



Numerical and experimental investigation of the effect of motor rotation speed and direction on the velocity and temperature distribution inside the cavity in domestic oven with fan

Mustafa Önal^{1,2*}, Özden Ağra¹, Mustafa Kemal Sevindir¹

¹Department of Mechanical Engineering, Yıldız Technical University, 34349, Istanbul, Türkiye

²Arçelik Cooking Appliances Plant R&D, 14300, Bolu, Türkiye

Highlights:

- Circulation flow rate measurement in the cavity of domestic oven with fan
- Determination of velocity and temperature distribution inside the cavity
- Investigation of the effects of fan rotation speed and direction on performance

Keywords:

- Domestic cooking appliances
- Velocity distribution
- Temperature distribution
- Rotation speed
- CFD

Article Info:

Research Article

Received: 23.03.2024

Accepted: 01.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1457567

Acknowledgement:

The authors would like to thank the Research and Development Unit of Arçelik Cooking Appliances Enterprise for their support.

Correspondence:

Author: Mustafa Önal
e-mail: mustafa.onal@beko.com
phone: +90 544 678 7646

Graphical/Tabular Abstract

Today, with the development of innovative designs and production technologies, the production of environmentally friendly home appliances is on the agenda. Within the scope of this study, in-cavity circulation flow rate, velocity and temperature distribution at different rotation speeds and directions of the fan-motor group in domestic oven with fan were investigated numerically and experimentally. The comparative results of the experimental and numerical temperature analyses performed on the base model (1800 rpm-clockwise) and the error rates are given in Figure A.

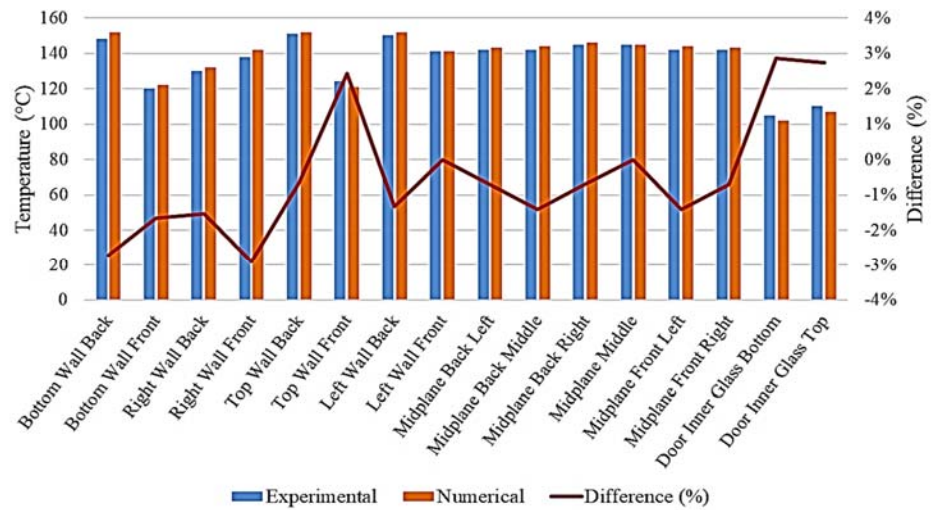


Figure A. Experimental-numerical analysis temperature differences at 1800 rpm rotation speed and clockwise rotation conditions

Purpose: The purpose of this study is to compare experimentally and numerically the in-cavity velocity and temperature distributions obtained for different rotation speeds and different rotation directions of the fan used in a domestic oven with a fan and to determine the parameter values that will provide homogeneous and fast cooking at the end of the study.

Theory and Methods: In this study, the motor rotation speed in the cavity was examined from 600 rpm to 2400 rpm. At the same time, velocity data were taken experimentally with a hot wire probe from local points on three planes determined in the cavity. In addition, experimental temperature data were taken with thermocouples. In parallel with the study, Ansys Fluent program was used in the numerical solution phase.

Results: As a result of the study, experimental and numerical results were found to be compatible with each other. Among the turbulence models examined, the k-w SST model was found to be the most stable and accurate model. When the outputs of the numerical thermal studies were compared with the experimental data, the highest deviation of 3% was found.

Conclusion: It was observed that as the rotational speed of the fan-motor group increased, the average velocity and standard deviation values on the planes in the cavity also increased. For homogeneous cooking, it was determined that the standard deviation value on the planes was the minimum and the average temperature on the planes was the closest to the targeted temperature with a motor rotation speed of ~2272 rpm and clockwise motor rotation direction.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Fanlı pişirici cihazlarda motor dönüş devri ve yönünün kavite içi hız ve sıcaklık dağılımına etkisinin sayısal ve deneysel incelenmesi

Mustafa Önal^{1,2*}, Özden Ağra¹, Mustafa Kemal Sevindir¹

¹Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, 34349, İstanbul, Türkiye

²Arçelik Pişirici Cihazlar İşletmesi Araştırma ve Geliştirme Birimi, 14300, Bolu, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Fanlı pişirici cihaz kavite içi sirkülasyon debisi ölçümü
- Kavite içi hız ve sıcaklık dağılımının belirlenmesi
- Fan dönüş devri ve yönünün performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 23.03.2024

Kabul: 01.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1457567

Anahtar Kelimeler:

Ev tipi pişirici cihaz,
hız dağılımı,
sıcaklık dağılımı,
dönüş devri,
HAD

ÖZ

Günümüzde tüketicilerin çevre bilinci arttıkça, enerji tasarruflu ev aletlerine olan talep de artmaktadır. Dolayısıyla yenilikçi tasarımlar ve üretim teknolojilerinin gelişmesi ile birlikte çevre dostu ev aletlerinin üretimi gündemde olmaktadır. Çalışma kapsamında fanlı pişirici cihazlarda fan-motor grubunun farklı dönüş devirlerinde ve yönlerinde kavite içi sirkülasyon debisi, hız dağılımı ve sıcaklık dağılımı sayısal ve deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmada kavite içinde 600 rpm' den 2400 rpm' e kadar motor dönüş devri taraması yapılmıştır. Kavite içerisinde belirlenen üç düzlem üzerindeki lokal noktalardan hız verileri deneysel olarak sıcak tel probu ile alınmıştır. Çalışmaya paralel olarak sayısal çözüm aşamasında Ansys Fluent programı kullanılarak farklı türbülans modelleri incelenmiş ve en kararlı, en doğru sonucu veren model olarak k-w SST modeli uygun bulunmuştur. Çalışma sonucunda deneysel ve sayısal sonuçların birbirlerine uyumlu olduğu görülmüştür. Fan-motor grubunun dönüş devri arttıkça düzlemler üzerindeki kavite içi ortalama hız ve standart sapma değerlerinin de arttığı görülmüştür. Homojen pişirme için düzlemler üzerindeki standart sapma değerleri minimum ve düzlemler üzerindeki ortalama sıcaklığın hedeflenen sıcaklığa en yakın olduğu koşulun ~2272 rpm motor dönüş devri ve saat yönü motor dönüş yönü olduğu belirlenmiştir. Yapılan sayısal ısı analizlerin çıktıları deneysel veriler ile karşılaştırıldığında en yüksek %3' lük bir sapma olduğu tespit edilmiştir.

Numerical and experimental investigation of the effect of motor rotation speed and direction on the velocity and temperature distribution inside the cavity in domestic oven with fan

H I G H L I G H T S

- Circulation flow rate measurement in the cavity of domestic oven with fan
- Determination of velocity and temperature distribution inside the cavity
- Investigation of the effects of fan rotation speed and direction on performance

Article Info

Research Article

Received: 23.03.2024

Accepted: 01.02.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1457567

Keywords:

Domestic cooking
appliances,
velocity distribution,
temperature distribution,
rotation speed,
CFD

ABSTRACT

Today, as consumers become more environmentally conscious, the demand for energy-efficient household appliances is increasing. Therefore, with the development of innovative designs and production technologies, the production of environmentally friendly home appliances is on the agenda. Within the scope of this study, in-cavity circulation flow rate, velocity and temperature distribution at different rotation speeds and directions of the fan-motor group in domestic oven with fan were investigated numerically and experimentally. In this study, the motor rotation speed in the cavity was examined from 600 rpm to 2400 rpm. At the same time, velocity data were taken experimentally with a hot wire probe from local points on three planes determined in the cavity. In parallel with the study, different turbulence models were examined using Ansys Fluent program in the numerical solution phase. Among the turbulence models examined, the k-w SST model was found to be the most stable and accurate model. As a result of the study, experimental and numerical results were found to be compatible with each other. It was observed that as the rotational speed of the fan-motor group increased, the average velocity and standard deviation values on the planes in the cavity also increased. For homogeneous cooking, it was determined that the standard deviation value on the planes was the minimum and the average temperature on the planes was the closest to the targeted temperature with a motor rotation speed of ~2272 rpm and clockwise motor rotation direction. When the outputs of the numerical thermal studies were compared with the experimental data, the highest deviation of 3% was found.

1. Giriş (Introduction)

Günümüzde; özellikle evlerde kullanılan fırınların performansının iyileştirilmesi, içindeki sıcaklık dağılımının homojenleştirilmesi ve enerjinin daha verimli kullanılmasına yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Fırın performansını belirleyen en önemli parametreler; enerji tüketimi ve pişirme kalitesidir. Dünyadaki enerjinin verimli kullanılması gün geçtikçe önem kazanmaktadır. Beyaz eşya üreticileri pazar paylarını muhafaza edip rakipleri ile rekabet edebilmek için enerji verimli ürünler hakkında çalışmalarını gün geçtikçe arttırmaktadır. Makale konusu olan fırınlar ile ilgili literatür ve patent araştırmasına bakıldığında fanlı elektrikli fırınların performansının artırılmasına yönelik literatürde çalışmalar bulunmaktadır. Bunlarda bazıları; Piaia vd. [1] tarafından elektrikli endüstriyel bir fırında sadece saat yönünün tersi yönde 1730 d/d sabit devirde dönen turbo motora sahip fırın içinde bulunan dört nokta üzerinden deneysel veriler ile sayısal çalışma sonucunda elde edilen hız değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Sayısal çalışmada hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) kullanılarak, türbülanslı akış, kararlı durum, üç boyutlu akış ve izotermal koşul varsayılmıştır. Deneysel çalışma 0-20 m/s hız aralığında gerçekleştirilmiş olup deneysel ölçümler ile sayısal analiz sonuçları arasında %22 sapma olduğu belirtilmiştir.

