

SÜRDÜREBİLİRLİĞİ SAĞLAMAK AMACIYLA ANKASTRE FIRINLARDA ISIL VERİMLİLİK ARTIRMA

Muharrem KEYFOĞLU^{1*}, S. Fatih KIRMIZIGÖL²

^{1,2} ESALBA Metal Sanayi A.Ş., Eskişehir

¹ ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-6601-0784>

² ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0986-0691>

Anahtar Kelimeler	Öz
Deney Enerji Fırın HAD Verimlilik	<i>Ev tipi ankastre fırınlar günlük yaşantıda sıkça kullanılan mutfak ekipmanlarıdır. Bu ekipmanların ısı verimliliğinin artırılması, enerji maliyetlerinin yükseldiği ve enerji krizinin yaşandığı günümüz Dünya'sında kritik öneme sahiptir. Farklı boyutlarda üretimleri gerçekleştirilebilen fırınların bu çalışma kapsamında 610 x 545 x 579 mm boyutlarında iç hacmi 72 L olan mevcut bir fırının enerji verimliliğinin iyileştirilmesi hem deneysel hem de Solidworks Flow Simulation (SWFS) ticari yazılımı kullanılarak Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) sayısal çalışması gerçekleştirilmiştir. Deneylerde fırın dış sacları ve iç bölgelerinden alınan sıcaklık değerleri karşılaştırma parametresi olarak ölçülürken HAD sayısal çalışmasında rezistansların ısı gücü, ortam koşulları ($P_s = 101235$ Pa), sıcaklığı ($T_o = 22$ °C), malzemelerin yoğunluğu, ısı iletkenliği, özgül ısı değerleri ve emaye kaplamaların olan yüzeyler için emisivite katsayısı tanımlanarak iletim, ışıınım ve taşınım ısı transferi çalışmaları yapılmıştır. HAD sayısal çalışmasında k-ε Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) türbülans modeli seçilmiş ve doğrulanan ağ yapısında Deney-HAD arasında merkez sıcaklık değerleri arasında %1,02 ve fırının sac yüzeyleri ve soğutma fanı etrafında en fazla %8,56 ve cam bölgesinde 3 bölge haricinde %9 altında fark olduğu tespit edilmiştir. Farklı fan koruma sacı (FKS) tasarımları ile yapılan iyileştirme çalışmalarında 40 Wh ve cam yünü yerine alüminyum kapmalı cam yünü yalıtım kullanımı ile 37 Wh enerji tasarrufu elde edildiği tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan iyileştirmelerin hepsi uygulandığında 131 Wh enerji tasarrufu sağlanarak A+ seviyesine ulaşması sağlanmıştır.</i>

INCREASING THERMAL EFFICIENCY IN BUILT-IN OVENS TO ENSURE SUSTAINABILITY

Keywords	Abstract
CFD Efficiency Energy Oven Experiment	<i>Increasing the thermal efficiency of built-in ovens is crucial due to rising energy costs and the current energy crisis. This study, both experimental and Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations were conducted to improve the energy efficiency of an existing oven with internal dimensions of 610 x 545 x 579 mm, resulting in a volume of 72 L, which can accommodate productions of different sizes. While temperatures were measured as the comparative parameter for the outer sheets and internal regions of the oven during experiments, in the CFD simulation, heat power of the resistors, ambient conditions ($P_s = 101235$ Pa), temperature ($T_o = 22$ °C), material densities, thermal conductivities, specific heat values, and emissivity coefficients for surfaces with enamel coatings were defined to conduct studies on heat transfer through conduction, radiation, and convection. In the CFD simulation, the k-ε Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) turbulence model was selected, and within the validated mesh structure, it was determined that there was a maximum difference of 1.02% between the central temperature values of the experiment and CFD, and a maximum difference of 8.56% around the oven sheet surfaces and cooling fan, with a difference of under 15% in all areas except for 4 zones in the glass area. Improvement studies conducted with different Fan Protection Sheet designs resulted in an energy saving of 40 Wh with the use of aluminum-coated glass wool insulation instead of glass wool, yielding a total energy saving of 131 Wh when all improvements were applied to reach A+ level.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 07.02.2024

Kabul Tarihi : 09.01.2025

Research Article

Submission Date : 07.02.2024

Accepted Date : 09.01.2025

* Sorumlu yazar: mkeyfoglu16@gmail.com

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1433107>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Fırınlara enerji tüketimine göre sınıflandırılmaya başlanması fırın üretici firmalarını, fırının enerji tüketimi üzerinde de çalışmalar yapıp, yüksek verimli fırınlar üretmeye yöneltmektedir. Ürünlerdeki enerji verimliliği ile ilgili şartlar 2014 yılında Ecodesign ile yayımlanmıştır. Bu direktifin uygulanmasıyla ilgili, kademeli bir geçiş yapılmış ve yıldan yıla enerji tüketim limitleri aşağı çekilmiştir. Son olarak 2019 yılında Avrupa Birliği üye ülkelere satış yapılabilmesi için enerji verimliliği indeksinin (Energy Efficiency Index - EEI) 96 altında olması şartı getirilmiştir. Çalışmanın yürütüldüğü Esalpa Metal Sanayi A.Ş. firması bünyesinde üretilen fırın modelinde ise EEI değeri 103 olarak hesaplanmıştır. Avrupa pazarında satışa devam edilebilmesi için enerji verimliliği düşük ürünlerde verimlilik artırma çalışmalarının yapılması kaçınılmaz bir hal almıştır.

Bu çalışma kapsamında çalışmaların yürütüldüğü mevcut fırında, 72 litrelik kavite hacmi ve 801 Wh'lık enerji tüketimiyle "A" enerji sınıfında konumlanmaktadır. Mevcut fırının HAD sayısal çalışması doğrulandıktan sonra yapılan iyileştirmeler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- FKS sacında bulunan deliklerin mevcut kalıp üretim koşulları düşünülerek parametrik olarak bazı deliklerin kapatılması,
- Isı yalıtım boyası kaplanmış cam yünü yalıtım yerleştirilmesi,
- Cam yünü yalıtımın alüminyum folyo kaplamalı cam yünü yalıtım ile değiştirilmesi,
- Fırında kullanılan cam sayısının 3'e çıkarılması.

AB standartlarına göre yapılan enerji verimlilik hesaplaması sonucuna göre fırının 699 Wh ve altındaki tüketim değerleri "A+" enerji sınıfına girmektedir. Çalışmanın nihai amacı enerji tüketiminin bu değerin altına indirilmesidir. Literatür taraması kapsamında tespit edilen yöntem ve tekniklerin HAD çalışmasıyla bilgisayar ortamında simülasyonun yapılması ve laboratuvarında yapılan deneyler sonrasında fırının enerji tüketiminde iyileştirmeler yapılmıştır. İyileştirilmiş fırının enerji verimlilik sınıfı "A+" sınıfına yükseltilmiştir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ısıtma, pişirme, kurutma fonksiyonlarının en azından birini içeren cihazlardan verimlilik, hızlı pişirme, homojen pişirme ve hızlı kurutma gibi özelliklerin performanslarında iyileşme giderek artmaktadır. Enerji maliyetlerindeki artış termal işlemler için daha fazla verimlilik ihtiyacı oluşturmaktadır.

Fırın içindeki sıcaklık ve hız dağılımını değerlerini tespit etmek, fırının performansını arttırmak için önemli bir

adımdır. Sıcaklık ve hız dağılımının tespiti deneysel olarak mümkünken prototip maliyetlerini azaltmak, üretim süreci olmadan bilgisayar ortamında doğrulanmış sayısal modelin oluşturulması iyileştirilmiş tasarımı hızlı bir şekilde oluşturmak için faydalı bir yoldur (Mirade, Kondjoyan ve Daudin, 2002) (Mistry, Subbu, Dey, Bishnoi ve Castillo, 2006). Doğrulama çalışmaları için ticari veya basitleştirilmiş model oluşturulabilirken temelde HAD sayısal çalışmaları gereklidir. Kurutma fırını, alüminyum eritme fırını, ısıtma fırını, zincir sertleştirme fırını ve ekmek pişirme fırını gibi endüstrinin kullandığı birçok fırında HAD sayısal çalışmaları yapılarak iyileştirme süreçlerine gidildiği belirtilmektedir (Niamsuwan, Kittisupakorn ve Suwatthikul, 2015). Hem deneysel hem de HAD sayısal çalışma ile küçük ölçekli bir ekmek pişirme fırını inceleyen Khatir ve ark. yüksek hızla çarpan hava jetlerine sahip bir fırını 2 boyutlu modellediğini göstermişlerdir. Fırın nozul boyutu ve fırın derinliği üzerine farklı parametrik tasarımlarla optimum çalışmayı belirlemişlerdir. 25 farklı noktadan yapılan ölçüm sonuçlarına göre HAD ve deney arasında %0,91 sıcaklık farkı olduğu tespit edilmiştir (Khatir, Paton, Thompson, Kapur ve Toropov, 2012) (Khatir, Taherkhani, Paton, Thompson, Kapur ve Toropov, 2015). Penske ve ark. tarafından yapılan çalışmada bir ankastre fırının enerji tüketimi analiz edilmiştir. Çalışma kapsamında fırının enerji verimlilik sınıfının AB standartlarına göre "A" sınıfına çıkarılması amaçlanmıştır. Tablo 1'de detayı verilen çalışmada fırının kapak açıklığı, baca çıkışının optimizasyonu, yalıtım kalınlığının artırılması, ısınlı ısı transferinin kesilmesi için alüminyum folyo kaplaması ve fırın camlarının 2 adetten 3 adede çıkarılması üzerine çalışılmıştır. Her konfigürasyon test edilerek enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. (Penske, Holec, Gierkes ve Golobic, 2005)

Tablo 1. Yapılan Revizyonlara Göre Enerji Tüketimi (Penske ve diğ., 2005)

No	Açıklama	E (Wh)
1	Standart	917
2	Kapakta ve Fırının Geneline Bulunan Isıl Kaçakların Engellenmesi	801
3	Kapakta ve Fırının Geneline Bulunan Isıl Kaçakların Engellenmesi ve Bacaların Kapatılması	772
4	Fırın Merkez Sıcaklığındaki Salınımların Azaltılması (PID)	745
5	Fırın Çevresine 30 mm Kalınlığında Ekstra Yalıtım Eklenmesi	846
6	Fırın Kazanı İçine Alüminyum Folyo Kaplanması	845
7	3 Camlı Fırın Kapağı	837

Buna göre 4 numaralı çalışmada görüldüğü gibi fırın sıcaklık kontrolünün elektronik olarak yapılarak merkez sıcaklık salınımlarının azaltılması enerji tüketimine en olumlu etkiyi sağlayan yöntem olarak

gözlemlenmiştir. Altun ve ark. tarafından yapılan çalışmada fırın kapağından dış ortama ısınlama ısı transferi ele alınmıştır. Fırın kapağından ısınlama ısı transferinin azaltılması amacıyla, emisivite katsayısı (ϵ) düşük olan alüminyum folyo ile kapak camının kaplanması enerji tüketimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Fırında iki farklı iyileştirme yapılarak testler gerçekleştirilmiştir. İlk testte fırın iç camı tamamen alüminyum folyo ile kaplanmıştır. İkinci testte ise fırın camında 8x32cm boyutlarında bir pencere açılarak alüminyum folyo kaplanmıştır. Testlerin gerçekleştirildiği fırının mevcut halinde enerji tüketimi 811 Wh olarak ölçülmüştür. Penceresiz alüminyum folyo kaplanmış kapak ile yapılan test sonucunda fırının 720 Wh enerji tüketimi tespit edilmiştir. Pencereci alüminyum folyo kaplanmış fırında yapılan testte ise fırının enerji tüketimi 711 Wh olarak ölçülmüştür. Ayrıca buna göre fırının EEI değeri ise 93'ten 82'ye düşürülmüştür (Altun, Yıldız ve Anık, 2018).

