



T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



Tam Elektrikli Bir Otobüs İklimlendirme Kanalı'nın HAD ile Karşılaştırmalı
Analizi ve Geometri Optimizasyonu

Eren Barın- 032280032

PROJE II

BURSA 2026

T.C.
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ

Tam Elektrikli Bir Otobüs İklimlendirme Kanalının HAD ile Karşılaştırmalı
Analizi ve Geometri Optimizasyonu

Eren Barın

032280032

Projenin Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi EMRE BULUT

ÖZET

Toplu taşıma araçlarında ısı konforu ve enerji verimliliğinin sağlanması, iklimlendirme hava kanallarının aerodinamik tasarımına doğrudan bağlıdır. Bu çalışmada, ticari bir otobüs iklimlendirme kanalının performansı Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği araçları kullanılarak incelenmiş ve menfez geometrilerinin çok kriterli optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Araştırma kapsamında oluşturulan sayısal model, gerçek araç üzerinden alınan hız verileri ile doğrulanmış ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata değerinin %10'un altında kaldığı kanıtlanmıştır. Mevcut kanal tasarımının analiz sonuçları, hava dağılımının Weltens Homojenlik İndeksi açısından başarılı olduğunu, ancak 115.85 Pa gibi yüksek bir basınç kaybı üreterek fan enerji tüketimini artırdığını ortaya koymuştur. Bu problemi çözmek amacıyla dört farklı alternatif menfez geometrisi geliştirilmiştir. Analizler sonucunda, kanal içerisindeki basınç düşüşünün engellenmesi ile havanın homojen dağıtılması arasında zıt yönlü ilişki olduğu tespit edilmiştir. Geometrilerin objektif olarak sıralanabilmesi amacıyla eşit ağırlıklandırma senaryosu ile COPRAS yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon sonucunda "Sona Doğru Daralan Menfez" tasarımı en iyi model olarak seçilmiştir. Optimum geometri, basınç direncini %45 oranında azaltarak 63,62 Pa seviyesine indirmiş ve enerji kazanımı sağlamıştır. Elde edilen bu tasarımın, gelecekte yapılacak otobüs HVAC çalışmalarında sürtünme kayıplarını en aza indiren temel bir model oluşturması hedeflenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Otobüs İklimlendirmesi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, COPRAS Optimizasyonu, Weltens Homojenlik İndeksi, Aerodinamik Analiz.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

1.	GİRİŞ	1
2.	MATERYAL VE YÖNTEM	4
2.1	Araç Geometrisi ve İklimlendirme Sistemi Altyapısı	4
2.2	Geometrik Modeller ve Tasarım Modifikasyonları	5
2.2.1	Referans Hava Kanalı Geometrisi	6
2.2.2	Revize Edilmiş Menfez Konfigürasyonları	6
2.3	Sayısal Modelleme Metodolojisi.....	9
2.3.1	Çözüm Ağı Oluşturma	9
2.3.2	Yönetici Denklemler ve Türbülans Modeli.....	9
2.3.3	Sınır Koşulları ve Çözücü Ayarları.....	11
2.4	Deneysel Ölçüm Düzenegi ve Validasyon Prosedürü.....	11
2.4.1	Test Aracı ve Sensör Yerleşimleri.....	12
2.4.2	Validasyon Kriterleri	14
2.5	Optimizasyon ve Çok Kriterli Karar Verme	14
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA.....	15
3.1	Sayısal Modelin Deneysel Verilerle Doğrulanması	15
3.2	Referans Tasarımın Akış Karakteristikleri	15
3.3	Yeni Menfez Geometrilerinin Akış Karakteristikleri	16
3.3.1	Dikdörtgen Menfez Tasarımının Etkisi.....	17
3.3.2	Kesiti Daralan Menfez Tasarımının Etkisi.....	18
3.3.3	Kesiti Genişleyen Menfez Tasarımının Etkisi.....	19
3.3.4	Ardışık Menfez Tasarımının Etkisi.....	19
3.4	Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Optimum Menfez Tasarımı	20
4.	SONUÇLAR	21
5.	REFERANSLAR.....	22

Şekiller Dizini

Sayfa No

Şekil 1 Avrupa' da Öngörülen Market Büyüklüğü.....	1
Şekil 2 Karsan Atak Aracı.....	4
Şekil 3 Atak Aracı Kabini.....	5
Şekil 4 Atak Aracı Gerçek Hava Menfezi	5
Şekil 5 Referans Geometri	6
Şekil 6 Dikdörtgen Menfez.....	7
Şekil 7 Ardışık Menfez	7
Şekil 8 Kesiti Genişleyen Menfez.....	8
Şekil 9 Kesiti Daralan Menfez	8
Şekil 10 Hava Kanalı İçin Örnek Mesh Yapısı.....	9
Şekil 11 Atak Aracı Arka Bölüm Hava Kanalı.....	12
Şekil 12 Testo 405i Anemometre	13
Şekil 13 Hava Menfezi Ölçümü	13
Şekil 14 Daralan Menfez Basınç Dağılımı	18
Şekil 15 Daralan Menfez Hız Değişimi	19

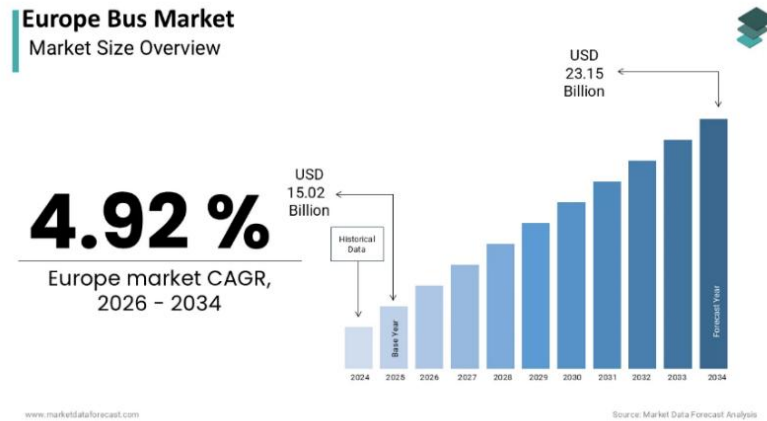
Tablolar Dizini

Sayfa No

Tablo 1 Test verisi ve analiz verisi karşılaştırması.....	15
Tablo 2 Menfezlere ait yüzde homojenlik değerleri.....	16
Tablo 3 Menfezlere ait maksimum hız değerleri.....	17
Tablo 4 Menfezlere ait basınç kaybı değerleri	17
Tablo 5 Menfezlere ait COPRAS sonuçları.....	20

1. GİRİŞ

Hızla artan kentleşme ve nüfus yoğunluğu, şehir içi toplu taşıma sistemlerine olan talebi her geçen gün artırmaktadır. Bu talep artışı, sektörün ekonomik büyüme ivmesine de güçlü bir şekilde yansımaktadır; güncel pazar araştırmaları, Avrupa otobüs pazarının 2026 ile 2034 yılları arasında %4,92'lik bileşik yıllık büyüme oranı sergileyerek, bu sekiz yıllık periyotta toplamda yaklaşık %54'lük bir büyüme ile 15,02 milyar ABD dolarından 23,15 milyar ABD doları hacmine ulaşacağını öngörmektedir [1]. Giderek büyüyen ve rekabetin arttığı bu pazarda, üreticiler için yolcu memnuniyetini ve seyahat kalitesini belirleyen en kritik unsurların başında kabin içi termal konfor gelmektedir. Otobüslerde iklimlendirme sistemleri, sadece yolculara sağlıklı ve konforlu bir ortam sunmakla kalmaz, aynı zamanda aracın toplam enerji tüketiminde de büyük bir paya sahiptir. Bu nedenle, HVAC sistemlerinin enerji verimliliğini artırmak ve termal konfor standartlarını optimize etmek, büyüyen pazarda rekabet avantajı sağlamak isteyen ticari araç üreticileri ve araştırmacılar için öncelikli bir mühendislik problemi haline gelmiştir.



