



ENDÜSTRİYEL FIRINLARDA CFD ANALİZLERİ İLE HAVA PERDESİ TASARIMI

AIR CURTAIN DESIGN IN INDUSTRIAL OVENS WITH CFD ANALYSES

Burak PALA*¹ Timurcan KARMAHMOĞLU¹ Recep YÜCE¹

¹ Kristal Endüstriyel Mutfak Çamaşırhane Makine Pazarlama San. ve Tic. A.Ş., Antalya, Türkiye.

ABSTRACT

The aim of this study is to optimize the air curtain design in industrial food ovens and to ensure a more homogeneous distribution of airflow. Optimizing airflow in industrial ovens increases the efficiency of the baking process by minimizing temperature differences and achieving more uniform baking results. In this context, oven modeling was carried out using SolidWorks 2022 software, and computational fluid dynamics (CFD) analyses were performed in Ansys software. Six different air curtain designs were analyzed to examine the effect of each design on airflow and temperature distribution. Initial analyses revealed that the airflow was not homogeneous, leading to geometric modifications in the designs. The new designs aimed to balance airflow, prevent vortex formation, and optimize temperature distribution. The analyses demonstrated that the air curtain design had a significant effect on homogenizing the internal temperature distribution of the oven and improving baking quality. In the results of Design 1, considerable temperature differences were observed between trays, with the upper trays showing lower temperatures compared to the lower trays. Following optimizations applied to Design 6, simulations showed a meaningful increase in tray temperatures and a reduction in temperature differences between trays. Gains in the upper trays ranged from 12.50 °C to 12.97 °C, while increases in the lower trays ranged from 1.35 °C to 3.85 °C, thereby significantly reducing the maximum temperature difference between trays. When the average temperature of all trays was evaluated, Design 6 achieved nearly a 4% increase compared to Design 1. The temperature difference between the first and the last tray decreased from 12.76% in Design 1 to 5.77% in Design 6. These results reveal that improvements in air curtain geometry not only minimize inter-tray temperature differences by optimizing the thermal distribution inside the oven but also increase the overall baking temperature, thus ensuring more uniform and higher-quality baking. This study provides an important contribution toward enhancing energy efficiency and product quality in industrial ovens. Future studies indicate that different fan configurations and variable-speed controlled airflow systems should be investigated.

Keywords: Air Curtain, CFD Analysis, Convection Oven, Industrial Oven.

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel yiyecek fırınlarındaki hava perdesi tasarımını optimize etmek ve hava akışının daha homojen bir şekilde yayılmasını sağlamaktır. Endüstriyel fırınlarda hava akışının optimize edilmesi, pişirme sürecinin verimliliğini artırarak, sıcaklık farklarını minimize edip daha eşit pişirme sonuçları elde edilmesini sağlamaktadır. Bu doğrultuda, SolidWorks 2022 yazılımıyla fırın modellenmesi yapılmış ve Ansys yazılımında hesaplamalı akışkan dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. Altı farklı hava perdesi tasarımı üzerinde yapılan analizlerde, her bir tasarımın hava akışı ve sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. İlk analizlerde hava akışının homojen olmadığı tespit edilerek, tasarımlarda geometri değişiklikleri yapılmıştır. Yeni tasarımlar, hava akışını daha dengeli hale getirmeyi, vorteks oluşumlarını engellemeyi ve sıcaklık dağılımını optimize etmeyi hedeflemiştir. Yapılan analizler sonucunda, hava perdesi tasarımının fırın içi sıcaklık dağılımını homojenleştirmede ve pişirme kalitesini artırmada önemli etkiler gösterdiği gözlemlenmiştir. Tasarım 1 analiz sonuçlarında, tepsiler arası sıcaklık farklarının belirgin olduğu ve üst tepsilerde sıcaklıkların alt tepsilere göre daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Tasarım 6'ya yönelik optimizasyonlar sonucunda gerçekleştirilen simülasyonlarda, tepsi sıcaklıklarında anlamlı bir artış gözlemlenmiş ve tepsiler arası sıcaklık farklarının azaldığı görülmüştür. Üst tepsilerdeki kazanımlar 12,50 °C ile 12,97 °C arasında değişirken, alt tepsilerdeki artışlar 1,35 °C ile 3,85 °C arasında gerçekleşmiş ve böylece tepsiler arası maksimum sıcaklık farkı önemli ölçüde azalmıştır. Tüm tepsilerin ortalama sıcaklığı değerlendirildiğinde, tasarım 6'da tasarım 1'e göre yaklaşık %4'e yakın oranda bir artış sağlandığı tespit edilmiştir. Son tepsi ile ilk tepsi arasındaki sıcaklık farkı tasarım 1'de %12,76 iken tasarım 6'da %5,77'lere kadar gerilemiştir. Bu sonuçlar, hava perdesi geometrisinde yapılan iyileştirmelerin, fırın içerisindeki termal dağılımı optimize ederek hem tepsiler arası sıcaklık farklarını minimize ettiğini hem de genel pişirme sıcaklığını artırarak daha eşit ve kaliteli pişirme sağladığını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, endüstriyel fırınlarda enerji verimliliği ve ürün kalitesini artırmak adına önemli bir katkı sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, farklı fan konfigürasyonları ve değişken hız kontrollü hava akışı sistemlerinin incelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Endüstriyel Fırın, Hava Perdesi, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Analizi, Konveksiyonel Fırın.

*Corresponding Author (Sorumlu Yazar), e-mail: brkpala07@gmail.com

Submission Date Başvuru Tarihi	Revision Date Revizyon Tarihi	Accepted Date Kabul Tarihi	Published Date Yayın Tarihi
23.04.2025	05.09.2025	19.09.2025	29.12.2025

1. GİRİŞ

Günümüzde değişen tüketici alışkanlıklarıyla birlikte hazır yemek tüketimi artmakta ve buna bağlı olarak gıda da yeniden ısıtma işlemleri daha fazla önem kazanmaktadır. Bu tür işlemlerde amaç, gıda içerisinde en kısa sürede maksimum sıcaklık homojenliği elde etmektir [1]. Endüstriyel fırınların çalışma prensibi, sıcak havanın dolaşımına ve gıda yüzeyine konvektif ısı transferine dayanmaktadır [2]. Bir fırının içindeki termo-akışkan dinamiği, pişmiş gıdanın kalitesi üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir ve fırının tasarımının ve performans değerlendirmelerinin doğruluğu kritik öneme sahiptir [3].

Isı kaynaklarının fırın içerisinde uygun olmayan şekilde konumlandırılması, sıcaklık dengesizliklerine yol açmakta ve ürün kalitesini olumsuz etkilemektedir [4].

Pişirme sürecinde ısı transferi, radyasyon, iletim ve konveksiyon yoluyla gerçekleşir. Radyasyon, fırın içindeki ısıtma elemanları ve sıcak metal yüzeylerden yayılan ısı enerjisidir. Konveksiyon ise, havanın ısıtma kaynağı ve fırının sıcak yüzeyleriyle etkileşime girerek ısıyı ürün yüzeyine iletmesi, ardından iletim yoluyla ürün içinde dağılması sürecini ifade etmektedir. [5,6,7,8]. Endüstride, yarı mamul ürünler genellikle sabit sıcaklıkta pişirilerek optimum bir pişirme süreci sağlanmaya çalışılmaktadır. Ancak, pişirme sırasında yarı mamul ürünlerden suyun uzaklaştırılmasıyla birlikte fırın içerisindeki hava neme doymun hale gelir ve bu durum, bitmiş ürünlerde kalite kusurlarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, nemin havalandırma delikleri aracılığıyla dışarı atılması gerekmektedir [9].

