



**T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI**

**KAZAN DAİRESİ HAVALANDIRMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN
HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ ÇALIŞMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATİH OĞUZ

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ CEMİL KOYUNOĞLU

**YALOVA
ŞUBAT 2025**



T.C.
YALOVA ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ BİLİM DALI

KAZAN DAİRESİ HAVALANDIRMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN HESAPLAMALI
AKIŞKANLAR MEKANİĞİ ÇALIŞMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FATİH OĞUZ
228107015

DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ CEMİL KOYUNOĞLU

YALOVA
ŞUBAT 2025

ETİK BEYAN

Yalova Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım “KAZAN DAİRESİ HAVALANDIRMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ ÇALIŞMASI” başlıklı bu tez çalışmada; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksinin tespiti halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Fatih OĞUZ



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca benden yardımlarını esirgemeyen, akademik anlamda bana her zaman destek olan ve doğru yolu gösteren sayın danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Cemil KOYUNOĞLU 'na teşekkür ederim.

Her zaman yanımda oldukları ve benden desteklerini hiçbir zaman esirgemedikleri, bu zorlu süreçte her anlamda bana destek oldukları için sevgili eşim Gülhatun OĞUZ'a ve biricik oğlum Doruk Efe OĞUZ'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca benden desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve büyük paya sahip olan kıymetli babam İbrahim OĞUZ'a, kıymetli annem Hatice OĞUZ'a, kardeşlerim Oğuzhan OĞUZ'a ve Vildan ÖZKAN'a teşekkür ederim.

Şubat – 2025

Fatih OĞUZ





İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN	i
İÇİNDEKİLER.....	v
SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	3
3. TEORİK TEMEL	5
3.1. Akışkanlar Mekaniği Temelleri.....	5
3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)	5
3.2.1 CFD'nin yönetici denklemleri	6
3.3. Metodoloji	6
3.3.1. Geometri oluşturulması.....	7
3.3.2. Mesh yapısının oluşturulması	7
3.3.3. Problemin özelliklerinin tanımlanması.....	8
3.3.4. Çözüm ve yakınsamalar.....	8
3.3.5. Analiz süreci ve yorumlamalar	8
4. MATERYAL VE METOD	9
4.1. Çalışmanın Yapıldığı Sağlık Merkezi ve Kazan Dairesi.....	9
4.2. CFD Modelleme Süreci ve ANSYS Fluent Programı	10
4.3. Geometrik Modelleme ve Mesh Yapısı.....	10
4.4. Sınır Şartları ve Tanımlamalar	12
4.5. Simulasyon Parametrelerinin Belirlenmesi	14
5. CFD SİMULASYONU VE ANALİZ.....	15
5.1. Mevcut Havalandırma Sisteminin Simülasyonu	15
5.2. Hava Akışı, Basınç Ve Isı Dağılımı	16
5.3. Mevcut Sorunların Tespiti Ve İyileştirme Alanları.....	26
6. İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ.....	27
6.1. Hava Kalitesini Artıracak Tasarım Değişiklikleri	27
6.2. Alternatif Havalandırma Düzenlemeleri	27
6.3. Yeni Simulasyon Sonuçları	29
6.3.1. Model-2 analiz sonuçları	29



6.3.2. Model-3 analiz sonuçları	37
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	47
7.1. Hava Akışı ve Basınç Dağılımı Değerlendirmesi	47
7.2. Türbülans Kinetik Enerjisi (TKE) ve Enerji Verimliliği.....	47
7.3. Isı Dağılımı ve Sıcaklık Gradyanı	48
7.4. Doğal Gaz Yönetmeliğine Göre Değerlendirme	48
7.3. Öneriler.....	49
7.3.1. Hava akışı ve egzoz yerleşimi	49
7.3.2. Basınç dengesi ve boru çapı seçimi	49
7.3.3. Türbülans ve enerji verimliliği	49
7.3.4. Sıcaklık gradyanı yönetimi	49
KAYNAKLAR.....	51
ÖZGEÇMİŞ	55



SİMGELER ve KISALTMALAR LİSTESİ

SİMGELER

E	: Enerji
ρ	: Akışkan Yoğunluğu
t	: Zaman
u	: Hız Vektörü
$^{\circ}\text{C}$	: Santigrat Derece
∇	: Gradyan Operatörü
P	: Statik Basınç
ν	: Viskozite
f_b	: Gövde Kuvveti
h_{top}	: Toplam Entalpiyi
λ	: İletkenlik
T	: Sıcaklık
S_E	: Dış Enerji Kaynakları

KISALTMALAR

CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CFD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HVAC	: Isıtma, Havalandırma, İklimlendirme
m	: Metre
TKE	: Türbülans Kinetik Enerjisi

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Mesh(Ağ) Yapısı Parametreleri	12
Tablo 4.2. Sınır Şartları Parametreleri	13
Tablo 6.1. Modellerin Tasarım Farklılıkları.....	27





ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 4.1. Kazan Dairesi Model 1 Mimari Plan	9
Şekil 4.2. Workbench Arayüzü Fluent İşlem Sıralaması	10
Şekil 4.3. Model-1 Geometrisi	11
Şekil 4.4. Modelin Ağ Yapısı.....	12
Şekil 5.1. Model-1 Yakınsama Grafiği	15
Şekil 5.2. Hesaplamanın Sonuçlandığı Değerler.....	16
Şekil 5.3. Hava Akış Çizgileri.....	17
Şekil 5.4. Belirlenen Kesite Göre İç Duvar Sıcaklığı	18
Şekil 5.5. Belirtilen Kesite Göre Basınç Dağılımı	20
Şekil 5.6. Belirtilen Yüzeye Göre Türbülans Kinetik Enerjisi.....	22
Şekil 5.7. Belirlenen Kesite Göre Alan Sıcaklığı.....	24
Şekil 6.1. Model-2 Kazan Dairesi Geometrisi	28
Şekil 6.2. Model-3 Kazan Dairesi Geometrisi	28
Şekil 6.3. Model-2 Hesaplamanın Sonuçlandığı Değerler	29
Şekil 6.4. Model-2 Yakınsama Grafiği	29
Şekil 6.5. Model-2 Hava Akış Çizgileri.....	30
Şekil 6.6. Model-2 Belirlenen Kesite Göre Basınç Dağılımı	32
Şekil 6.7. Model-2 Belirtilen Kesite Göre Türbülans Kinetik Enerjisi.....	33
Şekil 6.8. Model-2 Belirlenen Kesite Göre Sıcaklık Dağılımları	35
Şekil 6.9. Model-3 Hesaplamanın Sonuçlandığı Değerler	37
Şekil 6.10. Model-3 Yakınsama Grafiği	38
Şekil 6.11. Model-3 Hava Akış Çizgileri.....	38
Şekil 6.12. Model-3 Belirtilen Kesite Göre Basınç Dağılımı	40
Şekil 6.13. Model-3 Belirtilen Kesite Göre Türbülans Kinetik Enerjisi.....	42
Şekil 6.14. Model-3 Belirtilen Kesite Göre Sıcaklık Dağılımı	44



KAZAN DAİRESİ HAVALANDIRMASININ İYİLEŞTİRİLMESİ İÇİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR MEKANİĞİ ÇALIŞMASI

ÖZET

Bu çalışma, bir sağlık tesisinin doğal gaz ile çalışan kazan dairesine ait havalandırma sisteminin performansı incelenmiştir. Çalışmada üç farklı model (Model-1, Model-2 ve Model-3) oluşturularak, bu sistemlerin hava akışı, basınç dağılımı, sıcaklık gradyanı ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) açısından analizleri yapılmıştır. Materyal ve metot kapsamında, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) simülasyonları kullanılarak hava hareketi ve ısı transferi incelenmiş, doğal gaz yönetmelikleri doğrultusunda boru çapı ve basınç kaybı hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Bulgular bölümünde, Model-1’de hava sirkülasyonunun dengesiz olduğu, Model-2’de hava giriş sayısının artırılmasıyla türbülansın azaldığı ancak tavan bölgesinde hâlâ düzensizlikler bulunduğu, Model-3’te ise hava çıkışlarının iyileştirilmesiyle en düzenli akışın sağlandığı belirlenmiştir. Sonuç olarak, Model-3 sisteminin en iyi performansı sunduğu, ancak hava giriş ve çıkış noktalarının daha iyi optimize edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Doğal gaz yönetmelikleri ile yapılan değerlendirmeler, Model-3’ün enerji verimliliği açısından en uygun konfigürasyonu sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Havalandırma, CFD Simülasyonu, Türbülans Kinetik Enerjisi, Basınç Dağılımı, Isı Transferi.



COMPUTATIONAL FLUID MECHANICS STUDY FOR IMPROVING BOILER ROOM VENTILATION

ABSTRACT

This study examines the performance of a ventilation system in a natural gas-powered boiler room of a healthcare facility. Three different models (Model-1, Model-2, and Model-3) were developed and analyzed in terms of airflow, pressure distribution, temperature gradient, and turbulence kinetic energy (TKE). Materials and Methods involved Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations to assess air movement and heat transfer, alongside pipe diameter and pressure loss calculations based on natural gas regulations. Findings indicated that Model-1 exhibited unstable airflow circulation, Model-2 improved turbulence control with additional air inlets but still displayed irregularities in ceiling areas, while Model-3 achieved the most balanced airflow with optimized exhaust positioning. As a result, Model-3 demonstrated the best overall performance; however, further optimization of air inlet and exhaust locations is necessary. Evaluations based on natural gas regulations confirmed that Model-3 provides the most energy-efficient configuration.

Keywords: Ventilation, CFD Simulation, Turbulence Kinetic Energy, Pressure Distribution, Heat Transfer.



1. GİRİŞ

Hızla büyüyen ve nüfus olarak kalabalıklaşan dünyamızda, fazlasıyla ihtiyacını hissettiğimiz kentsel sağlık merkezlerinin en önemli bölümlerinden olan kazan daireleri, kuruluşun hizmet sürekliliği ve konforu için en az merkezin içindeki donanım kadar önemlidir.

Kazan dairelerinde kullanılan havalandırma sistemleri de, sistemin verimliliği ve güvenliği açısından önem arz etmektedir. Enerjiyi verimli kullanmak her geçen gün daha da dikkate alınması gereken bir konu olarak gündemimize gelmektedir.

Havalandırma sistemi ayrıca; kazan dairesi içerisinde uygun hava akışı, yeterli miktarda taze hava girişi, ortamda biriken ve süpürülmesi gereken zararlı gazların uzaklaştırılması, sürekli çalışan kazanların zarar görmemesi için ortamın sıcaklığını dengede tutma, korozyon oluşmaması için nem miktarını optimize etme gibi koşulları yaratmamızı sağlayan sistemlerdir.

Bu sistemlerin sıfırdan kurulması ve deneme yanılma yöntemiyle uygun hale getirilmesi oldukça maliyet, iş gücü ve zaman problemi yaratacaktır. Aynı durum mevcutta çalışan sistemler için daha büyük problem anlamı taşımaktadır. Bu sistemlerin optimizasyonu, sanal ortamda simüle edilerek analiz ve sonuçların yorumlanması ile daha güvenli ve çok çok daha düşük maliyetlerle mümkündür.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği(CFD) Analizi yöntemi kullanılarak yapılan bu optimizasyonlar dünyada; inşaat, otomotiv ve havacılık, Enerji sektörleri, HVAC sistemleri, sürdürülebilir mühendislik dallarında, çevre mühendisliği alanlarında ve bazı tıbbi bulguların detaylı analizlerinde kullanılmakta ve dünyamızın hızla gelişmesine yardımcı olmaktadır.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Hesaplama Akışkanlar Dinamiği yöntemi kullanılarak, zamandan ve maliyetten ciddi oranda tasarruf edilerek, mevcutta bulunan sistemlerin iyileştirilmesi ya da yeni kurulacak bir yapının optimum koşullarda inşa edilmesi amacıyla yapılan literatür çalışmaları her geçen gün daha da önem arz etmektedir. Bu çalışmalardan bazılarına baktığımızda;

Patel (2018), yaptığı çalışmada sınır şartlarını oluşturduğu bir odanın sıcaklık ve konfor koşullarını yaratmak üzere kullanılacak klima sistemi için 3 farklı model tasarlamış, bu modellerden klima iç ünitelerinin yükseklik ve karşılıklı alanlarda olacak şekilde sanal ortamda CFD analizlerini oluşturarak çift AC kanallı klima tasarımında daha hızlı ve etkili soğutma sağlanabileceğini tespit etmiştir.

Akdemir ve diğ. (2012), bir test odasında sıcaklık ve nem dağılımını inceleyerek tarımsal ürünlerin saklanma koşullarının optimize edilmesi amacıyla CFD analizi yapmış, elde edilen sonuçlara göre soğuk hava deposunun tasarımının iyileştirilmesi için önerilerde bulunmuştur.

Tezcan ve Büyüktaş (2015), bitkili ve bitkisiz ortamlar gibi farklı yetiştirme koşullarına sahip doğal havalandırılmalı seralarda hava sıcaklığı ve ortam nemini farklı bölgelerde ölçümlemiş, bu ölçümleri CFD analizi yardımıyla simüle etmiş ve bulunan sonuçları karşılaştırmıştır. Bu sonuçlara göre CFD analizinin çok küçük hata payları ile sonuçlandığını görmüş ve bu yöntemlerin sera içi iklim faktörlerinin belirlenmesinde önemli bir araç olarak kullanılabileceğini tespit etmiştir.

Wu ve diğ. (2023), bir uçağın lastiğinin patlaması durumunda kabin kapısının dinamik tepkisini incelemek üzere CFD analizi yöntemini omurga kirişine doğru kırılma ve panel kapısına doğru kırılma şeklinde 2 model üzerinde uygulamış ve sonucunda gerçek basınç dağılım deney verileri ile kıyaslamıştır. Test sonuçları ile analiz sonuçları birebir uyumlanmış ve model 2 olarak tanımladığı panele doğru kırılmanın model 1'e göre daha fazla hasar derecesine sahip olduğunu tespit etmiştir.

Amahjour ve diğ. (2023), bir hastane izolasyon odasında SARS-COV2 virüslerinin yayılımını CFD analizi ile incelemiş, odada bulunan klima havalandırma kanalı ve dezenfektan koşulları altında odadaki hava akış dağılımını detaylandırmıştır. Çalışmasında virüsün yayılma hızını azaltmak için oda tasarımının iyileştirilmesi için öneriler sunmuştur.

Yamamoto ve diğ. (2023), radyant paneller ile klima ünitelerini birleştirerek ortamdaki nem giderme özelliklerini de hesaba katarak CFD analizi yardımıyla bir enerji simülasyonu yapmış

ve modern konutlar için özellikle yaz aylarında termal konfor şartlarını iyileştirmek için detaylı bir analiz yapmıştır. Bu çalışma ile ürün geliştirme ve yapı malzemeleri tasarımı için yol gösterici yorumlar getirmiştir.

Sadeghi ve diğ. (2025), öksürükten kaynaklanan virüs yüklü damlacıkların yayılması konusunda yürüme hızına bağlı olarak bu damlacıkların ortamdaki hareketini CFD analizi yardımıyla incelemiş ve 1 m/s üzerinde hareket eden insanların öksürdüklerinde virüs içeren damlacıkların havada asılı kaldığını tespit etmiştir.

Kang ve diğ. (2024), CFD modeli kullanarak tarihi bir binanın iç mekan termal ortam değerlendirmesi üzerine bir analiz yapmış ve bu analiz sonucunda dış duvarlardan ve pencerelerden kaynaklanan ısı kayıplarının termal konfor açısından ciddi olumsuzlukları olduğunu tespit etmiş ve bu durumu iyileştirmek için önerilerde bulunmuştur.

Ma'bdeh ve diğ. (2025), CFD analizi kullanarak pencere ve duvar oranı için pencere tip rüzgar yakalayıcılar üzerine bir çalışma yapmış ve hava kalitesinin artırılması amacıyla pencere/duvar oranının önemine değinmiştir. Bu çalışma ile yeni binaların yapımında mimar ve mühendisler için en etkili stratejiler oluşturulması gerektiği konusunda fikirler vermiştir.

Nasser ve diğ. (2025), doğrulanmış bir CFD modeli kullanarak raf ömrünün uzatılması adına tarımsal ürünlerin soğutma ünitelerine olan yerleşimi konusunda bir analiz yapmış ve 16 adet hava geçirmez kapaklı 2 tepsi modeli üzerinde bu analizi detaylandırmıştır. Sonuçta havalandırma delikleri eklemenin soğutma hızını ve düzgünlüğünü garanti etmediğini ve bu deliklerin etkinlikleri klima ünitelerinin yerleşimiyle arttığını deneysel çalışmalarla da doğrulayarak ispatlamıştır.

Yi ve diğ. (2025), seralarda çalışan tarım işçilerinin ısı streslerinin azaltılması amacıyla bir CFD analizi yapmış ve özellikle yaz aylarında yüksek nem koşullarına bağlı olarak sıcaklıkların işçiler üzerindeki olumsuz etkilerinin azaltılması amacıyla yapılan bu çalışma sonucunda havalandırma kanallarının stratejik olarak yerleştirilmesinin ardından yeterli su içilmesi koşuluyla 7.3 °C bir ısı azaltımı sağlayarak işletme maliyetlerini ve termal konfor koşullarını optimize etmeyi başarmıştır.

Bahsettiğim çalışmalar gibi yüzlerce çalışma yapılmış ve CFD analizlerinin ne kadar önemli bir yöntem olduğu, hem zaman hem de maliyet tasarrufu açısından günden güne ne kadar da ilgi çekici bulunduğu açıkça görülmektedir.

3. TEORİK TEMEL

3.1. Akışkanlar Mekaniği Temelleri

Akışkanlar mekaniği, sıvılar ve gazlar gibi akışkanların davranışlarının incelendiği bilim dalı olarak literatürde yerini almaktadır. Bu bilim dalı genel olarak üç ana bölüme ayrılmıştır;

- I. Akışkan Statiği: Hareketsiz akışkanların basıncını ve yüzeylerle olan ilişkisini anlamamıza yardımcı olur (Karayel, 2021).
- II. Akışkan Dinamiği: Hareket halinde olan akışkanların hızını, basıncını ve enerji transferlerini analiz etmemize olanak tanır (Karayel, 2021).

Temel kavram olarak;

- ❖ Akım Çizgileri: Akışkan parçacıklarının izlediği yolu, akışın hızını ve yönünü ifade eder.
 - ❖ Bernoulli Prensibi: Akışkanın hızının arttığı noktalarda basıncın düştüğünü ifade eder. Genelde uçak kanatlarının ve sıvı püskürtme cihazlarının tasarımında kullanılır.
 - ❖ Navier-Stokes Denklemleri: Akışkanların hareketini tanımlayan diferansiyel denklemlerdir. Bu denklemler karmaşık akış problemlerini çözmek için kullanılır.
- III. Akışkan Kinematiği: Akışkanın hareketini zamana bağlı olarak incelememize olanak tanır (Karayel, 2021).

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD), en genel tabiriyle akışkanlar mekaniği problemlerinin analizi ve çözümünde kısmi diferansiyel denklemleri ve hesaplamalı geometriyi bir arada incelemek için akışın söz konusu olduğu her alanda momentum, kütle, enerji ve ısı transferi hesaplarını akışın yapısal modellemesi ile simüle ederek bilgisayar teknolojisinin gücüyle yüksek hassasiyette detaylı analiz etmemize olanak tanıyan yöntemlerdir (Tokgöz ve Süfer, 2023).

CFD programları kullanılarak çok basit fakat hesaplamaları zaman alabilecek modellemelerin analizleri yapılacağı gibi çok karmaşık, hesaplamalarında kimyasal reaksiyonlar, faz değişimleri, mekanik hareketler sonucu modellerdeki gerilme, dayanma ve deformasyonların modele ve çevresine olan etkilerinin de detaylı bir şekilde incelenebileceği tasarımların geliştirilmesine de katkıda bulunulabilir (Tokgöz ve Süfer, 2023).

3.2.1 CFD'nin yönetici denklemleri

Claude-Louis Navier ve George Gabriel Stokes'un adını taşıyan Navier-Stokes denklemleri, akışkan hareketini tanımlamamıza olanak tanıyan kısmi diferansiyel denklemlerdir. Akışkanın davranışını modellemek için en önemli denklemler olarak kabul görür ve kütle, momentum, enerji korunum denklemleri temeline dayanmaktadır.

- **Kütlenin Korunumu: Süreklilik Denklemi**

Belirli bir hacimdeki sıvıya ait kütlenin, kütle giriş ve çıkışı olmadığı sürece sabit kalması gerektiğini belirtir ve aşağıdaki formül ile ifade edilir.

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

Bu denklemde ρ akışkan yoğunluğunu, t zaman, u hız vektörü ve ∇ gradyan operatörünü ifade etmektedir.

- **Momentumun Korunumu: Newton'un İkinci Yasası**

Momentum denklemi, akışkan denklemi içindeki momentumun değişim hızını, basınç ve yer çekimi de hesaba katılacak şekilde üzerine etki edecek kuvvetlerin toplamına eşit olduğunu belirtir. Formülü ise aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 u + f_b \quad (3.2)$$

Burada p statik basıncı, ν viskoziteyi, f_b gövde kuvvetlerini ifade etmektedir.

- **Enerjinin Korunumu: Termodinamiğin Birinci Yasası**

Enerji denklemi, akışkanın toplam enerjisindeki değişimin, sisteme eklenen veya sistemden uzaklaştırılan enerjiye eşit olması gerektiğini belirtir. Formülü ise aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\frac{\partial (\rho h_{top})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u \cdot h_{top}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (u \cdot \tau) + S_E \quad (3.3)$$

Burada h_{top} toplam entalpiyi, λ iletkenlik, T sıcaklık, S_E dış enerji kaynaklarını ifade etmektedir. $\nabla \cdot (u \cdot \tau)$ terimi viskoz iş terimidir ve viskoz gerilimden kaynaklanan işi temsil eder.

3.3. Metodoloji

Hesaplama akışkanlar dinamiği kullanılarak yapılacak olan modelleme ve analizlerin çözümlenebilmesi için her akış hesaplamasında olduğu gibi öncelikle değişkenlerin

tanımlanması, kullanılacak denklemlerin ve sayısal yöntemlerin seçilmesi, modellemeye ait sınır şartlarının belirlenmesi ve kullanılacak olan akışkanlar mekaniği denklemlerinin doğru bir şekilde seçilmesi gerekmektedir. CFD analizlerinde genellikle program alt yapısına Navier-Stokes denklemleri çözülürülerek sonuca ulaşıldığı bilinmektedir (Tokgöz ve Süfer, 2023).

CFD Analiz programları genel olarak 3 aşamada problemin çözümünü gerçekleştirir. İlk olarak, akışkan ile ilgili hesaplanacak bölge bir CAD modeli ile tanımlanır. Ardından, alanı iyi tanımlanmış hücelere ayırmak için bir ağ oluşturulur. Son olarak uygun akışkan denklemleri ile her hücre içindeki bilgisayar tarafından çözüme ulaştırılır.

3.3.1. Geometri oluşturulması

Geometri oluşturma işlemi programda analizi yapılacak modelin tanıtılması ve programa işlenmesi için tasarlanan 3 boyutlu yapıdan oluşmaktadır. Bu modelleme paket programların içerisine dahil olabileceği gibi herhangi bir katı modelleme programı ile hazırlanmış tasarımı da kullanmaya izin vermektedir.

