



Turbo Kuzine Fırının Farklı Fan Tipleri, Kanat Açılırları ve Yalıtım Malzemeleri Kullanarak Kabin Sıcaklık Dağılımlarının Deneysel ve Nümerik İncelenmesi

Mahmut BURHAN^{1*}, Burak KİŞİN¹, Ender EFELER², A. Alper ÖZALP¹

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye
ORCID: 0000-0003-2059-2958

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye
ORCID: 0000-0003-0908-7977

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye
ORCID: 0000-0002-4976-9027

²Inoksan Mutfak Sanayi A.Ş., Bursa, Türkiye

* Sorumlu Yazar: Mahmut BURHAN 512110002@ogr.uludag.edu.tr

Özet

Endüstriyel mutfak sektöründe kullanılan kuzine fırınlarda homojen pişirmeyi sağlayan en önemli kriterlerden birisi kullanılan fan ve ısı kaynağı ile ısınan havanın yönlendirmesini yapan, fan ile pişirme hacmi arasına yerleştirilen, hava yönlendirme perdesi tasarımıdır. Yapılan çalışmada radyal ve teğetsel fanların fırınlardaki hava dolaşımı performansı nümerik olarak analiz edilmiş, ardından çıkan sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte bu çalışmada pişirme hacmine sıcak hava kanatlar vasıtası ile dinamik olarak yönlendirilmiş, pişirme hacmi düzenli bir şekilde taranarak homojen sıcaklık dağılımı hedeflenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda teğetsel fanların homojen pişirme performansının radyal fana göre daha fazla olduğu, bununla birlikte dinamik kanat yapısının havayı pişirme hacmi içerisine homojen dağıttığı, nümerik analiz ve deneysel sonuçlar ile birlikte görülmüştür.

Article Info

Research Article

Received: 16/05/2022

Accepted: 29/09/2022

Anahtar Kelimeler

Fırın, radyal fan,
teğetsel fan,
sıcaklık dağılımı,
yalıtım, homojen
pişirme

Experimental and numerical investigation of cabinet temperature distributions of turbo cousine furnace using different fan types, wing angles and insulation materials

Abstract

One of the most important criteria that ensures homogeneous cooking in the cooker ovens used in the industrial kitchen sector is the design of the air guiding curtain, which is placed between the fan and the cooking volume, which directs the heated air with the fan and heat source used. In the study, the air circulation performance of the radial and tangential fans in the furnaces was analysed numerically, and then the results were compared with the experimental data. However, in this study, hot air is directed to the cooking volume dynamically by means of blades, and homogeneous temperature distribution is aimed by scanning the cooking volume regularly. As a result of the study, it was seen with numerical analysis and experimental results that the homogeneous cooking performance of tangential fans is higher than the radial fan, and that the dynamic blade structure distributes the air homogeneously into the cooking volume.

Keywords

Oven, radial fan, tangential fan, temperature distribution, isolation homogeneous cooking

1.Giriş

Gıda sektöründe kullanılan pişirme fırınları farklı kapasitelerde olup piyasanın talebine göre şekillenmektedir. Bu fırınların bir kısmı konveksiyon fırınlar dediğimiz havanın bir ısıtıcı vasıtası ile ısıtılarak kabin içerisinde fan yardımı ile dolaştırılması prensibine dayanmaktadır. Fırınların ortak hedefleri pişirme hacmi ve tepsiler arasında dolaşan sıcak havanın homojen dağılmasının sağlanmasıdır. Bu konu ile ilgili birçok yaklaşım olmak ile birlikte farklı çalışmalar hala devam etmektedir. Özellikle günümüzde uluslararası standartlarla fırınların enerji sınıflarının belirlenmeye başlanmasıyla birlikte, elektrikli fırın üreticilerini düşük enerji tüketimine sahip fırınlar üretmeye yönlendirmektedir. Standartta fırınların pişirme performansı ile ilgili belirli bir performans kriteri bulunmamaktadır. Bu durumda kullanıcı memnuniyetinin önemini artmaktadır. Homojen sıcaklık dağılımının yanı sıra pişirme süresinin kısaltılması da pişirme performansını arttıran kriterler arasındadır.

Günümüzde, bu amaç doğrultusunda, mevcut fırın tasarımlarında rezistans tarafından ısıtılan hava pişirme hacmine fan ile taşınmaktadır. Radyal fanlar, yapısal tasarımları itibari ile fan çıkışında havaya girdaplı form kazandırmaktadır. Bu durum gerek pişirme hacmi içinde gerekse de tepsiler arasındaki hava iletiminin homojen dağılımının sağlanmasını mümkün kılmamaktadır. Bu durum yapılan test çalışmalarında da tepsiler üzerindeki sıcaklık farklılıklarıyla ortaya çıkmaktadır.

Literatür araştırması sonucunda, homojen sıcaklık dağılımı elde etmek amacıyla çeşitli fırın içi mekanik tasarım çalışmalarının yapıldığı görülmektedir. Yapılan bu tasarım çalışmaları aşamasında, tasarım sürecinin hızlanmasını sağlamak amacıyla, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yazılımları kullanılmaktadır.

Smolka ve ark. (2010) mevcut bir kurutma fırınının sertifikasyon programına destek vermek amacı ile 3-boyutlu bir CFD simülasyon çalışması yürütmüşlerdir. Başta taşınım ile ısı transferi olmak üzere iletim ve ışıma tipindeki ısı transferi mekanizmalarının, zamana bağlı değişimlerin ve dış yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayılarının da inceleme altına alındığı çalışmada fan hızı, hava dağılım kanallarının etkinliği, elektrik ısıtıcılardaki enerji üretim seviyelerinin homojen sıcaklığı dağılımı üzerindeki etkilerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.[1]

Yılmaz ve ark. (2013) taşınım ve buhar üflemleri hibrid fırında çörek pişirme prosesini farklı fırın sıcaklığı ve pişirme süresi şartlarında deneysel olarak inceleme altına almışlardır. Ürünün kuruma miktarı, tekil içerikli pişirme operasyonları ile mukayese edildiğinde, hibrid fırında en düşük seviyede kaldığı ve ortalama nem düzeyinin pişirme sıcaklığı ile önemli miktarda değişmediği tespit edilmiştir.[2]