Fırınların verimli çalışabilmesi ve sabit kalitede ürün elde edilebilmesi için tasarım aşamasında modelleme, simülasyon ve analiz süreçlerinden yararlanılması gerekmektedir. Bu bağlamda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) simülasyonları, fırın içi hava akışı ve ısı dağılımı gibi süreçleri analiz etmek için güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır [10,11,12,13]. Gıda endüstrisinde HAD, karıştırma, havalandırma, soğutma, pişirme ve kurutma gibi birçok sürecin simülasyonunda başarıyla uygulanmaktadır [14,15].

HAD simülasyonlarının kullanımına yönelik birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Örneğin, zorlamalı termal konveksiyon içeren bir fırın, soğuk depoların nemlendirme süreci, sürekli pişirme [16], fermente gıda ürünlerinin olgunlaşması [17], yiyeceklerin ısıtılması [18], büyük gıda soğutucularının [19], et kurutucularının [20], soğuk depoların [21], mikrodalga ısıtmanın [22] ve ısıtma fırınlarının [23] tasarım ve optimizasyonunda HAD'nin etkinliği gösterilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, endüstriyel yiyecek fırınlarındaki hava perdesi tasarımını optimize etmek ve hava akışının daha homojen bir şekilde yayılmasını sağlamaktır. Mevcut fan özellikleri ve hava debisi ile farklı geometrik hava perdesi tasarımları üzerinde çalışılarak, tepsiler arasındaki hava dağılımının iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Bu doğrultuda, bilgisayar destekli tasarım programı ile tasarlanmış hava perdelerinin HAD analizi yapılarak, hava akışının geometrik düzenlemelerle nasıl daha verimli hale getirilebileceği araştırılmıştır. Yapılmış olan iyileştirmelerle, tepsiler arası daha tutarlı ve kaliteli pişirme sonuçları elde edilmiş, tepsilerde toplam sıcaklık rejimleri artırılmış, pişirme sürecinin enerji verimliliğini artırılmış ve gıda kalitesinin yükseltilmesi sağlanmıştır. Bu çalışmanın endüstriyel fırınlarda hava akışının optimize edilmesi konusundaki literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Hava Perdesi Tasarımı ve HAD Analizi

Bu çalışmada, 304 kalite paslanmaz çelik iç ve dış gövdeye sahip, 20x2/1 GN kapasitesine sahip endüstriyel bir elektrikli fırın kullanılmıştır. Fırının dış ölçüleri 112x95x190 cm olup, ısıtmada kullanılan güç 50 kW'dır. Fırın, çoklu pişirme işlemleri için tasarlanmış olup, başlangıçlar, et, balık, sebzeler, ekmek, makarna ve kek gibi farklı ürün kategorilerinde kullanılabilir. Ayrıca, pişirme öncesinde ısıtma seçeneği sunarak, fırının verimli bir şekilde ısınmasını sağlayan özellikleri de bulunmaktadır. Söz konusu fırında sıcak havanın homojen biçimde ürünleri pişirmesine imkân tanıyacak şekilde tasarımı, hedef olarak önemli rol oynamaktadır. Bu özellik, pişirme sürecinde ürünlerin eşit şekilde pişmesini sağlayarak kaliteli sonuçların elde edilmesine katkıda bulunmaktadır.

Bu çalışmada kullanılan endüstriyel elektrikli fırının üç boyutlu montaj modeli, SolidWorks 2022 yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur. Modelleme sürecinde, fırının iç ve dış gövdesi, hava akış kanalları, fan sistemi, ısıtıcı bileşenleri ve raf yapıları detaylı bir şekilde tasarlanmıştır. Bu model, fırının

hava akış analizleri ve termal performans optimizasyonu için temel oluşturmuştur. Şekil 1’de, Expert elektrikli kombi fırın 202E’nin üç boyutlu izometrik görünümü sunulmaktadır.



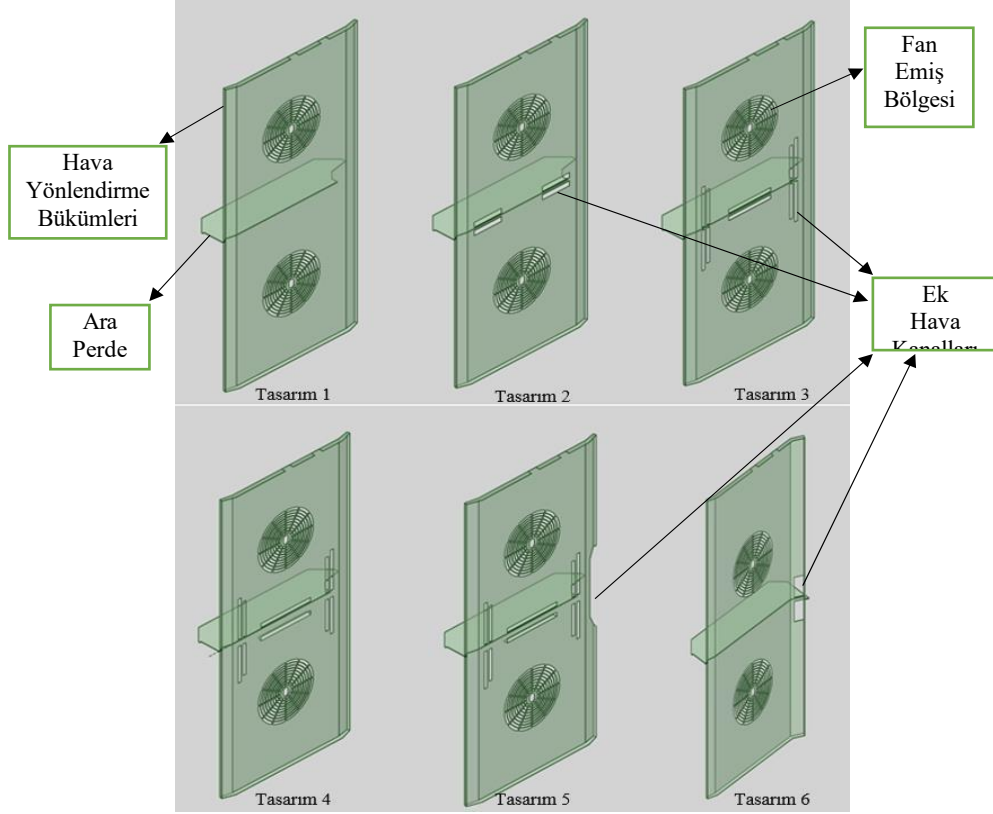
Şekil 1. Expert elektrikli kombi fırın 202E 3D model izometrik görünümü

Hava perdesi tasarımında yapılan iyileştirmeler, fırın içerisindeki sıcak hava dağılımını daha homojen hale getirerek pişirme sürecinin verimliliğini artırmayı amaçlamaktadır. Böylece, tepsiler arasındaki sıcaklık farkı minimize edilerek her noktada eşit pişirme koşulları sağlanması hedeflenmiştir.

Fırın içerisindeki hava akışını optimize etmek amacıyla farklı hava perdesi tasarımları oluşturulmuş ve analiz edilmiştir. İlk aşamada, SolidWorks 2022 yazılımı kullanılarak fırının başlangıç montaj modeli oluşturulmuş ve mevcut hava akış durumu değerlendirilmiştir. Daha sonra, hava akışının homojenliğini sağlamak ve sıcaklık dağılımını optimize etmek amacıyla Ansys yazılımında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) analizleri gerçekleştirilmiştir. İlk olarak tasarım 1 sonuçları incelendiğinde, bazı bölgelerde hava akışının yetersiz olduğu ve belirli noktalarda türbülansın arttığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, hava perdesi tasarımında geometri değişiklikleri yapılarak yeni modeller oluşturulmuş ve her biri Ansys programında yeniden analiz edilmiştir. Şekil 2’de, Expert elektrikli kombi fırın 202E için geliştirilen altı farklı hava perdesi tasarımının izometrik görünümü sunulmaktadır.

