEVCUT GENİŞ ALAN HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Mevcut hava temizleme cihazının HAD analizleri gerçekleştirilmiş olup sonuçların incelenmesi ve değerlendirilmesi konusunda şekil-5.1’te verilen referans düzlemleri kullanılmıştır.

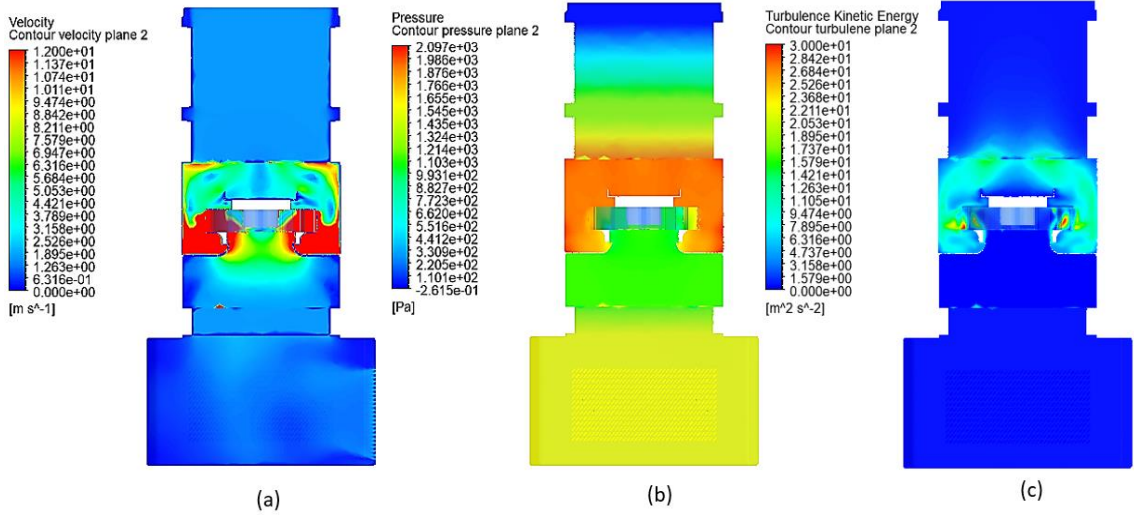
Şekil 5.1: Mevcut Geniş Alan Hava Temizleme Cihazı Üzerindeki Referans Düzlemleri



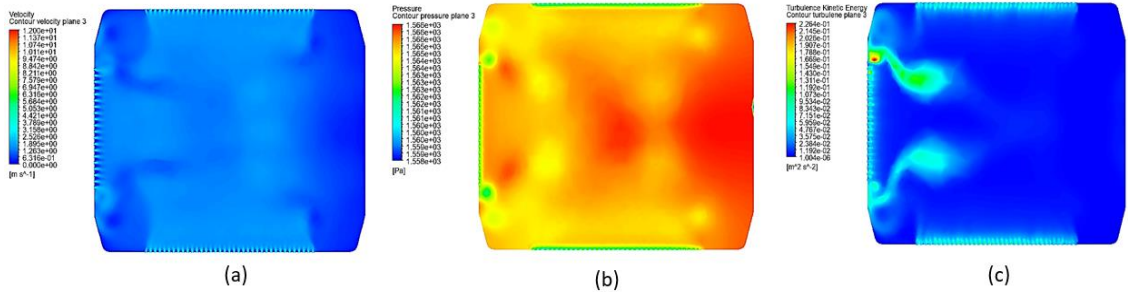
Şekil 5.2: Plane 1 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı



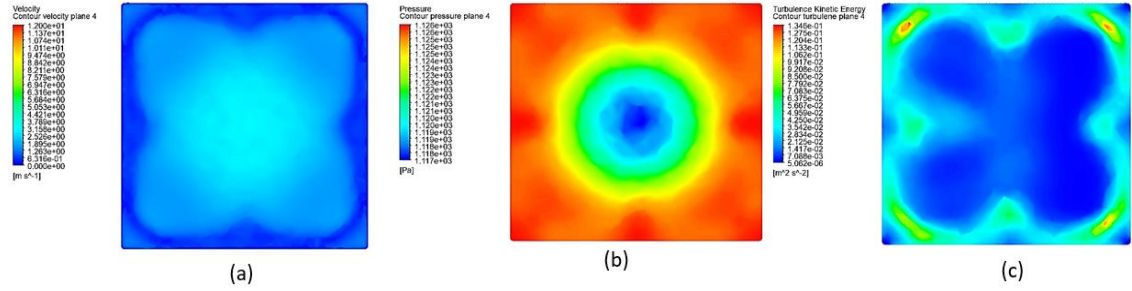
Şekil 5.3: Plane 2 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı



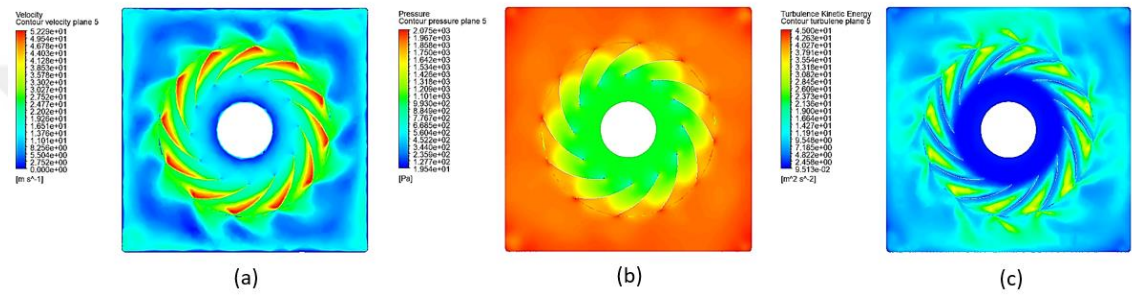
Şekil 5.4: Plane 3 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı



Şekil 5.5: Plane 4 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı



Şekil 5.6: Plane 5 üzerindeki Kontur Grafiği a) Hız Dağılımı b) Basınç Dağılımı c) Türbülans Kinetik Enerji Dağılımı



Mevcut havalandırma cihazının HAD sayısal çalışmasının %0-45 arasını gösteren türbülans bölgesi ve 0-12 m/s arasını gösteren hız konturu sırasıyla plane-1-2-3-4-5 gösterilmiştir. Şekil-5.2 ve Şekil-5.3'te plane 1 ve plane 2 üzerinde gösterilen türbülans konturu hava temizlemenin yan hava giriş bölgelerinden geçen havayı cihazın orta kesitinden göstermektedir. Yan hava girişlerden gelen hava birbirleriyle cihazın orta noktada çarpışmakta ve aynı zamanda motora doğru yükselmeyi istemektedir. Bu sırada yüksek hızda birbirlerine çarpan hava akışından dolayı türbülans oluşmaktadır. Ayrıca fan motorun üst bölgesinde tersinir akışlar gözlemlenmekte ve motorun üstünde türbülanslı akış oluşmaktadır. Şekil-5.6'da ise hava temizleme cihazının sadece ön bölgesinden gelen havanın bir kesit üzerinde dağılımı gösterilmiştir. Cihazın önünden gelen hava, cihazın arkasına doğru yönelmekte ve aynı zamanda fan motoruna doğru çekilmektedir. Hava giriş bölgesinde arka tarafa çarpan hava yüksek türbülansa neden olmaktadır. Tespit edilen türbülanslı bölgelerin ses kaynağı olabileceği düşünülmekte ve en aza indirgenmesi hedeflenmiştir. Şekil-5.4 ve şekil-5.5'te plane 4 ve plane 5 üzerinde hız, basınç ve türbülans dağılımları incelendiğinde filtrelerin türbülanslı akışı laminar akışa çevirdiği tespit edilmiştir.