Verboven vd. (1999) hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı kullanarak endüstriyel bir fırındaki sıcaklık ve hız dağılımlarını belirlemiştir. Sayısal çözümde, $k-\epsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Fırın içindeki ısı transferinin sadece iletim ve taşınım ile olduğu kabul edilmiş, radyasyonla ısı transferi hesaplanmamıştır. Sayısal çözüm ile deneysel çalışmaların sonuçları karşılaştırıldığında; sıcaklık dağılımında %3-8.8, hız dağılımında ise %22 hata yüzdesi olduğu görülmüştür.[3]

Sparrow ve Abraham (2003) elektrikli bir fırında ön ısıtma yapılması ve yapılmaması durumlarını analitik bir yaklaşım ile inceleme altına almışlardır. Işıma odaklı yüzey karakteristikleri ile ısı atalet faktör parametrelerinin de dikkate alındığı çalışmada fırın içindeki sıcaklık dağılımları zamana bağlı olarak tespit edilmiştir.[4]

Gıda ürünlerinin pişirilmesi sürecinin optimum şartlarda yürütülmesini sağlamaya yönelik bir çalışmayı yürüten Stigter ve ark. (2001) ürünlerin sıcaklık dağılım ve değişimini tespit etmek amacıyla 3-boyutlu zamana bağlı bir inceleme yapmışlardır. Ürün içindeki iletim mekanizması üzerinde taşınım sınır şartı etkilerini ürün içindeki minimum, maksimum ve ortalama sıcaklık seviyeleri ile dalgalanma değerleri üzerinden yorumlamışlardır.[5]

Colla ve ark. (1997) da endüstriyel fırının 2-boyutlu ortamda nümerik incelemesini yapmışlardır. Nümerik sonuçların deneysel ölçümler ile örtüşmesinin ötesinde fırın tasarımda önerilen farklılaşmanın yapılması sonrasında Nusselt sayısında %30 mertebesinde artışlar tespit edilmiştir.[6]

Unklesbay ve ark. (1997) ise hava sıcaklığındaki değişimlerin fırın performansına etkisini incelemeye yönelik yürüttükleri çalışmalarını 140°C – 236°C arasındaki fırın çalışma sıcaklığı seviyeleri için gerçekleştirmişlerdir.[7]

Khatir ve ark. (2012) da zorlanmış taşınım şartlarının hâkim olduğu bir fırın içindeki akış ve sıcaklık dağılım karakteristiklerini deneysel ve nümerik olarak inceleme altına almışlardır. Sıcaklık alanlarında farklılaşmaya neden olan devridaim bölgelerinin büyüklüğünün ağırlıklı olarak jet akışlarının şiddetine bağlı olduğu tespit edilmiştir.[8]

Therdthai ve ark. (2003) öncelikle pişirme prosesinin başarısının fırın içindeki sıcaklık dağılımına bağlı olduğuna vurgu yaparak taşınım ve ışıma mekanizmalarını dikkate alan 2 boyutlu bir nümerik çalışma yürütmüşlerdir. Isıtıcı gücü ile fan debisinin dikkate alındığı araştırmada fırın içindeki sıcaklık homojenizasyonu kadar kontrol sensor pozisyonlarının seçiminin de çok önemli olduğuna vurgu yapılmıştır.[9]

Navaneethakrishnan ve ark. (2007, 2010) ısıtıcı gücü kadar ısıtıcının pozisyonunun da fırın içinde homojen sıcaklık dağılımının sağlanmasında önemli olduğunu kayıt altına almışlardır.[10]

Ayrıca bu konuda FloEFD kullanılarak endüstriyel tipli fırınların analizi için akademik yayınlar da bulunmaktadır. [11,12]

Yapılan çalışmada fırınların kabin içi sıcaklık performansı ve kabin içerisindeki hava dağılımı için farklı metotlar uygulanmıştır. Radyal ve teğetsel fanların ile kabin içerisine ayrı montajı yapılarak katı modelleri CAD ortamına aktarılmış, FloEFD yazılımı kullanılarak CFD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra bu çalışmada mevcut fırınlardan farklı olarak havayı dinamik kanat sistemi ile pişirme hacmi içerisinde yönlendirip tepsiler üstünde homojen sıcaklık dağılımı amaçlanmıştır. Yapılan çalışmada amaçlanan diğer husus ise istenilen sıcaklığa en kısa sürede ulaşması ve ısıyı kabin içerisinde maksimum düzeyde tutması için en uygun izolasyonun tespit edilmesidir. Bununla ilgili de farklı izolasyonlardaki sıcaklık analizleri hem CFD olarak hem de deneysel olarak yapıp doğrulanmıştır. Yapılan tüm çalışmalarda hacim içerisindeki sıcak havanın hızına, dağılımına, kabin içi, tepsiler arası ve tepsi yüzeyi sıcaklık farklarına bakılmış ve aralarındaki farklar yorumlanmıştır.

2. Materyal ve Yöntem

Gıdaların ısıtılması, soğutulması, sterilizasyonu ve kurutulması gibi prosesler gıda mühendisliğinin temel konularıdır. Bu prosesler sırasında gıdalarda gerçekleşen ısı, kütle ve momentum transferinin modellenmesi çalışmaları yapılmaktadır. Gıda sektöründe katı gıdaların pişirilmesinin fiziksel prensibi, gıda ile içinde bulunduğu ortam arasında gerçekleşen ısı ve kütle transferine dayanmaktadır. Akışkan gıdaların pişirilmesinin modellenmesi için ise akışkan içindeki ısı, kütle ve momentum transferinin birlikte göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, özellikle sıvı gıdaların ısıl prosesler altındaki davranışlarının modellenmesinde hesaplamalı akışkanlar mekaniği paket programlarından yararlanılmaktadır. Belirsiz şekilli geometriler, karmaşık sınır şartları ve heterojen yapıdaki gıdalar ısıl proseslerinin modellendiği çalışmalar da mevcuttur. Isıl proseslerin modellenmesi incelendiğinde, yapılan çalışmalar model türüne göre sınıflandırılabilir. Bunlar tek başına ısı transferi, tek başına kütle transferi, ısı ve kütle transferi birlikte, yalnızca reaksiyon kinetiği ve reaksiyon ile birlikte

ısı ve/veya kütle transferinin birlikte modellendiği çalışmalardır. Modellerin birbirleriyle entegrasyonunun hatayı azalttığı gözlemlenmiştir.