3.3.2. Mesh yapısının oluşturulması

Bir uçak gövdesindeki stresi incelemek için havacılık endüstrisinde ortaya çıkan, problemlerin sayısal düzenlemesini elde etmek için mevcut durumu kolaylaştıran, akışkanlar mekaniği alanında Sonlu Elemanlar Yöntemi olarak adlandırılan metod CFD analizinin temelini oluşturmaktadır (Patel, 2018).

Sonlu elemanlar yöntemi bir yapı veya gövdenin sınırlı bileşenler olarak kabul edilen sınırlı ölçümlerdeki küçük bileşenlere bölündüğü ve bundan sonraki ilk gövde veya yapının, sınırlı sayıda bağlantıyla ilişkili bileşenlerin bir araya toplanması olarak kabul edildiği parçalı tahmin yöntemi şeklinde tanımlanabilir (Patel, 2018).

Programda Mesh(Ağ) oluşturma olarak adlandırılan bu yöntem ile geometrisi çizilen modeli daha hassas analizler ve hesaplamalar yapmak üzere çok daha küçük dilimlemelere ayırarak hesaplamaların doğruluk oranını artırmak için kullanılmaktadır. Bir diğer ifade ile küçük yapılara bölünmüş sistemde, her bir yapının çıkış parametreleri bir sonraki yapının giriş parametresi olarak hesaplanarak problem olabildiğince karmaşık halden basit hale indirgenmiş olmaktadır. Problemin doğru çözümünde mesh oranı ne kadar küçülürse hesaplamalar o derece doğru olacaktır. Doğal olarak bu dilimlemeler ne kadar küçük olursa analizlerin hesaplanma süreci de tersi oranda artmasına doğrudan etki edecektir.

3.3.3. Problemin özelliklerinin tanımlanması

Ağ yapısı oluşturulduktan sonra artık hesaplanmak istenen modele ait sınır koşullarının ve kullanılacak yöntemlerin belirlenmesi ve programa tanıtılması gerekmektedir. Bu aşama hesaplamalardan önceki son aşama olduğundan modelin malzeme özellikleri, enerji hesaplamalarının sisteme dahil edilip edilmeyeceği, yer çekimi ivmesi gibi fiziksel tanımlamaların dahil edilmesi, ortamdaki hava koşullarının kimyasal özellikleri gibi tüm detaylar bu aşamada programa tanımlanmalıdır. Ayrıca akışın türbülans modeli seçimi de hesaplamaların doğruluğu adına önem arz etmektedir. Burada seçilen akış özelliği hesaplamaların süresini artırmakla doğrudan bağlantılıdır.

3.3.4. Çözüm ve yakınsamalar

Denklemlerin çözüm aşamasına geçildiğinde oluşturulan modelin ve hesaplanması istenen koşulların özellikleri ve yakınsama kriterlerinin belirlenmesinin ardından hesaplama işlemi başlatılır. Bu işlem yakınsamanın istenilen değerlere ulaşmaya kadar devam edecektir. Problemin karmaşıklığı, hava akışının lineer veya türbülanslı oluşu, kimyasal reaksiyonların büyüklüğü ile doğru orantılı olacak şekilde hesaplamalar günler hatta haftalarca sürmektedir. Bu işlemin uzunluğu aynı zamanda kullanılan bilgisayarların gücüne de bağlı olarak uzayabilir. Sonuç olarak program aracılığıyla küçük dilimlere ayrılmış geometrinin her alanında binlerce denklem çözümlenerek istenilen kesinlik düzeyi elde edildiğinde hesaplamalar bitmiş ve analiz sürecine geçilmiş olur.

3.3.5. Analiz süreci ve yorumlamalar

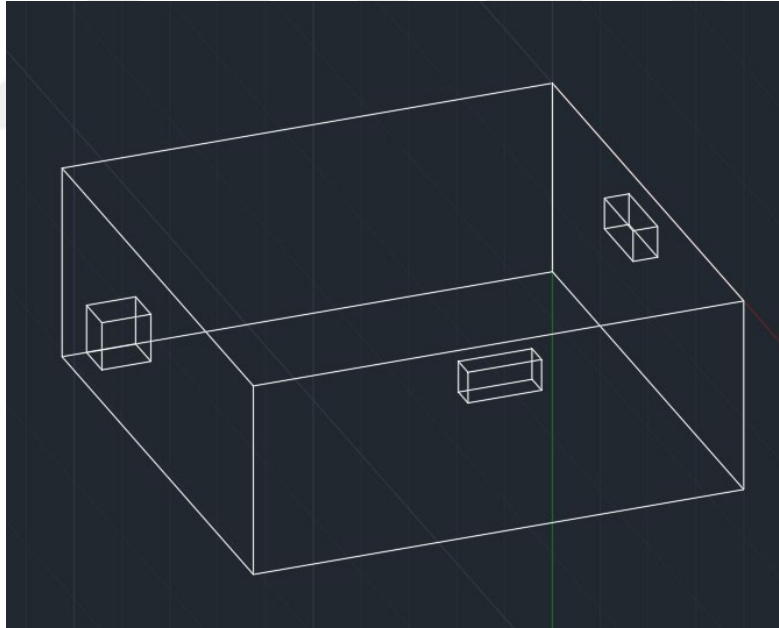
Tüm hesaplamalar bittiğine göre artık elde edilen sonuçlar ile modelleme analiz edilebilir duruma gelmiştir. Verilere göre eğer mümkünse elde olan gerçek değerler yapılan analizlerle karşılaştırılır ve sonuçlar birbirine yakın değerlerde ise iyileştirme veya optimizasyon yapılacak şekilde model sanal olarak geliştirilip ek bir maliyet yapılmadan birkaç farklı model oluşturularak doğru tasarımın oluşturulması sağlanmış olur. Ya da tasarlanmak istenen sistem sadece zaman harcanarak detaylı analizlere tabi tutulup tek seferde en ideal modelin belirlenmesi sağlanmış olur.

Bu aşamadan sonra modelin simülasyonu oluşturulabilir, herhangi bir bölümündeki deformasyonlar ya da fiziksel ve kimyasal özellikler belirlenebilir, tasarımın tamamlanması için gerekli yorumlamalar yapılabilir durumda olacaktır.

4. MATERYAL VE METOD

4.1. Çalışmanın Yapıldığı Sağlık Merkezi ve Kazan Dairesi

Bu çalışmada, Marmara bölgesinde inşasına karar verilen bir kentsel sağlık merkezine ait kazan dairesinin havalandırma sistemi için başlangıçta mimari projesinde yapılmak istenen modele ait analiz çalışması yapılmıştır. Model-1 olarak adlandırdığımız kazan dairesi ölçüleri Genişlik 10m, derinlik 10m ve yükseklik 5m olacak şekilde tasarlanmıştır. Kazan dairesi içinde tesisin ısıtma ve sıcak su ihtiyacını karşılayacak 1 adet kazan, birime temiz hava sağlayacak 1 adet temiz hava üfleme kanalı ve ortamdaki tozlu ve kirli havayı uzaklaştıracak 1 adet egzoz kanalı bulunmaktadır. Kazan dairesi içerisindeki çelik yüzeye sahip kazan sıcaklığı 50 °C, ortam ve duvar sıcaklıkları 35 °C olarak kabul edilmiştir. Ortamda bulunan temiz hava üfleme kanalı ve egzoz havası kanalı hava hızları 1.18 m/s, ve hava sıcaklıkları 24 °C ve boyutları 2m x 1m x 0.5m olarak belirlenmiştir. Kazan dairesine ait mimari plan CAD ortamında çizilmiş ve Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



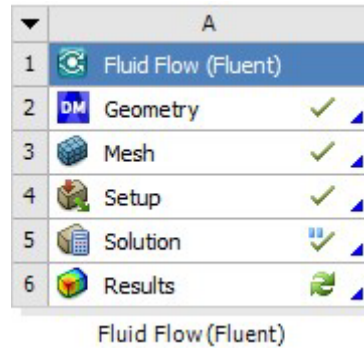
Şekil 4.1. Kazan Dairesi Model 1 Mimari Plan

4.2. CFD Modelleme Süreci ve ANSYS Fluent Programı

Model 1 olarak tanımladığımız mevcut mimariye ait kazan dairesi analizleri için bilinen en güvenilir CFD programı olarak ANSYS paket programına dahil olan ANSYS Fluent 2020 R2 versiyon yazılım kullanılmıştır.

ANSYS paket program halinde kullanıcı dostu arayüzü, güvenilirliği, harici herhangi bir programa gerek duymadan tüm ihtiyaçlara cevap vermesi sebebiyle en verimli yazılım olarak göze çarpmaktadır. Program içerisine dahil SpaceClaim yazılımı ile CAD ortamında çizilen ya da sıfırdan hazırlanacak projeler için 3 boyutlu katı modeli Fluent programına doğru algoritmalar ile aktarmak için ideal kullanım sunmaktadır. Bu yazılım sayesinde mimarisi çizilen Model 1 çalışması Fluent programına geometri oluşturulduğunda, tasarım içinde yer alan katı modeller otomatik olarak yazılım tarafından işlendiği için zaman tasarrufu açısından önem arz etmektedir.

Ayrıca ANSYS paket arayüzü olarak görülen Workbench uygulaması ile analizi yapılacak probleme göre uygun program seçilerek çalışma alanı kullanışlı bir şekilde karşımıza çıkmaktadır. Örneğin akışkan analizi yapılacak model 1 çalışması için Fluent programı seçildiğinde Workbench üzerinde şekil 4.2’de yer alan bölümler program üzerinde belirlemekte ve uygulanması gereken sıralama program tarafından bize sunulmaktadır.



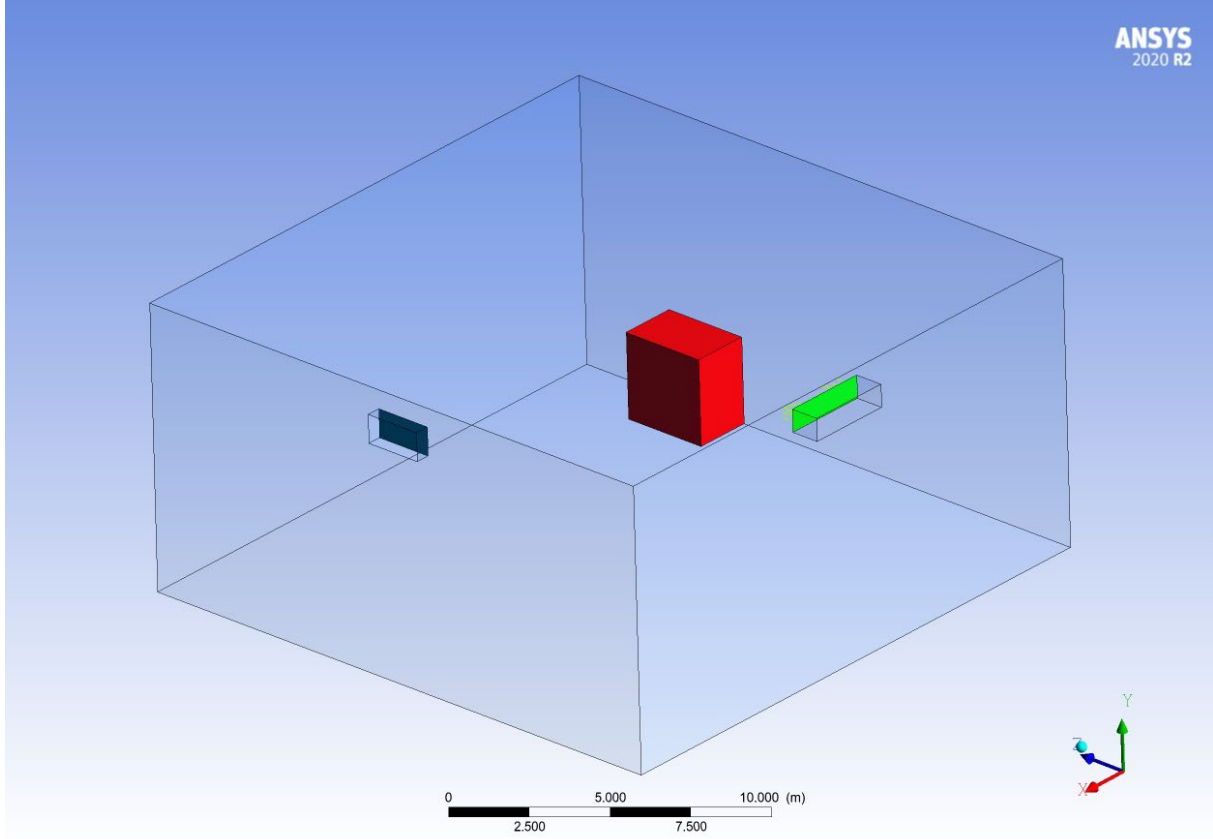
Şekil 4.2. Workbench Arayüzü Fluent İşlem Sıralaması

Şekil 4.2’de de görüldüğü üzere CFD analiz programları konusunda bahsedilen Geometri Oluşturma, Mesh Oluşturma, Başlangıç ve sınır parametreleri, hesaplamalar ve simülasyonları oluşturacağımız son adım sırasıyla belirtilmekte ve işlem durumu açıkça görülmektedir.

4.3. Geometrik Modelleme ve Mesh Yapısı

Daha önce CAD programıyla mimari planı çizilen ve SpaceClaim programı ile katı modeli oluşturulan Model-1 Kazan dairesi modellemesi, Workbench içerisindeki Geometry alanında

Fluent programına aktarıldığında Şekil 4.3’deki görüntü elde edilecektir. Elde edilen katı modelde kazan dairesi içindeki cihazları ve duvarları katı halde birbirinden ayrılacak şekilde sisteme tanımladıktan sonra “Generate” butonu vasıtasıyla artık modelimizin Mesh Yapısı oluşturulabilir duruma gelecektir.

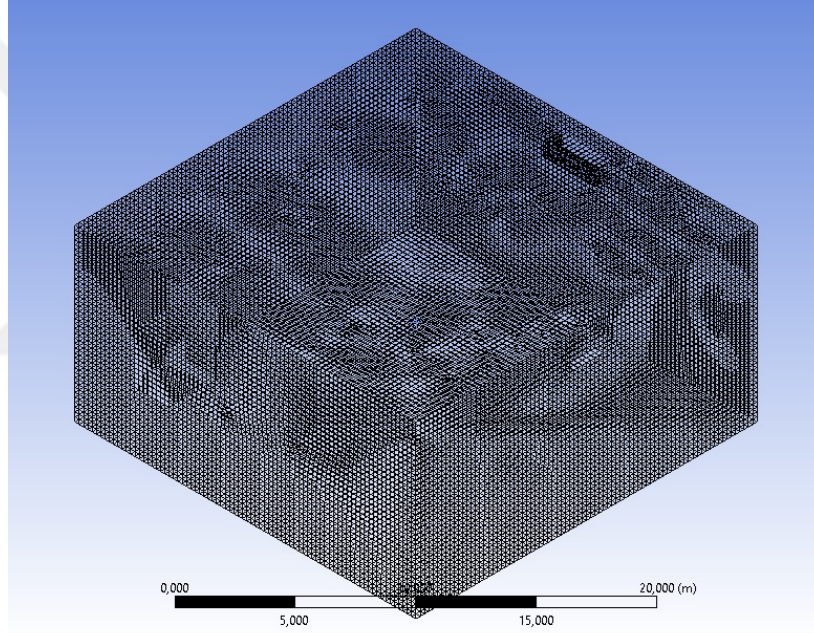


Şekil 4.3. Model-1 Geometrisi

Arayüze geri dönüp Ağ bölümüne girdiğimizde Tablo 4.1’deki tanımlamalar yapılarak modelin Ağ görüntüsü Şekil 4.4’de gösterildiği gibi olacaktır. Bu tanımlamalara göre modelimizin ağ elemanı uzunluğu 0.25m olarak seçilmiştir. Bu sayede modelimiz 0.25m’lik ağlara bölünerek her bir ağ için bilgisayar sistemi üzerinde hesaplamalar detaylı bir şekilde yapılmaya hazırlanmıştır.

Tablo 4.1. Mesh(Ağ) Yapısı Parametreleri

Mesh Elemanı Ölçüsü	0.25m
Fiziksel Özellik	CFD
Çözücü Özelliği	Akışkan
Eleman Düzeni	Lineer
Ağ Tipi	Altıgen
Yöntem	Çok Bölgeli



Şekil 4.4. Modelin Ağ Yapısı

Bu tanımlamaların ardından sınır koşullarını belirlemeye geçmeden önce son işlem olarak kazan dairesi içinde yer alan kazan, temiz hava kanalı ve egzoz kanalı olarak çizilen cihazlara sınır koşullarını daha iyi tanımlayabilmek için adlandırma yapılmalıdır. Bu işlem de yapıldıktan sonra artık ayarlar kısmına gerekli tanımlamaları yapabilir duruma gelinecektir.

4.4. Sınır Şartları ve Tanımlamalar

Workbench üzerinde Setup kısmına gelindiğinde Fluent programına ilk gireceğimiz veri ölçümlendirme ayarı olarak 3D, Double Precision ayarları seçili olacak ve bilgisayarımızın çekirdek sayısına göre işlemci ayarları olacaktır.

Bu kısımda Mesh datamız program tarafından okunacağı için gerekli kontrolleri yapmamıza ve kullanacağımız birim ve görüntüleme ayarlarını bu ekranda yapmamız gerekir.

Modelimize ait sınır koşullarımız aşağıdaki gibi tanımlanacaktır;

- Yer Çekimi İvmesi: -Y ekseninde 9.81 m/s^2
- Çözücü Türü: Basınç Tabanlı
- Zaman: Kararlı

Modelimizle ilgili türbülanslı akış ayarlarını, enerji denklemlerini, duvar ve ortama ait enerji ve akış özellikleri Tablo 4.2’de belirtilmiştir. Bu ayarlara göre modelimizin akış türü “k-epsilon” modeli olarak seçilmiş, denge dışı duvar özelliği aktif edilmiştir. Denge dışı duvar özelliği duvara komşu olan hücrelerdeki türbülans kinetik enerjiyi belirtir ve basınç gradyanının etkilerini de hesaplamalara dahil edecektir. Sistemimizde enerji denklemlerini de hesaplamaya dahil etmek üzere “Enerji” seçeneği de aktif edilmiş diğer hesaplamalara ihtiyaç duyulmadığından devre dışı bırakılmıştır.

Tablo 4.2. Sınır Şartları Parametreleri

Enerji	Açık
Akış Özellikleri	k-epsilon Modeli
	Denge Dışı Duvar

Hesaplamalara geçmeden önceki son sınır koşullarımız; kazan(device), temiz hava kanalı(air_inlet), dönüş havası kanalı(return), duvar ve ortam koşullarına ait tanımlamaların yapılması ile belirlenmiştir.

Bu tanımlamalara göre hava yoğunluğu 1.225 kg/m^3 , özgül ısı 1006.43 J/kg-K , ısı iletkenliği 0.0242 W/m-K , viskozite $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ olarak sisteme girilmiştir.

Kazan(device) cihazının yüzey sıcaklığı $50 \text{ }^\circ\text{C}$, kazan yüzey malzemesi “çelik” olarak tanımlanmıştır. Isı iletkenliği ve hesaplamalarda kullanılacak tanımlar buradaki verilere göre sistemde işlenecektir.

Temiz hava kanalı olarak belirlenen cihazdan ayrılan havanın hızı 1.18 m/s ve türbülans yoğunluğu %5 ve üfleme sıcaklığı $24 \text{ }^\circ\text{C}$ olarak tanımlanmıştır.

Benzer biçimde egzoz hava kanalına ait tanımlamalar yapılmış buna ilave dönüş havası sıcaklığı 35 °C olarak sisteme işlenmiştir.

Duvar özelliklerinin tanımlandığı bölüme, duvar sıcaklığı 35 °C olarak belirlenmiş ve kullanılan malzeme ise alüminyum olarak seçilmiştir.

Çözümleme özelliklerinin belirtildiği menüde standart çözümleme, referans çerçevesi ayarı hücre bölgesine göre olacak şekilde tanımlanmış ve sıcaklık değeri olarak 35 °C belirlenmiştir.

4.5. Simulasyon Parametrelerinin Belirlenmesi

Sınır koşullarımızı ve tüm tanımlamalarımızı da yaptıktan sonra hesaplamaların ve simulasyonun yapılacağı yöntemlerin tanımlanmasının ardından istenilen yakınsama miktarı programa belirtilerek hesaplamalar başlatılır. Her bir iterationda hesaplamalar yapılırken değerlerin istenilen koşulları sağlamasının ardından simulasyon tamamlanır ve ortama ait tüm sonuçlar istenilen herhangi bir yüzey ya da kesiti de kapsayacak şekilde yorumlamaları yapılır.

Model-1 olarak adlandırdığımız kazan dairesi simulasyonu için hesaplamada kullanılacak belirlenen ayarlar Basınç için ikinci düzey hesaplama seçilmiş fakat kullanılan sistemin yeterli olmamasından kaynaklı türbülans kinetik enerji, momentum ve türbülans dağılım oranı birinci düzey olarak belirlenmiştir. Daha ileri düzey bir çalışmada sistemin ve zamanın el verdiği oranda hesaplamalar birinci düzey olarak sonuçlandırıldıktan sonra tüm ayarlar sırasıyla ikinci düzey olarak yeniden hesaplanabilir. Bu durumda çözümün kesinlik oranı daha fazla artırılmış olacaktır. Ancak yaptığımız çalışmada bu düzeyde bir kesinlik belirtilen ayarlar için aranmadığından sonuçlar yeterli görülmüştür. Sonraki çalışmalarda bu durum ayrıca değerlendirilip karşılaştırma yapılabilir.

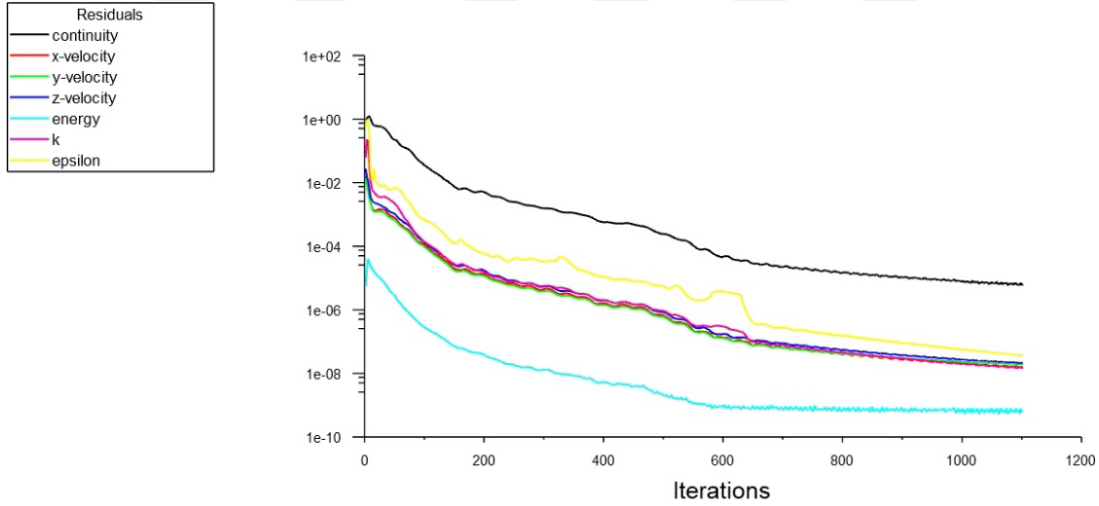
Hesaplama öncesi en önemli ayar yakınsamaların kaçınıcı parametrede sonlanacağı “yakınsama sayısı” değeridir. Burada girilen değer eğer yakınsamaların istenilen düzeye geldiği değerden büyük ise hesaplamalar otomatik olarak durdurulacak ve bir sonraki aşamaya geçilecektir. Fakat yeterli yakınsama oranına sahip olunamadı ise bu durumda sistem yeniden çalıştırılacak ve bir önceki hesaplamalarda kaldığı yerden devamı sağlanmış olacaktır. Genellikle yakınsama değerleri girilirken ilk önce 1000 civarı bir değer girilerek sistemin yorulmadan parça parça hesaplamaların yapılarak sonuca ulaşılması sağlanmış olacaktır.