Verboven vd. [2] yaptıkları çalışmada endüstriyel elektrikli bir fırında üç boyutlu izotermal hava akışını incelemek için hesaplamalı akışkanlar dinamiğinden (HAD) yararlanmışlardır. Sayısal analiz çalışmasında türbülans modeli olarak k-ε RNG modeli kullanılmış ve ışınlı ısı transferi ihmal edilmiştir. Deneysel çalışmada sıcak tel probu kullanılarak fırın içi belli bölgelerden hız ölçümü yapılmış ve sayısal analizler ile deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen hız değerlerinin birbirleri ile %22' lik sapma gösterdiği tespit edilmiştir. Kişin vd. [3] yaptıkları bir çalışmada çok tepsili endüstriyel bir fırında minimum elektrik tüketimi ile maksimum verimi alarak homojen pişirme yapmak için fırın içi akış analizleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan nümerik çalışmada floEFD programı kullanılmıştır. Çalışmada ışınlı ısı transferi ihmal edilmiştir. Sayısal analiz sonuçlarına göre fırın içinde yer alan 10 tepsi hesaba katılarak karşılaştırma yapıldığında en soğuk ve en sıcak bölge arasındaki farkın 50,2°C olduğu tespit edilmiştir. Yapılmış olan bu çalışma sadece sayısal analiz çalışması olup deneysel doğrulama ve iyileştirme çalışmalarını içermemektedir.

Smolka vd. [4] yaptıkları çalışmada endüstriyel bir kurutucuda ısıtıcı ve fan sonrası hava akış yolunun farklı varyasyonlarını deneyerek kavite içi sıcaklık dağılımını homojen hale getirmeye çalışmışlardır. Yapılan çalışma kapsamında sayısal türbülans modeli olarak k-ε Standard modeli kullanılmıştır. Smolka vd. [5] 2013 yılında yaptıkları çalışmada ise fırın içindeki hava hızlarını modellemeyi amaçlamışlardır. Çalışma kapsamında tek bir yönde ve tek bir devirde dönen motor kullanılmıştır.

Mirade vd. [6] yaptıkları çalışmada endüstriyel bir fırında havanın hız ve sıcaklık profillerini hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile hesaplamış ve %20 hata payı ile gerçek sonuçlara yaklaşmışlardır. Therdtai vd. [7] 50 tepsili endüstriyel bir fırında fırın içi hava hız dağılımını incelemiş, Khatir vd. [8] yaptıkları çalışmada ışınlı ısı transferini ihmal ederek ekmek pişirmek için kullanılan bir fırında kavite içi akış ve sıcaklık dağılımlarını HAD analizi ile incelemişlerdir.

Boulet vd. [9] yaptıkları çalışmada fırında akış ve ısı transferini modellemeyi hedeflemiş, Stigter vd. [10] kavite içindeki sıcak hava dağılımı ve havadan gıda yüzeyine olan taşınım ısı transferini incelemişlerdir. Mistry vd. [11] elektrikli pişirici fırında doğal taşınım ve ışınlı etkisini sayısal çalışma ile incelenmiş, Al-Nasser vd. [12]

ise yaptıkları çalışmada endüstriyel bir fırında ekmek pişirmeyi simüle etmek için sayısal bir analiz gerçekleştirmişlerdir. Sayısal çalışmada ekmek özellikleri ve hacim değişikliği hesaba katılarak fırın içinde akış, ısı ve kütle transferleri incelenmiştir.

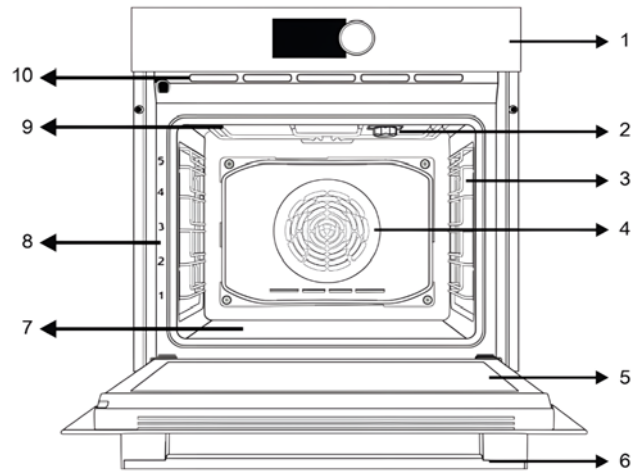
Shaughnessy ve Newborough [13] tarafından yapılan çalışmada ev tipi bir fırında enerji tüketimini düşürmek ve enerji test süresini kısaltmak için düşük emisiviteli bir fırın oluşturulmuş, çalışma sonucunda mevcut fırında test süresi 51 dakika ve enerji tüketimi değerleri 977 Wh olurken, oluşturulan düşük emisiviteli prototip fırında test süresi 34 dakika ve enerji tüketimi 624 Wh düşürülmüştür. Çalışma sadece deneysel bir çalışma olup sayısal analiz içermemektedir.

Yalçınkaya ve Durmaz [14] tarafından yapılan çalışma kapsamında homojen akış ve sıcaklık dağılımı elde edebilmek için rib tasarımları incelenmiştir. Çalışmanın sayısal çözüm aşamasında k-w SST, k-ε Realizable ve k-ε Standart türbülans modelleri karşılaştırılmış olup en uygun modelin k-w SST olduğuna karar verilmiştir.

Piştirici cihazlarda kavite içinde kullanılan motorlar genellikle sabit tek dönüş devrine ve yönüne sahiptir. Bu motorlara alternatif olarak piştirici cihazlar için yeni bir teknoloji olan farklı dönüş devri ve yönüne sahip motorlar geliştirilmiştir. Piştirici cihazlarda bu motorların kullanımı için literatürde devir ve debi optimizasyonuna ait az sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında homojen bir pişirme elde edebilmek için motor dönüş devri ve dönüş yönünün kavite içi hız ve sıcaklık dağılımı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

2. Materyal ve Metod (Material and Method)

Ev tipi ankastre bir fırının genel şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



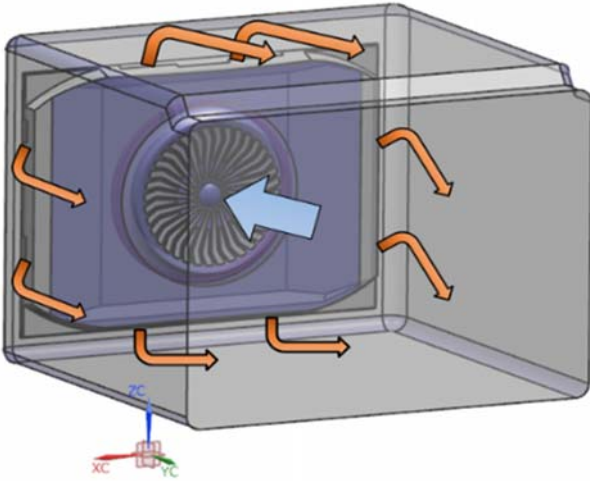
Şekil 1. Ankastre fırın yapısı: (1) Kontrol paneli, (2) Lamba, (3) Tel raflar, (4) Fan ve etrafında turbo ısıtıcı, (5) Kapak, (6) Tutamak, (7) Alt ısıtıcı (sac altında), (8) Raf konumları, (9) Üst ısıtıcı, (10) Havalandırma slotları

(Built-in oven: (1) Control Panel, (2) Lamb, (3) Wire shelf, (4) Fan and turbo heater, (5) Door, (6) Handle, (7) Bottom heater, (8) Wire shelving positions, (9) Top heater, (10) Ventilation slots)

Geleneksel ev tipi fanlı piştirici cihazlarda pişirme süresini kısaltmak ve homojen pişirme elde etmek için fan-motor grubu kullanılmaktadır. Kavite içerisinde yer alan fan bir emiş bölgesinden kavite içerisindeki havayı emerek basma bölgelerinden yine kavite içerisine basmaktadır. Kavite içerisinde durağan hava radyal bir fan

yardımla hareketlendirilerek sabit havanın sirkülasyonu sağlanmakta ve kavitenin her bölgesine ulaşması istenmektedir.

Fan yardımıyla kavite içerisinde elde edilen hava hızları birbirine ne kadar yakınsa o kadar iyi homojen pişirme elde edilmektedir. Buna paralel olarak kavite içerisindeki sıcaklıkların birbirine yakın olması da homojen pişirmeyi sağlamaktadır. Aynı zamanda kavite içerisinde hava ne kadar hızlı ise taşınım ısı transferini doğrudan etkilediği için pişirme de o kadar hızlı olacaktır.



Şekil 2. Kavite içi hava hareketi (Air movement inside the cavity)

Şekil 2’de görüldüğü gibi kavite içerisinde yer alan radyal turbo fan hava yönlendirme saçının emiş bölgesinden emiş yaparak yine hava yönlendirme saçının basma bölgelerinden havayı kavite içine basmaktadır. Bu sayede kavite içinde bulunan havayı hareketlendirerek sabit havanın sirkülasyonu sağlanmaktadır. Kullanılan fanın emiş hattındaki debi ölçülerek sirkülasyon debisi belirlenebilmektedir.

Fırın içi hava sirkülasyonunda etkin rol oynayan turbo fan, hava yönlendirme saçı emiş ve basma slotları Şekil 3’de verilmiştir.