Günümüzde pişirme fırınları tasarımlarında pişirme hacmi içindeki sıcak havanın homojen dağılmasının önemi bilindiği için üretici firmalar fırınların tasarımı sırasında akışkanlar mekaniği simülasyon programıyla, sıcak havanın pişirme hacmi içindeki dolaşımını gösteren akış ve ısı hesaplamaları ve analizleri yapmaktadırlar. Bu çalışmaları daha sonra da yaptıkları prototip testleri ile desteklemektedirler. Bu simülasyon çalışmaları hem mevcut çalışmaların süresini kısaltmakta hem de maliyetini düşürmektedir.

2.1.Yönetici denklemler

Kütle korunumu denklemi bir kontrol hacmi üzerinde kütle dengesi yazılarak geliştirilmiştir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

Momentumun korunumu denklemi Newton' un ikinci yasasının kontrol hacmi üzerinde uygulanmasıyla elde edilir. Momentum denkleminin diferansiyel formda yazılışı aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \rho \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \sigma_{ij} \quad (2)$$

Yukarıdaki denklemde σ_{ij} gerilme tensörüdür ve açılımı aşağıdaki gibidir:

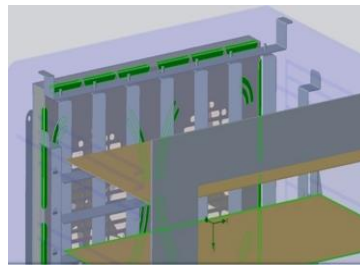
$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2 CAD model ve analiz çalışmaları

2.2.1 Radyal fan çalışmaları



Şekil 1. İnoksan turbo fırın

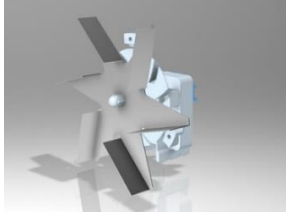


Şekil 2. Nolu turbo modelinin/tasarımının CAD görüntüsü.

Proje çerçevesinde tasarımı yapılan yarı endüstriyel turbo kuzine fırın Creo programında modellenmiştir (Şekil 1.) ve CAD görüntüsü Şekil 2.'de verilmiştir.

Pişirme hacmi içindeki hava akışının sağlanmasına yönelik olarak turbo kuzine üzerinde 2 adet AKSA marka AKS-686-25 model motor radyal fan Şekil 3.'deki gibidir. [13] Analizlerde, fanların bulunduğu kuzinenin arka bölmesi ile tepsiler arasındaki hava yönlendirici kanatlar yatay pozisyonda tutulmuştur.

1 nolu Turbo kuzine modeli / tasarımı üzerinde yürütülen simülasyon çalışmalarındaki

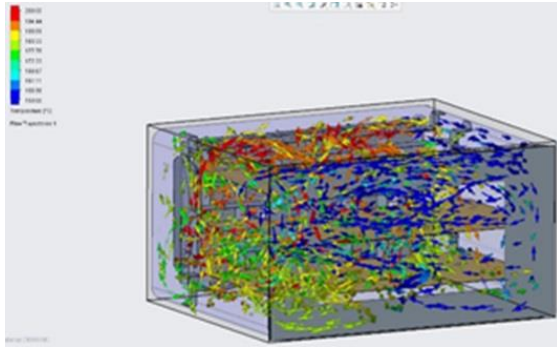


Şekil 3. AKSA marka AKS-686-25 model sıcak hava sirkülasyon fanının CAD ve gerçek görseli

sayısal ağ incelemelerine ait bulgular Tablo 1.'de sunulmuştur. Bu incelemelerdeki ana amaç kuzinenin pişirme hacmi içinde ve katı bölgelerde uygulanan sayısal ağ yoğunluğu ile doğru momentum karakteristiklerinin elde edildiğinin doğrulanmasıdır. FLOEFD'nin 6. seviye genel mesh derece uygulaması ile kuzinenin emme-basma yüzeylerindeki hava debileri %4 mertebesinde yakınsatılmıştır. Sonraki analizler benzer mesh uygulaması ile yürütülmüştür.

Tablo1.1 Nolu turbo kuzine modeli/tasarımı üzerinde yürütülen simülasyon çalışmalarında sayısal ağ incelemeleri.

Toplam Mesh	Katı Mesh	Akışkan Mesh	Genel Mesh Derecesi	Lokal Mesh Derecesi	İterasyon Sayısı	Emme Kanal Debisi [kg/s]	Basma Kanal Debisi [kg/s]	Emme Basma Debi Oranı
225 457	44 179	181 278	2	2	431	0.0146	-0.0137	%6
245 906	46 467	199 439	3	2	443	0.0147	-0.0159	%8
550 191	99 394	450 797	4	2	586	0.0134	-0.0149	%11
1 112 850	180 154	932 696	5	3	750	0.0122	-0.0128	%5
4 190 776	557 496	3 633 280	6	1	1 201	0.0135	-0.0140	%4



Şekil 4. 1 Nolu turbo kuzine modelinin/tasarımının iç sıcaklık dağılımı.

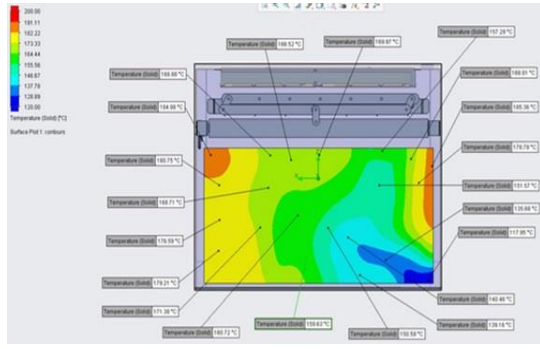
Analizlerde radyal fanların 240 rad/s hızda döndürülmesi ile elde edilen 1 nolu turbo kuzine tasarımının iç sıcaklık dağılımı Şekil 4.'de gösterilmiştir. Sıcaklık değerlerinin fırın içinde önemli miktarda farklılık gösterdiği şekilden görülebilmektedir.