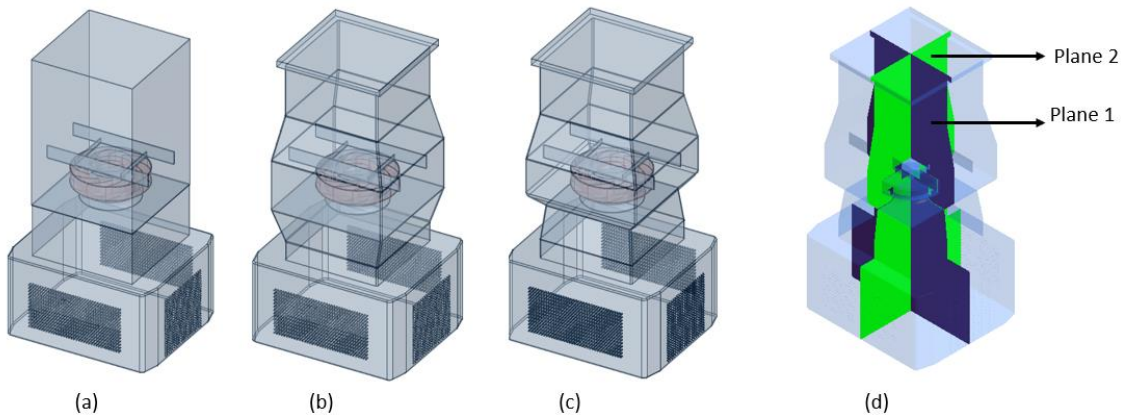
5.3. YENİ MODEL GENİŞ ALAN HAVA TEMİZLEME CİHAZININ HAD ANALİZİ SONUÇLARININ İNCELENMESİ

Mevcut hava temizleme cihazı üzerinde gerçekleştirilen HAD analizi çalışmalarında özellikle hava emiş bölgesi, fan motoru çevresi ve hava çıkış bölgesinde vortekslerin arttığı tespit edilmiştir. Çalışmanın bundan sonraki bölümünde bu bölgeler üzerinde tasarım iyileştirmeleri yapılacaktır.

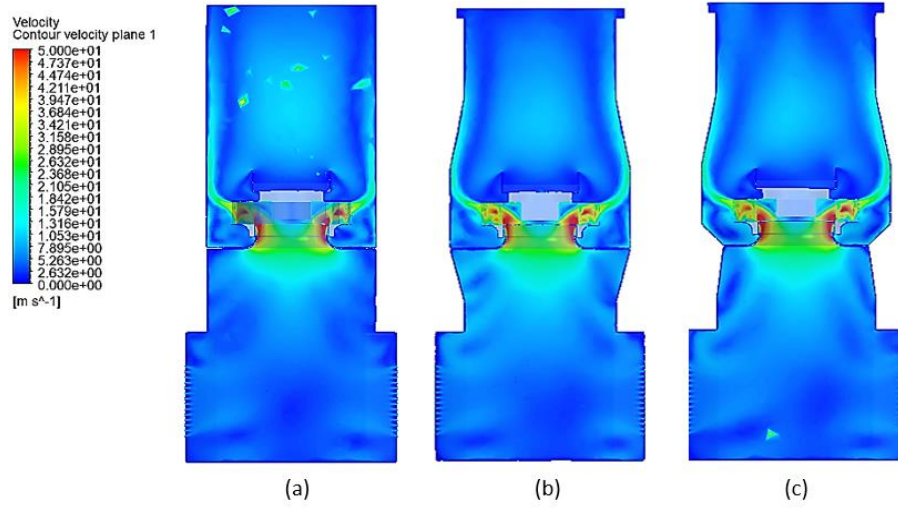
5.3.1. İç Kabin Tasarımı ve HAD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Mevcut hava temizleme cihazı üzerinde yapılan HAD analizleri incelendiğinde, F8 tipi ön filtre ile fan motoru arasında kalan bölgede ve fan motoru ile HEPA filtre arasında kalan bölgede, cihazı çalışması esnasında büyük vortekslerin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu durum iç kabin tasarımında hava akış yolu üzerinde iyileştirmeler yapılması gerekliliği ortaya koymuştur. Bu amaçla şekil-5.7’de gösterildiği gibi iç kabin tasarımının düz (a) ve açılı (b, c) olması durumunun HAD analizleri gerçekleştirilmiş olup şekil-5.7-d’de gösterilen referans düzlemleri 1-2 üzerinde hız, basınç ve türbülans kinetik enerji kontur grafikleri incelenmiştir.

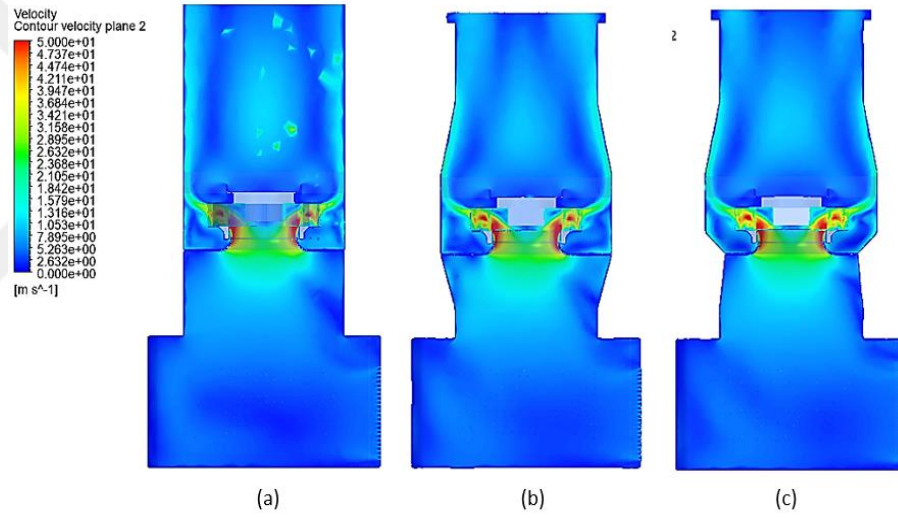
Şekil 5.7: İç Kabin Tasarımı **a) Düz b) Açılı Model 1 c) Açılı Model 2 d) Referans Düzlemleri**