5. CFD SİMULASYONU VE ANALİZ

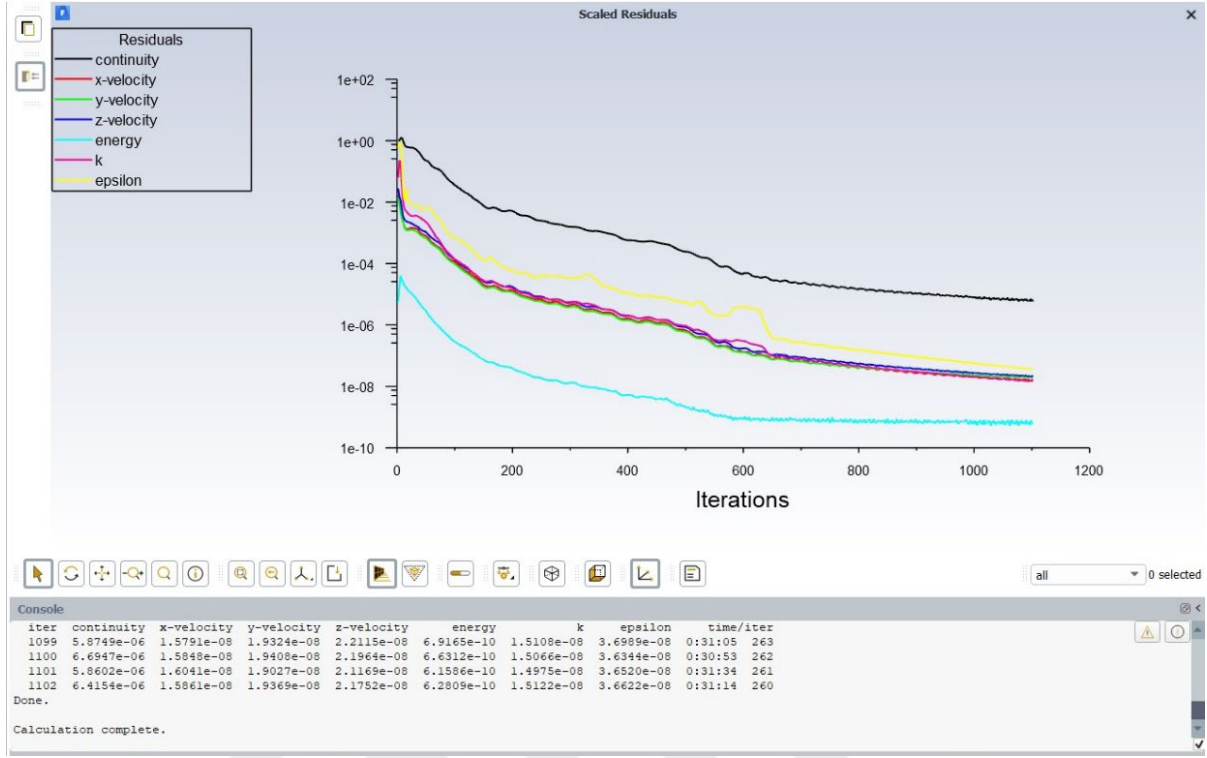
5.1.Mevcut Havalandırma Sisteminin Simülasyonu

Model-1 olarak tanımladığımız kazan dairesi simülasyonunda belirtilen ayarların yapılmasının ardından istediğimiz en hassas yakınsama değerleri 1100 civarı yakınsama hesaplaması ile tamamlanmıştır. Bu yakınsama değerleri ele alındığında sonuçlar tatmin edici düzeyde 10^{-6} seviyelerinin altında olmuştur. Bu simülasyona ait görüntüler Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir.

Görüldüğü üzere tüm hesaplanan veriler 10^{-6} seviyelerine geldiğinde hesaplama otomatik olarak durmuş ve analiz kısmına geçilmek üzere sonuç tamamlanmıştır. Bu yakınsama değerlerinde istenilen düzeye gelinememiş olsaydı bu durumda hesaplama yeniden çalıştırılacak ve istenilen seviyeye gelene kadar bu işlem devam edecekti.



Şekil 5.1. Model-1 Yakınsama Grafiği

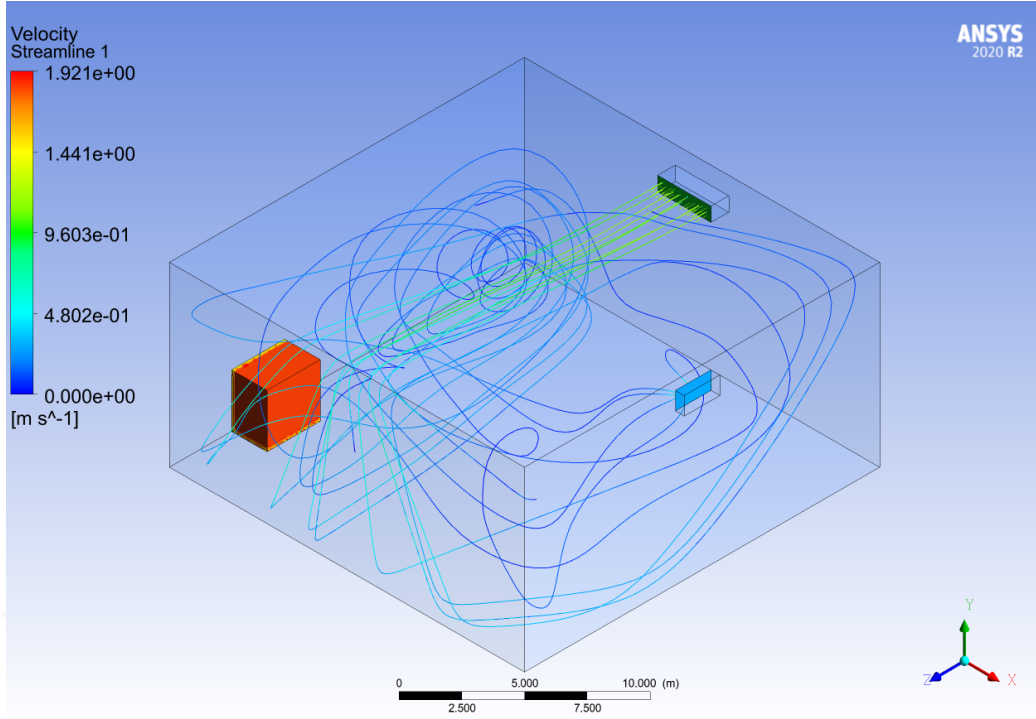


Şekil 5.2. Hesaplamanın Sonuçlandığı Değerler

5.2. Hava Akışı, Basınç Ve Isı Dağılımı

Yapılan hesaplamaların ardından Model-1 olarak tanımladığımız kazan dairesine ait detaylı simulasyon görüntüleri problem olup olmadığı, sistemin iyileştirmeye ihtiyaç duyup duymayacağı ya da havanın akış yönü ve özellikleri gibi birçok alanda bize yorumlama avantajı sağlayacaktır.

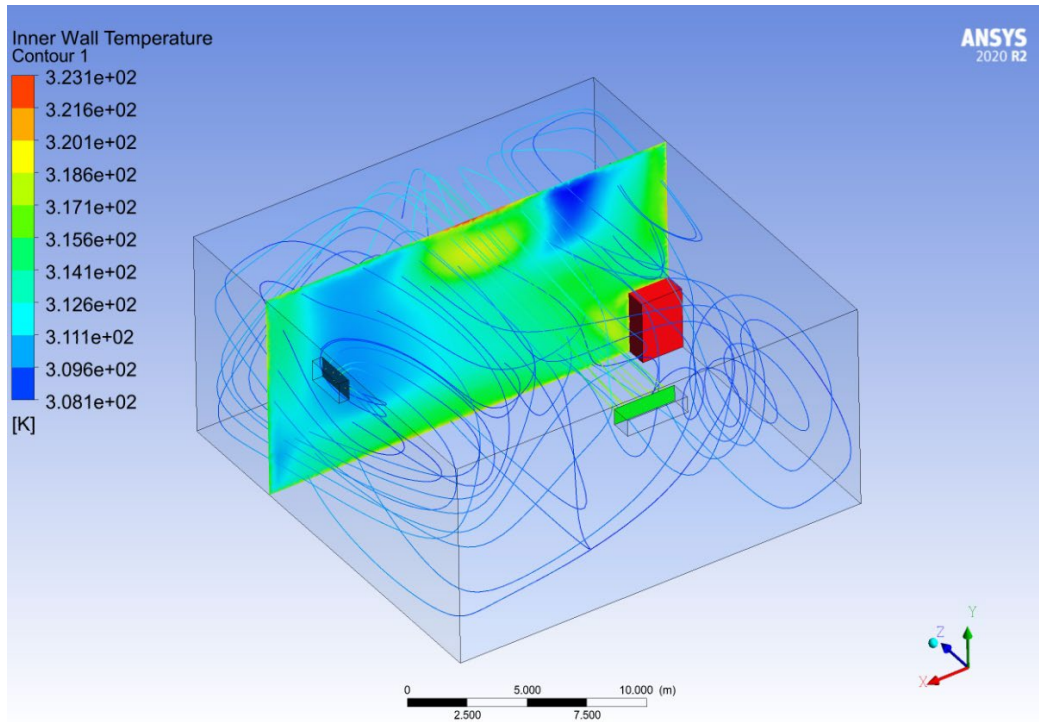
Hesaplamalara göre elde edilen veriler ve mevcut durum ortam özellikleri, havanın ortamdaki akış çizgileri, belirlenen kesite göre iç duvar sıcaklıkları, basınç dağılımı aşağıdaki şekillerde belirtildiği gibi gözlemlenmiştir.



Şekil 5.3. Hava Akış Çizgileri

Şekil 5.3, ANSYS Fluent yazılımında yapılan hava akışı simülasyonuna ait bir hız akış çizgileri (velocity streamlines) görselleştirmesidir. Görüntüde hava akışının yönü, girdap oluşumları ve türbülans bölgeleri hakkında önemli bilgiler sunulmaktadır. Sol üstte yer alan renk skalasına göre hava hızı 0 m/s (mavi) ile 1.921 m/s (kırmızı) arasında değişmektedir. Mavi ve açık yeşil tonlar, daha düşük hava hızlarını, Sarı, turuncu ve kırmızı tonlar, daha yüksek hava hızlarını göstermektedir. Sol taraftaki kırmızı bölge, hava giriş noktasıdır ve en yüksek hava hızlarının burada oluştuğu görülmektedir. Sağ üstteki yeşil renkli bölge ve sağ ortadaki mavi alan, egzoz çıkış noktalarıdır. Burada hava çıkışı sağlanmaktadır. Orta bölgede büyük girdaplar oluştuğu görülmektedir. Bu, hava akışının homojen olmadığını ve belirli bölgelerde hava sirkülasyonunun düzensiz olduğunu gösterir. Düşük hızdaki mavi akış çizgileri, durağan hava cepleri veya düşük hava değişim oranlarını işaret edebilir. Yüksek türbülanslı alanlar, enerji kayıplarına ve sistem verimliliğinin düşmesine neden olabilir. Egzoz çıkışlarının daha etkin konumlandırılması, hava akışındaki girdapları azaltabilir. Ek hava yönlendirme panelleri veya difüzörler kullanılarak, hava akışının daha homojen hale getirilmesi sağlanabilir. Hava giriş hızının optimizasyonu, türbülansın ve enerji kayıplarının azaltılmasına katkı sağlayabilir. Bu simülasyon, mevcut hava akış düzeninde yüksek türbülans ve girdap oluşumları olduğunu göstermektedir. Havalandırma sisteminin verimli çalışabilmesi için hava giriş-çıkış noktalarının optimize edilmesi, türbülansın azaltılması ve hava akışının daha dengeli hale getirilmesi gerekmektedir.

“A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation”, iç mekan hava akışı simülasyonu için sıfır-denklemli türbülans modelini kullanarak hava hızının, sıcaklık dağılımının ve türbülansın etkilerini incelemektedir. Simülasyon sonuçları, hava akışının düzensizliği ve girdap oluşumlarının havalandırma verimliliğini olumsuz etkileyebileceğini göstermektedir. Model-1’de tespit edilen girdaplar ve düzensiz akış çizgileri, bu çalışmadaki türbülans problemleriyle örtüşmektedir (Chen ve Xu, 1998). “Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1—Summary of prevalent turbulence models”, farklı türbülans modellerini kullanarak kapalı alanlardaki hava akışını analiz etmektedir. Çalışma, türbülans seviyelerinin belirli bölgelerde yüksek olduğunu ve bu durumun hava akışındaki düzensizlikleri artırarak verimliliği düşürdüğünü göstermektedir. Model-1’de gözlemlenen türbülans bölgeleri ve girdap oluşumları, bu çalışmada ele alınan türbülans kaynaklı sorunlarla doğrudan ilişkilidir (Zhai ve diğ., 2007). “Airflow modelling in a computer room”, bir bilgisayar odasındaki hava akışının sayısal simülasyonunu gerçekleştirmiş ve HVAC sistemleri için türbülans yönetiminin önemini vurgulamıştır. Model-1’de tespit edilen türbülans kinetik enerjisi ve hava akışı düzensizlikleri, bu çalışmadaki bulgularla benzerlik göstermektedir. Türbülansın belirli bölgelerde yoğunlaşmasının hava dağılımını etkilediği bu çalışmada da doğrulanmaktadır (Abanto ve diğ., 2004).



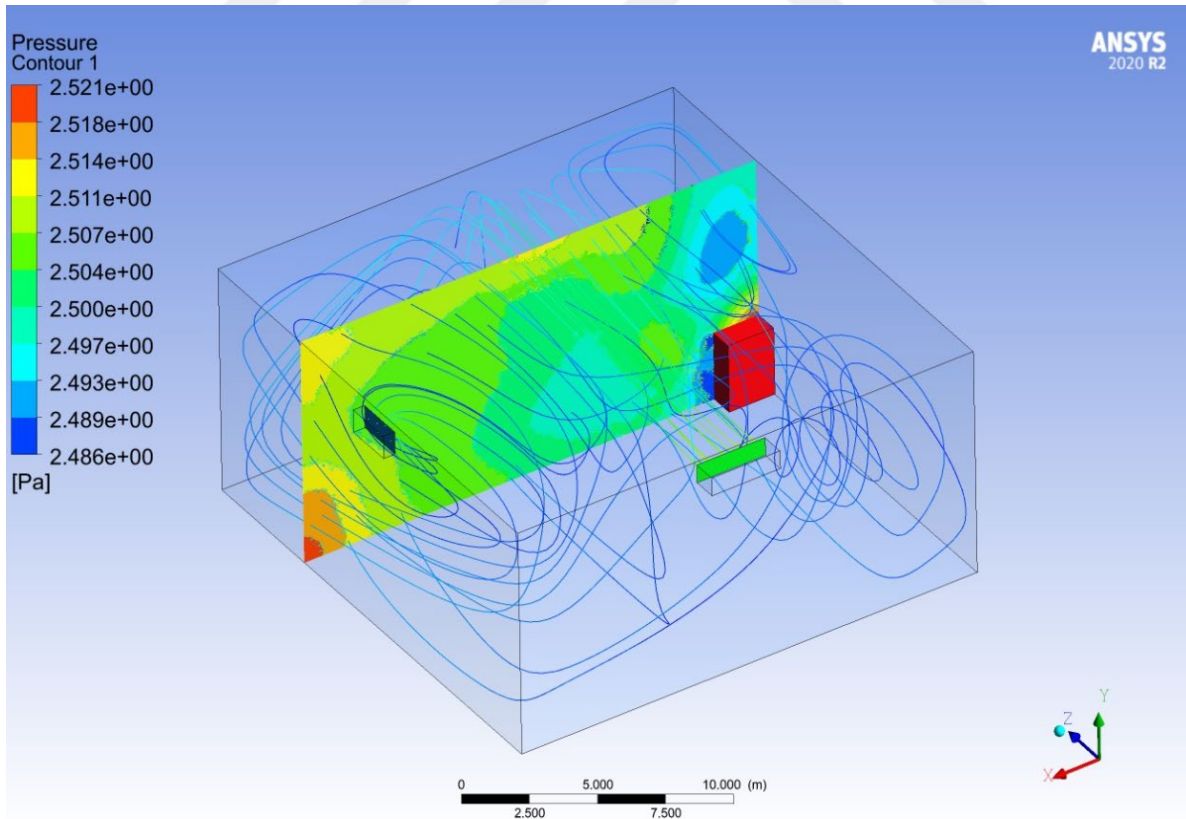
Şekil 5.4. Belirlenen Kesite Göre İç Duvar Sıcaklığı

Şekil 5.4, ANSYS Fluent yazılımında yapılan hava akışı ve iç duvar sıcaklık dağılımı simülasyonuna ait bir sıcaklık kontur haritasıdır. Görüntü, belirlenen bir kesitte iç duvar sıcaklıklarının değişimini göstermektedir. Sol üstteki renk skalasına göre sıcaklık değerleri 308.1 K ($\approx 35^{\circ}\text{C}$, mavi) ile 323.1 K ($\approx 50^{\circ}\text{C}$, kırmızı) arasında değişmektedir. Mavi ve yeşil tonlar, daha düşük sıcaklık değerlerine sahip bölgeleri temsil eder. Sarı, turuncu ve kırmızı tonlar, daha yüksek sıcaklık bölgelerini göstermektedir. Kırmızı bölge, sıcak hava giriş noktasını göstermektedir. Burada sıcaklık en yüksek seviyede olup, ortam ısısına önemli ölçüde katkı sağlamaktadır. Sol tarafta ve üst bölgelerdeki mavi alanlar, soğuk hava çıkış noktalarına veya düşük sıcaklıktaki bölgelerden hava akışına işaret etmektedir. Sıcaklık değişimi düzensizdir, bazı bölgelerde ani sıcaklık farkları görülmektedir. Bu durum, ısı dağılımının homojen olmadığını ve iç hava sirkülasyonunun düzensiz olduğunu gösterir. Üst duvar bölgesinde sıcak noktalar (sarı ve turuncu alanlar) oluşmuş olup, bu bölgelerde ısı birikimi meydana gelmektedir. Soğuk hava bölgeleri (mavi alanlar), özellikle hava çıkış noktalarına yakın bölgelerde sıcaklığın daha düşük olduğunu göstermektedir. Görselde gösterilen hava akış çizgileri (streamlines) karmaşık ve girdaplı bir yapı sergilemektedir. Tavan bölgesinde türbülans yüksek olup, sıcaklık farklarının büyük olduğu görülmektedir. Egzoz çıkışları sıcaklık farklarını dengelemekte yetersiz kalabilir, bu nedenle hava akışının daha iyi yönlendirilmesi gerekebilir. Egzoz çıkışlarının yerleşimi iyileştirilmeli, sıcak hava çıkışının daha verimli olması sağlanmalıdır. Hava akışı yönlendirme panelleri kullanılarak sıcak ve soğuk bölgeler arasındaki farklar azaltılabilir. Ek izolasyon malzemeleri kullanılarak, iç duvarlarda oluşan sıcaklık farkları minimize edilebilir. Hava giriş açısı ve debisi optimize edilerek, sıcak hava homojen bir şekilde dağıtılabilir. Bu analiz, iç duvar sıcaklıklarının homojen dağılmadığını ve belirli bölgelerde sıcaklık farklarının yüksek olduğunu göstermektedir. Daha verimli bir ısı yönetimi ve daha dengeli hava akışı sağlamak için egzoz çıkışlarının optimize edilmesi, türbülansın azaltılması ve hava akışının daha düzenli hale getirilmesi gerekmektedir.

“*HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming*”, HVAC sistemlerinin enerji yönetimi için optimize edilmesi gerektiğini ve sıcaklık farklarının dengelenmesinin sistem verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. Simülasyon sonuçları, yüksek sıcaklık gradyanlarının belirli bölgelerde enerji kayıplarına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.4’de gözlemlenen düzensiz sıcaklık dağılımı ve duvar bölgelerindeki sıcak noktalar, bu çalışmada ele alınan sıcaklık optimizasyon gereksinimleriyle doğrudan ilişkilidir (Fong ve diğ., 2006). “*Minimization of energy consumption in HVAC systems with*

data-driven models and an interior-point method”, HVAC sistemlerinde enerji tüketiminin en aza indirilmesi için sıcaklık dağılımının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, sıcaklık gradyanlarının yüksek olduğu bölgelerde türbülansın arttığını ve bunun hava akışının düzensizleşmesine neden olduğunu göstermektedir. Şekil 5.4’de belirlenen sıcaklık farkları ve duvar bölgelerindeki ani sıcaklık değişimleri, bu çalışmadaki enerji verimliliği optimizasyonu gerekliliğiyle örtüşmektedir (Kusiak ve diğ., 2014). “*Energy saving by integrated control of natural ventilation and HVAC systems using model guide for comparison*”, Bu makale, doğal havalandırma ve HVAC sistemlerinin entegre kontrolü yoluyla enerji tasarrufunun sağlanmasını incelemektedir. Çalışma, iç ortam sıcaklık dengesizliklerinin hava akışı ve ısı transferi üzerinde büyük etkisi olduğunu ortaya koymaktadır. Şekil 5.4’de gözlemlenen sıcaklık farkları ve hava akışının düzensizliği, bu çalışmada belirtilen iç hava kalitesi ve sıcaklık homojenliği konusundaki bulgularla doğrudan ilişkilidir (Homod ve diğ., 2014).

Bu makaleler, Şekil 5.4’de gösterilen sıcaklık farklarının, türbülansın ve hava akışı düzensizliklerinin HVAC sistemlerinin verimliliği üzerindeki etkilerini akademik olarak desteklemektedir.