Bu çıktıya kaynak oluşturan seçilen fanlar ile ilgili 3 problem şu şekilde tespit edilmiştir:

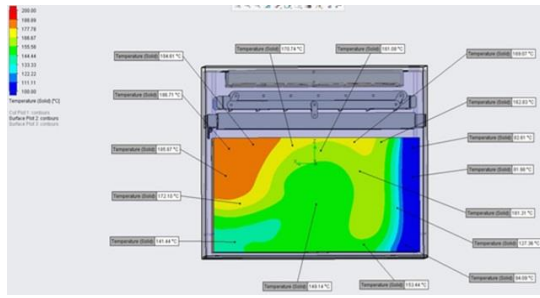
(i) Fanlar tepsiler tarafından emiş yapmaktadır. Bu durum projemiz kapsamında kuzine fırın tasarımına dahil edilen kanatları işlevsiz durumu sokmaktadır.

(ii) Radyal fanların merkez bölgesinde hava hızları kanat uçlarına göre çok düşüktür. Bu durumu emme / basma kesitlerinde homojen hava hareketi oluşmasını imkânsız kılmaktadır.

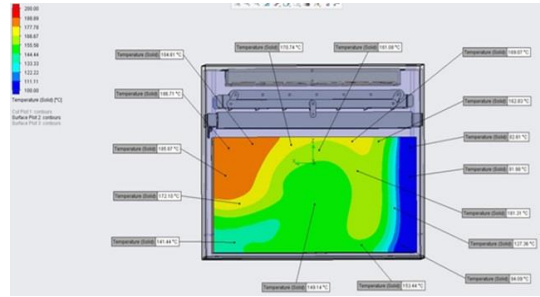
(iii) (ii) Nolu maddede tanımlanan sebepten dolayı tepsiler arasında homojen hava hareketi oluşmamakta, bu da tepsiler üzerindeki sıcaklık dağılımını olumsuz etkilemektedir.



(a)



(b)

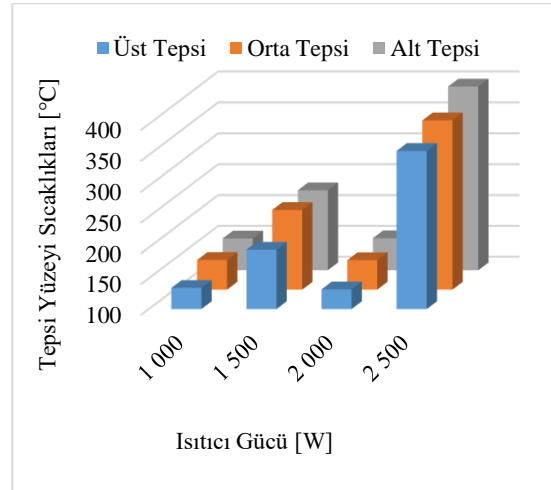


(c)

Şekil 5. 1 Nolu turbo kuzininin (a) alt tepsi, (b) orta tepsi ve (c) üst tepsi üzerindeki sıcaklık dağılımları

1 000 Watt ısıtıcı gücü seviyesinde yürütülen simülasyon neticesinde turbo kuzine tasarımı için elde edilen tepsi üzeri sıcaklık dağılımları Şekil 5.'de sunulmuştur. Her 3 tepsiye ait sıcaklık dağılımları çıktılarını tepsiler üzerinde yüksek sıcaklık farklılıkları olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Bu durumun kaynağında yukarıda ortaya konan radyal fan seçimi kaynaklı olumsuzluklar bulunmaktadır.

1 Nolu turbo kuzine tasarımına ait CFD çalışmaları 1 000, 1 500, 2 000 ve 2 500 Watt'lık ısıtıcı gücü seviyelerinde yürütülmüştür. Tepsileri üzerindeki en düşük, en yüksek ve ortalama sıcaklık değerleri Şekil 6. ve Tablo 2.'de sunulmuştur. Isıtıcı gücü ile tepsi sıcaklıklarının artması simülasyonlarda ısıl dengenin kurulduğunu doğrulamaktadır. Öte yandan bulgular her bir tepsi üzerindeki bağımsız sıcaklık farkının ısıtıcı gücü ile arttığını da göstermektedir. Düşük ısıtıcı gücü için dahi kayıtlı edilen tepsi üzeri sıcaklık farkı 105 °C (üst tepsi) civarındadır.



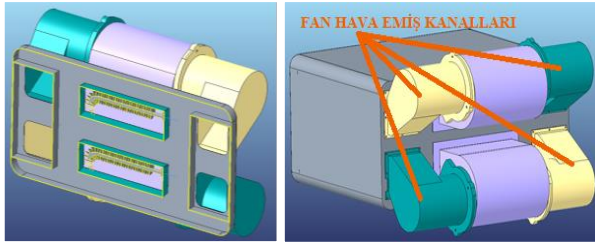
Şekil 6. 1 Nolu turbo kuzine tepsileri üzerindeki ortalama sıcaklık değerlerinin ısıtıcı gücüne bağlı değişimi.

Tablo 2.1 Nolu turbo kuzine tepileri üzerindeki en düşük, en yüksek ve ortalama sıcaklık değerlerinin ısıtıcı gücüne bağlı değişimi.

		Üst Tepsi	Orta Tepsi	Alt Tepsi
1 000 W Isıtıcı	En Yüksek Sıcaklık [°C]	186.71	193.36	185.36
	En Düşük Sıcaklık [°C]	81.98	103.07	117.95
	Ortalama Sıcaklık [°C]	134.34	148.21	151.65
1 500 W Isıtıcı	En Yüksek Sıcaklık [°C]	279.21	297.85	293.80
	En Düşük Sıcaklık [°C]	113.59	161.09	166.04
	Ortalama Sıcaklık [°C]	196.40	229.47	229.92
2 000 W Isıtıcı	En Yüksek Sıcaklık [°C]	186.57	192.91	184.66
	En Düşük Sıcaklık [°C]	77.21	102.81	119.46
	Ortalama Sıcaklık [°C]	131.89	147.86	152.06
2 500 W Isıtıcı	En Yüksek Sıcaklık [°C]	508.04	488.44	574.10
	En Düşük Sıcaklık [°C]	205.30	260.51	221.08
	Ortalama Sıcaklık [°C]	356.67	374.47	397.59

Bu bulgular radyal fan uygulamalı turbo kuzine tasarımının uygun olmadığını ortaya koymaktadır. Radyal fanlar ile üretilecek kuzine fırınlarda tepiler arası sıcaklık farklılıklarının 10°C'den fazla olmasından dolayı homojen pişirme problemi olma olasılığı yüksek ihtimal olacağından dolayı radyal fan uygulamalı kuzinenin prototip imalatı iptal edilip yerine teğetsel fanlar ile tasarım ve analiz çalışmaları yapılması kararlaştırılmıştır.