Şekil 1 Avrupa' da Öngörülen Market Büyüklüğü

Bir HVAC sisteminin performansı yalnızca soğutma/ısıtma kapasitesine değil, aynı zamanda şartlandırılmış havanın kabin içine nasıl dağıtıldığına da doğrudan bağlıdır. Hava kanalı tasarımı, bu dağılımın verimliliğini belirleyen en temel unsurdur. Geleneksel şehir içi otobüs tasarımlarında, uzunlamasına yerleştirilmiş hava kanallarından kabin

içine üflenlen havanın homojen olmaması, otobüsün ön ve arka kısımları arasında ciddi sıcaklık farklarına yol açmaktadır. Ayrıca, kanal içi akış ayrışmaları ve sürtünme kaynaklı basınç kayıpları, fan motorlarının gereğinden fazla çalışmasına neden olarak sistemin genel enerji verimliliğini düşürmektedir. Bu bağlamda, hava kanallarının ve menfez açıklıklarının aerodinamik açıdan optimize edilmesi hem akış homojenliğini sağlamak hem de basınç düşümünü minimize etmek için kritik bir gerekliliktir.

Literatürde, araç içi iklimlendirme sistemlerinin iyileştirilmesine yönelik Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği tabanlı birçok çalışma bulunmaktadır. Araştırmacıların büyük bir kısmı doğrudan kabin içi hava hızlarına ve sıcaklık dağılımlarına odaklanırken [2, 3], bazı çalışmalar hava kanalı geometrisinin akış karakteristikleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Örneğin Embiale ve arkadaşları [4], farklı kanal kesitlerinin basınç kayıplarına etkisini sayısal olarak analiz etmiş ve kesit değişimlerinin önemini vurgulamıştır. Benzer şekilde, Najafi ve arkadaşları [5] tarafından yapılan bir başka çalışmada, dikdörtgen hava kanalı dirseklerindeki akış ayrışmaları ve basınç kayıpları sayısal olarak incelenmiştir. Yönlendirici kanatçıkların kullanımıyla kanal içi akış direncinin nasıl azaltılabileceği araştırılmıştır. Ayrıca, araç havalandırma sistemleri üzerine yapılan güncel bir vaka çalışmasında [10], bir yolcu otobüsünün kompartmanındaki hava akışının sayısal simülasyonu yaz aylarında farkını izleyecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sayısal modelin performansını doğrulamak için deneysel bir ölçüm de yapılmıştır. Benzer şekilde [11] Bode ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada ise Sayısal model, Lazer Doppler Hız Ölçümü ve Parçacık Görüntüleme Hız Ölçümü ölçümleri de dahil olmak üzere deneysel veriler kullanılarak doğrulanmıştır. Bir diğer önemli çalışmada ise [15], otobüs hava kanalı tasarımı ve en uygun türbülans modelinin seçimi üzerine kapsamlı sayısal ve deneysel doğrulamalar gerçekleştirilmiştir. Yapılan saha testleri sonucunda, optimize edilen hava kanalı uygulamasının araç içi sıcaklık dağılımını daha homojen hale getirdiği ve yolcu konforunu doğrudan artırdığı kanıtlanmıştır. Benzer şekilde, şehir içi otobüs havalandırma kanallarında basınç düşüşünü en aza indirmeyi amaçlayan bir diğer çalışmada [16], farklı malzeme ve konstrüksiyon alternatiflerinin performansları HAD simülasyonlarıyla karşılaştırılmış; optimize edilen kanal yapılarının, havanın yolculara daha az kayıpla ve daha dengeli bir şekilde ulaşmasını sağladığı kanıtlanmıştır. "Benzer bir yaklaşımla [17] numaralı çalışmada, bir yolcu otobüsündeki hava şartlandırma

sisteminin performansı deneysel veriler ve HAD simülasyonları kullanılarak analiz edilmiş ve sistemin kabin içindeki soğutma kapasitesini en doğru şekilde modelleyebilmek için farklı türbülans modelleri test edilerek doğrulanmıştır. Ayrıca farklı bir araştırmada [18], otobüs iklimlendirme ünitelerinin ve kanal geometrilerinin kabin içi hava dağılımına olan etkisi HAD simülasyonları ve gerçek saha testleriyle incelenmiştir. Söz konusu çalışmada, geliştirilen basitleştirilmiş sayısal modelleme yaklaşımıyla hava akışı optimize edilmiş ve endüstriyel kullanıma uygun, homojen dağılımlı, hafif hava kanalı tasarımları geliştirilmiştir. Bu çalışmalar, HAD yaklaşımının HVAC kanal optimizasyonunda güçlü ve güvenilir bir araç olduğunu açıkça ortaya koymaktadır.

Mevcut literatürdeki HAD çalışmalarının büyük çoğunluğu idealize edilmiş sayısal modellere dayanmaktadır. Endüstriyel düzeyde tam ölçekli bir otobüs üzerinde deneysel testler gerçekleştirmenin zorluğu ve maliyeti nedeniyle, gerçek araç verileriyle doğrulanmış tasarımlar daha azdır. Ayrıca, havanın kanala girdiği ilk bölgelerdeki menfez daralmalarının veya genişlemelerinin, otobüsün tüm uzunluğu boyunca kütleli debi dağılımına olan etkisi büyük ölçüde incelenmeden kalmıştır. Sayısal öngörülerin yerine doğrudan saha ölçümleriyle desteklenmiş bir optimizasyon sunma ihtiyacı bu çalışmanın temel çıkış noktasını oluşturmaktadır.

Bu doğrultuda, çalışmada ticari bir şehir içi otobüsün HVAC hava kanalı sistemi hem deneysel hem de sayısal olarak incelenmiştir. İlk aşamada, orijinal hava kanalı geometrisi üç boyutlu modellenmiş ve gerçek araç üzerinde anemometreler ile gerçekleştirilen hassas ölçüm sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Sayısal modelin doğruluğu kanıtlandıktan sonra, akış homojenliğini artırmak ve sistem performansını optimize etmek amacıyla menfez yapıları üzerinde farklı alternatif geometriler tasarlanmış ve yeni tasarım alternatiflerinin akış karakteristiği üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın nihai aşamasında, farklı geometrik tasarımlardan elde edilen performans parametreleri, Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan COPRAS algoritması kullanılarak sistematik bir şekilde değerlendirilmiş ve optimum tasarım objektif bir yaklaşımla belirlenmiştir. Bu çalışma, endüstriyel iklimlendirme sistemlerinin iyileştirilmesinde HAD, deneysel validasyon ve analitik karar verme araçlarının entegre edildiği kapsamlı bir metodoloji sunmaktadır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1 Araç Geometrisi ve İklimlendirme Sistemi Altyapısı

Bu çalışmada incelenen hava kanalı, KARSAN tarafından üretilen elektrikli 8 metre uzunluğundaki ticari bir otobüs olan e-ATAK aracına aittir. Araç gövdesi, aerodinamik ve ergonomik kısıtlamalar göz önüne alınarak tasarlanmış olup, iç kabin toplam 61 yolcu kapasitesine hizmet verecek şekilde tasarlanmıştır. Kabin içi net hava hacmi yaklaşık 35 m³ tür. Bu geniş ve uzun hacim boyunca homojen bir sıcaklık ve taze hava dağılımı sağlamak, sistemin termal performansını belirleyen kritik unsurdur.