Literatür taramasında da görüldüğü üzere ev tipi fanlı pişirici cihazlarda genellikle kullanılan fan sabit tek devir ve sabit tek dönüş yönünde dönmektedir. Bu çalışma kapsamında literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak fanlı bir pişirici cihazda kullanılan fanın farklı dönüş devirleri ve farklı dönüş yönleri için elde edilen kavite içi hız dağılımları ve sirkülasyon debileri deneysel ve sayısal olarak belirlenmiş ve mukayese edilmiştir. Aynı zamanda çalışmanın sonunda homojen ve hızlı pişirmeyi sağlayacak parametre değerleri de belirlenmiştir.

2.1. Deneysel Çalışma (Experimental Study)

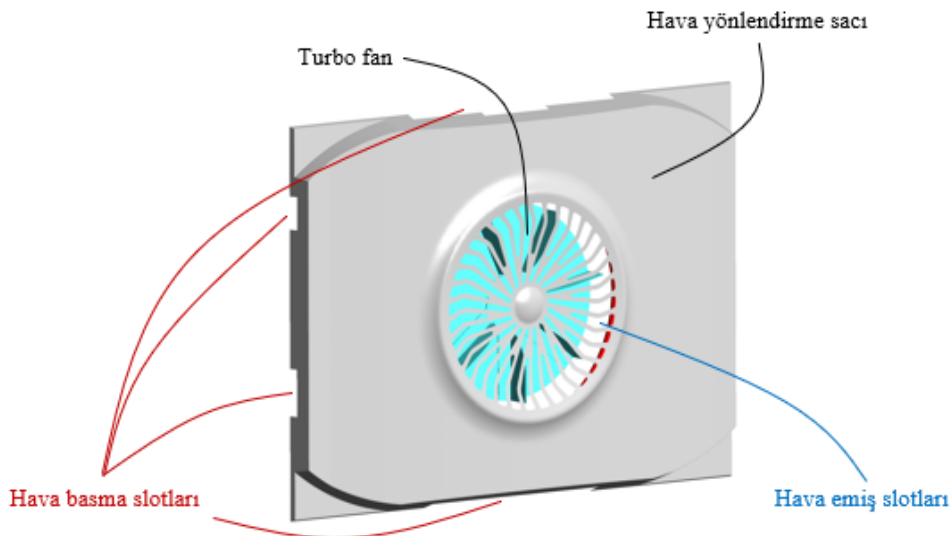
Deneysel çalışma kavite içi sirkülasyon debisi ölçümü, kavite içi hız dağılımının ve kavite içi sıcaklık dağılımının belirlenmesi şeklinde üç fazdan oluşmaktadır.

2.1.1. Kavite içi sirkülasyon debisi ölçümleri (Circulation flow measurements inside the cavity)

Yapılan deneysel çalışma kapsamında ev tipi fanlı pişirici cihazda kullanılan fanın farklı dönüş devirleri ve yönleri için elde edilen kavite içi sirkülasyon debileri AMCA 210-85 standartına göre standart rüzgar tüneli aracılığıyla ölçülmüştür [15]. Sirkülasyon debi ölçümü yapılan rüzgar tünelinde basınç ölçüm noktaları, lüleler, akış düzelticiler ve fan AMCA 210-85 standardı baz alınarak oluşturulmuş olup standarta göre debisi ölçülmek istenen cihaz tünele bağlanmıştır. Cihazdan çıkan hava tünel içinde sırasıyla akış düzeltici, lüle ve tekrar akış düzelticiden geçmektedir. Tünel içinde yer alan lüleler sayesinde lüleden önce ve sonra olmak üzere bir bölümden diğer bölüme geçişte kesit alanı değişmekte ve bu sayede iki bölüm arasında hava hızları ve basınçları da değişmektedir. Lüleden önce ve sonra oluşan basınç farkından yararlanarak Bernoulli prensibiyle hava debisi belirlenebilmektedir.

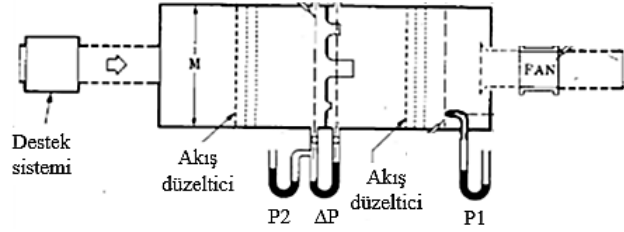
Rüzgâr tünelinde debi ölçümü pişirici cihazın kavitesi içerisinde yer alan hava yönlendirme saçındaki emiş hattının doğrudan tünel girişine bağlanması ile yapılmaktadır. Deneysel ölçümlerde kullanılan rüzgâr tüneline ait görsel Şekil 5’de görülmektedir.

Kavite içi sirkülasyon debisi, motor dönüş devri 600 rpm’ den 2400 rpm’ e kadar 300 rpm’ lik artışlarla taranmıştır. Fanın dönüş yönü



Şekil 3. Turbo fan ve hava yönlendirme saçı (Turbo fan and air baffle sheet)

olarak da saat yönü ve saat yönünün tersi için ölçümler yapılmıştır. Bu kapsamda oluşturulan deneysel tasarım tablosu Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 4. AMCA 210-85 standartında yer alan debi ölçümü şematik gösterimi
(Schematic representation of flow measurement in AMCA 210-85 standard)



Şekil 5. Rüzgar tüneli görseli (Wind tunnel image)

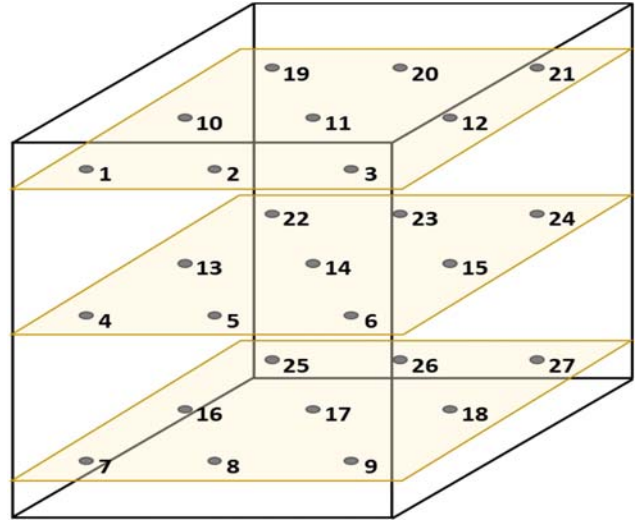
Tablo 1. Deneysel tasarım (Experimental design)

	Turbo Motor Dönüş Devri (rpm)	Turbo Motor Dönüş Yönü
1	600	Saat yönü
2	900	Saat yönü
3	1200	Saat yönü
4	1500	Saat yönü
5	1800	Saat yönü
6	2100	Saat yönü
7	2400	Saat yönü
8	600	Saat yönünün tersi
9	900	Saat yönünün tersi
10	1200	Saat yönünün tersi
11	1500	Saat yönünün tersi
12	1800	Saat yönünün tersi
13	2100	Saat yönünün tersi
14	2400	Saat yönünün tersi

Kavite içi motor dönüş devri dönen parçaların devir ve frekans ölçümü için kullanılan stroboskop ile ölçülmüştür.

2.1.2. Kavite içi hız dağılım ölçümleri (Measurements of velocity distributions inside the cavity)

Kavite içi hız dağılımlarını ölçmek üzere kavitede üst, orta ve alt olmak üzere üç düzlem belirlenmiştir. Her bir düzlemde 9 nokta seçilmiş olup toplamda 27 noktadan hız ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Hız ölçüm noktalarının şematik gösterimi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Kavite içi üst, orta, alt düzlem ve hız ölçüm noktaları
(Top, middle, bottom plane and velocity measurement points inside the cavity)

Kavite içerisinde belirlenen noktalardan hız ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için teknik özellikleri Tablo 2’de görülen sıcak tel prob kullanılmıştır. Sıcak tel prob ile hız ölçümünün tekniği bir akışa yerleştirilen elektriksel olarak ısıtılmış bir algılama elemanından gelen ısı akışı ile yerel akışkan hızı arasındaki ilişkiye dayanarak ölçüm yapar [16].

Tablo 2. Sıcak tel prob teknik özellikler
(Hot wire probe technical specifications)

Ölçüm aralığı	0-30 m/s
Doğruluk	0 ... 20 m/s → ± 5% 20,01 ... 30 m/s → ± 4%
Çözünürlük	0,01 m/s

Kavite içindeki hızların belirlenebilmesi için kavitenin sağından ve solundan prob girebilecek büyüklükte delikler açılmış ve ilgili noktanın hız ölçümü için kaviteye açılan delikten sıcak tel prob kavitenin içerisine yerleştirilmiştir.