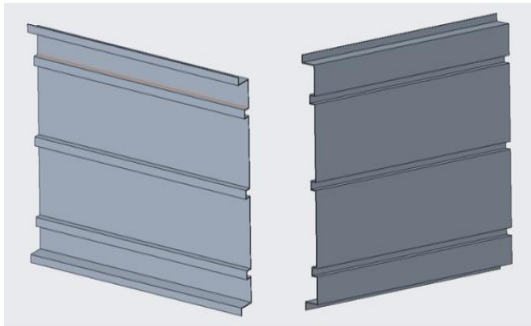
2.2.2 Teğetsel fan çalışmaları



Şekil 8. Fan hava emiş kanallarının CAD görüntüsü

2 Nolu turbo kuzine tasarımı Şekil 8.'de gösterildiği gibi 2 adet teğetsel fanın sisteme dahil edilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca Şekil 9.'da görüldüğü gibi pişirme hacmi içinde tepilerin yerleştirileceği ve fanın emiş kanalının oluşturulacağı tepsi tutma sacı tasarlanmıştır. Bu sac ile fırın yan sacları arasında oluşan hava yolundan fanın fırın hacminden dönen sıcak havası emilmektedir.



Şekil 9. Fırın tepsi tutma sacı

Bu sayede fanın üflediği sıcak hava tepilerin ön tarafına kadar iletilmekte ve fırın pişirme hacmi içinde zorlanmış taşınım ile emiş debisi azalmadan talep edilen şekilde yol alması sağlanmaktadır.

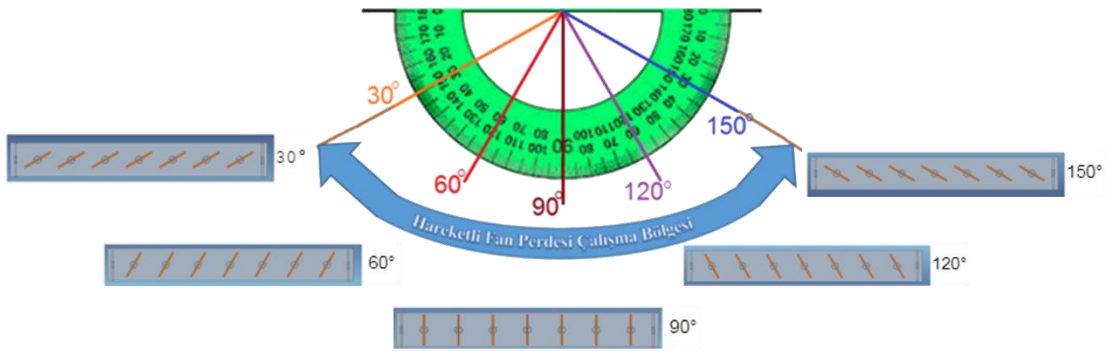
Yeni model için tepsi sıcaklık dağılımı analizleri tekrar yapılmıştır. FloEFD'de dinamik modellerin ısıl analizleri yapılamadığından Şekil 10.'de görülen hareketli fan perdesinin kanatlarının

belirli açılarda durduğu kabulü ile yeni modelin analizleri tamamlanmıştır.

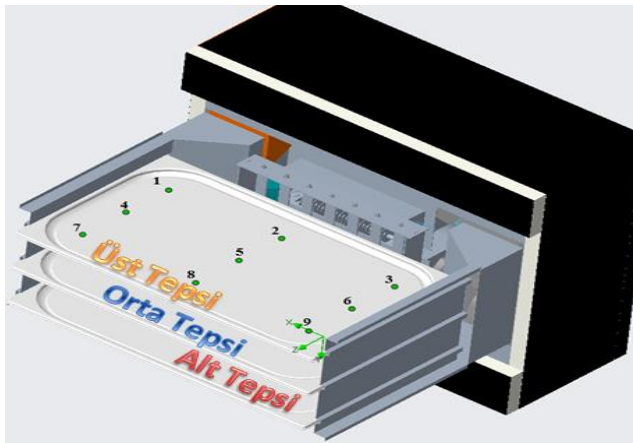


Şekil 10. Hareketli fan perdesi

Kanatlar, Şekil 11.'de görülen çalışma bölgesindeki boyalı alanı tarayacak şekilde 30° 'den başlayıp 60° , 90° , 120° ve 150° olarak gösterilen açısal konumlara doğru kendi merkezlerinde dönmektedirler. Daha sonra kanatlar tekrar başlangıç noktasına gelmekte ve hareket çevrimi bu şekilde devam etmektedir. Hareketli fan perdesinin çalışma çevrimindeki kanat açıları Şekil 11.'de gösterilmektedir.



Şekil 11.Hareketli fan perdesi çalışma çevrimi ve çalışma bölgesi



Şekil 12 Tepsi sıcaklık ölçüm noktaları

hedef sıcaklığına göre noktasal sapma miktarı ve sapma yüzleri de gösterilmiştir.

