

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNEK BİR ARACIN HAVALANDIRMA SİSTEMİNDE  
AKIŞ DAĞILIMININ SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK  
İNCELENMESİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ

**Muhammet Yusuf ERDEM**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Proses Programı

Danışman

Prof. Dr. Hakan DEMİR

Eş Danışman

Doç. Dr. Zafer GEMİCİ

Temmuz, 2025

**T.C.**  
**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİNEK BİR ARACIN HAVALANDIRMA SİSTEMİNDE**  
**AKIŞ DAĞILIMININ SAYISAL VE DENEYSEL OLARAK**  
**İNCELENMESİ VE İYİLEŞTİRİLMESİ**

Muhammet Yusuf ERDEM tarafından hazırlanan tez çalışması 30.07.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Proses Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Hakan DEMİR  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

Doç. Dr. Zafer GEMİCİ  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Eş-Danışman

**Jüri Üyeleri**

Prof. Dr. Hakan DEMİR, Danışman  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Şevket Özgür ATAYILMAZ, Üye  
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Sertaç ÇADIRCI, Üye  
İstanbul Teknik Üniversitesi

---

---

---

Danışmanım Prof. Dr. Hakan DEMİR sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Binek bir aracın havalandırma sisteminde akış dağılımının sayısal ve deneysel olarak incelenmesi ve iyileştirilmesi ”başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Muhammet Yusuf ERDEM

İmza



Bu çalışma, “Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü’nün FBA-2024-6159” numaralı projesi ile desteklenmiştir.



*Aileme  
ve  
eşime*

## TEŐEKKÜR

---

İki gözümün çiçeği eőim Hatice Sena ERDEM, minik papatyamlarım Saliha Yüstra ERDEM ve Zeynep Ebrar ERDEM'e gösterdikleri fedakarlık ve sabır için teőekkürlerimi sunuyorum. Çalışmanın fikir aşamasından itibaren her safhasında desteklerini esirgemeyen Halit TERZİOĞLU'na őükranlarımı iletiyorum. Binek aracın ön havalandırma konsolunun temin edilmesi konusundaki desteklerinden ötürü Doç. Dr. Alp Tekin ERGENÇ hocaya, deney tesisatının kurulumu, deneylerin icra edilmesi ve sayısal hesapların yapılması konusunda yönlendirmelerinden ötürü de danışman hocalarım Prof. Dr. Hakan DEMİR ve Doç. Dr. Zafer GEMİCİ'ye teőekkürlerimi iletiyorum.

Muhammet Yusuf ERDEM

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xii</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xiii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xv</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Hava Kanallarında Akış .....	1
1.2 Binek Araçlardaki Konfor Parametreleri .....	2
1.3 Problemin Tanımı ve Amaç .....	2
<b>2 LİTERATÜR TARAMASI</b>	<b>4</b>
2.1 Akış Dağılımı ve Kabin Konforu.....	4
2.2 Ölçüm Teknikleri .....	11
2.3 Tezin Kapsamı .....	18
<b>3 DENEYSEL ÇALIŞMA</b>	<b>20</b>
3.1 Deney Sistemi ve Ölçüm Cihazları.....	20
3.2 Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme.....	22
<b>4 SAYISAL ÇALIŞMA</b>	<b>29</b>
4.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi.....	29
4.1.1 Süreklilik ve Navier Stokes Denklemleri .....	29
4.1.2 Türbülans Modellemesi .....	30

4.1.3 Fan Modelleme .....	32
4.2 Sayısal Doğrulama Çalışması .....	33
4.2.1 Geometri Oluşturma Çalışması .....	33
4.2.2 Simülasyon Modeli.....	36
4.2.3 Debi Dağılımının İyileştirilmesi .....	54
<b>5 SONUÇ</b>	<b>63</b>
5.1 Deneysel ve Sayısal Verilerin Kıyaslanması .....	63
5.2 Gelecek Çalışmalar .....	64
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>65</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>68</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

P	Basınç [Pa]
$\Psi$	Boyutsuz Debi Dağılım Oranı
Cd	Boyutsuz Sürüklenme Katsayısı
n	Bölme Sayısı
u'	Çalkantılı Hız [m/s]
D	Çap [m]
$\Omega$	Devir Sayısı [devir/dakika]
Pv	Dinamik Basınç [Pa]
F <sub>D</sub>	Hesaplanan Sürüklenme Kuvveti [N]
V	Hız [m/s]
u	Hızın X Yönündeki Bileşeni [m/s]
v	Hızın Y Yönündeki Bileşeni [m/s]
w	Hızın Z Yönündeki Bileşeni [m/s]
K	Kayıp Katsayısı
A	Kesit Alanı [m <sup>2</sup> ]
v <sub>a</sub>	Ortalama Hız [m/s]
Re	Reynolds Sayısı
$\epsilon$	Sapma Miktarı
T	Sıcaklık [°C]
P <sub>s</sub>	Statik Basınç [Pa]
P <sub>t</sub>	Toplam Basınç [Pa]
L	Uzunluk [m]
$\rho$	Yoğunluk [kg/m <sup>3</sup> ]
t	Zaman [s]
$\bar{u}$	Zaman Ortalamalı Hız [m/s]

## KISALTMA LİSTESİ

---

ASHRAE	The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational Fluid Dynamics
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
EN	European Norm
EWT	Enhanced Wall Treatment
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HVAC	Heating, Ventilating and Air Conditioning
ISO	International Organization for Standardization
k- $\epsilon$	k-Epsilon
k- $\omega$	k-Omega
LES	Large Eddy Simulation
LL	En sol menfez
LM	Orta sol menfez
M	Hücre Sayısı(Milyon)
MRF	Multiple Reference Frame
RANS	Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
RBM	Rigid Body Motion
RM	Orta sağ menfez
RPM	Revolutions Per Minute
RR	En sağ menfez
RSM	Reynolds Stress Model
SMM	Sliding Mesh Motion
SST	Shear Stress Transport
STL	Standard Triangle Language
TKE	Türbülans Kinetik Enerji

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Kanal çatallanmasını ifade eden kavramlar. a) Keskin pah b) Eksantrik pah c) Eş merkezli pah .....	6
Şekil 2.2 Dağılım seçenekleri a) Ağaç dallanması b) Yuvarlak dallanma .....	7
Şekil 2.3 Test altyapısı.....	8
Şekil 2.4 Ölçüm örneği.....	14
Şekil 2.5 Pitot tüpü [25].....	15
Şekil 2.6 Kesit üzerindeki ölçüm noktaları [24].....	16
Şekil 3.1 Deney tesisatı (Ölçüm cihazları takılı değilken) .....	20
Şekil 3.2 Deney tesisatı (Ölçüm cihazları takılı iken) .....	21
Şekil 3.3 Ölçüm aletleri a) Testo 417 pervaneli anemometre b) Testovent 417 akış düzeltici huni c) Testo 440 sıcak tel anemometresi d) Testo 470 Takometre .....	22
Şekil 3.4 Fan devri ölçümü.....	22
Şekil 3.5 Menfez isimlerinin gösterimi .....	25
Şekil 3.6 Sıcak tel anemometresi ile ölçüm.....	27
Şekil 3.7 Pervaneli anemometre ve sıcak tel anemometresi ölçüm sonuçları .....	28
Şekil 4.1 Türbülanslı akışta zaman ortalamalı $\bar{u}$ ve çalkantılı $u'$ parametrelerinin gösterimi [26].....	31
Şekil 4.2 Test geometrisi a) Fan modülü b) Fan modülü sol parçası .....	34
Şekil 4.3 Tarama geometrisi (Fan modülü sol parça).....	35
Şekil 4.4 Test geometrisi hava kanalları ve fan modülü.....	35
Şekil 4.5 Yüzey örme işlemi sonrası geometri yüzey formu.....	36
Şekil 4.6 Test geometrisi klape konumları ve incelenen kısımlar .....	37
Şekil 4.7 Ölçüm için gerekli parçalar a) Önden görünüm b) Yandan görünüm....	37
Şekil 4.8 Analiz modeli sınır şartları .....	38
Şekil 4.9 Birinci aşama ağ bağımsızlığı çalışması .....	40
Şekil 4.10 İkinci aşama ağ bağımsızlığı çalışması .....	41
Şekil 4.11 Hız karşılaştırması için oluşturulan çizgi .....	41
Şekil 4.12 Hız profili kıyası.....	42
Şekil 4.13 B1, B2, B5 ağ yapılarının hız profili kıyası .....	42

<b>Şekil 4.14</b> B3, B4, B5 ağ yapılarının hız profili kıyası .....	43
<b>Şekil 4.15</b> Optimum ağ yapısı .....	43
<b>Şekil 4.16</b> Optimum ağ yapısı kesit görüntüsü.....	44
<b>Şekil 4.17</b> Optimum ağ yapısı sınır tabaka görüntüsü.....	44
<b>Şekil 4.18</b> MRF ve RBM metotlarının karşılaştırılması.....	46
<b>Şekil 4.19</b> Orta kesitteki hız konturu kıyası a) MRF b) RBM.....	47
<b>Şekil 4.20</b> LL menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası .....	49
<b>Şekil 4.21</b> RR menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası.....	50
<b>Şekil 4.22</b> LM menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası .....	50
<b>Şekil 4.23</b> RM menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası.....	51
<b>Şekil 4.24</b> Orta kademe fan hızı orta kesitte hız ve basınç konturları a) Hız konturu b) Basınç konturu .....	52
<b>Şekil 4.25</b> Orta kademe fan hızı menfezlerdeki hız vektörleri .....	53
<b>Şekil 4.26</b> Orta kademe fan hızı akım çizgileri konturu a) Önden görünüm b) Yandan görünüm.....	53
<b>Şekil 4.27</b> Orta kademe fan hızı duvarlar ve fan üzerinde $y^+$ konturları .....	54
<b>Şekil 4.28</b> Fan modülü içerisindeki üçgensel yapılar a) Test geometrisi yandan görünüm b) Test geometrisi önden görünüm c) HAD modeli önden görünüm .....	56
<b>Şekil 4.29</b> HAD modeli üçgensel yapılar ve akış yönü.....	56
<b>Şekil 4.30</b> HAD modeli orta menfez bölümüne eklenen engel geometrileri a) 4 mm çap b) 8 mm çap c) 12 mm çap .....	57
<b>Şekil 4.31</b> HAD modeli orta menfez bölümüne eklenen 9 mm çap engel geometrisi .....	58
<b>Şekil 4.32</b> Orta kademe fan hızında eski geometri ve 9 mm çaplı revize engel geometrisi debi karşılaştırması .....	59
<b>Şekil 4.33</b> Eski geometri orta kademe fan hızı menfezlerdeki hız vektörleri.....	60
<b>Şekil 4.34</b> 9 mm çaplı revize geometri orta kademe fan hızı menfezlerdeki hız vektörleri .....	60
<b>Şekil 4.35</b> Orta kademe fan hızı eski geometri ve optimum 9 mm çaplı revize geometri menfezlerdeki hız konturu karşılaştırması.....	61

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 3.1</b> Fan devri ölçüm sonuçları.....	23
<b>Tablo 3.2</b> Fan girişinden pervaneli anemometre ile toplam debi ve hız ölçümü sonuçları .....	24
<b>Tablo 3.3</b> Sıcak tel anemometresi ile yüksek fan devrinde fan girişinden alınan hız ölçüm sonuçları .....	24
<b>Tablo 3.4</b> Pervaneli anemometre ile menfezlerdeki hız-debi ölçüm sonuçları .....	26
<b>Tablo 3.5</b> Sıcak tel anemometresi ile menfezlerdeki hız ölçümleri .....	27
<b>Tablo 4.1</b> Birinci aşama ağ bağımsızlığı sonuçları .....	39
<b>Tablo 4.2</b> İkinci aşama ağ bağımsızlığı sonuçları .....	40
<b>Tablo 4.3</b> Türbülans modeli karşılaştırması .....	45
<b>Tablo 4.4</b> Sayısal çözüm metodolojisi .....	45
<b>Tablo 4.5</b> Yüksek kademe fan hızı test ve HAD sonuçları .....	48
<b>Tablo 4.6</b> Orta kademe fan hızı test ve HAD sonuçları .....	48
<b>Tablo 4.7</b> Düşük kademe fan hızı test ve HAD sonuçları .....	48
<b>Tablo 4.8</b> Orta kademe fan hızı test ve HAD debi dağılım oranları .....	55
<b>Tablo 4.9</b> Orta kademe fan hızı HAD mevcut dağılım ve hedeflenen dağılım.....	55
<b>Tablo 4.10</b> Engel geometrilerinin çaplara göre debi dağılım oranları .....	58
<b>Tablo 4.11</b> 9 mm engel geometrisi debi dağılım sonuçları .....	58
<b>Tablo 4.12</b> Düşük ve yüksek kademe fan hızları debi dağılım oranı sonuçları ....	62

## **Binek Bir Aracın Havalandırma Sisteminde Akış Dağılımının Sayısal ve Deneysel Olarak İncelenmesi ve İyileştirilmesi**

Muhammet Yusuf ERDEM

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Hakan DEMİR

Eş Danışman: Doç. Dr. Zafer GEMİCİ

Araç içi güvenli ve rahat bir sürüş deneyimi için sürücü ve yolculara termal konfor açısından uygun bir ortam sağlanması önem arz etmektedir. Bu durum, araç içindeki havalandırmanın etkin bir şekilde kontrol edilmesini gerekli kılar. Bu çalışmada, binek bir aracın havalandırma kanalları fan bölümü de dahil edilerek deneysel olarak incelenmiş, ölçüm yöntemleri tartışılmıştır. Deneysel çalışmadan sonra sayısal doğrulama çalışması gerçekleştirilmiş, debi dağılımı homojen hale getirilerek iyileştirilmiştir.

Deneylerde fan hızı düşük, orta ve yüksek devir olmak üzere üç farklı hız seviyesinde çalıştırılarak ölçümler yapılmıştır. Her bir menfezden ve fan girişinden alınan ölçümler, farklı hız seviyelerindeki performansın ve akış dağılımının değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

Fan hızı ölçümlerinde temassız takometre kullanılırken, debi ve hız ölçümleri için pervaneli anemometre ile sıcak tel anemometresi tercih edilmiştir. Pervaneli anemometre ve sıcak tel anemometresi ile yapılan ölçüm sonuçları karşılaştırılmış,

cihazların sahip olduğu avantajlar ve dezavantajlar değerlendirilerek kullanım alanlarına uygunlukları ele alınmıştır. Sonuç olarak her iki cihazın da akışın dözgün olduğu durumlarda birbirlerine yakın sonuç verdiği, akış düzensizliklerinin fazla olduğu durumlarda ise pervaneli anemometrenin daha sağlıklı sonuçlar verdiği ortaya konmuştur.

Sayısal çalışma kapsamında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak üç farklı fan hızında doğrulama gerçekteşirilmıştir. Fan modellemesi için Multiple Reference Frame (MRF) ve Rigid Body Motion (RBM) yöntemleri kullanılmış, RBM metodu ile test ile daha yakın sonuçlar elde edildiği tespit edilmiştir.

Sayısal doğrulama çalışması sonrasında debi dağılımının iyileştirilmesi için geometrik revizyonlar yapılmış, orta menfezlere giden kısma 9 mm çaplı engel geometrisi ile her üç fan hızında da debi dağılımının homojen olduğu ortaya konmuştur.

Bu tez çalışması kapsamında binek bir aracın havalandırma hattı için uygun ölçüm metodolojisi geliştirilmış, sayısal doğrulama akabinde debi dağılımının iyileştirilmesi sağlanarak akış dağılımı homojenize edilmiştir. Çalışmanın debi ölçümü, sayısal modelleme ve debi dağılımının iyileştirilmesi konusunda yol gösterici olacağı düşünölmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Debi ölçümü , sıcak tel anemometresi, pervaneli anemometre, sayısal doğrulama, debi dağılımı iyileştirilmesi

# **Numerical and Experimental Investigation and Improvement of Flow Distribution in the Ventilation System of a Passenger Car**

Muhammet Yusuf ERDEM

Department of Mechanical Engineering

Master of Science

Supervisor: Prof. Dr. Hakan DEMİR

Co-supervisor: Assoc. Prof. Dr. Zafer GEMİCİ

For a safe and comfortable driving experience, it is important to provide a suitable environment for drivers and passengers in terms of thermal comfort. This requires effective control of the ventilation inside the vehicle. In this study, the ventilation ducts of a passenger vehicle were experimentally examined including the fan section, and the measurement methods were discussed. After the experimental study, a numerical validation study was conducted, and the flow distribution was improved by making it homogeneous.

In the experiments, measurements were made by operating the fan speed at three different speed levels: low, medium and high speed. The measurements taken from each vent and fan inlet allowed the evaluation of the performance and flow distribution at different speed levels.

While a non-contact tachometer was used for fan speed measurements, a vane anemometer and a hot wire anemometer were preferred for flow and speed measurements. The measurement results of the vane anemometer and the hot wire anemometer were compared, the advantages and disadvantages of the devices were evaluated and their suitability for their areas of use was discussed. As a result, it was revealed that both devices gave similar results when the flow was smooth, and when the flow irregularities were high, the vane anemometer gave more accurate results.

Within the scope of the numerical study, validation was performed at three different fan speeds using the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. Multiple Reference Frame (MRF) and Rigid Body Motion (RBM) methods were used for fan modeling, and it was determined that closer results were obtained with the RBM method with the test.

After the numerical validation study, geometric revisions were made for flow optimization, and it was revealed that the flow distribution was homogeneous at all three fan speeds with a 9 mm diameter obstacle geometry in the section going to the middle vents.

Within the scope of this thesis, a suitable measurement methodology was developed for the ventilation line of a passenger vehicle, and after numerical validation, the flow distribution was homogenized by providing flow optimization. It is thought that the study will guide flow measurement, numerical modeling and improvement of flow distribution.

**Keywords:** Flow measurement, hot-wire anemometer, vane anemometer, numerical validation, flow distribution improvement.

## 1.1 Hava Kanallarında Akış

İklimlendirme ve endüstriyel havalandırma sistemlerinde, havanın taşınması için hava kanalları kullanılır. Bu sistemlerdeki ana ekipmanların güçlerini belirlemek için hava kanallarının hem fiziksel yapısının hem de temel özelliklerinin anlaşılması kritik öneme sahiptir. Havalandırma kanallarında basınç kayıpları çeşitli faktörlerden kaynaklanır. Bunlar arasında kanal iç yüzeylerindeki sürtünme, bağlantı elemanlarındaki düzensizlikler, hava akışının yön değiştirmesi ve kanal çapındaki daralmalar bulunur. Kanallardaki toplam basınç kaybını hesaplamak için, kullanılan malzeme türü, kanaldaki hava hızı ve kanalın uzunluğu gibi bilgilere ihtiyaç duyulur. Kanallar boyutlandırılırken dikkat edilmesi gereken başlıca unsurlar şunlardır: kanallardaki hava hızları, kanal kenar oranları, havalandırma sistemindeki basınç. [1]

Hava kanalları, yapısal olarak genellikle dikdörtgen, silindirik ve oval olmak üzere farklı biçimlerde tasarlanır. Her bir geometrik formun kendine özgü avantajları ve dezavantajları bulunur. Örneğin, silindirik hava kanalları, basınç kayıpları ve gürültü seviyeleri açısından dikdörtgen ve oval kesitli kanallara göre daha elverişlidir. Dikdörtgen kesitli kanallar ise çoğunlukla HVAC sistemlerinde kullanılır. Bunun sebebi, duvarlara ve diğer yapılara monte edilmesinin kolay olmasıdır. Oval kesitli kanallara gelince, bunlar hem dikdörtgen kanallara göre daha düşük basınç kaybına neden olur hem de montaj kolaylığı açısından silindirik kanallardan daha avantajlıdır. Özellikle otomotiv ve hava araçlarındaki havalandırma sistemlerinde genellikle silindirik ve oval kesitli tasarımlar tercih

edilir. Bu özellikler göz önünde bulundurularak hava kanalları tasarlanır ve böylece istenen hava akışı ile dağıtımı sağlanmış olur. [1]

## **1.2 Binek Araçlardaki Konfor Parametreleri**

Araç içerisinde güvenli ve rahat bir sürüş için şoför ve yolculara termal açıdan konforlu bir ortam sağlanması gerekmektedir. ASHRAE 55. Standart'ın tabiriyle termal konfor, "termal ortamdan memnuniyeti ifade eden ruh hali" dir. [2] Diğer bir tarife göre ise termal konfor; "hava sıcaklığı, nem, hava hızı, ortalama radyant sıcaklık, bireylerin fiziksel aktivite durumu ve giysilerin yalıtımı" ile yakından ilişkilidir. [3]

Literatürde önerilen termal konfor parametreleri şu şekildedir: hava sıcaklığı 18-22 °C, bağıl nem % 40-60, hava hızı 18 °C'de 0.1 m/s, 24 °C'de 0.4 m/s, kişi başına hava değişimi 25-50 m<sup>3</sup>/h temiz hava, maksimum kirlenici yoğunluğu %0.17 CO<sub>2</sub>, %0.01 CO ve 1 mg/m<sup>3</sup> toz. [4]

Bu parametrelerin uygun olduğu mertebelerin sağlanamaması durumunda insanlarda baş ağrısı, uykusuzluk, halsizlik, bunalma hissi vb. rahatsızlıkların meydana gelmesi söz konusudur. Dolayısıyla bu konuda uygun şartların sağlanması gerekmektedir. Bu çalışmada en önemli konfor parametrelerinden biri olan hava hızı dikkate alınacaktır. Binek bir otomobilin ön havalandırma kanallarındaki hava dağıtımı ve menfezlerden elde edilen hava debileri ele alınacaktır. Diğer parametreler de hava hızı ile ilişkili olduğu için hava dağılımının homojen oluşu termal konfora büyük ölçüde fayda sağlayacaktır.

## **1.3 Problemin Tanımı ve Amaç**

Klima santralleri ve hava dağıtım kanallarında hız, debi, basınç ölçümleri ve akış dağılımının belirlenmesi doğru tasarım yapılması için oldukça önemlidir. Kollara ayrılan bir otomobil ön havalandırma kanalında her bir menfezden istenilen miktarda debi elde etmek hedeflen bir konudur. Yapılan ölçümlerin uygun bir şekilde icra edilmesi, çıkışlardan istenilen debinin elde edilmesi, sistemin beklenen performansı sağlaması ve uzun ömürlü olması açısından kritiklik arz etmektedir.

Hava hızı ölçümlerinin uygun ortamda ve uygun cihazlar ile yapılması elde edilecek sonucun doğruluğu açısından dikkat edilmesi gereken önemli bir husustur.

Hava hızı ve debi ölçümlerinde çeşitli enstrümanlar kullanılmaktadır. Bunlar, pitot tüpü, sıcak tel anemometreleri, orifis plakaları, nozüller, venturiler, balometreler, pervaneli probalar, ultrasonik cihazlar vb. şeklindedir. Bu cihazların her birinin çalışma koşulları ve kullanım yerleri farklılık göstermektedir. Bu koşulların sağlanamaması durumunda yanlış sonuçlar vermesi muhtemel bir durumdur.

Bu çalışmada binek bir aracın havalandırma hattında ölçüm enstrümanları kullanarak menfezlerden ve fan girişinden çeşitli ölçümler yapıp deneysel ve sayısal olarak incelemeler gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmada ölçüm cihazı olarak pratik ve hızlı şekilde ölçüm yapılabilen sıcak tel anemometresi ve hassas pervaneli prob kullanılmıştır. Hava hızı ve debisi için kullanılan bu cihazların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları değerlendirilip sayısal doğrulama çalışması yapılmıştır. Sayısal doğrulamanın akabinde debi dağılımı homojen hale getirilerek iyileştirilmiştir.

## 2 LİTERATÜR TARAMASI

---

### 2.1 Akış Dağılımı ve Kabin Konforu

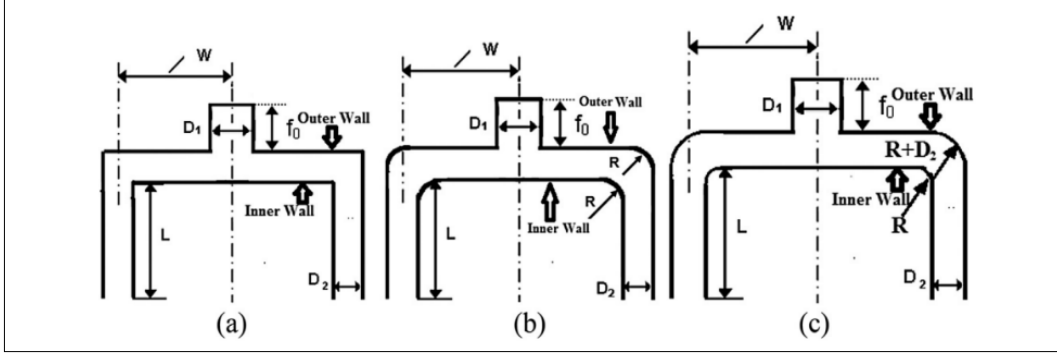
Akış ayrılması, debi dağılımı ve kabin konforu konusunda literatürde yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde genelde geometrik parametrelerin akış dağılımına etkisinin incelendiği görülmüştür. Akış dağılımı çalışmalarında temel yaklaşım daha homojen bir akış elde etmek olup analitik modelleme, numerik modelleme ve deneysel yöntemlerle bu incelemeler gerçekleştirilmektedir.