Şekil 2 Karsan Atak Aracı

Otobüsün kabin içi termal konforu, aracın tavanına entegre edilmiş merkezi bir iklimlendirme ünitesi tarafından sağlanmaktadır. Temel bir buhar sıkıştırırmalı soğutma çevrimi prensibiyle çalışan bu sistem kompresör, kondenser, genleşme valfi ve evaporatör bileşenlerinden oluşmaktadır. Soğutma modunda çevrim sırasında ortamdan ısı çeken evaporatör bataryalarından geçirilen hava, filtrelenip şartlandırılarak istenen sıcaklık değerine getirilir. Şartlandırılmış bu hava, sistemin üfleme fanları aracılığıyla yüksek bir kinetik enerjiyle ana dağıtım portuna ve oradan da otobüsün iç tavan yapısının sağ ve sol kenarları boyunca simetrik olarak uzanan hava kanallarına basılır.



Şekil 3 Atak Aracı Kabini

Evaporatör fanlarından ana kanallara giren hava, kanal boyunca ilerleyerek belirli aralıklarla yerleştirilmiş menfezler vasıtasıyla yukarıdan aşağıya doğru yolcu kabinine aktarılır. Bu çalışmanın temel hesaplama alanını, HVAC ünitesinin üfleme çıkışından başlayarak otobüsün arka kısmına kadar uzanan ve üzerindeki menfezleri barındıran bu hava kanalı geometrisi oluşturmaktadır. Referans araç üzerinde yer alan orijinal tasarımda, kanalın toplam uzunluğu 7,2 metre olup, üzerinde havayı kabine yönlendiren 102 adet menfez bulunmaktadır.



Şekil 4 Atak Aracı Gerçek Hava Menfezi

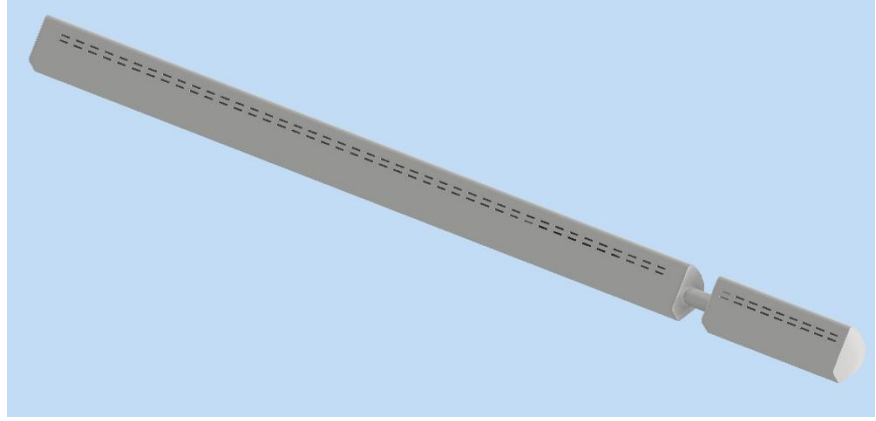
2.2 Geometrik Modeller ve Tasarım Modifikasyonları

Otobüs kabin içi hava dağılımı üzerinde menfez geometrisinin etkisini incelemek amacıyla beş farklı menfez konfigürasyonu geliştirilmiş ve Hesaplamalı Akışkanlar

Dinamiği (HAD) yöntemiyle analiz edilmiştir. Geometriler; hem gerçek araç montaj kısıtlamalarını yansıtacak hem de potansiyel tasarım iyileştirmelerini kapsayacak şekilde tasarlanmıştır. Tüm konfigürasyonlar özdeş kanal giriş koşullarını ve kabin geometrisini paylaşmakta olup gözlemlenen akış davranışı farklılıklarının yalnızca menfez geometrisi değişkeninden kaynaklandığı güvence altına alınmıştır.

2.2.1 Referans Hava Kanalı Geometrisi

Referans geometri, üretim aracında kullanılan menfez konfigürasyonundan doğrudan elde edilmiştir. Gerçek araç montajında menfez ünitesi, hava dağıtım kanalının uzunlamasına eksenini boyunca sıralı çift delik düzenlemelerinden oluşmaktadır.



Şekil 5 Referans Geometri

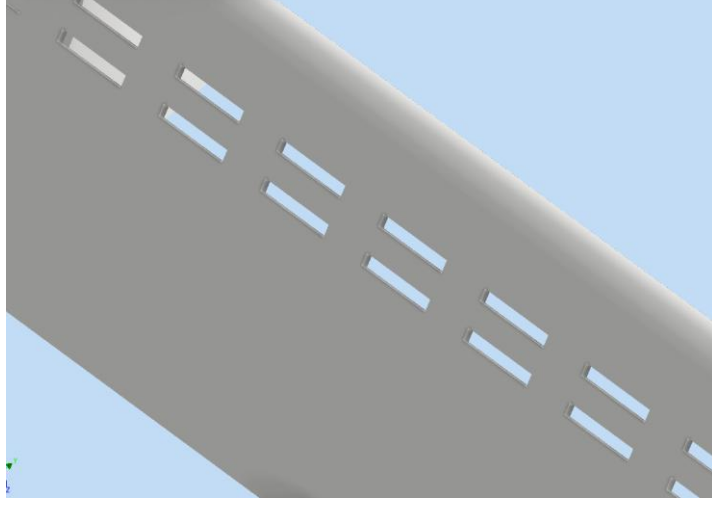
2.2.2 Revize Edilmiş Menfez Konfigürasyonları

Açıklık şekli, boyutu ve dağılım örüntüsüne yönelik değişikliklerin aerodinamik etkilerini araştırmak amacıyla dört adet revize menfez geometrisi geliştirilmiştir. Her tasarım, kanal uzunluğu boyunca akış tekdüzeliği ve basınç geri kazanımının belirli bir yönünü hedef almaktadır.

2.2.2.1 Dikdörtgen Menfez Geometrisi

Bu konfigürasyonda referans menfezi toplam açık alana sahip dikdörtgen açıklıklarla değiştirilmiştir. Dikdörtgen kesitli açıklıklara geçiş, her bir açıklık kenarındaki yerel akış ayrılması karakteristiğini değiştirerek boşaltma katsayılarını ve kabin içindeki hava yönelimini etkileyebilmektedir. Bu geometri, boyut veya konumsal

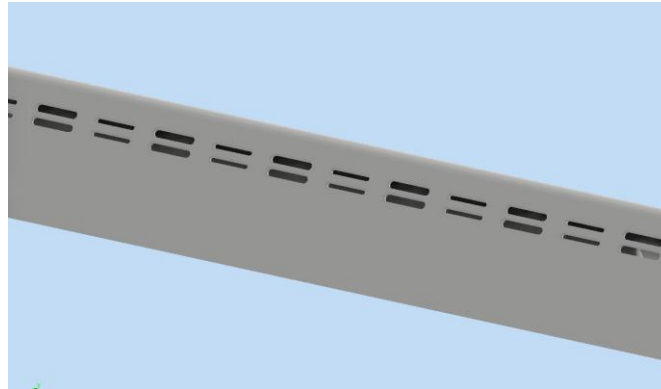
değişkenlerden bağımsız olarak iç akış dağılımının açıklık şekline olan duyarlılığının değerlendirilmesini sağlamaktadır.