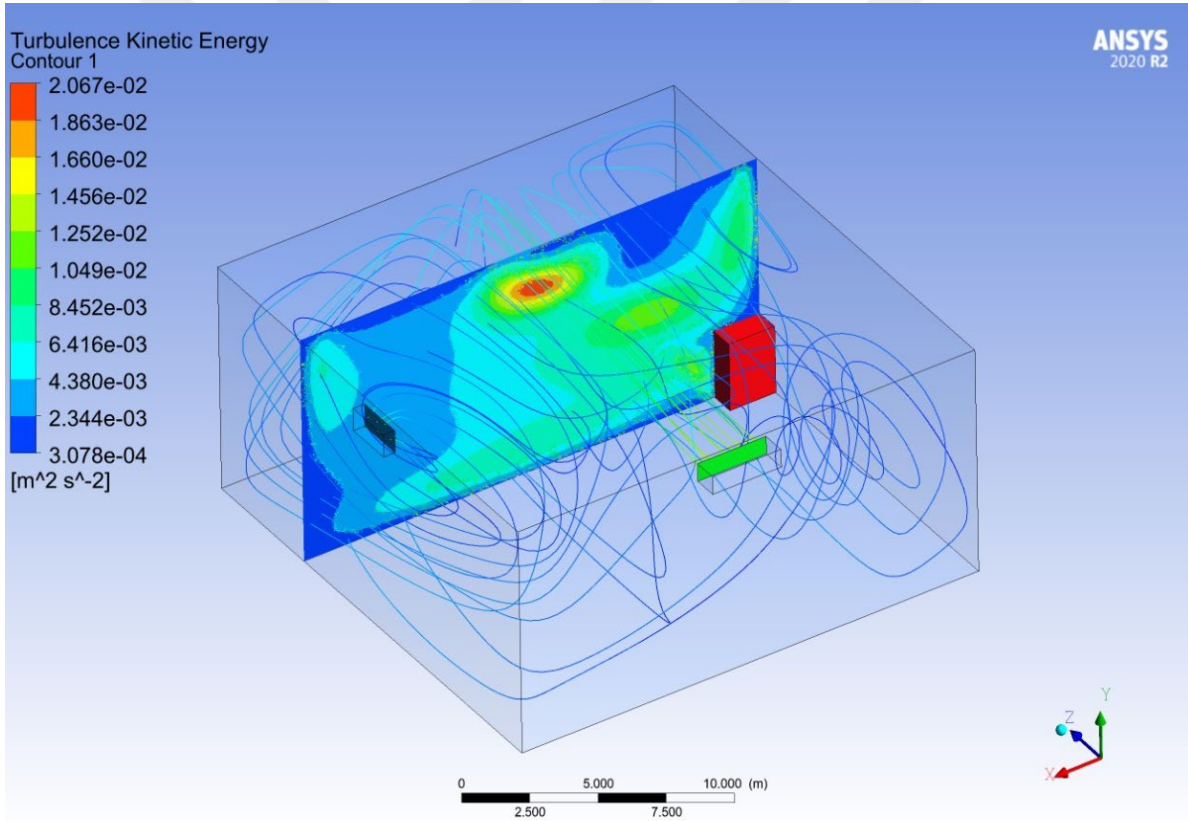


Şekil 5.5. Belirtilen Kesite Göre Basınç Dağılımı

Şekil 5.5, ANSYS Fluent yazılımında yapılan hava akışı ve basınç dağılımı simülasyonuna ait bir basınç kontur haritasıdır. Görüntü, belirlenen bir kesitte iç ortamda oluşan basınç dağılımını göstermektedir. Sol üstteki renk skalasına göre basınç değerleri 2.486 Pa (mavi) ile 2.521 Pa (kırmızı) arasında değişmektedir. Mavi ve yeşil tonlar, düşük basınç bölgelerini temsil eder. Sarı, turuncu ve kırmızı tonlar, daha yüksek basınç bölgelerini göstermektedir. Kırmızı bölge, hava giriş noktası olup, burada en yüksek basınç değerleri görülmektedir. Sol tarafta ve alt bölgelerdeki mavi alanlar, düşük basınç bölgeleridir. Burada hava akışının hızlandığı ve egzoz çıkışlarına yönlendiği gözlemlenmektedir. Basınç farklarının belirli bölgelerde ani değişiklik gösterdiği görülmektedir, bu da hava akışında düzensizliklere ve türbülansa neden olabilir. Egzoz çıkış noktalarının çevresindeki düşük basınç bölgeleri, havanın etkili bir şekilde tahliye edildiğini göstermektedir. Düşük basınçlı bölgeler, hava sirkülasyonunun düzensiz olduğu alanlar olup, burada türbülansın yüksek olabileceği değerlendirilmektedir. Görselde gösterilen hava akış çizgileri (streamlines) karmaşık bir yapı sergilemektedir. Hava giriş noktalarında basınç yüksek ancak çıkışa doğru hızla düşmektedir, bu da akış yönünde ani değişimlere ve girdap oluşumlarına neden olabilir. Basınç farkları çok büyük olmamakla birlikte, bazı bölgelerde hava akışının durağan hale gelebileceği ve sistemin tam anlamıyla dengeli çalışmadığı anlaşılmaktadır. Hava giriş ve egzoz çıkışlarının yerleşimi optimize edilerek, basınç dağılımındaki ani değişimler azaltılabilir. Hava akış yönlendirme panelleri kullanılarak, hava sirkülasyonunun daha homojen olması sağlanabilir. Egzoz çıkışlarının kapasitesi artırılarak, düşük basınç bölgelerindeki türbülans etkileri azaltılabilir. Hava giriş hızları düzenlenerek, türbülans oluşumu minimize edilebilir ve daha dengeli bir basınç profili oluşturulabilir. Bu analiz, basınç dağılımının tam olarak dengeli olmadığını ve bazı bölgelerde ani basınç değişimlerinin hava akışını düzensiz hale getirdiğini göstermektedir. Havalandırma sisteminin verimli çalışabilmesi için basınç farklarının optimize edilmesi, türbülansın azaltılması ve hava giriş-çıkış noktalarının daha uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

“*Review of modeling methods for HVAC systems*”, HVAC sistemlerinin modelleme yöntemlerini inceleyerek, basınç dağılımının hava akışı üzerindeki kritik rolünü vurgulamaktadır. Çalışma, basınç farklarının hava sirkülasyonunda türbülansa neden olabileceğini ve hava akışındaki dengesizliklerin havalandırma sisteminin verimini düşürdüğünü göstermektedir. Şekil 5.5’de gözlemlenen ani basınç değişimleri ve hava akışı düzensizlikleri, bu çalışmadaki basınç yönetimi konusundaki bulgularla doğrudan örtüşmektedir (Afram ve Janabi-Sharifi, 2014). “*Modeling and optimization of HVAC energy consumption*”, HVAC sistemlerinde enerji tüketimini optimize etmek için basınca dayalı

yöntemleri ele almaktadır. Çalışma, hava giriş noktalarındaki yüksek basınç bölgelerinin ve egzoz çıkışlarına yakın düşük basınç bölgelerinin hava akışı dengesizliğine yol açtığını ortaya koymaktadır. Şekil 5.5’de görülen basınç farkları ve düzensiz hava akışı, bu makalede açıklanan enerji verimliliği ve hava akışı yönetimi konularıyla doğrudan ilişkilidir (Kusiak ve diğ., 2010). “*Overview of HVAC system simulation*”, HVAC sistemlerinin simülasyonlarını kapsamlı bir şekilde analiz ederek, aşırı türbülansın önlenmesi için basınç gradyanlarının dengelenmesinin önemini vurgulamaktadır. Çalışma, ani basınç değişimlerinin hava akışında düzensizliklere ve enerji kayıplarına neden olabileceğini göstermektedir. Şekil 5.5’de gözlemlenen basınç farklarının neden olduğu türbülans ve hava sirkülasyonu problemleri, bu çalışmadaki bulgularla doğrudan örtüşmektedir (Trčka ve Hensen, 2010). Bu makaleler, Şekil 5.5’de gözlemlenen basınç dağılımı dengesizliklerinin, hava akışı, türbülans ve enerji verimliliği üzerindeki etkilerini akademik olarak desteklemektedir.



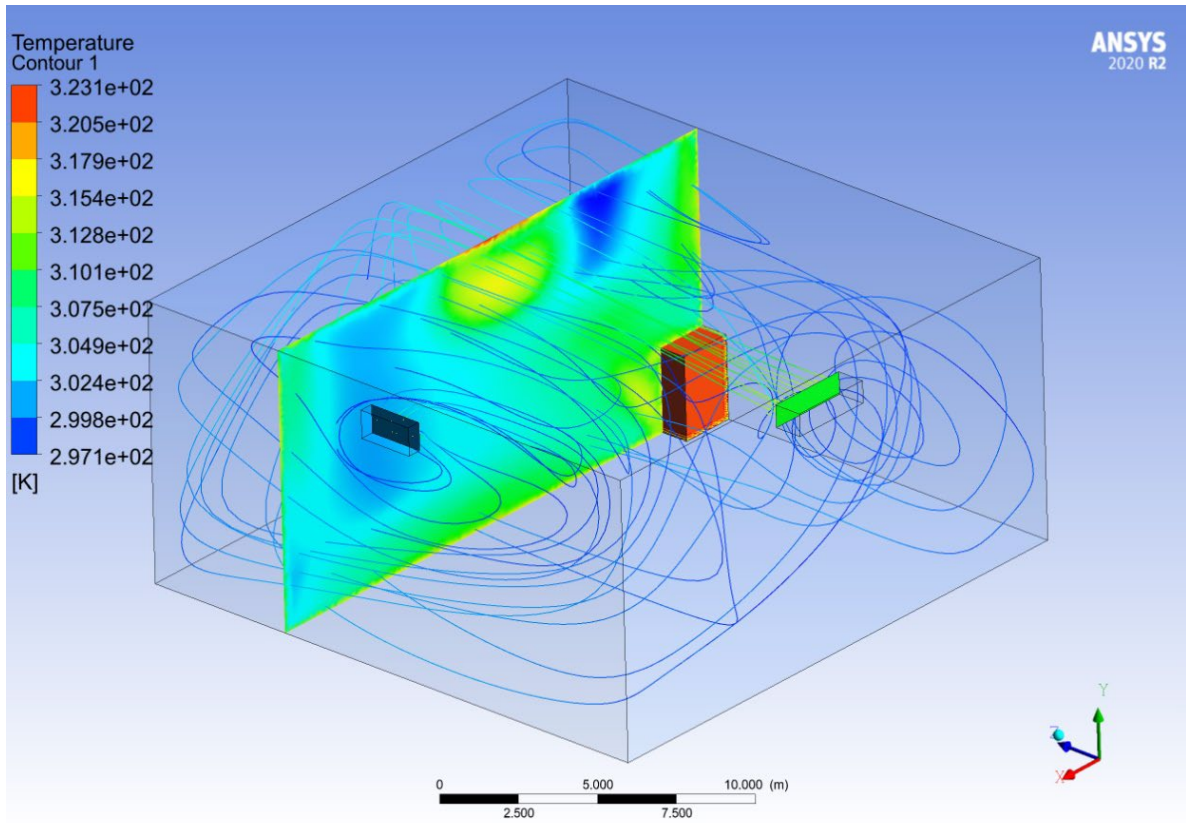
Şekil 5.6. Belirtilen Yüzeye Göre Türbülans Kinetik Enerjisi

Şekil 5.6, ANSYS Fluent yazılımında yapılan hava akışı ve türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımı simülasyonuna ait bir kontur haritasıdır. Görüntü, belirlenen bir yüzeyde türbülans kinetik enerjisi (TKE) değerlerinin dağılımını göstermektedir. Sol üstte yer alan renk skalasına göre TKE değerleri $3.078 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$ (mavi) ile $2.067 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}^2$ (kırmızı) arasında

değişmektedir. Mavi ve yeşil tonlar, düşük türbülans bölgelerini gösterir. Sarı, turuncu ve kırmızı tonlar, yüksek türbülans bölgelerini ifade eder. Kırmızı bölge, en yüksek türbülans kinetik enerjisine sahip alanı göstermektedir. Mavi alanlar, hava akışının nispeten daha stabil olduğu bölgeleri işaret etmektedir. Türbülansın en yoğun olduğu bölge, hava girişinin hemen yakınında ve üst kesimde görülmektedir. Bu durum, hava giriş hızının yüksek olması ve akış yönündeki değişimlerden dolayı türbülans oluştuğunu göstermektedir. Yüksek türbülans seviyeleri, hava akışının düzensizliğini artırarak enerji kayıplarına ve hava sirkülasyonunun verimsiz olmasına neden olabilir. Tavan bölgesinde türbülans kinetik enerjisi yüksek olup, bu bölgede akışın kontrol edilmesi gerekmektedir. Egzoz çıkış noktalarının yakınında daha düşük türbülans gözlemlenmektedir, bu da hava tahliyesinin nispeten yönlendirilmiş olduğunu göstermektedir. Hava giriş hızının optimize edilmesi ile türbülansın azaltılması sağlanabilir. Ek hava yönlendirme panelleri kullanılarak hava akışının daha stabil hale getirilmesi mümkündür. Egzoz çıkış noktalarının daha verimli bir şekilde konumlandırılması, hava sirkülasyonunu dengeli hale getirebilir. Tavan bölgesinde hava akışı daha iyi yönlendirilerek, burada meydana gelen türbülans etkisi azaltılabilir. Bu analiz, hava giriş noktalarının yakınında ve tavan bölgesinde yüksek türbülans kinetik enerjisi oluştuğunu, bunun da hava akışını düzensiz hale getirdiğini göstermektedir. Daha verimli bir hava dağılımı ve enerji kullanımı sağlamak için türbülansın azaltılması, hava giriş-çıkış noktalarının optimize edilmesi ve hava akışının daha homojen hale getirilmesi gerekmektedir.

“A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation”, iç mekan hava akış simülasyonu için sıfır-denklemli türbülans modelini kullanarak türbülans kinetik enerjisi ve hava akışı dengesizliklerini analiz etmektedir. Çalışma, türbülans seviyelerinin yüksek olduğu bölgelerde hava akışının düzensiz hale geldiğini ve enerji kayıplarının arttığını göstermektedir. Şekil 5.6’da gözlemlenen türbülanslı alanlar ve hava akışı düzensizlikleri, bu çalışmadaki bulgularla doğrudan ilişkilidir (Chen ve Xu, 1998). *“Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part I—Summary of prevalent turbulence models”*, farklı türbülans modellerini karşılaştırarak kapalı alanlardaki hava akışını incelemektedir. Çalışmada, yüksek türbülans kinetik enerjisi değerlerinin bulunduğu bölgelerde hava akışının düzensiz olduğu ve bu durumun hava sirkülasyonunu olumsuz etkilediği belirtilmiştir. Şekil 5.6’da görülen yüksek türbülans alanları, bu makalede ele alınan türbülans yönetimi gerekliliği ile örtüşmektedir (Zhai ve diğ., 2007). *“Assessment of various turbulence models for transitional flows in an enclosed environment (RP-1271)”*, geçiş rejimindeki hava akışlarını analiz ederek türbülans kinetik enerjisinin iç ortam hava

sirkülasyonu üzerindeki etkisini incelemektedir. Çalışma, yüksek türbülans seviyelerinin havalandırma sisteminin verimini düşürdüğünü ve türbülansın özellikle tavan seviyelerinde kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir. Şekil 5.6'da tavan bölgesinde yüksek türbülans kinetik enerjisi gözlemlenmiş olup, bu durum makaledeki bulgularla doğrudan paralellik göstermektedir (Wang ve Chen, 2009). Bu makaleler, Şekil 5.6'da gözlemlenen türbülans kinetik enerjisi seviyelerinin hava akışı ve sistem verimliliği üzerindeki olumsuz etkilerini akademik olarak desteklemektedir.



Şekil 5.7. Belirlenen Kesite Göre Alan Sıcaklığı

Şekil 5.7, ANSYS Fluent yazılımında gerçekleştirilen hava akışı ve sıcaklık dağılımı simülasyonuna ait bir kontur haritasıdır. Görüntü, belirlenen bir kesitte ortam sıcaklık dağılımını göstermektedir. Sol üstteki renk skalasına göre sıcaklık değerleri 297.1 K ($\approx 24^{\circ}\text{C}$, mavi) ile 323.1 K ($\approx 50^{\circ}\text{C}$, kırmızı) arasında değişmektedir. Mavi ve yeşil bölgeler, daha düşük sıcaklık alanlarını gösterirken, sarı, turuncu ve kırmızı bölgeler daha yüksek sıcaklıkları temsil etmektedir. Kırmızı alan, en yüksek sıcaklık bölgesini temsil etmektedir ve hava giriş bölgesinin yakınında yoğunlaşmaktadır. Sarı ve yeşil bölgeler, ısı yayılımının devam ettiği ancak sıcaklığın nispeten daha düşük olduğu alanları göstermektedir. Mavi ve açık yeşil

bölgeler, soğuk hava girişinin ve hava akışının etkili olduğu bölgeleri işaret etmektedir. Hava akış çizgileri (streamlines), odadaki hava sirkülasyonunun düzensiz olduğunu göstermektedir. Tavan bölgesinde türbülans ve sıcaklık farkları belirgindir, bu da sıcak hava birikimi yaşandığını ve homojen bir sıcaklık dağılımının olmadığını göstermektedir. Düşük sıcaklıklı bölgeler, egzoz çıkış noktalarının olduğu alanlara yakın konumlanmıştır, bu da havanın tahliye edildiği yerlerde sıcaklığın daha stabil hale geldiğini göstermektedir. Tavan bölgesinde sıcak noktalar oluşmuş, bu da sıcak havanın yükseldiğini ve burada sıkıştığını göstermektedir. Egzoz çıkışlarının konumu ve hava akışının düzensizliği nedeniyle, bazı bölgelerde yüksek sıcaklık gradyanları oluşmuş, bu da ısı dağılımının dengesiz olduğunu göstermektedir. Egzoz çıkışlarının daha iyi konumlandırılması ile sıcak hava tahliyesi optimize edilebilir. Ek hava yönlendirme panelleri kullanılarak, sıcaklık farkları dengelenebilir ve sıcak hava homojen bir şekilde dağıtılabilir. Hava giriş hızının optimize edilmesi, türbülansın ve sıcaklık gradyanlarının azaltılmasına yardımcı olabilir. İzolasyon malzemeleri kullanılarak, belirli yüzeylerde aşırı ısınma önlenir. Bu analiz, alan sıcaklığının homojen dağılmadığını ve belirli bölgelerde sıcaklık farklarının yüksek olduğunu göstermektedir. Daha verimli bir ısı yönetimi sağlamak için hava giriş-çıkış noktalarının optimize edilmesi, sıcak hava birikiminin önlenmesi ve türbülansın azaltılması gerekmektedir.

“*Dynamic model of an HVAC system for control analysis*”, HVAC sistemlerinin dinamik modellerini kullanarak sıcaklık dağılımını ve iç duvar sıcaklıklarının bölgedeki hava sıcaklığı üzerindeki etkisini analiz etmektedir. Çalışma, sıcaklık dağılımının daha homojen olması için HVAC sistemlerinin nasıl optimize edilmesi gerektiğini tartışmaktadır. Şekil 5.7’de gözlemlenen sıcaklık değişimleri ve sıcak hava birikimleri, bu çalışmadaki sıcaklık dengeleme gerekliliğiyle doğrudan ilişkilidir (Tashtoush ve diğ., 2005). “*Overview of HVAC system simulation*”, HVAC sistemlerinin simülasyonlarına genel bir bakış sunarak, sıcaklık dağılımının homojen olmasının önemini vurgulamaktadır. Çalışmada, sıcak hava ve soğuk hava bölgeleri arasındaki dengesizliğin hava akışı üzerinde olumsuz etkileri olduğu gösterilmektedir. Şekil 5.7’de görülen sıcaklık farkları ve türbülans, bu makalenin ortaya koyduğu HVAC optimizasyon ihtiyacıyla doğrudan örtüşmektedir (Trčka ve Hensen, 2010). “*Dynamic simulation of energy management control functions for HVAC systems in buildings*”, HVAC sistemlerinde enerji yönetimi kontrol fonksiyonlarının dinamik simülasyonlarını kullanarak sıcaklık dağılımını analiz etmektedir. Çalışma, sıcaklık dalgalanmalarının sistem verimliliği üzerindeki etkisini ve sıcak noktaların oluşmasını önlemek için alınabilecek önlemleri ele almaktadır. Şekil 5.7’de görülen sıcak hava bölgeleri ve tavan seviyesindeki sıcaklık

değişimleri, bu çalışmanın sonuçlarıyla doğrudan ilişkilidir (Huang ve diğ., 2006). Bu makaleler, Şekil 5.7’de gözlemlenen sıcaklık dağılımı dengesizliklerinin, hava akışı, enerji verimliliği ve sistem optimizasyonu üzerindeki etkilerini akademik olarak desteklemektedir.

5.3. Mevcut Sorunların Tespiti Ve İyileştirme Alanları

Kazan dairelerinin havalandırma sistemi, güvenlik ve verimlilik açısından kritik öneme sahiptir. Bilindiği üzere kazan dairelerinde kullanılan ekipmanlar hem ekonomik olarak pahalı cihazlardır hem de sürekli çalışmaları önem arz etmektedir. Hastane kazan dairelerine baktığımızda, hastanenin siterilizasyonu, sürekli olarak ısıtma ve sıcak su ihtiyacı, buhar üretimine katkıda bulunması, gerekirse elektrik üretimi gibi konularda hayati rol oynadığı görülmektedir.

Bu durumda kazan dairesi havalandırmasını önemli hale getiren birkaç durum oluşmaktadır.

- Doğru Hava Akışı: Yakıcı cihazların sağlıklı çalışması ve gerekli oksijen temini için sürekli taze hava girişi, ortamdaki kirli ve kalitesiz havanın dışarı atılması için ise etkili bir egzoz sistemi gerekmektedir.
- Güvenlik Önlemleri: Acil durum oluşması halinde hızlı bir şekilde devreye girecek acil durum havalandırma sistemi ve uygun hava hızına sahip kanallar olası bir yangın veya gaz kaçağı durumlarında hayati öneme sahiptir.
- Isı ve Nem Kontrolü: Enerji kayıplarını minimum düzeye indirmek ve ortamda bulunan cihazların uzun ömürlü olabilmesi için ortamdaki sıcaklığın ve nemin optimum düzeyde olması ve cihazların korozyona uğramaması adına önemlidir.
- Enerji Verimliliği: Kullanılan fanların ve ya motorların enerji verimliliği açısından yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Zira enerji ihtiyacı günümüzde her geçen gün daha kritik öneme sahip bir konu olarak bilinmektedir.

Tüm bu konu başlıkları göstermişirki özellikle hastanelerde bulunan kazan daireleri için üstün körü hesaplamalarla cihaz seçimi ve kullanımı yerine mevcutta bulunan veya yeni inşa edilecek olan kazan dairelerinde CFD analizleri gibi etkili yöntemler daha yaygın kullanılmak zorundadır.

6. İYİLEŞTİRME ÖNERİLERİ

6.1. Hava Kalitesini Artıracak Tasarım Değişiklikleri

Mevcutta hesaplamaları yapılan Model-1 olarak tanımladığımız kazan dairesi analizlerine baktığımızda, ortam havasının sıcaklık, basınç, ve diğer simülasyonlarda homojen bir hava ortamı yaratmadığı görülmüştür. Buna ek olarak alternatif tasarımların sisteme etkilerinin ne olabileceği konusunda farklı tasarımlar yapılmasının daha verimli enerji kullanımına, daha kaliteli, homojen ve daha ideal hava dağılımına etkilerini incelemek gerekmektedir.