Andras T. ve Gergely K. [5] tarafından yapılan çalışmada manifold tasarımı için jenerik bir ayrık model geliştirilmiştir. Bahsedilen ayrık modelde formüller iteratif Newton-Raphson sayısal çözümleme yöntemiyle hesaplanmaktadır. Bu modelde sabit basınç geri kazanımı katsayısı, dönüş katsayısı ve sürtünme katsayılarını uygulamak yerine değişken akış katsayısı kullanılmıştır. Bahsedilen değişken akış katsayıları deneysel hesaplamalarla karşılaştırılmış, uygulanabilirliği ve hassasiyeti değerlendirilmiştir.

Ayrık model için sistemin parametreleri manifold girişindeki Re sayısı ( $Re_0$ ), çap oranı ( $D_2/D_1$ ), port uzunluğunun port çapına oranı ( $L_2/D_2$ ), iki port arasındaki mesafenin kolektör çapına oranı ( $L_1/D_1$ ) ve toplam port sayısı ( $n$ ) şeklindedir. Manifold girişindeki Re sayısı ise değiştirilen kontrol parametresidir. Hesaplamalar 13200, 26000, 39200 Re sayılarında gerçekleştirilmiştir.

Ayrık modelin yanı sıra HAD çalışması da ele alınmıştır. Ağ bağımsızlığı çalışması ile uygun ağ yapısı seçilmiş  $k-\omega$  SST türbülans modeli kullanılarak sayısal çözümlene yapılmıştır. Deneysel çalışma ayrık modelde olduğu gibi üç farklı Re sayısında gerçekleştirilmiştir. Test her bir manifold çıkışından tek bir nokta yerine 21 noktadan hız ölçülmesi ile gerçekleştirilmiştir. Böylelikle yeterince hassas bir şekilde hız verisinden debi verisine geçiş mümkün olmaktadır. Toplam debiyi kontrol etmek için orifis plakası kullanılmıştır. Elde edilen deney sonuçları ve HAD sonuçları jenerik ayrık model sonuçları ile kıyaslanmış ve belirsizlik analizi de dikkate alınarak sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Hong ve arkadaşları [6] simetrik olarak çatallanmış bir yapıda akış dağılımının homojen olmasına etki eden dört farklı parametreyi incelemiştir. Bu parametreler, giriş kanalının merkez uzaklığının akışın aşağı akımındaki kanalın merkez uzaklığına olan yanal mesafe ( $W/D_2$ ), akışın dağılımının gerçekleştiği dönüş kısmının pah yapısı, giriş kısmındaki hız profili ve akış kanalının yüksekliği şeklindedir. Bu parametreler Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Akış dağılımının homojen olup olmadığının tespiti için her bir parametrede akışın dağıldığı aşağı akımdaki hız profilinin simetrik olup olmadığı incelenmiştir. İlk parametre olan  $W/D_2$  parametresinin 4,56'dan fazla olduğu durumlarda akış profilinin oldukça simetrik olduğu tespit edilmiştir. Akışın dağıldığı bölümün pah yapısı olarak üç farklı yapı incelenmiştir. Bunlar, eksantrik pah, eş merkezli pah ve keskin pah.  $W/D_2$  parametresi 4,56 olarak seçilerek gerçekleştirilen analizlerde eksantrik ve eş merkezli pah yapısına sahip geometride akışın aşağı akımında daha simetrik bir profil olduğu tespit edilmiştir. İncelenen bir diğer parametre olan girişteki hız profili iki farklı şekilde ele alınmıştır. Bunlar homojen ve parabolik hız profilleri. Sonuç olarak bu iki hız profilinin akışın düzgünlüğü konusunda ciddi bir etkiye sahip olmadığı bulunmuştur. Araştırmaya konu olan diğer parametre kanal yüksekliğidir. Aynı giriş hızında dar ve geniş kanal yüksekliğine sahip geometride kanal yüksekliği geniş olan durumda akışın daha az düzgün olduğu tespit edilmiştir.

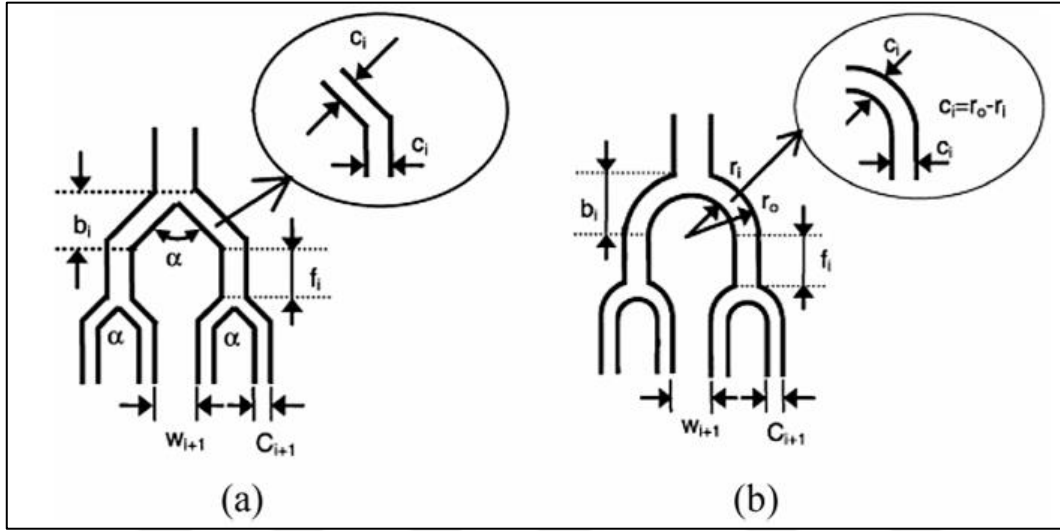


**Şekil 2.1** Kanal çatallanmasını ifade eden kavramlar a) Keskin pah b) Eksantrik pah c) Eş merkezli pah

Nümerik modelleme metodolojisi de üç kısma ayrılmaktadır. Geometri hazırlığı için Solidworks, ağ yapısı için Gambit ve çözücü olarak Fluent paket programı kullanılmıştır. Çalışmada deneysel veri olarak yazarın bir başka çalışması [7] referans alınmıştır. Yapılan incelemede 16 kanallı akışın dağılımında HAD sonuçları ile deneysel sonuçlar arasında hata oranının %8 den az olduğu ifade edilmektedir.

Hong Liu ve arkadaşları [7] akış dağılımına etki eden geometrik faktörleri iki farklı konseptte test etmişlerdir. Bunlar ağaç şeklinde dallara ayrılan ve silindirik olarak dallara ayrılan akış dağılımı geometrileridir. Bu iki gruba ait üç farklı geometri parametresi ele alınmış olup toplamda altı farklı geometride testler yapılmıştır. Bu geometrilerin her biri dört defa ikiye ayrılarak toplamda on altı çıkışa sahip olacak şekilde üretilmiştir. Her bir model ilk üç kademedeki  $f/c$  oranına göre isimlendirilmiştir. Şekil 2.2’de  $f/c$  parametresinin ne anlama geleceği şematik olarak verilmiştir. Model isimleri: Tee-432, Tee-321, Tee-221, Circular-321, Circular-221, Circular-000 şeklindedir. Deneysel çalışma  $1,13 \text{ m}^3/\text{h}$  debiden başlayıp modelden modele değişmekle beraber 9 farklı debide test edilmiştir. Akış dağılımının homojen olup olmadığı değerlendirmesi için ise  $\beta$  ve  $\xi$  parametreleri tanımlanmıştır.  $\beta$ , kanallardaki ortalama hızların standart sapmasının bütün çıkışlardaki hızların ortalamasına oranı iken  $\xi$ , kanallardaki ortalama hızların birbirlerine göre maksimum farkları olarak tanımlanmıştır. Bu iki parametrenin en az olduğu modeller akış dağılımı homojenliği açısından daha üstün olduğu ifade edilmiştir. Çıkışlardaki hızlar pitot tüpü yardımıyla ölçülmüş olup, ölçülen kesitte

pitot tüpündeki hareketin daha hassas olması açısından pitot tüpü, x-y-z koordinatlarında 0.1 mm hassasiyetle hareket eden step motor yardımıyla yer değiştirmiştir. Modellerin genel performansı değerlendirilirken basınç kayıpları da incelenmiştir. Yapılan deney sonuçlarına binaen f/c parametresinin akış dağılımında önemli bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Sonuç olarak Circular-321 modelinin diğer modellere kıyasla akış dağılımı ve basınç düşümü açısından daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 2.2 Dağılım seçenekleri a) Ağaç dallanması b) Yuvarlak dallanma

Şekil 2.2’de verilen diğer parametreler ise yazarın başka bir çalışmasında [6] sayısal olarak incelenmiştir.

Ran gao ve arkadaşları [8] havalandırma hatlarında bulunan dirseklerin halihazırda ciddi miktarda kayıplara yol açtığını ifade etmektedirler. Dolayısıyla mevcut geleneksel dirsek yapılarına alternatif olacak direnç katsayısı daha düşük olan jenerik bir dirsek yapısı üzerine araştırma yapmışlardır. Çalışma hem deneysel hem de sayısal modellemeyi içermektedir. Sayısal modellemede RANS modelleri arasında LES ve DES modellerine en yakın olan Türbülans modeli olan Reynolds Stress Modeli kullanılmıştır. Çalışmada dört farklı geleneksel dirsek ve jenerik dirsek modeli kıyaslanmıştır. Jenerik modelin optimizasyonu Arc A, Arc B, Arc C ve Arc D olarak ifade edilen dirseğin çevresinde bulunan kenarların açılarının değiştirilmesi ile yapılmıştır. Yapılan sayısal çalışmaların doğruluğunu ispatlamak için  $T_0$  ve  $T_N$  dirsek modelleri birebir üretilip testleri yapılmış ve HAD ile

kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlar birbirleriyle uyumlu olduğu için sayısal modelleme prensibinin güvenilir olduğu ortaya konmuştur. Kıyaslama parametresi olarak değişen en-boy oranlarında dirsekler değerlendirilmiş ve enerji yayılım yoğunluğu miktarları karşılaştırılmıştır. Nihai olarak görülmüştür ki optimize edilen jenerik dirsek modeli diğer geleneksel dirsek modellerine kıyasla %42 veya daha fazla oranda direnç katsayında azalma sağlamıştır. Böylelikle havalandırma kanallarında daha az enerji ile hava dağıtımı mümkün olmaktadır.

Gustavo I Bicalho ve arkadaşları [9] bir otomobildeki havalandırma kanalını 2 farklı fan ve 2 farklı kanal yapısı ile test etmiş menfezlerdeki debi ve basınç kayıplarını incelemiştir. Test planında dört farklı model mevcuttur. Bunlar mevcut fanların ve kanal yapılarının kombinasyonu şeklindedir. Birinci fan 95 mm iç çapa sahip olup 35 adet eşit mesafelerde kanat yapısına sahiptir. İkinci fan 113 mm iç çapa sahip olup 47 adet eşit mesafede kanat yapısına sahiptir. Kanal yapıları incelendiğinde birinci havalandırma kanalı daha keskin köşelere sahipken ikinci kanal yapısı nispeten daha yumuşak dönüşlerden oluşmaktadır. Testler dört farklı fan hızında gerçekleştirilmiştir. Havalandırma hattında dört farklı menfez mevcuttur. Bunlar, sol yan menfez, sol merkez menfez, sağ merkez menfez ve sağ yan menfez. Şekil 2.3'te test altyapısı ve ölçüm noktaları gösterilmiştir.



**Şekil 2.3** Test altyapısı

Yapılan testlerde bu dört menfezdeki debi miktarları ve mevcut çıkışın toplam debiye oranları incelenmiştir. Basınç kayıpları ve fanın harcadığı güç miktarları da

ayrıca değerlendirilmiştir. Yapılan testler ve değerlendirmeler neticesinde ikinci kanal yapısının birinci kanal yapısına kıyasla bütün fan hızlarında daha fazla debi çektiği ifade edilmiştir. Bununla birlikte, her bir menfezdeki debi miktarları incelendiğinde ikinci fan ve ikinci kanal yapısı konfigürasyonu daha homojen bir dağılım sağlamıştır. Yapılan bu modifikasyon ile %23,5 daha fazla debi elde edilmiş, hava kutusu kısmında ise %41,2 daha az basınç kaybı sağlanmıştır. Söz konusu modifikasyon ile güç tüketimi hafif bir miktar artmış olsa bile termal konfor açısından elde edilen avantaj göz önüne alındığında güç tüketimindeki artış önemsizdir.

Hongge Tao ve arkadaşları [10] Çin'de ticari olarak kullanılan bir metro aracının havalandırma hattının deneysel hız-debi ölçümlerini yapıp sayısal olarak incelemelerde bulunmuştur. Her bir vagonun çatı kısmında iki adet havalandırma ünitesi bulunmaktadır. Her bir vagon için sağlanan toplam hava debisi  $9600 \text{ m}^3/\text{h}$ 'tir. Her bir vagonda dört adet bağımsız hava kanalı bulunmaktadır. Deney için incelenen havalandırma hattından geçen toplam debi ise  $1200 \text{ m}^3/\text{h}$  olup bağımsız bir hava kanalı deneye tabi tutulmuştur. Ana havalandırma kanalında 9 adet, düz kanalda 11 adet çıkış bulunmaktadır. Her bir çıkıştan sıcak tel anemometresi ile hava hızı ölçümü yapılmış ve ayrıca düz kanal bölümünde 1-6, 7-9, 1-9, 1-6, 7-11, 1-11 çıkışlarından toplam hava debisi ölçülmüştür. Sayısal modelleme k-ε standart duvar fonksiyonları kullanarak yapılmıştır. Elde edilen test sonuçları ve yapılan sayısal modelleme sonuçları değerlendirildiğinde sayısal modelin geçerli ve uygun olduğu ifade edilmiştir.

L. Tan ve Y. Yuan [11] elektrikli bir aracın HVAC hattını ve araç kabin içerisini sayısal olarak modellemişlerdir. Fan bölgesi için MRF eşanjör bölgesi için poroz modeli kullanılmıştır. Modelde buğu çözme ve yüze üfleme hattındaki kanallar da bulunmaktadır. Böylelikle menfezlerdeki akış dağılımının homojen olup olmadığı değerlendirilmiştir. Buğu hattındaki menfezlerden çıkan havanın Ulusal Çin standartlarına uygun şekilde ön camdaki buğuyu çözüp çözmediği de temel olarak incelenmiştir. Hem buğu çözme hattında hem de üfleme hattında akış dağılımı ve buğu çözme performansına ilişkin tespit edilen uygunsuzluklar üç adet yapısal modifikasyon ile giderilmiştir. Böylelikle hem buğu çözme hattındaki

menfezlerden istenilen buğu çözme performansına uygun olacak şekilde hız ve debi elde edilmiş hem de üfleme hattındaki menfezlerdeki akış homojenliği arttırılmış böylelikle araç içerisindeki termal konfor iyileştirilmiştir.

Jiahao He [12], bir otomobilin havalandırma hattında menfez çıkışlarındaki debi dağılımının homojen olmadığını HAD yardımıyla tespit etmiştir. Buna göre sol menfezde 1.89 m/s , orta sol menfezde 2.54 m/s, orta sağ menfezde 0.84 m/s ve sağ menfezde 1.83 m/s hava hızı mevcuttur. Dolayısıyla orta sol ve orta sağ menfezler arasında ciddi bir düzensizlik söz konusudur. Yapılan inceleme ile sol menfez hattının borulaması bir miktar değiştirildiğinde akış dağılımının daha homojen olduğu tespit edilmiştir. Böylelikle sol menfezde 2.56 m/s, orta sol menfezde 3.32 m/s, orta sağ menfezde 3.83 m/s ve sağ menfezde 2.81 m/s hava hızı elde edilmiştir. Yapılan iyileştirme ile sol ve sağ menfezler arasındaki akış dengesizliği oldukça azaltılmıştır. Ayrıca eski modelin yan bağlantısında, akışta gereksiz türbülans oluşturacak eğimli bir geçiş bölgesi bulunmaktadır. Yeni modelde bu geçiş iptal edilerek bu etki minimize edilmiştir. Böylelikle akış dağılımı homojenize edilmiştir.

N. Olleh ve arkadaşları [13] binek aracın havalandırma kanalını sayısal olarak modellemiştir. Sayısal modelleme de farklı türbülans modelleri ve farklı ağ yapıları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar üretici firma test verileri ile kıyaslanmış ve oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Sayısal doğrulama sonrasında menfez çıkışları ve dirsek açılarının değiştirilmesine dayanan beş farklı model oluşturulup hız dağılımı incelenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde her bir menfez çıkışının yuvarlak kesite dönüştürüldüğü dördüncü modelin referans modele göre daha iyi bir hız dağılımı sağladığı ifade edilmiştir. Buna göre bütün menfez çıkışlarında hava hızı %6-8 arasında arttırılmıştır. Ayrıca dirsek açılarında yapılan modifikasyonun kayda değer bir değişime neden olmadığı ortaya konmuştur.

A. Patidar ve arkadaşları [14] bir otomobilin HVAC sisteminde yüz, ayak ve buğu çözme modlarındaki akış dağılımı, basınç düşümü ve hava deşarj oranı sayısal olarak incelemiş ve akış dağılımı deney sonuçları ile kıyaslamışlardır. Ayrıca araç ön camındaki buğu çözme performansı da incelenmiştir. Sayısal modelleme de fan

bölgesi MRF yöntemi ile eşanjörler poroz modeli ile modellenmiştir. Her bir mod incelenirken diğer bölgelere giden hava akışı kesilmiş ve ilgili bölgedeki hava akışı incelenmiştir. Örneğin yüz modu incelenirken ayak ve buğu bölgesine giden hava akışı kesilmektedir. Menfez çıkışlarındaki akış dağılımı ve homojenliği üniformluk indeksi olarak tanımlanan boyutsuz katsayı ile takip edilmiştir. Üç mod için yapılan akış dağılımı ve homojenliği kıyaslamalarında deney sonuçları ile sayısal sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür.

C. Lin ve arkadaşları [15] bir otomobilin havalandırma hattının yarısını simetri koşulu ile deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Havalandırma hattının yüzeylerine yerleştirilen basınç muslukları ile yüzeylerdeki basınç verileri bilgisayara aktarılmıştır. Böylece lokasyona bağlı basınç verileri elde edilmiştir. Ayrıca iki adet çıkıştan hız ve debi ölçümü yapılmıştır. Sayısal analizlerle elde edilen basınç ve akış dağılımı verileri deneysel verilerle kıyaslandığında %3'ten daha az hata oranı ile uygun sonuçlar elde edildiği ifade edilmiştir. Böylelikle çalışmada kullanılan sayısal modelin hava kanallarının tasarımında yardımcı olabileceği öne sürülmüştür.

## 2.2 Ölçüm Teknikleri

Hava kanallarının menfez çıkışlarında hız ve debiyi ölçmek için çeşitli standartlar mevcuttur. Bu standartlardan bazıları ISO 3966 [16], ISO 7145 [17] EN 12599 [18] 'dir. Bu standartlar ölçüm yapılırken kesit üzerinde birden fazla noktadan veri alınmasıyla ortaya çıkacak olası hataları minimize etmeyi amaçlamaktadır.

I. Caré ve arkadaşları [19] yuvarlak ve dikdörtgen kesitli kanallarda belirlenen parametrelere bağlı ölçüm hatalarını incelemiştir. Ölçüm yapılacak hattın belirlenen çap uzunluğu kadar ötesinde bir dirsek bulunmaktadır. Birinci parametre ölçüm aletinin bu dirseğe olan uzaklığına bağlı oluşan ölçüm hatalarıdır. İkinci parametre ise kesitten yapılan ölçüm sayısıdır. Bu çalışmada deneysel çalışma için Bontjoux ve arkadaşları [20] referans alınmıştır. Bontjoux ve arkadaşları yuvarlak kesitte akışı bozan dirsek, Y bağlantı, açık damper, kapalı damper gibi engellere olan uzaklığa bağlı ölçümler gerçekleştirmiştir. Yapılan deneylerden görülmüştür ki dirsek, aynı düzlemdeki 2 dirsek ve farklı düzlemdeki 2 dirsek ölçümleri

maksimum ölçüm hatalarına sahiptir. Dolayısıyla bu çalışmada maksimum ölçüm hatalarına sahip geometriler referans alınarak öncelikle sayısal doğrulama, akabinde dikdörtgen kesitli kanallar için sayısal çalışmalar yapılmıştır. ISO 3966 tam gelişmiş türbülanslı akışta herhangi bir engelden yuvarlak kesitte 20 çap, dikdörtgen kesitte 30 çap mesafede ölçüm yapılması gerektiğini belirtmektedir. [16] Bu şartlar sağlandığında pitot tüpü ile %3 belirsizlik oranıyla ölçüm sonuçları elde edilebildiği ifade edilmiştir. [19] İki farklı kesitte ISO 3966, En 12599, Pr EN 16211 ve standart olmayan yöntemlerle ölçüm aletinin dirseğe olan mesafesinin 5, 10 ve 45 L/D olduğu, yatay ve dikey ölçüm sayılarının da standartlara göre belirlendiği şekilde ölçümler gerçekleştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli kanallarda şekil faktörü 1 ve 4 olacak şekilde ölçümler yapılmıştır. Şekil faktörü dikdörtgenin uzun kenarının kısa kenarına oranı şeklindedir. Sonuç olarak standart olmayan yöntemle L/D mesafesinin en büyük olduğu durumda bile uygun hata oranları elde edilememiştir. Yuvarlak kesitte olduğu gibi ölçüm sayısının ve L/D mesafesinin artmasıyla ölçüm hataları azaldığı ifade edilmiştir.

Hava kanallarında hız ölçümünde kullanılan bir diğer alet Pitot tüpüdür. Pitot tüpleri Bernoulli prensibi ile hız ölçümünü mümkün kılmaktadır. Pitot tüpü endüstride yaygın olarak kullanılan bir cihazdır ve ölçüm yaparken dikkat edilmesi gereken birtakım hususlar mevcuttur. Örneğin baca gazları emisyonlarını incelerken gaz hızını, gaz debisini pitot tüpü yardımıyla elde etmek yaygın bir durumdur. Pitot tüpü ile ölçüm yaparken yapılan bazı yanlışlar baca gazı emisyonlarında ciddi hatalara sebep olabilmektedir.

R. A. Robinson ve arkadaşları [21] pitot tüpü ile baca gazı ölçümleri yapılırken teorik olarak yapılan kabulleri incelemiş, gerçek şartlara uygunluğunu tartışmışlardır. Bernoulli prensibinin Pitot tüpüne uygulanması ile ortaya çıkan kabuller tartışılmıştır.

Ölçüm yaparken tavsiye olarak:

- Akış hızı Mach sayısı 0.25 altında olmalıdır.
- Basınç farkı ölçümü yapılan cihazın belirsizlik oranı %1'den az olmalıdır.
- Akışta oluşan blokajı minimize etmek için Pitot tüpü (sap kısmı) geometrisi kanal çapına uygun olmalıdır.

- Baca gazı içerisindeki Pitot tüpü etrafında Reynolds sayısı 1200'den büyük olmalıdır.
- Akış hızı 5 m/s ile 50 m/s aralığında olmalıdır. Bu aralığın dışında kalan bölgede ölçüm yapılacaksa Pitot tüpü kalibre edilmelidir.
- Girdap açısı 15 dereceden az olmalıdır.

Sonuç olarak Pitot tüpü, standartlara uygun ve ölçüm hatalarının minimize olduğu, ölçüm hassasiyetinin de istenilen seviyelerde olduğu durumlarda kullanılması gerektiği ifade edilmiştir. Bernoulli prensibi kullanılarak yapılan kabullerin sonuçlara etkisinin detaylı olarak araştırılması tavsiye edilmiştir.

G. Dinardo ve arkadaşları [22] hava kanallarında dairesel kesit için mevcut formülleri kullanarak dikdörtgen kesit için hava hızı hesaplamada deneysel bir formül geliştirmişlerdir. İlgili formül, referans alınan dairesel kesite eş değer çapa sahip dikdörtgen kesit için oluşturulmuştur. Kesitin lokasyonuna bağlı olarak birden fazla noktada ortalama hız hesabı yapılmıştır. Çalışma aynı zamanda deneysel çalışma ile desteklenmiştir. Deneysel inceleme ses altı bir rüzgar tüneline yapılmış olup hız verileri Lazer Doppler hız ölçer ile elde edilmiştir. Lazer hız ölçümü yapılan cihazın markası Dantec Dynamics olup Lazer probu yatay ve dikey ekseninde  $4,5 \pm 0,1$  mm hassasiyetle hareket etmektedir. Ölçüm, kanalın kesit merkezinde kesişen 4 farklı eksen üzerinde toplam yirmi beş noktada yapılmıştır. Bu metodoloji EN 12599 (binalarda havalandırma ve iklimlendirme işlemleri, ölçüm metotları) standartındaki tavsiye ve uyarılar dikkate alınarak geliştirilmiştir. Ölçümler her bir noktada 5 kere tekrarlanmış ve her ölçümün arasında 60 dakika süre bulunmaktadır. Ayrıca bu ölçümler beş farklı günde tekrarlanmıştır. Ölçüm sonuçları ve teorik olarak yapılan hesaplar karşılaştırıldığında en fazla %3 hata oranı ile test verileri doğrulanmıştır. Uygulamada 3%'lük hata oranı kabul edilebilir bir mertebede olduğu için teorik olarak geliştirilen metodolojinin kullanılabilir olduğu ifade edilmektedir.