İyileştirme çalışmalarında kullanılan HAD sayısal çalışmasında model doğrulaması ve ağ yapısı önemli bir konudur. k- ϵ RANS türbülans modeli endüstride de sıklıkla kullanılan ve tutarlı sonuçlar verdiği ispatlanmış bir modeldir (Wakes, Maegli, Dickinson ve Hilton, 2008). Wakes ve ark. tarafından yapılan bu çalışmada akış hızı ve sıcaklık ölçümleri belirli noktalarda ölçülerek HAD modeli doğrulanmıştır. HAD modelinin doğrulanmasında fırın ön kapağındaki akış hızları ve fırının çeşitli noktalarındaki sıcaklık ölçümlerine yoğunlaşılmıştır. Sıcaklıklardaki ve akışkan hızındaki HAD - Deney verileri paylaşılarak birbiriyle karşılaştırılmıştır. Fırın kapağındaki hava çıkışında akışkan hızı HAD sayısal çalışmasında %3 hata payı ile gözlemlenmiştir. Sıcaklık ölçümü yapılan noktalarda ise ortalama hata oranı %2 olarak tespit edilmiştir. Ağ yapısının iyileştirilmesiyle daha tutarlı sonuçların alındığı raporlanmıştır. Kayıhan (Kayıhan, 2003) tarafından yapılan çalışmada ise 58L kavite hacmine sahip bir elektrikli fırın ele alınmıştır. Fırında üst ısıtıcıların üzerine yansıtıcı plakaların konması, fırın kavite yüzeylerinin yansıtıcı plakalarla kaplanması, fırın baca çıkışının kapatılması, fırın kapağına "O" conta kullanılması, fırın kapak çerçevesinin-cam aralığının ve alt ısıtıcı koruma sacının cam yünü ile izole edilmesi gibi yöntemler denenmiştir. Çalışmada en fazla enerji verimliliği sağlayan yöntemin fırındaki ısı kayıp ve kaçakların engellenmesi olduğu görülmüştür. İyileştirilmiş fırının mevcut durumuna göre %17 daha düşük enerji tüketimi sağlanmıştır. Piaia ve ark. tarafından yapılan çalışmada içerisinde hava akımı bulunan bir kurutma fırını ele alınmıştır. Fırın içerisindeki sıcaklık dağılımının, pişirilen yiyeceklerin kalitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğundan bahsedilerek tasarım ve performans değerlendirmesinin önemine dikkat çekilmiştir. Fırının performansının tahmin edilmesi için bir HAD sayısal çalışması gerçekleştirilmiştir. RANS yaklaşımı ile k- ϵ

türbülans modeli kullanılmıştır. HAD sayısal çalışması deneyde kullanılan hız sensörlerinden alınan verilerle doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçların gerçek deney verileriyle uyumlu olduğu görülmüştür. Deneylerle ölçülen değerlerle HAD sayısal çalışmasından alınan değerler arasındaki hata oranı %18,14'tür (Piaia, Claumann, Quadri ve Bolzan, 2018). Niamsuwan ve ark. tarafından yapılan çalışmada toz boya ile boyanmış klima parçalarının pişirilmesi için kullanılan fırının HAD sayısal çalışması ile performansının artırılması ele alınmıştır. Çalışmada büyük ölçekteki boya pişirme fırınının içerisindeki sıcaklık ve akış hızı dağılımını incelemek için HAD sayısal çalışması gerçekleştirilmiştir. HAD sayısal çalışması gerçek deneylerle elde edilen sıcaklık verileriyle doğrulanmıştır. Doğrulama için toplam 14 noktada sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Bu noktalardaki hata oranları %1,9-2,4 arasında değişmektedir. Fırın içerisindeki ortalama sıcaklık yapılan çalışmalarla 1,3 °C ve 1,9 °C artırılmıştır (Niamsuwan ve diğ., 2015).

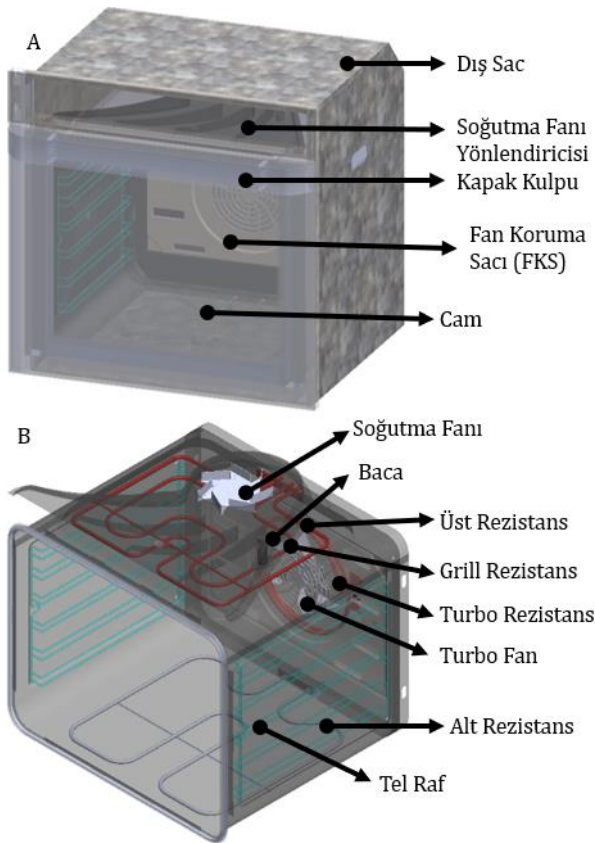
Fırınlarda çalışma prensibi taşınım, zorlanmış ve ısınlama ısı transferi yaparak içerdeki havayı ya sirkülasyon ile ya da doğrudan ısıtarak gerçekleştirmeye dayanır (Stinger, Scheerlinck, Nicolai ve Impe, 2001). Zorlanmış taşınım ısıtılan fırınlarda kullanılan soğutma fan sayısı, fanlar arası mesafe ve fanların yüzeye olan mesafeleri akışın fırın içindeki dağılımını etkilemektedir. HAD - Deney sonuçları benzer bir trend gösterirken motor çevresinde ölçüm belirsizliği daha fazlayken %25,58 ölçüm farkı oluşmaktadır (Şahin, 2023). Ürün pişirme süreçleri için kullanılan elektrikli bir fırında sıcaklık dağılımını tespit ederek fırının pişirmeye olan etkisini arttırmaya yönelik SWFS HAD sayısal çalışması kullanılan çalışmada ısı transferi katsayısı, sıcaklık ve basınç değerleri elde edilmiştir. HAD - Deney arasındaki sıcaklık farkının maksimum %7,6 olduğu belirlenmiştir (Constantin, Munteanu, Voicu, Paraschiv ve Ştefan, 2023). Pişirme performansı değerlendirmek için elektrikli fırında ekmek modellemesi yapılabilirken pişirme sürecini değerlendirmek için farklı güçlerde HAD sayısal çalışmasında k- ϵ RANS türbülans modeli kullanılarak çıkan ürün kalitesi iyileştirilmiştir (Khatibi, Zamani ve Mirzababaei, 2023).

Bu çalışma kapsamında mevcut bir fırının enerji verimlilik değerinin iyileştirilmesi üzerine hem deneysel hem de HAD sayısal çalışması yapılmıştır. Fırın koruyan FKS sacında bulunan havalandırma delikleri üzerinde parametrik çalışma ile yeni FKS tasarımının belirlenmesi ve ısıyı fırın içinde tutmaya yarayan cam yünü yalıtımın değiştirilmesi üzerine iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Fırın içi hava sıcaklığı ve komponentlerin sıcaklık değerleri ile doğrulan HAD sayısal çalışması deney sonuçları ile karşılaştırmaları paylaşılarak enerji tüketiminden 131 Wh kazanç tespit edilmiştir.

3. Yöntem

3.1. Standart Performans Deneyi Prosedürü

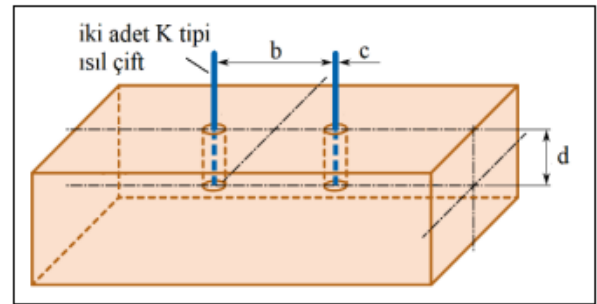
İç hacmi 72 L olan deney çalışmasında kullanılan fırın Şekil 1’de gösterilen dış sac, soğutma fanı yönlendiricisi, kapak kulpu, fan koruma sacı (FKS), cam, soğutma fanı, turbo fan, üst-alt-turbo-grill rezistans, tel raf ve baca gibi parçalardan oluşmaktadır. Çalışma kapsamında iyileştirme parametresi olarak kullanılan parçalardan olan FKS, fırın içinde bulunan turbo fanın korunması sağlarken sac yüzeyinde bulunan delikler (boşluklar) sayesinde fırın içindeki havanın dağılımında rol oynamaktadır. Fırın içi hava sirkülasyonu ile fırın performansı değişirken yemeklerin homojen pişmesine ve enerji verimliliği gibi fırın tasarımı için kritik olan konulara direkt etki etmektedir. Fırında kullanılan baca, iç ortamda oluşan buharın tahliye edilmesini sağlayan bir açıklıktır. Baca, fırın içindeki hava dolaşımını düzenler ve pişirme süreci sırasında meydana gelen buharın etkin bir şekilde dışarıya atılmasını temin eder.



Şekil 1. A) Fırın Dış Parçalar B) Fırın İç Parçalar

Çalışmada kullanılan mevcut fırının performans testleri EN60350-1 (EN 60350-1, 2013) standardında belirtilen performans testine göre Şekil 2’de detayları gösterilen 1 adet hipor tuğla ile gerçekleştirilmiştir. Hipor tuğlanın boyutları 230 x 114 x 64 mm’dir. 32 mm derinliğinde, 50

mm uzaklığında, iki adet 1mm çapında termokupl yuvası bulunmaktadır ve ilgili ölçüler sırasıyla d, b, c ile gösterilmiştir. Fırının merkezinde bulunan tuğlanın yuvalarına montajlanan termokupl ile tuğla içindeki sıcaklık değerleri ölçülmüştür. Enerji verimlilik hesaplamaları için gerekli olan bir diğer veri ise hipor tuğlanın fırına girmeden önceki yaş ağırlığı ve fırından çıktıktan sonraki kuru ağırlığıdır. Hipor tuğla standarda göre iç sıcaklığının 5 ± 2 °C olması gerekirken 1050 ± 50 gram suyu emmesi gerektiğinden dolayı soğutucu dolaplarda su dolu kaplarda tutulmuştur. Soğutucudan çıktıktan sonrasında 1 dakika süre zarfında üstünde bulunan suyun akması beklenir ve süre sonunda fırın içine alınarak deney süreci aktif hale getirilmiştir.



Şekil 2. Deneylerde Kullanılan Hipor Tuğla Gösterimi (Altun ve diğ., 2018)

Standartta belirtilen koşullara göre deney ortam sıcaklığı ve fırının 23 ± 2 °C olması gerekmektedir. Fırın iç sıcaklığı, fırın merkezine yerleştirilen bir termokupl ile merkez sıcaklığı ölçülerek fırın set sıcaklığının ortam sıcaklığına göre Tablo 2’de belirtilen sıcaklık limitleri içinde olduğu teyit edilmiştir. Bu artışların sonunda fırın merkez sıcaklığının, merkezde kullanılan termokupl aracılığı ile eş zamanlı sıcaklık değerleri alınarak istenen sıcaklık artışının sağlanması kontrol edilmiştir.