Şekil 5.8: Hız Kontörü Plane 1'a) Düz İç Kabin b) Açılı Kabin 1 c) Açılı Kabin 2

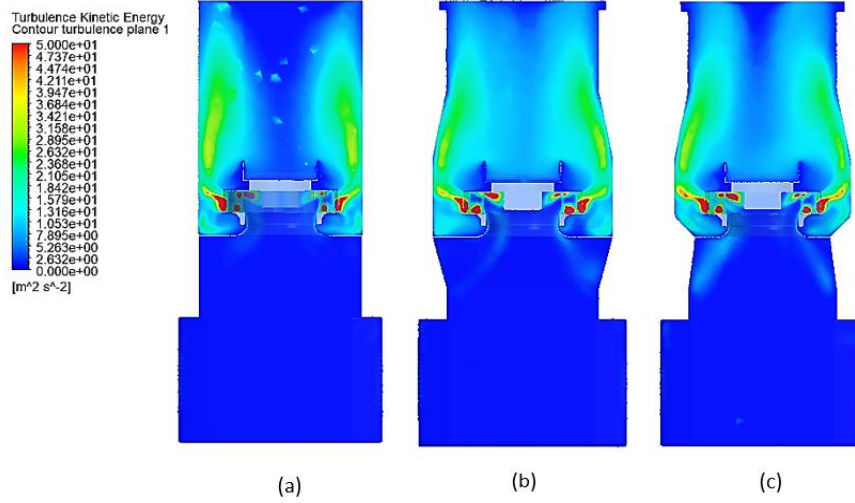


Şekil 5.9: Hız Kontörü Plane 2 a) Düz İç Kabin b) Açılı Kabin 1 c) Açılı Kabin 2

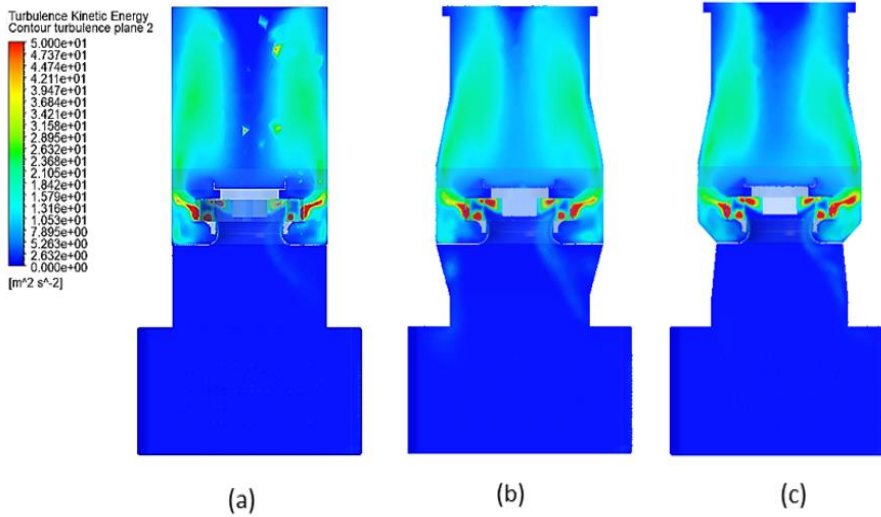


İç kabin tasarım iyileştirme çalışmalarına yönelik gerçekleştirilen HAD analizlerinde Şekil-5.8'de düz kabin ve açılı kabin 1-2'nin plane 1 üzerindeki hız kontör dağılım grafikleri, Şekil-5.9'da ise plane 2 üzerindeki hız dağılım kontör grafikleri gösterilmektedir.

Şekil 5.10: Türbülans Kinetik Enerji Kontörü Plane 1 **a)** Düz İç Kabin **b)** Açılı Kabin 1 **c)** Açılı Kabin 2



Şekil 5.11: Türbülans Kinetik Enerji Kontörü Plane 2 **a)** Düz İç Kabin **b)** Açılı Kabin 1 **c)** Açılı Kabin 2



Şekil-5.10'te düz kabin ve açılı kabin 1-2'nin plane 1 üzerindeki türbülans kinetik enerji kontör dağılım grafikleri, Şekil-5.11'te ise plane 2 üzerindeki türbülans kinetik enerji dağılım kontör grafikleri gösterilmektedir.

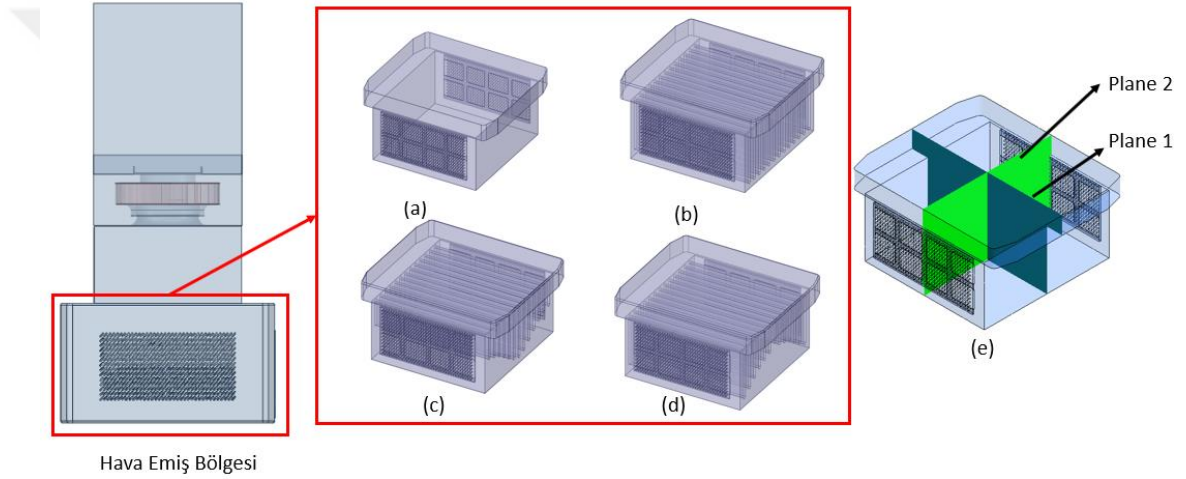
İç kabin tasarımına yönelik gerçekleştirilen HAD analiz çalışmalarında hız ve türbülans kinetik enerji kontör dağılım grafikleri detaylı incelendiğinde, Açılı kabin tasarım-1 modelinde hem fan motoru ile F8 ön filtre arasında kalan bölgede hem de fan

motoru ile HEPA filtre arasında kalan bölgede vortekslerin azalmasında önemli katkıda bulunduğu aynı zamanda da türbülans şiddetini azalttığı tespit edilmiştir.

5.3.2. Susturucu Tasarımı ve HAD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

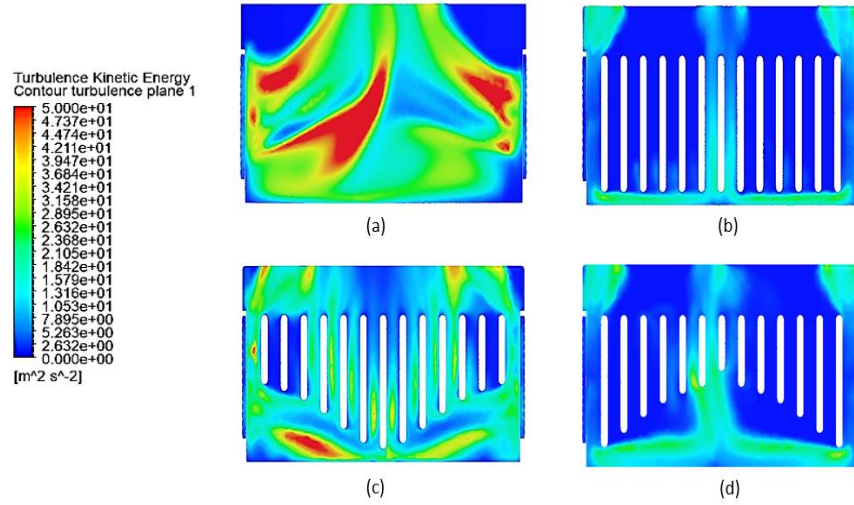
İç kabin tasarımına yönelik gerçekleştirilen HAD analizlerinde hem fan motoru ile F8 ön filtre arasında kalan bölgede hem de fan motoru ile HEPA filtre arasında kalan bölgede vortekslerin varlığı tespit edilmişti. Ancak modeller üzerinde detaylı inceleme yapıldığında şekil-5.12’de gösterilen hava emiş bölgelerinde vortekslerin oluştuğu tespit edilmiştir.