Ölçüm aletleri ve bu aletlerin teknik verileri çeşitli teknik yazılarla ifade edilmiştir. Testo ltd. şti. firması tarafından hazırlanan teknik yazıda [23] sıcaklık, nem, hava hızı, basınç, baca gazı ve yanma verimliliği, termal görüntüleme ve soğutma

sistemlerine ilişkin sensor teknolojileri ele alınmıştır. Hava kanallarında hız ölçümünde kullanılan üç tip sensör açıklanmıştır. Bunlar, pervane tip sensör, termal sensör ve Pitot tüpüdür. Düşük seviye hızlarda (0-5 m/s) termal prop, orta seviye hızlarda (5-40 m/s) pervane tip sensör ve yüksek seviye hızlarda ise (40-100 m/s) Pitot tüpü kullanımı tavsiye edilmektedir. Prob seçiminde bir diğer kriterin sıcaklık olduğu ifade edilmiştir. Yaklaşık 70 °C ye kadar akışkan için termal problemler, 350 °C'ye kadar özel olarak tasarlanmış pervane problemleri ve 350 °C üzeri sıcaklıklarda ise Pitot tüpü kullanımı uygun görülmüştür. Bu üç probun çalışma mantıkları incelendiğinde termal problemlerde sıcaklığı sabit tutulan bir telin üzerinden geçen akışkanın soğuması ile ölçümlerin yapıldığı, pervane problemlerinde pervanenin dönüşünün elektrik sinyaline dönüştürülmesi ile ölçüm yapıldığı, Pitot tüpünde ise Bernoulli prensibine göre basınç farklarından ölçüm yapıldığı ifade edilmiştir. Hava hızı ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise ölçüm probunun akışkan hattında doğru konumlandırılmasıdır. Ölçüm probunun kanal içerisindeki çeşitli engellerden en az 10 çap ileride ve kendisinden sonraki en yakın engelin ise en az 4 çap ötede olması tavsiye edilmiştir. Örnek bir hava hızı ölçümü Şekil 2.4'te verilmiştir.



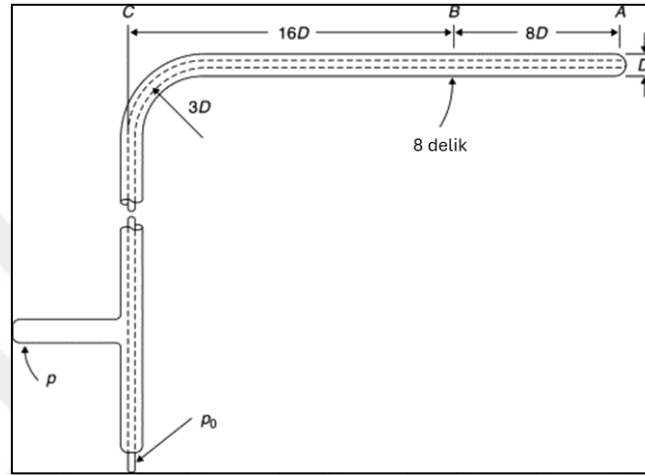
**Şekil 2.4** Ölçüm örneği

Hava hızı ölçümü için ASHARE standartları incelenmiş, hangi metodların kullanılabilir olduğu araştırılmıştır. Buna göre hava hızı ölçümü yapmak için

seçilen düzlemin olası engellerden en az 7.5 çap aşağı akımında ve 3 çap yukarı akımında olmalıdır. [24]

Hava hızı ölçümü için kullanılan metotlar şu şekildedir:

- Pitot-Statik Tüp Hava Hızı Ölçüm Metodu: Pitot tüpünün şematik olarak çizimi Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Pitot tüpü [25]

Pitot tüpü kullanılarak yapılan ölçümlerde ortalama hızı elde etmek için aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

$$P_v = P_t - P_s \quad (2.1)$$

$$P_{va} = \left( \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{P_{vi}}}{N} \right)^2 \quad (2.2)$$

$$V_a = K \sqrt{\frac{2 P_{va}}{\rho x}} \quad (2.3)$$

Ölçüm yapılırken sadece bir noktadan değil Şekil 2.6'da gösterildiği gibi belli noktalardan veri alınıp bu verilerin ortalaması hesaplanmaktadır.



akışı başladığında, akustik sinyal akış yönünde hız kazanırken, akışın tersi yönde ise yavaşlar. Bu hız farkı, hava akış hızıyla doğrudan ilişkili bir zaman farkı oluşturur ve böylece hız ölçümü mümkün hale gelir. [24]

- Sürüklenme Kuvveti Hız Ölçeri: Sürüklenme kuvveti hız ölçerleri, havanın hızını ölçmek için tasarlanmış cihazlardır. Bu cihazlar, dinamik sürüklenme kuvvetindeki değişiklikleri tespit etmek amacıyla genellikle piezoelektrik veya gerinim ölçer yöntemlerini kullanır. Hava hızı, tespit edilen sürüklenme kuvveti değişimleri üzerinden denklem (2.4) ile hesaplanabilir. [24]

$$V = K \sqrt{\frac{2 * F_D}{C_d * A * \rho_x}} \quad (2.4)$$

- Lazer Doppler Hız Ölçer: Lazer Doppler Hız Ölçer (LDV), optik tabanlı bir ölçüm sistemidir. Bu sistem, aynı frekanstaki iki kesişen lazer ışınının içinden geçen hava akımındaki parçacıklardan saçılan ışığı toplar. Bu yolla, parçacıkların hareketinden kaynaklanan Doppler kayması prensibiyle hava akımının hızını hassas bir şekilde belirlenebilir. [24]

Akış dağılımının çok sayıda olduğu havalandırma kanallarında doğru bir şekilde debi, hız ve basınç ölçümü birçok endüstri sahasının ilgi alanına girmektedir. Bu konuda literatür incelendiğinde bazı çalışmalarda akışa uygun olmayan ölçüm aletlerinin kullanıldığı, doğru yerlerden ölçüm alınmadığı görülmüştür. Örneğin türbülanslı akışa sahip bir hava akışında bir boyutlu sıcak tel anemometre ile hava hız ölçümü yapıp ardından debi hesabı yapılması sonuçlarda hatalara neden olmaktadır. Sözü edilen çalışmalarda genellikle debiyi belirleme konusunda sıcak tel anemometreleri tercih edilmiştir. Bazı çalışmalarda ise sistemdeki basınç kaybını oldukça arttıran orifis plakası veya sıcak tel anemometresi gibi yine tek yönde ölçüm yapan pitot tüpü kullanılarak debi hesabı gerçekleştirilmiştir. Her ne kadar ölçüm yapılırken birkaç çap mesafeden ölçüm yapıldığı ifade edilse de türbülantif karakteri yoğun olan akış rejimlerinde akışı tamamen homojen hale getirmek oldukça güçtür. Dolayısıyla türbülanslı akışta bir boyutlu termal anemometre veya pitot tüpü ile yapılan ölçümlerde birtakım ölçüm hatalarının olması muhtemel bir durumdur.

Bu projede öncelikle ölçümlerde kullanılan deney enstrümanlarının çalışması için elverişli koşullar sağlanmıştır. Böylelikle ölçüm aletinden kaynaklanacak ölçüm hatalarının minimize edilmesi hedeflenmiştir. Hava hızı ve debi hesabı için sıcak tel anemometresi ve pervaneli akış ölçerler kullanılmıştır. Bu ölçüm aletlerinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları değerlendirilmiştir. Böylelikle hava kanallarında hız ve debi ölçümü için kullanılacak ölçüm aletlerinin hangi koşullarda ve nasıl kullanılması gerektiği konusunda literatüre faydalı bir çalışma kazandırmak hedeflenmiştir. Bununla beraber, çalışmada binek bir aracın havalandırma kanallarındaki debi dağılımı test ile sayısal olarak doğrulanmış ve homojen hale getirilerek iyileştirilmiştir.

### **2.3 Tezin Kapsamı**

Tezin kapsamı, binek bir aracın havalandırma hattında her bir menfezden hız ve debi ölçümüne dair uygun şartları sağlayacak kullanışlı bir ölçüm metodolojisi ortaya koymak, doğrulanmış bir sayısal model oluşturmak ve bu modelle debi dağılımını iyileştirmektir.

Tez kapsamında deneysel olarak:

- Fan girişinden toplam debinin pervaneli anemometre ve sıcak tel anemometresi ile ölçümü gerçekleştirilmiştir.
- Her bir menfezden pervaneli anemometre ve sıcak tel anemometresi ile hız ölçümü ve debi hesabı yapılmıştır.
- Takometre ile fan devri ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında sayısal olarak:

- Uygun kabullerle havalandırma kanalları geometrik olarak modellenmiştir.
- Elde edilen sayısal sonuçların ağ yapısından bağımsız olduğunu görebilmek için ağ bağımsızlığı çalışması yapılmıştır.
- Sonuçların deneysel verilerle uyumlu olduğu ortaya konmuştur.
- Sayısal doğrulama faaliyeti ile elde edilen metodoloji kullanılarak debi dağılımı homojen hale getirilmiştir.

Böylelikle havalandırma hattında ölçüm teknikleri ve akış dağılımı konusunda deneysel ve sayısal olarak kullanışlı bir yöntem belirlenmiş, sistemin debi dağılımı homojen hale getirilerek iyileştirilmiştir.



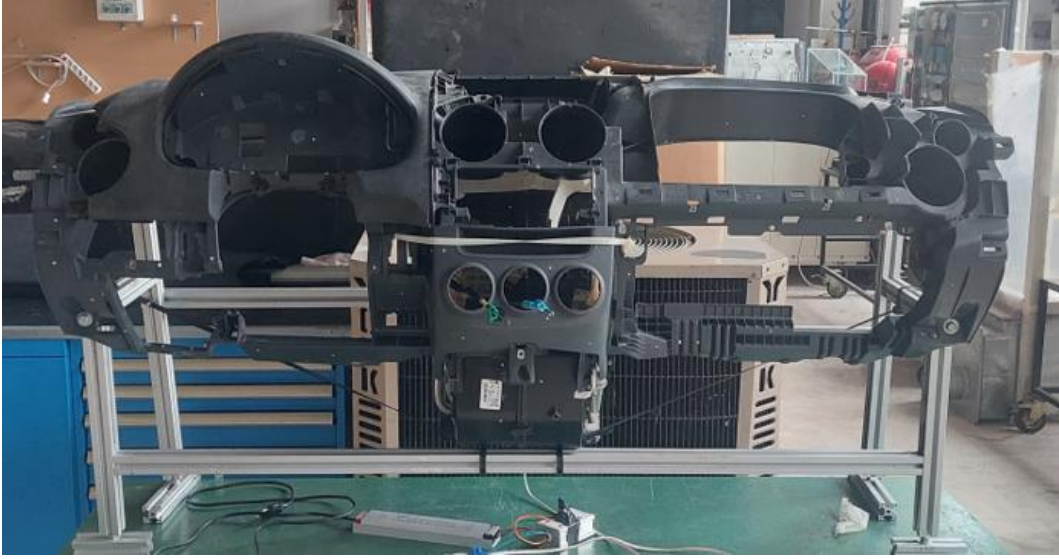
# 3

## DENEYSEL ÇALIŞMA

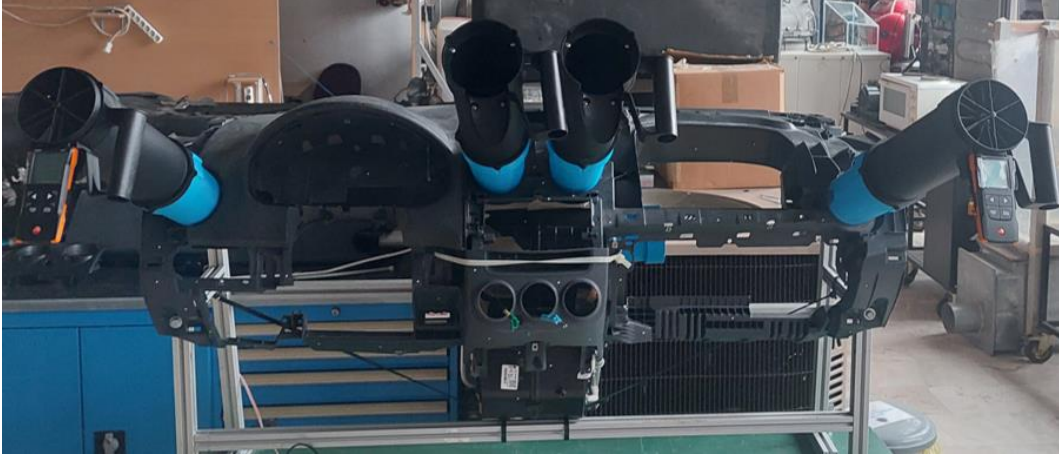
---

### 3.1 Deney Sistemi ve Ölçüm Cihazları

Deneyisel çalışma binek bir aracın ön havalandırma kanallarının ve fan bölümünün araçtan çıkarılarak laboratuvar ortamında çalıştırılması ile gerçekleştirilmiştir. Deney tesisatı Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından fon desteği alınarak kurulmuştur. Deney tesisatının kurgusu Şekil 3.1’de verilmiştir.



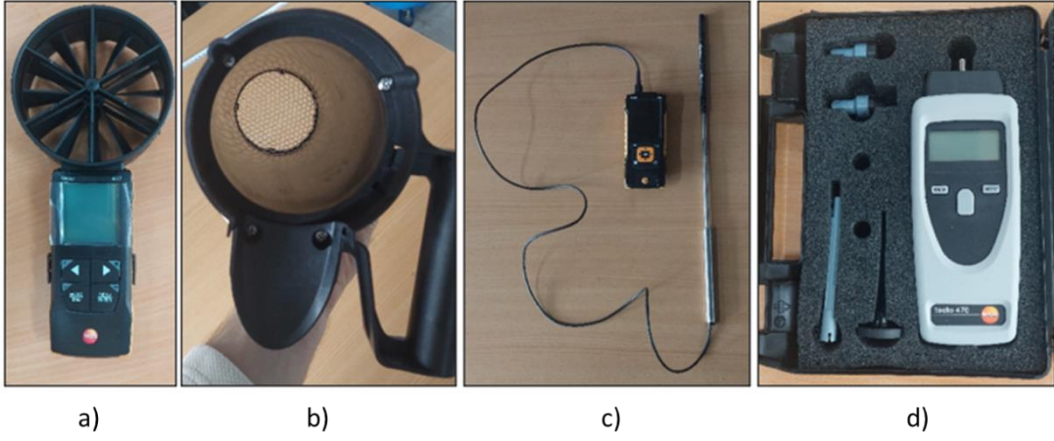
Şekil 3.1 Deney tesisatı (Ölçüm cihazları takılı değilken)



**Şekil 3.2** Deney tesisatı (Ölçüm cihazları takılı iken)

Deney tesisatı ön konsol bölümünden ve fan bölümünden oluşmaktadır. Fan bölümü arkada olup orta kısımdan fan konsolu ve havalandırma hattı birbirlerine bağlanmaktadır. En sol ve en sağda birer tane, orta kısımda da sol ve sağda birer tane olmak üzere dört adet menfez çıkışı mevcuttur. Buğu çözme hatları çalışma kapsamında olmadığı için fan bölümünden bu kısımlara giden çıkışlar kapatılmış, içerisindeki eşanjörler sökülmüş ve buğu çözme çıkışlarından herhangi bir debi geçişine izin verilmemiştir. Dolayısıyla fanın çektiği tüm hava debisi ön kısımda bulunan dört adet çıkıştan çıkmaktadır. Menfezlerin çapı pervaneli anemometrelerin direkt olarak ölçüm yapmasına uygun olmadığı için menfezler ile pervaneli anemometrelerin arasına üç boyutlu yazıdan üretilmiş boru şeklindeki aparatlar takılmıştır. Böylelikle pervaneli anemometreler ile ölçüm işlemleri gerçekleştirilebilmiştir.

Deney tesisatının havalandırma geometrisine herhangi bir ölçüm cihazı ve aparatı takılı değil iken Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Şekil 3.2’de pervaneli anemometre ile ölçüm yapılabilmesi için gerekli olan aparatlar takılı halde bulunmaktadır. Şekil 3.2’de pervaneli anemometre cihazlarının kenarlardaki menfezlerde takılı olduğu görülmektedir. Deneysel ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için kullanılan ölçüm cihazları hava hızı ölçümü için pervaneli anemometre ve sıcak tel anemometresi, fan hızı için ise takometredir. Bu kapsamda çalışmada kullanılan cihazlar Şekil 3.3’de verilmiştir.



**Şekil 3.3** Ölçüm aletleri a) Testo 417 pervaneli anemometre b) Testovent 417 akış düzeltici huni c) Testo 440 sıcak tel anemometresi d) Testo 470 Takometre

### 3.2 Deneysel Sonuçlar ve Değerlendirme

Deneysel çalışma 3 farklı fan hızında gerçekleştirilmiştir. Fan devri düşük hız , orta hız ve yüksek hızda iken ölçüm sonuçları alınmıştır. Fan hızı ölçümleri Testo 470 Takometre ile gerçekleştirilmiş ve ölçümler temassız modda yapılmıştır. Ölçüm cihazının teknik dokümanda verilen ölçüm hassasiyeti  $\pm\%0.2$  mertebesinde dir. Ölçüm cihazı fan pervanelerine en az 30 cm mesafeden gerçekleştirilmiş ve akışı engelleyecek bir durum oluşturmamıştır. Şekil 3.4’de fan devri ölçümünün nasıl gerçekleştirildiği verilmiştir.



**Şekil 3.4** Fan devri ölçümü

Fan devri ölçümleri yapılmadan önce havalandırma kanallarındaki akışkan hareketinin daimi hale gelmesi önem arz etmektedir. Dolayısıyla her fan devri için minimum 180 saniye beklenmiş akışkan hareketinin düzenli hale geldiğinden emin olunmuştur. Ölçümler 10-15 saniye aralıklarla 7 defa tekrarlanmış ve Tablo 3.1’de verilmiştir.

**Tablo 3.1** Fan devri ölçüm sonuçları

Fan Devri (Devir/dakika)			
Ölçüm	Düşük Hız	Orta Hız	Yüksek Hız
1	981	1512	2107
2	980	1496	2127
3	982	1505	2116
4	982	1501	2122
5	981	1497	2113
6	973	1513	2123
7	985	1518	2097
Minimum	973	1496	2097
Maksimum	985	1518	2127
Ortalama	980.6	1506.0	2115.0
Sapma [%]	-1.2	-1.5	-1.4

Fan devri ölçüm sonuçları incelendiğinde düşük, orta ve yüksek hızda elde edilen maksimum sapma miktarları sırasıyla %1.2, %1.5 ve %1.4 seviyesindedir. Ölçüm sonuçlarının birbirleriyle tutarlı olduğu söylenebilir. Fan devri ölçümlerinden sonra fan girişinden hız ve debi ölçümleri yapılmıştır. Düşük, orta ve yüksek fan hızlarında sistemdeki akışın daimi hale geldiğinden emin olmak için en az 180

saniye beklendikten sonra ölçümler alınmıştır. Tablo 3.2’de pervaneli anemometre ile düşük, orta ve yüksek fan hızlarında elde edilen hız ve debi verileri mevcuttur.

**Tablo 3.2** Fan girişinden pervaneli anemometre ile toplam debi ve hız ölçümü sonuçları

<b>Fan Girişi Toplam Debi Ölçümü</b>									
	Düşük Fan Hızı			Orta Fan Hızı			Yüksek Fan Hızı		
Hız [m/s]	5.13	5.22	5.21	8.03	8.04	8.13	11.49	11.45	11.39
Debi [m <sup>3</sup> /h]	146.1	148.6	148.3	228.7	228.9	231.5	327.2	326	324.3
Ort. Hız [m/s]	5.2			8.1			11.4		
Ort. Debi [m <sup>3</sup> /h]	147.7			229.7			325.8		
Debi Sapma [%]	1.69			1.22			0.89		

Pervaneli anemometre ile fan girişinden yapılan sonuçlar incelendiğinde hacimsel debideki sapma miktarının düşük, orta ve yüksek fan devirlerinde sırasıyla %1.69, %1.22 ve %0.89 mertebesinde olduğu görülmektedir. Sıcak tel anemometresi ile sadece yüksek fan hızında ölçüm yapılmıştır. Tablo 3.3’de sıcak tel anemometresi ile fan girişinden alınan hız sonuçları verilmiştir.

**Tablo 3.3** Sıcak tel anemometresi ile yüksek fan devrinde fan girişinden alınan hız ölçüm sonuçları

<b>Sıcak tel Anemometresi Fan Girişi Hız Ölçümleri</b>	
Ölçümler	Hız [m/s]
1	11.02
2	12.15
3	10.85
4	10.78
5	10.23
6	11.2
7	11.35
Minimum	10.23
Maksimum	12.15
Ortalama	11.1
Sapma [%]	17.3

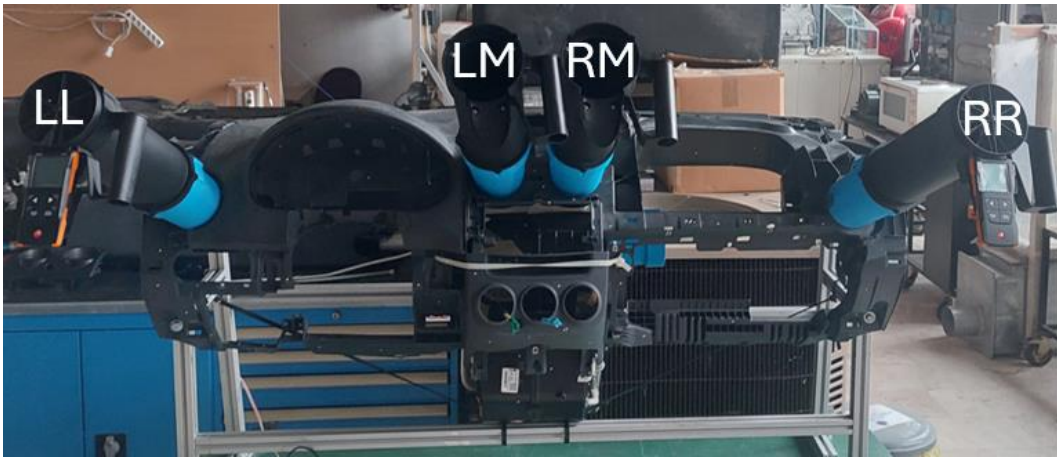
Sıcak tel anemometresi ile fan girişinden alınan hız verileri incelendiğinde ortalama hızların pervaneli anemometre ortalama hızları ile yakın olduğu görülmüştür.

Pervaneli anemometre ile fan girişindeki ortalama hız 11.4 m/s, sıcak tel anemometresinde ise ortalama hız 11.1 m/s olarak elde edilmiştir.

Fan hızı ve fan debisi ölçümlerinde olduğu gibi menfezlerdeki hız ve debi ölçümlerinde de havalandırma hattının daimi hale gelmesi için ölçümlerden önce en az 180 saniye beklenmiş, akışın oturmasından sonra ölçümler alınmıştır. Pervaneli anemometreden iki adet mevcut olduğu için test esnasında anlık olarak dört çıkıştan ölçüm almak mümkün değildir. Dolayısıyla pervaneli anemometreler menfezlere ikili şekilde sırasıyla takılara sonuçların ortalaması alınmıştır. Ölçüm sonuçları incelendiğinde pervanenin dönme ataletinden kaynaklı ekstra yükün %2.6 mertebesinde olduğu hesaplanmıştır. Pervaneli anemometre ile ölçümler yapılırken %2.6'lık sapmayı minimize etmek için aşağıdaki ölçüm sıralama esas alınmıştır.

- 1- LL ve RR menfez ölçümü,
- 2- LM ve RM menfez ölçümü,
- 3- LL ve LM menfez ölçümü,
- 4- RM ve RR menfez ölçümü.

Bu metodoloji ile alınan sonuçların ortalamaları alınıp menfez debi verileri elde edilmiştir. Böylelikle her bir menfezdeki hız ve debi verisi %1'den daha az bir hata ile elde edilmiştir. Şekil 3.5'de menfezlere verilen isimler verilmiştir. Buna göre en soldaki menfez LL, orta sol menfez LM, orta sağ menfez RM ve en sağdaki menfez de RR olarak isimlendirilmiştir.



Şekil 3.5 Menfez isimlerinin gösterimi

Tablo 3.4’de düşük, orta ve yüksek fan hızlarında pervaneli anemometre ile menfezlerden yapılan hız ve debi ölçüm sonuçları verilmiştir.