Deney, hipor tuğlanın 32 mm derinlikli yuvalarda bulunan termokupllarda okunan sıcaklık değerlerinin başlangıç sıcaklık değerine göre 55 °C artış olduğunda sonlandırılmıştır. Bu süre zarfında elde edilen enerji tüketimi hesaplanır. Enerji tüketimi bir sayaç yardımıyla ölçülürken deney öncesi ve sonrasında oluşan enerji farkına bakılarak elde edilmektedir. Hipor tuğlanın yaş ve kuru ağırlıkları, enerji tüketimi gibi değerler yardımıyla EN60350-1 standardında bulunan hesaplama tekniği ile enerji sınıfı belirlenir.

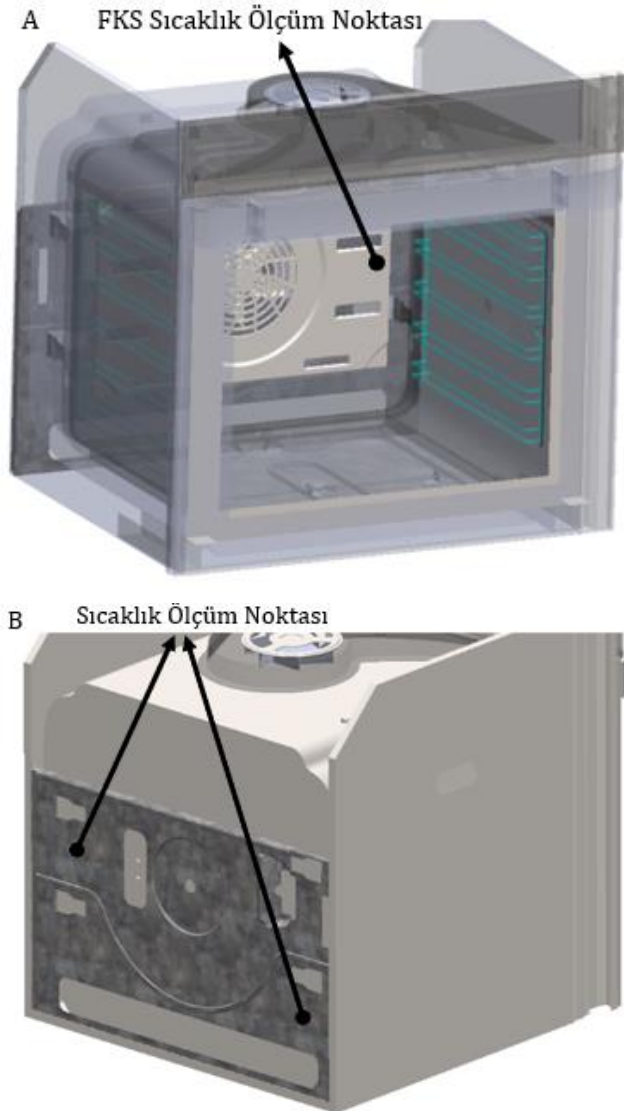
Tablo 2. EN 60350-1 Standardına Göre Test Sıcaklıkları

Sıcaklık Artışı	Isıtma Fonksiyonları		
	Konvansiyonel	Zorlanmış Taşınım	Kızgın Buhar
ΔT_1^i	$140 \pm 10^\circ\text{K}$	$135 \pm 10^\circ\text{K}$	$135 \pm 10^\circ\text{K}$
ΔT_2^i	$180 \pm 10^\circ\text{K}$	$155 \pm 10^\circ\text{K}$	$155 \pm 10^\circ\text{K}$
ΔT_3^i	$220 \pm 10^\circ\text{K}$	$175 \pm 10^\circ\text{K}$	$175 \pm 10^\circ\text{K}$

3.2. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği Simülasyonu

3.2.1. Geometri

Mevcut fırının HAD sayısal çalışmaları gerçekleştirilerek ısı kaçakların tespit edilmesi, kavite içerisindeki ısı dağılımının incelenmesi, performans iyileştirmesi yapılabilecek komponentlerin belirlenmesi ve baca açıklığındaki akış hızının hesaplanması amaçlanmıştır. HAD sayısal çalışmaları SWFS ticari yazılımında yapılmış olup doğrulanabilmesi için mevcut fırın üzerinde çeşitli enerji verimlilik testleri ve sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te toplamda 3 adet sıcaklık ölçüm noktası gösterilmiştir. Ön kapak camı dahil olmak üzere toplam 170 noktada sıcaklık ölçümü yapılmış ve ortalama sonuçlar alınmıştır.



Şekil 3. Fırın Sıcaklık Ölçüm Noktaları A) FKS B) Arka Sac

Şekil 4'te fırınlarda kullanılan mekanik termostatların sıcaklığı ölçen kısmı olan bulb (fırın termostatu) gösterilmiştir. Fırın aç-kapa mekanik termostatla kontrol edilmektedir. Bulb bulunduğu konum itibarıyla fırın merkezindeki sıcaklık ile aynı sıcaklığa sahip bir

bölgede konumlandırılmalıdır. HAD sayısal çalışmalarında bu bölgedeki sıcaklık kritiktir.



Şekil 4. Bulb

Sıcaklıkların tümü "K" tipi ısı çiftler kullanılarak bir veri toplayıcı üzerinden alınmıştır. Fırın bir mutfak dolabının içine yerleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Sınır Şartları

RANS türbülans modeli endüstriyel HAD sayısal çalışmalarında sıkça kullanılan bir modelleme yaklaşımıdır (Fahey ve Karagöz, 2007). RANS yaklaşımı çok çeşitli problemler üzerinde yıllarca doğrulanmıştır. RANS, endüstriyel problemlerin çözümü için kullanılan en pratik yaklaşım olarak kabul görmektedir. Tutarlılık ve gerekli hesaplama gücü arasında ideal bir denge yakalamaktadır. Çeşitli türbülans modelleme seçeneklerine rağmen, k-ε modeli kullanılan en yaygın ve doğrulanmış iki denklemlidir. Endüstriyel akışlar için (bir fırın içindeki akış gibi), k ve ε'nun dağılımı önceden bilinmez ve genellikle giriş hızı ve bir uzunluk ölçeği arasında türbülans üretimi bağlantılarından yaklaşık olarak hesaplanır. RANS denklemleri ortalama alınmış süreklilik ve momentum denklemlerini içerir ve akışkanlar için denklem (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmaktadır. Burada belirtilen u_i hız bileşenlerini, $(\rho u_i' u_j')$ ise türbülans gerilmelerini, ρ akışkanın yoğunluğunu göstermektedir.

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

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

Momentum denkleminde ortaya çıkan türbülans gerilmelerinin hesabı için türbülans modelleri kullanılır. Türbülans kinetik enerjisi (k) ve dissipasyon oranı (ε) için yazılan iki transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir. Kaldırma kuvvetleri etkisi ihmal edildiğinde, bu transport denklemleri k ve ε için sırası ile denklem (3) ve (4)'te belirtilmektedir. Denklemlerde belirtilen R kayma oranları akım çizgisi eğriliklerini açısından hesaplanmaktayken kayma oranının (μ) kuvvetli olduğu

bölgelerde ε değeri artmaktadır. Bu denklemlerde yer alan G_k ortalama hız gradyanlarından kaynaklanan türbülans kinetik enerji üretimini temsil etmektedir ve denklem (7)'de akışkanın türbülans viskozitesine (μ) ve farklı yönlerdeki hız değişimine (u) bağlı denklemlerle ifade edilmiştir. Türbülans viskozitesi denklem (7)'de belirtildiği üzere SWFS, HAD çalışmasında kullanılan $k - \varepsilon$ türbülans modelinde bulunan türbülans kinetik enerjisini (k) ve dissipasyon oranı (ε) içermektedir. C_μ ise sabit bir katsayıdır (Modelling Turbulence, 2006).

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} - R \quad (4)$$

$$R = \frac{C_\mu \rho \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \varepsilon^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

Diğer ampirik sabitleri; $C_1 = 1,44$, $C_2 = 1,92$, $C_\mu = 0,09$, k ve ε için tanımlanan türbülans prandtl sayıları $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$ tür (Kaya ve Karagöz, 2007).

SWFS HAD çalışmasında RANS türbülans modeli yaklaşımı için standart $k-\varepsilon$ alternatifi olarak Lam-Bremhorst tarafından düzenlenmiş $k-\varepsilon$ modeli kullanılmaktadır. Bu model standart $k-\varepsilon$ modeline göre duvar fonksiyonlarını daha tutarlı hesaplamak için eddy viskozitesi ve dissipasyon oranı formülünde çeşitli katsayılar içermektedir. Lam-Bremhorst $k-\varepsilon$ türbülans modeli için dissipasyon oranı ve eddy viskozitesi denklem (8) ve (9)'da belirtilmiştir (Lam ve Bremhorst, 1981). Burada belirtilen f_μ , f_1 ve f_2 katsayıları denklem (10)-(12) arasında aktarılmıştır. Bu katsayıların 1'e eşit olması durumunda denklem standart $k-\varepsilon$ modeli haline gelmektedir.

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\frac{\nu_1}{\sigma_\varepsilon} + \nu_1 \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 f_1 \nu_1 \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_2 f_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

$$\nu_1 = \frac{C_\mu f_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (9)$$

$$f_\mu = (1 - e^{-A} \mu^{R_k})^2 \left(1 + \frac{A_t}{R_t} \right) \quad (10)$$

$$f_1 = (1 + (A_{C1}/f_\mu))^3 \quad (11)$$

$$f_2 = 1 - e^{-R_t^2} \quad (12)$$

A_t , A_{C1} , C_1 , C_2 , türbülans model sabitleridir ve R_k , R_t türbülans Reynolds sayılarını ifade eder. Burada C_1 , C_2 sabitleri daha önce verilmiş olup A_t , A_{C1} sabitleri ise deneme yanılma yoluyla bulunmaktadır. Ancak ampirik olarak bu değerler $A_t=20,5$ ve $A_{C1}=0,05$ olarak belirlenmiştir (Lam ve Bremhorst, 1981).

$$R_t = \frac{k^2}{\nu_1 \varepsilon} \quad (13)$$

$$R_k = \frac{k^{1/2}}{\nu_1} \quad (14)$$

HAD sayısal çalışmasında incelenen bir diğer konu ise fırının ısı akısıdır. Isı akısı birim alana etkiyen ısı enerjisinin birim zamandaki miktarını ifade etmektedir. Fırınlarda ısı kaçaklarını indirmek için kullanılan cam yününden ve camdan kaçan ısı miktarına göre fırın içindeki minimum-maksimum sıcaklık değerleri değişmektedir. Bu durum enerji verimlilik, fırın içi sıcaklık, merkez sıcaklık ve pişirme performanslarını etkilemektedir. Isı akısı denklem (15)'te belirtildiği üzere sıcaklığa (T), ısıyın geçtiği yüzeyin uzunluğuna (x) ve ısı iletim katsayısına (k) bağlıdır.

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (15)$$

Çalışmada iletim, taşınım ve ısıyınım ısı transferleri bulunurken farklı malzemeler içeren fırın HAD sayısal çalışmasında katı cisimler arasındaki ısı iletim denklem (16)'te ifade edilmiştir. Burada Q_H birim hacim başına özısı yayımı, λ_i ısıl iletkenlik tensörü özdeğerleridir. "e" özgül iç enerjidir ve denklem (17)'de verilmiştir. Burada kullanılan c öz ısı ve T sıcaklık olarak ele alınmaktadır. ısıyınım ısı transferi ise HAD sayısal çalışmasında ayrık ordinatlar (DO) modelini kullanır. Bu model denklem (18)'de belirtilmiştir. Burada "s" ısıyınımın yönünü gösteren birim vektördür (Modest, 2013).