Şekil 5.12: Alt Susturucu a) Susturucusuz b) Düz Kanat c) V Kanatlı d) Ters V Kanat e) Referans Düzlemi

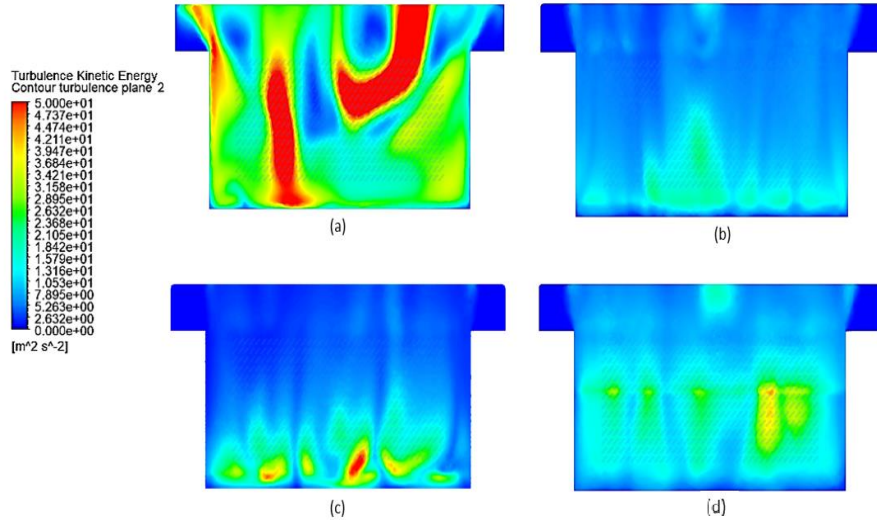


Hava emiş bölgesinde meydana vorteksleri azaltmak ve hava akışını F8 filtreye doğru yönlendirmek amacıyla Şekil-5.12’de gösterildiği gibi susturucusuz model (a), Düz susturucu modeli (b), V tipi susturucu modeli (c) ve Ters V tipi susturucu (d) modellerinin HAD analizleri gerçekleştirilmiş olup Şekil-5.12-e’de verilen referans düzlemleri üzerindeki hız ve türbülans kinetik enerji dağılımları incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5.13: Alt Susturucu Türbülans Kinetik Enerji Plane 1 **a)** Susturucusuz **b)** Düz Kanat **c)** V Kanatlı **d)** Ters V Kanat



Şekil 5.14: Alt Susturucu Türbülans Kinetik Enerji Plane 2 **a)** Susturucusuz **b)** Düz Kanat **c)** V Kanatlı **d)** Ters V Kanat



Susturucu tasarımının hava emiş bölgesi içindeki vorteks oluşumuna etkisinin incelendiği HAD analizleri çalışmalarında aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- Şekil-5.13-a ve Şekil 5.14-a gösterildiği gibi susturucu kullanılmadığı durumlarda hava emiş bölgesi içerisinde oldukça yüksek türbülans kinetik enerjisi değerleri tespit edilmiştir.
- Şekil-5.13-b-d ve Şekil-5.14 -b-d gösterilen susturucu kanatlarının düz ve ters v şeklinde yerleştirildiği modellerde başlangıç kanatları hava akışının

sistem içine homojen girişini engellemiş ve F8 filtrenin verimli kullanılmasını engellemiştir.

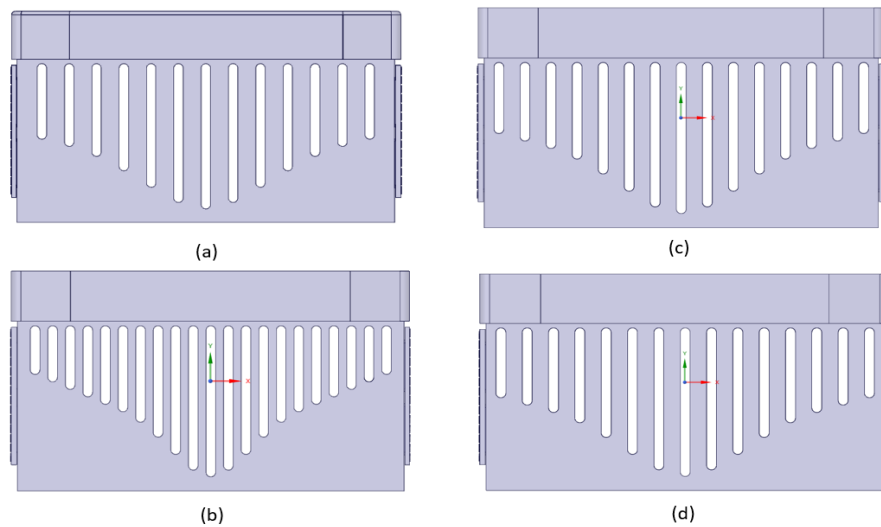
- Şekil-5.13 ve şekil-5.14'te verilen V tipi susturucu (c) modelinde, v şeklinde dizilmiş kanatlar sayesinde hem hava emiş bölgesinde hem de F8 filtreye hava çıkışı durumunda homojene yakın hava geçişi sağlamaktadır.

Tablo 5.1: Alt Susturucu Modellerinin Çıkış Hızı Kıyaslanması

Model	Çıkış Hızı (m/s)
Susturucusuz Tasarım	18.7
Düz kanatlı Susturucu Tasarımı	17.3
V tipi Susturucu Tasarımı	12.7
Ters V tipi Susturucu Tasarımı	16.5

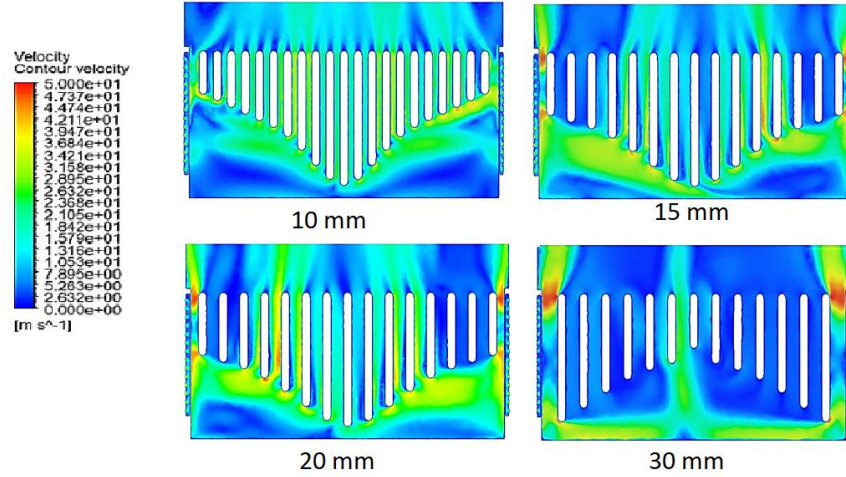
Tablo-5.1'de alt susturucu alternatif modellerinin susturucu çıkışındaki hız değerleri kıyaslanmış olup V tipi susturucu modelinin çıkışındaki hız değeri (12,7 m/s) susturucusuz modele (18.7) göre düşük kalmıştır. Bu durum sistem çıkışındaki debi değerini olumsuz etkileyecektir. V tipi susturucu modeli için 35 mm olan kanatlar arasındaki mesafenin optimize edilerek uygun kanatlar arası mesafenin belirlenmesi gerekmektedir.