**Tablo 3.4** Pervaneli anemometre ile menfezlerdeki hız-debi ölçüm sonuçları

<b>Fan Hızı</b>	<b>Düşük Fan Hızı</b>			
Çıkışlar	LL	LM	RM	RR
Ort. Hız [m/s]	0.9	1.7	1.6	1.1
Ort. Debi [m <sup>3</sup> /h]	26.9	47.4	45.1	31.1
<b>Fan Hızı</b>	<b>Orta Fan Hızı</b>			
Çıkışlar	LL	LM	RM	RR
Ort. Hız [m/s]	1.5	2.5	2.4	1.7
Ort. Debi [m <sup>3</sup> /h]	42.7	71.6	68.6	49.3
<b>Fan Hızı</b>	<b>Yüksek Fan Hızı</b>			
Çıkışlar	LL	LM	RM	RR
Ort. Hız [m/s]	2.0	3.6	3.5	2.4
Ort. Debi [m <sup>3</sup> /h]	57.8	102.5	98.2	67.8

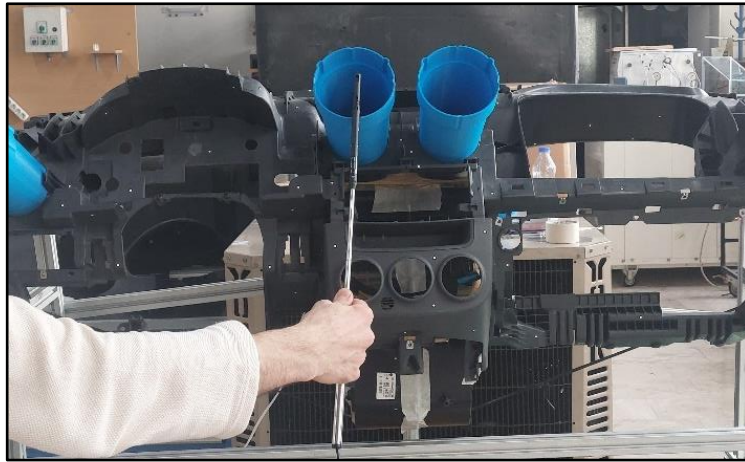
Tablo 3.4’deki sonuçlar incelendiğinde fan hızındaki artış ile menfezlerden elde edilen debilerdeki artışın uyumlu olduğu görülmektedir.

Pervaneli anemometre ile menfez çıkışlarından yapılan ölçümlerin bulunduğu Tablo 3.4’deki ortalama debi değerleri toplanıp fan girişinden pervaneli anemometre ile yapılan hız, debi ölçümlerinin bulunduğu Tablo 3.2’deki toplam debi değerleri kıyaslandığında düşük, orta ve yüksek fan hızlarında sırasıyla %1.88, %1.07 ve %0.14 fark olduğu hesaplanmıştır. Sapma oranları dikkate alındığında sistemdeki hava kaçaklarının iyi derece yalıtıldığı, sistemdeki kütle dengesinin sağlandığı ve ölçüm sonuçlarının tutarlı olduğu ortaya konmuştur.

**Tablo 3.5** Sıcak tel anemometresi ile menfezlerdeki hız ölçümleri

Sıcak Tel Anemometresi ile Hız Ölçümleri								
Fan Hızı	Düşük Fan Hızı				Yüksek Fan Hızı			
Ölçümler/ Çıkışlar	LL	LM	RM	RR	LL	LM	RM	RR
1	0.21	1.25	1.16	0.38	1.1	2.38	2.17	1.09
2	0.23	1.37	1.01	0.48	1.15	2.67	2.94	1.22
3	0.11	0.89	0.94	0.72	0.98	2.93	2.7	1.35
4	0.28	1.33	1.23	0.29	0.89	2.59	2.79	1.11
5	0.24	1.55	1.15	0.6	1.05	2.79	2.77	1.19
6	0.42	1.29	1.25	0.31	1.42	3.22	2.89	1.24
7	0.14	1.36	0.97	0.4	1.03	2.97	2.78	1.79
Minimum Hız [m/s]	0.11	0.89	0.94	0.29	0.89	2.38	2.17	1.09
Maksimum Hız [m/s]	0.42	1.55	1.25	0.72	1.42	3.22	2.94	1.79
Ortalama Hız [m/s]	0.23	1.29	1.10	0.45	1.09	2.79	2.72	1.28
Sapma [%]	80.4	20.0	13.5	58.5	30.4	15.3	8.1	39.4

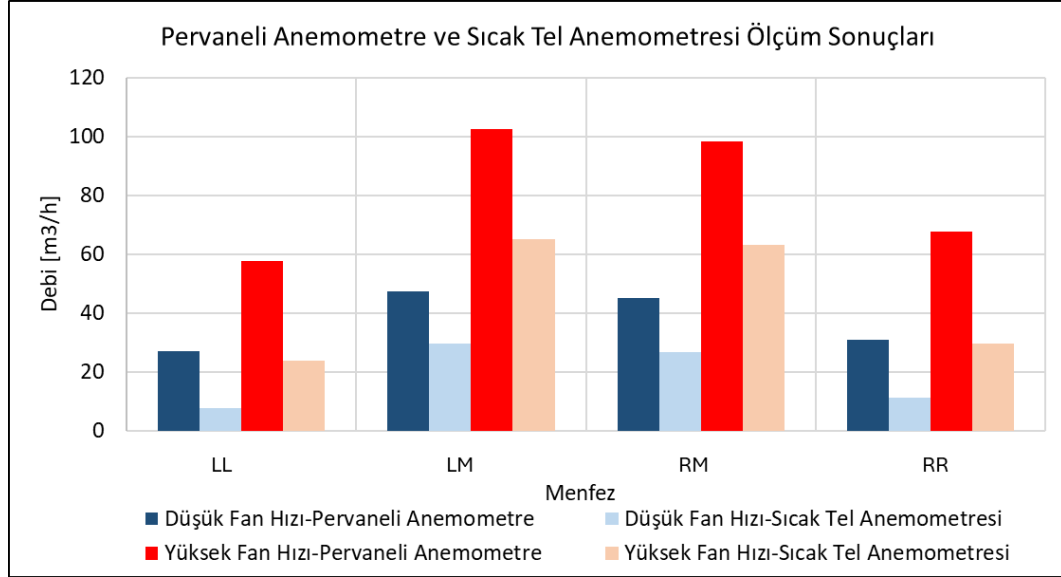
Tablo 3.5’de sıcak tel anemometresi ile düşük ve yüksek fan hızlarında menfezlerden alınan ölçüm sonuçları verilmiştir. Şekil 3.6’da sıcak tel anemometresi ile yapılan ölçümlerden bir örnek verilmiştir.



**Şekil 3.6** Sıcak tel anemometresi ile ölçüm

Diğer ölçümlerde olduğu gibi bu ölçümde de sistemdeki akışın daimi rejimde olması için en az 180 saniye beklenmiş ve 7 farklı ölçüm yapılmıştır. Alınan veriler

incelendiğinde sıcak tel anemometresinde sapma miktarlarının oldukça fazla olduğu ve düşük hızlarda farklılığın daha büyük olduğu görülmektedir.



Şekil 3.7 Pervaneli anemometre ve sıcak tel anemometresi ölçüm sonuçları

Pervaneli anemometre ve sıcak tel anemometresi ile menfezlerden ölçülen debi değerleri düşük ve yüksek fan hızı için Şekil 3.7’de sütun grafiği olarak verilmiştir. Grafikten yola çıkarak pervaneli anemometre debi değerlerinin sıcak tel anemometresine kıyasla bütün menfezlerde daha yüksek olduğu görülmektedir. Sıcak tel anemometresi tek yönlü ölçüm yapması nedeniyle türbülansın yoğun olduğu ortamlarda doğru sonuç vermeyeceği bilinen bir durumdur. Pervaneli anemometrede ise akış bilinen bir kesitten geçtiği için türbülansın yoğun olduğu ortamlarda bile yüksek hassasiyetle ölçüm yapmak mümkün olmaktadır. Dolayısıyla tek yönlü sıcak tel anemometresi ile ölçüm yapılırken akışın türbülanslı ortamdan arındırılmış olması ölçümlerin doğruluğu açısından önem arz etmektedir. Fanın emiş yaptığı kısımda akış oldukça düzgün olduğu için pervaneli anemometre ile fan girişindeki ortalama hız 11.4 m/s, sıcak tel anemometresinde ise ortalama hız 11.1 m/s olarak elde edilmiştir. Aradaki farkın %2.7 mertebesinde olduğu ve bu sonucun kabul edilebilir mertebede olduğu söylenebilir. Ancak menfezlerdeki ölçümlerde pervaneli anemometre ile sıcak tel anemometresi birbirlerine yakın sonuç vermemiştir. Bunun nedeni akışın menfezlere gelene kadar bozulup akış düzensizliklerinin yoğun olmasından kaynaklanmaktadır.

# 4

## SAYISAL ÇALIŞMA

---

### 4.1 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Yöntemi

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), İngilizce kısaltmasıyla CFD (Computational Fluid Dynamics) olarak bilinir. Bu yöntem, özellikle mühendislik alanında ısı transferi ve akışkanlar dinamiği problemlerini sayısal metotlarla çözmek için kullanılır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği uygulama alanı oldukça geniştir. Örneğin, otomotiv, havacılık, savunma sanayisi ve denizcilik uygulamaları gibi birçok farklı sektörde Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yönteminden aktif olarak faydalanılır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemi ile test gereksinimleri ciddi oranda azaltılmış böylelikle ürünlerin araştırma geliştirme süreçleri kısaltılmıştır. Böylelikle hem zamandan hem de maliyetten tasarruf söz konusu olmaktadır.

#### 4.1.1 Süreklilik ve Navier Stokes Denklemleri

Akışkan içerisinde diferansiyel bir kontrol hacmi dikkate alınarak Newton'un ikinci yasası ve kütle korumu yasalarının uygulanmasıyla elde edilen kısmi diferansiyel denklemlere sırasıyla Navier Stokes denklemleri ve süreklilik denklemi denilmektedir. Sıkıştırılmaz ve Newton tipi akışkanları kartezyen koordinatlarda ifade etmek gerekirse;

Süreklilik denklemi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4.1)$$

x yönündeki momentum denklemi:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (4.2)$$

y yönündeki momentum denklemi:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (4.3)$$

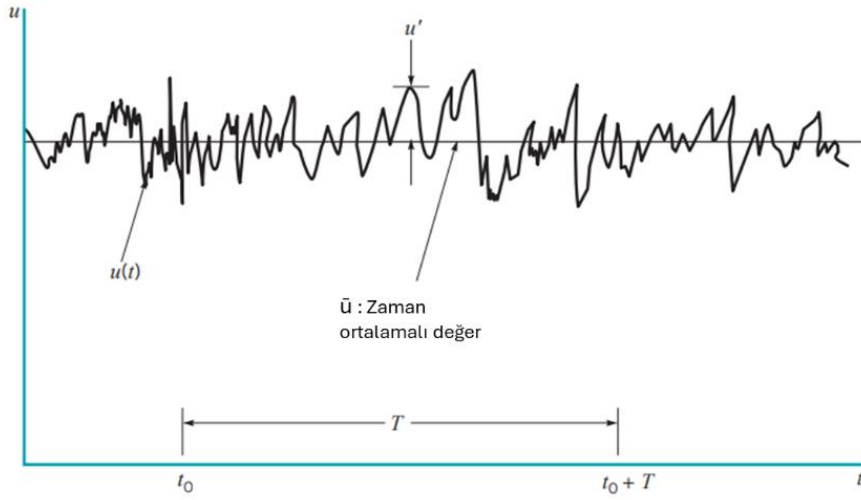
z yönündeki momentum denklemi:

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (4.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklemlerdeki u bileşeni x yönündeki hızı, v bileşeni y yönündeki hızı ve w bileşeni ise z yönündeki hızı ifade etmektedir. Akışkanlar mekaniği çözümleri bu denklemler ile gerçekleştirilmektedir.

#### 4.1.2 Türbülans Modellemesi

Akışkanlar dinamiği çözümlerinde Reynolds sayısına bağlı olarak akışkan hareketi laminar ya da türbülanslı bir karaktere sahip olmaktadır. Endüstriyel uygulamaların çoğunda türbülanslı akış hareketi söz konusudur. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile türbülanslı akış rejime sahip bir analiz gerçekleştirebilmek için türbülans modeli kullanılmaktadır. Türbülans modellerini çözüm tekniği ve hesaplama maliyeti açısından temel olarak üçe ayırmak mümkündür: Reynolds ortalamalı Navier Stokes (RANS), büyük girdap simülasyonu (LES) ve direkt sayısal simülasyonu (DNS). Bu yöntemlerden ilki olan RANS modelinde Navier Stokes denkleminde bulunan anlık parametrelerin zaman ortalaması alınarak hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Örneğin akışkan içerisindeki hız bileşeni, ortalama hız bileşeni ve çalkantılı hız bileşeni olarak ikiye ayrılır. Şekil 4.1’de türbülanslı akışa sahip bir akışkan alanındaki bir noktanın zamana bağlı hız verisi mevcuttur. Şekilde çalkantılı hız verisi  $u'$ , ortalama hız verisi ise  $\bar{u}$  olarak gösterilmiştir. [26]



**Şekil 4.1** Türbülanslı akışta zaman ortalamalı  $\bar{u}$  ve çalkantılı  $u'$  parametrelerinin gösterimi [26]

Benzer şekilde basınç ve sıcaklık parametrelerinin de çalkantılı ve ortalama değerleri olduğunu ve RANS yaklaşımı ile bu verilerin ortalama değerleri üzerinden hesaplamaların yapıldığı söylenebilir.

Diğer bir yöntem olan LES, akışkan içerisindeki büyük girdapların direkt olarak çözülmesi ve küçük girdapların ise basitleştirilerek modellenmesi ile hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. DNS yöntemi ise herhangi bir ortalama değer kullanımı veya modelleme metodolojisi kullanmadan akışkan hareketi içerisindeki bütün çalkantıların ve girdapların Navier Stokes kullanarak çözülmesi şeklindedir. Burada doğruluk ve hassasiyet olarak bir sıralama yapılırsa en doğru ve hassas çözümlemenin sırasıyla DNS, LES ve RANS ile yapıldığını ifade edilebilir. Ancak yapılan çözümleri hesaplama maliyeti açısından değerlendirmek gerekirse en fazla hesaplama maliyetinin DNS'de en az hesaplama maliyetinin ise RANS'da olduğunu söylemek mümkündür. Mühendislik uygulamalarının çoğunda kısa sürede istenilen sonuçları vermesi nedeniyle RANS modelleri daha çok tercih edilmektedir. RANS modelleri arasında en bilinen türbülans modelleri: Spalart-Allmaras,  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$ , Reynolds Stress Model ve bu modellerin varyantları şeklindedir. [26] Bu türbülans modellerinin her birinin uygun olduğu durumlar ve çeşitli kısıtlamaları mevcuttur. Ancak sıra dışı uygulamalar ve çok fizikli kompleks akışlar haricinde  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  modelleri ve bu modellerin varyantları çoğu mühendislik problemlerinde başarılı sonuçlar vermektedir.

### 4.1.3 Fan Modelleme

HAD paket programları ile fan modellemesi gerçekleştirebilmek için fan bölgesine dönme hızı tanımlanmalı ya da kanatçıklarının belirli bir hızla döndürülmesi gerekmektedir. Bunun için Multiple Reference Frame (MRF), Sliding Mesh Motion (SMM), 3D Fan Zone, Rigid Body Motion (RBM) modelleri kullanılabilir. Bu modellerin yanı sıra dinamik ağ yaklaşımı ile fan analizi de yapılabilmektedir. Ancak dinamik ağ analizleri diğer yöntemlere göre oldukça fazla hesaplama maliyeti içerdiği için çoğunlukla tercih edilmemektedir. Bu yöntemlerin herbirinin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Bir sonraki bölümde zamandan bağımsız MRF ve zamana bağlı RBM modelleri incelenecektir.

#### 4.1.3.1 Multiple Reference Frame (MRF)

Çoklu Referans Çerçevesi (MRF) yöntemi, dönen makine elemanlarının (türbinler, pompalar, karıştırıcılar vb.) akış analizlerinde kullanılan sayısal bir modelleme tekniğidir. Bu yöntem, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonlarında, dönen ve sabit bölgeler arasındaki etkileşimi çözmek için geliştirilmiştir. MRF yöntemi, simülasyon bölgesini sabit (stator) ve dönen (rotor) referans çerçevelerine ayırarak çalışır. Her bölge kendi referans çerçevesinde modellenir ve bu bölgeler arasındaki veri aktarımı, arayüz (interface) bölgeleri üzerinden gerçekleştirilir. [27]

MRF yönteminde ağ yapısı sabit kalmaktadır. Dolayısıyla döner parçanın gerçek durumdaki anlık bir görüntüsü analiz ediliyor gibi düşünülebilir. Dolayısıyla MRF yöntemi “dondurulmuş rotor yaklaşımı” şeklinde de ifade edilmektedir. [27]

MRF, zamana bağlı çözüm gerektiren Rigid Body Motion (RBM) yöntemine kıyasla daha az hesaplama kaynağı tüketir ve özellikle daimi durum (steady-state) analizlerinde yaygın olarak tercih edilir.

#### 4.1.3.2 Rigid Body Motion (RBM)

RBM yönteminde MRF yönteminde olduğu gibi belirli bir hacmi döndürmek yerine fan kanatçıkları gerçek zamanlı olarak döndürülmektedir. RBM metodu, rotor geometrisini içeren bir alanın döndürüldüğü ve hareketli alandan sabit alana bilgi aktarmak için arayüzlerin kullanıldığı bir yaklaşım gerektirir. [28] Dolayısıyla fan

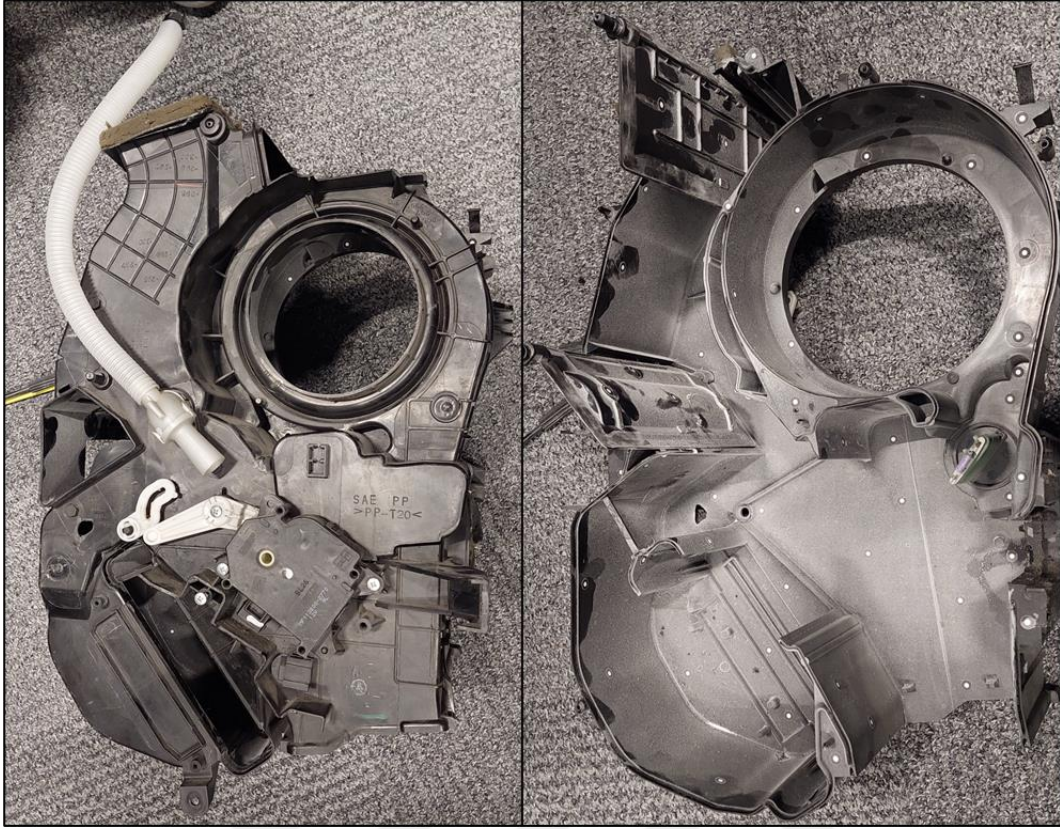
gerçek zamanlı olarak döndürülerek fiziksel duruma daha yakın bir analiz gerçekleştirilebilmektedir. Hesaplama maliyeti açısından maliyetli olması nedeniyle MRF metoduna göre daha az tercih edilmektedir.

## **4.2 Sayısal Doğrulama Çalışması**

Sayısal analizlerin test ile doğruluğunun sağlanması kullanılan metot ve yöntemlerin geçerli ve kullanılabilir olduğunu gösteren önemli bir aşamadır. Dolayısıyla bu çalışmada sayısal doğrulama faaliyeti gerçekleştirilmiştir. Bu doğrultuda öncelikle kullanılacak geometrinin sayısal modellemeye hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Geometrik işlemler tamamlandıktan sonra ağ yapısının bağımsızlığı çalışması yapılmıştır. Analizde kullanılan türbülans modelinin uygunluğunun tespit edilmesi de önem arz etmektedir.

### **4.2.1 Geometri Oluşturma Çalışması**

Çalışmada kullanılan havalandırma geometrisi binek bir aracın ön havalandırma hattı sökülerek elde edilmiştir. Bu geometrinin sayısal modelleme ile analiz edilebilmesi için uygun şekilde bilgisayar ortamına aktarılması gerekmektedir. Bu işlem için havalandırma hattı tersine mühendislik yaklaşımı ile tarama cihazı ile üç boyutlu olarak taranarak bilgisayar ortamına alınmıştır. Geometrinin fan modülü Şekil 4.2’de verilmiştir.

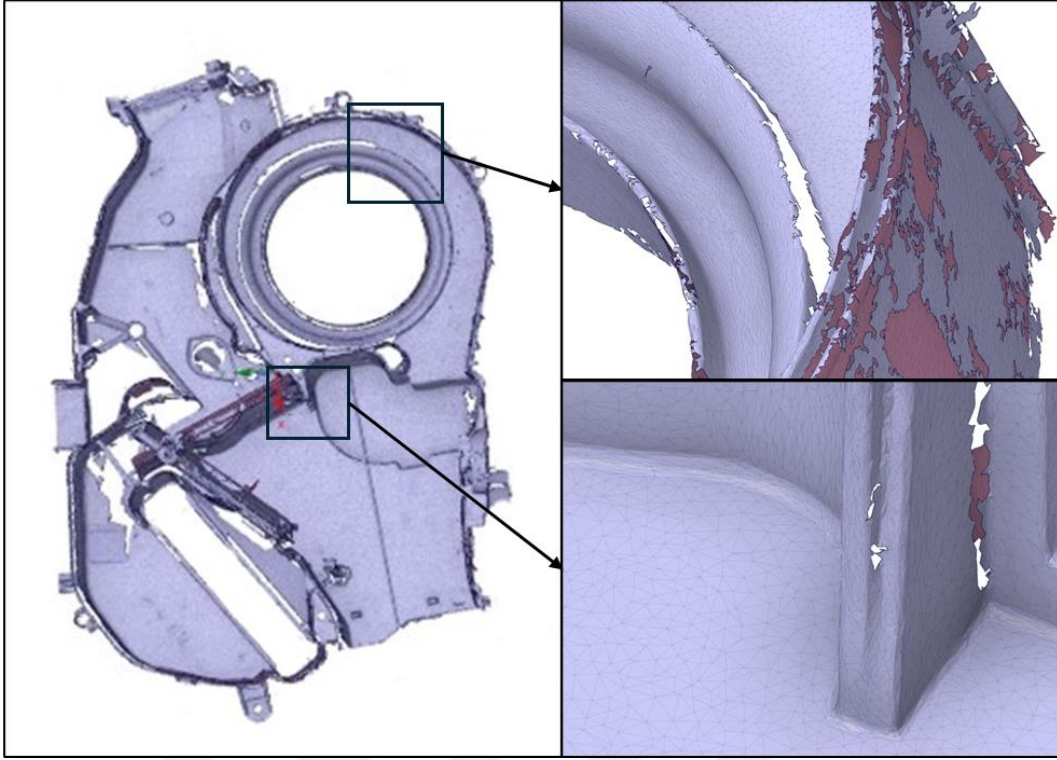


a)

b)

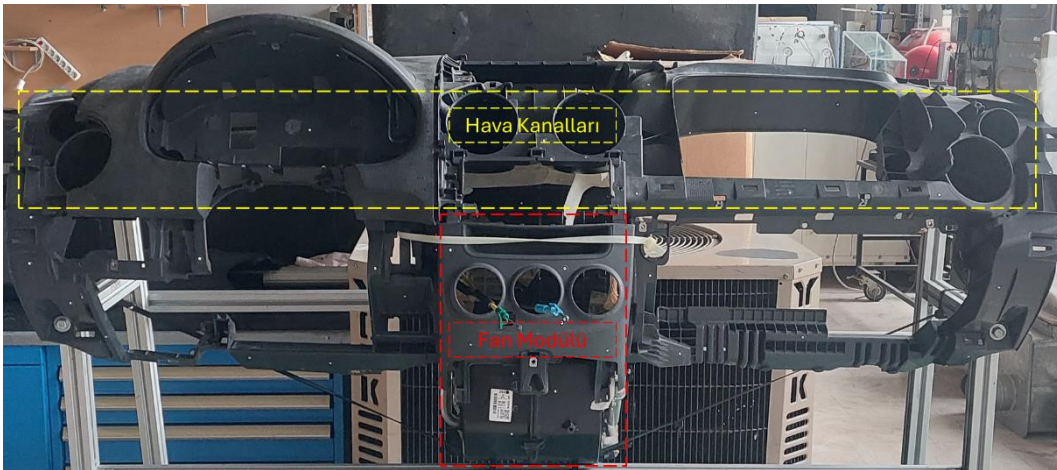
**Şekil 4.2** Test geometrisi a) Fan modülü b) Fan modülü sol parçası

Taranan geometri bilgisayar ortamında direkt olarak yüzey formunda değil STL formatında, diğer bir ifade ile küçük üçgensel elemanlarla örülmüş şekilde bulunmaktadır. Şekil 4.3’de taranan fan modülünün örneği verilmiştir.