Toplamda altı farklı hava perdesi tasarımı karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tasarımlar arasında sağ ve sol kenarlarda bulunan kanat boyutları, yönleri, açıları, ortalara eklenen hava kanallarının konumları, fan bölgesini ayıran ara perde ve yönlendirme geometrileri değiştirilerek, fırın içindeki akış alanı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Orijinal tasarım olan tasarım 1’den sonra ardından gelen tasarımlarda orta bölgelerde açılan hava kanalları, orta tepsilerdeki dengeyi arttırmak için açılmış fakat fan emişi çok kuvvetli olduğundan dolayı diğer engellemelere rağmen bypass probleminin önüne geçilmesi için en son geometride kapatılma durumunda kalmıştır. Temel eksik olan sağ sol dengesi, tasarım 6’daki gibi hava yönlendiren kanadın açısının terse çevrilmesi ve orta tepsiler için ortasına kanal açılması ile tepsilerde daha dengeli sıcaklıklara olanak sağlaması düşünülmüştür.

İlk olarak fırının üç boyutlu modeli oluşturulmuş ve hava akış hacmi tanımlanmıştır. Ardından uygun ağ yapısı (mesh) oluşturulmuş, hücre boyutu ve kalite kriterleri (orthogonal quality) kontrol edilmiştir. Şekil 3, analizde kullanılan mesh yapısını sunmaktadır.



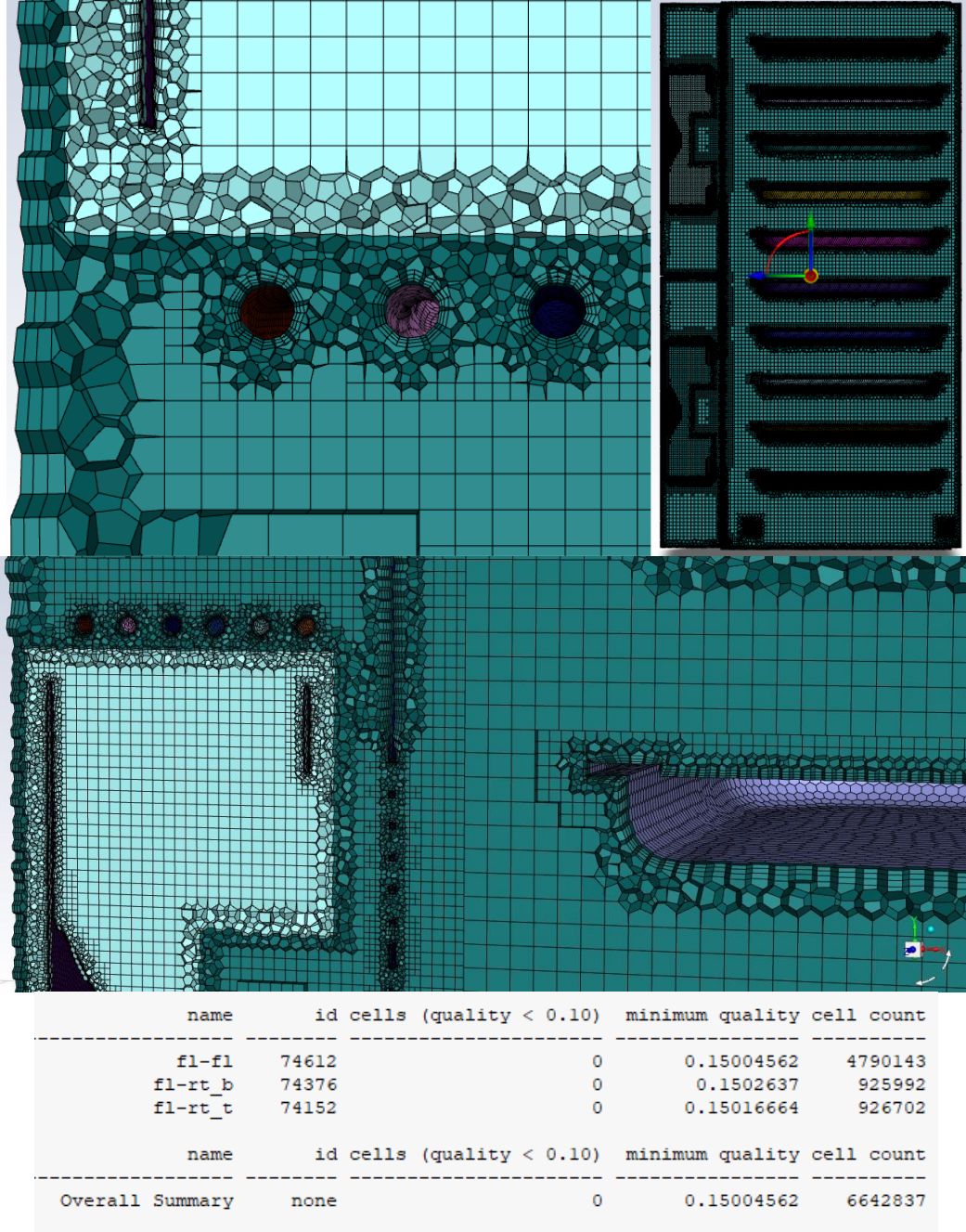
Şekil 2. Expert elektrikli kombi fırın 202E için hava perdesi tasarımlarının izometrik görüntüsü

Bu çalışmada, hava perdesi tasarımlarının analiz edilebilmesi için montajlar Ansys Fluent Meshing modülüne aktarılarak uygun bir hesaplama ağı (mesh) oluşturulmuştur. Meshleme sürecinde, fırın üç ana bölüme ayrılmıştır. Üst fan (fl-rt_t), alt fan (fl-rt_b) ve geriye kalan akış hacmi (fl-fl). Fan bölümlerinin ayrılmasındaki temel amaç; Fluent programında çözümlenirken kullanılacak olan hareketli ağ (mesh motion) metodunun kullanılacak olmasıdır. Bu metotla beraber bu iki fan bölümü eksenlerinde belirlenen devir/dakika rotasyon ile dönerek havayı ivmelendirecek unsur olmaktadır. Çözüm hassasiyetini artırmak amacıyla havayı sirküle eden fan bölümleri ve sıcaklık değişimlerinin kritik olduğu tepsi bölgelerde daha ince elemanlar kullanılmıştır.

Tüm kenar yüzeylerine yumuşak geçiş (smooth-transition) sınır katman metodu atanmış olup, bu katmanlar sayesinde sınırlardaki hava akışları daha hassas ölçülebilmektedir ve analizde izlenecek bölgelerde daha doğru sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır.

Mesh kalite metriği olan orthogonal kaliteyi ve dolayısıyla analiz hassasiyetini artırmak amacıyla poly-hexcore metodu tercih edilmiştir. Bu mesh metodunun seçilmesindeki en önemli sebep; fırın içinde boş bölümlerin nispeten daha fazla hacim kaplaması ve bu bölümlerde tetragonal ağ hücrelerinin çok daha iyi kaliteyi daha az hücre sayısı ile verebilmesidir. Poly-Hexcore metodu, ağ yapısını oluştururken hem heksagonal (altıgen) hem de poligonel (çokgen) elemanları birleştirir. Bu yöntem, özellikle karmaşık geometri ve sınır koşulları olan problemlerde ağın kalitesini artırmayı amaçlar. Şekil 3’de görüldüğü üzere büyük boşluklara sahip alanlara daha düzenli olan tetragonal hücreler atanmıştır. Dolayısı ile bu bölgelerdeki hücreler düzenli ve birbirine uyumlu olduğundan orthogonal kalite çok yüksek çıkmaktadır.