2.1.3. Kavite içi sıcaklık dağılımları ölçümleri (Measurements of temperature distributions inside the cavity)

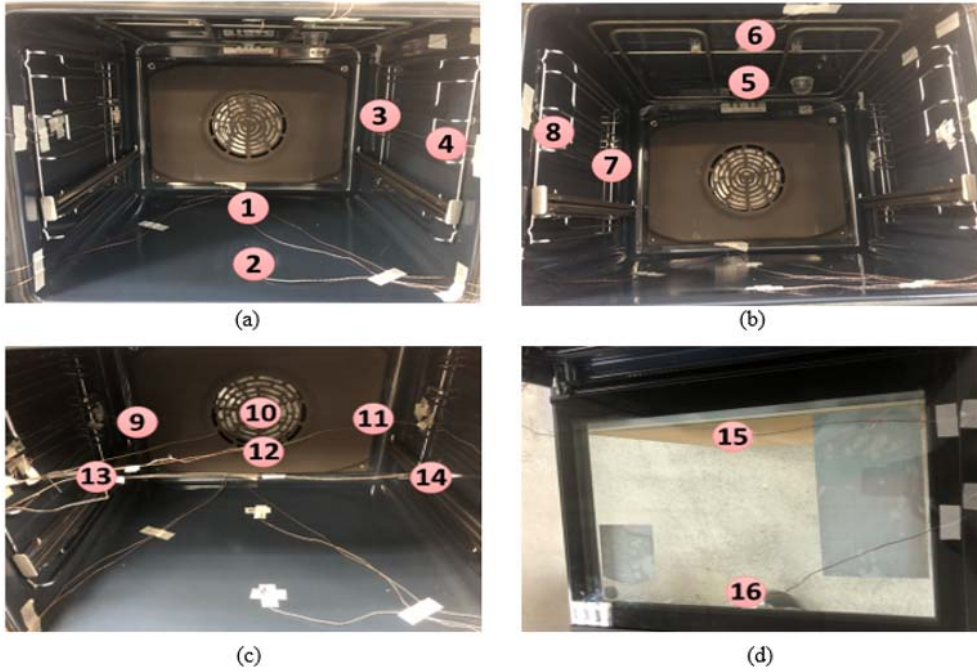
Kavite içi farklı bölgelerden termokupl ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiş olup Kavite yüzeyinden alınan sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 7 (a) ve (b)’de, kavite içi orta düzlem üzeri alınan hava sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 7 (c)’de ve kapak iç cam üzeri alınan yüzey sıcaklık ölçüm noktaları Şekil 7 (d)’de görülmektedir.

Şekil 7 a, b, c ve d’de gösterilen sıcaklık ölçüm noktalarının numaraları, isimleri ve ölçüm yerleri Tablo 3’de verilmiştir.

Kavite içi sıcaklık dağılımının belirlenmesi için deneysel parametreler:

- Turbo motor dönüş devri: 1800 rpm
- Turbo motor dönüş yönü: Saat yönünde (CW)
- Fırın set sıcaklığı: 145°C (~418K)
- Test süresi: 60 dakika olarak belirlenmiştir.

Pişirme kalitesinin belirlenebilmesi için standartlarda küçük kek pişirilmesi yapılır. Fanlı konumlarda küçük kek pişirme sıcaklığı ortalama 145°C olduğu için fırın 145°C sıcaklığa ayarlanmıştır.



Şekil 7. Kavite içinden alınan sıcaklık ölçüm noktaları (Temperature measurement points taken from the cavity surface)

Tablo 3. Kavite içi sıcaklık ölçüm noktaları
(Temperature measurement points inside the cavity)

No	İsim	Yüzey/Hava
1	Alt Duvar Arka	Yüzey
2	Alt Duvar Ön	Yüzey
3	Sağ Duvar Arka	Yüzey
4	Sağ Duvar Ön	Yüzey
5	Üst Duvar Arka	Yüzey
6	Üst Duvar Ön	Yüzey
7	Sol Duvar Arka	Yüzey
8	Sol Duvar Ön	Yüzey
9	Orta Düzlem Arka Sol	Hava
10	Orta Düzlem Arka Orta	Hava
11	Orta Düzlem Arka Sağ	Hava
12	Orta Düzlem Orta	Hava
13	Orta Düzlem Ön Sol	Hava
14	Orta Düzlem Ön Sağ	Hava
15	Kapak İç Cam Alt	Yüzey
16	Kapak İç Cam Üst	Yüzey

Baz modelde yapılan 60 dakikalık sıcaklık ölçüm testinde sıcaklıkların rejime oturmasının garantilenmesi amacıyla testin son 20 dakikasındaki ortalama sıcaklık verileri alınmıştır. Sıcaklık ölçümlerinin yapılmasını sağlayan termokupl K tipi yüksek sıcaklığa dayanıklı bir termokupl olup 375°C' e kadar $\pm 1,5^\circ\text{C}$ hata ile ölçüm yapabilmektedir.

2.2. Belirsizlik Analizi (Uncertainty Analysis)

Deneyler sırasında sıcaklık, hız ve basınç farkı verileri toplanmıştır. Bu verilere ek olarak rüzgâr tüneli ölçümlerinde kullanılan parametreler de Tablo 4'de verilmiştir. Sıcaklık ve hız değerleri ayrı ayrı ölçümlerde tekil olarak değerlendirilirken diğer veriler sirkülasyon debisi ölçümünde etkin olan parametrelerdir.

Sirkülasyon debisi ölçümündeki belirsizlik analizini hesaplamak üzere Eş. 1 [17] kullanılmış olup belirsizlik değeri 1,46% olarak hesaplanmıştır.

$$w_r = \sqrt{\left(\frac{\partial R}{\partial v_1} w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial v_2} w_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial v_n} w_n\right)^2} \quad (1)$$

Tablo 4. Deneysel ölçüm verilerinin doğruluğu
(Accuracy values of measurements)

Veriler	Doğruluk
Akış ölçer	0,25%
Hız	5%
Sıcaklık	0,4%
Basınç	2000 Pa $\pm$ 12 Pa
Nozul Katsayısı	0,92 $\pm$ 0,012
Nozul Alanı	4 cm ² $\pm$ 0,005 cm ²

2.3. Sayısal Analiz Çalışması (Numerical Analysis Study)

Ev tipi fanlı pişirici cihaz sayısal analiz için SIEMENS NX 11 programında modellenmiştir. Modelin ağ yapısının oluşturulmasında ANSYS 2022 R2 programı içerisinde yer alan FLUENT MESHING, sayısal analiz çözümlemesinde de ANSYS FLUENT 2022 R2 programları kullanılmıştır.

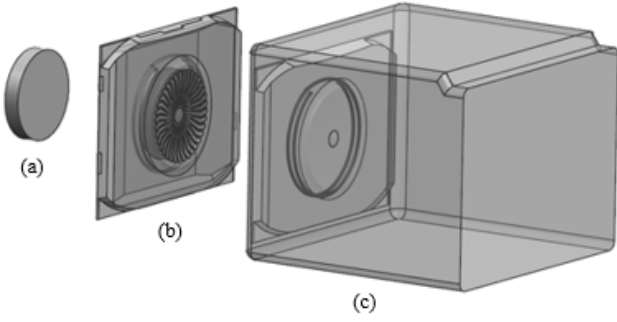
2.3.1. Geometrik model (Geometric model)

Çalışma yapılan fanlı pişirici cihazın üç boyutlu akış hacmi ağ yapısı oluşturuldu ve hazırlanan geometrik akış hacminin patlatılmış görseli Şekil 8'de görülmektedir.

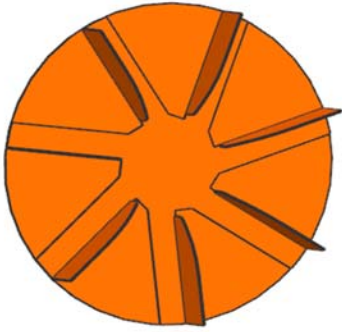
Fanlı pişirici cihazda kullanılan fan Şekil 9'da gösterilmiş olup hem saat yönünde hem de saat yönünün tersinde dönebilen simetrik bir yapıya sahiptir.

2.3.2. Modelin ağ yapısının oluşturulması (Mesh of the model)

Çalışmada ANSYS 2022 R2 paket programı içerisinde yer alan Fluent Meshing kısmı yardımıyla ağ yapısı oluşturulmuştur. Modelin ağ yapısında "Physics Preference" seçeneği için "CFD" seçilmiş, "Solver Preference" olarak da "Fluent" belirlenmiştir. Üç temel akış hacminden oluşan modelin kavite içi akış hacminin ağ yapısı Şekil 10 (a)'da verilmiştir.



Şekil 8. Patlatılmış akış hacmi; (a) Fan etrafı akış hacmi, (b) Hava yönlendirme sacı akış hacmi, (c) Kavite içi akış
(Exploded flow volume; (a) Flow volume around the fan, (b) Air baffle flow volume, (c) In-cavity flow)



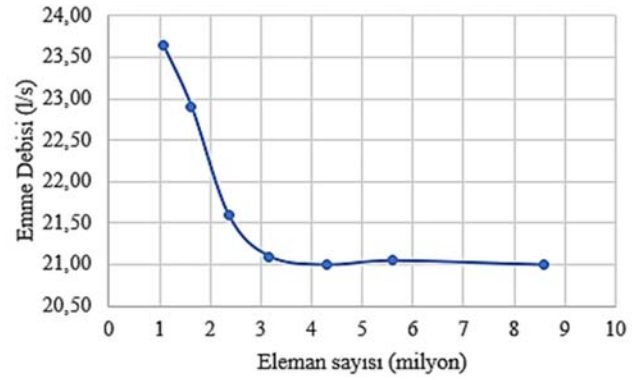
Şekil 9. Pişirici cihazda kullanılan fan
(Fan used in the cooking appliance)



Şekil 10. (a) Nümerik model ağ yapısı, (b) Fan etrafı ağ yapısı
(a) Mesh of the numerical model, (b) Mesh around the fan)

Yapılan sayısal analizlerde modeli oluşturan akış hacimlerinden fan etrafındaki akış hacmine dönme hareketi verilmiştir. Özellikle fan etrafı kaynaklı hızları çözüm doğruluğu için son derece kritiktir. Bu nedenle Şekil 10 (b)'de görüldüğü gibi fan etrafı akış hacmine küçük boyutlu elemanlar atanmıştır.

Detaylı ağ yapısı oluşturulup ağ yapısı bağımsızlığı da yapıldıktan sonra Şekil 11'de görüldüğü gibi yaklaşık 3,5 milyon eleman sayısından sonra sonuçların değişmediği görülmüş ve çalışma 4,3 milyon eleman sayısı ile yapılmıştır. Oluşturulan ağ yapısı kalitesinde çarpıklık değeri en fazla 0,89 olmaktadır. ANSYS tarafından yayınlanan bilgilendirme dökümanlarında yer alan bilgiye göre kabul edilebilir bir analiz için en fazla çarpıklık değerinin 0,94 olması gerektiği belirtilmiştir [18]. Yapılan çalışmada çarpıklık değeri literatürde kabul edilen 0,94 değerinden küçük olduğu için ağ yapısı kalitesi uygun bulunmuştur.