Şekil 6 Dikdörtgen Menfez

2.2.2.2 Ardışık Menfez Geometrisi

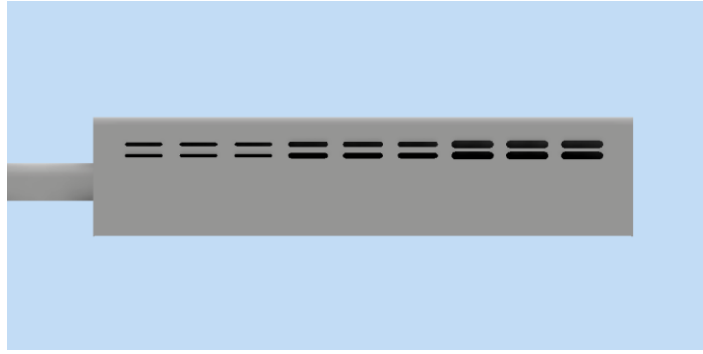
Bu konfigürasyon, menfez uzunluğu boyunca iki farklı delik boyutunun periyodik olarak dönüşümlü biçimde sıralandığı bir düzenleme içermektedir. Küçük delikler referans geometriyle aynı çapa sahipken, büyük delikler referans delik sınırına +3 mm düzgün radyal öteleme uygulanmasıyla elde edilmiştir. İki boyutun dönüşümlü yerleşimi, düzgün olmayan bir açık alan dağılımı oluşturmakta ve bu sayede farklı yerel hız değerlerinin genel akış tekdüzeliği üzerindeki etkisinin incelenmesine imkân tanımaktadır.



Şekil 7 Ardışık Menfez

2.2.2.3 Kesiti Genişleyen Menfez Geometrisi

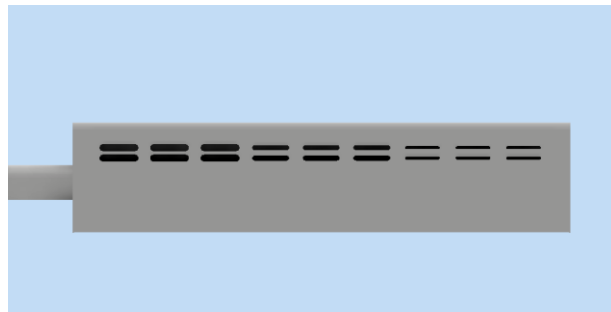
Bu konfigürasyonda açıklıklar, kanal girişinden uzak uca doğru büyümektedir. Her bir ardışık deliğe uygulanan radyal öteleme miktarı +1 mm'lik aşamalarla artmaktadır. İlk açıklıkta 0 mm olan öteleme, son açıklıkta +5 mm'ye. Bu kademeli genişleme, kanal boyunca beklenen basınç geri kazanımını telafi etmek amacıyla tasarlanmıştır. Aksi takdirde bu basınç artışı uzak uçtaki çıkışlarda yüksek debi değerlerine yol açmaktadır. Uzak uca doğru yerel açık alanın artırılmasıyla tüm açıklıklar boyunca daha tekdüze bir uzunlamasına kütle debisi dağılımı elde edilmesi hedeflenmektedir.



Şekil 8 Kesiti Genişleyen Menfez

2.2.2.4 Kesiti Daralan Menfez Geometrisi

Bu konfigürasyon, kesiti genişleyen ile geometrik olarak tümleyen bir yapı sergilemektedir. Aynı kademeli öteleme dizisini ters sırayla uygulamaktadır. Buna göre girişe yakın uçta daha büyük açıklıklar yer alırken, uzak uca doğru açıklıklar giderek küçülmektedir. Kesiti Daralan geometri, bu nedenle Kesiti Genişleyen geometri ile karşıt bir durum olarak konumlandırılmakta ve açıklık boyutu gradyanının yönünün akış dağılımı karakteristikleri üzerindeki duyarlılığının değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.

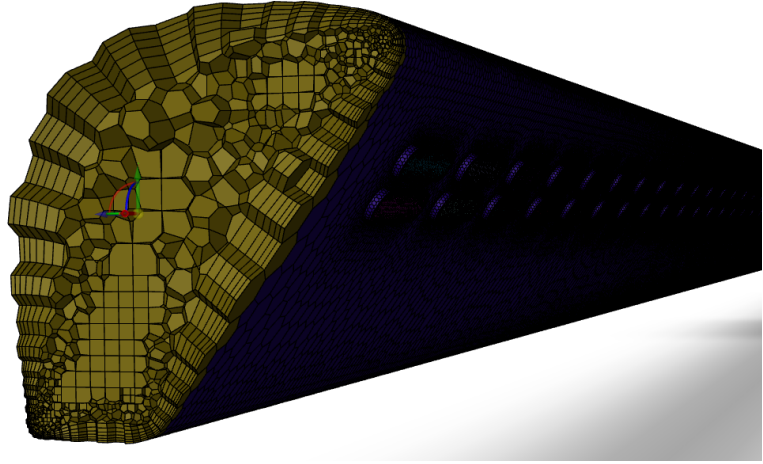


Şekil 9 Kesiti Daralan Menfez

2.3 Sayısal Modelleme Metodolojisi

2.3.1 Çözüm Ağı Oluşturma

Sayısal analizlerin doğruluğu ve yakınsama performansı doğrudan oluşturulan çözüm ağının kalitesine bağlıdır. Bu çalışmada hava kanalı ve menfezlerin geometrik detaylarını yakalayabilmek adına Şekil 10’da kesiti sunular Poly-Hexcore hücre yapısına sahip bir çözüm ağı oluşturulmuştur. Şekilden görüleceği üzere kanalın merkez bölgelerindeki ana akış hacmi kübik hücrelerle doldurularak sahte difüzyon hataları en aza indirilmiştir. Çeperlere ve eğimli geometrilere doğru geçişler ise çokyüzlü hücrelerle sağlanmıştır. Toplam 2.445.725 adet hücre ve yaklaşık 7.781.434 adet düğüm noktası bulunmaktadır. Sınır tabaka bölgelerinde duvar sürtünmelerini hassas bir şekilde çözebilmek için cidar boyunca inflation katmanları atılmış ve y^+ değerleri $k - \omega$ SST türbülans modelinin otomatik duvar fonksiyonları ile uyumlu olacak seviyelerde tutulmuştur. Mesh kalitesi incelendiğinde ise minimum ortogonalite kalitesinin kabul edilebilir sınırların içerisinde 0,1307 değerine ulaştığı ve maksimum en-boy oranının 49,89 seviyesinde kaldığı teyit edilmiştir. Bu metrikler, elde edilecek sayısal sonuçların yüksek çözünürlüğe sahip olduğunu ve sahte difüzyon hatalarının en aza indirildiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 10 Hava Kanalı İçin Örnek Mesh Yapısı

2.3.2 Yönetici Denklemler ve Türbülans Modeli

Hava kanalı içindeki akışkan hızı düşük olduğundan, sistem içindeki akış üç boyutlu, sıkıştırılamaz ve sürekli rejimde kabul edilmiştir. Ayrıca, sadece kanal içi

kütlesel debi dağılımı ve aerodinamik basınç kayıpları hedeflendiğinden, sistem izotermal olarak ele alınmıştır. Bu fiziksel kabuller altında, akış alanını yöneten kütle ve momentumun korunumu denklemleri çözülmüştür.