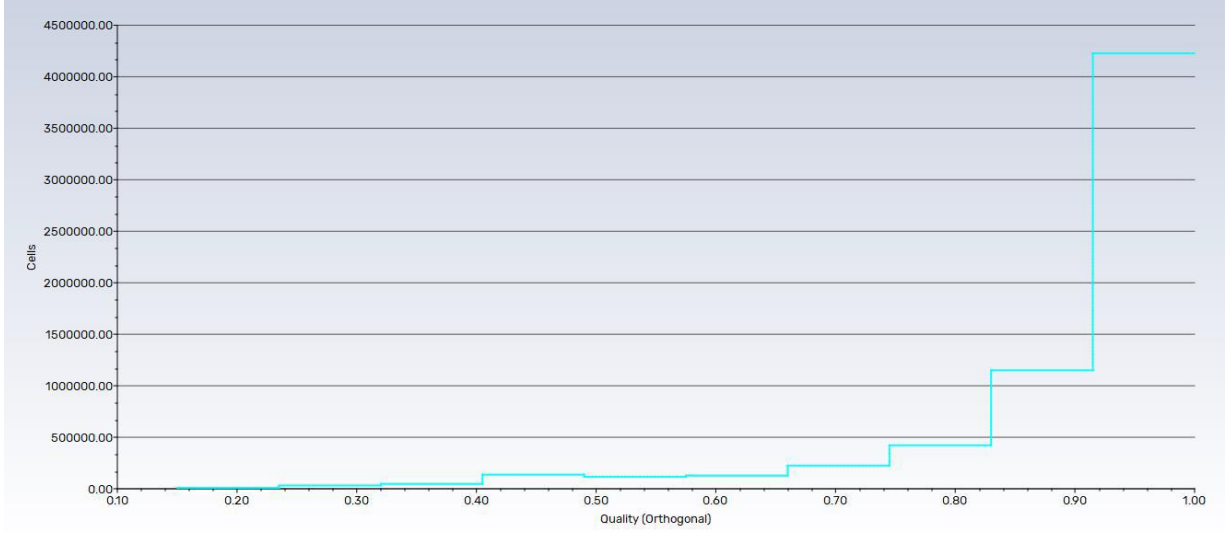
Küçük hücreli ve sınıra yakın bölgelere altıgen hücreler atanarak kabul edilebilir kalitede minimum hücre sayılarına ulaşılmıştır. Şekil 3’de görülebileceği üzere model toplam 6.642.837 elemandan oluşan üç bölge ve Şekil 4’de görülebildiği gibi minimum orthogonal kalitesi 0,15 olup ortalama orthogonal kalitesi 0,903 olan bir mesh yapısına bölünmüştür. Bu yapı, hava akışının ve sıcaklıkların kritik olduğu bölgelerde daha yüksek çözünürlük sağlayarak analiz sonuçlarının doğruluğunu artırmıştır. Meshleme işleminin tamamlanmasının ardından model, çözüm sürecine geçmek üzere Ansys Fluent Solver ortamına aktarılmıştır.



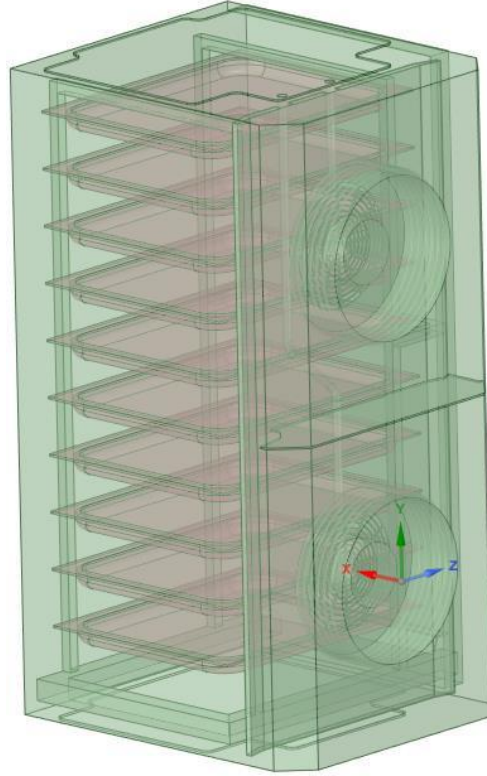
Şekil 3. Expert elektrikli kombi fırın 202E'nin Ansys programında ağ yapısı ve orthogonal kalitesi

Şekil 5' teki üç boyutlu fırın görseli analizlerde, hava akışının türbülans karakteristiğini doğru bir şekilde modellemek amacıyla SST k-omega türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model, düşük ve yüksek Reynolds sayılı bölgelerde hassas çözümler sunarak, özellikle sınır tabaka akışlarını ve girdap (vortex) oluşumlarını daha doğru bir şekilde simüle etmektedir. Çalışmada akışkan olarak hava kullanılmış olup, hava için 180 Celcius termal özellikleri olarak; yoğunluk 0.779 kg/m^3 , özgül ısı $1022.43 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, ısıl iletkenlik $0.0372 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ve kinematik viskozite $32.29 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak tanımlanmıştır.

Fırın iç yapısında kullanılan katı malzeme alüminyum olup, analizlerde alüminyumun yoğunluğu 2719 kg/m^3 , özgül ısı $871 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ ve ısıl iletkenliği $202.4 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4. Expert elektrikli kombi fırın 202E'nin Ansys programında ağ yapısına ait orthogonal kalite grafiği



Şekil 5. Expert elektrikli kombi fırın 202E'nin Ansys Spaceclaim programında hazırlanan akış hacmi

Sınır koşulları olarak; fanlar havayı hareketlendiren unsurdur ve alt ve üst fan bölgesi olarak ayrılmıştır. Bu bölgeler mesh hareketlendirme (mesh motion) metodu ile havayı ivmelendirmekte ve fırın içi hava sirkülasyonunu sağlamaktadır. Bu metot sayesinde fan geometrisinin etkisini de barındırdığından dolayı iç hacimdeki unsurlardan kaynaklanan (hava perdesi, tepsiler vb.) statik basınca göre debi değişebilmektedir. Bu sayede gerçeğe çok daha yakınsanan bir iç akış karakteristiği elde etmeyi mümkün kılmaktadır. Akış hacmini hareketlendiren bu metot ile hava giriş ve çıkış yüzeylerine de gerek kalınmamakta, gerçekteki gibi içerideki sabit hava sirküle edilmektedir.

Şekil 3’de daha net bir şekilde görülebilen fanların çevresinde bulunan ve ısıtmayı sağlayan toplam 50kW gücündeki rezistanslar alt ve üst fanlarda 25kW olarak eşit dağılmaktadır. Bu güç değerleri, rezistans yüzey alanına bölünerek W/mm^2 cinsinden rezistans yüzeylerine eklenmiştir.