Şekil 11. Ağ yapısı bağımsızlığı (Mesh dependency)

2.3.3. Sayısal analizin kurulumu ve sınır koşulları (Setup of numerical analysis and boundary conditions)

Analiz kurulumunda model tipi olarak basınç tabanlı ve kararlı durum dikkate alınmıştır. Çözüm yöntemi olarak sahte zamana bağlı yöntem (Pseudo Transient) seçilerek model hazırlanmıştır. Başlangıçta daha hızlı yakınsaması için zaman ölçeği faktörü 1 seçilirken, daha sonrasında daha hassas ve doğru çözüm vermesi için zaman ölçeği faktörü 0,1'e kadar düşürülmüştür. Zaman ölçeği faktörünün düşürülmesi çözüm süresini uzatırken çözüm hassasiyetini artırmaktadır. Turbo fan etrafına bir dönme hacmi oluşturulup katı fan bu hacimden çıkartılmıştır. Fluent programında fanın dönme hareketi çerçeve hareketi olarak tanımlanmış ve fanın etrafındaki havanın döndürülmesi sağlanmıştır. Dönme hızı (rpm) ile dönme yönleri sırasıyla girilmiştir.

Analiz esnasında kavite içerisindeki lokal hız verileri ve sirkülasyon debisi grafik olarak çizdirilerek takip edilmiştir. Ek olarak analizlerin yakınsama değeri olarak en düşük 10^{-6} değeri baz alınmıştır. Yapılan sayısal analizlerde;

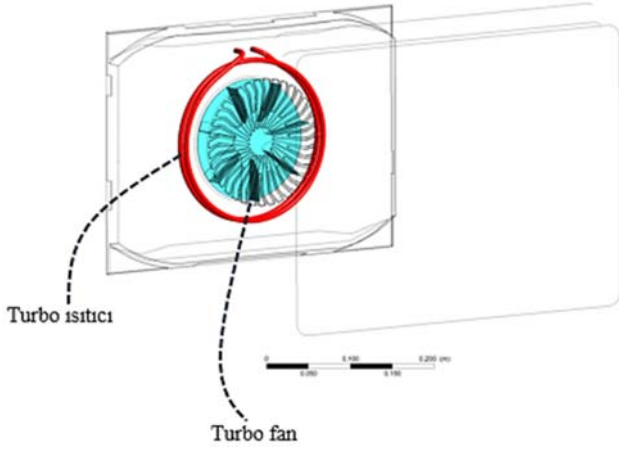
- türbülanslı akış,
- kararlı durum (steady-state),
- üç boyutlu akış ve
- izotermal akış koşulları ile çözümlemeler yapılmıştır. Piaia [1], Verboven [2], Kişin [3], Smolka [4], Mirade [6] ve Khatir [8] da yapmış oldukları çalışmalarda bu koşullarla çözümlemeler yapmışlardır.

Hem literatürden elde edilen bilgilere göre hem de çalışmada kullanılan turbo ısıtıcının önünde hava yönlendirme sacı olması nedeniyle ısıtım etkisi ihmal edilmiştir. Literatürde Verboven [2], Kişin [3] ve Khatir [8] yapmış oldukları çalışmalarda termal analizler yapıp ısıtımını ihmal etmişlerdir.

Sayısal analizlerin ikinci fazında yapılan ısı analizlerinde fırın içi istenilen sıcaklığı tutturmak için turbo ısıtıcı yüzeyine sabit bir sıcaklık tanımlanmıştır. Turbo ısıtıcı yüzeyine tanımlanan sabit sıcaklık, deneysel olarak turbo ısıtıcının yüzeyinden sıcaklık alınarak belirlenmiştir. Sayısal analizlerde yüzeyine sabit sıcaklık tanımlanan turbo ısıtıcı ve hava sirkülasyonu sağlayan turbo fan Şekil 12'de gösterilmiştir.

Dönüş devri 1800 rpm ve saat yönü dönüş koşullarında turbo ısıtıcı yüzeyi 670K sıcaklık olarak deneysel olarak belirlenmiş ve tanımlanmıştır. Aynı zamanda sayısal analizlerde fırın kavitesinin çevresinden ve fırın kapağından olan ısı kaybı da hesaba katılmıştır. Deneysel olarak sıcaklık ölçümü alınan noktaların sıcaklıkları baz alınarak kavite çevresinden ve fırın kapağından olan ısı taşınım katsayıları sayısal analize girdi olmuştur. Deneysel verilere göre en

uygun kavite içi sıcaklıkların oluşmasını sağlayan ısı taşınım katsayıları fırın kavite çevresi için $4 \text{ W/m}^2\text{K}$, fırın kapağı için $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak belirlenmiştir.



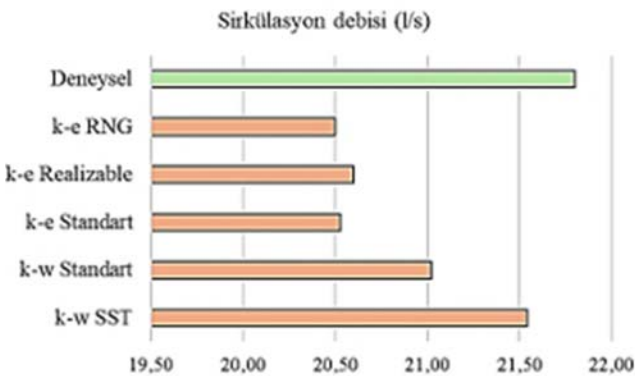
Şekil 12. Turbo ısıtıcı ve turbo fan geometrik model
(Turbo heater and turbo fan geometric model)

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Yapılan sayısal analizlerde ilk inceleme deneysel verilere en uygun türbülans modelinin belirlenmesi şeklinde olmuştur. Yakınsama hızı, çözüm doğruluğu ve kararlılığı açısından en uygun modelin k-w SST olduğuna karar verilmiş olup buna karşı özellikle k-epsilon modeli kullanıldığında debi ve hız değerlerinin saçınıklık içinde olduğu ve deneysel sonuçlardan uzak olduğu tespit edilmiştir. Türbülans modelinin belirlenmesinde dikkate alınan parametrelerden;

- Çözüm kararlılığının, sirkülasyon debisi kararlılığının, belirli noktalardaki hava hızı kararlılığının, çözüm doğruluğunun ve yakınsama hızının en yüksek değerlerde;
- Yakınsama durumunda yakınsadığı değere farkının ise en düşük değerlerde olması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında denenen türbülans modelleri ile deneysel sonuçların baz modelde (1800 rpm) karşılaştırma grafiği Şekil 13'de verilmiştir.



Şekil 13. Türbülans modelleri ile deneysel sonucun karşılaştırması
(Comparison of turbulence models and experimental results)

Yapılan çalışma kavite içi sirkülasyon debisi, kavite içi hız dağılımı ve kavite içi sıcaklık dağılımı değerlendirme olmak üzere üç fazdan oluşmaktadır. İlk iki fazda sadece akış analizleri yapılmış olup üçüncü fazda akış analizlerine ısı analizler de ilave edilmiştir.

3.1. Kavite içi sirkülasyon debisi ve hız dağılımı değerlendirme (Evaluation of circulation flow rate and velocity distribution inside the cavity)

Kavite içinde üst, orta ve alt düzlem olarak hız ve sıcaklık dağılımlarını görebilmek için üç düzlem belirlenmiştir. Belirlenen her bir düzlem üzerinde 9 nokta olmak üzere toplam üç düzlem üzerinde 27 noktadan deneysel hız ölçümü alınmıştır. Sayısal modelin doğruluğunu teyit etmek için üç farklı dönüş devrinde deneysel-sayısal hız dağılım karşılaştırması yapılmıştır. Üç farklı dönüş devrinde deneysel doğrulama yapıldıktan sonra sayısal analizlerle devir taraması gerçekleştirilmiştir. 600 rpm dönüş devri ve saat yönü (a) - saat yönünün tersi (b) dönüş koşullarında yapılan sayısal analizlere ait sonuçlar ve üç düzlemin konumu Şekil 14'de verilmiştir.

Sayısal analiz sonuçları incelediğinde motor dönüş yönü değiştiğinde kavite içindeki hız patikasının da değiştiği görülmektedir. Şekil 14 (a)'da gösterilen 600 rpm dönüş devri ve saat yönü koşullarında üst düzlemin sağ kısmı sol kısmına göre daha hızlı akışa sahipken, Şekil 14 (b)'de gösterilen 600 rpm dönüş devri ve saatin tersi yönü koşullarında üst düzlemin sol kısmı sağ kısmına göre daha hızlı akışa sahip olduğu görülmektedir. Bu durum orta ve alt düzlemler için de geçerlidir. Motor dönüş yönünün değişmesiyle kavite içindeki akış patikası ve doğal olarak hız dağılımı da değişmektedir. 600 rpm dönüş devri ve saat yönü ile saat yönünün tersi dönüş koşullarında sayısal ve deneysel hız dağılım karşılaştırması da Şekil 15'de verilmiştir.