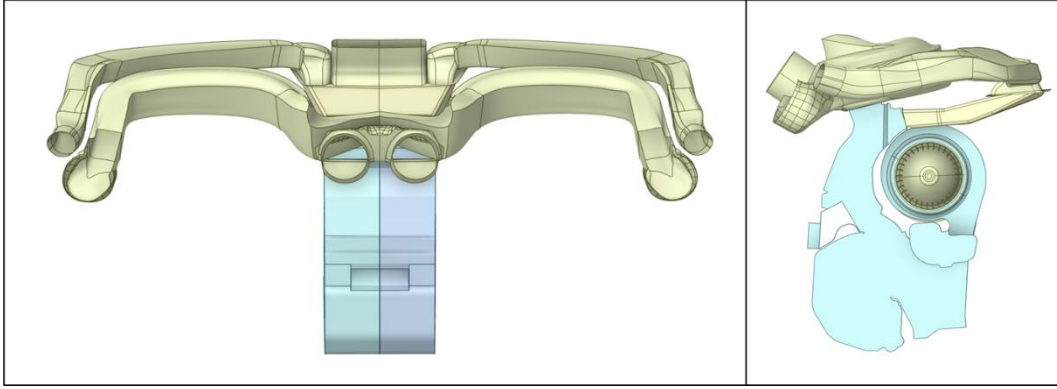
**Şekil 4.3** Tarama geometrisi (Fan modülü sol parça)

Bilgisayar ortamına STL formatında alınan geometrinin sayısal modellemeye uygun hale getirilmesi için küçük üçgensel yüzeylerin bütüncül yüzeylere dönüştürülmesi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sayısal analizin doğruluğuna olumsuz etkisi olmayacak bazı gereksiz detayların giderilmesi ağ yapısı oluşturma ve analizin yakınsamasını kolaylaştırması açısından önemlidir.



**Şekil 4.4** Test geometrisi hava kanalları ve fan modülü

Hava kanalları ve fan modülünün tümü Şekil 4.4’de verilmiştir. Hava kanallarının etrafında bulunan plastik kısımlar akışı test etmek ve modelleme açısından bir öneme sahip olmadığı için taranmamıştır.

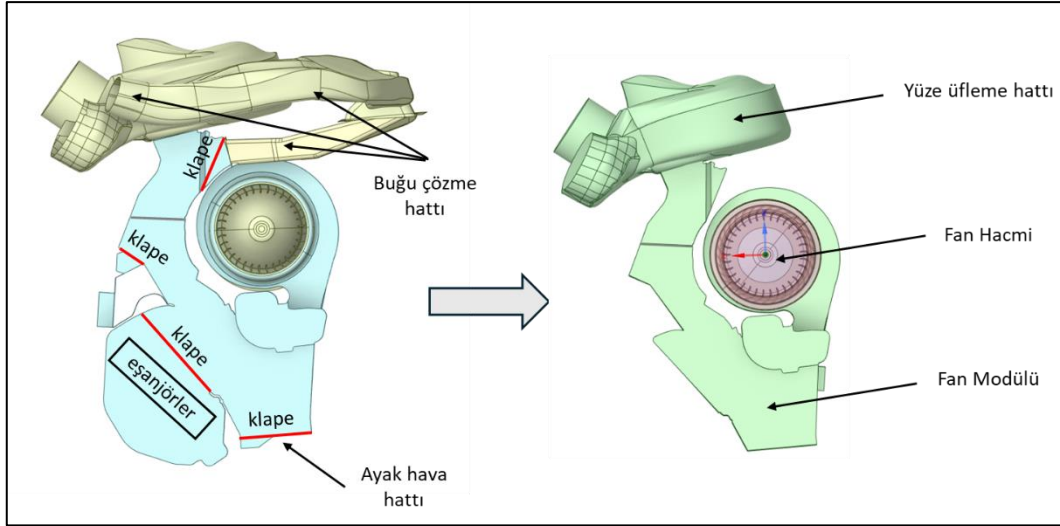


**Şekil 4.5** Yüzey örme işlemi sonrası geometri yüzey formu

Sadece hava kanallarının bulunduğu yüze üfleme, buğu çözme ve fan modülü kısımları yüzey örme işlemi ile elde edilmiştir. Geometrinin sayısal modellemeye uygun hale getirilmesi için oluşturulan yüzey formu Şekil 4.5’de verilmiştir.

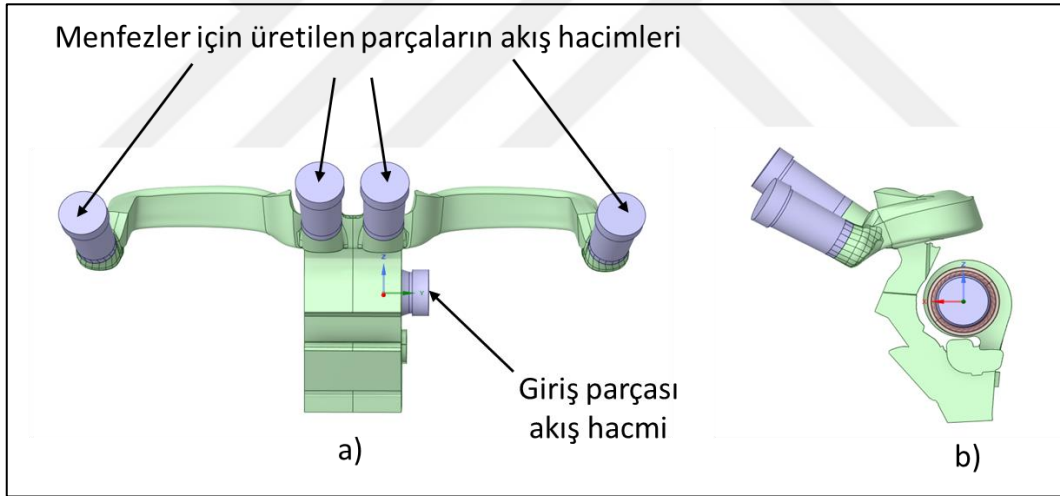
#### **4.2.2 Simülasyon Modeli**

Deneysel çalışma yüze üfleme modu için gerçekleştirildiği için buğu çözme ve ayak üfleme hattı sistemde bulunan ilgili klapelerle kapatılmıştır. HAD modelinde yüze üfleme modunda havanın geçtiği kısımların akış hacmi çıkarılmış diğer kısımlar modele dahil edilmemiştir. Klapelerle kapatılan bölümler ve sonrasında elde edilen hava kanalları modeli Şekil 4.6 ile verilmiştir.



**Şekil 4.6** Test geometrisi klape konumları ve incelenen kısımlar

Deneyisel kısımda da izah edildiği üzere menfezlerden ve fan girişinden pervaneli prob ile ölçüm yapabilmek 3 boyutlu yazıcı ile boru şeklinde parçalar üretilmiştir. Bu parçaların hacmi de modele dahil edilmiştir.



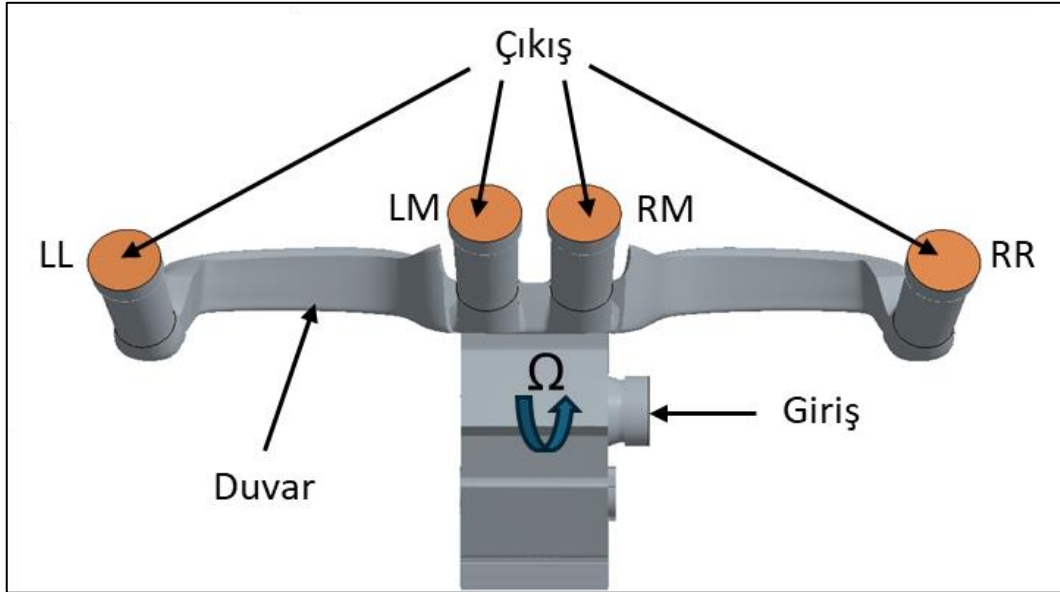
**Şekil 4.7** Ölçüm için gerekli parçalar a) Önden görünüm b) Yandan görünüm

Hava kanallarının gerekli geometri temizliği ve düzenlemeleri yapılmış, geometri analize hazır hale getirilmiştir. Akış hacmi Şekil 4.7 ile verilmiştir.

#### 4.2.2.1 Sınır Şartları

Analiz kurulumu Star CCM+2402 ile gerçekleştirilmiştir. Modelde fan girişine atmosferik giriş, menfez çıkışlarına atmosferik çıkış, duvar bölgelerine ise

kaymayan duvar sınır şartı atanmıştır. Fan bölgesine dönme hızı devir/dakika olarak verilerek fanın testte olduğu gibi atmosferik havayı içeri emerek menfezlerden basması sağlanmıştır.



**Şekil 4.8** Analiz modeli sınır şartları

Analizlerde fan girişinde ve menfez çıkışlarında kayda değer bir tersine akış gözlemlenmediği için (<1%) giriş ve çıkış bölgelerine ekstra hava hacimleri konulmamıştır. En sol menfez LL, orta sol menfez LM, orta sağ menfez RM ve en sağ menfez RR olarak isimlendirilmiştir. Sınır şartlarının gösterimi Şekil 4.8 ile verilmiştir.

#### 4.2.2.2 Ağ Yapısı ve Ağ Bağımsızlığı Çalışması

Hesaplama akışkanlar dinamiği analizlerinde çözümleme yapılırken kullanılan ağ yapısının optimum mertebede olması önem arz etmektedir. Analizler yapılırken ilgili fiziğin modellenmesi için gerekenden daha fazla hücre sayısı analizin maliyeti konusunda dezavantaj oluşturmaktadır. Diğer taraftan olması gerekenden daha az hücre ile oluşturulan ağ yapısı ilgili fiziğin doğru olarak modellenmesini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla kullanılan ağ yapısının uygun mertebede olup olmadığının tespiti ağ bağımsızlığı çalışması ile mümkündür.

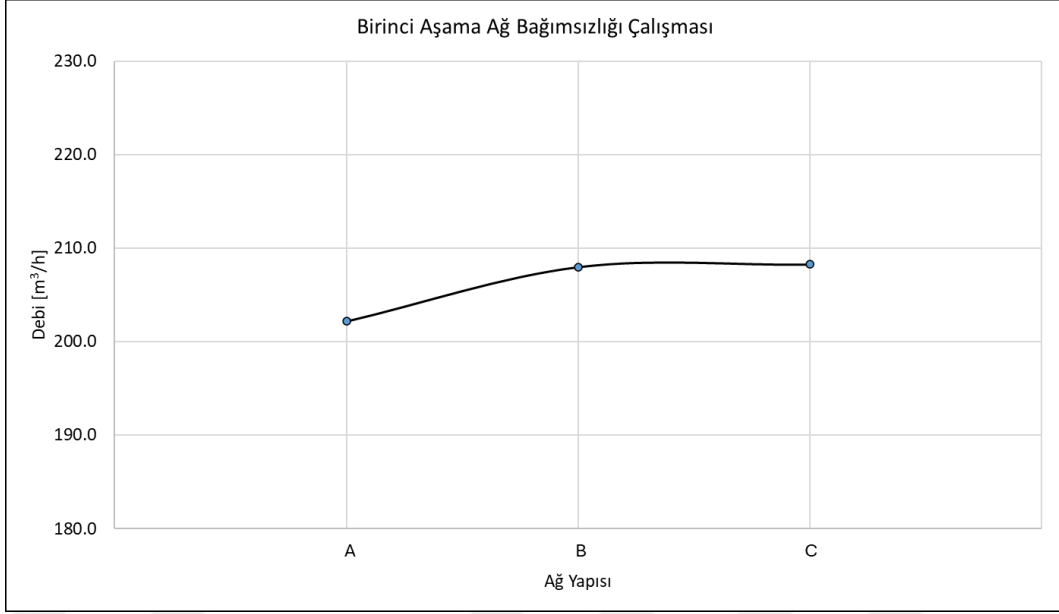
Bu tez çalışmasında ağ bağımsızlığı üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada yüzey ve hacimsel ağ yapısı özellikleri sabit tutulup üç farklı sınır tabaka

yapısı üzerinden analizler gerçekleştirilmiştir. İkinci aşamada, birinci aşamada uygun görülen sınır tabaka ile yüzey ölçüleri değiştirilerek beş farklı ağ yapısı üzerinden toplam debi parametresi takip edilmiştir. Üçüncü aşamada ise fanın fan modülü içerisine havayı en fazla bastığı bir lokasyona bir çizgi üzerinde yirmi farklı nokta konumlandırılarak bu noktadaki hızın z yönündeki değeri ikinci aşamadaki beş farklı ağ yapısı ile değerlendirilmiştir. Fan analizlerinde dönme hareketine bağlı olarak kanatlarda akış ayrılmalarının yoğun olarak görülmesi duvar fonksiyonları ile yapılan çözümlerlerde hatalara neden olmaktadır. Dolayısıyla sınır tabaka özellikleri boyutsuz duvardan uzaklık parametresi olan  $y+1$  hedefi ile oluşturulmuştur. Tablo 4.1’de üç farklı sınır tabaka ile yapılan analizlerin sonuçları ve analizlerin koşturulma maliyetleri verilmiştir.

**Tablo 4.1** Birinci aşama ağ bağımsızlığı sonuçları

Birinci Aşama Ağ Bağımsızlığı Çalışması								
Ağ İsmi	Sınır Tabaka Sayısı	Ağ Sayısı [M]	LL [m <sup>3</sup> /h]	LM [m <sup>3</sup> /h]	RM [m <sup>3</sup> /h]	RR [m <sup>3</sup> /h]	Toplam [m <sup>3</sup> /h]	CPUhour
A	5	2	43.7	57.7	57.4	43.3	202.2	604
B	10	3.4	42.3	62.1	60.7	42.8	208.0	1284
C	15	4.9	41.7	61.9	61.2	43.5	208.3	1741

Birinci aşama ağ bağımsızlığı çalışmasında 5, 10 ve 15 sınır tabaka ile üç analiz yapılmıştır. Yapılan analizlerde 10 ve 15 sınır tabaka ile yapılan ağ yapısı-A ve ağ yapısı-B toplam debi açısından birbirlerine çok yakın sonuç vermiştir. Dolayısıyla ağ yapısı-B yani 10 sınır tabaka ile analizlerin koşturulması maliyet açısından daha avantajlı olmaktadır. Şekil 4.9’da üç farklı sınır tabaka ile elde edilen sonuçlar verilmiştir.



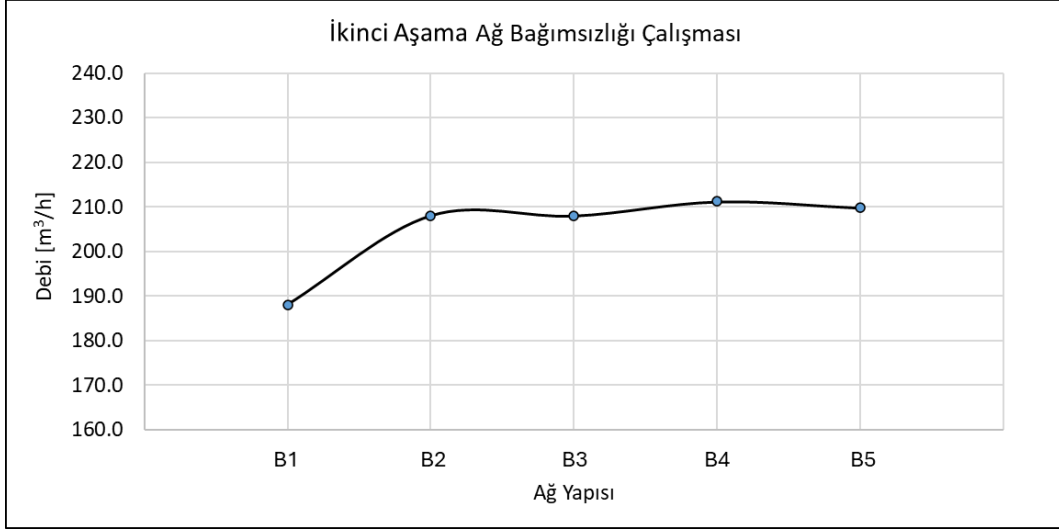
**Şekil 4.9** Birinci aşama ağ bağımsızlığı çalışması

Birinci aşamada uygun görülen ağ yapısı-B sınır tabaka özelliği kullanılarak beş farklı ağ yapısı oluşturulmuş ve analiz edilmiştir.

**Tablo 4.2** İkinci aşama ağ bağımsızlığı sonuçları

İkinci Aşama Ağ Bağımsızlığı Çalışması							
Ağ Yapısı	Hücre Sayısı [M]	LL [m³/h]	LM [m³/h]	RM [m³/h]	RR [m³/h]	Toplam [m³/h]	CPUhour
B1	1.5	35.6	57.5	55.1	39.8	188.0	907
B2	2.3	42.0	63.8	60.8	41.6	208.1	928
B3	3.4	42.3	62.1	60.7	42.8	208.0	1284
B4	6.6	45.1	61.0	60.3	44.7	211.2	2200
B5	14	44.9	61.0	59.6	44.3	209.8	5133

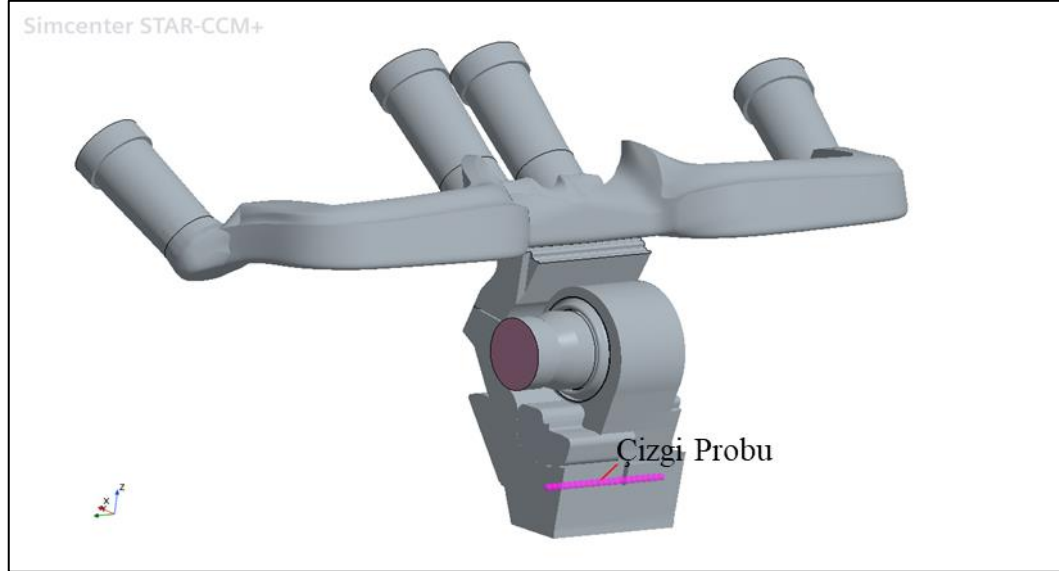
Tablo 4.2’de de ikinci aşama ağ bağımsızlığı için beş farklı ağ yapısı ile koşturulan analizlerin sonuçları verilmiştir. Tablo 4.2 incelendiğinde en yüksek hücre sayısına sahip B5 ağ yapısı ile B2, B3 ve B4 ağ yapıları arasında toplam debi olarak maksimum %0.85 farklılık söz konusudur.



**Şekil 4.10** İkinci aşama ağ bağımsızlığı çalışması

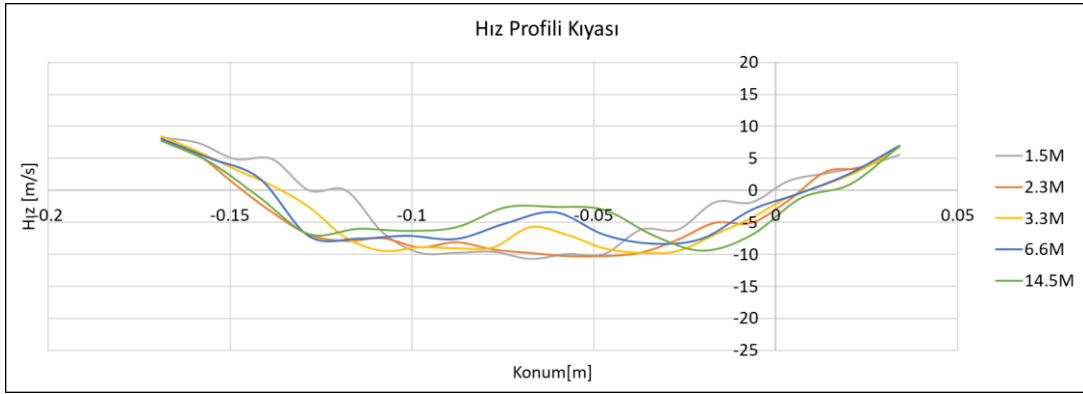
Tablo 4.2’deki sonuçlar grafik haline getirildiğinde Şekil 4.10 elde edilmiştir. Şekil 4.10 incelendiğinde B2, B3, B4 ve B5 sonuçlarının birbirlerine yakın olduğu ve yönelimin yatay seyrettiği görülmektedir.

Üçüncü aşama ağ bağımsızlığı çalışmasında Şekil 4.11’de verilen çizgi üzerinde yirmi nokta boyunca hızın z yönündeki verisi karşılaştırılmıştır.



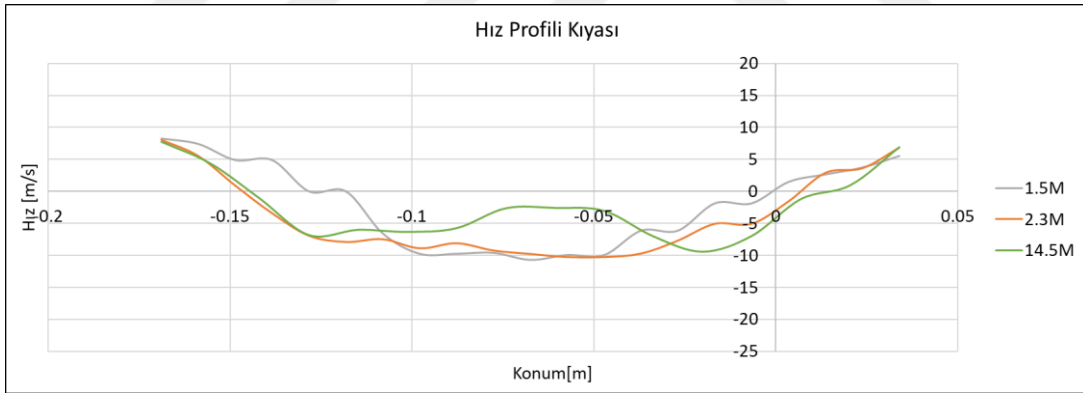
**Şekil 4.11** Hız karşılaştırması için oluşturulan çizgi

Elde edilen sonuçlar grafik haline getirilmiştir. Şekil 4.12’ de beş farklı ağ yapısı ile çizgi boyunca elde edilen hız verileri karşılaştırılmıştır.