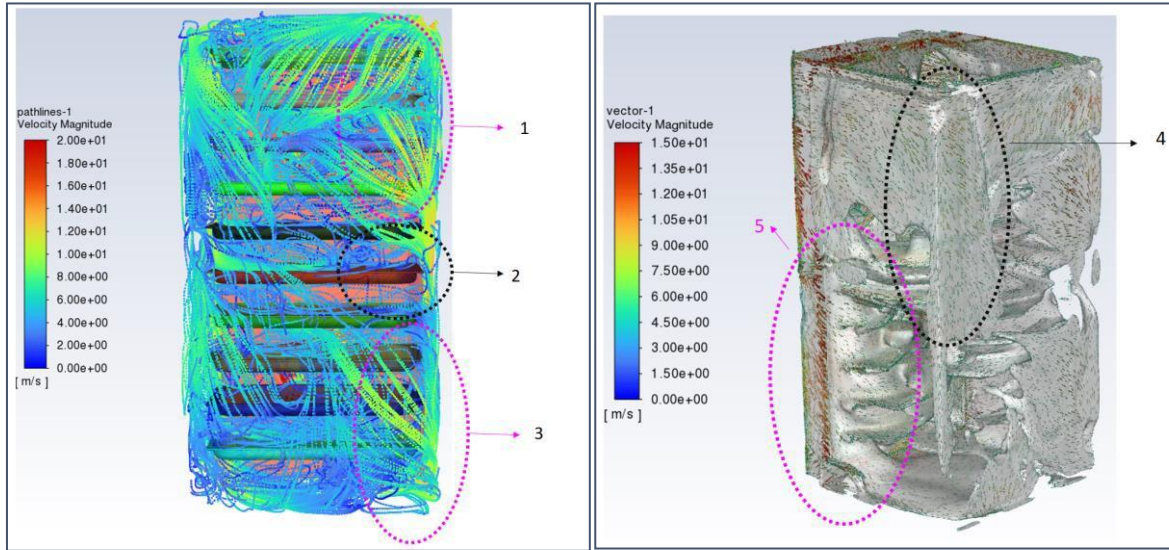
Yapılan tüm analizlerde bu belirlenen başlangıç ve sınır koşulları sabit kalmış olup, tek değişken olarak hava perdesine ait geometride güncellemeler yapıp sonuçlar değerlendirilmiştir.

Belirlenen bu başlangıç koşulları doğrultusunda gerçekleştirilen analizler, hava akışının fırın içerisindeki dağılımı ve sıcaklık homojenliği üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde değerlendirmek için kullanılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, endüstriyel fırın içindeki hava akışını optimize etmek amacıyla farklı hava perdesi tasarımları üzerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri yapılmıştır. Analizler, her bir tasarımın hava akışı üzerindeki etkilerini, sıcaklık dağılımını ve türbülans düzeylerini inceleyerek, en verimli tasarımın belirlenmesini amaçlamaktadır. Toplamda altı farklı hava perdesi tasarımı incelenmiş olup, her bir tasarımın performansı, fırının içindeki hava akışının homojenliğine, sıcaklık eşitliğine ve enerji verimliliğine katkıları doğrultusunda karşılaştırılmıştır. Aşağıda, her bir hava perdesi tasarımının özellikleri ve yapılan iyileştirmeler sırasıyla açıklanacaktır.

Şekil 5’te yer alan Tasarım 1 akış hacmi görseli, referans alınan montaj geometrisini temsil etmektedir. Bu tasarım, fırın içindeki hava akışının mevcut durumunu değerlendirmek, akış analizleri ile eksiklikleri belirlemek ve optimizasyon sürecine temel oluşturmak amacıyla referans olarak kabul edilmiştir. Şekil 6’da gösterilen analizlerde, fırın içerisindeki merkezde ve alt bölgelerde bulunan tepsiilere yeterli hava akışının sağlanmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 6. Expert elektrikli kombi fırın 202E’nin Ansys programında Tasarım 1’deki hava perdesine ait hava hız çizgileri ve kontörü

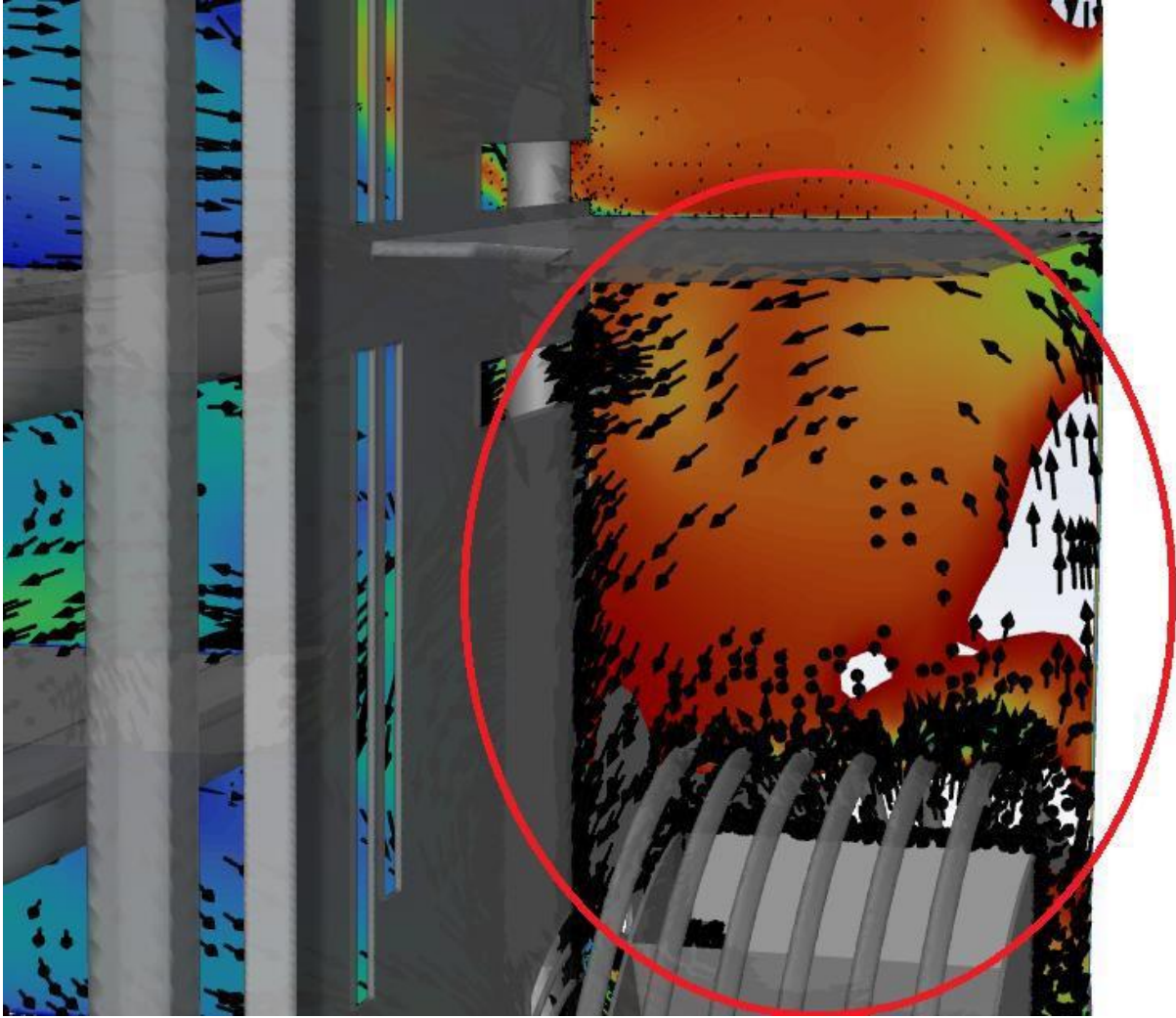
Şekil 6’de verilen hız çizgileri (sol) incelendiğinde iki fan arasında kalan bölgede, kapının karşısında kalan tarafta rafların arasına hava girişinin belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Fırın orta bölgesinde diğer raflara göre daha az ısı akışının oluşma nedeninin bu durum olduğu öngörülmektedir. 1 ve 3 numaralı kısımlarda hava yönünün rafların içine doğru olduğu görülmektedir. 2 numaralı alanda ise tepsi çevresince bir dolaşımın olduğu anlaşılmaktadır.