Analiz programından elde edilen farklı kanat açılarındaki (30° , 60° , 90° , 120° ve 150°) tepsi sıcaklıkları dağılımlarının tabloları ve görsel analiz çıktıları başlıklar halinde listelenmiştir. Şekil 12.'de görüldüğü gibi analiz ve testlerde tepsi üzerinde belirlenen 9 noktadan sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Alt, orta ve üst tepsi analiz yapılan tüm kanat açılarındaki noktasal sıcaklık dağılımlarının ortalaması Tablo 3'te sunulmaktadır. Bu tabloda

Tablo 3. Tüm kanat açılarının sıcaklık dağılımlarının ortalaması [$^{\circ}\text{C}$]

Sıcaklık Ölçüm Noktası	Üst Tepsi			Orta Tepsi			Alt Tepsi		
	Sıcaklık	Sapma	Sapma [%]	Sıcaklık	Sapma	Sapma [%]	Sıcaklık	Sapma	Sapma [%]
1	252.74	2.7	1.1	251.13	1.1	0.5	248.39	-1.6	-0.6
2	253.01	3.0	1.2	250.72	0.7	0.3	249.17	-0.8	-0.3
3	252.59	2.6	1.0	250.72	0.7	0.3	247.50	-2.5	-1.0
4	252.95	3.0	1.2	251.53	1.5	0.6	248.71	-1.3	-0.5
5	253.05	3.0	1.2	251.07	1.1	0.4	249.03	-1.0	-0.4
6	252.91	2.9	1.2	250.69	0.7	0.3	247.77	-2.2	-0.9
7	253.57	3.6	1.4	251.58	1.6	0.6	249.00	-1.0	-0.4
8	253.63	3.6	1.5	251.72	1.7	0.7	249.22	-0.8	-0.3
9	253.56	3.6	1.4	251.08	1.1	0.4	248.67	-1.3	-0.5
Ortalama	253.11	3.1	1.2	251.14	1.1	0.5	248.61	-1.4	-0.6

Analiz çıktılarındaki tepşiler üzerindeki sıcaklık farklarının homojen pişme için kabul edilebilir sıcaklık farkının 10°C 'den az olması sebebi ile teğetsel fan ve yeni fan gövdesi tasarımının imalat sürecine geçilmiş ve analiz sonuçları ile prototipi üretilen modelin deneysel sonuçları karşılaştırılmıştır.

2.3 Fırın izolasyon uygulama / optimizasyon çalışmaları

Tablo 64. Farklı izolasyon malzemelerinin ısı özellikleri

Malzeme	Isı İletim Katsayısı [W/mK]	En Yüksek Kullanım Sıcaklığı [$^{\circ}\text{C}$]
Paslanmaz Çelik	15.7 - 25.1	1 450
Cam Yünü	0.030 - 0.050	250
Tas Yünü	0.035 - 0.050	750
Seramik Elyaf	0.22	1 260
PTFE Teflon Bant	0.25	290
Normal Cam	1.3	1 550
Low E Kaplamalı Cam	1.8	1 550

Teğetsel fan modellenli turbo kuzine modeli/tasarımının ön, yan, üst ve arka yüzeylerine izolasyon uygulanarak fırın dış yüzey sıcaklıklarının elde edilmesine yönelik optimizasyon çalışması yürütülmüştür. Fırın dış yüzey sıcaklıkları TS EN 60335 Standardına uygun olacaktır. Proje

tasarım / geliştirme çalışmalarımızın bu aşamasında kullanılan izolasyon malzemelerinin ısı özellikleri Tablo 4'de sunulmuştur.

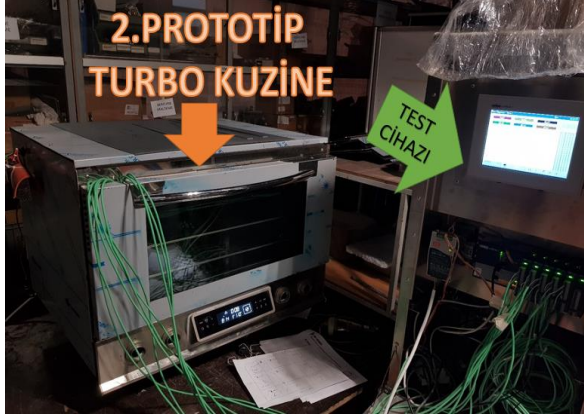
Toplam kalınlık 1,5 cm olacak şekilde farklı izolasyon malzemeleri tekil veya kompozit olarak kuzinenin yan, üst ve arka yüzeylerine uygulanırken, ön cam için 2 farklı malzeme alternatifi dikkate alınmıştır. Bu aşamadaki simülasyon çalışmalarımızda inceleme altına alınan 4 farklı izolasyon ve 2 ön cam seçimi kullanılmıştır. Analiz çalışmaları sonucu Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Modelin dış yüzeyindeki sıcaklık değerleri [$^{\circ}\text{C}$]

İzolasyon Kombinasyonu	Üst Yüzey		Yan Yüzey		Arka Yüzey		Ön Yüzey	
	En Yüksek	En Düşük	En Yüksek	En Düşük	En Yüksek	En Düşük	En Yüksek	En Düşük
Cam Yünü Normal Cam	74.42	49.46	83.49	47.27	198.78	50.40	154.64	52.83
Tas Yünü Teflon Bant Low E Cam	34.93	29.66	44.89	33.02	74.09	36.80	78.25	47.46
Cam Yünü Teflon Bant Low E Cam	34.88	29.27	47.53	31.86	94.34	36.35	79.29	40.28
Seramik Elyaf Teflon Bant Low E Cam	34.57	29.50	44.05	29.10	106.42	42.39	77.29	37.31

Yine Tablo 5.'de bu seçimler neticesinde turbo kuzinenin ön, yan, üst ve arka yüzeyleri için elde edilen maksimum ve minimum sıcaklık değerleri verilmiştir. Yalıtım olarak taş yünü-teflon bant ikilisi ile ön camda kullanılan Low E Cam en iyi sonuçları vermektedir. Bu sıcaklık değerlerin tamamı fırın dış yüzey sıcaklık üst değerleri ile ilgili TS EN 60335 Standardına uygun olmaktadır.