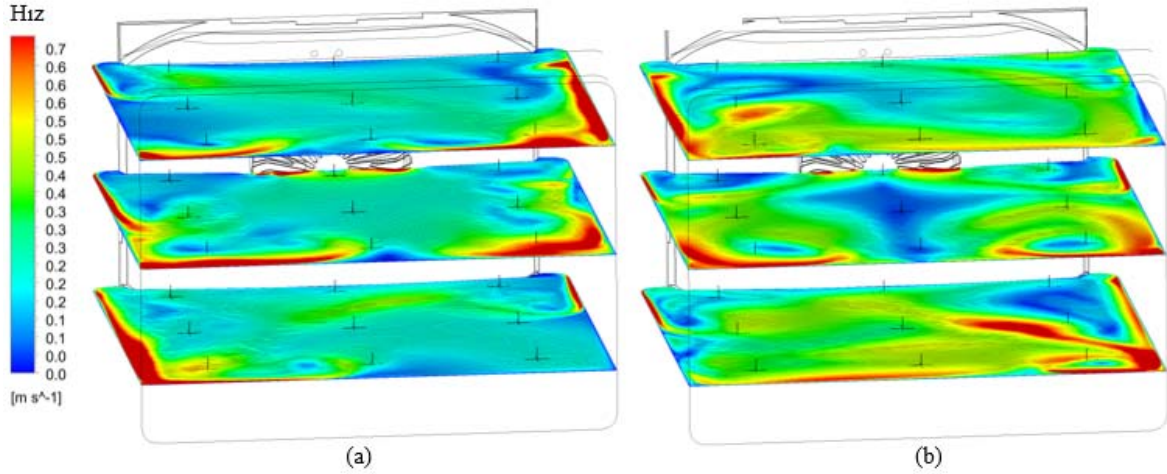
1800 rpm dönüş devri için saat yönü ve saat yönünün tersi dönüş koşullarında yapılan sayısal analizlere ait görseller Şekil 15' de verilmiştir. 600 rpm dönüş devrinde düzlemler üzerindeki hız değerleri en fazla $0,7 \text{ m/s}$ mertebelerinde iken 1800 rpm dönüş devrinde düzlemler üzerindeki hız değerleri $2,4 \text{ m/s}$ seviyelerine geldiği görülmüştür. Şekil 14'deki gibi Şekil 16'da da görüleceği gibi motor dönüş yönü değiştiğinde hız patikaları da değişmektedir. Saat yönü dönüşte üst düzlem sağ kısımdaki hız değerleri daha yüksekken, saat yönünün tersi dönüşte üst düzlem sol kısımdaki hız değerleri daha yüksek gelmektedir.

1800 rpm dönüş devri ve saat yönü dönüş koşullarında sayısal ve deneysel hız dağılım karşılaştırması da Şekil 17'de verilmiştir. Sayısal ve deneysel hız verilerinin uyumlu olduğu ve aralarındaki en fazla sapma değerinin %12 olduğu belirlenmiştir.

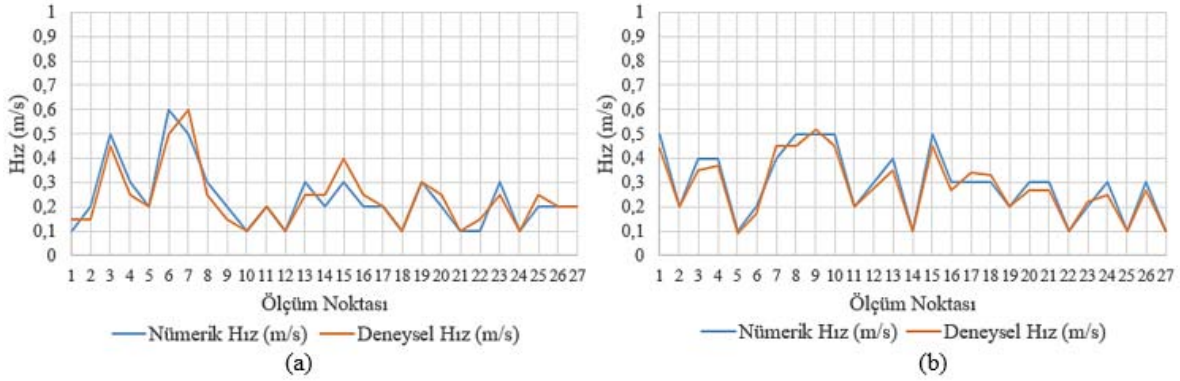
Literatürde yer alan sayısal analizlerdeki hata payları incelendiğinde Therdtai vd. [7] tarafından yapılan çalışmada deneysel ve sayısal hız değerleri arasında %37,3' lük bir hata olduğu belirtilmiştir. Hoang vd. [19] tarafından yapılan çalışmada akış rejimlerinin simülasyonu %26-28,5 hata payı ile yapılmıştır. Verboven vd. [2] tarafından fanlı bir pişirici cihazda hava akışı %22 hata ile simüle edilmiştir. Mirade ve Daudin [20] tarafından yapılan bir soğutucu analizinde %40 hata payı ile deneysel sonuçlara yaklaşılmıştır.-Yapılan bu çalışmada ise fanlı bir pişirici cihazda kavite içi hız değerleri %12 hata payı ile simüle edilmiştir.

3.2. Kavite içi sıcaklık dağılımı değerlendirme (Evaluation temperature distribution inside the cavity)

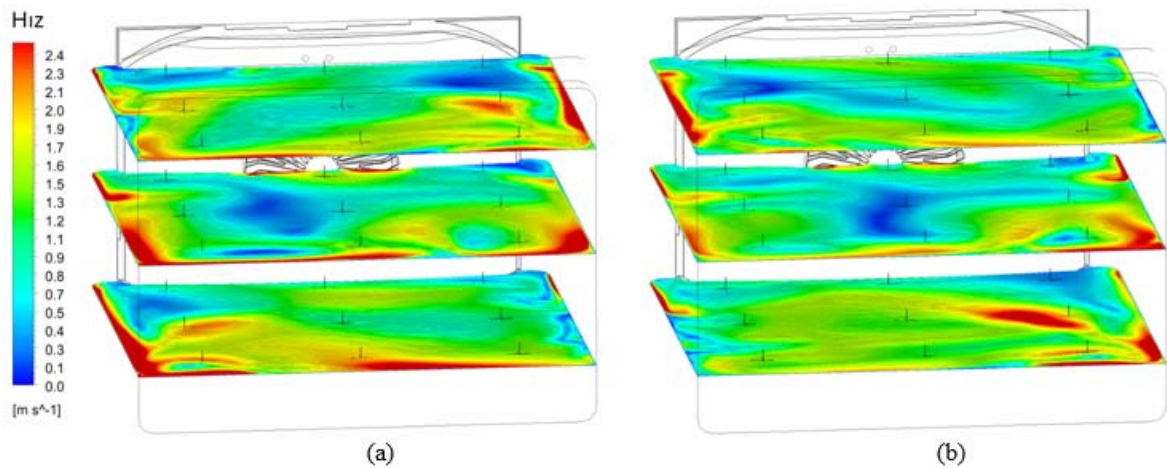
Isıl analizlerin sayısal doğruluğunu kontrol etmek ve girdi sağlamak amacıyla kavite içinde farklı bölgelerden termokupl ile sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Deneysel olarak alınan sıcaklık verileri ile aynı noktalardaki sayısal sonuçlar karşılaştırılmıştır. Baz model olarak belirlenen turbo motorun 1800 rpm dönüş devri ve saat yönü dönüş koşullarına sahip olduğu deneysel sıcaklık testinde 60 dakika boyunca sıcaklık verileri toplanmıştır. Sıcaklıkların rejime oturmasından emin olunarak 60 dakikalık testin son 20 dakikasındaki ortalama sıcaklık verileri alınmıştır. Deneysel olarak alınan sıcaklık verileri Şekil 18'de görülmektedir.



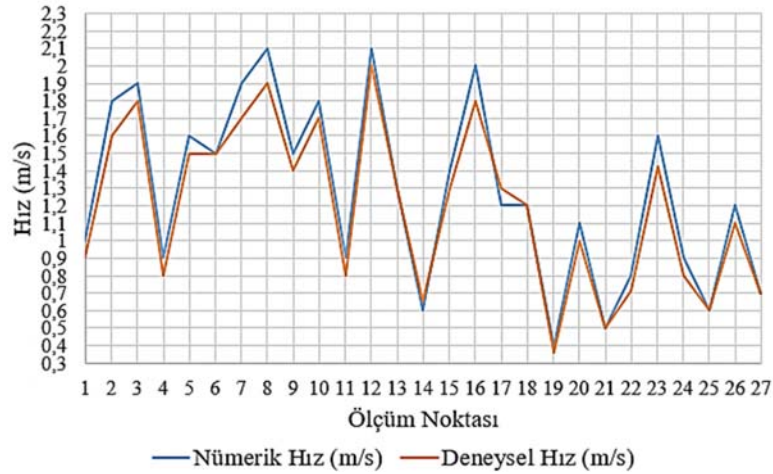
Şekil 14. (a) Saat yönü, (b) Saat yönünün tersi ve 600 rpm dönüş devri koşullarında sayısal analizden elde edilen üç düzlem üzerindeki hız dağılımları
((a) clockwise, (b) counter-clockwise and 600 rpm rotation speed conditions,, speed distributions on three planes obtained from numerical analysis)



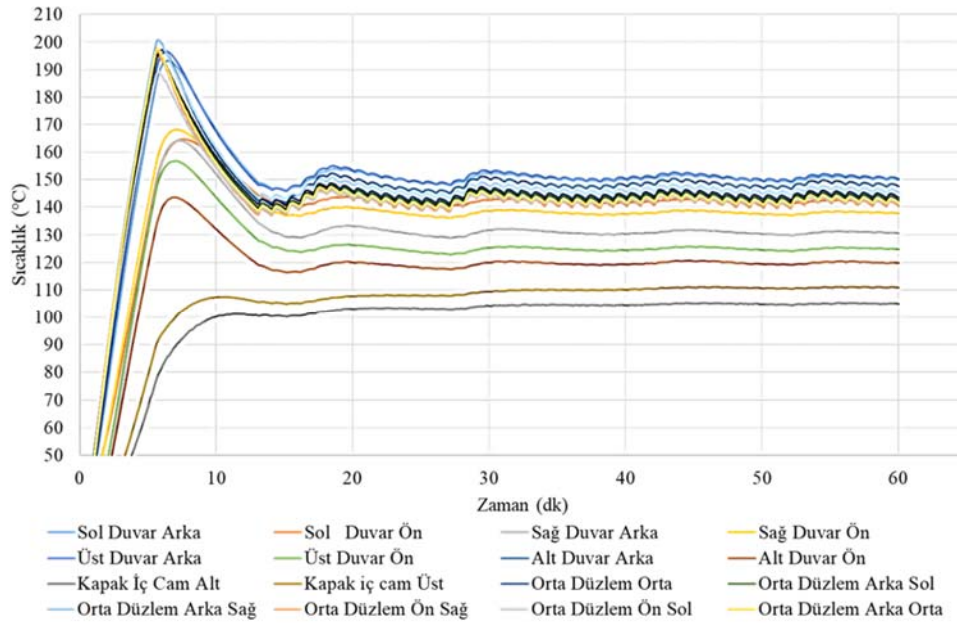
Şekil 15. (a) Saat yönü, (b) Saat yönünün tersi ve 600 rpm dönüş devri koşullarında sayısal – deneysel hız dağılımı karşılaştırması
((a) clockwise, (b) counter-clockwise and 600 rpm rotation speed conditions numerical - experimental speed distribution comparison)