numaralı kısım, ön taraftaki kapı menteşe tarafındaki köşe olup, bu köşe kısımlarından arkaya yönelen bir hava kütlesi görülmektedir. Özellikle üst bölümden tepsi arkasına doğru yönelen hava kütlelerinin bu köşede yoğunlaştığı görülmektedir. Hava hız çizgilerinde görülen hızlı ve yoğunlaşan bölgelerin tepsiiler üzerindeki ısı akışı etkileri Şekil 7’deki sol görselle de teyit edilebilir.

numaralı bypass bölgesi, 4 numaralı bölgenin altında da devam etmektedir yani üst raflarda da bypass söz konusudur. Bypass; kenarlardan üflenen hava, fırın içine yayılmadan doğrudan ortadaki emiş bölgesine çekilerek ısısını raflara ve ürünlere vermeden geri dönmektedir.

Bu eksikliğin giderilmesi amacıyla Tasarım 2'de hava perdesinin merkezine dikdörtgen şeklinde açıklıklar eklenmiş ve hava akışının daha homojen hale getirilmesi hedeflenmiştir. Ancak, yapılan HAD analizleri sonucunda, bu değişikliğin hava akışı üzerindeki etkisinin yetersiz olduğu ve merkezdeki hava dağılımında beklenen iyileşmenin sağlanamadığı görülmüştür.

Bu doğrultuda geliştirilen Tasarım 3'te, hava perdesinin yalnızca merkez bölgesine değil, aynı zamanda kenar bölgelerine de dikdörtgen hava açıklıkları eklenmiştir. Böylece hava akışının yalnızca merkezde değil, tüm tepsi yüzeylerine daha eşit şekilde yayılması amaçlanmıştır. Ancak, Şekil 6'da görülebileceği gibi analiz sonucunda fan ayırma sacına daha çok yönelmeye başlayan havanın alt bölgede vorteks oluşturduğu belirlenmiştir. Hava akışındaki bu düzensizlik, fırın içerisindeki sıcaklık dağılımını orta alt taraf tepsiyerinde olumsuz etkileyerek pişirme verimliliğini düşürmüştür.



Şekil 7. Expert elektrikli kombi fırın 202E'nin Ansys programında Tasarım 3'deki hava perdesine ait vorteks bölümü

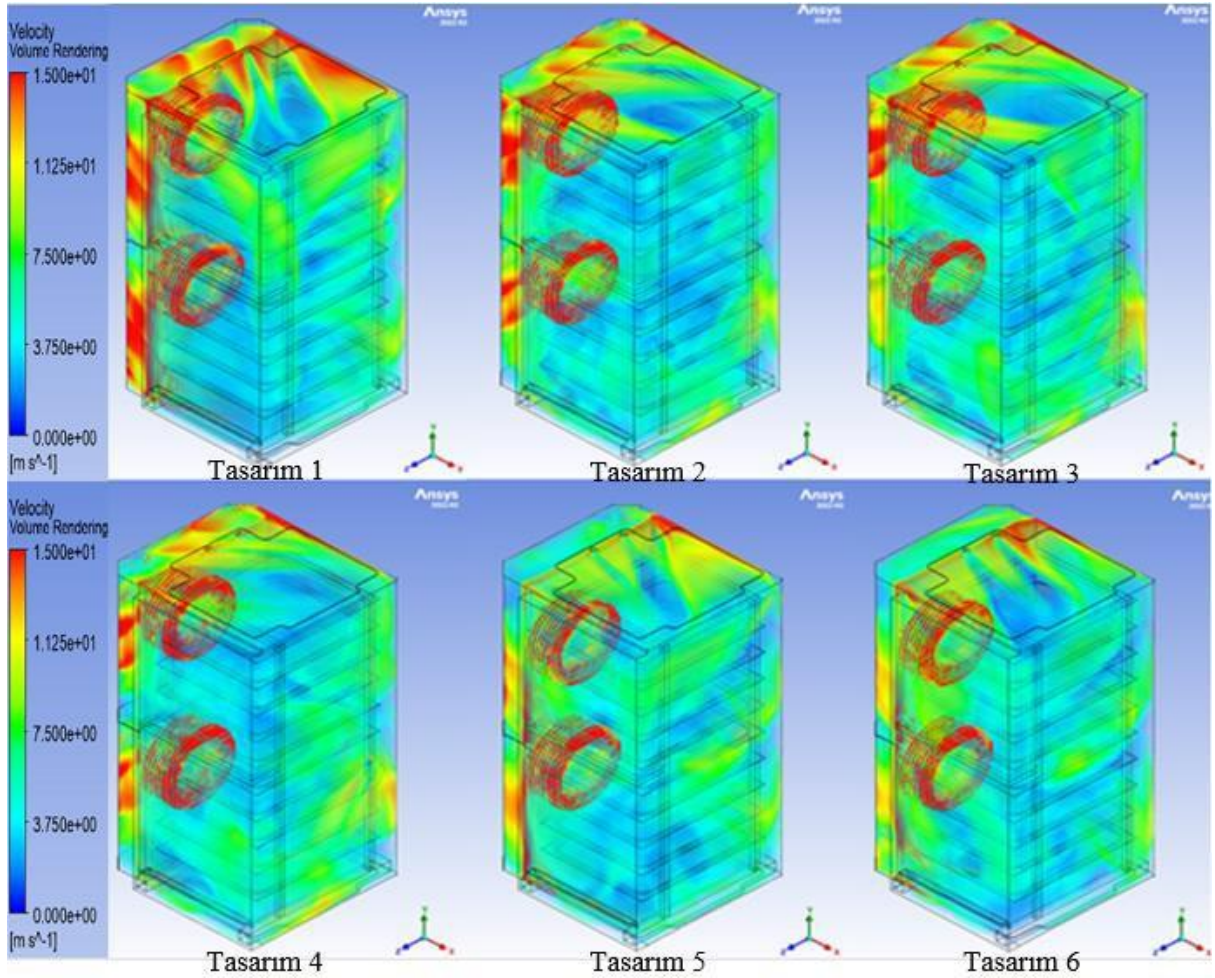
Bu sorunu gidermek için Tasarım 4'te, hava perdesinin alt kısmındaki dikdörtgen hava açıklıklarına büküm verilerek hava akışının yönlendirilmesi sağlanmıştır. Bu sayede vorteks oluşumunun engellenmesi ve daha istikrarlı bir akış profili elde edilmesi hedeflenmiştir. Yapılan analizler sonucunda, vorteksin büyük ölçüde azaltıldığı ve hava akışının daha kontrollü hale getirildiği gözlemlenmiştir.

Vorteks oluşumunun büyük ölçüde giderilmesi sonrasında, hava akışının yan bölgelerde düzensiz dağıldığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, Tasarım 5'te hava perdesinin yanal genişliği artırılarak hava

kaçışları minimize edilmeye çalışılmıştır. Genişletilmiş hava perdesi tasarımının analiz sonuçları olumlu yönde etkiler gösterse de, bu tasarımda yanal yüzeylerin kapanması sonucu fırın içerisinde kapı tarafının karşısında atıl hava bölgelerinin oluştuğu belirlenmiştir. Atıl hava bölgeleri, sıcaklık dağılımında dengesizliklere ve hava akışında ölü hacimlerin meydana gelmesine neden olmuştur.