Süreklilik denklemi [12]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum denklemi [12]:

$$\rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

Kanal sisteminde, ana hattın menfezlere geçiş noktalarında ani kesit daralmaları ve akış yönlenmeleri meydana gelmektedir. Bu durum, sınır tabaka ayrışmalarına, şiddetli ters basınç gradyanlarına ve yüksek türbülanslı girdap oluşumlarına neden olmaktadır. Bu karmaşık akış karakteristiğini geleneksel modellerle çözmek, menfez çıkışlarındaki kütlesel debi dengesizliklerinin hatalı hesaplanmasına yol açabilmektedir. Bu nedenle çalışmada, RANS denklemlerinin kapatılması için literatürde cidar yakınındaki akış ayrışmalarını modellemedeki yüksek başarısıyla bilinen $k-\omega$ SST türbülans modeli tercih edilmiştir.

Menter tarafından geliştirilen $k-\omega$ SST modeli [13], cidar yakınındaki alt tabakalarda standart $k-\omega$ modelinin üstün çözünürlüğünü kullanırken, serbest akış bölgesinde standart $k-\varepsilon$ modelinin [14] kararlılığına geçiş yaparak her iki modelin en güçlü yönlerini birleştirmektedir. Bu karma yaklaşım, taşıma denklemlerine eklenen bir harmanlama fonksiyonu ile sağlanır. SST modeli, türbülanslı kinetik enerji ve spesifik sönümlenme oranı olmak üzere iki adet ek taşıma denkleminin çözülmesini gerektirir.

Türbülanslı kinetik enerji” k ” taşıma denklemi [13]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]$$

(3)

Spesifik sönümlenme oranı” ω “taşıma denklemi [13]:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j \omega)}{\partial x_j} = \frac{\alpha}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (4)$$

2.3.3 Sınır Koşulları ve Çözücü Ayarları

Gerçek araç koşullarını sayısal ortama en doğru şekilde yansıtabilmek amacıyla sınır koşulları referans iklimlendirme sistemi üreticisinden alınan blower verileri ile belirlenmiştir. Sistemin ana kanal girişine kütleli debi değeri 0,61 kg/s olarak tanımlanmıştır. Havanın yolcu kabinine aktarıldığı tüm menfez çıkışlarında ise atmosfer basıncına açılma koşulunu simüle etmek üzere basınç çıkışı sınır koşulu uygulanmış ve manometrik basınç 0 Pa olarak girilmiştir. Kanal çeperlerinde sürtünmeli akışı modellemek için kaymaz duvar koşulu aktif edilmiştir.

Sayısal hesaplamalar ANSYS Fluent yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, kütle ve momentum denklemlerinin çözümü için ayrıklaştırma şemaları ikinci derece doğruluk ile ayarlanmıştır. Basınç ve hız kuplajı sağlanarak yakınsama kriteri tüm denklemler için 10^{-4} değerinin altına inene kadar iterasyonlara devam edilmiştir.

2.4 Deneyisel Ölçüm Düzeneği ve Validasyon Prosedürü

Sayısal modelleme aşamasında elde edilen sonuçların fiziksel geçerliliğini kanıtlamak amacıyla, gerçek test otobüsü üzerinde yerinde deneyisel ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelin güvenilirliği kanıtlandıktan sonra, yenilenmiş yeni menfez geometrilerinin analizlerine geçilmiştir.



Şekil 11 Atak Aracı Arka Bölüm Hava Kanalı

2.4.1 Test Aracı ve Sensör Yerleşimleri

Sayısal simülasyon sonuçlarının deneysel olarak doğrulanması amacıyla ölçümler referans menfez geometrisi için yapılmıştır. Test koşullarının tekrarlanabilirliğini ve simülasyon sınır koşullarıyla tutarlılığını sağlamak için araç kliması 20 °C'ye şartlandırılmış, kabin fanı ise maksimum kapasitede çalıştırılmıştır. Bu sayede kanal girişindeki kütleli debi ve sıcaklık değerlerinin sayısal modelde tanımlanan değerlerle örtüşmesi sağlanmıştır.

Hava hızı ölçümleri, ısı anemometre prensibine dayalı Testo 405i taşınabilir hız ölçüm cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testo 405i; 0–10 m/s ölçüm aralığında $\pm 0,1$ m/s doğruluk değerine sahip olup düşük hızlı iç mekân hava akışı ölçümlerinde yaygın biçimde tercih edilmektedir. Cihaz, Testo tescilli akıllı telefon uygulaması Testo Smart App aracılığıyla kablosuz veri kaydı imkânı sunmaktadır. Ölçüm verileri zamana bağlı kayıtlar hâlinde raporlanabilmektedir.



Şekil 12 Testo 405i Anemometre

Ölçüm noktaları, menfez uzunluğu boyunca beşer delik aralığında seçilmiştir. Prob ucu, her ölçüm noktasında doğrudan ilgili deliğin çıkışına konumlandırılmıştır. Her bir ölçüm noktasında yaklaşık 5 dakikalık sürekli kayıt alınmıştır. Bu süre zarfında hava hızının kararlı hal değerine ulaştığı ve istatistiksel olarak sabit kaldığı teyit edilmiştir. Hız sinyalindeki ani dalgalanmalar ve geçici rejim etkileri, değerlendirme dışı bırakılarak yalnızca kararlı hal verileri analize dahil edilmiştir.



Şekil 13 Hava Menfezi Ölçümü

2.4.2 Validasyon Kriterleri

Sayısal modelin deneysel verilerle doğrulanmasında aşağıdaki nicel kriterler esas alınmıştır.

Nokta Bazlı Hız Karşılaştırması: Her bir ölçüm noktasında deneysel olarak elde edilen zaman ortalamalı hız değerleri, aynı konumdaki HAD simülasyonu çıktılarıyla karşılaştırılmıştır. Kabul edilebilir sapma eşiği, bireysel ölçüm noktaları için %10 olarak belirlenmiştir. Bu eşik değeri, düşük hızlı iç mekân hava akışı çalışmalarında yaygın biçimde benimsenen tolerans aralığıyla örtüşmektedir [6].

Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE): Tüm ölçüm noktaları üzerinden hesaplanan ortalama mutlak yüzde hata değerinin %10'un altında kalması hedeflenmiştir. MAPE hesabı aşağıdaki bağıntı ile gerçekleştirilmiştir [7]:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{V_{exp,i} - V_{CFD,i}}{V_{exp,i}} \right| \times 100$$

(5)

2.5 Optimizasyon ve Çok Kriterli Karar Verme

HAD analizleri neticesinde, denenen her bir alternatif menfez geometrisi aerodinamik performans ve hava dağılım homojenliği açısından birbirinden farklı sonuçlar üretmiştir. Bu farklı özelliklere sahip menfezlerden en iyi olanı objektif bir biçimde seçebilmek amacıyla Çok Kriterli Karar Verme metodolojilerinden biri olan COPRAS [8] yöntemine başvurulmuştur.