Şekil 16. (a) Saat yönü, (b) Saat yönünün tersi ve 1800 rpm dönüş devri koşullarında sayısal analizden elde edilen üç düzlem üzerindeki hız dağılımları
((a) clockwise, (b) counter-clockwise and 1800 rpm rotation speed conditions,, speed distributions on three planes obtained from numerical analysis)



Şekil 17. 1800 rpm dönüş devri ve saat yönü dönüş koşullarında sayısal – deneysel hız dağılımı karşılaştırması (1800 rpm rotation speed and clockwise rotation conditions numerical - experimental speed distribution comparison)



Şekil 18. Deneysel kavite içi sıcaklık ölçümleri (Experimental in-cavity temperature measurements)

1800 rpm-saat yönü koşullarındaki deneysel ve sayısal analizlerin sonuçları ile farkları Şekil 19'da verilmiştir. Şekil 19'da görüldüğü gibi deneysel ve sayısal analiz sonuçları arasında en fazla %3' lük bir hata oranı çıkmıştır. 1800 rpm dönüş devri, saat yönü ve saat yönünün tersi dönüş koşullarındaki sayısal analizlere ait kavite içi üç düzlemde elde edilen sıcaklık dağılımı görselleri Şekil 20'de verilmiştir.

Sayısal model doğrulama işlemi tamamlandıktan sonra kavite içi sıcaklık dağılımlarının tespiti sayısal analizlerle devam etmiştir. 600 rpm'den 2400 rpm'e kadar motor dönüş devri taraması gerçekleştirilmiş olup aynı zamanda her koşul için saat yönü ve saat yönünün tersi koşullarında analizler yapılmıştır.

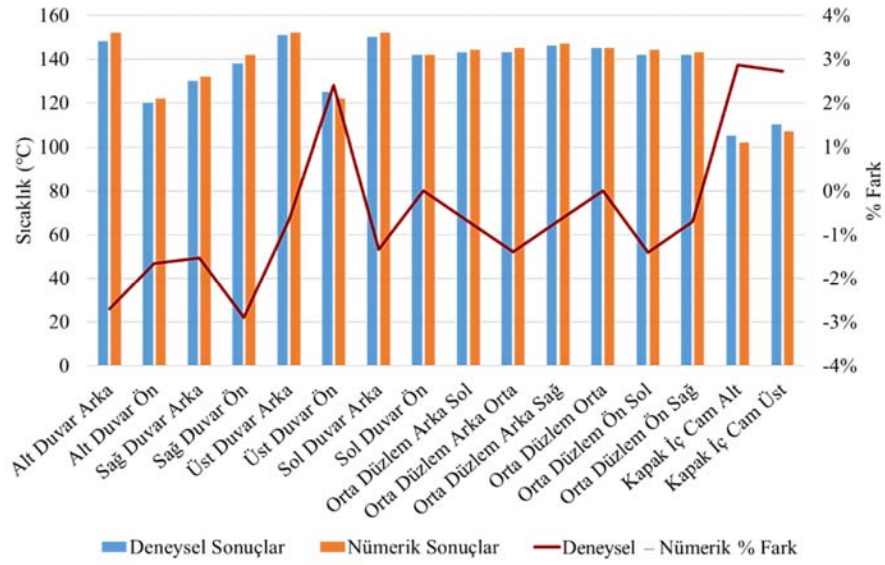
3.3. Sirkülasyon Debisi Veri Analizleri (Data Analysis of Circulation Flow Rate)

Yapılan sayısal analizler ve deneysel çalışmalar sonucunda turbo motor dönüş yönünün ve dönüş devrinin pişirme hacmi içi sirkülasyon debisi üzerindeki duyarlılığı Minitab programı ile incelenmiştir [21].

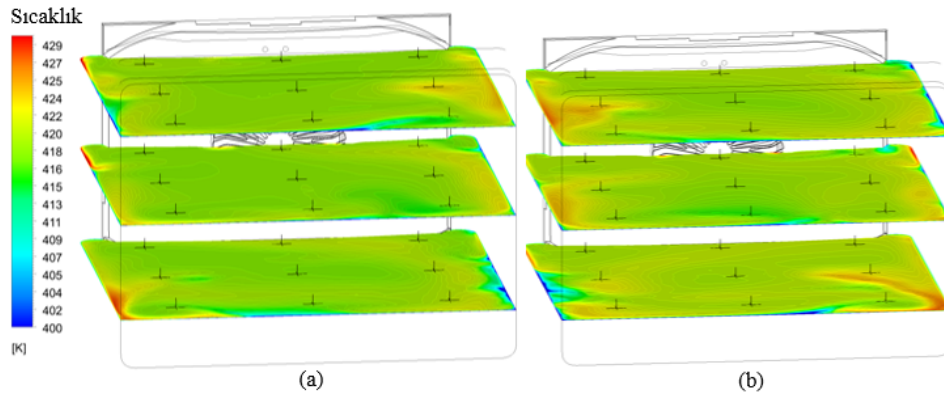
Şekil 21'de görüldüğü gibi turbo motor dönüş yönünün değişimiyle sirkülasyon debisi etkilenmemektedir. Diğer yandan turbo motor dönüş devri arttıkça sirkülasyon debisinin de doğrusal bir şekilde arttığı görülmüştür. Grafikte yer alan dönüş yönü parametresi için CW saat yönünü, CCW saat yönünün tersini göstermektedir.

Şekil 22'de sayısal analiz sonucunda elde edilen sirkülasyon debileri ile deneysel rüzgar tüneli ölçümleri sonucunda elde edilen sirkülasyon debileri karşılaştırılmıştır.

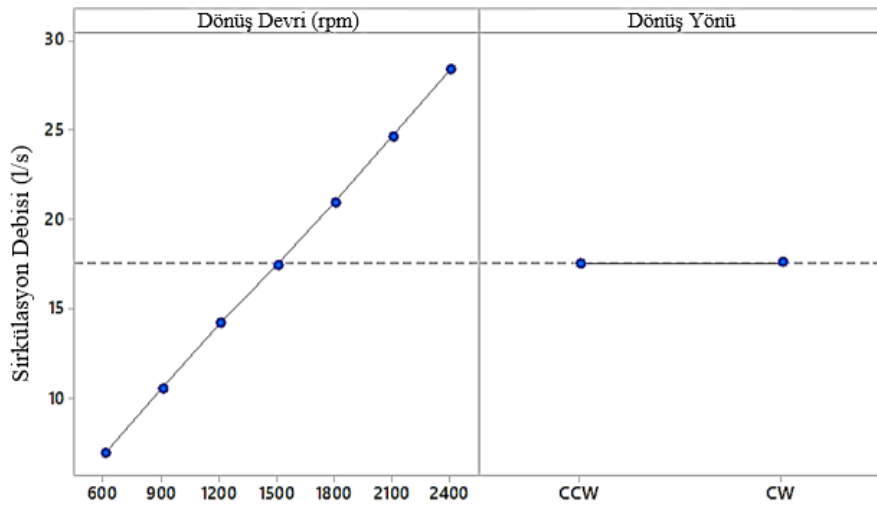
Elde edilen sonuca göre analiz çıktıları deneysel sirkülasyon debilerine oldukça yakın olmakla beraber bir miktar daha düşük çıkmaktadır. Bu farkın nedeninin deneysel fırın kaçakları ve fırın bacasının göz ardı edilmesi olduğu öngörülmektedir. Buna ek olarak sayısal analizler ile deneysel verilerin birbirine olan uyumu oldukça başarılıdır (Şekil 22). Sayısal analizlerden çıkan sirkülasyon debi değerleri, deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında en fazla %9'luk bir sapma olduğu tespit edilmiştir (Şekil 23). Aynı zamanda motor dönüş devri arttıkça sayısal analiz sonuçlarının deneysel sonuçlara göre sapma oranının da azalarak %3' lere kadar düştüğü görülmektedir.