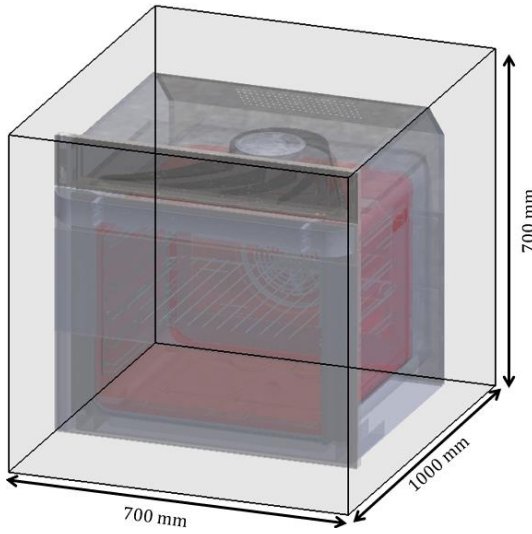
$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H \quad (16)$$

$$e = c \cdot T \quad (17)$$

$$\frac{dI(s,r)}{ds} = -(K + \sigma_s) I(\vec{s}, \vec{r}) + Kn^2 I_b(\vec{r}) + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_{\Omega=4\pi} \Phi(\vec{s}', \vec{s}) I(\vec{s}', \vec{r}) d\Omega' \quad (18)$$

Mevcut fırın modeli, tahmini akış ve ısınma karakteristiği göz önüne alınarak HAD sayısal çalışması için düzenlenmiştir. Bu düzenleme ile sivri köşeler iç içe geçen parçalar, vida ve vida delikleri gibi tekillik problemleri oluşturması muhtemel yüzey ve komponentlerin ortadan kaldırılmasıyla hesaplama süresinin azaltılması hedeflenmiştir. Yapılan düzenlemeler sonrası gereksiz komponentler ve geometriler kaldırılmıştır. İğnelenmiş cam yünü gibi katlanabilen malzemeler modellenirken fırının kapatılan yüzey alanı esas alınmıştır. Kazan içerisinde, rezistanslarda, fan kanat yapılarında, ısıl yükü yüksek saclarda değişiklik yapılmamıştır. Isıtıcı rezistansların ve fanların HAD sayısal çalışmasında gerçek modeli tanımlanmıştır. Isı transferinin yüksek olduğu ve montajı sebebiyle ısı akısı yüksek olan parçalarda herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Hazırlanan fırın modelinin sınır şartları deney ortamında alınan verilere

göre hazırlanmıştır. Çalışmada hem iç akışın hem de dış akışın simüle edilebilmesi için Şekil 5'te boyutları gösterilen dış ortam hazırlanmıştır.



Şekil 5. HAD Modeli Dış Akış Hacı Boyutları

Fırın üzerinde bulunan rezistansların güçleri güç ölçüm cihazı ve fanların devirleri takometre ile ölçülerek HAD sayısal çalışmada tanımlanmıştır. Deneylerde kullanılan rezistansların bütün yüzeyleri ısınmadığı için HAD sayısal çalışmada da bu durum dikkate alınmıştır. Böylelikle rezistanslara Tablo 3'te belirtilen "yüzey güç" sınır şartı tanımlı yapılırken sıcaklığın rezistans üzerinde olduğu ilgili yüzeyler seçilmiştir. Turbo fan ve soğutma fanının RPM değerleri Tablo 4'te aktarılmıştır. Rotasyon sınır şartı soğutma fanı için 126 mm çapında 19 mm kalınlığında ve turbo fanı için 154 mm çapında 22 mm kalınlığında oluşturulan silindir kontrol hacmi ile sağlanmıştır. Bu değerler fanları içine alacak minimum değerlerdir.

Tablo 3. Rezistans Güçleri

Rezistans	Güç (W)
Üst Rezistans	980
Grill Rezistans	1200
Alt Rezistans	1100
Turbo Rezistans	2100

Tablo 4. Fan Devirleri

Fan	Devir (devir/dakika)
Turbo Fan	960
Soğutma Fanı	1160

Fırın rezistansları HAD sayısal çalışmada 200 °C'ye ulaşana kadar aktiftir. 200 °C'yi geçtikten sonra kapanırken 200 °C'nin altına düştüğünde tekrardan aktifleşmektedir. Çalışma kapsamında set sıcaklığının 200 °C seçilmesinin sebebi EN60350-1 standardında merkez sıcaklık gibi birçok testin bu sıcaklık değerinde yapılmasıdır. Fırın rezistansları deneyde set sıcaklığına göre açılıp kapanırken, zamandan bağımsız HAD sayısal

çalışmasında PSEUDO zamanına göre rezistansları sıcaklığa bağlı olarak açıp kapatarak gerçek şartlarda fırının yapmış olduğu sıcaklık salınımlarını simüle edilmiştir. Fırın rezistansları set sıcaklığı kadar aç-kapa yapması durumu fırın içinde merkez sıcaklık değerini ve fırındaki komponentlerin sıcaklıklarının belirli bir aralıkta salınım yapmasına sebep olmaktadır. Bu durumda nihai deney sıcaklık sonuçları fırının 1 saat çalıştırılması ile tespit edilmiştir. 1 saat deney süresi EN60350-1 standardından alınarak elde edilmiştir.

İletim, taşınım ve ışıyım ısı transferinin aktif olduğu fırında kullanılan komponentlerin malzeme özellikleri Tablo 5'deki gösterildiği gibi tanımlanmıştır. Değerler literatürde bulunan farklı çalışmalardan ve kullanılan ürünlerin kataloglarından sağlanmıştır.

Tablo 5. Malzeme Özellikleri

Kullanılan Komponent	Malzeme	Isı İletkenlik ($\frac{W}{m.K}$)
Camlar	Temperli Cam	1 (Schott, 2004)
Yalıtım	İğnelenmiş Cam Yünü	0,043 (Çengel ve Ghajar)
Arka Yalıtım Plakası	Su Bazlı Akrilik Boya	0,023 (isollat, n.d.) (Yamalı, 2019)
Silikon Yapıştırıcı	Silikon	0,68 (Shanks, Maycock, Dides ve Danielson, 1963)
Tüm Metal Komponentler	Çelik	60 (Material data sheet thermally broken steel USA, 1997)
Kapak Üst Çıtası ve Kapak Profil	PA66	0,233 (Material: Polyamide 66, n.d.)
Kapakları	PA66GF30	0,30 (Material: Polyamide 66 GF 30, n.d.)
Soğutma Fanı	Alüminyum	237 (Çengel ve Ghajar)
Yönlendirici Kanat	Paslanmaz Çelik	15,1 (Material data sheet thermally broken steel USA, 1997)
Kapak Kulpu	Çelik	0,2 (Guerin, Morin, Chaussy ve Auriault, 2001)
Rezistans Dış Kılıfları	Serigrafi Boyası	

Fırın içinde bulunan sıcaklığı korumak ve enerji verimliliğini korumak/arttırmak için fırın iç yüzeyindeki sıcaklığa maruz kalan saclar emaye ile kaplanmaktadır. Ayrıca fırın camları da düşük emisitive içeren noktalı bir yapıya sahiptir. Bu komponentlerin ışıyım özellikleri Tablo 6'de ifade edildiği gibi ışıyım ısı transferi içeren komponentlerin için emisivite katsayıları tanımlanmıştır. Ayrıca emaye veya galvaniz (çinko) kaplama olan parçalar için de HAD sayısal çalışması yazılımında bulunan "İşinimsal Yüzey" özelliği kullanılmıştır. Bu özellik sayesinde parçaların üzerine fazladan katı veya cidar modellemesi yapmaya gerek kalmadan emisivite katsayısı seçilen yüzeylere tanımlanabilmektedir. Fırındaki ısı etkilerinin içerisinde ışıyım önemli bir yer tutmaktadır. Özellikle üst rezistans ve kavite içerisindeki emaye kaplama ışıyım etkisiyle sıcaklığı ve ısı akısı değişecek komponentlerdir. Bu sebeple ışıyım aktif hale getirilmiştir.

Tablo 6. Işınım Yüzeyleri ve Emisivite Katsayıları

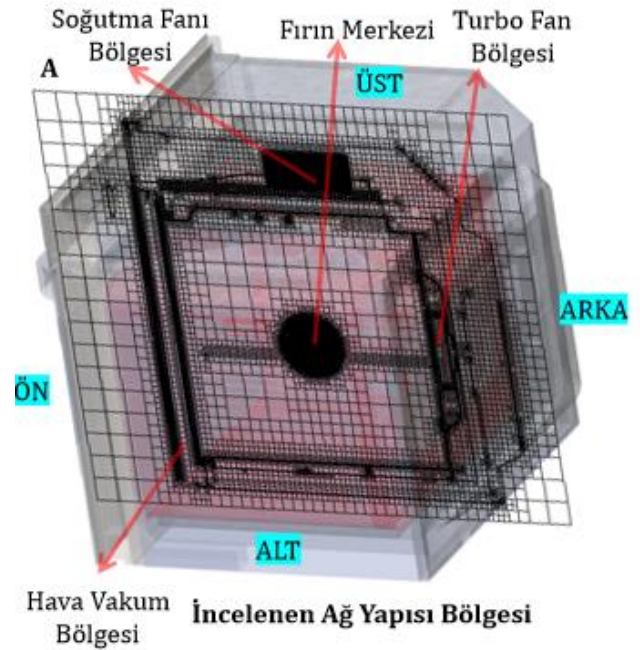
Işınımsal Yüzey	Emisivite Katsayısı
Kavite Emaye Kaplaması	0,90 (Kokolj, Skerget ve Ravnik, 2017)
İç Cam Low-e Kaplama	0,02 (Schott, 2004)
Dış Cam	0,90 (Kokolj, Skerget ve Ravnik, 2017)

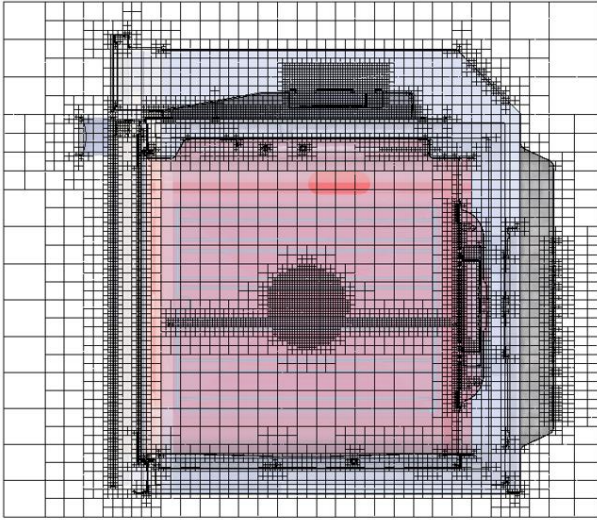
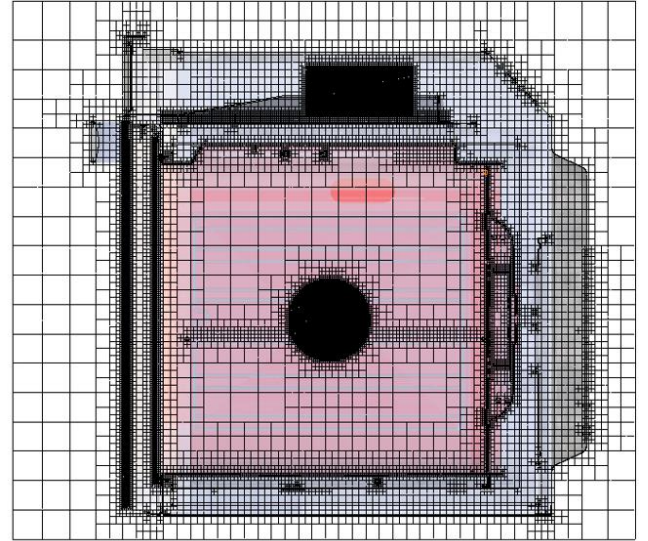
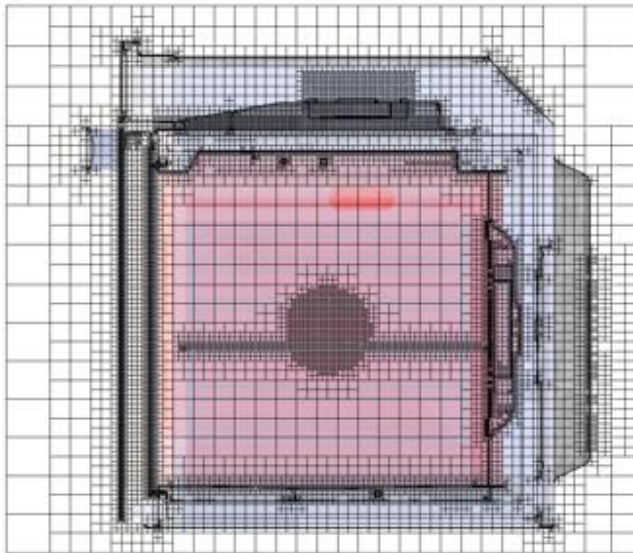
HAD sayısal çalışmasında, fırın dış akış kontrol hacmi fırının boyutlarından daha fazla tanımlanarak (Şekil 5) fırına dış ortamında gelen hava koşulları yansıtılmıştır. Bu koşullar deneylerin gerçekleştiği açık hava basıncı ($P_s = 101235$ Pa), ortam sıcaklığı ($T_o = 22$ °C) ve hız değerleri 0 m/s olarak tanımlanmış böylelikle fırının dış yüzeylerinden gelen taşınım ısı transferi için zemin hazırlanmıştır. İç ortam sıcaklığı fırının çalışmasından dolayı ± 1 °C değişmektedir. HAD sayısal çalışmasında bu değer ihmal edilip sabit 22 °C sıcaklık tanımlanmıştır. Yer çekimi 9,81 m/s² olarak tanımlanmıştır. Çalışma kapsamında vida delikleri ve vida gibi ısı transferine ve havanın akış çizgilerini çalışmaya olan etkisi yok denecek kadar az olduğu için ihmal edilmiş ve ağ yapısının kalitesini bozacak veya eleman sayısını arttıracak etmenler ihmal edilmiştir.