Çalışmada uygulanan COPRAS yönteminde üç parametre belirlenmiştir. Birinci parametre menfezlerin kütleli debi ölçümleri ile elde edilen homojenlik değeridir. İkinci parametre menfezlerden ölçülen maksimum hız değeridir. Üçüncü parametre menfezlerin yarattığı basınç düşümleridir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1 Sayısal Modelin Deneysel Verilerle Doğrulanması

Geliştirilen HAD modelinin güvenilirliğini kanıtlamak amacıyla, sayısal simülasyon sonuçları gerçek araç üzerinde gerçekleştirilen deneysel ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Validasyon süreci, hava kanalı sisteminin referans geometrisi üzerinde yürütülmüş olup bu aşamanın temel amacı ilerleyen bölümlerde sunulan alternatif geometri analizlerinin güvenilir bir sayısal temele dayandığını ortaya koymaktır.

Deneysel ölçümler, araç durağan konumdayken ve HVAC sistemi kararlı hal çalışma koşullarında gerçekleştirilmiştir. Hava hızı ölçümleri, Testo 405i marka termal anemometre kullanılarak kanal boyunca belirlenen 15 farklı menfez çıkış noktasında alınmıştır. Her ölçüm noktasında, anlık hız değerlerinin kararlı bir değerde sabitlendiği gözlemlenene kadar ölçüme devam edilmiş ve bu kararlı değer ilgili noktanın ölçüm verisi olarak kaydedilmiştir. Tüm testler, 20°C ortam hava sıcaklığı koşullarında yürütülmüştür.

Menfez No	Ölçüm Sonucu (m/s)	Analiz Sonucu (m/s)	Bağıl Hata (%)
1	11.85	11.00	7.17%
5	13.10	13.44	2.58%
10	13.09	12.66	3.30%
15	10.20	9.74	4.53%
20	10.76	10.62	1.30%
25	9.21	9.62	4.40%
30	8.88	8.08	9.06%
35	9.11	9.26	1.69%
40	8.86	8.49	4.18%
42	9.11	9.36	2.70%

Tablo 1 Test verisi ve analiz verisi karşılaştırması

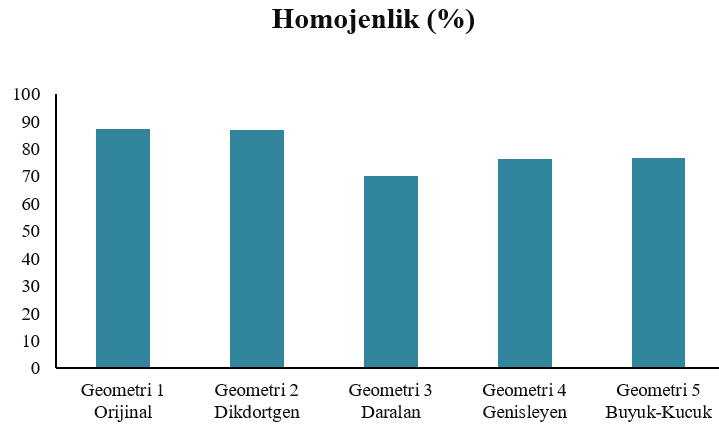
3.2 Referans Tasarımın Akış Karakteristikleri

Hava kanalının aerodinamik performansının iyileştirilebilmesi için öncelikle referans olarak kabul edilen mevcut tasarımın akış karakteristikleri incelenmiştir. Kanal içerisindeki debi ve hız dağılımının eşitliğini matematiksel olarak ifade edebilmek amacıyla havalandırma sistemlerinde yaygın olarak kabul gören Weltens Homojenlik

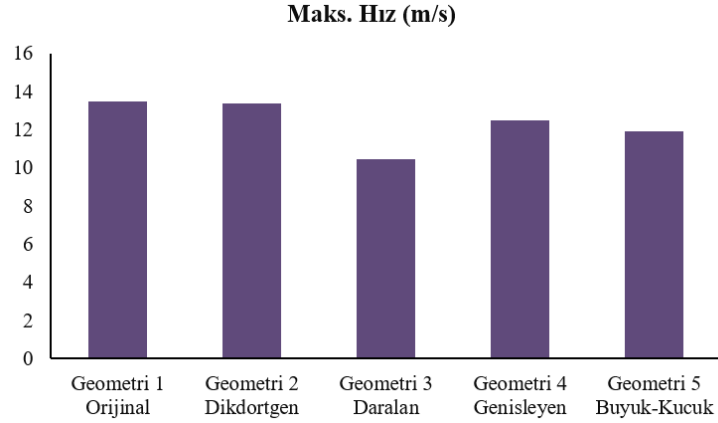
İndeksi kullanılmıştır [9]. Referans tasarımın hız ve alan ağırlıklı verileri doğrultusunda bu indeks %87,24 olarak hesaplanmıştır. Weltens indeksinin yüksek olması, yolcu kabineye gönderilen havanın menfezlere homojen bir şekilde dağıldığını göstermektedir. HAD sonuçları, referans tasarımın bu yüksek indeks değeri ile ilerleyen bölümlerde incelenecek olan alternatif menfez geometrilerine kıyasla dengeli bir hız dağılımı sunduğunu ortaya koymuştur. Ancak referans tasarımdaki asıl problemin homojenlik eksikliği değil kanal içindeki yüksek akış dirençleri olduğu tespit edilmiştir. Nitekim fan tarafından basılan hava akışının kanal boyunca ilerlerken sürtünme ve kesit değişimleri nedeniyle yaşadığı toplam basınç kaybı incelendiğinde, referans tasarımda 115.85 Pa gibi bir basınç düşüşü meydana geldiği görülmüştür. Aynı zamanda sistemdeki maksimum menfez çıkış hızının 13,48 m/s kadar ulaştığı saptanmıştır. Bu yüksek hızlar ve basınç kaybı üfleyici fanın daha fazla enerji harcamasına, kanalda hava akış kaynaklı lokal gürültü oluşumuna ve sistemin genel aerodinamik veriminin düşmesine neden olmaktadır.

3.3 Yeni Menfez Geometrilerinin Akış Karakteristikleri

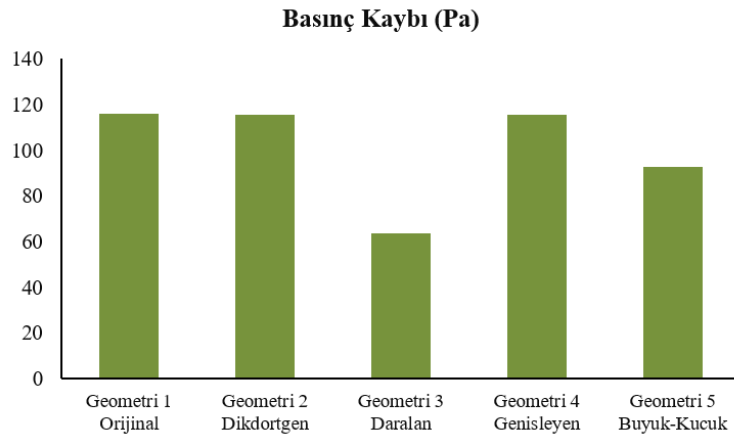
Referans tasarımda gözlemlenen yüksek basınç kayıplarını ve aşırı bölgesel hızlanmaların farklı geometri değişimleri ile nasıl değiştiğini belirlemek amacı ile dört farklı alternatif menfez geometrisi geliştirilmiştir. Bunlar sırasıyla; dikdörtgen, sona doğru daralan, sona doğru genişleyen ve ardışık tasarımlardır. Yapılan sayısal çalışmalar neticesinde, menfez formunun ve kesit alanının değiştirilmesinin kanalın içindeki basınç dağılımını, maksimum hava çıkış hızını ve hız homojenliğini ne derece etkilediği alt bölümlerde detaylı olarak tartışılmıştır.