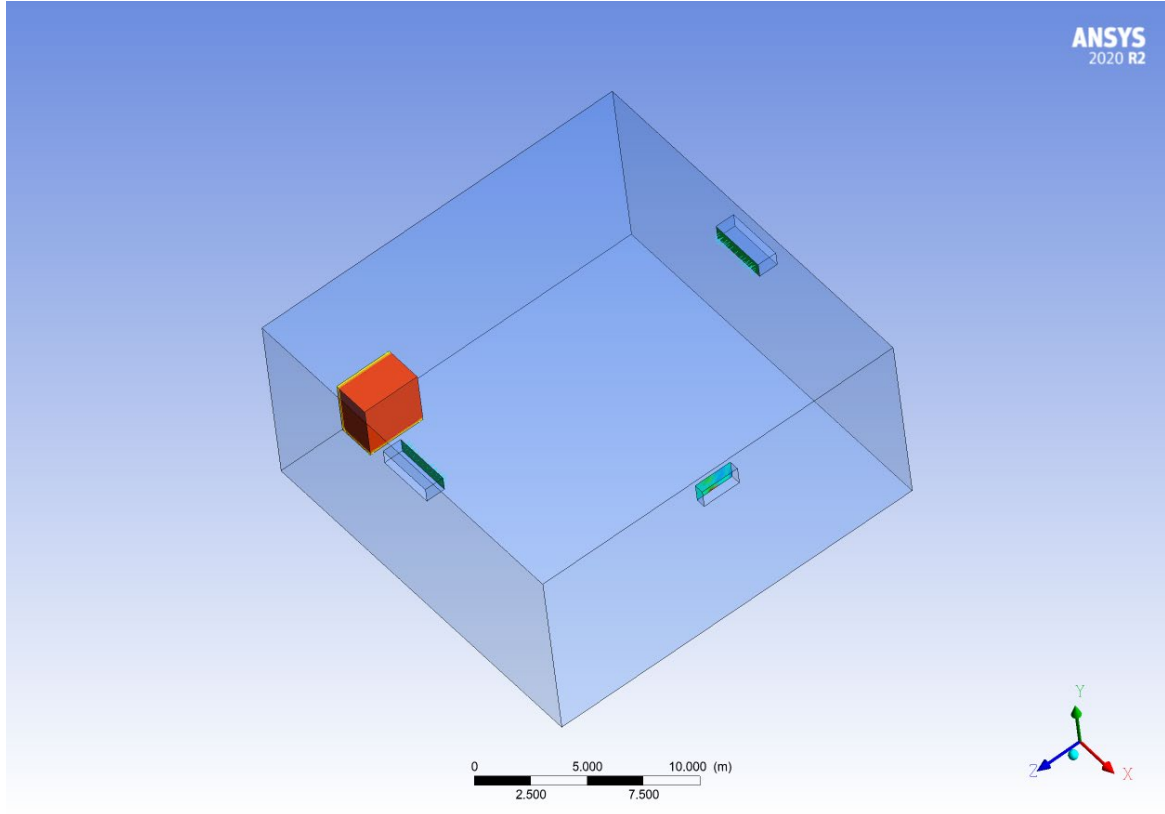
Bu durumda kazan sistemine dokunmadan mevcutta bulunan sisteme 1 adet daha temiz hava kanalı eklenerek oluşturulabilecek Model-2 olarak tanımladığım bir tasarım ve 2 adet temiz hava kanalına ek olarak 2 adet egzoz hava kanalı tasarımı ile oluşturulabilecek Model-3 olarak tanımladığım alternatif tasarımların analizlerini yaparak mevcut sisteme etkilerinin ne olacağı araştırma konusunu oluşturmuştur.

6.2. Alternatif Havalandırma Düzenlemeleri

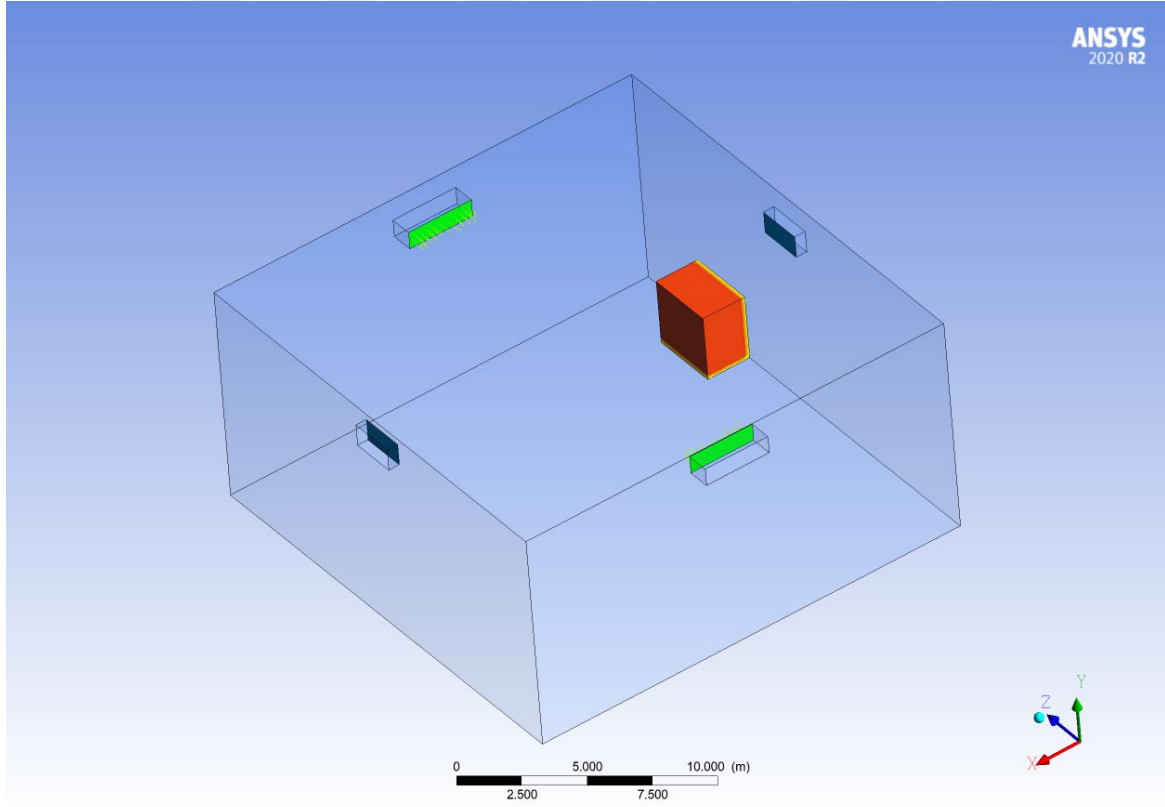
Tablo 6.1. Modellerin Tasarım Farklılıkları

MODEL	ÖZELLİK	HAVA HIZI	SICAKLIK
MODEL-1	1 Temiz Hava Kanalı	1,18 m/s	24 °C
	1 Egzoz Kanalı	1,18 m/s	35 °C
MODEL-2	2 Temiz Hava Kanalı	0,59 m/s	24 °C
	1 Egzoz Kanalı	1,18 m/s	35 °C
MODEL-3	2 Temiz Hava Kanalı	0,59 m/s	24 °C
	2 Egzoz Kanalı	1,18 m/s	35 °C

Tablo 6.1’de belirtildiği şekilde eklemeler yapılarak Model-1 olarak tanımladığım kazan dairesi içerisindeki diğer tüm değerler aynı kalacak şekilde sadece havalandırma kanallarına ilaveler yaparak ve temiz hava kanalı fan hızını yarı yarıya düşürerek tasarlanan model-2 ve model-3 için geometriler şekil 6.1 ve şekil 6.2’de gösterilmiştir.



Şekil 6.1. Model-2 Kazan Dairesi Geometrisi

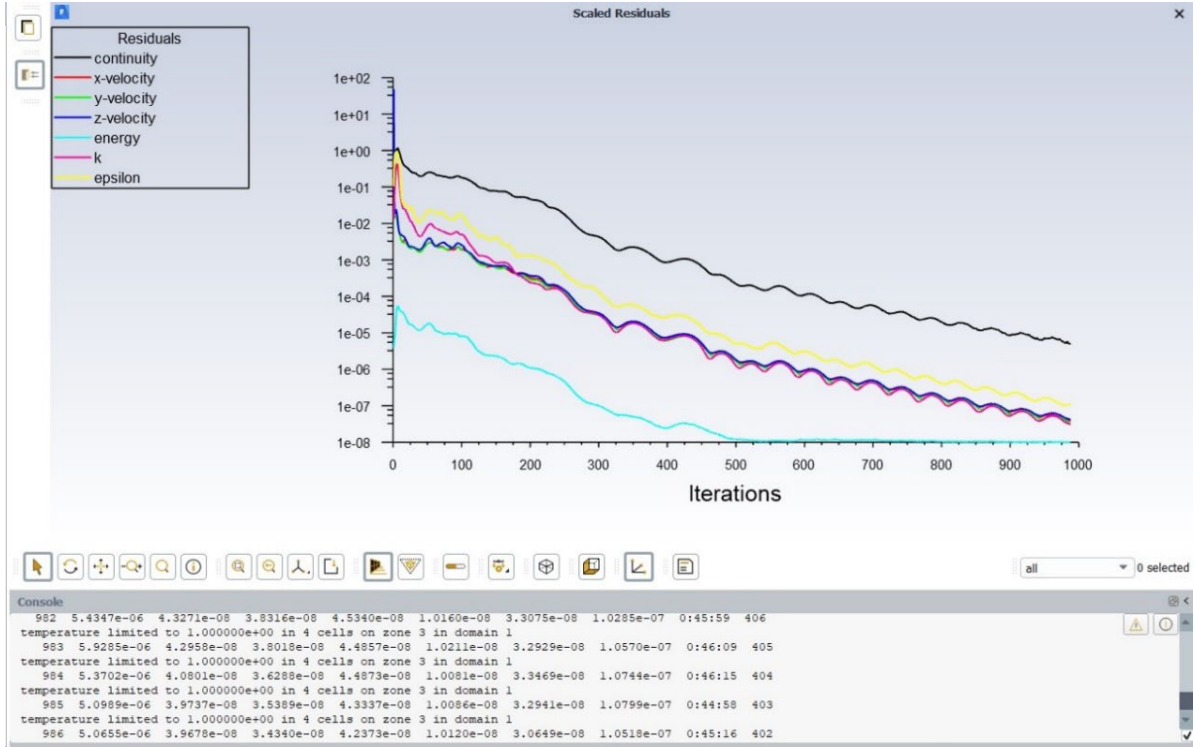


Şekil 6.2. Model-3 Kazan Dairesi Geometrisi

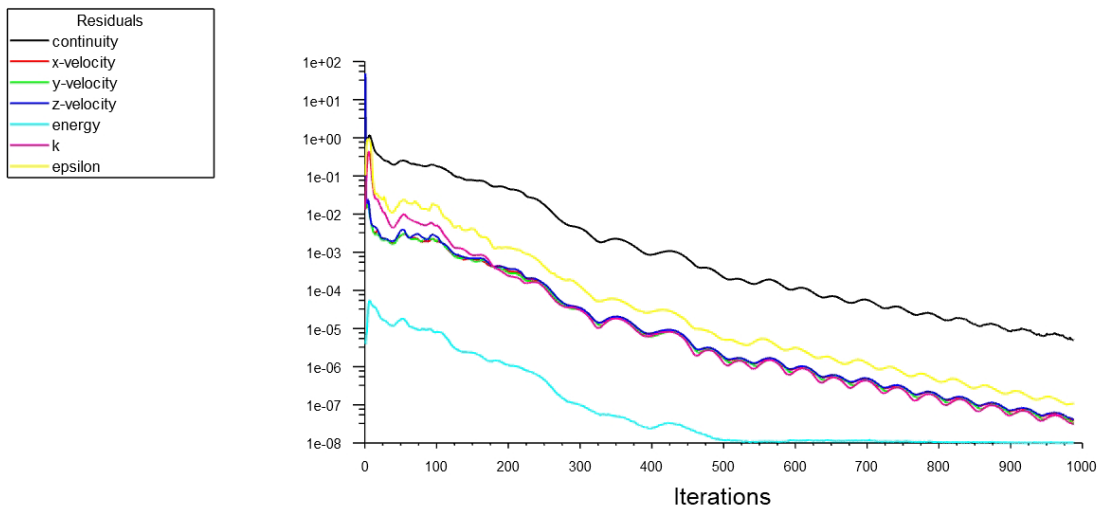
6.3. Yeni Simulasyon Sonuçları

Bu geometri ve sınır koşullarına göre Model-1’de olduğu gibi Model-2 ve Model-3 kazan dairelerine ait yakınsama grafikleri yine tatmin edici şekilde sonuçlandığından hesaplamaların doğruluk oranı yeterli düzeyde kabul edilmiştir.

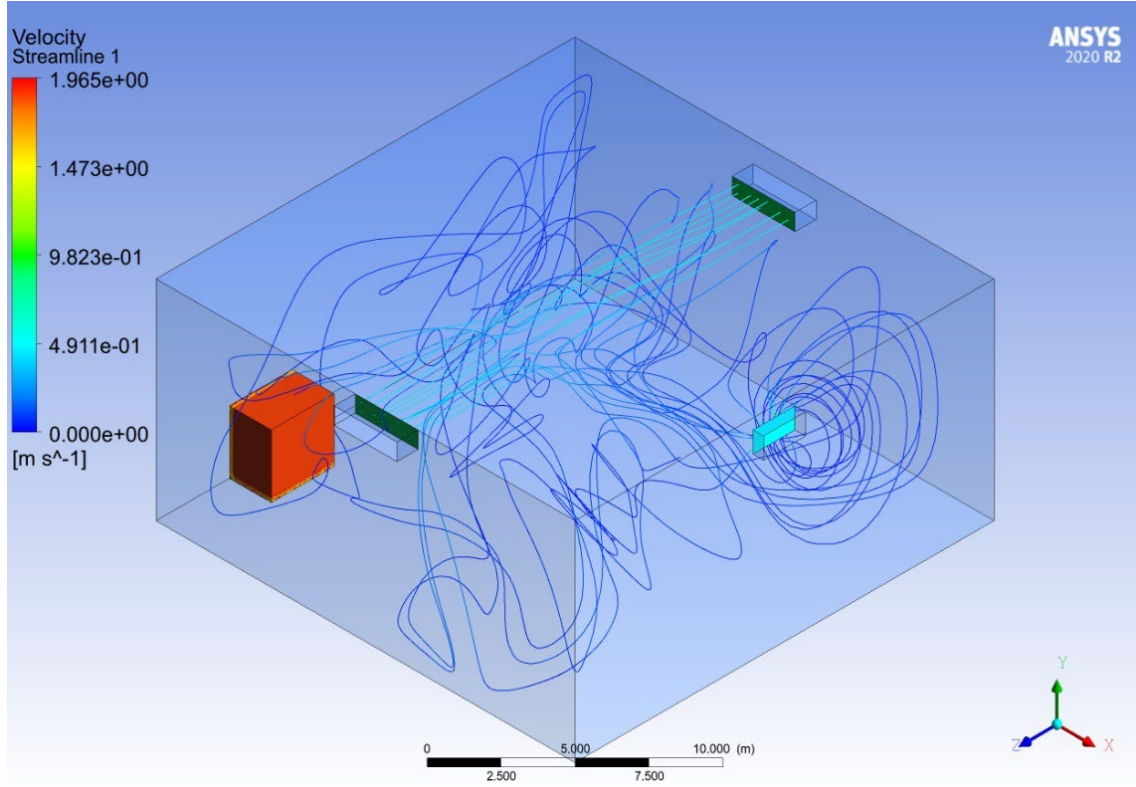
6.3.1. Model-2 analiz sonuçları



Şekil 6.3. Model-2 Hesaplamanın Sonuçlandığı Değerler



Şekil 6.4. Model-2 Yakınsama Grafiği

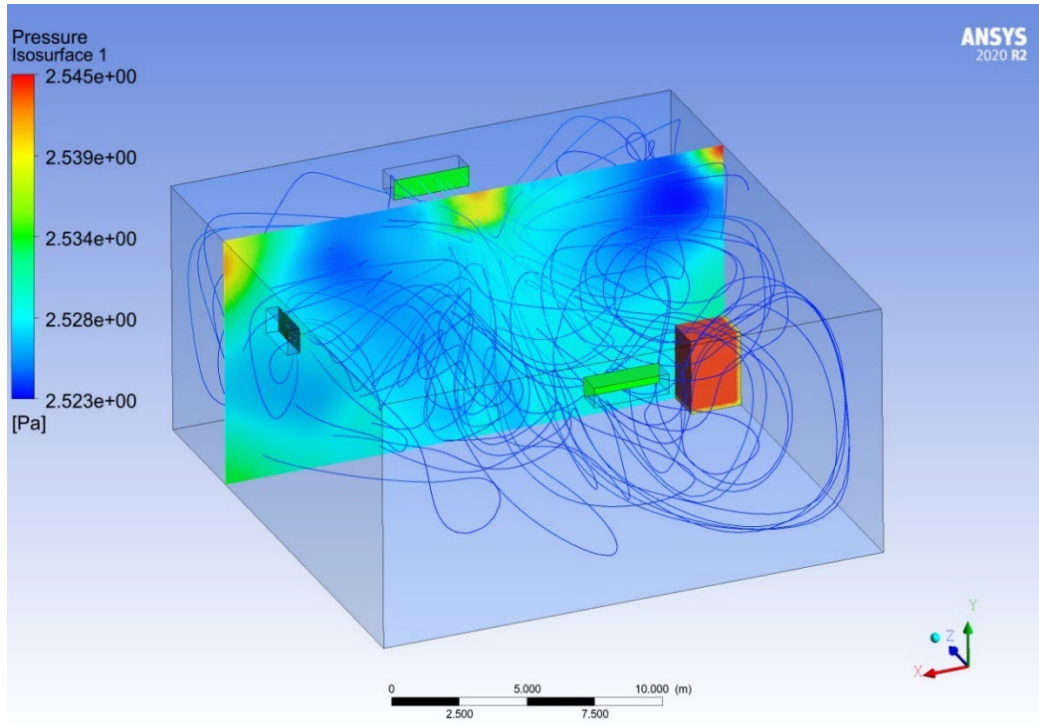


Şekil 6.5. Model-2 Hava Akış Çizgileri

Şekil 6.5, Model-2 havalandırma sisteminde hava akış çizgilerini göstermektedir. Hava akış çizgileri, havanın odadaki hareketini ve akış yönünü temsil eder, bu nedenle sistemin etkinliği hakkında önemli bilgiler sunar. Renk skalasına göre hava hızı 0 m/s ile 1.965 m/s arasında değişmektedir. Mavi tonlar düşük hızları, yeşil ve sarı tonlar orta hızları, kırmızı tonlar ise yüksek hızları ifade etmektedir. Hava giriş noktalarında (sol tarafta, kırmızı bölgede) hız en yüksek seviyededir, hava odanın içine dağıldıkça hız azalmaktadır. Çok sayıda girdap ve düzensiz akış çizgileri gözlemlenmektedir, bu da türbülansın belirli bölgelerde yüksek olduğunu göstermektedir. Odanın ortasında ve sağ taraftaki egzoz çıkışı çevresinde yoğun girdaplar oluşmuş, bu durum havanın tam anlamıyla yönlendirilemediğini ve akışın düzensiz olduğunu göstermektedir. İyi yönlendirilmiş bir akış yerine, iç hacimde türbülansın hakim olduğu anlaşılmaktadır. Hava girişi ile çıkışı arasındaki akış çizgilerinin karmaşık olması, iç hava sirkülasyonunun dengeli olmadığını gösterir. Bazı bölgelerde durağan hava cepleri olabilir, bu da havalandırmanın etkili çalışmadığını ve belirli alanlarda kirli havanın birikebileceğini gösterir. Hava akışının belirli bir doğrultuda ilerlememesi, ortam havasının homojen dağılmasını zorlaştırır ve sıcaklık farklarına yol açabilir. Hava giriş ve egzoz çıkışları daha iyi konumlandırılarak hava akışının düzenli olması sağlanabilir. Yüksek türbülanslı bölgeler için yönlendirici paneller veya hava akış kontrol cihazları eklenebilir. Hava hızları

optimize edilerek gereksiz girdap oluşumları azaltılabilir. Egzoz çıkış kapasitesi artırılarak havanın daha hızlı tahliye edilmesi sağlanabilir. Bu simülasyon, Model-2'nin hava akışında ciddi türbülanslar ve girdaplar oluştuğunu, dolayısıyla havalandırma sisteminin iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir. Daha verimli bir havalandırma için hava akış yolları optimize edilmeli ve türbülansın azaltılması sağlanmalıdır.

“A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation” adlı çalışma, iç mekan hava akışındaki türbülansın etkilerini analiz etmek için sıfır denklemlili bir türbülans modeli kullanmaktadır. Simülasyon sonuçları, düzensiz hava akışı ve girdap oluşumlarının havalandırma verimliliğini azalttığını göstermektedir. Model-2’de gözlemlenen yoğun girdap oluşumları ve hava akışının yönlendirilememesi, bu çalışmada vurgulanan türbülans etkileriyle örtüşmektedir (Chen ve Xu, 1998). *“Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1—Summary of prevalent turbulence models”* adlı çalışma, kapalı ortamlardaki hava akışını farklı türbülans modelleri kullanarak analiz etmektedir. Çalışma, belirli bölgelerde türbülans seviyelerinin yüksek olduğunu ve bunun düzensiz hava dağılımına yol açtığını vurgulamaktadır. Model-2’de tespit edilen düzensiz akış çizgileri ve durağan hava cepleri, bu çalışmada ele alınan türbülans kaynaklı sorunlarla tutarlıdır (Zhai ve diğ., 2007). *“Assessment of various turbulence models for transitional flows in an enclosed environment (RP-1271)”* adlı çalışma, geçiş rejimindeki hava akışlarını ve bunların havalandırma sisteminin verimliliği üzerindeki etkilerini incelemektedir. Simülasyon sonuçları, türbülanslı bölgelerde hava akışının kararsız hale geldiğini ve bunun hava dağılımının homojen olmamasına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Model-2’de gözlemlenen hava akışı düzensizlikleri, bu çalışmada belirtilen sirkülasyon problemleriyle örtüşmektedir (Wang ve Chen, 2009).