3.2.3 Ağ Yapısı ve Ağdan Bağımsızlık Çalışması

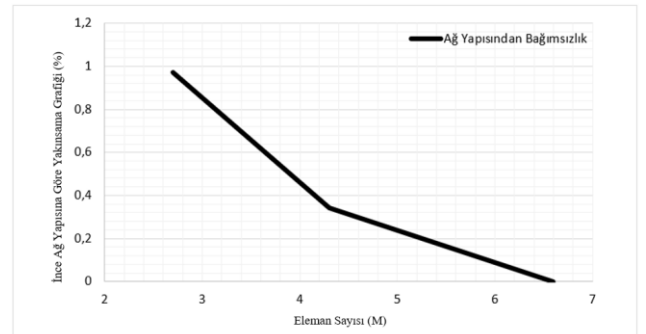
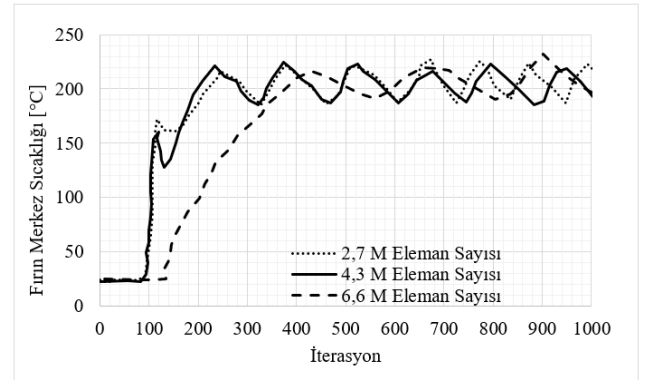
HAD sayısal çalışmasında bir ağ yapısı stratejisi belirlenmesi gerekmektedir. Bu noktada akışın kritik olduğu noktalar, duvarlar, ısı kaynakları ve ölçüm noktaları için bazı ağ yapısı denetimleri uygulanmıştır. Bu noktalara daha ince bir ağ yapısı uygulanarak sonuçların daha tutarlı olması ve analizin yakınsaması amaçlanmıştır. Ağ yapısında bulunan eleman sayısı bu yapılan iyileştirmelerin kuvvetine göre değişmektedir. Ağ yapısında bulunan elemanların sayısı ile hesaplama süresi birbirine paraleldir. Ayrıca bilgisayardaki işlemci çekirdek sayısı (10) ve RAM (128 GB) miktarına bağlı olarak hesaplamaların yapılabilmesi için ağ yapısı eleman sayısının optimize edilmesi gerekmektedir. Optimum dengenin bulunduğu noktada model üzerinde çalışmalara devam edilmektedir. Bu çalışmalara ağ yapısından bağımsızlık (mesh independency study) adı verilmektedir. Modelde farklı ağ yapısı eleman sayıları ile yakınsama grafikleri ve hedef değerler kontrol edilir. Ağ yapısı eleman sayısı düşükten yükseğe doğru giderek denemeler yapılır. Bu denemelerin sonunda eleman sayısının artmasına rağmen bulunan değer veya yakınsama grafiklerinin değişmediği noktada ağ yapısından bağımsızlık çalışması tamamlanır. Ağ yapısından bağımsızlık çalışmasının sonucunda analiz sonuçlarının değişmediği en düşük eleman sayısına sahip ağ yapısı işlem gücü açısından en verimli çözüm olmaktadır. Bu ağ yapısı ile HAD sayısal çalışmasına devam edilmektedir (Lu, Rane ve Kovacevic, 2022). SWFS ağ yapısını üç boyutlu dikdörtgen hücreler şeklinde oluştururken buna sonlu hacim (FV) yöntemi denilmektedir. Akışkanın bulunduğu dikdörtgen

hücrelerde Navier-Stokes (NS) denklemleri çözülmektedir. SWFS sınır katmanları için özgün bir yaklaşım sergilemekte ve duvardaki hız profillerini oluşturmak ve hesaplayabilmek için Prandtl sınır tabaka yaklaşımını kullanır. Sınır tabakası çözümünü kitlesel akış ile birleştirmek için iki yöntemden oluşan İki Ölçekli Duvar Fonksiyonu (2SWF) kullanılır (Kırmızıgöl ve Uçar, 2024). Bunlardan iki akış ve termal profillerin oluşumu için eleman sayısı yeterli değilse ince sınır tabaka işleminin uygulanması ikincisi ise sınır tabaka profillerinin çözümü için katman boyunca kullanılan ağ yapısı gerekenden fazla ise kalın bir sınır katmanı yaklaşımı uygulanmasıdır (Sobachkin ve Dumnov). Bu çalışma kapsamında kaba (2.7 M), seçilen (4.3 M) ve iyi (6.6 M) olmak üzere 3 farklı ağ yapı incelenmiştir. Şekil 66A'da fırın kesiti üzerinde incelenen ağ yapısının bölgelerine yer verilmiştir. Buna göre fırının kritik bölgeleri olan hava vakum bölgesinde, soğutma fanı bölgesi, turbo fan bölgesi, fırın merkezinde ağ yapısı inceltirilerek ele alınmıştır. Hava vakum bölgesi cam üzerinde oluşan sıcaklığı belirlerken, fan bölgeleri içeride oluşan hava dağılımı etkiler ve merkez sıcaklığın değişmesine neden olur. 2,7 M – 4,3 M ve 6,6 M eleman sayılı ağ yapıları ve ilgili bölgelerde oluşan değişimler Şekil 6B-D arasında verilmiştir. Bu ağ yapılarından elde edilen sonuçlar Şekil 7'de paylaşılmıştır.



B**2,7 M Eleman Sayısı****D****6,6 M Eleman Sayısı****C****4,3 M Eleman Sayısı**

Şekil 6. A) İncelenen Ağ Yapısı Bölgeleri B) 2,7 M Eleman Sayılı Kaba Ağ Yapısı C) 4,3 M Eleman Sayılı Seçilen (Orta) Ağ Yapısı D) 6,6 M Eleman Sayılı İnce Ağ Yapısı



Şekil 7. Ağ Yapısı Eleman Sayısına Göre Fırın Merkez Sıcaklık Salınımı (Üst), İnce Ağ Yapısına Göre Yakınsama Grafiği (5) (Alt)

Şekil 7'de verilen sonuçlara göre fırın merkez sıcaklık değerlerinin ağ yapısından bağımsızlık çalışmasından elde edilen merkez sıcaklık sonuçları karşılaştırılmıştır.

Ankastre fırınların sıcaklık kontrolü, termal dengeyi sağlamak amacıyla belirli bir set sıcaklığını koruyarak kesikli ısınma süreçlerine dayanır. Fırın içindeki sıcaklık, sürekli bir şekilde ısıtılmak yerine, belirli bir hedef sıcaklık ayarlandığında, elektrikli rezistanslar belirli bir süre boyunca devreye girer ve fırın ortamını ısıtarak hedef sıcaklığa ulaşmayı sağlar. Bu süreç, termokupl adı verilen sıcaklık sensörleri aracılığıyla izlenir ve hedef sıcaklık ayarına ulaşıldığında rezistanslar otomatik olarak kapanır. Ancak, rezistansların kapanmasının ardından fırın içindeki hava ve malzeme, ısı kaybı ile soğuma eğilimindedir. Bu noktada termokupl, iç ortam sıcaklığını algılar ve sıcaklık hedef değerinin altına düştüğünde rezistanslar yeniden devreye girer. Böylece, ısıtıcılar tekrar aktif hale gelir ve ortamın ısısı yeniden yükseltilir. Ancak bu ısınma sırasında, termokupl hâlâ soğuma eğilimindedir, çünkü sensörün algıladığı sıcaklık, rezistanslardan gelen doğrudan ısıdan önce çevresel ısı dengeye ulaşmamaktadır. Bu döngüsel ısınma ve soğuma süreci, iç ortamda sürekli bir termal dalgalanma yaratır. Bu dalgalanmalar, fırın içindeki sıcaklık profilini zamanla stabilize etmeye çalışırken, HAD sayısal çalışmalarında da benzer şekilde modellenir. Termokuplun yanıtı, ısınan rezistanslardan gelen doğrudan ısı ve fırın içindeki hava akışının etkileşimiyle belirlenir. Bu nedenle, modelleme sürecinde sıcaklık dağılımı, hava akışkanlarının davranışı, ısıtıcı elemanlarının yerleşimi ve çevresel koşullar dikkate alınarak zamanla değişen bir termal denge simüle edilir.

Bu tür sayısal çalışmalar, fırın içindeki ısı dağılımı, sıcaklık dalgalanmalarını ve enerji tüketimini daha doğru bir şekilde tahmin etmek için kritik öneme sahiptir. Böylelikle, fırın tasarımı ve sıcaklık kontrol stratejileri, daha verimli ve güvenilir bir çalışma sağlamak için optimize edilebilir.

Deneyel çalışmada ankastre fırın çalışma prensibinden dolayı fırın termokupl sıcaklığı ayarlanan 200 °C set değerine geldiğinde rezistanslar kapanmaktadır. Rezistansların kapanmasına rağmen merkez sıcaklık bir süre daha artarak 200 °C'nin üstüne çıkmaktadır. Aynı şekilde fırın termokupl sıcaklığı 200 °C'nin altına indiğinde fırın rezistansları tekrar aktif olmaktadır. Rezistanslar ısınana kadar geçen sürede merkez sıcaklığı düşmeye devam etmekte ve Şekil 7'de gösterildiği gibi salınım oluşmaktadır. HAD sayısal çalışmasında rezistanslar, deney sürecindeki gibi 200 °C'de aç-kapa sistemi oluşturulmuştur. Şekil 7'de belirsizlik çalışmasında gösterildiği üzere, HAD sayısal çalışmaları 2,7 M-4,3 M-6,6 M eleman sayısı olmak üzere 3 farklı ağ yapısında incelenmiştir. 4,3 M eleman sayısının sonuçları, 6,6 M eleman sayısı sonuçlarına göre %0,4 olarak tespit edilmiştir. Bu koşullar daha fazla ince ağ yapısı denemeye gerek olmaksızın çalışma aşamasında hem bilgisayar gücünü korumak hem de çalışma süresini uzatmamak için 4,3 M eleman sayısı seçilmiştir.