Tablo 2 Menfezlere ait yüzde homojenlik değerleri



Tablo 3 Menfezlere ait maksimum hız değerleri



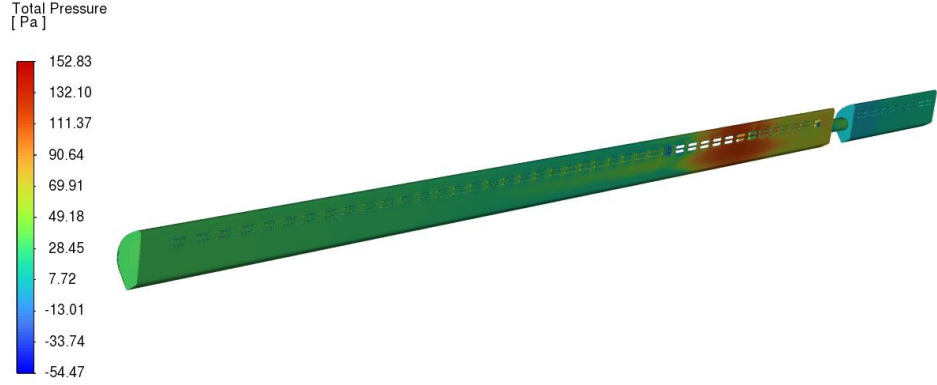
Tablo 4 Menfezlere ait basınç kaybı değerleri

3.3.1 Dikdörtgen Menfez Tasarımının Etkisi

Bu geometride mevcut tasarımın oval hatlarının daha keskin köşelere sahip dikdörtgen formlara dönüştürülmüştür. Sayısal analizler sonucunda bu geometrinin performansının orijinal tasarıma oldukça yakın bir karakter sergilediği saptanmıştır. Weltens homojenlik indeksi %86,91, toplam basınç düşüşü 115,58 Pa ve maksimum hava çıkış hızı ise 13,35 m/s olarak hesaplanmıştır. Menfez şeklinin köşeli forma getirilmesinin kanal içindeki temel akış direncini azaltmakta yetersiz kaldığı anlaşılmıştır. Aksine, dikdörtgen köşelerde meydana gelebilecek akış ayrılmaları ve sınır tabaka etkilerinin aerodinamik verimlilikte iyileşme sunamadığı değerlendirilmiştir.

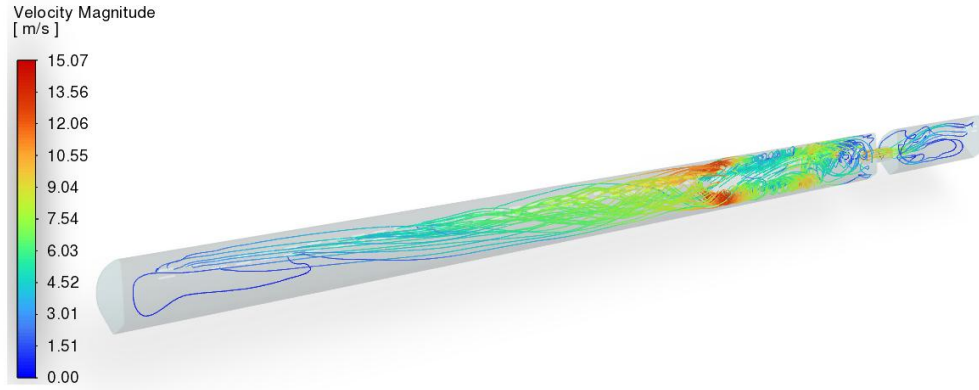
3.3.2 Kesiti Daralan Menfez Tasarımının Etkisi

Kanal boyunca menfezlerin kesit alanlarının kademeli daraltıldığı bu tasarım, analiz edilen geometriler arasında aerodinamik basınç düşüşü açısından en başarılı sonuçları üretmiştir. Şekil 13'te sunulan Toplam Basınç konturu incelendiğinde, yüksek basınç yığılmalarının yalnızca giriş bölgesinde yaşandığı ve akışın kanal boyunca ilerledikçe basıncın dengeli bir biçimde sönümlendiği görülmektedir. Bu sayede, referans tasarımda 115,85 Pa olan basınç kaybı, bu geometride neredeyse yarı yarıya bir düşüş eğilimi göstererek 63,62 Pa seviyesine inmiştir. Bu iyileşme, hava akışının daralan menfez kesitlerinde daha az dirence maruz kaldığını göstermektedir.



Şekil 14 Daralan Menfez Basınç Dağılımı

Şekil 14'te hız büyüklükleri, akım çizgileri şeklinde gösterilmiştir. Menfez giriş kısmında hız ani bir yükseliş yapmaktadır. Sonrasında ise kanal boyunca ilerlerken türbülanslı girdaplara maruz kalmadan kontrollü bir formda akmaktadır. Bu aerodinamik rahatlamanın bir sonucu olarak, sistemdeki maksimum çıkış hızı 10,45 m/s seviyelerine gerilemiştir. Böylece lokal hızlanmalardan kaynaklı akustik problemlerin önüne geçilmiştir.



Şekil 15 Daralan Menfez Hız Değişimi

Sistemin aerodinamik olarak rahatlaması, menfezlerdeki havanın homojen dağılımını bir miktar zorlaştırmış ve Weltens indeksi %70,31 seviyesine gerilemiştir. Ancak bu değer, elde edilen enerji ve basınç kazanımı göz önüne alındığında tartışmaya açıktır.

3.3.3 Kesiti Genişleyen Menfez Tasarımının Etkisi

Daralan geometrinin tam zıttı bir kurgu ile havanın kanal sonundaki yığılma etkisini azaltmak amacıyla menfez kesitlerinin kademeli olarak genişletildiği bu tasarım beklentileri karşılamamıştır. Toplam basınç kaybı referans tasarıma benzer şekilde yüksek kalarak 115.64 Pa olarak ölçülürken, maksimum hava hızı 12,47 m/s olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, hava dağılımının homojenliği de bozularak Weltens indeksi %76,26'ya gerilemiştir. Bu negatif performansın temel fiziksel nedeni akışın genişleyen menfez çıkışlarında bir difüzör etkisine maruz kalmasıdır. Akışkan, genişleyen kesitlerde momentumunu kaybederek ani ayrılmalara uğramış ve basınç toparlanması sağlanamadığı için ölü bölgelerde türbülans artmıştır.

3.3.4 Ardışık Menfez Tasarımının Etkisi

Sistemde bir basınç dalgalanması yaratarak havanın kanal içerisinde hem homojen dağılmasını hem de rahat ilerlemesini sağlamak amacıyla geliştirilen bu asimetrik tasarım, analiz sonuçlarına göre orta düzey bir aerodinamik performans sergilemiştir. Toplam basınç kaybını referans tasarıma göre iyileştirerek 92.76 Pa seviyesine düşürmeyi

başarmıştır. Maksimum hava çıkış hızını ise 11,90 m/s'ye çekmiştir. Ancak hız homojenliğindeki gerileme bu geometrinin akışkanın menfezlere eşit dağıtımını sorununu tek başına çözemediğini göstermiştir. Bu karma tasarım, Daralan Menfezlerin sunduğu aerodinamik rahatlama ile Orijinal Tasarımın sunduğu dengeli homojenlik arasında bir sonuç üretmiştir.