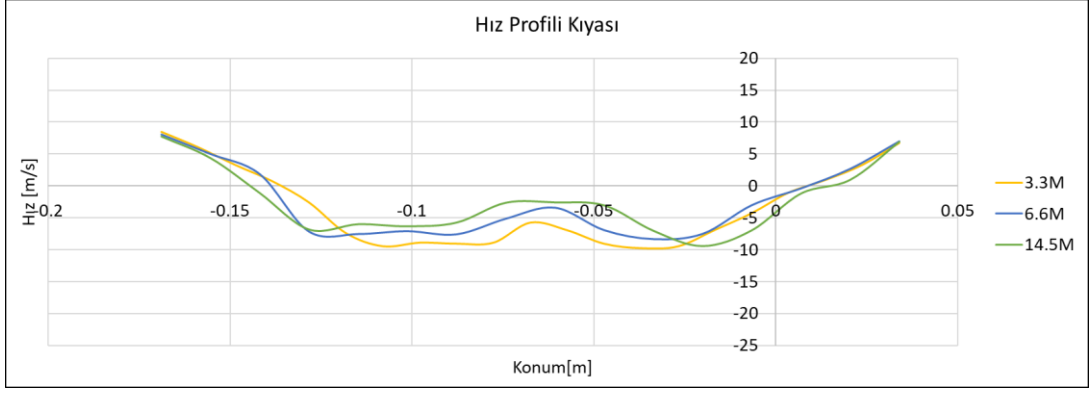
**Şekil 4.12** Hız profili kıyası

Verilerin daha iyi karşılaştırılabilmesi için en fazla hücre sayısına sahip (14.5 milyon) ağ yapısı B5 ile B1 (1.5 milyon) ve B2 (2.3 milyon) ayrıca çizdirilip kıyaslanmıştır. Şekil 4.13’de görüldüğü üzere 1.5 milyon ve 2.3 milyon hücre sayısına sahip ağ yapıları 14.5 milyon ağ yapısına sahip analizle trend olarak uyumlu değildir. Özellikle -0.1 m ile -0.05 m arasında ciddi bir uyumsuzluk görülmektedir.



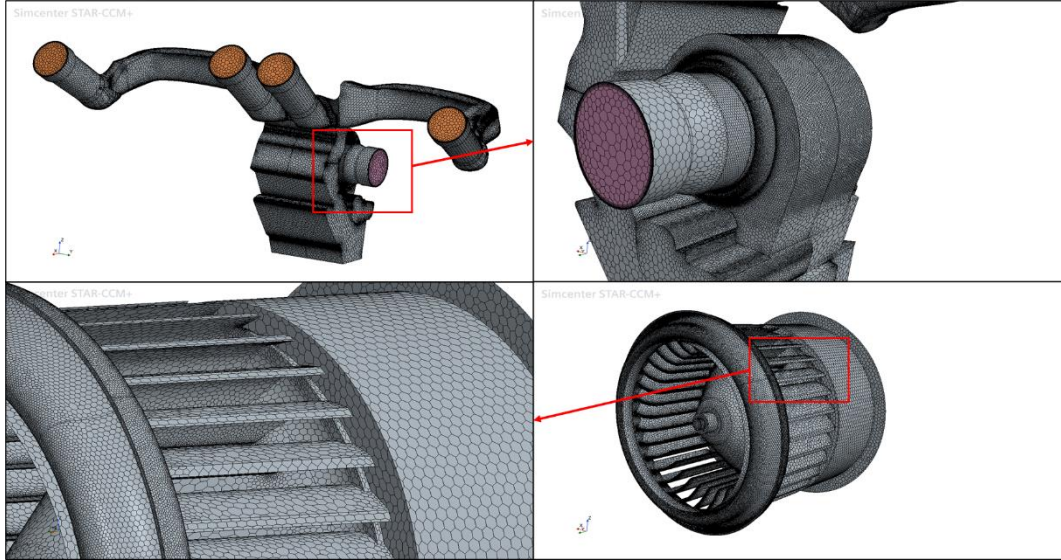
**Şekil 4.13** B1, B2, B5 ağ yapılarının hız profili kıyası

Şekil 4.14’de verilen B3 (3.3 milyon), B4 (6.6 milyon) ve B5 (14.5 milyon) ağ yapısı sonuçları ayrıca çizdirilip incelendiğinde sonuçların uyumlu olduğu görülmüştür. B5 ağ yapısına en yakın sonuçların B4 (6.6 milyon) ağ yapısı ile sağlandığı görülmektedir.



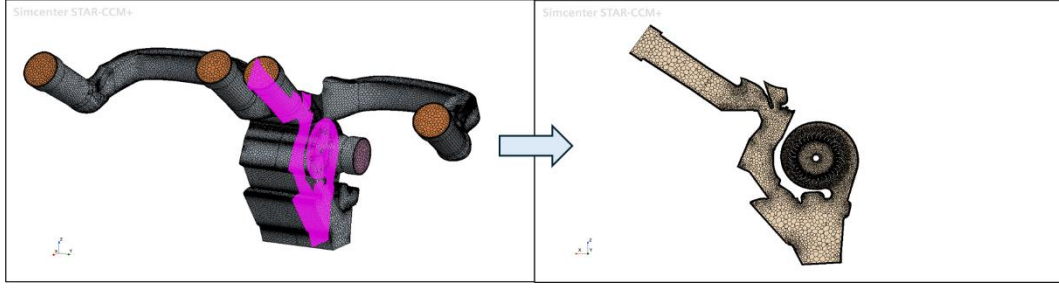
Şekil 4.14 B3, B4, B5 ağ yapılarının hız profili kıyası

Dolayısıyla birinci, ikinci ve üçüncü aşama ağ bağımsızlığı sonuçları değerlendirildiğinde B4 (6.6 milyon) ağ yapısının ilgili fiziği çözümlene ve maliyet açısından optimum çözünürlüğüne sahip olduğu tespit edilmiştir. Seçilen ağ yapısının çözünürlüğü ve yapısı Şekil 4.15 ile verilmiştir.



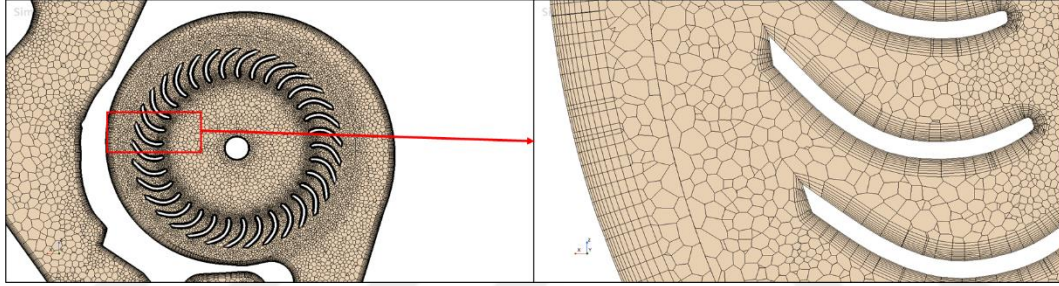
Şekil 4.15 Optimum ağ yapısı

Analiz modelinin ortasından bir kesit alınmış ve kesitteki ağ yapısı Şekil 4.16'da verilmiştir.



**Şekil 4.16** Optimum ağ yapısı kesit görüntüsü

Fan bölgesine ve fan modülü ile yüze üfleme hattının birleştiği bölgeye daha iyi çözümlene yapılabilmesi için “boi” olarak isimlendirilen daha hassas hacimsel çözünürlük ayarı verilmiştir. Böylelikle hız gradyenlerinin yüksek olduğu bölgelerde modelleme hassasiyeti daha yüksek olabilmektedir. Sınır tabakanın detaylı incelenmesi için daha yakından kesit görüntüsü Şekil 4.17 ile verilmiştir.



**Şekil 4.17** Optimum ağ yapısı sınır tabaka görüntüsü

Seçilen ağ yapısı ile doğrulama çalışması yapılmış düşük, orta ve yüksek fan hızlarında menfezlerdeki debiler test ile karşılaştırılmıştır. Bu konu sayısal doğrulama çalışması bölümünde ayrıntılı ele alınmıştır.

#### 4.2.2.3 Türbülans Modelleri Kıyaslaması

Ağ bağımsızlığı çalışmasında optimum olarak seçilen B4 ağ yapısı k- $\epsilon$  Relizable all y+ modelinin yanı sıra Spalart Allmaras ve k- $\omega$  SST türbülans modelleri ile de koşturularak sonuçlar değerlendirilmiştir. Tablo 4.3’de üç farklı türbülans modeli ile orta fan hızında elde edilen sonuçlar verilmiştir.

**Tablo 4.3** Türbülans modeli karşılaştırması

Türbülans Modeli Karşılaştırması						
Model	LL [m <sup>3</sup> /h]	LM [m <sup>3</sup> /h]	RM [m <sup>3</sup> /h]	RR [m <sup>3</sup> /h]	Toplam [m <sup>3</sup> /h]	CPUhour
Spalart Allmaras	37.0	66.9	67.2	35.7	206.8	2235
k-ε Relizable all y+	45.1	61.0	60.3	44.7	211.2	2200
k-ω SST	38.1	66.4	62.4	39.0	206.0	2568

Spalart Allmaras ve k-ω SST türbülans modelleri çözüm sırasında k-ε Relizable all y+ modeline göre daha çalkantılı çözümlere yapmaktadır. Diğer yandan k-ε türbülans modelinin hem yakınsama hem de teste yakınlık açısından daha avantajlı olduğu ortaya konmuştur. Analizlerin yakınsamaları ve test verilerine göre mertebeleri değerlendirildiğinde k-ε Relizable all y+ türbülans modelinin bu çalışma için daha uygun olduğu tespit edilmiştir.

#### 4.2.2.4 Sayısal Doğrulama Çalışması

Ağ bağımsızlığı çalışması sonucu seçilen B4 ağ yapısı test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Buna göre düşük, orta ve yüksek fan hızında analizler koşturulmuş menfezlerden elde edilen debiler ve fanın çektiği toplam debi deney sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Analizler k-ε Relizable all y+ türbülans modeli ile koşturulmuştur. Hız ve basınç ilişkisi çözümlenmesinde çözücü metodu olarak coupled kullanılmıştır. Analizlerdeki çözüm metodolojisi Tablo 4.4 ile verilmiştir.

**Tablo 4.4** Sayısal çözüm metodolojisi

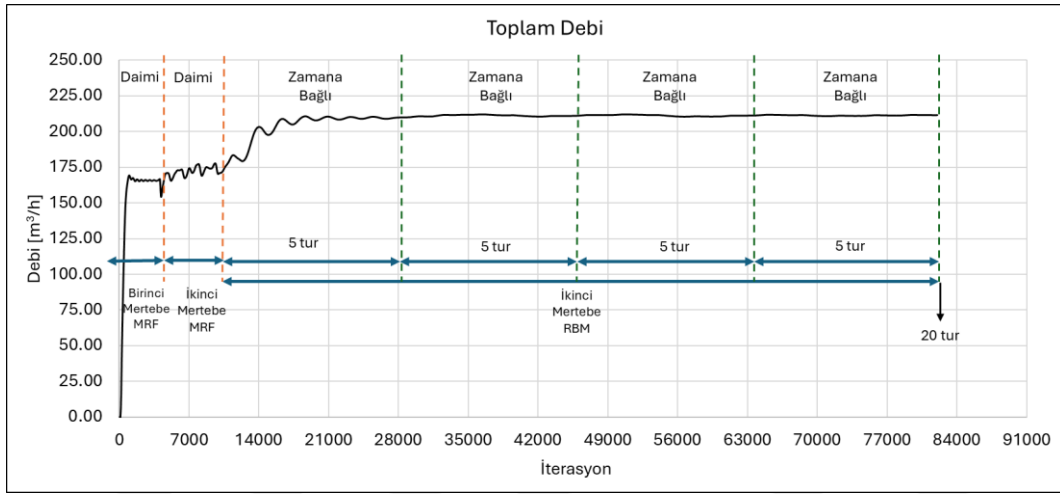
Zaman	Fan Modeli	Çözüm Mertebesi	İterasyon Sayısı
Daimi	MRF	Birinci Mertebe	0 - 4.000
Daimi	MRF	İkinci Mertebe	4.000 - 10.000
Zamana Bağlı	RBM	İkinci Mertebe	10.000 - 20 Tur

Analizler öncelikle birinci derece çözüm mertebesinde MRF yöntemi ile 4000 iterasyon koşturulup ardından ikinci derece çözüm mertebesine alınıp 6000 iterasyon daha koşturulmuştur. Ardından çözüm zamanlaması daimi'den zamana

bağlı rejime alınıp fan modellemesi de RBM'e alınmıştır. Böylelikle fan gerçek zamanlı olarak döndürülmüştür. Zaman adımı olarak türbomakina çözümlerinde genel olarak benimsenen prensip olan kanatçıkların 1 derece dönme miktarı esas alınmıştır. [29] Bu hesaplama denklem (4.5)'de verilmiştir.

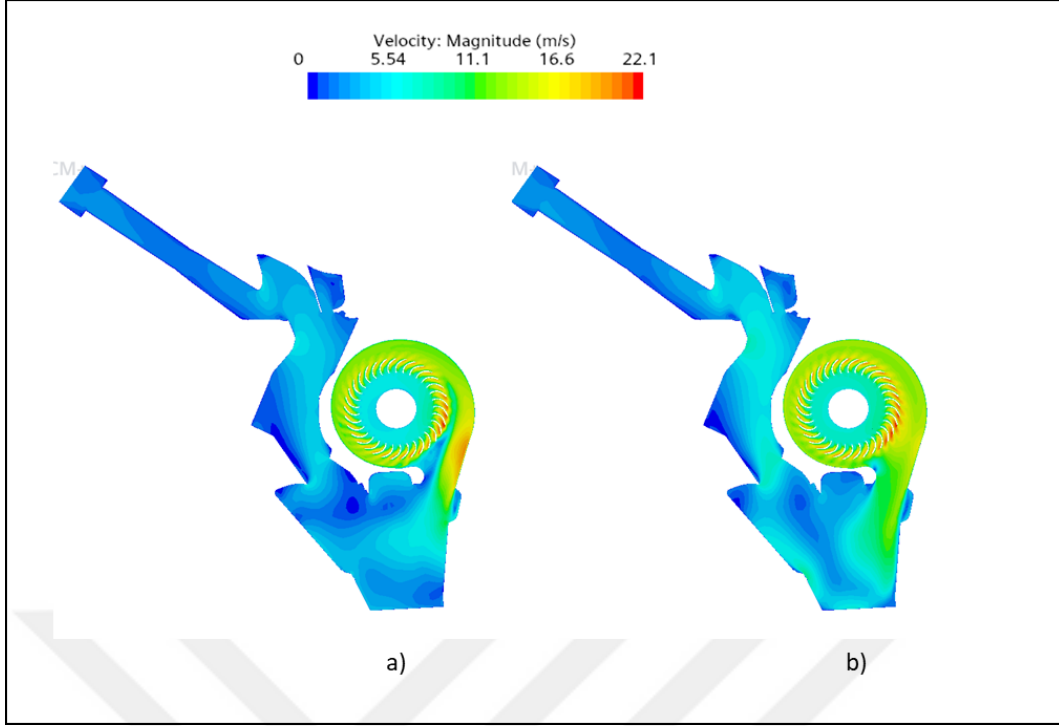
$$Zaman\ adımı = \frac{1}{\frac{\Omega}{60} \times 360} \quad (4.5)$$

Analiz çözüm metodolojisi (MRF+RBM) orta hız seviyesi ile menfezlerdeki toplam debi parametresi için Şekil 4.18'de verilmiştir.



**Şekil 4.18** MRF ve RBM metodlarının karşılaştırılması

Şekil 4.18'de de görüleceği üzere sadece MRF ile bir çözümleme yapılması halinde toplam debinin 170-180 m<sup>3</sup>/saat civarında olduğu ve test sonuçlarından uzak bir seviye olduğu anlaşılmaktadır. MRF sonrasında RBM metoduna geçişle birlikte toplam debi testte elde edilen debi seviyesine oldukça yaklaşmaktadır. Aynı durum her bir menfez için de gözlemlenmektedir. Dolayısıyla yalnızca zamandan bağımsız MRF yöntemi bu çalışmada uygun bir metod olmayıp sonrasında RBM ile teste yakın sonuçlar elde edilmiştir.



**Şekil 4.19** Orta kesitteki hız konturu kıyası a) MRF b) RBM

Şekil 4.19’da kesit üzerindeki hız konturu MRF ve RBM sonucu olarak verilmiştir. Özellikle fanın fan modülüne havayı bastığı kısımda ciddi bir farklılık olduğu görülmektedir. Fanın muhafazası içerisinde toplanan hava akışı RBM modeli ile MRF’e göre daha kuvvetli basılmaktadır. Dolayısıyla çözümler sadece MRF ile değil MRF+RBM şeklinde yapılmıştır. Tablo 4.5’de yüksek kademe fan hızıyla elde edilen test sonuçları ve HAD sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde toplam debi %8.1 oranında test sonuçları ile uyumlu olup menfezlerde ise maksimum %14.7 hata oranı ile tüm menfezler test sonuçları ile örtüşmektedir.

**Tablo 4.5** Yüksek kademe fan hızı test ve HAD sonuçları

Debi Dağılımı	LL [m <sup>3</sup> /saat]	LM [m <sup>3</sup> /saat]	RM [m <sup>3</sup> /saat]	RR [m <sup>3</sup> /saat]	Toplam [m <sup>3</sup> /saat]
Test	57.8	102.5	98.2	67.8	326.3
HAD	64.2	87.4	85.2	63.1	299.9
Hata Oranı [%]	11.1	-14.7	13.3	6.9	8.1

Orta seviye fan hızı ile menfezlerden ve fan girişinden elde edilen debi Tablo 4.6 ile verilmiştir. Buna göre toplam debi %9 oranında test ile uyumlu iken menfezlerde ise maksimum %14.8 hata oranı ile test ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4.6** Orta kademe fan hızı test ve HAD sonuçları

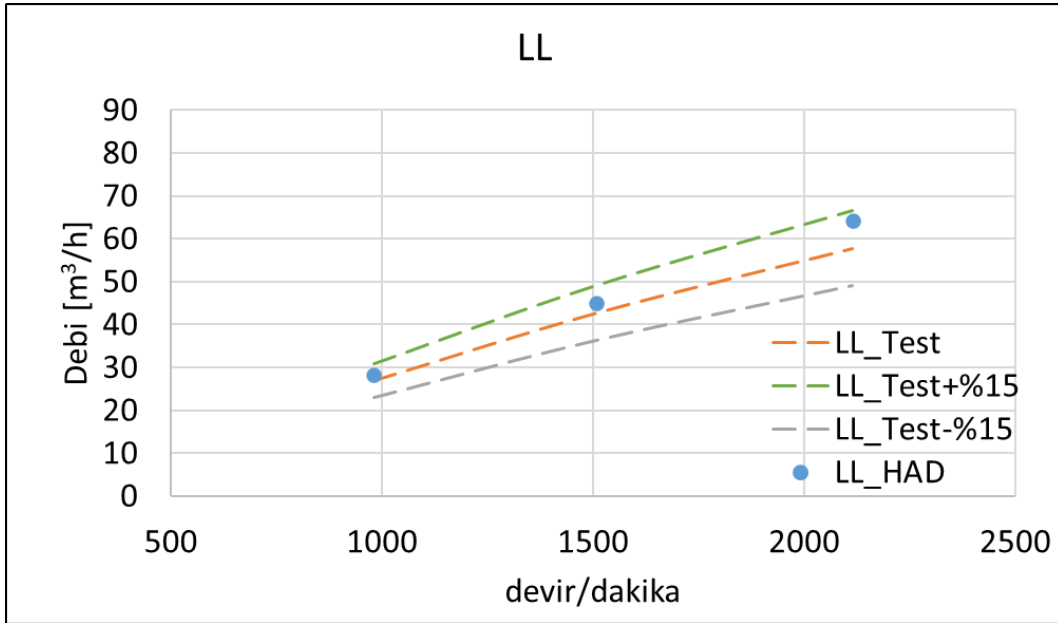
Debi Dağılımı	LL [m <sup>3</sup> /saat]	LM [m <sup>3</sup> /saat]	RM [m <sup>3</sup> /saat]	RR [m <sup>3</sup> /saat]	Toplam [m <sup>3</sup> /saat]
Test	42.7	71.6	68.6	49.3	232.2
HAD	45.1	61.0	60.3	44.7	211.2
Hata Oranı [%]	5.7	-14.8	-12.0	-9.3	-9.0

Düşük kademe fan hızı ile elde edilen test ve HAD sonuçları Tablo 4.7 ile verilmiştir. Buna göre toplam debi %10.7 oranında test ile uyumlu iken menfezlerde ise maksimum %17.4 hata oranı ile test ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

**Tablo 4.7** Düşük kademe fan hızı test ve HAD sonuçları

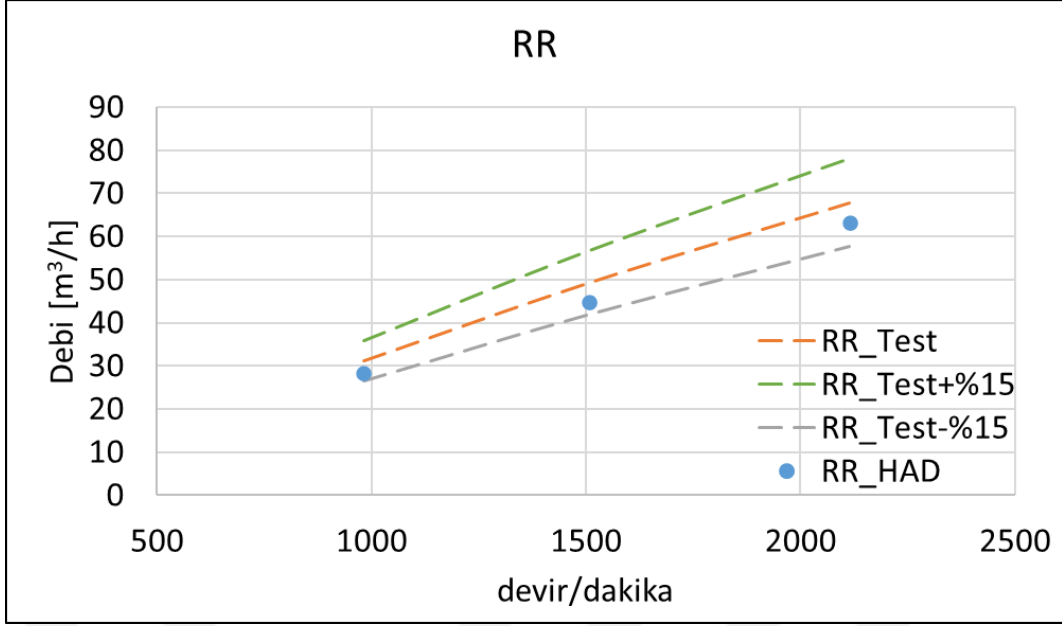
Debi Dağılımı	LL [m <sup>3</sup> /saat]	LM [m <sup>3</sup> /saat]	RM [m <sup>3</sup> /saat]	RR [m <sup>3</sup> /saat]	Toplam [m <sup>3</sup> /saat]
Test	26.9	47.4	45.1	31.1	150.5
HAD	28.2	39.2	38.8	28.3	134.4
Hata Oranı [%]	4.9	-17.4	-14.0	-9.0	-10.7

Test cihazlarının hassasiyeti, test icra edilirken insan kaynaklı ölçüm hataları ve sayısal hatalar değerlendirildiğinde %15’lik hata marjı sonuçlar açısından uyumlu kabul edilmiştir. Düşük, orta ve yüksek hızlarda dört menfez ve toplam debiler düşünüldüğünde on beş adet veri test sonuçları ile kıyaslanmıştır. On beş veriden on dört tanesi %15 bandında olup sadece bir adet menfez verisi bu bandın hafif dışında seyretmiştir. Tüm hata oranlarının ortalaması alındığında %11 olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu hassasiyet oranı sayısal doğrulama açısından uygun görülmüştür. Düşük, orta ve yüksek fan hızında menfezlerden ve fan girişinden elde edilen debiler her bir menfezde ayrı ayrı grafik olarak Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23 ile verilmiştir.