Tablo 7'de gösterilen elde edilen HAD sayısal sonuçlarına göre merkez sıcaklık salınımı 2,7 M eleman sayısı için 203,6 °C 4,3 M eleman sayısı için 206,3 °C ve 6,6 M eleman sayısı için 205,6 °C olarak tespit edilmiştir. Ortalama sıcaklık değerleri sonuçların yakınsağı 400-1000 iterasyonlar arasındaki değerler baz alınarak hesaplanmıştır. Sonuçların ağ yapısından bağımsızlığını değerlendiren çalışma, en ince ağ yapısına ilişkin yakınsama grafiği Şekil 7'de sunulmuştur. 4,3 milyon elemanlı ağ yapısı, bilgisayar gücü ve sayısal çözüm süresi açısından sağladığı verimlilik nedeniyle tercih edilmiştir. Bu ağ yapısının merkez sıcaklık sonuçları ile deneyel veriler arasındaki ortalama fark %1,02 olduğu için bu ağ yapısı seçilmiştir.

Tablo 7. Ağ Yapısına Bağlı Olarak Sıcaklık Değişimi

Ağ Yapısı Eleman Sayısı (Milyon Eleman)	Fırın Merkez Ortalama Sıcaklığı (°C) (İter 400-1000)
2,7	203,6
4,3	206,3
6,6	205,6

Deney ve HAD sayısal sonuçları fırın üzerinden alınan farklı bölgelerde sıcaklık karşılaştırması yapılmış ve Tablo 8'de paylaşılmıştır. Buna göre en fazla hata oranları soğutma fanı etrafında oluşmuştur. Soğutma fanı etrafında oluşan hata oranı, fanın yapısının modellenmesinde oluşan geometrik farklılıklarından gelmektedir. Ayrıca denklem (19)'da belirtilen belirsizlik analizinden gelen %2,4 hata oranı termokupl, takometre ve güç ölçüm cihazından kaynaklanmaktadır. Fırın içindeki sıcaklık değerleri belirsizlik analizi limitleri içinde olup, fırın içinde emaye duvarlardan kaynaklanan ışıyım ısı transferi tahmini daha zor olmaktadır.

Tablo 8. Deneyde Alınan Sıcaklıklar ile HAD Sayısal Çalışması Sıcaklıklarının Karşılaştırılması

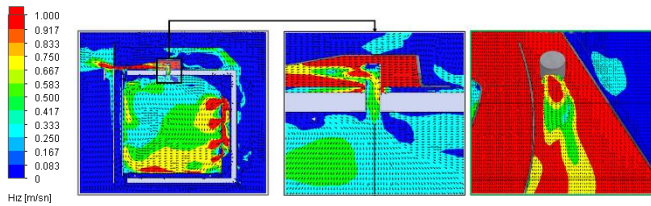
Bölge	HAD	Deney	Hata Oranı (%)
Soğutma Fanı Sensörü (Maksimum)	75,17	80,1	6,15
Fırın Merkez Sıcaklığı (Ortalama)	206,3	204,2	1,02
FKS Sağ Üst (Ortalama)	200,61	200	0,31
Kazan içi sağ duvar (Ortalama)	202,45	197,39	2,56
Kazan içi sol duvar (Ortalama)	198,87	199,26	0,20
Bulp (Ortalama)	212,43	198,9	6,80
Soğutma Sacı Sol (Ortalama)	61,97	67,77	8,56
Soğutma Sacı İç (Maksimum)	72,87	67,5	7,96

Tablo 9'da ise Avrupa Birliği güvenlik standartlarına göre fırın camının belli noktalarından alınmış sıcaklık verileri bulunmaktadır. Bu bölgeler camın üzerinde

belirlenmiş alanın karelere bölünmesiyle oluşmaktadır. Deneyde alınan sıcaklıklar ve HAD sayısal çalışması sonucundaki sıcaklıklara göre 3 bölgenin ortalama sıcaklığı dışındaki tüm bölgelerde %9 hata oranının altında kalmıştır. İlgili 3 bölge sırasıyla camın sol üst (1. Kutu), sağ üst (6. Kutu) ve sol orta (7. Kutu)'dır. Bu bölgeler cam üzerinde yer alan emaye yüzeyler olduğu için bu noktalarda HAD sayısal çalışmanın tahmin kabiliyeti kötü olmakla birlikte diğer noktalarda iyi tahmin edebilmesi çalışmanın iyileştirme yapılabilmesi için yeterli olarak görülmüştür.

Tablo 9. Fırın Camı Deney ve HAD Analizi Sıcaklık Değerleri ve Hata Oranları

1. Kutu	2. Kutu	3. Kutu	4. Kutu	5. Kutu	6. Kutu
HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney
66,8 49,1	72,0 66,4	72,0 67,1	71,2 64,6	70,9 62,2	67,5 53,8
Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
35,9	8,3	-4,9	-6,6	-8,7	-13,7
7. Kutu	8. Kutu	9. kutu	10. Kutu	11. Kutu	12. Kutu
HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney
63,1 50,4	62,9 62,2	63,1 62,9	63,0 62,2	62,4 60,7	59,8 53,3
Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
-12,7	-0,7	-0,2	-0,8	-1,6	-6,4
13. Kutu	14. Kutu	15. Kutu	16. Kutu	17. Kutu	18. Kutu
HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney	HAD Deney
55,9 47,3	55,4 56,7	55,2 58,6	55,1 59,4	55,2 58,3	54,8 49,2
Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)	Hata (%)
-8,6	1,3	3,4	4,3	3,1	-5,6



Şekil 8. Baca Akışı

Fırın bacasının fonksiyonunu yerine getirip getirmediğinin kontrolü için laboratuvarında bulunan fırında turbo fan kapalı modda fırın çalıştırılırken kazan içine bir duman kaynağı konmuştur. Bu kaynaktan çıkan dumanın bacadan vakum edilip edilmediği gözlenmiştir. Ancak duman kazanın içerisinde kalmakta ve bacadan kazan içine doğru (olması gerekenin tam tersi yönde) hava girişi olmaktadır. Bu durum ayrıca HAD sayısal çalışmasında da gözlemlenmiş ve Şekil 8'de paylaşılmıştır.

ESALBA Metal Sanayi A.Ş. Ar-Ge laboratuvarında bulunan enerji tüketimi ölçüm cihazlarının akredite laboratuvarlardaki testlerle aynı sonuçları verip

vermediğinin görülmesi amacıyla iki adet fırın üretilmiştir. Bunların bir tanesi Ar-Ge laboratuvarında bir tanesi ise bağımsız test kuruluşunda test edilmiştir. Bağımsız test kuruluşunda yapılan enerji tüketim testinin sonucu turbo modunda 801 Wh iken Ar-Ge laboratuvarında yapılan testin sonucu ise 791 Wh bulunmuştur. Yaklaşık %1'lik hata oranı kabul edilerek testlere devam edilmiştir.

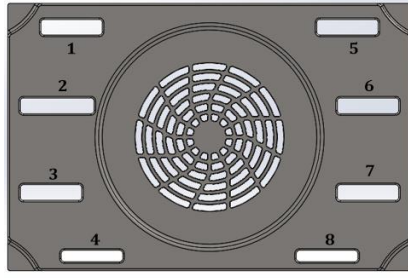
3.2.4 Belirsizlik Analizi

DeneySEL çalışmalar termokupl'dan gelen sıcaklık değerleri, takometreden gelen RPM değerleri, ısıtıcı güç ölçüm değerlerinden gelen sistematik belirsizlik içermektedir. Çalışmanın belirsizlik analizi deney çalışmalarında kullanılan ölçüm komponentlerinin hassasiyet değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Deney çalışmalarında kullanılan termokupl $\pm 1,5$ °C hassasiyetle, takometre $\pm 0,03$ RPM ve ısıtıcı güç ölçüm cihazı ise $\pm 0,1$ ölçüm hassasiyetine sahiptir. HAD sayısal çalışmalarda bu değerler hem pozitif hem de negatif yönde değiştirilerek yeni sonuçlar elde edilmiştir. Belirsizlik analizi denklem (19) kullanılarak, ısıtıcı güçleri, fırın set sıcaklığı ve fanların RPM değerleri değiştirilerek belirsizlik çalışması sonucu merkez sıcaklığı pozitif yönde %2,1 ve negatif yönde %2,4 olarak değişmektedir.

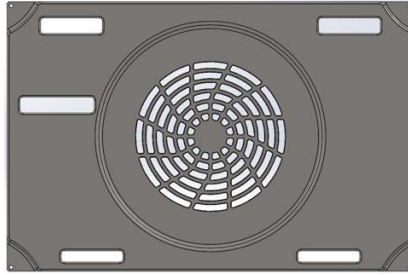
$$\sigma_T = [\Delta T_{T_f \pm 2K} + \Delta T_{f, RPM \pm \% 0.03} + \Delta T_{f, W \pm \% 0.1}]^{0.5} \quad (19)$$

3.3. İyileştirme Çalışmaları

FKS, özellikle fanın aktif olduğu modlar için kritik önem arz etmektedir. Kavitenin ısınma karakterini direkt olarak etkileyen faktörlerden biridir. FKS üzerindeki yönlendirme boşlukları ve fan kanatlarının tasarımı turbo rezistans tarafından üretilen ısı enerjisinin kavite içerisindeki dağılımını etkilemektedir. Isınma karakterinde iki ana ister bulunmaktadır. Bunların birincisi kavite içerisindeki sıcaklık dağılımının mümkün olduğunca homojen olmasıdır. İkincisi ise tuğlanın mevcut duruma göre daha az zamanda ısıtılarak az enerji tüketmesini sağlamaktır. Şekil 9'da mevcut ve iyileştirilmiş FKS tasarımlarına yer verilmiştir. Mevcut FKS'nin üretim şartlarını, kalıp revizyonunu ve maliyeti arttırmayacak şekilde 8 farklı hava çıkış alanını, 38 farklı kombinasyon tasarımlarında farklı bölgeler kapatılarak elde edilen iyi tasarım "iyileştirilmiş tasarım" olarak ele alınmıştır. Bu tasarım Şekil 9B'de gösterilmiş ve mevcut duruma göre 3, 6 ve 7 numaralı hava çıkış alanlarının kapatıldığı FKS tasarımı seçilmiştir.



A) Mevcut FKS



B) İyileştirilmiş FKS

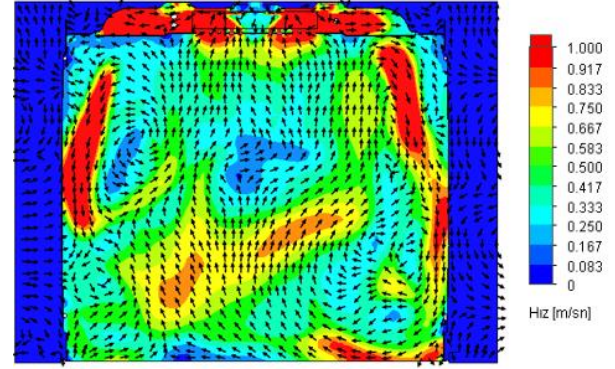
Şekil 9. A) Mevcut FKS B) İyileştirilmiş FKS

Kavite içerisindeki sıcaklık dağılımının homojenize edilmesi, akış hızlarının homojenize edilmesinden geçmektedir. Buna istinaden kavite içerisindeki akış konturları incelenmiştir.