3.4 Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Optimum Menfez Tasarımı

Geometrilerin farklı performans karakteristiklerini objektif bir şekilde değerlendirebilmek ve en iyi menfez tasarımını belirleyebilmek amacıyla. Karar matrisinde yer alan üç temel kritere eşit ağırlıklandırma yaklaşımı uygulanmıştır.

COPRAS algoritması çalıştırıldığında alternatif tasarımların sıralaması Tablo 5'te görüldüğü gibi gerçekleşmiştir:

Geometri	Sıra
Orijinal	4
Dikdörtgen	3
Daralan	1
Genişleyen	5
Ardışık	2

Tablo 5 Menfezlere ait COPRAS sonuçları

Eşit ağırlıklandırma ile Sona Doğru Daralan Menfez tasarımı matematiksel olarak makalenin optimum tasarımı seçilerek 1. sıraya yerleşmiştir. Diğer taraftan referans tasarım ise kullanılan ağırlıklandırma ile 4. sıraya gerilemiştir.

Daralan tasarımın COPRAS sıralamasında zirveye yerleşmesinin temel matematiksel ve fiziksel sebebi homojenlikten bir miktar ödün verilmiş olmasına rağmen, sistemdeki akış direncini ve maksimum hız değerlerini düşürebilmiş olmasıdır.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada elektrikli bir otobüs iklimlendirme sistemine ait hava kanalının performansı HAD araçları ile incelenmiş ve hava dağılımını iyileştirmek amacıyla Çok Kriterli Karar Verme destekli bir geometri optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analizlere başlanmadan önce, gerçek araç üzerinden alınan deneysel hız verileri ile HAD simülasyonu çıktıları karşılaştırılmış ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata değerinin kabul edilebilir sınırı olan %10'un altında kaldığı teyit edilerek model başarıyla doğrulanmıştır. Referans tasarımın analiz sonuçları incelendiğinde, sistemin Weltens Homojenlik İndeksi açısından iyi bir hava dağılımı sağladığı görülmüştür. Ancak bu standart tasarımın kanal içerisinde 115.85 Pa gibi yüksek bir basınç kaybına ve 13,48 m/s'ye varan maksimum hızlara neden olduğu ölçülmüştür. Bu durum, fanın aşırı enerji harcamasına ve kanalda bölgesel gürültülerin oluşmasına sebebiyet vermektedir.

Mevcut tasarımdaki bu aerodinamik kayıpları engellemek amacıyla sırasıyla dikdörtgen, sona doğru daralan, sona doğru genişleyen ve ardışık olmak üzere dört farklı yeni menfez geometrisi geliştirilmiştir. Analiz sonuçlarından da görüldüğü gibi, sistemin basınç kaybını düşürmeye yönelik yapılan her geometrik iyileştirme, havanın menfezlere homojen dağılmasını bir miktar zorlaştırmıştır. Parametreler arasındaki bu durumu objektif olarak çözebilmek adına COPRAS optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Eşit ağırlıklandırma senaryosu ile çalıştırılan COPRAS algoritması sonucunda, tasarımlar arasından Sona Doğru Daralan Menfez modeli optimum tasarım seçilmiştir. Orijinal tasarım 115.85 Pa basınç direnci yaratırken, daralan optimum geometri bu basınç kaybını neredeyse yarı yarıya düşürerek 63.62 Pa seviyesine indirmiştir. Enerji ve aerodinamik açıdan çıktılar iyileşmiş fakat hava homojenliğinden bir miktar ödün verilmiş ve Weltens indeksi %70,31 seviyesine gerilemiştir. Ancak bu indeks düşüşü, elde edilen basınç düşüşü göz önüne alındığında sistemin genel verimliliğini yükseltmiştir.

Sonuç olarak, makalede optimize edilen bu "Daralan Geometri", hava kanalı tasarımları için sürtünme kayıplarını ve fan yorulmalarını azaltan bir temel model oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda, homojenlik indeksinde yaşanan bu kayıpların da telafi edilebilmesi amacıyla, optimum seçilen bu daralan hava kanalı iskeleti üzerine çalışılarak hem minimum basınç kaybı hem de maksimum homojenlik sunan nihai tasarımlara ulaşılması hedeflenmektedir.

5. REFERANSLAR

- [1] Market Data Forecast. (2026, Mart). *Europe bus market* (Rapor No. 16190).
[<https://www.marketdataforecast.com/market-reports/europe-bus-market>]
- [2] Shafie, N. E. A., Kamar, H. M., & Kamsah, N. (2015). Effects of ventilation setups on air flow velocity and temperature fields in bus passenger compartment. *Jurnal Teknologi*, 77(30), 49-53.
- [3] Ahmad Shafie, N. E., Mohamed Kamar, H., & Kamsah, N. (2015). CFD simulation of air temperature inside a bus passenger compartment. *Applied Mechanics and Materials*, 735, 85-90.
- [4] Embiale, M., Bekele, A., Venkatachalam, C., & Parthiban, M. (2021). CFD simulation of pressure drop in turbulence flow of water through circular, square, rectangular and triangular cross-sectional ducts. *Appl. Eng. Lett.*, 6, 39-45.
- [5] Najafi, A., & Mesbah, M. (2025). Understanding pressure loss mechanisms in rectangular air duct elbows: The role of guide vanes. *Journal of Building Engineering*, 104, 112253.
- [6] Chen, Q., & Srebric, J. (2002). A procedure for verification, validation, and reporting of indoor environment CFD analyses. *HVAC&R Research*, 8(2), 201-216.
- [7] Lewis, C. D. (1982). *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. Butterworth Scientific.
- [8] Zavadskas, E. K., Kaklauskas, A., & Sarka, V. (1994). The new method of multicriteria complex proportional assessment of projects. *Technological and Economic Development of Economy*, 1(3), 131-139.
- [9] Weltens, H., Bressler, H., Terres, F., Neumaier, H., & Rammoser, D. (1993). Optimisation of catalytic converter gas flow distribution by CFD prediction. *SAE Transactions*, 102, 1024-1033.
- [10] Aliahmadipour, M., Abdolzadeh, M., & Lari, K. (2017). Air flow simulation of HVAC system in compartment of a passenger coach. *Applied Thermal Engineering*, 123, 973-990. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.086>

- [11] Bode, F., Joldos, T., Sirbu, G. M., Danca, P., Nastase, I., & Coşoiu, C. (2025). Impact of realistic boundary conditions on CFD simulations: A case study of vehicle ventilation. *Building and Environment*, 267, 112264. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112264>
- [12] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education.
- [13] Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598-1605.
- [14] Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 3(2), 269-289.
- [15] Mezarcıöz, S., & Akıllı, H. (2021). Calculation of heat transfer from the bottom of a coach to the passenger compartment. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 10(2), 83-90. <https://doi.org/10.18245/ijaet.824547>
- [16] Özkan, A. (2015). Şehir içi otobüslerde tekstil hava kanalı tasarımı.
- [17] Suleymanov, T. (2022). *Computational Fluid Dynamics analysis of a bus air channel* (Politecnico di Torino).
- [18] Özcan, O., Demirtaş, S., Yıldız, A. E., & Coşkun, A. (2022). *Improving the Performance of the Air Conditioning Unit in Different Locations of a City Bus and Lightening the Air Ducts* (No. 2022-01-5044). SAE Technical Paper.