Bu sorunun giderilmesi amacıyla geliştirilen Tasarım 6'da, hava perdesinin kapı tarafındaki akış yönü optimize edilmiş ve hava akışı daha dengeli hale getirilmiştir. Ancak, analizler sonucunda, kapı tarafının karşısındaki yüzeylerde hava birikmesi nedeniyle yeni vorteks oluşumlarının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu durumu engellemek için hava boşluklarına yönelik iyileştirmeler yapılmış, sac yüzeyi içe doğru eğilendirilerek atıl hava alanlarının azaltılması sağlanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, bu tasarımın fırın içerisindeki hava akışını en homojen şekilde dağıttığı ve en verimli sonuçları sunduğu belirlenmiştir.

Şekil 8'de tasarlanan 6 perdenin de Ansys Post-Process programında iç hava hızlarına ait renderler sunulmaktadır.

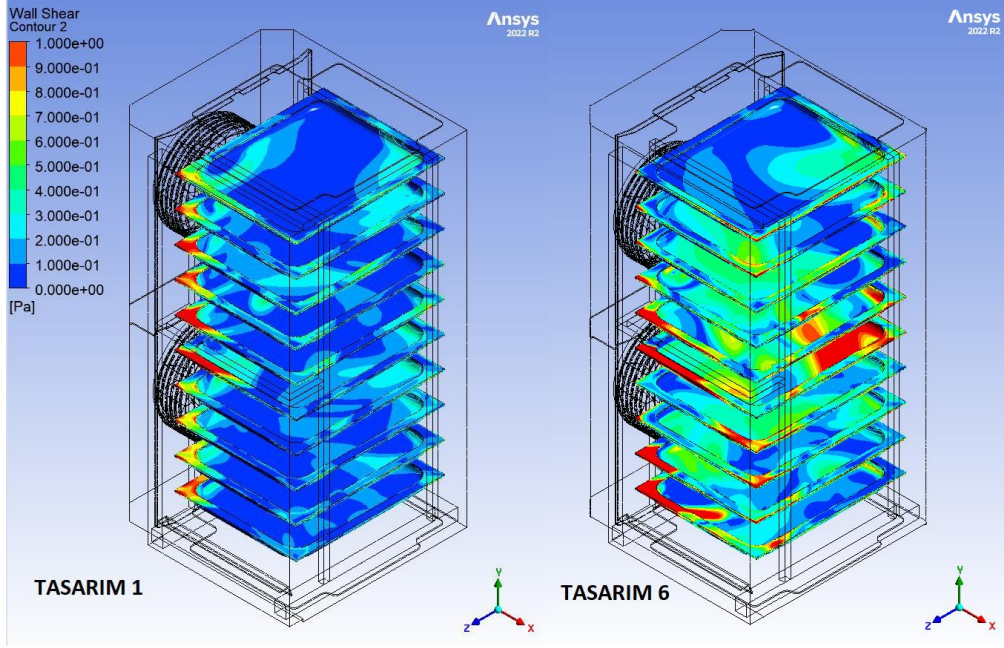


Şekil 8. Expert elektrikli kombi fırın 202E'nin Ansys programında hava akış simülasyonu

Şekil 9, farklı tasarımlar için tepsilere temas eden hava akışını ve buna bağlı olarak yüzeylerde oluşan gerilme (wall stress) dağılımlarını sunmaktadır. Wall stress analizi, hava akışının tepsi yüzeyleriyle etkileşimini ve akış yoğunluğunu değerlendirmede kritik bir parametre sağlamaktadır.

İlk durumda (Tasarım 1), tepsiler arası sıcaklık dağılımında belirgin dengesizlikler görülmektedir: alt raflarda sıcaklık düşük, üst raflarda ise yüksektir. Zaman ilerledikçe bu farklılıklar daha da artmakta, tepsiler arası sıcaklık farkı büyümektedir. Bu durum, hava akışının yeterince homojen olmadığını göstermektedir. Optimizasyon sonrasında (Tasarım 6), hava akışının tepsilerle temasının artmasıyla wall stress değerleri yükselmiş, bu da sıcak hava dağılımının daha dengeli hale geldiğini ve pişirme sürecinde homojenliğin sağlandığını göstermektedir. Analizler, bu tasarımın hava akışını optimize ederek fırın

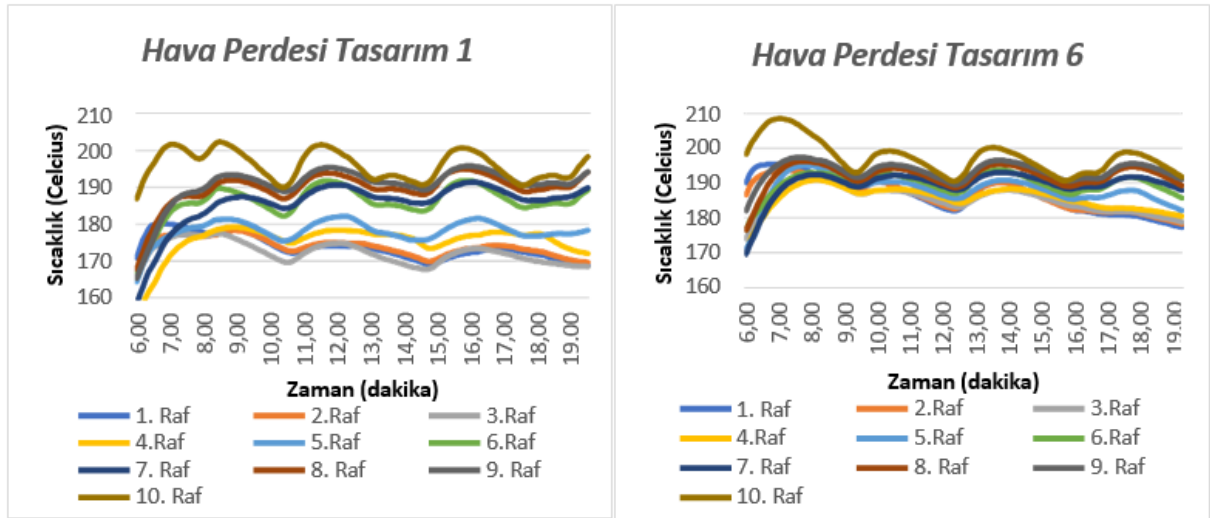
içerisindeki sıcaklık farklarını azalttığını ve tüm tepsi yüzeylerinde daha dengeli bir pişirme performansına katkı sağladığını ortaya koymuştur. Tablo 1 ve Şekil 10, Tasarım 1 ve Tasarım 6 için elde edilen tepsiler arası sıcaklık dağılımını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Şekil 10'daki veriler dakikada 12 kez alınan sıcaklık değerlerinin farklı perde tasarımlarındaki grafiğini ifade etmektedir. Tasarım 1'de, alt ve üst raflar arasında sıcaklık farkı yüksektir ve dalgalanmalar artmaktadır. Buna karşılık Tasarım 6'da, sıcaklık dağılımı dengelenmiş; alt raflardaki sıcaklık artışı ve üst raflardaki sıcaklık düşüşü bir dengeye ulaşarak homojen bir profil elde edilmiştir. Böylece tepsiler arası sıcaklık farkı minimize edilmiş, pişirme süreci daha istikrarlı hale gelmiştir.