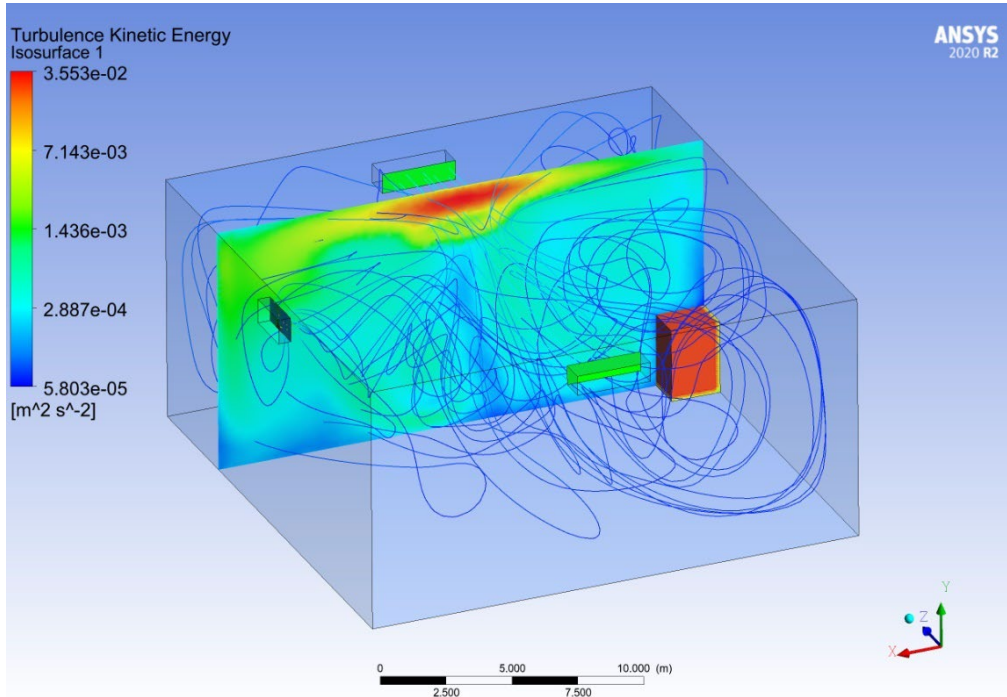


Şekil 6.6. Model-2 Belirlenen Kesite Göre Basınç Dağılımı

Şekil 6.6, Model-2 havalandırma sisteminde belirli bir kesitteki basınç dağılımını göstermektedir. Basınç dağılımı, hava akışının yönlendirilmesini ve ortam içindeki hava hareketlerinin düzenini belirleyen kritik bir parametredir. Renk skalasına göre, basınç değerleri 2.523 Pa ile 2.545 Pa arasında değişmektedir. Kırmızı ve sarı bölgeler yüksek basınçlı alanları, mavi ve yeşil bölgeler düşük basınçlı alanları ifade etmektedir. En yüksek basınç değerleri, hava giriş noktalarının yakınında görülmektedir (sağ alt kısımda, kırmızı alan). Düşük basınç bölgeleri, havanın hızlandığı veya egzoz çıkışlarına yöneldiği alanları işaret etmektedir. Basınç farkları, hava akışının yönünü belirler ve ortam içindeki hava sirkülasyonunu etkiler. Sol üst kısımda ve orta bölgede düşük basınç alanları bulunmaktadır, bu da havanın burada hızlandığını ve egzoz çıkışına doğru yönlendiğini gösterir. Yüksek basınç bölgeleri, hava akışının engellendiği veya giriş hızının yüksek olduğu noktaları ifade eder. Yüksek türbülanslı bölgelerde (hızlı basınç değişimi olan alanlar) hava akışının dengesiz olduğu gözlemlenmektedir. Havalandırma sisteminin dengeli çalışabilmesi için basınç farklarının iyi yönetilmesi gerekir. Hava giriş ve çıkış noktalarının konumları, bu basınç dağılımına uygun olacak şekilde düzenlenmelidir. Egzoz çıkışlarının kapasitesi artırılarak hava daha etkili şekilde tahliye edilebilir. Hava giriş noktalarının yerleşimi yeniden değerlendirilerek basınç farkları dengelenebilir. Ek yönlendirme kanalları eklenerek hava akışının türbülansı azaltılabilir ve daha homojen bir dağılım sağlanabilir. Bu simülasyon, Model-2’de hava akışının homojen

olmadığını, bazı bölgelerde yüksek türbülans oluştuğunu ve basınç farklarının düzensiz dağıldığını göstermektedir. Daha dengeli bir hava sirkülasyonu ve enerji verimliliği için basınç farklarının optimize edilmesi gereklidir.

“*Review of modeling methods for HVAC systems*” adlı çalışma, HVAC sistemleri için farklı modelleme yöntemlerini inceleyerek, basınç dağılımının hava akışı verimliliğini önemli ölçüde etkilediğini vurgulamaktadır. Bulgular, uygunsuz basınç farklarının, Model-2’de gözlemlenen düzensiz basınç dağılımına benzer şekilde dengesiz hava akışına ve türbülansa yol açabileceğini vurgulamaktadır (Afram ve Janabi-Sharifi, 2014). “*Modeling and optimization of HVAC energy consumption*” Bu araştırma, basınca dayalı HVAC optimizasyon yöntemlerini inceleyerek, hava girişlerine yakın yüksek basınç bölgelerinin ve egzoz çıkışlarına yakın düşük basınç bölgelerinin hava akışı dengesini etkilediğini göstermektedir. Model-2’de tanımlanan basınç farkları bu bulgularla uyumludur ve zayıf basınç dağılımının havalandırma verimliliği üzerindeki etkisini göstermektedir (Kusiak ve. diğ., 2010). “*Overview of HVAC system simulation*” aşırı türbülansı önlemek için basınç gradyanlarını yönetmenin önemini vurgulayarak, HVAC simülasyonlarının kapsamlı bir analizini sunar. Model-2’de gözlemlenen hızlı basınç değişiklikleri, hava akışındaki dengesizliği gösterir ve bu çalışmada tartışıldığı gibi optimize edilmiş basınç dağılımına olan ihtiyacı güçlendirir (Trčka ve Hensen, 2010).

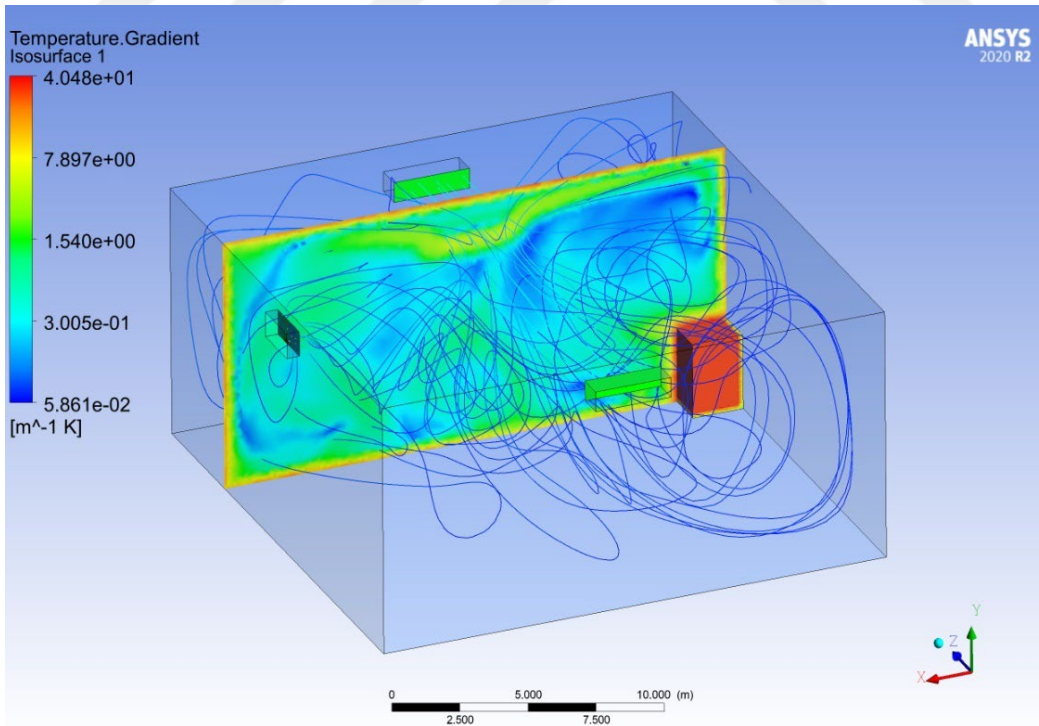


Şekil 6.7. Model-2 Belirtilen Kesite Göre Türbülans Kinetik Enerjisi

Şekil 6.7, Model-2 havalandırma sisteminde belirlenen bir kesitteki türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımını göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisi, hava akışının düzensizliğini ve girdap oluşumunu gösteren önemli bir parametredir. Renk skalasına göre türbülans kinetik enerjisi $5.803e-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ile $3.553e-02 \text{ m}^2/\text{s}^2$ arasında değişmektedir. Kırmızı ve sarı bölgeler yüksek türbülans seviyelerine, mavi ve yeşil bölgeler ise daha düşük türbülansa sahip bölgelere işaret etmektedir. Yüksek türbülans değerleri hava giriş ve çıkış noktalarında, özellikle tavan seviyesinde ve sağ alandaki hava girişine yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır. Havalandırma sistemindeki hava girişleri, yüksek hız farkları yaratarak ani türbülans değişikliklerine neden olmaktadır. Tavan bölgesinde belirgin bir türbülans oluşumu gözlemlenmektedir, bu da hava akışının düzensizliğini artırarak sıcaklık ve hava kalitesini olumsuz etkileyebilir. Düşük türbülanslı bölgeler (mavi alanlar), hava akışının daha kararlı olduğu bölgeleri göstermektedir, ancak bu alanlarda durağan hava cepleri oluşma ihtimali bulunmaktadır. Yüksek türbülans, havalandırma sisteminin verimini düşürebilir ve enerji kayıplarına neden olabilir. Hava sirkülasyonunun homojen olmaması, ortamda sıcaklık farklarına ve düşük hava kalitesine yol açabilir. Hava çıkış noktalarının etkin çalışmadığı veya akışın düzenlenmediği görülmektedir, bu nedenle ek hava yönlendirme elemanları gerekebilir. Hava giriş ve çıkış noktalarının daha iyi konumlandırılması türbülansı azaltabilir. Yüksek türbülanslı bölgelerde hava akış yönlendirme panelleri kullanılarak türbülans etkileri kontrol altına alınabilir. Egzoz çıkışlarının kapasitesi artırılarak, türbülanslı bölgelerde daha etkili hava sirkülasyonu sağlanabilir. Tavan bölgesindeki türbülansı azaltmak için hava giriş açıları ve hava debisi optimize edilebilir. Bu analiz, Model-2’de türbülans kinetik enerjisinin belirli bölgelerde yüksek olduğunu ve hava akışının düzensiz bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Havalandırma sisteminin verimini artırmak ve hava akışını optimize etmek için türbülansın azaltılması gereklidir. Bu, hava giriş ve çıkışlarının yeniden düzenlenmesi, yönlendirme elemanlarının kullanılması ve hava debisinin dengelenmesi ile sağlanabilir.

“*CFD analysis and energy simulation of a gymnasium*” iç mekan hava akışında türbülans kinetik enerjisi (TKE) CFD simülasyonlarıyla analiz etmektedir. Araştırma, hava giriş ve çıkış noktalarındaki yüksek türbülans seviyelerinin hava akışı dengesini bozarak havalandırma verimliliğini azalttığını göstermektedir. Model-2’de özellikle tavan seviyesinde ve hava giriş noktalarına yakın bölgelerde gözlemlenen yüksek TKE değerleri, bu çalışmada belirtilen bulgularla örtüşmektedir. Bu durum, türbülans kaynaklı verimsizlikleri en aza indirmek için hava dağılımının optimize edilmesi gerektiğini göstermektedir (Lam ve Chan, 2001). “*On the effect of turbulent intensity towards the accuracy of the zero-equation turbulence model for*

indoor airflow application” iç mekan ortamlarda türbülans yoğunluğunun hava akışı doğruluğu üzerindeki etkisini incelemektedir. Çalışma, özellikle kötü tasarlanmış havalandırma sistemlerinde aşırı türbülansın hava akışının kararsızlaşmasına ve enerji kayıplarına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Model-2’de gözlemlenen yüksek türbülanslı bölgeler ve ani türbülans değişimlerinden kaynaklanan enerji kayıpları, bu çalışmada belirtilen sorunlarla örtüşmektedir ve hava akış kontrol mekanizmalarının iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Ng ve diğ., 2011). “*CFD simulation of leak in residential HVAC ducts*”, HVAC kanallarında türbülans oluşumunu ve bunun hava akış verimliliği üzerindeki etkisini incelemektedir. Araştırmada, türbülans kaynaklı enerji kayıplarının düzensiz hava dağılımına ve durağan hava ceplerine yol açabileceği sonucuna varılmıştır. Model-2’de gözlemlenen hava durağanlığı ve dengesiz akış desenleri, bu çalışmada vurgulanan türbülansın olumsuz etkileriyle paralellik göstermektedir. Bu durum, egzoz çıkışlarının daha iyi konumlandırılması ve hava hızlarının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır (Moujes ve Gundavelli, 2012). Bu çalışmalar, Model-2’de gözlemlenen aşırı türbülans kinetik enerjisinin hava akışında kararsızlığa, havalandırma verimliliğinin düşmesine ve enerji kayıplarına yol açabileceğini akademik olarak desteklemektedir.



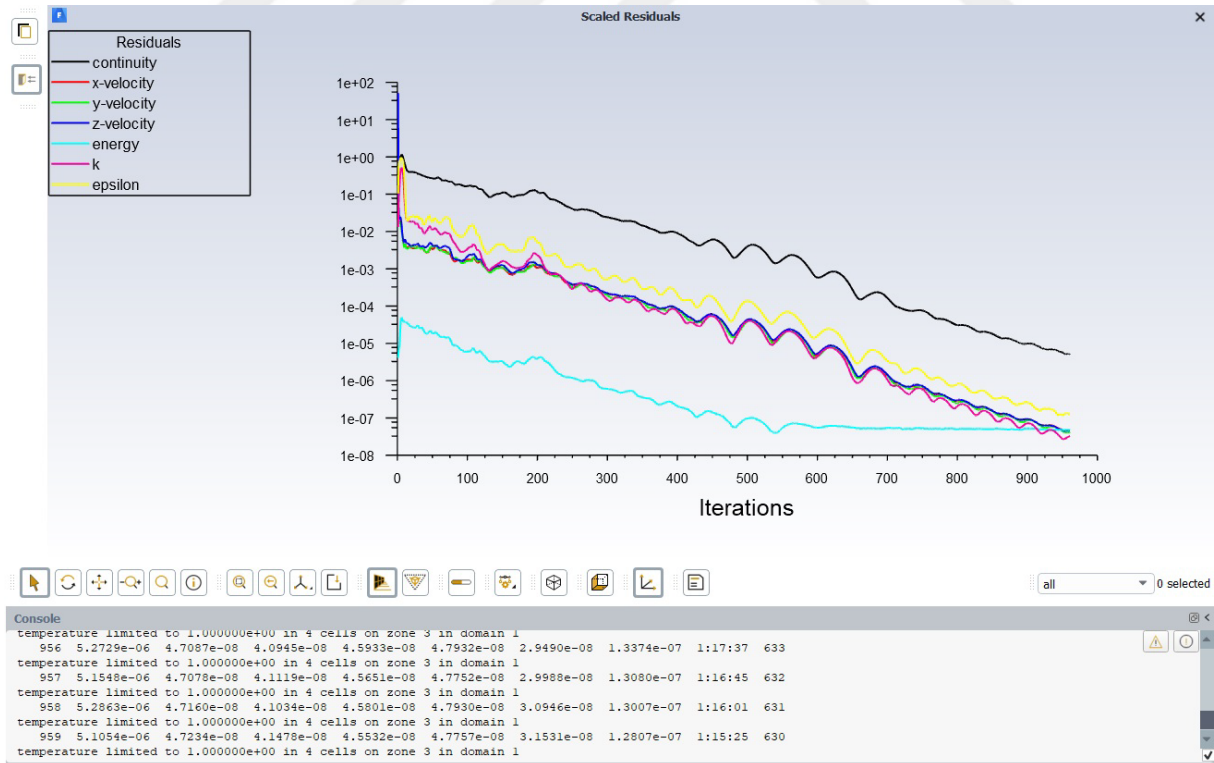
Şekil 6.8. Model-2 Belirlenen Kesite Göre Sıcaklık Dağılımları

Şekil 6.8, Model-2 havalandırma sisteminde belirlenen bir kesitteki sıcaklık gradyanını göstermektedir. Sıcaklık gradyanı, bir ortamda sıcaklık değişiminin ne kadar keskin olduğunu ifade eder ve ısı transferi açısından kritik bir parametredir. Renk skalasına göre sıcaklık gradyanı $5.861e-02 \text{ m}^{-1}\text{K}$ ile $4.048e+01 \text{ m}^{-1}\text{K}$ arasında değişmektedir. Kırmızı ve sarı bölgeler yüksek sıcaklık gradyanlarına, mavi ve yeşil bölgeler ise daha düşük sıcaklık değişimlerine sahip bölgelere işaret etmektedir. Hava giriş ve çıkış noktaları çevresinde ve duvarların yakınında yüksek sıcaklık değişimleri gözlemlenmektedir. Yüksek sıcaklık gradyanı olan bölgeler (kırmızı ve sarı alanlar), sıcaklık değişiminin hızlı olduğu ve ısı transferinin fazla olduğu bölgelerdir. Düşük sıcaklık gradyanı olan mavi bölgeler, sıcaklık farklarının düşük olduğu ve ısı transferinin daha az olduğu bölgeleri göstermektedir. Hava akışının düzensiz olduğu ve girdapların yoğun olduğu bölgelerde sıcaklık değişiminin de belirgin olduğu görülmektedir. Sıcak hava girişinin olduğu sağ alandaki kırmızı bölge, yüksek sıcaklık gradyanı nedeniyle hava akışında ani sıcaklık değişimlerine neden olmaktadır. Egzoz çıkışı çevresinde türbülansın yüksek olması, sıcaklık farklarını artırmakta ve ısı transferini dengesiz hale getirmektedir. Havalandırma sisteminin yetersiz olduğu bölgelerde sıcaklık farkları daha belirgin olup, homojen bir sıcaklık dağılımı sağlanamamaktadır. Hava giriş ve çıkış noktalarının daha iyi konumlandırılması ile sıcaklık farkları dengelenebilir. Yüksek sıcaklık gradyanlarının olduğu bölgelerde ek havalandırma veya yönlendirme elemanları kullanılarak ısı transferi daha kontrollü hale getirilebilir. Egzoz çıkışlarının kapasitesi artırılarak, sıcak hava daha verimli şekilde ortamdan uzaklaştırılabilir. İzolasyon malzemeleri veya ısı bariyerleri kullanılarak duvar yüzeylerindeki sıcaklık farkları minimize edilebilir. Bu analiz, Model-2’de hava akışının düzensizliğinden kaynaklanan sıcaklık değişimlerinin belirli bölgelerde yüksek olduğunu göstermektedir. Daha verimli bir ısı yönetimi için sıcaklık gradyanlarının dengelenmesi, havalandırma sisteminin iyileştirilmesi ve türbülansın azaltılması gerekmektedir.

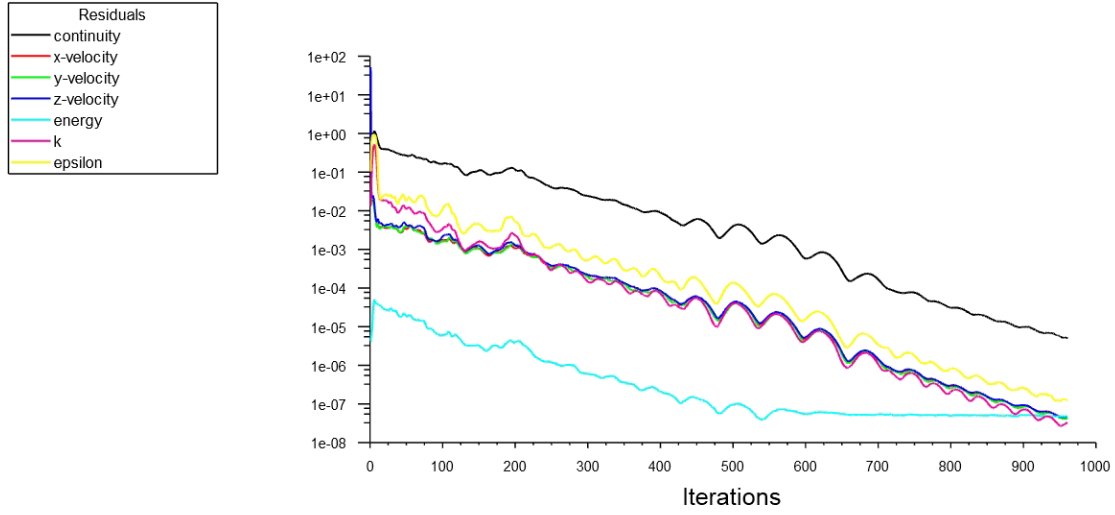
“*Review of modeling methods for HVAC systems*”, HVAC sistemlerinin modellenmesine yönelik farklı yöntemleri incelemekte ve sıcaklık gradyanlarının hava akışı ve ısı transferi üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Çalışma, hava giriş ve çıkış noktalarının konumlandırılmasının sıcaklık farklarını etkilediğini ve düzensiz hava akışı durumunda sıcaklık değişimlerinin daha keskin olduğunu göstermektedir. Model-2’de gözlemlenen sıcaklık farkları ve homojen olmayan ısı dağılımı, bu çalışmada belirtilen bulgularla örtüşmektedir (Afram ve diğ., 2014). “*HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming*”, HVAC sistemlerinin enerji yönetimi için optimize edilmesi gerektiğini ve

sıcaklık farklarının dengelenmesinin sistem verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. Simülasyonlar, yüksek sıcaklık gradyanlarının özellikle hava giriş ve çıkış noktaları çevresinde yoğunlaştığını ve bu durumun enerji tüketimini artırarak hava kalitesini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Model-2’de gözlemlenen yüksek sıcaklık değişimleri ve ısı transferindeki dengesizlikler, bu çalışmada vurgulanan sorunlarla uyumludur (Fong ve diğ., 2006). “Minimization of energy consumption in HVAC systems with data-driven models and an interior-point method”, HVAC sistemlerinde enerji tüketiminin en aza indirilmesi için sıcaklık dağılımının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, sıcaklık gradyanlarının yüksek olduğu bölgelerde türbülansın arttığını ve bu durumun hava akışının düzensizleşmesine neden olduğunu göstermektedir. Model-2’de belirlenen sıcaklık farkları ve tavan bölgesindeki yoğun türbülans, bu çalışmadaki bulgularla paralellik göstermektedir ve daha dengeli bir sıcaklık dağılımı için havalandırma sisteminin yeniden tasarlanması gerektiğini göstermektedir (Kusiak ve diğ., 2014). Bu çalışmalar, Model-2’de gözlemlenen sıcaklık gradyanlarının hava akışı düzensizlikleri, enerji verimliliği ve ısı transferi üzerindeki olumsuz etkilerini akademik olarak desteklemektedir.