Şekil 5.15: V tipi Susturucu Kanat Aralığı a) 30 mm b) 10 mm c) 15 mm d) 20 mm



Bu amaçla şekil-5.15'te gösterildiği gibi kanatlar arası mesafenin 10-15-20-30 mm olması durumunda HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5.16: Kanatlar Arası Mesafenin Hız Kontörüne Etkisi



Tablo 5.2: Kanatlar Arası Mesafenin Çıkış Hızına Olan Etkisinin Kıyaslanması

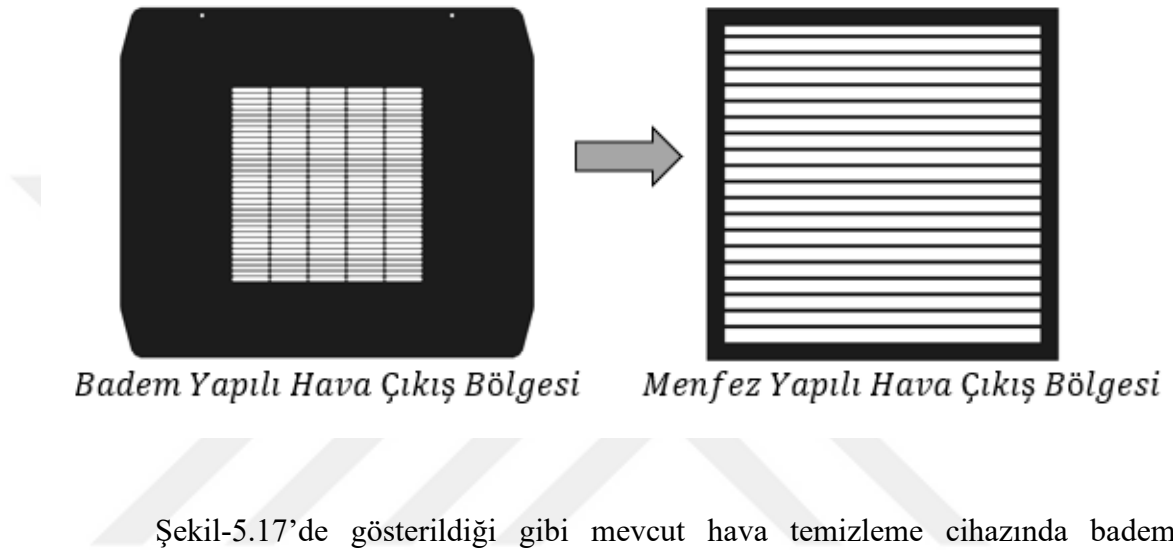
V Tipi Susturucu Modeli	Çıkış Hızı (m/s)
Susturucusuz Model	18.7
Kanatlar Arası Mesafe 10 mm	16.1
Kanatlar Arası Mesafe 15 mm	15.4
Kanatlar Arası Mesafe 20 mm	14.8
Kanatlar Arası Mesafe 30 mm	13.5
Kanatlar Arası Mesafe 35 mm	12.7

Yapılan parametrik çalışma sonucunda şekil-5.16'da gösterildiği gibi kanatlar arası mesafenin 10 mm olduğu durum için susturucu çıkışında daha homojen bir hız dağılımı elde edilmiştir. Ayrıca Tablo-5.2 'de kanatlar arası mesafenin çıkış hızına olan etkisi kıyaslanmış ve 10 mm kanat aralığında çıkış hızı (16,1 m/s) susturucusuz modele (18,7 m/s) göre yakın sonuçlar elde edilmiştir.

5.3.3. Hava Çıkış Menfezi Tasarımı ve HAD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Şu ana kadar yapılan çalışmalarda hava temizleme cihazı içerisindeki türbülansın yoğun olduğu bölgeler üzerinde iyileştirme çalışmaları yapılmış HAD analizi yardımıyla iç kabin tasarımı ve susturucu tasarımlarına karar verilmiştir. Hava temizleme cihazlarında performansı (çıkış debisi) etkileyen en önemli unsurlardan biri de hava çıkış bölgesi tasarımıdır.

Şekil 5.17: Hava Çıkış Bölgesi Tasarımı

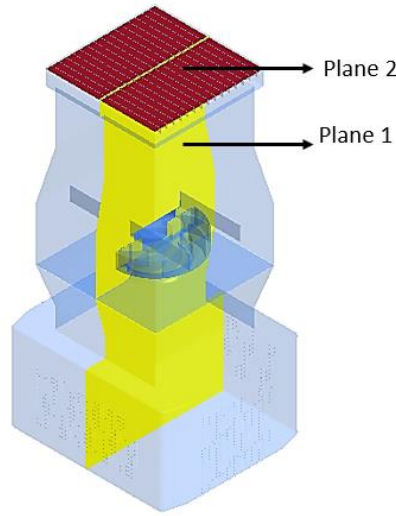


Şekil-5.17’de gösterildiği gibi mevcut hava temizleme cihazında badem tasarımlı çıkış formu kullanılmıştır. Esalba Metal ARGE Merkezi Test merkezinde balometre ile gerçekleştirilen debi ölçümlerinde hava çıkışının açık olması durumunda $1100 \text{ m}^3/\text{h}$ debi elde edilirken badem yapılı hava çıkış formu kullanıldığında bu değer $750 \text{ m}^3/\text{h}$ kadar düşmektedir. Bu problemten dolayı badem yapılı form yerine menfez yapılı çıkış formuna geçilmiştir. Ancak havalandırma sistemleri için standart olan kanatlar arası mesafenin hava temizleme cihazı için uygun olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünde çıkış debisini artırabilmek amacıyla Tablo-5.3 verilen parametrik çalışmaların HAD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5.3: Menfez Kanatlar Arası Parametrik Çalışması

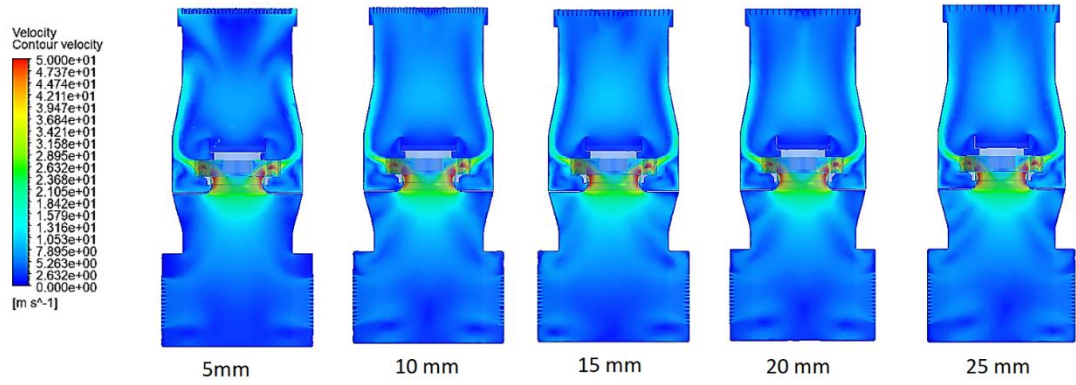
Model	Menfez Kanat Aralığı (mm)
Alternatif Model 1	5
Alternatif Model 2	10
Alternatif Model 3	15
Alternatif Model 4	20
Alternatif Model 5	25