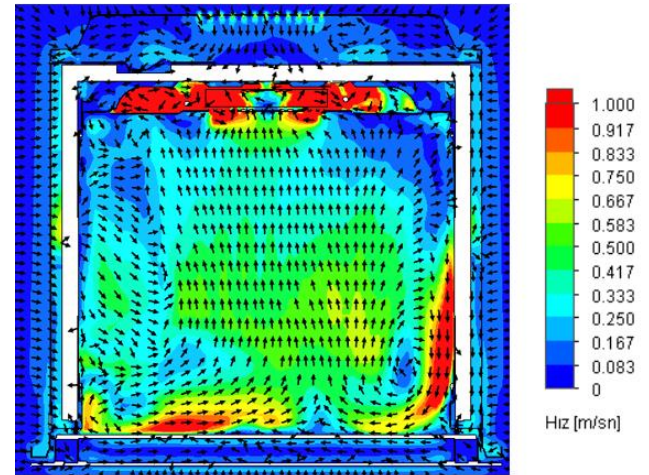
Şekil 10'da kavite merkezinden alınan mevcut FKS'nin akış konturu ve iyileştirilmiş FKS'nin akış konturu Şekil 11'de paylaşılmıştır. Şekil 9A'da gösterilen mevcut FKS'de sağda bulunan delikler fanın dönüşünden dolayı fırının altına doğru akışı yönlendirirken, solda bulunan delikler fırının üstüne doğru akışı yönlendirmektedir. 5,6,7 ve 8 numaralı deliklerden aynı anda gelen hava akışı fırının sağ tarafında kaotik veya girdaplı bir akışa sebebiyet vermektedir. 6 ve 7 numaralı deliklerin kapatılması ile fırının sağ tarafındaki hava akışı mevcut duruma göre daha düz ve girdap oluşturmada ilerlemektedir. Ayrıca hava hız değerleri azaltılarak tepsi üzerinde homojen bir akış olması sağlanmıştır. Diğer bir taraftan fırının sol tarafında 3 numaralı deliğin yok edilmesi ile fırın merkezine yöneltilen akışın kesilmesi sağlanarak sağdan ve soldan gelen akışların birbirleri ile çarpışması azaltılmıştır.

Buna göre;

- Fırın merkezinde akış dağılımı daha homojen hale getirilmiştir.
- Akış hız farkı mevcut duruma göre minimize edilmiştir.
- Deneysel çalışmalarda iyileştirilmiş FKS 40 Wh daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

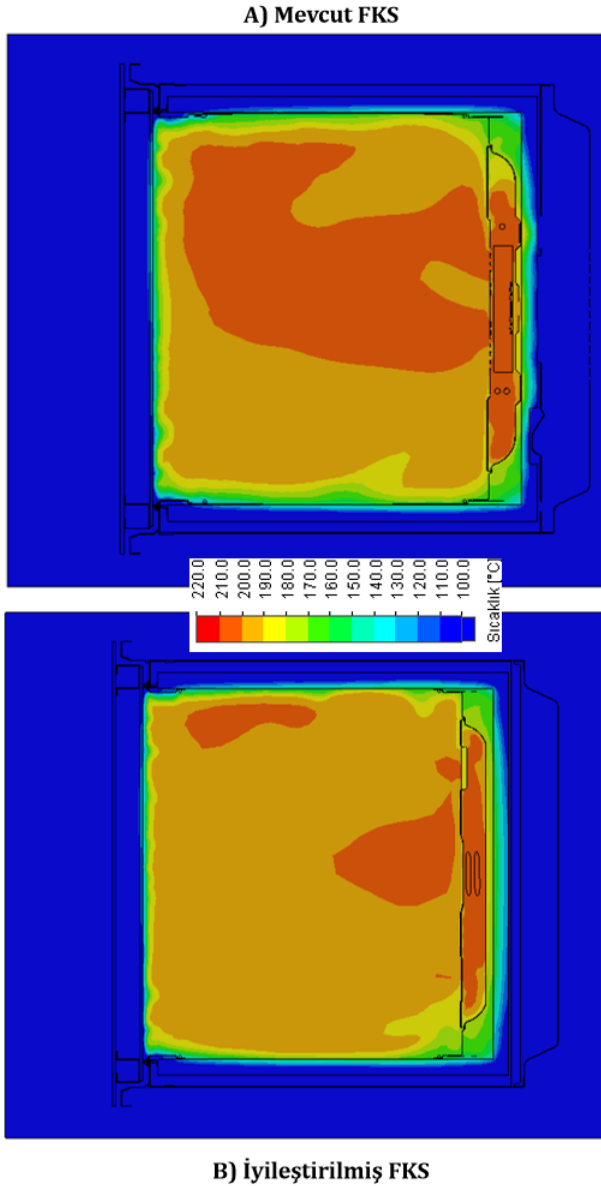


Şekil 10. Mevcut FKS akış hız konturu



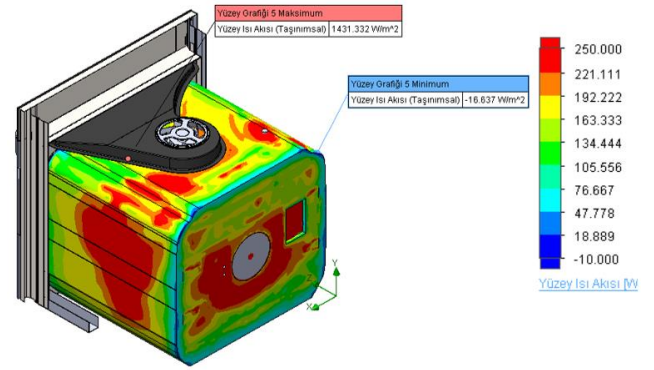
Şekil 11. Revize FKS ile Kavite İçi Akış Konturu

Şekil 12'de 200 °C'de alt, üst rezistansların ve turbo fanın aktif açık olduğu sıcaklık dağılımı görülmektedir. Hem akışkanın homojen dağılması hem de yapılan iyileştirmelerle fırın içindeki sıcaklık dağılımı homojen yayılmıştır. Bu durum merkez sıcaklık değerlerinin daha az bir aralıkta dalgalanmasına, fırın termostatının erkenden soğuyup erkenden ısınmasına yarar sağlamaktadır. Böylelikle iyileştirilmiş FKS tasarımı daha iyi enerji verimliliği sağlamaktadır. Çalışma kapsamında fırın rezistansları aç-kapa ilkesine dayalı olduğu için mevcut ve iyileştirilmiş FKS HAD sayısal çalışmasından elde edilen sıcaklık konturu ± 10 °C fark gözetilerek değerlendirilmelidir.



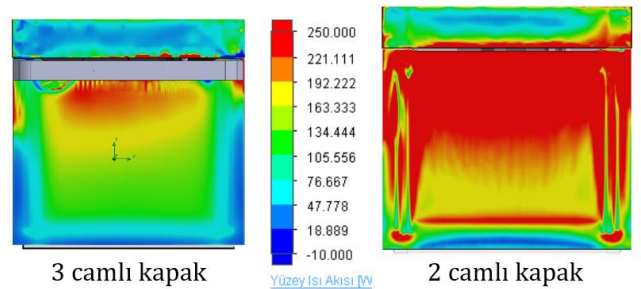
Şekil 12. 200 °C-Alt, Üst Rezistans HAD Sayısal Çalışması
A) Mevcut FKS B) Yeni FKS

Fırında revize edilen FKS ile akış konturunda daha homojen bir dağılım gözlenmektedir. Buna bağlı olarak tuğla daha az sürede ısınarak tüketilen toplam enerji azalmaktadır. Fırında bulunan ısı kaçaklarının enerji verimliliğine etkisi olumsuz yansımaktadır. Buna istinaden hazırlanan ve doğrulanan HAD modelinde fırının yüksek ısı akısı bulunan bölgeleri incelenmiştir.



Şekil 13. Fırın Yalıtımı Isı Akısı Konturu

Şekil 13’de gösterildiği üzere konturun kırmızı olduğu bölgeler ısı akısının yüksek olduğu bölgelerdir. Turbo fan modunda fırının arka kısmında bulunan ısı akısının engellenebilmesi için bu kısma su bazlı akrilik boya ile kaplanmış 5 mm kalınlığında cam yünü plaka hazırlanarak yerleştirilmiştir. Yapılan çalışmayla birlikte fırının enerji tüketimi azaltılmıştır. Fırının ısı yalıtımı enerji tüketiminin azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir. Fırın kavitesinin iç kısmı emisivite katsayısı 0,90 olan siyah emaye kaplama olduğundan ışıyım ile ısı transferi yüksektir. Işıyım ile ısı transferinin azaltılması amacıyla fırında bulunan yalıtımın dış kısmına alüminyum folyo sarılmıştır. Alüminyum folyo ile yapılan enerji verimlilik testlerinde enerji tüketiminin 37 Wh azaldığı gözlenmiştir. Fırın ön kapağı ısı transferinin yoğun olduğu bölgelerden bir diğeridir. Fırın kapağı 2 adet camdan oluşmaktadır. Kapakta bulunan iç camın fırın kavitesine bakan kısmında düşük emisivite katsayısına sahip bir kaplama bulunmaktadır. Buradaki ısı transferinin azaltılması amacıyla kapağa üçüncü cam eklenmiştir. Bununla birlikte HAD sayısal çalışmasında aşağıdaki ısı akısı konturları elde edilmiştir.



Şekil 14. Ön Cam Isı Akısı Konturları Karşılaştırması

Fırın kapağından ısı akısının azaldığı Şekil 14’te görülmektedir. Bu da daha fazla ısıнын fırın kavitesi içinde kaldığını göstermektedir.

4. Bulgular

Yapılan çalışmalar sonucunda ev tipi ankastre fırın için hedeflenen AB standartlarına göre A+ enerji verimlilik sınıfına ulaşılmıştır. Tablo 10’da gösterildiği gibi en

yüksek enerji verimliliği FKS'nin revize edilmesi sonucunda elde edilmiştir. Toplam 38 farklı FKS geometrisi HAD sayısal çalışmada çalışılmış olup maliyet-performans oranı en yüksek model seçilmiştir. Böylelikle ekstra kalıp maliyetine gerek kalmadan kavite içerisindeki akış düzenlenmiş, fırının ısı verimliliği artırılmıştır. FKS revizesi yapılırken HAD modelinin yanında bir alt model oluşturulmuştur. Bu alt modelde yalnızca kavite bulunmaktadır. Böylelikle çözüm süresi 1/10 oranında azaltılmıştır.

Tablo 10. Revizyonlara Göre Enerji Tasarrufu

No	Yapılan Çalışma	Sağlanan Enerji Tasarrufu (Wh)
1	FKS Revizyonu	40
2	Isı Yalıtım Boyası ile Kaplanmış Cam Yünü Plaka Yerleştirilmesi	23
3	Alüminyum Folyo Kaplamalı Yalıtım	37
4	3 Camlı Fırın Ön Kapağı	16
5	4 Çalışmanın Toplam Uygulanışı	131

Tablo 11'de paylaşılan mevcut fırında 801 Wh enerji tasarrufu sağlanırken, iyileştirilmiş tasarımda 670 Wh enerji tasarrufu elde edilirken mevcut duruma göre %16,4 enerji tasarrufu sağlanmıştır.

Tablo 11. İyileştirme Öncesi ve Sonrası Wh Değerleri

Tasarım	Sağlanan Enerji Tasarrufu (Wh)
Mevcut	801
İyileştirilmiş	670

Soğutma fanı etrafında HAD – Deney arasında en fazla %8,56 (5,8 °C) sıcaklık farkı oluşmaktadır. Fırın merkez sıcaklığında HAD sayısal çalışması deney verisini iyi tahmin ederek ortalamada %1,02 sıcaklık farkı oluşmuştur. Cam yüzeylerinde 3 bölge haricinde sıcaklık farkı %9'in altında olurken diğer 3 bölge, emisivitenin olduğu yerler olduğundan dolayı bu bölgelerde HAD sayısal çalışması tahmini azalmaktadır.