Şekil 9. Expert elektrikli kombi fırın 202E'nin Ansys programında tepsilere gelen havanın temasta bulunduğu yoğunluk haritaları

Tablo 1. Expert elektrikli kombi fırın 202E fırını için Tasarım 1 ve Tasarım 6 tepsi sıcaklıkları

Tepsi No	Tasarım 1 (°C)	Tasarım 6 (°C)	Artış (°C)	Artış (%)
1	173,8007	186,556	12,7553	7,35
2	173,9458	186,4453	12,4995	7,17
3	172,2418	185,216	12,9742	7,53
4	175,4961	185,44	9,9439	5,67
5	178,2007	187,9187	9,718	5,46
6	186,1797	189,6273	3,4476	1,85
7	185,6948	189,548	3,8532	2,07
8	189,6366	191,9553	2,3187	1,22
9	190,7039	193,392	2,6881	1,41
10	195,9856	197,3327	1,3471	0,69
Toplam	1821,8857	1893,4313		
Ortalama			7,1546	4,042



Şekil 10. Expert elektrikli kombi fırın 202E fırını için tasarlanan Tasarım 1 ve Tasarım 6 hava perdelerinin raflardaki tepsiler arası zamana bağlı sıcaklık dağılımı

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 20×2/1 GN kapasiteli Expert elektrikli kombi fırın 202E üzerinde hava perdesi tasarımının optimizasyonu amaçlanmıştır. Çalışmanın temel hedefi, fırın içerisindeki hava akışını homojenleştirerek sıcaklık farklılıklarını minimize etmek, böylece pişirme kalitesini yükseltmek ve enerji verimliliğini artırmaktır.

SolidWorks 2022 ile oluşturulan CAD modeli ve Ansys Fluent kullanılarak yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri sonucunda başlangıç ve sınır koşulları sabit tutularak altı farklı hava perdesi tasarımı test edilmiştir. Analizlerde, hava perdesine dengesiz sıcaklıktaki tepsileri iyileştirmek için açılan orta hava kanalları, fan emiş bölgesine yakın olduğundan dolayı kabin içinde bypass, fan bölgesinde ise girdaplanma yaratmıştır. Özellikle Tasarım 6'da kaldırılan hava kanalları ve yapılan geometrik düzenlemelerle (kapı tarafındaki hava yönlendirme bükümünün ters açılması ve ortasına kanal açılması) fırın içindeki hava akışını fan performansından ödün vermeden en homojen şekilde dağıttığını ve tepsiler arası sıcaklık farklarını en aza indirdiğini ortaya koyarken toplam sıcaklık rejimini de arttırmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada katkı sağlayan fırın bölümü çalışanlarına ve Ar-Ge ile üretim birimlerindeki ekiplere, özverili çalışmaları ve sağladıkları destek için teşekkür ederiz. Sürecin her aşamasında verilen yapıcı geri bildirimler, tasarımların iyileştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır.

Ayrıca, çalışma sürecinde yönlendirmeleri ve katkılarıyla destek veren bölüm sorumlularına teşekkürlerimizi sunarız.

REFERANSLAR

- [1] Julio Cesar Zanchet Piaia, Carlos Alberto Claumann, Marinho Bastos Quadri and Arioaldo Bolzan, Air Flow CFD Modeling in an Industrial Convection Oven, 2018.
- [2] Stigter JD, Scheerlinck N, Nicolai B, Van Impe JF Optimal heating strategies for a convection oven. J Food Eng 48(4), 335–344, 2001.
- [3] Mistry H, Dey S, Bishnoi P, Castillo JL Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens. Appl Therm Eng 26 (17), 2448–2456, 2006.
- [4] Bakerpedia Oven Temperature, <https://bakerpedia.com/processes/oven-temperature/> (accessed on 8 July 2024).
- [5] Sabovics, M.; Straumite, E.; Galoburda, R. The influence of baking temperature on the quality of triticale bread. In Proceedings of the 9th Baltic Conference on Food Science and Technology

- FOODBALT 2014 Conference Proceedings, Jelgava, Latvia, 24–26 April 2014, 228–233.
- [6] Chhanwal, N.; Anishaparvin, A.; Indrani, D.; Raghavarao, K.S.M.S.; Anandharamakrishnan, C. Computational fluid Dynamics (CFD) modeling of an electrical heating oven for bread-baking process. *J. Food Eng.* 100(3), 452–460, 2010.
- [7] Chukwuneke, J.; Nwuzor, I.C.; Anisiji, E.O.; Digitemie, I.E. Design and Fabrication of a Dual Powered Baking Oven. *Adv. Res*2018, 16, 1–8.
- [8] Chukwuneke, J.; Nwuzor, I.C.; Anisiji, E.O.; Digitemie, I.E. Design and Fabrication of a Dual Powered Baking Oven. *Adv. Res*, 16(4), 1–8, 2018.
- [9] Gundu, R.; Datta, A.K.; Jayashree, G.C. Optimization of Bread Baking Parameters in Conventional Oven. *J. Agric. Eng. Res.* 49(2), 54–57, 2012.
- [10] Kokolj, U.; Škerget, L.; Ravnik, J. The Validation of Numerical Methodology for Oven Design Optimization Using Numerical Simulations and Baking Experiments. *J. Mech. Eng.* 63(4), 215–224 2017.
- [11] Rek, Z.; Rudolf, M.; Zun, I. Application of CFD Simulation in the Development of a New Generation Heating Oven. *J. Mech. Eng.*58(2), 134–144, 2014.
- [12] Norton, T.J.; Sun, D.-W. Computational fluid dynamics (CFD)—An effective and efficient design and analysis tool for the food industry: A review. *J. Food Sci. Technol.* 17(11), 600–620, 2006.
- [13] Norton, T.; Tiwari, B.; Sun, D.-W. Computational Fluid Dynamics in the Design and Analysis of Thermal Processes: A Review of Recent Advances. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 53 (3), 251–275, 2013.
- [14] Padhi, M.R. A Review on Applications of Computational Fluid Dynamics (CFD) in the Food Industry. *PJAE* 2020, 17, 10159–10169.
- [15] Badea, A. Basics of Heat Transfer and Mass; Romanian Academy: Bucharest, Romania, 2004.
- [16] S.-Y. Wong, W. Zhou, J. Hua, Designing process controller for a continuous bread baking process based on CFD modelling, *J. Food Eng.* 81 (3) 523-534, 2007.
- [17] P.-S. Mirade, Computational fluid dynamics (CFD) modelling applied to the ripening of fermented food products: basics and advances, *Trends Food Sci. Technol.* 19 (9) 472-481, 2008.
- [18] J. Stamatios, S.J. Babalis, V.G. Belessiotis, Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs, *J. Food Eng.* 65 (3) 449-458, 2004.
- [19] P.-S. Mirade, A. Kondjoyan, J.-D. Daudin, Three-dimensional CFD calculations for designing large food chillers, *Comput. Electron. Agric.* 34 (1-3) 67-88, 2002.
- [20] P.-S. Mirade, Prediction of the air velocity field in modern meat dryers using unsteady computational fluid dynamics (CFD) models, *J. Food Eng.* 60 (1) 41-48, 2003.
- [21] H.B. Nahor, M.L. Hoang, P. Verboven, M. Baelmans, B.M. Nicolai, CFD model of the airflow, heat and mass transfer in cool stores, *Int. J. Refrig.* 28 (3) 368-380, 2005
- [22] S. Gunasekaran, H.-W. Yang, Effect of experimental parameters on temperature distribution during continuous and pulsed microwave heating, *J. Food Eng.* 78 (4) 1452-1456, 2007.
- [23] P. Navaneethakrishnan, P.S.S. Srinivasan, S. Dhandapani, Heat transfer and heating rate of food stuffs in commercial shop ovens, *Sadhana-Acad. P. Eng. S.* 32 (5) 535-544, 2007.