Şekil 5.18: Referans Düzlemleri

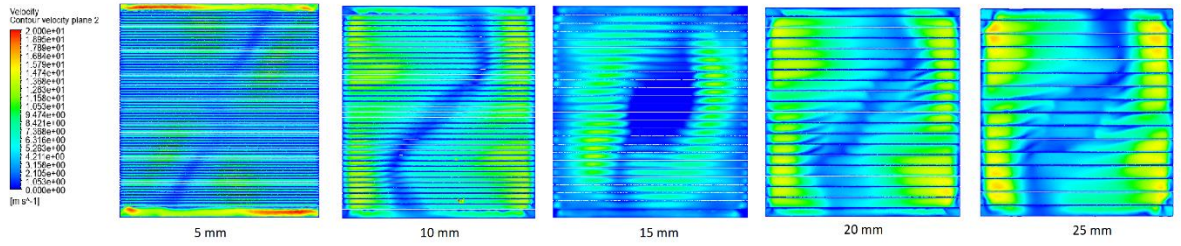


Şekil-5.18’de verilen referans düzlemleri kullanılarak aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 5.19: Plane 1 Üzerindeki Hız Dağılımı



Şekil 5.20: Plane 2 Üzerindeki Hız Dağılımı



Yapılan çalışmalarda şekil-5.19’da verilen plane 1 üzerindeki hız dağılımları incelendiğinde menfez kanat açıklığının Fan motoru ile HEPA filtre arasında kalan

bölgedeki akışın karakteristiğini önemli ölçüde etkilediği tespit edilmiştir. Şekil-5.20’de verilen plane 2 üzerinde meydana gelen hız dağılımları incelendiğinde kanatlar arasındaki mesafe azaldıkça hava çıkışına karşı direnç oluşmakta bu da çıkış hızını düşürmektedir.

Tablo 5.4: Kanatlar Arası Mesafe Çıkış Hızı ve Çıkış Debisi Kıyaslanması

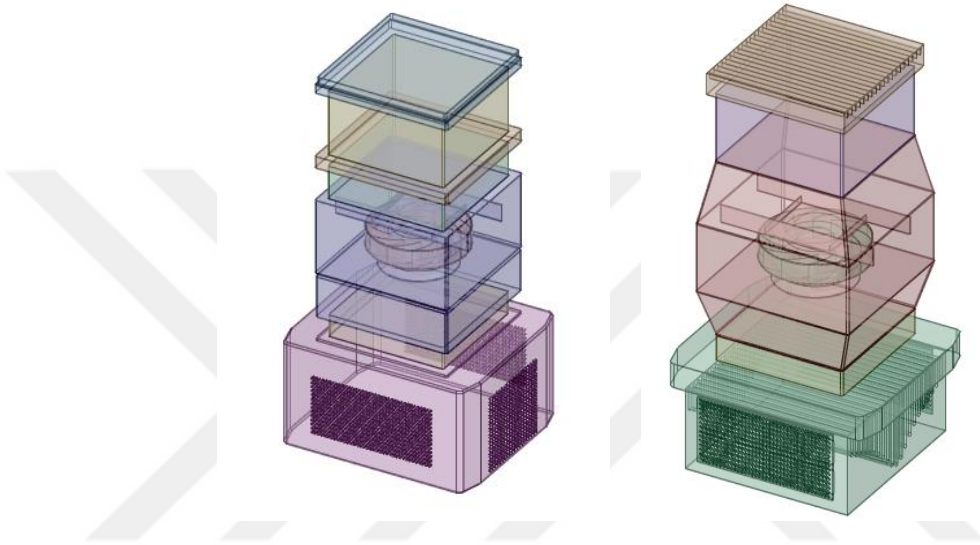
Menfez Kanatları Arasındaki Mesafe (mm)	Çıkış Hızı (m/s)	Çıkış Debisi (m ³ /h)
5	1.43	824
10	1.88	1083
15	2.01	1158
20	2.12	1221
25	2.25	1296

Yapılan HAD analizleri sonucunda menfez kanatları arasındaki mesafenin çıkış hızı ve çıkış debisine olan etkisi tablo-5.4’de verilmiştir. Tablodaki debiler incelendiğinde kanat arasının 25 mm olması durumunda sistemin çıkış debisinin yaklaşık 1300 (m³/h) olarak ölçülmüştür.

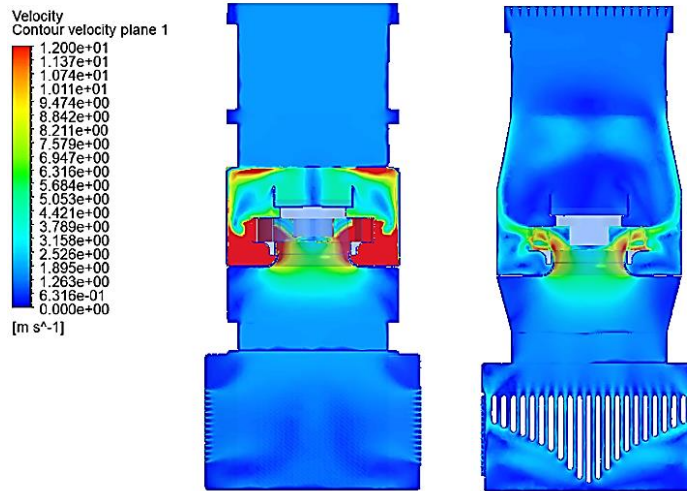
5.4. MEVCUT HAVA TEMİZLEME CİHAZI VE YENİ TASARIM HAVA TEMİZLEME CİHAZININ KIYASLANMASI

Şekil-5.21-a'da verilen Mevcut hava temizleme cihazının 3 boyutlu tasarımları kullanılarak HAD analizleri gerçekleştirilmiş ve HAD analizlerinden elde edilen bilgiler ışığında iç kabin tasarımı, susturucu tasarımı ve menfez tasarımları geliştirilerek şekil-5.21-b'de verilen nihai tasarım elde edilmiştir.

Şekil 5.21: Hava Temizleme Cihazı **a)** Mevcut Tasarım **b)** Yeni Tasarım



Şekil 5.22: Hız Dağılımı Kıyaslanması a) Mevcut Tasarım b) Yeni Tasarım



Yapılan sayısal analiz çalışmalar sonucunda şekil-5.22'de gösterildiği gibi sistem içerisindeki vorteks oluşan bölgeler optimize edilmiştir. Çalışmalar sonunda elde edilen bilgiler aşağıda verilen tablo-5.5'te özetlenmiştir. Çalışmalar sonucunda 3400 rpm ile

dönen fandan yeni modelde 1296 m³/h çıkış debisi elde edilmiş olup mevcut modele göre %14,4 artış sağlanmıştır.

Tablo 5.5: Simülasyon Sonuçlarının Kıyaslanması

Model	Çıkış Debisi (m ³ /h)	Yüzdelik Değişim (%)
Mevcut Model	1133	-
Yeni Model	1296	14.4

5.5. YENİ MODELİN TESTLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Şekil 5.23: Yeni Model a) Prototip Hazırlanması b) Testlerin Yapılması



Yeni tasarlanan model şekil-5.23-a’da gösterildiği prototipi hazırlanmıştır. Esalba Metal Sanayi ARGE Merkezi test merkezinde ürün maksimum kademe (3400rpm) çalıştırılarak öncelik güç tüketimi ölçülmüştür. Daha sonra şekil-5.23-b’de gösterildiği balometre yardımıyla ISO 14644/3 standardına göre çıkış debisi ölçülmüştür.

Şekil 5.24: Test Kuruluşu



Kaynak: İntertek Test Kuruluşu

Ürünün firma bünyesindeki testleri tamamlandıktan sonra TSE EN 3744 standartına göre şekil-5.24'te gösterildiği gibi Akredite kuruluştaki akustik testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler elde edilen sonuçlar tablo-5.6'da mevcut ürünle kıyaslamalı olarak verilmiştir.