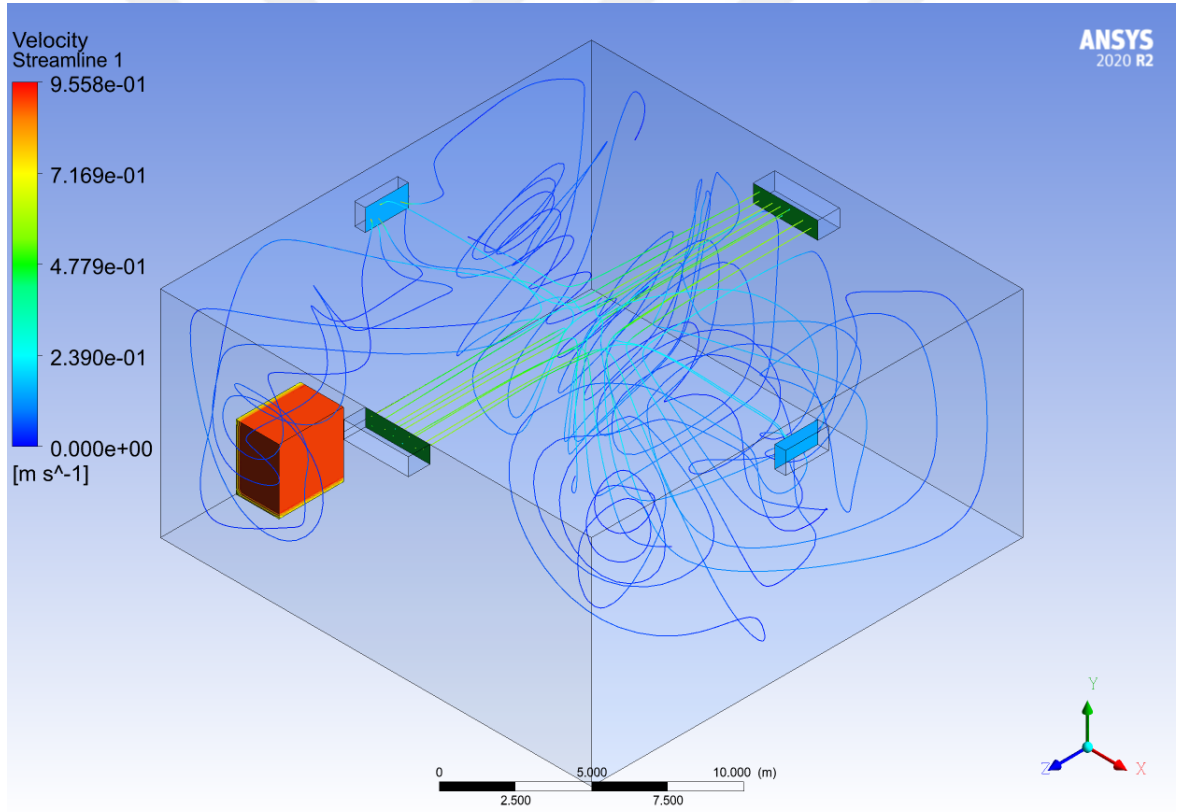
6.3.2. Model-3 analiz sonuçları



Şekil 6.9. Model-3 Hesaplamanın Sonuçlandığı Değerler



Şekil 6.10. Model-3 Yakınsama Grafiği



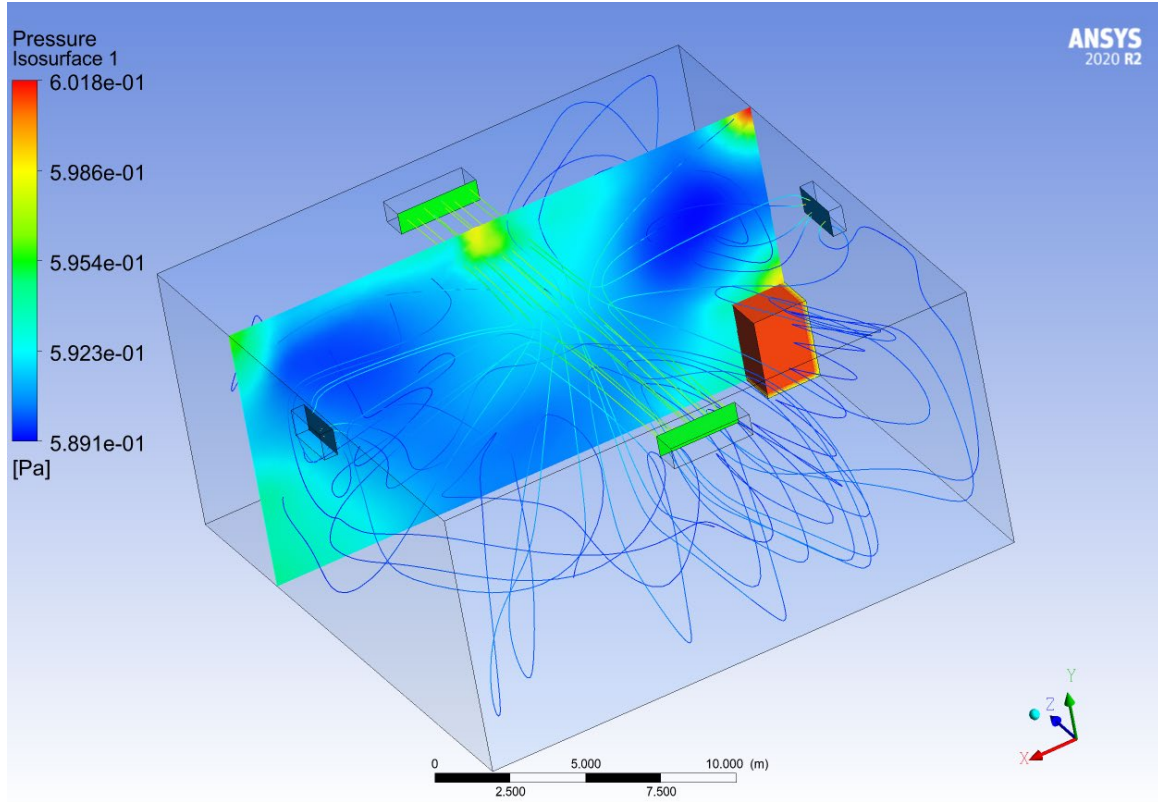
Şekil 6.11. Model-3 Hava Akış Çizgileri

Şekil 6.11, Model-3 havalandırma sisteminde hava akış çizgilerini göstermektedir. Hava akış çizgileri, havanın sistem içinde nasıl hareket ettiğini, akış yönlerini ve türbülans bölgelerini ortaya koyar. Renk skalasına göre hava hızı 0 m/s ile 0.955 m/s arasında değişmektedir. Kırmızı ve turuncu bölgeler hava girişinin olduğu alanları ve en yüksek hava hızlarını gösterirken, mavi

alanlar daha düşük hızda hava akışını temsil etmektedir. Hava girişinin olduğu sol taraftaki bölge (kırmızı alan), en yüksek hava hızına sahip olup akışın başlangıç noktasını oluşturmaktadır. Düzensiz ve karmaşık akış çizgileri, türbülansın yüksek olduğunu göstermektedir. Orta bölgede ve çıkış noktalarına yakın alanlarda girdaplar oluşmuş, bu da hava sirkülasyonunun homojen olmadığını ve belirli bölgelerde durağan hava ceplerinin oluşabileceğini göstermektedir. Sağ üst ve sağ alt köşelerde hava çıkış noktaları yer almakta ve hava akışı bu yönlere yönlendirilmektedir. Model-3, Model-2'ye kıyasla daha düzenli bir hava akışı sağlamaktadır, ancak girdap oluşumları hala mevcuttur. Hava girişinden çıkan akış, doğrudan egzoz noktalarına yönlendirilmemekte ve odanın içinde dolanarak türbülans yaratmaktadır. Hava hızlarının belirli bölgelerde düşük olması, havanın odanın her yerine eşit şekilde dağılmadığını ve sıcaklık farklarının oluşabileceğini göstermektedir. Egzoz çıkışlarının hava akış yönüne daha uygun konumlandırılması ile girdaplar azaltılabilir. Hava giriş hızları optimize edilerek türbülansın azaltılması sağlanabilir. Hava yönlendirici paneller veya ek fanlar kullanılarak, akışın daha homojen dağılması sağlanabilir. Bu simülasyon, Model-3'te hava akışının Model-2'ye göre biraz daha düzenli olduğunu, ancak hala belirgin türbülans ve girdap bölgeleri bulunduğunu göstermektedir. Havalandırma sisteminin verimli çalışabilmesi için hava çıkış ve giriş noktalarının optimize edilmesi, türbülansın azaltılması ve hava akışının daha homojen hale getirilmesi gerekmektedir.

“Investigation of Airflow Patterns and Thermal Efficiency in Different Ducting Configurations by using CFD”, farklı kanal yapılandırmalarındaki hava akış desenlerini ve termal verimliliği analiz etmek için CFD simülasyonlarını kullanmaktadır. Araştırma, hava giriş ve çıkış noktalarının yerleşiminin hava akış yönünü doğrudan etkilediğini ve düzensiz akış çizgilerinin türbülansı artırarak havalandırma verimliliğini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Model-3'te tespit edilen girdap oluşumları ve düzensiz hava dağılımı, bu çalışmada belirtilen bulgularla örtüşmektedir (Irfan ve. diğ., 2024). *“Observation on Air Flow Distribution in Room by HVAC System using Ansys Fluent CFD Simulation”*, HVAC sistemlerinin odadaki hava akış dağılımını Ansys Fluent CFD simülasyonu kullanarak incelemektedir. Çalışma, hava akış yönlerinin düzgün olmaması durumunda girdap oluşumlarının arttığını ve bazı bölgelerde durağan hava ceplerinin meydana geldiğini göstermektedir. Model-3'te gözlemlenen türbülans bölgeleri ve düşük hızdaki akış alanları, bu çalışmada vurgulanan hava dağılımındaki dengesizliklerle uyumludur (Boniface ve. diğ., 2024). *“The measurement and simulation of indoor air flow”*, iç mekan hava akışını simüle ederek, duvar ısı transferi ve türbülans modellemesinin hava akış düzenine etkisini incelemektedir. Çalışma, havalandırma sistemlerindeki hava giriş ve çıkış

noktalarının konumlarının, türbülans ve girdap oluşumlarını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Model-3'te tespit edilen hava girişinin doğrudan egzoz noktalarına yönlendirilmemesi ve odanın içinde girdaplar oluşturması, bu çalışmada vurgulanan bulgularla paralellik göstermektedir (Loomans, 1998). Bu çalışmalar, Model-3'te gözlemlenen hava akış düzensizliklerinin, girdap oluşumlarının ve durağan hava ceplerinin havalandırma sisteminin verimliliğini azalttığını akademik olarak desteklemektedir.

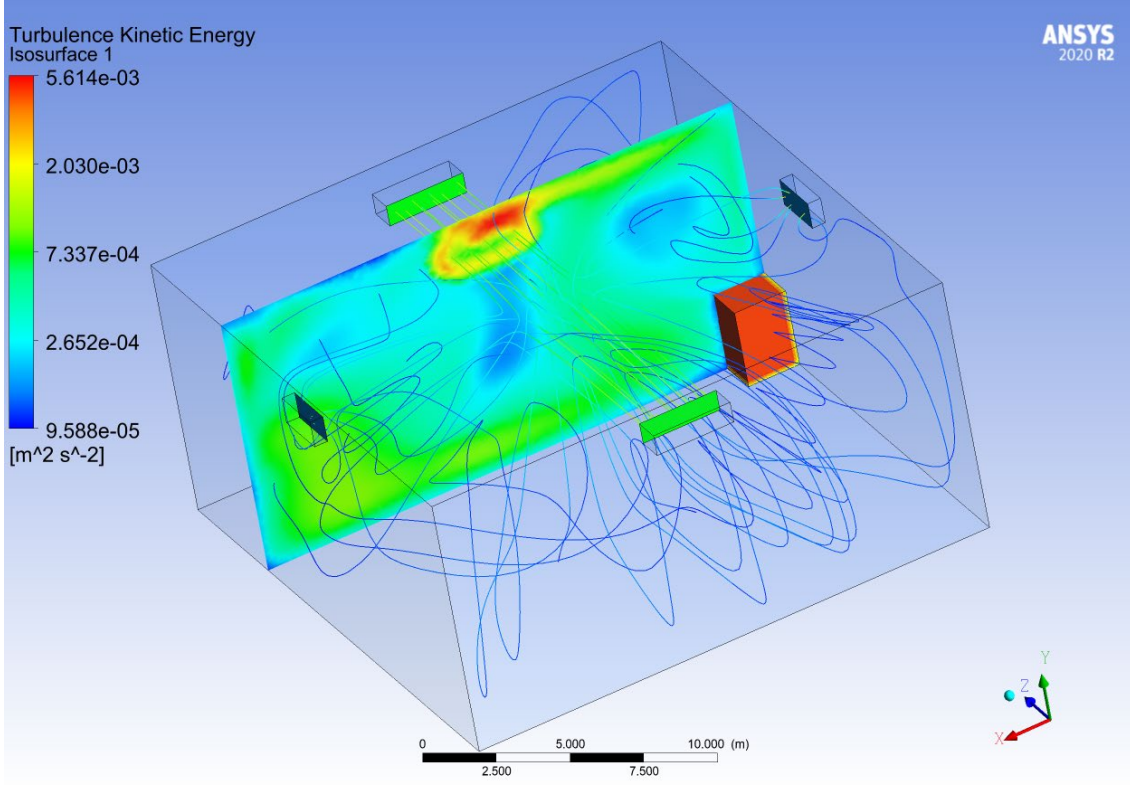


Şekil 6.12. Model-3 Belirtilen Kesite Göre Basınç Dağılımı

Şekil 6.12, Model-3 havalandırma sisteminde belirlenen bir kesitteki basınç dağılımını göstermektedir. Basınç dağılımı, hava akışının yönlendirilmesini ve ortam içindeki hava hareketlerini belirleyen kritik bir parametredir. Basınç değerleri 0.589 Pa ile 0.6018 Pa arasında değişmektedir. Kırmızı ve sarı bölgeler yüksek basınçlı alanları, mavi ve yeşil bölgeler düşük basınçlı alanları göstermektedir. En yüksek basınç bölgeleri hava giriş noktasında (sağ alt köşe, kırmızı bölge) oluşmaktadır, çünkü burası havanın içeriye girdiği noktadır. Düşük basınç bölgeleri ise odanın sol tarafında ve egzoz çıkışları çevresinde görülmektedir. Basınç farkları, hava akışının yönünü ve hızını belirleyen temel etkidir. Basınç dağılımı genel olarak dengeli görünse de, bazı bölgelerde aniden değişen basınç farkları hava akışında düzensizliklere neden olabilir. Egzoz çıkışlarının hemen önünde görülen düşük basınç bölgeleri, havanın çıkış

noktalarına yönlendiğini göstermektedir, bu da hava tahliyesinin etkili olduğunu gösterir. Hava giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farkı, hava hareketini belirlemektedir. Basınç farkları çok yüksek olmadığından, hava akışı nispeten daha dengeli olabilir, ancak girdaplar ve türbülanslı bölgeler hava sirkülasyonunu olumsuz etkileyebilir. Bazı bölgelerde hava akışının durağan olabileceği ve düşük hava değişim oranlarına sahip olabileceği gözlemlenmelidir. Egzoz çıkışlarının daha stratejik yerleştirilmesiyle, hava tahliyesi daha dengeli hale getirilebilir. Hava giriş noktalarının konumu optimize edilerek, yüksek basınç bölgeleri azaltılabilir ve türbülans önlenir. Ek hava yönlendirme elemanları veya hava akış kontrol panelleri kullanılarak basınç dağılımı daha dengeli hale getirilebilir. Bu analiz, Model-3'te basınç dağılımının nispeten dengeli olduğunu ancak bazı bölgelerde ani basınç değişimleri nedeniyle türbülansın devam ettiğini göstermektedir. Havalandırma sisteminin verimli çalışabilmesi için hava giriş ve çıkışlarının konumlarının iyileştirilmesi, basınç farklarının optimize edilmesi ve türbülansın azaltılması gerekmektedir.

“Review of modeling methods for HVAC systems”, HVAC sistemlerinin modellenmesine yönelik farklı yöntemleri incelemekte ve basınç dağılımının hava akış düzeni üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Çalışma, hava giriş ve çıkış noktalarının basınç farkları nedeniyle hava akışını nasıl yönlendirdiğini ve düzensiz basınç değişimlerinin türbülansa yol açabileceğini göstermektedir. Model-3'te gözlemlenen ani basınç farkları ve türbülans bölgeleri, bu çalışmada belirtilen bulgularla örtüşmektedir (Afram ve Janabi-Sharifi, 2014). *“Modeling and optimization of HVAC energy consumption”*, HVAC sistemlerinin enerji tüketimini optimize etmek için basınç dağılımının önemini vurgulamaktadır. Simülasyonlar, hava giriş ve çıkış noktaları arasındaki basınç farklarının iyi yönetilmediği durumlarda hava akışının düzensizleştiğini ve girdap oluşumlarına neden olduğunu ortaya koymaktadır. Model-3'te tespit edilen hava çıkış noktalarındaki düşük basınç bölgeleri ve hava tahliyesinin etkili olması, bu çalışmadaki bulgularla uyumludur (Kusiak ve diğ., 2010). *“Overview of HVAC system simulation”*, HVAC sistem simülasyonlarını inceleyerek basınç dağılımının hava akışı ve sirkülasyon üzerindeki etkilerini analiz etmektedir. Araştırma, ani basınç değişimlerinin türbülansı artırabileceğini ve düşük basınç bölgelerinin hava sirkülasyonunu dengesiz hale getirebileceğini göstermektedir. Model-3'te tespit edilen düşük basınçlı bölgelerde hava akışının durağanlaşma riski, bu çalışmada vurgulanan sorunlarla paralellik göstermektedir (Trčka ve Hensen, 2010). Bu çalışmalar, Model-3'te gözlemlenen basınç dağılımı dengesizliklerinin hava akışı, sirkülasyon ve enerji verimliliği üzerindeki etkilerini akademik olarak desteklemektedir.

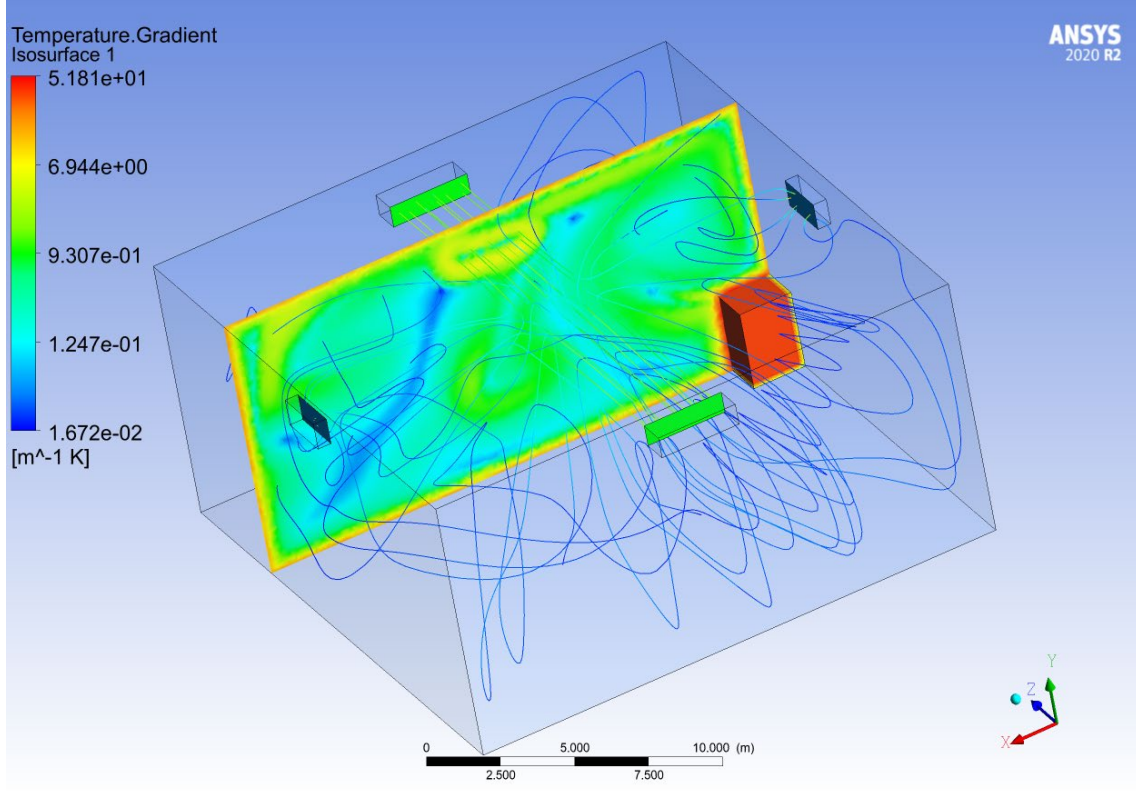


Şekil 6.13. Model-3 Belirtilen Kesite Göre Türbülans Kinetik Enerjisi

Şekil 6.13, Model-3 havalandırma sisteminde belirlenen bir kesitteki türbülans kinetik enerjisi (TKE) dağılımını göstermektedir. Türbülans kinetik enerjisi, akışın düzensizliğini ve girdap oluşumunu belirleyen önemli bir parametredir. Renk skalasına göre türbülans kinetik enerjisi $9.588e-05 \text{ m}^2/\text{s}^2$ ile $5.614e-03 \text{ m}^2/\text{s}^2$ arasında değişmektedir. Kırmızı ve sarı bölgeler yüksek türbülans seviyelerine, mavi ve yeşil bölgeler ise daha düşük türbülansa sahip bölgelere işaret etmektedir. Hava giriş ve çıkış noktaları çevresinde, özellikle tavan bölgesinde türbülans kinetik enerjisinin yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Tavan bölgesinde yüksek türbülans gözlemlenmektedir, bu durum hava akışının yönlendirilmesinde düzensizlikler olduğunu gösterir. Hava çıkış noktaları yakınında daha düşük türbülans gözlemlenmektedir, bu da hava akışının yönlendirildiğini ancak bazı bölgelerde hala girdaplar oluştuğunu göstermektedir. Hava girişinin olduğu sağ alt köşede hava akışının türbülanslı olduğu ve bu bölgedeki girdapların türbülansı artırdığı gözlemlenmektedir. Yüksek türbülanslı bölgeler hava akışının düzensiz olduğunu ve belirli bölgelerde durgun hava cepleri oluşabileceğini göstermektedir. Havalandırma sisteminin daha verimli çalışabilmesi için türbülanslı bölgelerin azaltılması gerekmektedir. Daha düzenli bir akış sağlanması, hava sirkülasyonunun daha verimli ve enerji tasarruflu hale gelmesini sağlayacaktır. Hava giriş ve çıkış noktalarının konumlarının optimize edilmesiyle türbülans azaltılabilir. Yüksek türbülanslı bölgelerde hava yönlendirme panelleri

veya baffle (hava akış düzenleyiciler) kullanılarak akışın daha kararlı hale getirilmesi sağlanabilir. Egzoz çıkışlarının kapasitesi artırılarak, türbülanslı bölgelerde daha etkili hava sirkülasyonu sağlanabilir. Tavan bölgesindeki türbülansı azaltmak için hava giriş açıları ve hava debisi optimize edilebilir. Bu analiz, Model-3'te hava akışının belirli bölgelerde yüksek türbülansa sahip olduğunu ve özellikle tavan bölgesinde akışın düzensiz olduğunu göstermektedir. Havalandırma sisteminin verimini artırmak ve hava akışını optimize etmek için türbülansın azaltılması gerekmektedir. Bu, hava giriş ve çıkışlarının yeniden düzenlenmesi, yönlendirme elemanlarının kullanılması ve hava debisinin dengelenmesi ile sağlanabilir.