3.Test çalışmaları



Şekil 14. Turbo kuzine ve test cihazı

Analiz sonuçlarına göre tasarımı tamamlanan fan gövdesi ve fan perdesi üretimi tamamlanmış ve yapılan analizin deneysel metotlar ile doğrulanması amaçlanmıştır. Üretilen cihaz 3 tepsi kapasiteli, tepsiler arası mesafe 78 mm dir. Cihazın en x boy x derinliği 800 x 725 x 750 mm boyutlarındadır. Endüstriyel fırınlarda ön ısıtma süresi çok önemli bir kavram olup, ön ısıtma süresinin kısa olması hem enerji tasarrufu hem de daha az bekleme süresi olarak kabul edebiliriz. Ön ısıtma süresinde cihazın gücü önemli bir parametre olup kullanılan izolasyon da ekilidir. Tasarımda kullandığımız teflon bant – taş yünü ikilisi ısıyı izole etmede önemlidir. Testte pişirim kabini 200°C sıcaklığa ulaşana kadar zaman tutulmuştur. Prototip yaklaşık 12dk 15s (<13 dakika) de hedef sıcaklığına ulaştığı gözlenmiştir. Tepsi sıcaklıklarının noktasal dağılımını ölçebilmek için proje kapsamında satın alınan test cihazı ve üretimi gerçekleştirilen 2.prototip turbo kuzine Şekil 14.'de görülmektedir.

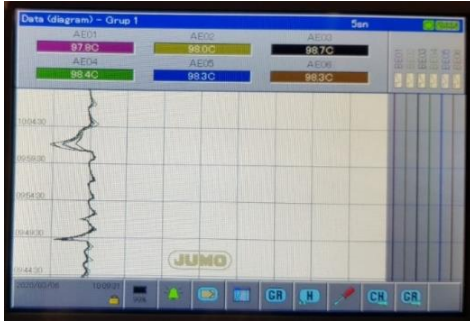
Tepsi sıcaklıkları ölçülürken analiz programında da olduğu şekilde konumlandırılmıştır. Şekil 15. 'de görülen tel tepsi üzerine test cihazının sıcaklık ölçüm problemleri sabitlenerek sıcaklık ölçüm aparatı hazırlanmıştır. Prototip testlerinde hazırlanan aparat, ölçüm yapılmak istenen alt, orta veya üst raftaki GN1/1 gastronom tepsilerin üzerine Şekil 16.'de görüldüğü üzere konumlandırılmıştır.



Şekil 15. Sıcaklık ölçüm aparatı



Şekil 16. GN tepsi üzerindeki sıcaklık ölçüm aparatı



Şekil 17. Test cihazı sıcaklık ölçüm ekran

Prototip testlerinden elde edilen tepsi sıcaklıklarının noktasal dağılımı Şekil 17’de görüldüğü gibi test cihazı ekranından alınıp Excel’de tablo yapılarak raporlanmıştır. İlgili tabloda test cihazı vasıtasıyla ölçümü yapılan noktasal sıcaklık dağılımı sonuçları ile birlikte hesaplamalarla elde edilen hedef sıcaklık değerine göre fark tablosu ve hedef sıcaklık sapma yüzdeleri tablo olarak sunulmuştur.

Turbo kuzinenin 100°C hedef sıcaklığındaki testlerde elde edilen sıcaklık dağılımı Tablo 6’da sunulmuştur.

Tablo 6.100°C Hedef sıcaklığındaki prototip testi noktasal sıcaklık dağılımı.

Sıcaklık Ölçüm Noktası	Üst Tepsi			Orta Tepsi			Alt Tepsi		
	Sıcaklık [°C]	Sapma [°C]	Sapma [%]	Sıcaklık [°C]	Sapma [°C]	Sapma [%]	Sıcaklık [°C]	Sapma [°C]	Sapma [%]
1	99.5	-0.5	-0.5	101.5	1.5	1.5	97.8	-22	-2.2
2	100.9	0.9	0.9	102.5	2.5	2.5	98	-20	-2
3	100.4	0.4	0.4	101.9	1.9	1.9	987	-13	-1
4	102.8	2.8	2.8	102.3	2.3	2.3	98.4	-1.6	-1.6
5	97.5	-2.5	-2.5	100.5	0.5	0.5	98.3	-1.7	-1.7
6	98.6	-1.4	-1.4	101.2	1.2	1.2	98.3	-1.7	-1.7
7	97.6	-2.4	-2.4	101.1	1.1	1.1	98	-20	-2
8	98.7	-1.3	-1.3	102.4	2.4	2.4	987	-13	-1
9	96.8	-3.2	-3.2	101.2	1.2	1.2	97.3	-27	-2.7
Ortalama	99.2	-0.8	-0.8	101.6	1.6	1.6	98.2	-1.8	-1.8

Turbo kuzinenin 200°C hedef sıcaklığındaki testlerde elde edilen sıcaklık dağılımı Tablo 7’de sunulmuştur.

Tablo 7.200°C Hedef sıcaklığındaki prototip testi noktasal sıcaklık dağılımı

Sıcaklık Ölçüm Noktası	Üst Tepsi			Orta Tepsi			Alt Tepsi		
	Sıcaklık [°C]	Sapma [°C]	Sapma [%]	Sıcaklık [°C]	Sapma [°C]	Sapma [%]	Sıcaklık [°C]	Sapma [°C]	Sapma [%]
1	200.7	0.7	0.3	202.5	2.5	1.3	199.3	-0.7	-0.3
2	200.7	0.7	0.3	203.5	3.5	1.8	200.7	0.7	0.3
3	199.6	-0.4	-0.2	202.9	2.9	1.5	200	0.0	0
4	200.6	0.6	0.3	203.3	3.3	1.7	200.3	0.3	0.2
5	199.5	-0.5	-0.3	201.5	1.5	0.8	200.3	0.3	0.2
6	204.8	4.8	2.4	202.2	2.2	1.1	200.4	0.4	0.2
7	202.4	2.4	1.2	202.1	2.1	1.1	200.7	0.7	0.3
8	202.9	2.9	1.5	203.4	3.4	1.7	200	0.0	0
9	201.5	1.5	0.8	202.2	2.2	1.1	199.8	-0.2	-0.1
Ortalama	201	1.4	0.7	203	2.6	1.3	200	0.2	0.1

Kuzine Fırının testlerinde dış yüzey sıcaklıkları ölçülmüş ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

Ön kapak dış cam (3.cam) sıcaklığı 75°C ve kapaktaki paslanmaz sac sıcaklığı 78°C, dış gövde sağ yan sıcaklığı 68°C ve sol yan sıcaklığı 65°C (Yan), dış gövde arka sac sıcaklığı ise 61°C olduğu gözlemlenmiştir. Prototipte dış gövde arka sacına bağlanan soğutma fanı bulunmaktadır.