Tablo 5.6: Mevcut ve Yeni Modelin Sonuçlarının Kıyaslanması

Model	Simülasyon Debisi (m ³ /h)	Test Debisi (m ³ /h)	Güç Tüketimi (Watt)	Ses Basınç Seviyesi (dB)
Mevcut Model	1133	1062	416	62.2
Yeni Model	1296	1252	386	49.1

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında mevcutta kullanılan yüksek kapasiteli ($1000 \text{ m}^3/\text{h}$) bir geniş alan (200 m^2) hava temizleme cihazının verimini artırmak, güç tüketimini azaltmak ve ses konforunu artırmak amacıyla sayısal ve deneysel çalışmaları yapılarak performansı iyileştirilmiştir. Yapılan çalışmalar kapsamında, Tasarım süreçlerinde Solidworks 3D yazılımı, Analiz süreçlerinde Hesaplamalı Akışkan Dinamiği (HAD) programı olan Ansys Fluent ve Ansys Spaceclaim programlarından destek alınmıştır. Ayrıca ürünün debi ve güç testleri ile prototip aşamalarında Esalba Metal sanayi firmasının ARGE Merkezi olanaklarından yararlanılmıştır.

Mevcut ürün Test ve HAD analizlerinden elde edilen bilgiler ışığında iç kabin tasarımı, susturucu tasarımı ve menfez tasarımı çalışmaları yapılmış olup aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Mevcut yüksek kapasiteli geniş alan hava temizleme cihazı üzerinde yapılan HAD analizlerinde, hava emiş bölgesi ile F8 ön filtre arasında kalan bölge, Fan motoru ile F8 ön filtre arasında kalan bölgede ve Fan motoru ile HEPA filtre arasında kalan bölgelerde büyük çaplı vortekslerin olduğu tespit edilmiştir. Özellikle fan motorundan çıkan havanın iç kabin duvarlarına ortalama 10 m/sn - 50 m/sn hızla çarparak hava kaynaklı gürültüyü artırdığı belirlenmiştir.
- Mevcut model üzerinden gerçekleştirilen testlerde sistemin $1062 \text{ m}^3/\text{h}$ debiye sahip olduğu, yapılan HAD analizlerinde ise $1133 \text{ m}^3/\text{h}$ sahip olduğu hesaplanmıştır. Yapılan testler ile simülasyon çalışmaları arasında %6'lık fark olduğu tespit edilmiştir.
- Optimize edilmiş Yeni Tasarım yüksek kapasiteli geniş alan hava temizleme cihazında HAD programı olan Ansys Fluent yazılımı ile fan motoru etrafındaki iç kabin sacına açılı verilerek hava akışı yönlendirilmiş, vortekslerin yoğun olduğu ve gürültünün arttığı hava emiş bölgesine V tipi susturucu eklenmiş, çıkış bölümüne açısı ayarlanabilir menfez eklenerek sistemin çıkış debisi $1296 \text{ m}^3/\text{h}$ seviyesine çıkarılarak mevcut ürüne göre %14 debi artışı sağlanmıştır.

- Esalba Metal Sanayi ARGE Merkezi Test Merkezinde mevcut ve yeni ürünün güç ve debi testleri yapılmış olup mevcut ürünün debi değeri 1062 m³/h, yeni ürünün debi değeri 1256 m³/h olarak test edilmiştir. Test sonuçlarına göre %18 debi artışı sağlanmıştır. Ayrıca güç testleri sonucunda fan motoru üzerindeki direnç azaldığı için mevcut ürün 416 watt güç tüketirken yeni ürünün güç tüketimi 386 watt'a düşürülmüş olup %7,7'lik enerji tasarrufu sağlanmıştır.
- Akredite kuruluştaki TSE EN 3744 standartına göre üründen 1 metre mesafe uzaklığa 6 adet mikrofon yerleştirilerek gerçekleştirilen akustik testlerde mevcut ürünün ses basınç seviyesi (SPL) 62 dB olarak ölçülürken, hava akış yoku optimize edilmiş yeni tasarım hava temizleme cihazında 49 dB olarak ölçülmüştür. Yaklaşık 13 dB ses düşümüyle birlikte cihazın konut, sınıf gibi kapalı ortamlarda ses konforu yüksek olarak çalışması sağlanmıştır.
- Ayrıca çift cidarlı iç kabine sahip olan mevcut hava temizleme cihazı yerine tek cidarlı açılı iç kabin kullanılmasıyla ürün ağırlığı 102 kg'dan 92 kg düşürülmüş ürün hafifletilmiştir. Bu durum ürünün sevkiyatı esnasında tonajı azalttığı için kullanılan araçların yakıt tüketimini azaltarak karbon salınımı azaltmaktadır.

KAYNAKÇA

- Ansyz Inc. (1998). *Fluent User's Guide*. Fluent incorporated Centerra Resource park, Lebanon.
- Bazant, M. Z., & Bush, J. W. (2021). A guideline to limit indoor airborne transmission of COVID-19. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118, 18-30.
- Bergmann, K. C., Sehlinger, T., Gildemeister, J., & Zuberbier, T. (2017). A novel experimental technology for testing efficacy of air purifiers on pollen reduction. *Allergo Journal*, 26, 20-25.
- Bertolín, L. S., Oro, J. M. F., Díaz, K. A., Vega, M. G., Velarde-Suárez, S., Del Valle, M. E., & Fernández, L. J. (2023). Optimal position of air purifiers in elevator cabins for the improvement of their ventilation effectiveness. *Journal of Building Engineering*, 63, 466-490.
- Burgmann, S., & Janoske, U. (2021). Transmission and reduction of aerosols in classrooms using air purifier systems. *Physics of fluids*, 33(3), 33-44.
- Bluyssen, P. M., Ortiz, M., & Zhang, D. (2021). The effect of a mobile HEPA filter system on 'infectious' aerosols, sound and air velocity in the SenseLab. *Building and environment*, 188, 475-487.
- Cappare, P., D'Ambrosio, R., De Cunto, R., Darvizeh, A., Nagni, M., & Gherlone, E. (2022). The usage of an air purifier device with HEPA 14 filter during dental procedures in COVID-19 pandemic: A randomized clinical trial. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 221-232.
- Darwin Technology About if D. Retrieved (2017,19 Nisan). Eriřim adresi: <http://www.ifdair.com/ifd/index.html>
- Fazlzadeh, M., Salarifar, M., Hassanvand, M. S., Nabizadeh, R., Shamsipour, M., & Naddafi, K. (2022). Health benefits of using air purifier to reduce exposure to PM2. 5-bound polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), heavy metals and ions. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131-143.
- Fermo, P., Artíñano, B., De Gennaro, G., Pantaleo, A. M., Parente, A., Battaglia, F., ... & Miani, A. (2021). Improving indoor air quality through an air purifier able to reduce aerosol particulate matter (PM) and volatile organic compounds (VOCs): Experimental results. *Environmental research*, 197, 131-139.
- Froumann Profesyonel Hava Temizleme Cihazları, (2023,28 Temmuz)''Hava Temizleme Cihazı Ne İşe Yarar? 'Eriřim adresi:<https://froumann.com/hava->

[temizlemecihazineiseyayarar/?gclid=CjwKCAjwzo2mBhAUEiwAf7wjKqSRgIAQZe9Hs_5fxKjic_Y-tQprfIpkvTbK-J2mm2fzreV4J_vqfRoCk18QAvD_BwE](https://www.semanticscholar.org/temizlemecihazineiseyayarar/?gclid=CjwKCAjwzo2mBhAUEiwAf7wjKqSRgIAQZe9Hs_5fxKjic_Y-tQprfIpkvTbK-J2mm2fzreV4J_vqfRoCk18QAvD_BwE)