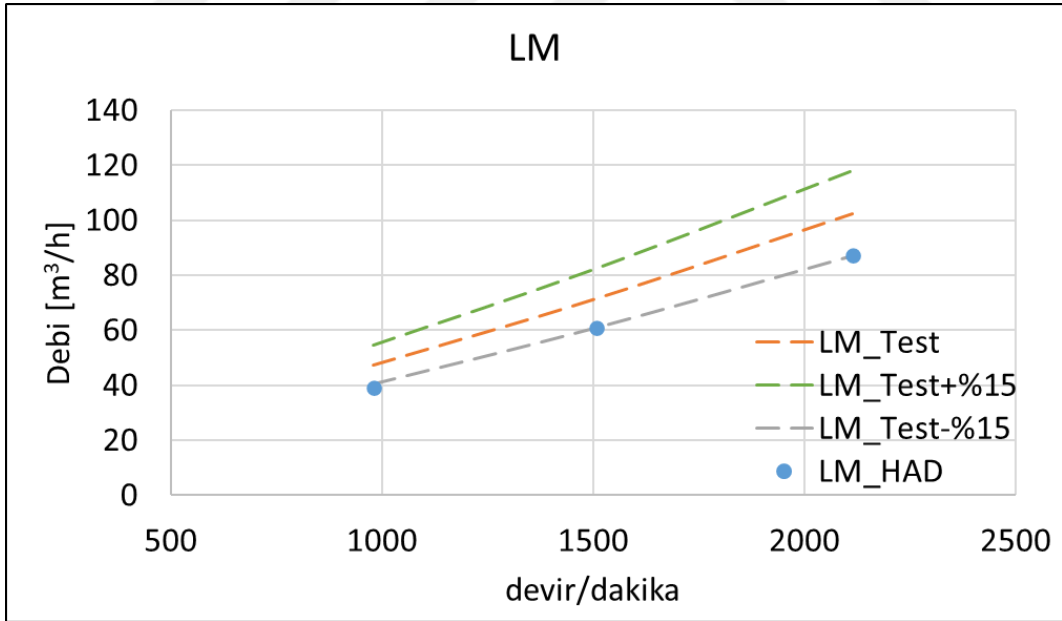
**Şekil 4.20** LL menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası

Şekil 4.20’de LL menfezi için test ve HAD sonuçları verilmiştir. Test verisinin ortalama değerinin yanı sıra +%15 ve -%15 bandı da grafikte belirtilmiştir. HAD sonuçları bu iki sınır içerisinde kalmaktadır.



Şekil 4.21 RR menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası

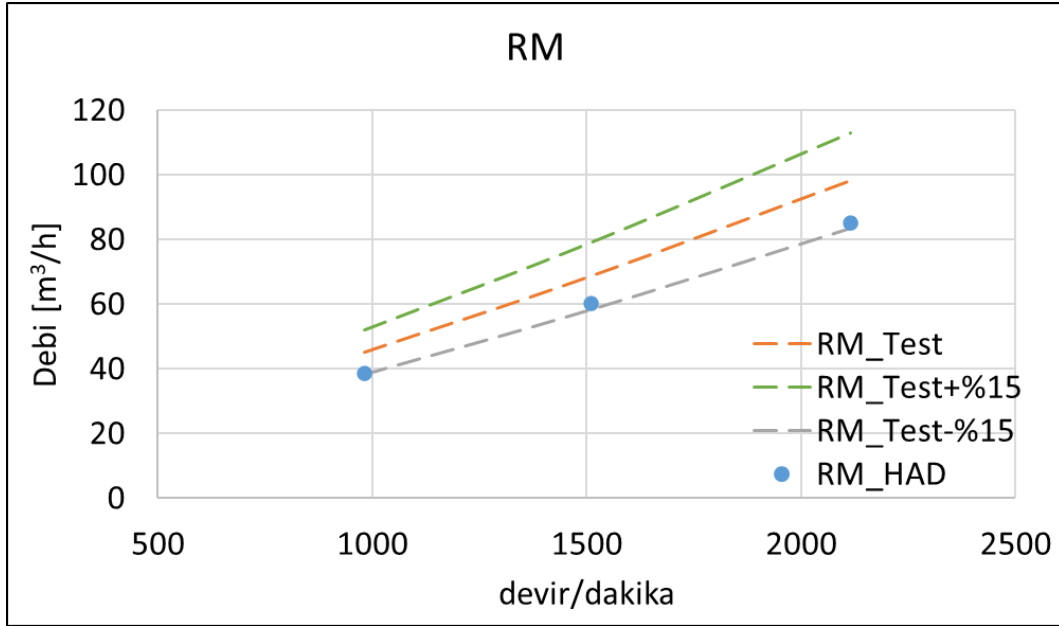
Şekil 4.21’de RR menfezi için test ve HAD sonuçları verilmiştir. Test verisinin ortalama değerinin yanı sıra +%15 ve -%15 bandı da grafikte belirtilmiştir. HAD sonuçları bu iki sınır içerisinde kalmaktadır.



Şekil 4.22 LM menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası

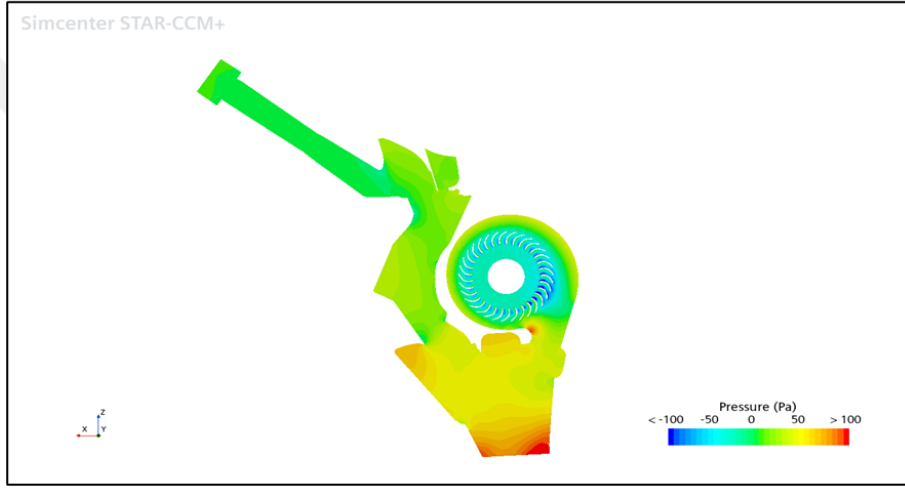
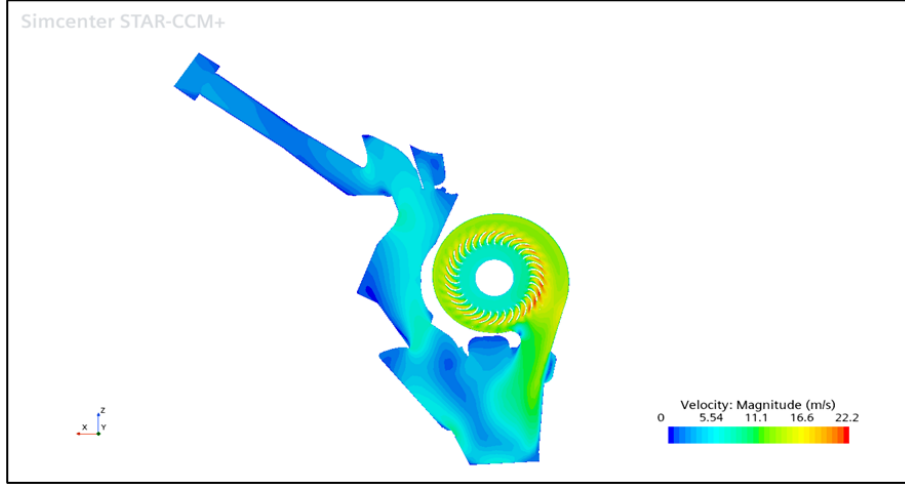
Şekil 4.22’de LM menfezi için test ve HAD sonuçları verilmiştir. Test verisinin ortalama değerinin yanı sıra +%15 ve -%15 bandı da grafikte belirtilmiştir. HAD

sonuçları orta ve yüksek hızda bu iki sınır içerisinde kalmaktadır. Düşük hızda -%15 bandının hafif dışında kalmaktadır.



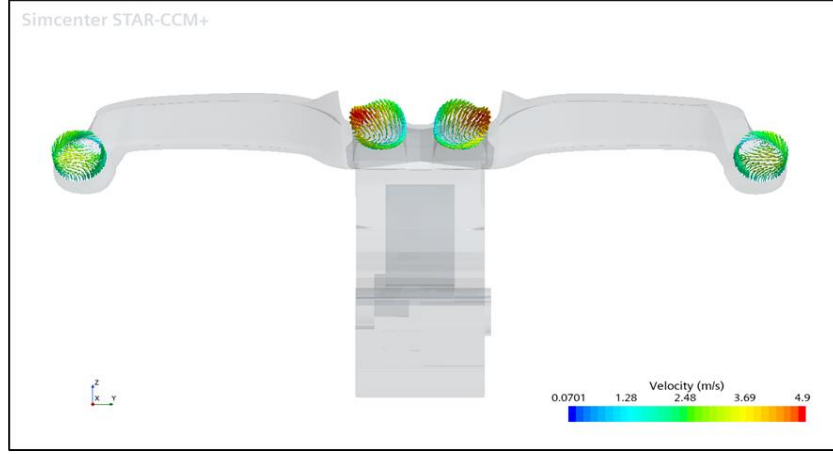
Şekil 4.23 RM menfezi HAD ve test sonuçları debi kıyası

Şekil 4.23’de RM menfezi için test ve HAD sonuçları verilmiştir. Test verisinin ortalama değerinin yanı sıra +%15 ve -%15 bandı da grafikte belirtilmiştir. HAD sonuçları bu iki sınır içerisinde kalmaktadır. Her bir menfezdeki sonuçların test ile uyumlu olduğu dolayısıyla kullanılan sayısal çözümleme ayarlarının ve metodolojisinin kullanışlı olduğu ifade edilebilir. Orta kademe fan hızı ile elden edilen sayısal sonuçlardan bazı hız ve basınç konturları Şekil 4.24 ile verilmiştir.



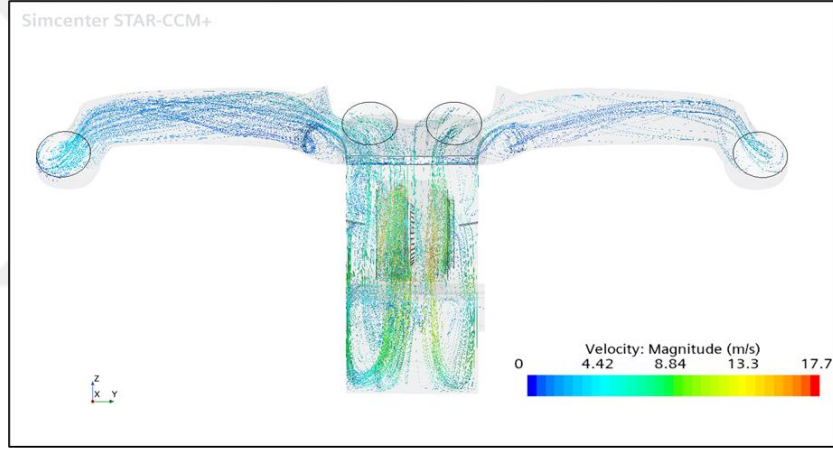
**Şekil 4.24** Orta kademe fan hızı orta kesitte hız ve basınç konturları a) Hız konturu b) Basınç konturu

Şekil 4.24 incelendiğinde fanın santrifüj tipi olması nedeniyle dönmesine bağlı olarak etrafındaki cidarda toplanan hava aşağı doğru yönlenmekte, böylelikle sisteme dağıtılmaktadır.

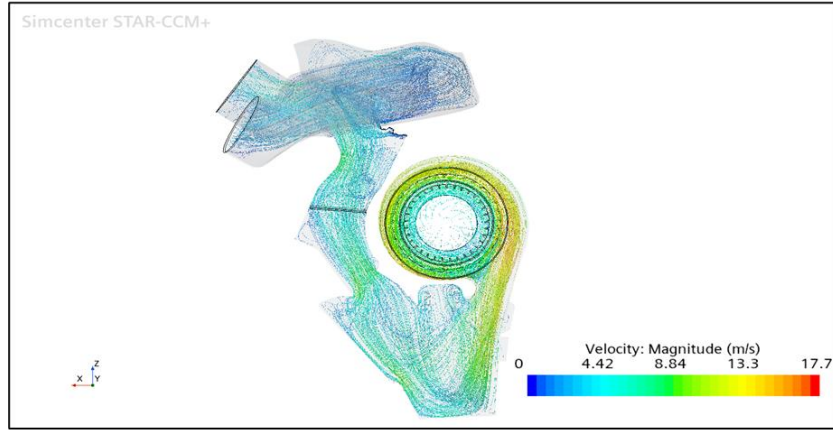


**Şekil 4.25** Orta kademe fan hızı menfezlerdeki hız vektörleri

Şekil 4.25’de menfezlerdeki hız vektörleri çizdirilmiştir. Orta menfezlerde yan menfezlere kıyasla daha yüksek hava hızı ve debisi olduğu görülmektedir.



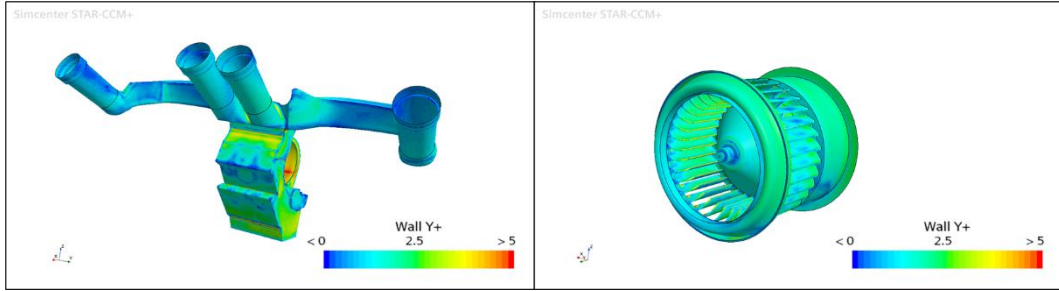
a)



b)

**Şekil 4.26** Orta kademe fan hızı akım çizgileri konturu a) Önden görünüm b) Yandan görünüm

Sistemde dolaşan hava akım çizgileri konturu ile çizdirilmiş ve Şekil 4.26’da verilmiştir. Konturdan da görüleceği üzere sistemde yoğun şekilde girdaplar ve akış ayrılmaları mevcuttur.



**Şekil 4.27** Orta kademe fan hızı duvarlar ve fan üzerinde y+ konturları

Duvarlar üzerindeki y+ değerleri Şekil 4.27 ile verilmiştir. Konturlar incelendiğinde fan modülü, yüze üfleme hattı ve fan bölgesindeki duvarlarda y+ değerinin 1 civarında olduğu görülmektedir. Ortalama değerleri hesaplandığında fan modülü ve yüze üfleme hattında ortalama y+ değeri 1.49, fan bölgesinde gövde ve kanatçıklar üzerinde ortalama y+ değeri 1.50 olduğu tespit edilmiştir.

### 4.2.3 Debi Dağılımının İyileştirilmesi

Sayısal doğrulama çalışmasında deneysel verilerle uyumlu bir metodoloji elde edildikten sonra debi dağılımının iyileştirilmesi kısmına geçilmiştir. İyileştirme kapsamında her bir menfezden eşit debi elde etmek hedef olarak belirlenmiştir. Böylelikle araç içinde daha homojen hava dağılımı elde edilmiş olunacaktır. Hava hızının ve debisinin homojen olması sıcaklık ve diğer parametrelerin de homojen dağılmasına katkı sağlayacaktır. Debi dağılımının oransal olarak takip edilebilmesi için boyutsuz dağılım oranı  $\Psi$  parametresi (Denklem 4.6) ile tanımlanmıştır.

$$\text{Dağılım oranı } (\Psi) = \frac{\text{Menfez Debisi}}{\text{Toplam Debi}} \times 100 \quad (4.6)$$

Test ve HAD sonuçları incelendiğinde sol ve sağ menfezlere giden hava miktarının orta menfezlere kıyasla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Tablo 4.8’de orta kademe fan hızında Test ve HAD’ın menfezlerdeki dağılım oranları verilmiştir.

**Tablo 4.8** Orta kademe fan hızı test ve HAD debi dağılım oranları

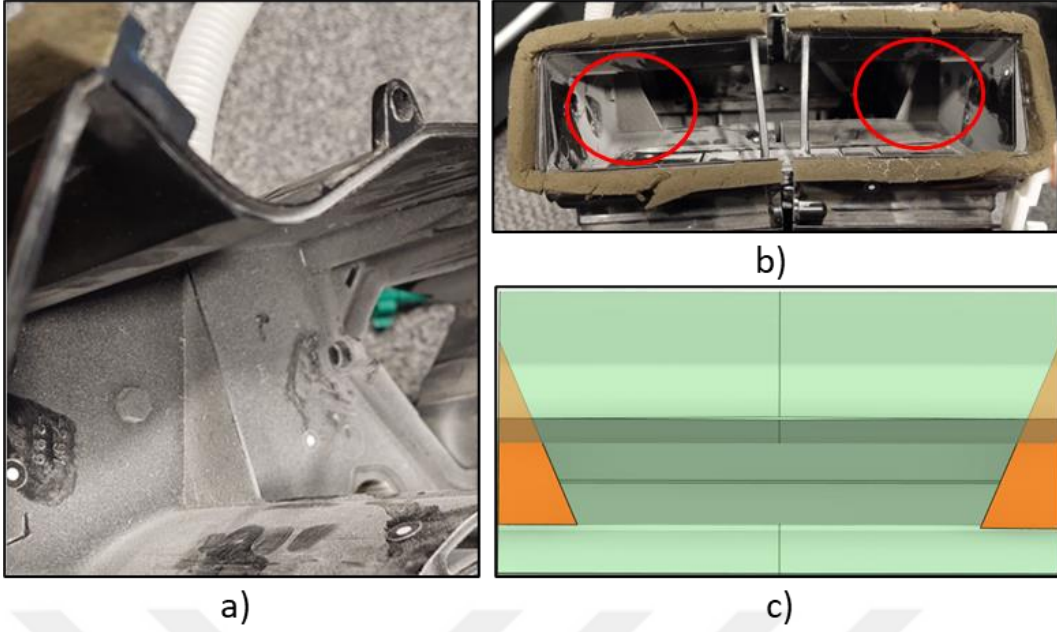
Debi Dağılımı	LL	LM	RM	RR
$\Psi_{\text{Test}}$	18	31	30	21
$\Psi_{\text{HAD}}$	21	29	29	21

Hem test hemde HAD analizlerinde orta menfezler sol ve sağ menfezelere kıyasla daha fazla debiye sahiptir. Dolayısıyla homojen debi dağılımı hedefi çerçevesinde ortadaki merkez menfezlere toplam debinin yarısı (LM+RM) kenardaki menfezlere ise diğer yarısı olacak şekilde iyileştirme elde etmek amaçlanmaktadır. Böylelikle her bir menfezde %25 (+-%1) dağılım oranına sahip olunacaktır. Tablo 4.9’da mevcut dağılım ve hedef dağılım oranları verilmiştir.

**Tablo 4.9** Orta kademe fan hızı HAD mevcut dağılım ve hedeflenen dağılım

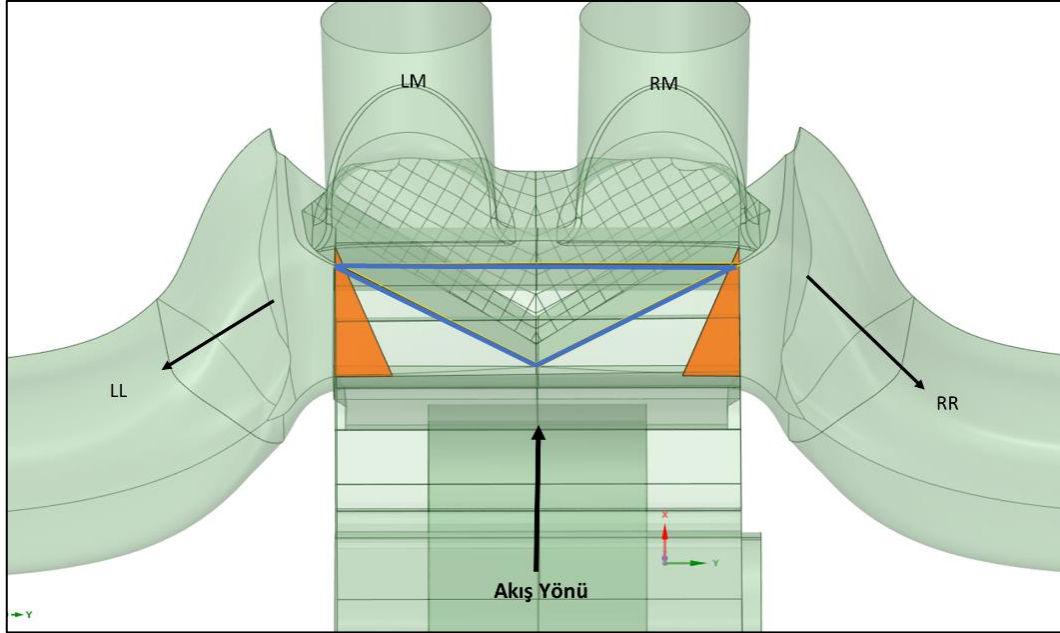
Debi Dağılımı	LL	LM	RM	RR
$\Psi_{\text{HAD,mevcut}}$	21	29	29	21
$\Psi_{\text{HAD,hedef}}$	25	25	25	25

Sistem yapısı incelendiğinde fan modülünün yüze üfleme hattına bağlandığı lokasyonda sol ve sağda olmak üzere iki adet üçgen çıta bulunduğu tespit edilmiştir. Şekil 4.28’de bu çıtaların gerçek geometride ve HAD modelindeki konumu verilmiştir.



**Şekil 4.28** Fan modülü içerisindeki üçgensel yapılar a) Test geometrisi yandan görünüm b) Test geometrisi önden görünüm c) HAD modeli önden görünüm

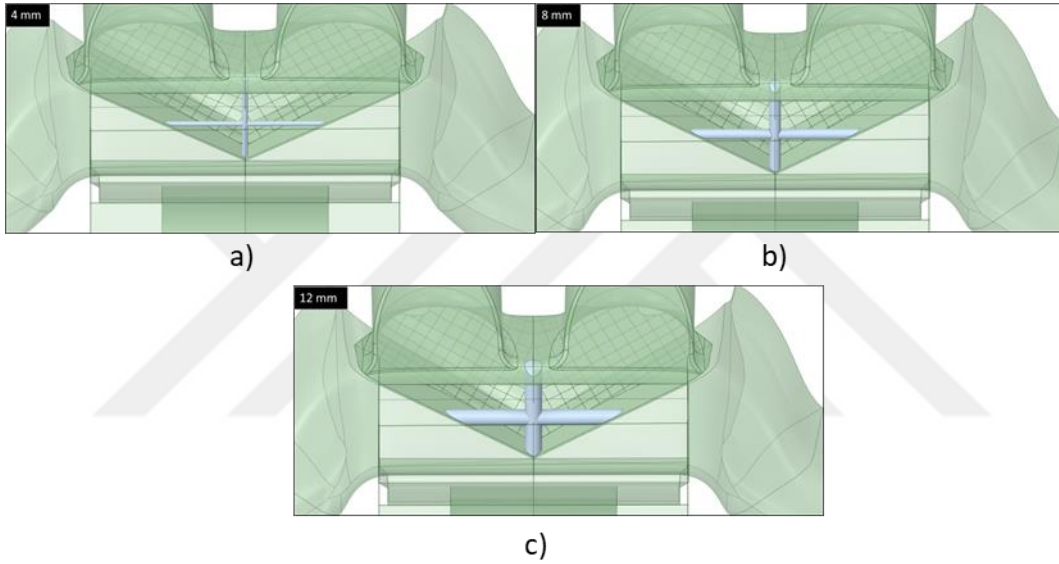
Üçgensel çitaların fan modülü ve menfez hattına bağlandığı konumdaki HAD modeli Şekil 4.29’da verilmiştir.



**Şekil 4.29** HAD modeli üçgensel yapılar ve akış yönü

Şekil 4.29’da orta menfezlere giden debi mavi çizgilerle çevrilmiş üçgensel bölmeden geçmektedir. Mavi çizgilerin sol ve sağında kalan üçgensel kısımlardan

ise sol ve sağ menfezlere debi geçişi olmaktadır. Dolayısıyla Şekil 4.29’da turuncu renk ile işaret edilen üçgensel yapıların kaldırılıp orta menfezlere giden mavi çizgili kısma da uygun bir blokaj geometrisi konulduğu takdirde orta menfezlere giden debi azalıp sol ve sağ menfezlerin debisi artacaktır. Böylelikle menfezlerdeki debi dağılımı daha homojen hale getirilmiş oluncaktır. Orta menfezlere giden kısma ilk aşamada 3 farklı blokaj geometrisi eklenmiştir. Bu geometriler silindirik iki ucuğun yatay ve dikey olarak birleştirilmesinden oluşmaktadır. Akışın simetrisinin bozulmaması için parçalar da simetrik olarak yerleştirilmiştir. İlk etapta 4 mm, 8 mm ve 12 mm çapa sahip engeller orta kısma eklenerek analiz edilmiştir. Şekil 4.30’da üç farklı engel geometrisi verilmiştir.