“A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation”, iç mekan hava akışındaki türbülans kinetik enerjisini (TKE) analiz etmek için sıfır-denklemlili türbülans modelini kullanmaktadır. Simülasyon sonuçları, yüksek türbülans seviyelerinin hava akışında düzensizliklere ve girdap oluşumuna neden olduğunu göstermektedir. Model-3'te tavan bölgesinde ve hava giriş noktalarında gözlemlenen yüksek TKE değerleri, bu çalışmada belirtilen türbülansın olumsuz etkileriyle paralellik göstermektedir (Chen ve Xu, 1998). *“Evaluation of various turbulence models in predicting airflow and turbulence in enclosed environments by CFD: Part 1—Summary of prevalent turbulence models”*, iç mekan hava akışını tahmin etmek için farklı türbülans modellerini değerlendirmektedir. Çalışma, hava giriş ve çıkış noktalarındaki yüksek türbülans kinetik enerjisinin, hava akışında kararsızlığa ve girdap oluşumuna neden olduğunu vurgulamaktadır. Model-3'te gözlemlenen hava girişindeki türbülanslı bölgeler ve düzensiz akış yönleri, bu çalışmada ortaya konulan türbülans problemleriyle örtüşmektedir (Zhai ve diğ., 2007). *“Assessment of various turbulence models for transitional flows in an enclosed environment (RP-1271)”*, kapalı alanlarda geçiş rejimindeki hava akışlarını analiz ederek, türbülans kinetik enerjisinin havalandırma sistemleri üzerindeki etkisini incelemektedir. Araştırma, yüksek türbülansın hava sirkülasyonunu dengesiz hale getirdiğini ve bazı bölgelerde durağan hava ceplerine neden olduğunu göstermektedir. Model-3'te özellikle tavan bölgesinde gözlemlenen düzensiz akış ve yüksek türbülans seviyeleri, bu çalışmada belirtilen sirkülasyon problemleriyle uyumludur (Wang ve Chen, 2009). Bu çalışmalar, Model-3'te gözlemlenen yüksek türbülans kinetik enerjisinin hava akışının düzensizleşmesine, girdap oluşumlarının artmasına ve havalandırma sisteminin verimliliğinin düşmesine yol açabileceğini akademik olarak desteklemektedir.



Şekil 6.14. Model-3 Belirtilen Kesite Göre Sıcaklık Dağılımı

Şekil 6.14, Model-3 havalandırma sisteminde belirlenen bir kesitteki sıcaklık gradyanını göstermektedir. Sıcaklık gradyanı, bir ortamda sıcaklık değişiminin ne kadar keskin olduğunu ifade eder ve ısı transferi açısından kritik bir parametredir. Renk skalasına göre sıcaklık gradyanı $1.672e-02 \text{ m}^{-1}\text{K}$ ile $5.181e+01 \text{ m}^{-1}\text{K}$ arasında değişmektedir. Kırmızı ve sarı bölgeler yüksek sıcaklık gradyanlarına, mavi ve yeşil bölgeler ise daha düşük sıcaklık değişimlerine sahip bölgelere işaret etmektedir. Duvar yüzeylerinde sıcaklık değişiminin daha keskin olduğu ve özellikle hava giriş bölgesinde yüksek sıcaklık farklarının meydana geldiği gözlemlenmektedir. Hava girişinin olduğu sağ alt köşede yüksek sıcaklık değişimleri gözlemlenmektedir, bu da sıcak hava akışının içeri giriş yaptığı ve soğuk hava ile çarpışarak ani sıcaklık farkları oluşturduğunu göstermektedir. Hava çıkış noktalarına yakın bölgelerde daha düşük sıcaklık gradyanı gözlemlenmektedir, bu da hava sıcaklıklarının bu bölgelerde daha dengeli olduğunu göstermektedir. Tavan ve yan duvarlara yakın alanlarda sıcaklık değişimleri fazladır, bu da ısı transferinin en yoğun olduğu bölgeler olarak değerlendirilebilir. Yüksek sıcaklık farkları, ortamda düzensiz hava sirkülasyonuna yol açarak bazı bölgelerde aşırı ısınmaya neden olabilir. Havalandırma sisteminin etkinliği açısından sıcaklık farklarının kontrollü olması gerekmektedir, aksi halde ortamda sıcak hava birikimi ve enerji kayıpları yaşanabilir. Egzoz çıkış noktalarında düşük sıcaklık farkları, havanın etkin bir şekilde dışarı

atıldığını göstermektedir ancak türbülansın fazla olduğu bölgelerde sıcaklık değişimlerinin düzensiz olduğu gözlemlenmektedir. Hava giriş noktalarının konumlarının optimize edilmesi ile sıcaklık farkları dengelenebilir. Yüksek sıcaklık değişimlerinin olduğu bölgelerde ek havalandırma veya yönlendirme elemanları kullanılarak ısı transferi daha kontrollü hale getirilebilir. Egzoz çıkışlarının kapasitesi artırılarak, sıcak hava daha verimli şekilde ortamdan uzaklaştırılabilir. İzolasyon malzemeleri veya ısı bariyerleri kullanılarak duvar yüzeylerindeki sıcaklık farkları minimize edilebilir. Bu analiz, Model-3'te hava akışının düzensizliğinden kaynaklanan sıcaklık değişimlerinin belirli bölgelerde yüksek olduğunu göstermektedir. Daha verimli bir ısı yönetimi için sıcaklık gradyanlarının dengelenmesi, havalandırma sisteminin iyileştirilmesi ve türbülansın azaltılması gerekmektedir.

“Review of modeling methods for HVAC systems”, HVAC sistemlerinin modellenmesine yönelik farklı yöntemleri incelemekte ve sıcaklık gradyanlarının hava akışı ve ısı transferi üzerindeki etkilerini vurgulamaktadır. Çalışma, yüksek sıcaklık değişimlerinin hava sirkülasyonunu olumsuz etkileyerek enerji kayıplarına neden olabileceğini göstermektedir. Model-3'te gözlemlenen sıcaklık farkları ve homojen olmayan ısı dağılımı, bu çalışmada belirtilen bulgularla örtüşmektedir (Afram ve Janabi-Sharifi, 2014). *“HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming”*, HVAC sistemlerinin enerji yönetimi için optimize edilmesi gerektiğini ve sıcaklık farklarının dengelenmesinin sistem verimliliğini artırabileceğini göstermektedir. Simülasyonlar, yüksek sıcaklık gradyanlarının özellikle hava giriş bölgelerinde yoğunlaştığını ve bu durumun sıcaklık dengesizliğine yol açtığını ortaya koymaktadır. Model-3'te gözlemlenen sıcak hava girişindeki ani sıcaklık değişimleri ve ısı transferindeki dengesizlikler, bu çalışmada vurgulanan sorunlarla uyumludur (Fong ve diğ., 2006). *“Minimization of energy consumption in HVAC systems with data-driven models and an interior-point method”*, HVAC sistemlerinde enerji tüketiminin en aza indirilmesi için sıcaklık dağılımının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, sıcaklık gradyanlarının yüksek olduğu bölgelerde türbülansın arttığını ve bunun hava akışının düzensizleşmesine neden olduğunu göstermektedir. Model-3'te belirlenen sıcaklık farkları ve tavan bölgesindeki yoğun sıcaklık değişimleri, bu çalışmadaki bulgularla paralellik göstermektedir ve daha dengeli bir sıcaklık dağılımı için havalandırma sisteminin yeniden tasarlanması gerektiğini göstermektedir (Kusiak ve diğ., 2014). Bu çalışmalar, Model-3'te gözlemlenen sıcaklık gradyanlarının hava akışı düzensizlikleri, enerji verimliliği ve ısı transferi üzerindeki olumsuz etkilerini akademik olarak desteklemektedir.



7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Mevcut çalışmada bir hastaneye ait kazan dairesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi yaparak kazan dairesi havalandırmasının sanal ortamda incelenmesi ve bu alanda yapılacak olan çalışmalara katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

Bu çalışmada, doğal gaz ile çalışan kazan dairesi sistemlerinin havalandırma ve enerji verimliliği açısından analizi gerçekleştirilmiştir. Özellikle Model-1, Model-2 ve Model-3 sistemlerinin hava akışı, sıcaklık dağılımı, basınç profili ve türbülans kinetik enerjisi üzerindeki etkileri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Elde edilen bulgular, sistemlerin mevcut durumlarını değerlendirerek iyileştirme önerileri sunmayı amaçlamaktadır.

7.1. Hava Akışı ve Basınç Dağılımı Değerlendirmesi

Yapılan simülasyon analizlerine göre, Model-1 sisteminde hava akışının yeterli olmadığı belirlenmiştir. Özellikle hava giriş noktalarındaki yüksek basınç bölgeleri ile egzoz çıkışlarındaki düşük basınç bölgeleri arasında ciddi bir dengesizlik gözlemlenmiştir. Bu durum, hava sirkülasyonunun homojen dağılmasını engellemekte ve bazı bölgelerde hava ceplerinin oluşmasına sebep olmaktadır.

Model-2 sisteminde hava akışını iyileştirmek adına ek temiz hava kanalları eklenmiş ve bu sayede hava hızı dengelenmiştir. Ancak, basınç farkları tam anlamıyla optimize edilememiş, bazı bölgelerde ani basınç değişimleri ve türbülans oluşumu gözlemlenmiştir.

Model-3 ise iki egzoz çıkışının eklenmesiyle oluşturulmuş olup, hava akışının daha düzenli olduğu görülmüştür. Ancak, tavan seviyesinde yüksek türbülans kinetik enerjisi değerleri tespit edilmiştir. Bu durum, sistemin hala bazı bölgelerde düzensiz hava akışı sergilediğini ve egzoz konumlandırmasının iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

7.2. Türbülans Kinetik Enerjisi (TKE) ve Enerji Verimliliği

Yapılan türbülans analizlerinde, Model-1 sisteminde girdap oluşumlarının hava akışını düzensiz hale getirdiği gözlemlenmiştir. Bu düzensizlikler, hava sirkülasyonunun tam anlamıyla kontrol edilememesine ve enerji verimliliğinin düşmesine neden olmaktadır.

Model-2 sisteminde hava akışı biraz daha iyileştirilmiş olsa da, tavan bölgesinde belirgin türbülans artışları tespit edilmiştir. Model-3'te ise hava çıkış noktalarında daha az türbülans gözlemlenmiş olup, giriş noktalarındaki hava hızı daha dengeli bir dağılım sergilemiştir.

Doğal gaz yönetmeliklerine göre, gaz tesisatlarında basınç kaybı hesaplamaları belirli kriterlere göre yapılmaktadır. Doğal Gaz Teknik Esasları'na göre, servis kutusundan sayaç vanasına kadar olan basınç kaybının 1,0 mbar ve sayaç çıkışından yakıcı cihaza kadar olan kaybın ise 0,8 mbar sınırlarını aşmaması gerekmektedir. Yapılan analizlerde, özellikle Model-1 ve Model-2'de basınç farklarının ani değişimlere neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu da doğal gaz sistemlerindeki hava sirkülasyonunun verimsizliğini artıran bir faktör olarak öne çıkmaktadır.

7.3. Isı Dağılımı ve Sıcaklık Gradyanı

Sıcaklık analizlerinde Model-1 ve Model-2 sistemlerinde sıcak hava cebi oluşumları tespit edilmiştir. Özellikle egzoz noktalarının uygun yerleştirilmemesi nedeniyle sıcaklık farkları homojen bir dağılım göstermemiştir. Doğal gaz yönetmeliklerinde kazan dairelerinde sıcaklık farklarının en aza indirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Model-3, sıcaklık dağılımının en homojen olduğu sistem olarak değerlendirilmiştir. Ancak, bazı bölgelerde sıcaklık farklarının halen yüksek olduğu ve ilave hava yönlendirme elemanlarının kullanılması gerektiği görülmüştür.

7.4. Doğal Gaz Yönetmeliğine Göre Değerlendirme

Doğal gaz tesisatlarında güvenlik ve verimlilik açısından çeşitli hesaplamalar yapılmaktadır. Yönetmeliklere göre:

- Boru çapı hesaplamaları, gazın akış hızının 6 m/s'yi aşmaması esasına dayanır.
- Basınç kaybı hesaplamalarında, P1 ve P2 değerleri arasındaki fark 1 mbar'dan düşük olmalıdır.
- Havalandırma açıklıkları en az 150 cm² serbest kesit alanına sahip olmalıdır.

Yapılan analizler, Model-3'ün bu kriterlere en yakın değerleri sağladığını, ancak Model-1 ve Model-2'de bazı hesaplamalara uygun olmayan basınç farklarının ve hava akış düzensizliklerinin devam ettiğini göstermektedir.

7.3. Öneriler

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

7.3.1. Hava akışı ve egzoz yerleşimi

Model-3, en iyi hava akışı düzenini sağlamış olsa da, egzoz çıkış noktalarının daha stratejik olarak yerleştirilmesi gerekmektedir. Özellikle egzoz çıkış kapasitesinin artırılması ve yönlendirici paneller eklenmesi önerilmektedir.

7.3.2. Basınç dengesi ve boru çapı seçimi

Doğal gaz tesisatlarında belirlenen basınç kaybı sınırlarının aşılması için Model-1 ve Model-2 sistemlerinde boru çapı seçimlerinin gözden geçirilmesi gerekmektedir. Yüksek basınç farklarının olduğu bölgelerde ek regülatör veya hava akış kontrol elemanları kullanılmalıdır.

7.3.3. Türbülans ve enerji verimliliği

Model-3, türbülans açısından en dengeli sistem olarak değerlendirilmiştir. Ancak, tavan bölgesinde yüksek türbülans kinetik enerjisi değerleri tespit edilmiştir. Bu nedenle, hava giriş açıları ve hava debisinin optimize edilmesi önerilmektedir.

7.3.4. Sıcaklık gradyanı yönetimi

Sıcaklık farklarını azaltmak adına, izolasyon malzemelerinin daha etkili kullanılması ve ek hava yönlendirme elemanlarının sisteme entegre edilmesi gerekmektedir.

Model-3 mevcut sistemler arasında en iyi performansı gösterse de, sistemin tam anlamıyla optimize edilebilmesi için hava giriş-çıkış noktalarının iyileştirilmesi, boru çaplarının yönetmeliklere uygun hale getirilmesi ve türbülansın minimize edilmesi gerekmektedir. Bu öneriler doğrultusunda yapılacak geliştirmeler, doğal gaz tesisatlarında enerji verimliliğini artıracak, sistem güvenliğini iyileştirecek ve hava akışını daha homojen hale getirecektir.

Sonuç olarak; ANSYS Fluent 2020 R1 programı kullanılarak tamamlanan bu analiz birkez daha göstermiştir ki, CFD analizleri ile çok basit gibi görülen küçük dokunuşlarla mevcuttaki her sistemin geniş kapsamlı bir şekilde simüle ederek birçok problem, ek maliyet ve zaman harcanmadan ortadan kaldırılabilir, iyileştirilebilir ve verimli hale getirilebilir. Bu alanda yapılan birçok analiz olmasına rağmen insani yaşam döngüsünün devamında en önemli kuruluşlar olan hastanelerin kazan daireleri ciddi anlamda önem arz eden birimlerdir. Bu

birimlerdeki cihazların uzun ömürlü olması, kesintisiz hizmetin devamlılığı için yapılacak her çalışma önemli görülmelidir.

Her geçen gün enerji verimliliğinin ve yeşil enerjilerin daha da önem arz ettiği dünyamızda, gelişen teknolojiyi daha verimli kullanabilmek adına bilgisayarların gücünden daha fazla yararlanmaya ihtiyacımız olacaktır.

Model-3 ise iki egzoz çıkışının eklenmesiyle oluşturulmuş olup, hava akışının daha düzenli olduğu görülmüştür. Ancak, tavan seviyesinde yüksek türbülans kinetik enerjisi değerleri tespit edilmiştir. Bu durum, sistemin hala bazı bölgelerde düzensiz hava akışı sergilediğini ve egzoz konumlandırmasının iyileştirilmesi gerektiğini göstermektedir.



KAYNAKLAR

- Abanto, J., Barrero, D., Reggio, M., & Ozell, B. (2004). Airflow modelling in a computer room. *Building and Environment*, 39(12), 1393-1402. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.03.011>
- Afram, A., & Janabi-Sharifi, F. (2014). Review of modeling methods for HVAC systems. *Applied Thermal Engineering*, 67(1), 507-519. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.03.055>
- Akdemir, S., Öztürk, S., Edis, F. O., & Ülger, P. (2012). Soğuk Hava Depolarında Ortam Koşullarının Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD) ile Modellemesi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 8(2), 241-248.
- Amahjour, N., Garcia-Sanchez, G., Agaoglou, M., & Mancho, A. (2023). Analysis of the spread of SARS-CoV-2 in a hospital isolation room using CFD and Lagrangian Coherent Structures. *Physica D: Nonlinear Phenomena*. <https://doi.org/10.1016/j.physd.2023.133825>
- Boniface, B., Anak, A., Zambri, A., Osman, A., Ahmed, A., Taib, I., & Manshoor, B. (2024). Observation on Air Flow Distribution in Room by HVAC System using Ansys Fluent CFD Simulation. *Journal of Complex Flow*, 6(1), 29-37.
- Chen, Q., & Xu, W. (1998). A zero-equation turbulence model for indoor airflow simulation. *Energy and Buildings*, 137-144. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00020-6](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00020-6)
- Eddine, A., Duret, S., Flick, D., & Moureh, J. (2025). Characterising airflow and heat transfer within a multi-package of horticultural produce using a validated CFD model. *International Journal of Refrigeration*, 170, 314-324. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.12.003>
- Fong, K., Hanby, V., & Chow, T. (2006). HVAC system optimization for energy management by evolutionary programming. *Energy and Buildings*, 38(3). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.05.008>
- Homod, R., Sahari, K., & Almurib, H. (2014). Energy saving by integrated control of natural ventilation and HVAC systems using model guide for comparison. *Renewable Energy*, 71, 639-650. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.06.015>
- Huang, W., Zaheeruddin, M., & Cho, S. (2006). Dynamic simulation of energy management control functions for HVAC systems in buildings. *Energy Conversion and Management*, 47(7), 926-943. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.011>
- Irfan, M., Isa, N., Hariri, A., Hussein, M., & Adebayo, D. (2024). Investigation of airflow patterns and thermal efficiency in different ducting configurations by using CFD. *International Journal of Mechanical and Sustainability Engineering Technology*, 1(1), 46-56.

- Kang, Y., Yuk, H., Jo, H., & Kim, S. (2024). Indoor thermal environment assessment of a historic building for a thermal and energy retrofit scenario using a CFD model. *Case Studies in Thermal Engineering*, 63. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105330>
- Karayel, D. (2021, May). *Akışkanlar mekaniği ders notları*. Retrieved December 2024, from <https://avesis.akdeniz.edu.tr/resume/downloadfile/dkarayel?key=45728187-6119-4cdb-a05a-2baa097d2728&announcementId=dae65669-b430-49bf-89c0-0443ac8c77ff>
- Kusiak, A., Li, M., & Tang, F. (2010). Modeling and optimization of HVAC energy consumption. *Applied Energy*, 87(10), 3092-3102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.04.008>
- Kusiak, A., Xu, G., & Zhang, Z. (2014). Minimization of energy consumption in HVAC systems with data-driven models and an interior-point method. *Energy Conversion and Management*, 85, 146-153. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.05.053>
- Lam, J., & Chan, A. (2001). CFD analysis and energy simulation of a gymnasium. *Building and Environment*, 36(3), 351-358. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00014-7)
- Loomans, M. G. (1998). *The measurement and simulation of indoor air flow [Doctoral dissertation]*, Technische Universiteit Eindhoven.
- Ma'bdeh, S., Hamasha, A., Al-Shawabkeh, M., Alali, R., Almomani, R., Obeidat, L., & Alrebei, O. (2025). Enhancing office air quality: The role of window to wall ratio with window-wind catchers using CFD analysis. *Energy Reports*, 13, 1508-1524. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.038>
- Moujes, S., & Gundavelli, R. (2012). CFD simulation of leak in residential HVAC ducts. *Energy and Buildings*, 54, 534-539. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.025>
- Ng, K., Abdul Aziz, M., & Ng, E. (2011). On the effect of turbulent intensity towards the accuracy of the zero-equation turbulence model for indoor airflow application. *Building and Environment*, 46(1), 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.07.002>
- Patel, A. (2018). CFD Analysis of air conditioning in room using ansys fluent [Unpublished doctoral dissertation]. University Institute of Technology RGPV Shivpuri.
- Sadeghi, S., Aminossadati, S., & Leonardi, C. (2025). Numerical investigation of the role of human motion in the spread of virus-laden droplets from coughing using CFD dynamic mesh technique. *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, 111, 42-60. <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2024.12.002>
- Tashtoush, B., Molhim, M., & Al-Rousan, M. (2005). Dynamic model of an HVAC system for control analysis. *Energy*, 30(10), 1729-1745. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.10.004>
- Tezcan, A., & Büyüktaş, K. (2015). Doğal havalandırılmalı seralarda hesaplamalı akışkanlar dinamiği tekniği kullanılarak. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 28(2), 71-76.

- Tokgöz, N., & Süfer, Ö. (2023). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğine Genel Bir Bakış*.
Osmaniye: OKU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi.
<https://doi.org/10.47495/okufbed.1191498>
- Trčka, M., & Hensen, J. (2010). Overview of HVAC system simulation. *Automation in Construction*, 19(2), 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2009.11.019>
- Wang, M., & Chen, Q. (2009). Assessment of Various Turbulence Models for Transitional Flows in an Enclosed Environment (RP-1271). *HVAC&R Research*, 15(6), 1099-1119. <https://doi.org/10.1080/10789669.2009.10390881>
- Wu, X., Zhang, K., Zhao, B., Wang, P., Zhao, W., & Yue, Z. (2023). Dynamic response and safety assessment of cabin door under the tire burst based on CFD method. *International Journal of Impact Engineering*, 176. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2023.104564>
- Yamamoto, T., Ozaki, A., Aratsu, K., & Fukui, R. (2023). Energy simulation and CFD coupled analysis for the optimal operation of combined convection and radiant air conditioning considering dehumidification. *Heliyon*, 9(7), e18092. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18092>
- Yi, Y., Akdeniz, N., Choi, C., & Shutske, J. (2025). Mitigating heat stress for agricultural workers using computational fluid dynamics (CFD) simulations. *Energy and Buildings*, 328, 115186. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115186>
- Zhai, Z. J., Zhang, Z., Zhang, W., & Chen, Q. (2007). Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environments by CFD: Part 1—Summary of Prevalent Turbulence Models. *HVAC&R Research*, 853-870. <https://doi.org/10.1080/10789669.2007.10391459>



ÖZGEÇMİŞ

İlk ve orta öğrenimini Yalova’da tamamladı. 2005 yılında başladığı Dumlupınar Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümünden 2009 yılında mezun oldu. 2010 yılında Doğalgaz ve Enerji sektöründe iş hayatına adım attı. Halen aynı sektörde Ahlatçı Holding/MarmaraGAZ Yalova şirketinde Doğalgaz İç Tesisat Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYIN VE ESERLER

Oğuz, F., ve Koyunoğlu, C. (2024). Bir Kentsel Sağlık Merkezinde Kazan Dairesi Havalandırmasının İyileştirilmesi İçin Hesaplamalı Akışkanlar Mekaniği Çalışması. In 4th International World Energy Conference (Kayseri, Türkiye).