- Glover, N. J. (2002). Countering chemical and biological terrorism. *Civil Engineering*, 72(5), 62.
- Guo, J., Xiong, Y., Kang, T., Xiang, Z., & Qin, C. (2020). Bacterial community analysis of floor dust and HEPA filters in air purifiers used in office rooms in ILAS, Beijing. *Scientific reports*, 10(1), 6417.
- Hammond, A., Khalid, T., Thornton, H. V., Woodall, C. A., & Hay, A. D. (2021). Should homes and workplaces purchase portable air filters to reduce the transmission of SARS-CoV-2 and other respiratory infections? A systematic review. *PLoS One*, 16(4), 100-112.
- Jangra, R., Ahlawat, K., Dixit, A., & Prakash, R. (2023). *Efficient deactivation of aerosolized pathogens using a dielectric barrier discharge based cold-plasma detergent in environment device for good indoor air quality*. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41598-023-37014-2>.
- Jumlongkul, A. (2021). Semi-Outdoor Filterless Air Purifier For Smog And Microbial Protection With Water Purifier System. *Environmental Research*, 197, 111-116.
- Jin, W., Wang, C., Shi, C., & Wang, Z. (2021,9-11 April). *Prediction of PM2.5 Purification Time of Air Purifier under High Elevation Angle and High Wind Speed* [Presented paper]. In E3S Web of Conferences.
- Kedare, V. J., Kharat, S. S., & Tawde, S. (2020). Effectiveness of constructed indoor air purifier to enhance indoor air quality. *European Journal of Engineering and Technology Research*, 5(12), 61-66.
- Kotas, T. J. (2012). *The exergy method of thermal plant analysis* (Pod ed.). Paragon Publishing.
- Kim, S., Kim, S., Park, H. J., Park, S., Kim, J. Y., Jeong, Y. W., ... & Lee, C. (2022). Practical scale evaluation of a photocatalytic air purifier equipped with a Titania-zeolite composite bead filter for VOC removal and viral inactivation. *Environmental research*, 204, 112-126.
- Lange, P., Westhoff, A., Kohl, A., & Müller, A. (t.y). *Experimental study of the indoor aerosol-dynamics for a low-momentum ventilation system with an air purifier unit*. Yayınlanmamış makale taslağı.

- Law, K. S., & Stohl, A. (2007). Arctic air pollution: Origins and impacts. *science*, 315(5818), 1537-1540.
- Long, L. N., Plassmann, P. E., Sezer-Uzol, N., & Jindal, S. (2004, 9-12 August). *Real-time visualization and steering of large-scale parallel simulations* [Presented paper]. In 11th International Symposium on Flow Visualization, University of Notre Dame, Notre Dame ,Indiana, USA.
- Lowther, S. D., Deng, W., Fang, Z., Booker, D., Whyatt, D. J., Wild, O., ... & Jones, K. C. (2020). How efficiently can HEPA purifiers remove priority fine and ultrafine particles from indoor air?. *Environment international*, 144, 106-115.
- Mathur, G. (2021). COVID Killing Air Purifier Based on UV & Titanium Dioxide Based Photocatalysis System. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 4(2021-01-0214), 143-150.
- Masuda, S., Hosokawa, S., Tu, X. L., Tsutsumi, M., Ohtani, T., Tsukahara, T., & Matsuda, N. (1993). The performance of an integrated air purifier for control of aerosol, microbial, and odor. *IEEE transactions on industry applications*, 29(4), 774-780.
- Modi, A., Sezer-Uzol, N., Long, L. N., & Plassmann, P. E. (2005). Scalable computational steering for visualization/control of large-scale fluid dynamics simulations. *Journal of Aircraft*, 42(4), 963-975.
- Raghava, N., & Vidovic, B. (2020). *Using computational fluid dynamics to evaluate the role of air purification in reducing fallow time in dentistry*. Retrieved from https://assets.researchsquare.com/files/rs-59571/v1_covered.pdf?c=1631839365
- Saw, L. H., Leo, B. F., Lin, C. Y., Mokhtar, N. M., Ali, S. H. M., & Nadzir, M. S. M. (2022). The myth of air purifier in mitigating the transmission risk of SARS-CoV-2 virus. *Aerosol and Air Quality Research*, 22(3), 210-232.
- Sezer-Uzol, N. (2006). *Unsteady flow simulations around complex geometries using stationary or rotating unstructured grids* (PhD Dissertation). The Pennsylvania State University.
- Shiue, A., Hu, S. C., & Tu, M. L. (2011). Particles removal by negative ionic air purifier in cleanroom. *Aerosol and Air Quality Research*, 11(2), 179-186.
- Tonkal, O. Ç., Pehlivan, S., Sezer Uzol, N., & İşler, V. (2009,15-18 Nisan). *Hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile üç boyutlu karmaşık akış problemlerinin yüksek başarılı*

hesaplamaları [Sözlü bildiri]. 1. Ulusal Yüksek Başarım ve Grid Konferansı, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.

US Environmental Protection Agency, (2021,13 July)’’ *Healthy Buildings, Healthy People: A Vision for the 21st Century; Office of Air and Radiation*’’ Retrieved for from <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/healthy-buildings-healthy-people-vision-21st-century>.

Zhang, X. J., Fang, L., Wargocki, P., Szulc, D., Tanaka, T., & Kagawa, K. (2011,6-11 November). *Effect of streamer plasma air purifier on SBS symptoms and performance of office work* [Presented paper]. In 7th International Symposium on Heating, Ventilating and Air Conditioning, Shanghai, China.



DİZİN

-A-

Akustik, v,2,4,5,6,13,26,57,63

-B-

Balometre,26,27,52,56

Basınç,6,20,21,26,27,28,37,38,41,42,43,
44,45,46,47,48,50,51,54,55**-C-**

Covid-19, v,1,4,8,9,12

-D-Debi, v,2,6,23,24,25,26,28,29,35,39,42,
50,52,62,63**-F-**Fan,4,16,23,24,25,26,28,29,31,33,34,35
,36,38,44,45,47,48,54,62,63
F8,23,24,25,27,28,45,47,48,50,62**-G-**

Güç, v,2,4,5,6,13,25,26,42,56,62,63

-H-HAD,v,2,5,6,10,15,18,23,28,29,30,31,3
2,33,36,38,41,42,44,45,46,47,48,49,51,
52,55,63Hava çıkışı,11,16,24,26,28,29,35,36,
45,52

Hava girişi ,24,26,30,44

Hava temizleme cihazı,

v,2,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,15,16,
23,24,26,28,29,33,35,36,38,41,42,
44,45,52,55,62,63

HEPA14,8,9,11,12,16,17,18,23,35,45,4

7,48,54,62

Hız,v,6,20,21,26,27,28,37,38,41,42,43,4
4,45,46,47,48,50,51,54,55**-K-**Kabin,4,6,9,28,36,37,40,42,45,46,47,48,
52,55,62,63Karbonfiltre,1,10,16,17,18,23,24,25,27,
28,35,63**-M-**Menfez,6,36,39,40,42,52,53,54,55,62
mesh,6,18,23,34,40**-S-**Susturucu,36,37,38,40,41,42,48,49,50,5
1,52,55,62**-T-**Türlülans,6,9,15,18,20,21,28,32,35,38,
41,42,43,44,45,47,49**-V-**

Vorteks,6,38,42,45,47,48,62