4.Sonuç ve Tartışma

Yapılan çalışmada radyal ve teğetsel fanların fırınlardaki hava dolaşımı performansı nümerik olarak analiz edilmiş, ardından çıkan sonuçlar deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Bununla birlikte bu çalışmada pişirme hacmine sıcak hava kanatlar vasıtası ile dinamik olarak yönlendirilmiş, pişirme hacmi düzenli bir şekilde taranarak homojen sıcaklık dağılımı hedeflenmiştir.

Hem analiz hem de deneysel çalışmalarda kuzine fırınlarının tepsiler üzerindeki sıcaklık dağılımı ölçülmüştür. Radyal fanlar ile üretilecek kuzine fırınlarda tepsiler arası sıcaklık farklılıklarının 10°C'den fazla olmasından dolayı homojen pişirme problemi olma olasılığı yüksek ihtimal olacağından dolayı teğetsel fanların radyal fanlara göre turbo kuzine fırın için havayı kabin içinde homojen dağıtma performansının yeni tasarlanan fan geometrisi ile birlikte için daha uygun olduğu tespit edilmiştir radyal fan uygulamalı kuzinenin prototip imalatı iptal edilip yerine teğetsel fanlar ile tasarım ve analiz çalışmaları yapılması kararlaştırılmıştır.

Prototip, deneysel ve nümerik çalışmalar İNOKSAN MUTFAK A.Ş Ar-Ge Merkezi bünyesinde TÜBİTAK –TEYDEB projesi (Proje No: 3170730) kapsamında yapılmış olup, prototip testlerinde, tepsi sıcaklıklarının noktasal dağılımının sıcaklık farklarının 10°C'nin altında kaldığı gözlenmiştir. Bu değer homojen pişirme için hedef kriterler arasında olup analiz sonuçları ile örtüşmekte olduğu görülmüştür. Fırınlardan yalıtımı için farklı yalıtım malzemeleri kullanılmış ve analiz sonuçlarına göre sıcaklık homojenitesine katkıda bulunan taş yünü - teflon bant seçilmiştir. Bu sonuçlara göre de fırının ilgili dış yüzey sıcaklıkları prototip testlerinde ölçülmüş ve TS EN 60335 standardına uygun olduğu gözlemlenmiştir.

Semboller ve kısaltmalar

Semboller

ρ	: Yoğunluk [kg/m^3]	P	: Basınç [Pa]	%	: Yüzde
∇	: Nabla operatörü	τ_{ij}	: Kayma gerilmesi [Pa]	$W/(mK)$: Isı iletim katsayısı
V	: Hız [m/s]	C	: Celsius	K	: Kelvin
g	: Yerçekimi ivmesi [m/s^2]	W	: Watt	m	: Metre
σ_{ij}	: Gerilme tensörü	$^\circ$: Derece	s	: Saniye
kg	: Kilogram	rad	: Radyan	mm	: Milimetre

Kısaltmalar

CFD	Computational Fluid Dynamics	TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Kurumu
HAD	Hesaplamalı Akışkanla Dinamiği	TEYDEB	Teknoloji ve Yenilik Destek Programları Başkanlığı
CAD	Computer Aided Design	A.Ş.	Anonim Şirketi
TS	Türk Standartları	Ar-Ge	Araştırma Geliştirme
GN	Gastronomik Norm		

Finansal Destek

Makalenin hazırlanmasında herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

Yazar katkısı

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamışlardır.

Çıkar çatışma beyanı

Yazarlar olarak herhangi bir çıkar çatışmasının olmadığını beyan ederiz.

Etik kurul

Makale etik kurul onayı gerektirmemektedir.

Kaynaklar

- [1] Smolka, J., Nowak, A. J., Rybarz, D., Improved 3-D temperature uniformity in a laboratory drying oven based on experimentally validated CFD computations, *Journal of Food Engineering*, Vol. 97, pp. 373-383, (2010)
- [2] Yılmaz, M.S., Kemerli, T., Isleroglu, H., Baking kinetics of muffins in convection and steam assisted hybrid ovens (baking kinetics of muffin), *Journal of Food Engineering*, Vol. 119, pp. 483-489, (2013)
- [3] Verboven, P., Scheerlinck, N., De Baerdemaeker, J., Computational fluid dynamics modelling and validation of the isothermal airflow in a forced convection oven, *Journal of Food Engineering*, Vol. 43, pp. 41-53, (2000)
- [4] Sparrow, E. M., Abraham, J. P., A computational analysis of the radiative and convective processes that take place in preheated and non-preheated ovens, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 24, pp. 25-37, (2003)
- [5] Stigter, J. D., Scheerlinck, N., Nicolai, B., Optimal heating strategies for a convection oven, *Journal of Food Engineering*, Vol. 48, pp. 335-344, (2001)
- [6] Colla, M., Rainieri, S., Pagliarini, G., Finite-element analysis of a rotary oven for bread, *Computers & Structures*, Vol. 64, pp. 1097-1112, (1997)
- [7] Unklesbay, K., Boza C. A., Unklesbay, N., Air temperature transfer function of a convection oven, *Food Control*, Vol. 8, pp. 39-43, (1997)
- [8] Khatir, Z., Paton, J., Thompson, H., Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small-scale bread-baking oven, *Applied Energy*, Vol. 89, pp. 89-96, (2012)
- [9] Therdthai, N., Zhou, W. B., Adamczak, T., Two-dimensional CFD modelling and simulation of an industrial continuous bread baking oven, *Journal of Food Engineering*, Vol. 60, pp. 211-217, (2003)
- [10] Navaneethakrishnan, P., Srinivasan, P. S. S., Dhandapani, S., Numerical and experimental investigation of temperature distribution inside a heating oven, *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 34, pp. 275-288, (2004)
- [11] Burhan, M., Efeler, E., Özalp A.A., Turbo fırın radyal ve tanjansiyel fanlarının operatif performansının nümerik olarak incelenmesi, *International Symposium on Engineering Natural Sciences and Architecture*, (2020)
- [12] Kışın, B., 3 tepsili endüstriyel gıda fırınının pişirme hacmi içindeki momentum ve ısı mekanizmalarının farklı çalışma şartlarında nümerik incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, (2020)
- [13] <https://www.aksamotorfan.com>, (2022)