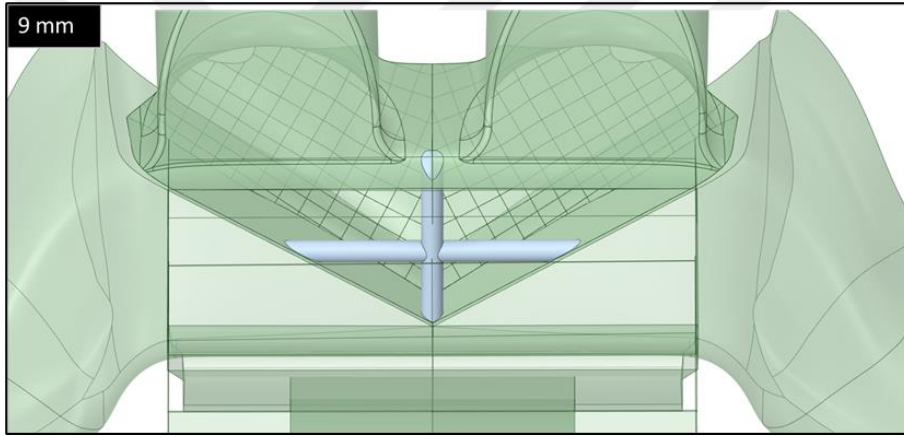
**Şekil 4.30** HAD modeli orta menfez bölümüne eklenen engel geometrileri a) 4 mm çap b) 8 mm çap c) 12 mm ap

Şekil 4.30’da verilen üç farklı engel geometrisi ile analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar debi dağılımı cinsinden Tablo 4.10 ile verilmiştir. Buna göre homojen dağılıma en yakın olan geometrinin 8 mm çapa sahip engel olduğu görülmektedir.

**Tablo 4.10** Engel geometrilerinin çaplara göre debi dağılım oranları

Analiz	LL	LM	RM	RR
$\Psi_{4 \text{ mm}}$	23	27	27	24
$\Psi_{8 \text{ mm}}$	25	26	25	24
$\Psi_{12 \text{ mm}}$	26	24	24	26

İlk aşama analizlerinde 8 mm ile homojen dağılıma yakın sonuç elde edilmiş olmasına rağmen ikinci aşamada 9 mm çap ile %25 hedefine daha da yaklaşılacağı düşünülmektedir. Dolayısıyla 9 mm çapa sahip engel geometrisi ile ilave analiz gerçekleştirilmiştir.



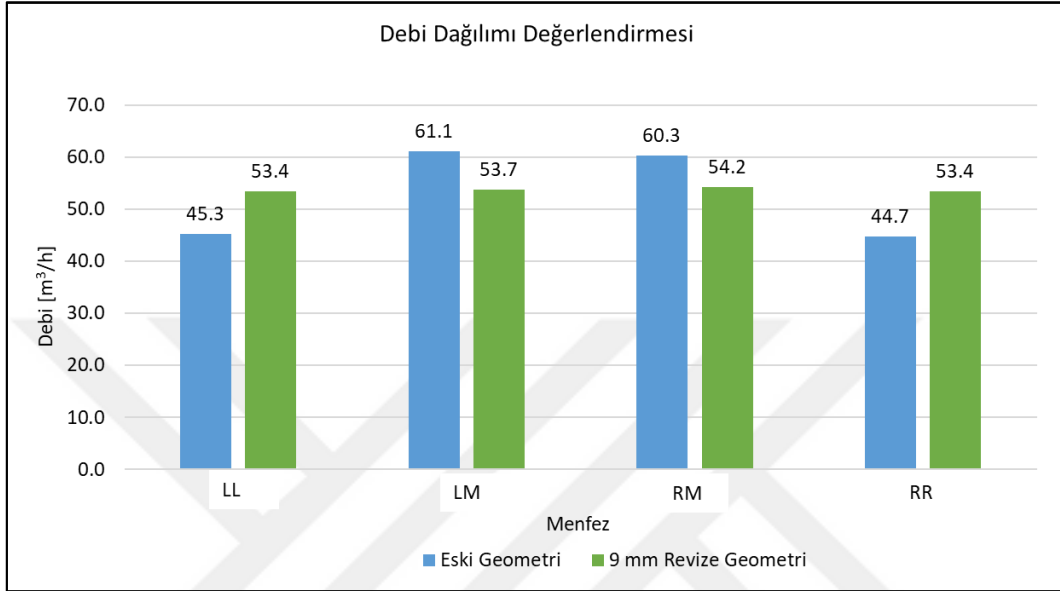
**Şekil 4.31** HAD modeli orta menfez bölümüne eklenen 9 mm çap engel geometrisi

Şekil 4.31’de 9 mm çapa sahip engel geometrisi verilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo 4.11’de verilmiştir.

**Tablo 4.11** 9 mm engel geometrisi debi dağılım sonuçları

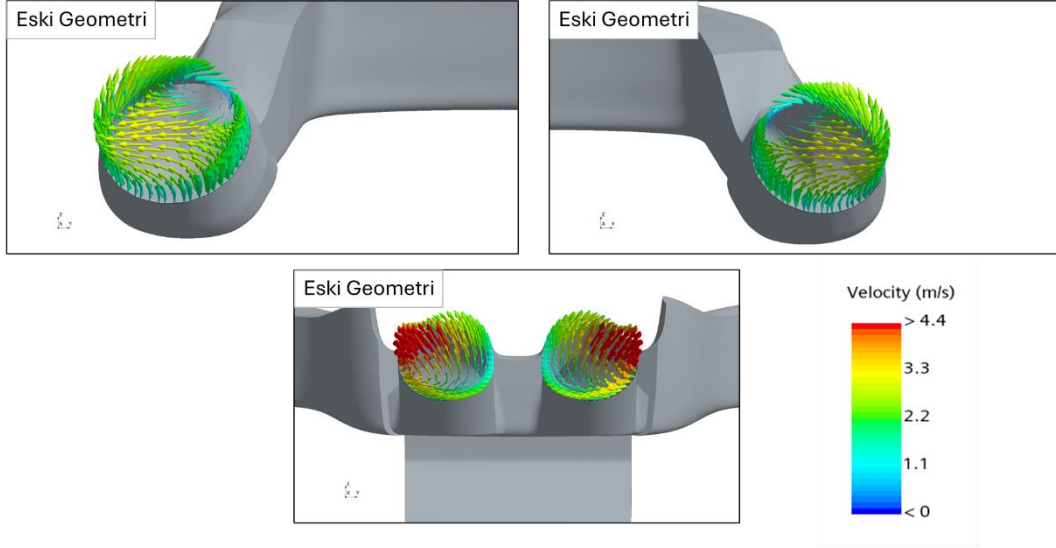
Analiz	LL	LM	RM	RR
$\Psi_{9 \text{ mm}}$	25	25	25	25

Geometrik değişiklik yapılmadan önceki debi dağılımı sonuçları ve 9 mm çapa sahip engel geometrisi ile elde edilen debi dağılımı sonuçları Şekil 4.32 ile verilmiştir. Eski geometri ve 9 mm revize geometri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde yapılan revizyonla akışın homojen hale getirildiği ortaya konmuştur.



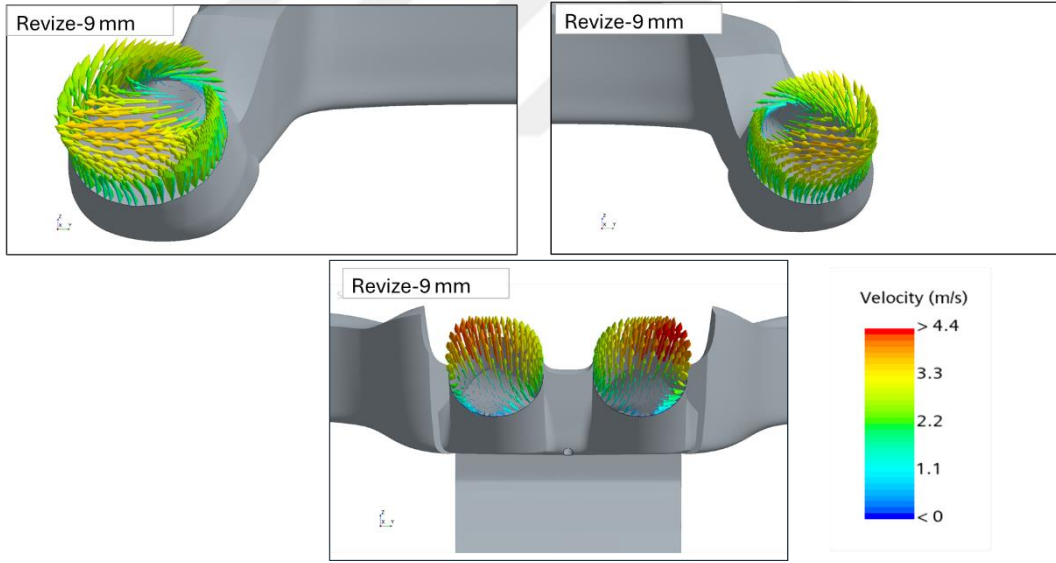
**Şekil 4.32** Orta kademe fan hızında eski geometri ve 9 mm çaplı revize engel geometrisi debi karşılaştırması

Orta seviye fan hızında eski geometri ve revize edilmiş geometri ile elde edilen konturlar ve hız vektörleri Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 ile verilmiştir. Vektör konturları aynı hız skalasında çizdirilmiştir.



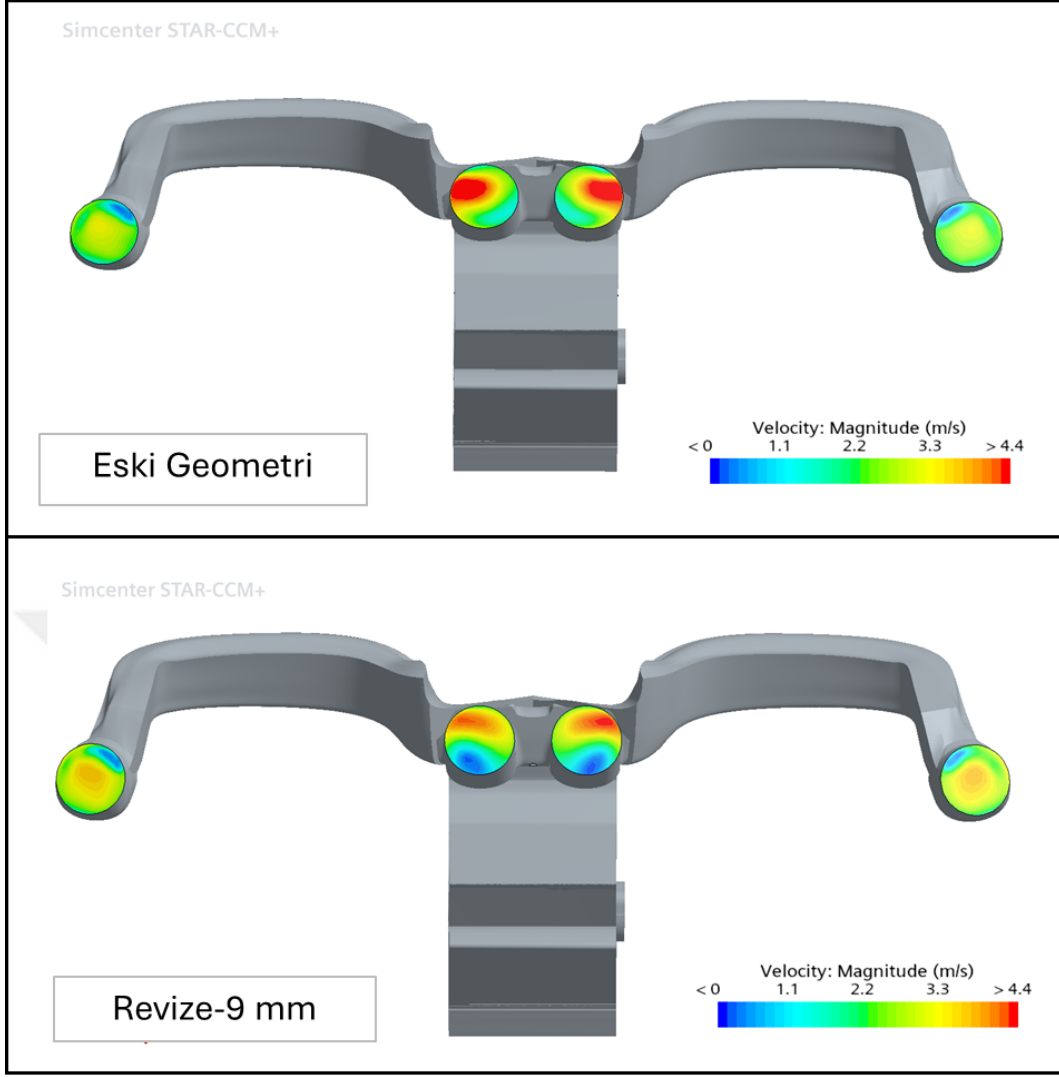
**Şekil 4.33** Eski geometri orta kademe fan hızı menfezlerdeki hız vektörleri

Eski geometri ile koşturulan analizin vektör konturları incelendiğinde orta menfezlerdeki yüksek hız, sol ve sağ menfezlerdeki düşük hız net bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 4.34** 9 mm çaplı revize geometri orta kademe fan hızı menfezlerdeki hız vektörleri

Revize edilmiş 9 mm engel geometrisi ile elde edilen sonuçların vektör konturları incelendiğinde orta menfezdeki hızların düştüğü, sol ve sağ menfezlerdeki hızların ise yükseldiği tespit edilmiştir.



**Şekil 4.35** Orta kademe fan hızı eski geometri ve 9 mm çaplı revize geometri menfezlerdeki hız konturu karşılaştırması

Menfez yüzeylerindeki hız konturları eski ve revize geometri için çizdirilmiştir. Şekil 4.35’de verilen konturlar incelendiğinde 9 mm revize geometrisinde orta menfezlerdeki hız düşmüş, sol ve sağ menfezlerdeki hız yükselmiştir.

Orta seviye fan hızında 9 mm çapa sahip engel geometrisi ile oldukça homojen sonuçlar elde edilmiştir. Düşük ve yüksek fan hızlarında da analizler koşturulmuş ve sonuçlar Tablo 4.12’de verilmiştir.

**Tablo 4.12** Düşük ve yüksek kademe fan hızları debi dağılım oranı sonuçları

Dağılım	LL	LM	RM	RR
$\Psi_{\text{Düşük fan hızı}}$	24.6	25.6	25.1	24.7
$\Psi_{\text{Yüksek fan hızı}}$	25.5	25.0	24.3	25.2

Sonuçlar incelendiğinde düşük ve yüksek fan hızlarında da (+-%1) hassasiyetle tüm menfezlerde belirlenen hedef olan %25 debi dağılımı gerçekleştirilmiştir. Böylelikle önerilen geometrinin tüm hızlarda istenilen sonucu verdiği ortaya konmuştur. Dolayısıyla yapılan iyileştirme ile tüm fan hızlarında homojen bir debi dağılımı elde edilmiştir.

### 5.1 Deneysel ve Sayısal Verilerin Kıyaslanması

Bu çalışmada binek bir otomobilin havalandırma hattı deneysel ve sayısal olarak ele alınmıştır. Deneysel çalışmada düşük, orta ve yüksek fan hızlarında test yapılmış, farklı ölçüm cihazlarının kullanım kabiliyetleri ve ölçüm performansları değerlendirilmiştir. Akabinde sayısal olarak doğrulama gerçekleştirilmiş ve belirlenen hedef doğrultusunda debi dağılımı homojen hale getirilerek iyileştirilmiştir. Deneysel ve sayısal çalışma kapsamında elde edilen bulgular ve elde edilen sonuçlar şu şekildedir:

- Deneysel çalışmada fan girişinden elde edilen toplam debi miktarı ve menfezlerden toplanarak elde edilen debi miktarı düşük, orta ve yüksek fan hızlarında sırasıyla %1.88, %1.07 ve %0.14 mertebesindedir. Bu durum sistemdeki kaçakların oldukça iyi yalıtıldığı ve kütle korunumun sağlandığını göstermektedir.
- Deneylerde pervaneli anemometrenin sıcak tel anemometresi ile ölçüm performansı değerlendirildiğinde akışın düzgün olduğu durumlarda birbirlerine yakın sonuç verdiği, türbülansın ve düzensizliklerin daha fazla olduğu durumlarda sıcak tel anemometresinin uygun sonuç vermediği ortaya konmuştur. Fan girişinden ve menfezlerden yapılan ölçümler bu durumu desteklemektedir.
- Sayısal çalışmada öncelikle doğrulama çalışması yapılmış sonrasında debinin istenilen hedef doğrultusunda dağıtılması için geometrik revizyonlar yapılmıştır.

- Fan modülünde havalandırma hattına giden kısmın sol ve sağdaki üçgensel engeller kaldırılıp orta menfezlere giden kısma engel geometrisi eklenmiştir.
- Engel geometrisi öncelikle 4, 8, 12 mm çaplarında analiz edilmiş, ikinci aşamada engel geometrisi için 9 mm çapın optimum olduğu tespit edilmiştir.
- Optimum 9 mm çaplı engel ile düşük, orta ve yüksek fan hızında her bir menfez için hedeflenen %25(+1) debi dağılımı elde edilmiştir.

Böylelikle deneysel çalışmada binek bir otomobilin havalandırma hattı için uygun ölçüm metodolojisi elde edilmiştir. Sayısal çalışma kapsamında ise yapılan doğrulama ve debi dağılımı iyileştirmesi ile hesaplamalı akışkanlar dinamiği yöntemi kullanılarak kullanışlı bir sayısal metot elde edilmiş, test gereksinimleri azaltılmış, ele alınan binek aracın ön havalandırma hattındaki debi dağılımı homojen hale getirilmiştir. Bu tez çalışmasıyla birlikte hem deneysel hem de sayısal olarak kullanışlı yöntemler literatüre kazandırılmıştır.

## **5.2 Gelecek Çalışmalar**

Gelecek çalışmalar kapsamında sistemin akustik performansı değerlendirilebilir. Ayrıca ölçüm yöntemlerinin ve deney tesisatının geliştirilmesi ile buğu çözme hattı da ilerleyen süreçte analiz edilebilir, deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirilebilir.

- [1] H. Karadeniz vd. “Bilgisayar destekli kanal tasarımı ile kanal yalıtımının değerlendirilmesi” 13. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi, İzmir, 2017
- [2] S. Ashrae, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy,” vol. 5, Jan. 1992, [Online]. Available: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10024962698>
- [3] I. Sârbu, "Thermal comfort evaluation models," Theoretical Considerations, no. 2 (43), University of Timișoara, 2007.
- [4] F. Vlk, Stavba motorových vozidel. Brno: Nakladatelství a vydavatelství Vlk, 2003. (in Czech)
- [5] A. Tomor and G. Kristóf, “Validation of a discrete model for flow distribution in Dividing-Flow manifolds: Numerical and Experimental studies,” Periodica Polytechnica Mechanical Engineering, vol. 60, no. 1, pp. 41–49, Jan. 2016, doi: 10.3311/ppme.8518.
- [6] H. Liu, P. Li, and K. Wang, “The flow downstream of a bifurcation of a flow channel for uniform flow distribution via cascade flow channel bifurcations,” Applied Thermal Engineering, vol. 81, pp. 114–127, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.02.028.
- [7] H. Liu, P. Li, J. Van Lew, and D. Juarez-Robles, “Experimental study of the flow distribution uniformity in flow distributors having novel flow channel bifurcation structures,” Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 37, pp. 142–153, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.10.015.
- [8] R. Gao, Z. Fang, A. Li, K. Liu, Z. Yang, and B. Cong, “A novel low-resistance tee of ventilation and air conditioning duct based on energy dissipation control,” Applied Thermal Engineering, vol. 132, pp. 790–800, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.107.
- [9] G. I. Bicalho, S. M. Hanriot, C. B. Maia, and L. Cabezas-Gómez, “Assessment of the fluid dynamics aspects of a vehicle ventilation system,” International Journal of Ventilation, vol. 14, no. 1, pp. 65–76, Jun. 2015, doi: 10.1080/14733315.2015.11684070.
- [10] H. G. Tao, H. X. Chen, J. L. Xie, and J. Z. Jiang, “Comparison on Simulation and Experiment of Supply Air through Metro Vehicle Air Conditioning Duct,” Applied Mechanics and Materials, vol. 44–47, pp. 1724–1728, Dec. 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.44-47.1724.
- [11] L. Tan and Y. Yuan, “Computational fluid dynamics simulation and performance optimization of an electrical vehicle Air-conditioning system,”

- Alexandria Engineering Journal, vol. 61, no. 1, pp. 315–328, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.05.001.
- [12] J. He, “Design and optimization of automotive air conditioning duct based on CFD algorithm,” *Journal of Physics Conference Series*, vol. 2386, no. 1, p. 012095, Dec. 2022, doi: 10.1088/1742-6596/2386/1/012095.
- [13] N. N. Olleh, N. N. A. Husain, N. H. M. Kamar, N. N. B. Kamsah, and N. M. I. Alhamid, “Outlets airflow velocity enhancement of an automotive HVAC duct,” *Evergreen*, vol. 8, no. 1, pp. 163–169, Mar. 2021, doi: 10.5109/4372273.
- [14] A. Patidar, S. Natarajan, and M. Pande, “CFD analysis and validation of an automotive HVAC system,” *SAE Technical Papers on CD-ROM/SAE Technical Paper Series*, Apr. 2009, doi: 10.4271/2009-01-0535.
- [15] C. H. Lin, T. Han, and V. Sumantran, “Experimental and computational studies of flow in a simplified HVAC duct,” *International Journal of Vehicle Design*, vol. 15, no. 1/2, pp. 147–165, Jan. 1994, doi: 10.1504/ijvd.1994.061913.
- [16] Measurement of fluid flow in closed conduits. Velocity area method for regular flows using Pitot static tubes, ISO 3966:2008, 2008.
- [17] Determination of Flowrate of Fluids in Closed Conduits of Circular Cross-Section - Method of Velocity Measurement at One Point of the Cross-Section, ISO 7145:1982, 1982.
- [18] Binalarda havalandırma - Havalandırma ve iklimlendirme sistemlerinin üzerindeki deney işlemleri ve ölçme metotları, TS EN 12599, 2000.
- [19] I. Caré, F. Bonthoux, and J.-R. Fontaine, “Measurement of air flow in duct by velocity measurements,” *EPJ Web of Conferences*, vol. 77, p. 00010, Jan. 2014, doi: 10.1051/epjconf/20147700010.
- [20] M. Kurth and P. Komp, "Influence of installation and operating conditions on the measurement of highpressure natural fluid flow, ultrasonic flow meters (in Czech)," *Techniky a technológia*, vol. 2, 2013.
- [21] R. A. Robinson, D. Butterfield, D. Curtis, and T. Thompson, "Problems with Pitots, Issues with flow measurement in stacks," *AIR Monitoring, Technical Report, IET Buyers' Guide 2004–2005*.
- [22] G. Dinardo, L. Fabbiano, and G. Vacca, “How to directly measure the mean flow velocity in square cross-section pipes,” *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 49, pp. 1–7, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2016.03.001.
- [23] Testo Ltd. Şti., "Sensör teknolojileri ve ölçüm teknikleri Sıcaklık, nem, hava hızı, basınç, baca gazı ve yanma verimliliği, termal görüntüleme, soğutma sistemleri," *Teknik Yazı, Testo Ltd. Şti.*
- [24] Standard Methods for Air Velocity and Airflow Measurement, ANSI/ASHRAE Standard 41.2-2018, 2018.

- [25] G. P. Russo, "Velocity and mass flow by pressure measurements," in *Aerodynamic Measurements*, G. P. Russo, Ed. Woodhead Publishing, 2011, pp. 25-65. doi: 10.1533/9780857093868.25.
- [26] A. L. Gerhart, J. I. Hochstein, and P. M. Gerhart, Munson, Young and Okiishi's fundamentals of fluid mechanics. John Wiley & Sons, 2020.
- [27] ANSYS Inc., ANSYS 2024 R1 Fluent theory guide, Canonsburg, PA : ANSYS Inc., 2024.[Çevrimiçi]. Mevcut:<https://www.ansys.com>
- [28] R. Franzke, S. Sebben, T. Bark, E. Willeson, and A. Broniewicz, "Evaluation of the multiple reference frame approach for the modelling of an axial cooling fan," *Energies*, vol. 12, no. 15, p. 2934, Jul. 2019, doi: 10.3390/en12152934.
- [29] F.R. Menter and R. Lechner, "Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD" Ansys, Germany GmbH A. Matyushenko, NTS, St. Petersburg, Russia, 2021



## TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

---

### **Konferans Bildirileri**

1. M. Y. Erdem, H. Demir, and Z. Gemici, "Experimental Investigation of Flow Distribution in a Passenger Car Ventilation System," in Proceedings of the 4th International Congress of Modern Scientific Research 2025, Chirchik, Uzbekistan, April 08-10, 2025, pp. 614-622. [Online]. Available: <https://www.scienceuzbekistan.org/tr/uzbekistan>

### **Projeler**

1. Binek bir aracın havalandırma sisteminde akış dağılımının sayısal ve deneysel olarak incelenmesi ve optimizasyonu – Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü, Proje Kodu: FBA-2024-6159