Çalışmada kullanılan standart cam yünü yalıtım yerine alüminyum folyolu cam yünü enerji verimliliği 37 Wh düşürerek mevcut duruma göre %4,6 kazanç getirmiştir. FKS'de yapılan iyileştirme %5 kazanç sağlarken 40 Wh enerji tasarrufu sağlamıştır. Fırın camının sayısının 2'den 3'e çıkarılması 16 Wh enerji tasarrufu sağlarken %2 kazanç getirmektedir. Bütün yapılan değişikliklerde en fazla kazanç FKS'nin değişimi ile elde edilmiştir. Işınım ile ısı transferinin azaltılması fırının enerji verimliliğinin artırılmasında önemli faydalar sağlamaktadır. Özellikle kaviteden dışarıya olan ışınlama ısı transferinin azaltılması yalıtımın emisivite katsayısı düşük olan alüminyum folyo ile kaplanmasıyla mümkün hale gelmiştir. Ayrıca Şekil

14'te gösterilen ön cam ısı akısının azaltılması ile kavite dışına ısı transferinin azaltılması sağlanmıştır.

Diğer bir taraftan çalışma kapsamında değerlendirilmeyen fakat elde edilen homojen akışın ve oluşan iyileştirilmiş enerji verimliliğinin pişirme performansının artırılmasında önemli rol oynamaktadır.

Ankastre fırın sektöründe daha önce kullanılmamış bir yalıtım malzemesi olan su bazlı akrilik boya ile kaplanmış 5mm kalınlığında cam yünü plaka yalnızca turbo rezistansın arka kısmına yerleştirilmesiyle fırın enerji tüketimini %6,6 azaltarak 670 Wh değerinden 626 Wh değere indirerek 44 Wh enerji tasarrufu sağlanmıştır. Su bazlı akrilik boya fırınlarda kullanılmak üzere gelecek çalışması kapsamında kullanılabilir bir ürün olduğu tespit edilmiştir.

5. Tartışma

Yapılan çalışmalarda bir ankastre fırın ele alınarak ısı verimliliğinin artırılarak enerji verimlilik seviyesinin yükseltilmesi amaçlanmıştır. Fırındaki ısı transferi mekanizmaları dikkatlice incelenerek bazı önlemler alınmıştır. Ayrıca HAD sayısal çalışmalarıyla fırın içerisindeki ısının daha verimli kullanılabilmesinin önü açılmıştır. Tüm çalışmaların sonucunda fırının enerji tüketimi 670 Wh'e düşürülerek enerji verimlilik sınıfının AB standartlarına göre "A+" olması sağlanmıştır. Fırında yapılan çalışmalar, literatürdeki çalışmalarla paralel olarak benzer ısı verimliliği sağlamıştır. Ancak bahsi geçen ekstra yalıtım malzemesi parçası ile kayda değer derecede verim elde edilebilmiştir. Özellikle halihazırda bulunan FKS üzerine yatırım maliyeti olmadan yapılan revizyonlarla ısı verimliliğinin artırılması mümkün hale gelmiştir.

6. Sonuçlar

Gerek ülkemizde gerek diğer ülkelerde sıklıkla kullanılan ankastre fırınların enerji verimliliği enerji kriziyle birlikte kritik hale gelmektedir. Yapılan çalışmada çeşitli yöntemlerle ankastre fırınların enerji verimliliği artırılmış olup AB standartlarına göre enerji verimlilik sınıfı "A+"a çıkarılmıştır.

Yapılan literatür araştırmalarına göre ankastre fırınlarda kullanılan mekanik termostatların yerine PID kontrollü termostatların kullanılması fırının ısınma karakteristiğine önemli oranda etki etmektedir. Böylelikle enerji verimliliğinin daha da artırılması mümkün hale gelebilmektedir.

Fırının içerisinde bulunan baca çıkışındaki akış hızının ve baca pozisyonunun HAD simülasyonları ile optimize edilerek enerji verimliliğinin artırılacağı öngörülmektedir. Kavite dışına ısı transferinin yoğun olduğu bir diğer bölge baca çıkışıdır.

FKS üzerinde bulunan açıklıkların ve FKS formunun optimize edilmesiyle kavite içi akışın iyileştirilmesi mümkündür. Farklı FKS çeşitleri ile yapılacak HAD sayısal çalışması sonucunda ısı verimliliğinin artırılmasının önü açılabilir.

Fırının sıcaklık kontrolörü olarak görev yapan mekanik aç-kapa tipi termostatin yerine elektronik olarak PID veya bulanık mantık algoritması ile kontrol edilen bir kontrolör kullanılması enerji verimlilik sınıfını artırılabilir. Kavite içerisine yerleştirilebilecek bir PT100 sıcaklık sensöründen alınan verilen işlenmesi ile merkez sıcaklık salınımı azaltılıp hipor tuğlanın daha çabuk ısınması sağlanabilir. Bu durumda sıcaklık sensörünün kavite içerisindeki konumu kritik olmaktan çıkarılarak daha kolay optimizasyon imkânı sağlanacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma Esalba Metal Sanayi A.Ş. bünyesinde yapılmıştır. Ar-Ge laboratuvarında yapılan testler esnasında vermiş olduğu desteklerden dolayı E. Sanlı'ya, M. Çağdaş'a ve F.Ş. Duran'a teşekkür ederiz. Ayrıca bilgi ve tecrübesiyle vermiş olduğu desteklerden dolayı M. Uçar'a teşekkür ederiz.

Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Muharrem KEYFOĞLU, literatür araştırması, uygulanması, bilgisayar HAD sayısal çalışmasının iyileştirilmesi, laboratuvarında yapılan testler ve iyileştirmeler; Süleyman Fatih KIRMIZIGÖL, HAD sayısal çalışması modelinin hazırlanması, laboratuvarında yapılan testler ve makale revizyonu konularında katkı sağlamışlardır.

Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir ve bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır. Makalede yer alan deneysel çalışmaları Esalba Metal Sanayi A.Ş.'de yapılmış olup Ar-Ge merkezi projesinin bir çıktısıdır ve kurum veya kişiden izin alınmasına gerek yoktur.

Kaynaklar

Altun, Ö., Yıldız, Ş., & Anık, T. (2018). Ankastre Ev Tipi fırınlarda fırın Kapağının Enerji Tüketimi ve Enerji Seviyesine Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(4), pp. 403-409. doi: 10.5505/pajes.2018.23922

Constantin, G. A., Munteanu, M. G., Voicu, G., Paraschiv, G., & Ştefan, E. M. (2023). An analysis of air flow in the baking chamber of a tunnel-type electric oven. *Computation*, 11(236), pp. 2-20.

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (n.d.). *Isı ve Kütle Transferi* (4 ed.). Palme Yayıncılık.

EN 60350-1. (2013). Household electric cooking appliances Part 1: Ranges, ovens, steam ovens and grills - Methods for measuring performance. *GENELEC European Committee for Electrotechnical Standardization Brussels*.

Fahey, M., & Karagöz, İ. (2007). Use of computational fluid dynamics in domestic oven design. *Int. Jnl. Of Multiphyssics*, 2(1). doi:10.1260/175095408784300216

Guerin, D., Morin, V., Chaussy, D., & Auriault, J. L. (2001). Thermal conductivity of handsheets, papers and model coating layers. *12th Fundamental Research Symposium*, pp. 927-945. doi: 10.15376/frc.2001.2.927

isollat. (n.d.). Retrieved from <https://www.isollat.com/>

Kayihan, S. A. (2003). Elektrikli fırınların ısı performansının deneysel olarak incelenmesi. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. doi:<http://hdl.handle.net/11527/9850>

Khatibi, M., Zamani, H., & Mirzababaei, S. M. (2023). Flatbread baking process under time-varying input power in a home-scale electric oven: 3D CFD simulation with experimental validation. *Thermal Science and Engineering Progress*, 46. doi:<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102129>

Khatir, Z., Paton, J., Thompson, H., Kapur, N., Toropov, V., Lawes, M., & Kirk, D. (2012). Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven. *Applied Energy*, 89(1), pp. 89-96. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.02.002>

Khatir, Z., Taherkhani, A. R., Paton, J., Thompson, H., Kapur, N., & Toropov, V. (2015). Energy thermal management in commercial bread-baking using a multi-objective optimisation framework. *Applied Thermal Engineering*, 80, pp. 141-149. doi:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.01.042>

Kırmızıgöl, F., & Uçar, M. (2024). Bir Hava Temizleme Cihazının Sayısal ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 458-469. doi:<https://doi.org/10.21205/deufmd.2024267812>

Kokolj, U., Skerget, L., & Ravnik, J. (2017). The validation of numerical methodology for oven design optimization using numerical simulations and baking

- experiments. *Journal of Mechanical Engineering*, 63(4), pp. 215-224. doi:10.5545/sv-jme.2016.4089
- Lam, C. K., & Bremhorst, K. (1981, 09). A modified form of k- ϵ model for predicting wall turbulence. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 103, pp. 456-460.
- Lu, Y., Rane, S., & Kovacevic, A. (2022). Evaluation of cut cell cartesian method for simulation of a hook and claw type hydrogen pump. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(54). doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.05.110
- Material data sheet thermally broken steel USA. (1997). Retrieved from UNI 10088-2: https://thermallybrokensteelusa.com/wp-content/uploads/2015/10/Material_Data_Sheet-Thermally-Broken-Steel-USA.pdf
- Material: Polyamide 66. (n.d.). Retrieved from Licharz Engineering Plastics : <https://www.holes.hu/public/upload/files/PA66.pdf>
- Material: Polyamide 66 GF 30. (n.d.). Retrieved from Licharz Engineering Plastics: <https://www.holes.hu/public/upload/files/PA66-GF30.pdf>
- Mirade, P. S., Kondjoyan, A., & Daudin, J. D. (2002). Three-dimensional CFD calculations for designing large food chillers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, pp. 67-88. doi:https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00180-6
- Mistry, H., Subbu, G., Dey, S., Bishnoi, P., & Castillo, J. L. (2006). Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens. *Applied Thermal Engineering*, 26, pp. 2448-2456. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.02.007
- Modelling Turbulence. (2006, 09 29). *Fluent Inc.*, pp. 12-26.
- Modest, M. (2013). *Radiative Heat Transfer*. doi:https://doi.org/10.1016/C2010-0-65874-3
- Niamsuwan, S., Kittisupakorn, P., & Suwatthikul, A. (2015). Enhancement of energy efficiency in a paint curing oven via CFD approach: Case study in an air-conditioning plant. *Applied Energy*, pp. 465-477. doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.041
- Pensek, M., Holecek, N., Gierkes, H., & Golobic, I. (2005). Energy consupcion analysis of domestic oven. *Journal of Mechanical Engineering*, pp. 405-410. doi:10.1615/ICHMT.2004.IntThermSciSemin.560
- Piaia, J. C., Claumann, C. A., Quadri, M. B., & Bolzan, A. (2018). Air flow CFD modelling in an industrial convection oven. *CFD Techniques and Thermo-Mechanics Applications*. doi:10.1007/978-3-319-70945-1_1
- Schott. (2004). *TIE-31: Mechanical and thermal properties of optical glass*.
- Shanks, H. R., Maycock, P. D., Didles, P. H., & Danielson, G. C. (1963). Thermal conductivity o silicon from 300 to 1400 K. *Physical Review Journal Archive*, 130(5), pp. 1743-1748. doi:https://doi.org/10.1103/PhysRev.130.1743
- Sobachkin, A., & Dumnov, G. (n.d.). Numarical basis of CAD-Embedded CFD . *NAFEMS World Congress*, pp. 1-20.
- Stinger, J. D., Scheerlinck, N., Nicolai, B., & Impe, J. F. (2001). Optimal heating strategies for a convection oven. *Journal of Food Engineering*, 48(4), pp. 335-344. doi:https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00176-X
- Şahin, S. (2023). A systematic approach to numerical analysis and validation for industrial oven design and optimization. *Research Square*, pp. 1-22. doi:10.21203/rs.3.rs-3131043/v1
- Wakes, S. J., Maegli, T., Dickinson, K. J., & Hilton, M. (2008). Three-Dimensional Flow Simulation Over a Complex Sand Dune System. *Environmental Problems in Coastal Regions VII*, pp. 221-230. doi:10.2495/CENV080211
- Yamalı, C. (2019). *Isıl iletkenlik test raporu ISOLLAT ısı yalıtımı malzemesi*. Ankara: Makina Mühendisliği Bölümü Orta Doğu Teknik Üniversitesi.