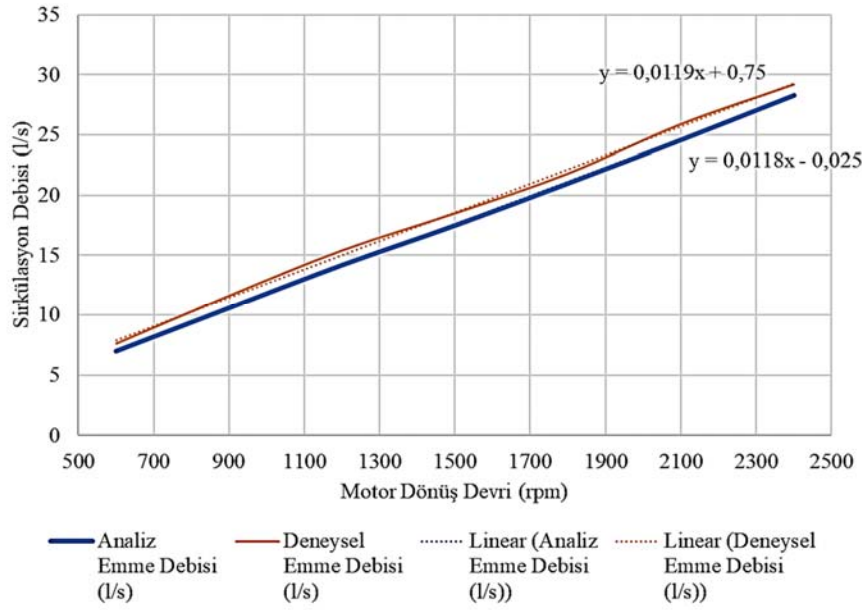
Şekil 19. 1800 rpm dönüş devri ve saat yönü dönüş koşullarında deneysel-sayısal analiz sıcaklık farkları (1800 rpm rotation speed and clockwise rotation conditions, experimental-numerical analysis temperature differences)



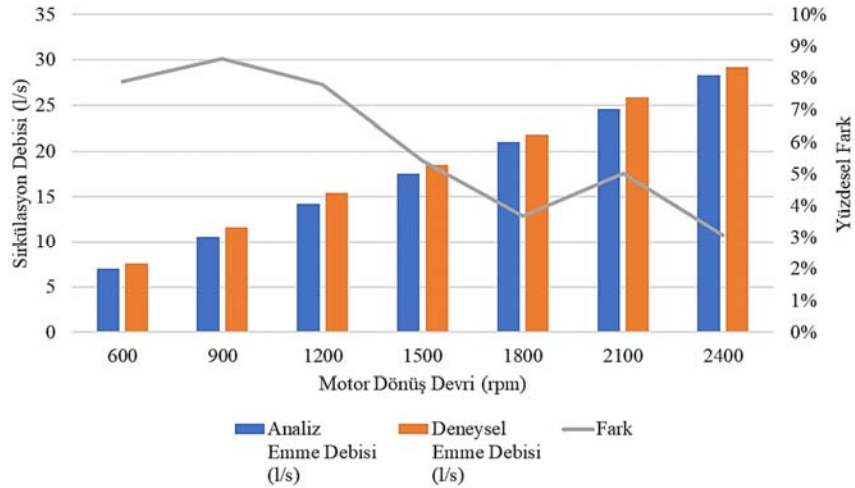
Şekil 20. (a) Saat yönü, (b) Saat yönünün tersi ve 1800 rpm dönüş devri koşullarında üç düzlem üzerindeki sıcaklık dağılımları ((a) clockwise, (b) counterclockwise and 1800 rpm rotation speed conditions, temperature distributions on three planes)



Şekil 21. Motor dönüş devri ve dönüş yönünün sirkülasyon debisi üzerindeki etkisinin ana etki grafiği (Main effect graph of the effect of motor rotation speed and rotation direction on circulation flow rate)



Şekil 22. Sayısal analiz ile deneysel sirkülasyon debilerinin karşılaştırılması
(Comparison of numerical analysis and experimental circulation flow rates)



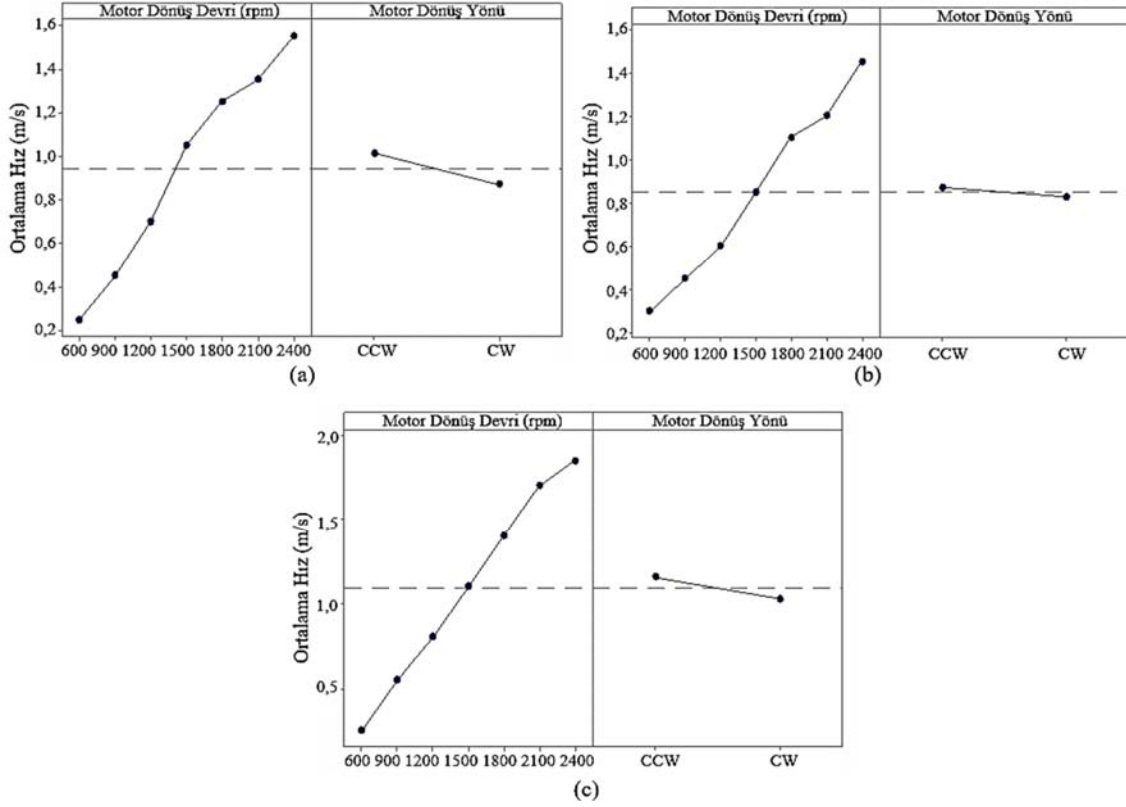
Şekil 23. Sayısal analiz ile deneysel sirkülasyon debilerinin farkları
(Differences between numerical analysis and experimental circulation flow rates)

3.4. Kavite İçi Hız Dağılımı Veri Analizleri (Data Analysis of Velocity Distribution in the Cavity)

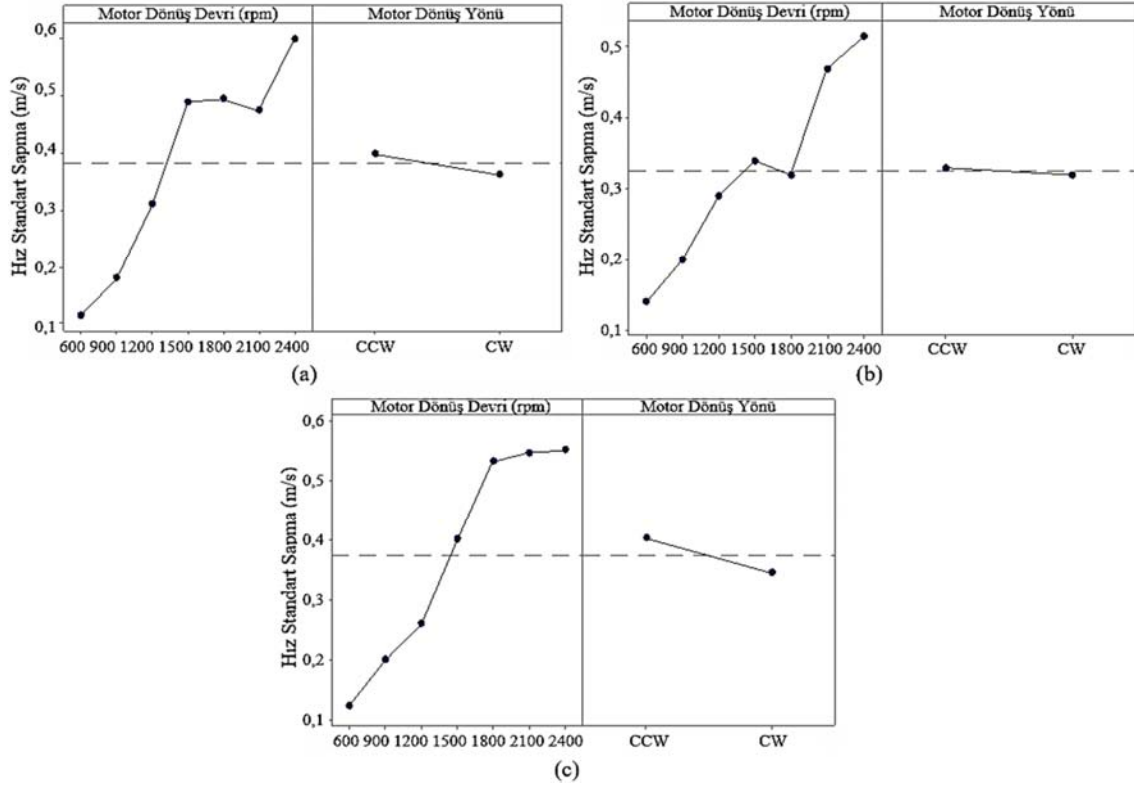
Kavite içi hız dağılımlarının kontrolü için kavite içinde üç düzlem üzerinden hız verileri çekilerek veri analizleri gerçekleştirilmiştir. Motor dönüş devri ve yönünün üst düzlem, orta düzlem ve alt düzlem üzerindeki ortalama hızlara etkisi Şekil 24'de görülmektedir.

Düzlemler üzerindeki ortalama hızlara etki grafiklerinden de görüleceği gibi motor dönüş devri arttıkça düzlemler üzerindeki ortalama hız değerleri artarken, motor yönünün değişmesiyle düzlemler üzerindeki ortalama hız değerlerinde radikal değişiklikler olmamaktadır. Bu verilere ek olarak kavite içinde düzlemler üzerindeki standart sapma değerleri de incelenmiştir. Motor dönüş devri ve yönünün üst düzlem, orta düzlem ve alt düzlem üzerindeki standart sapmaya etkisi Şekil 25'de verilmiştir.

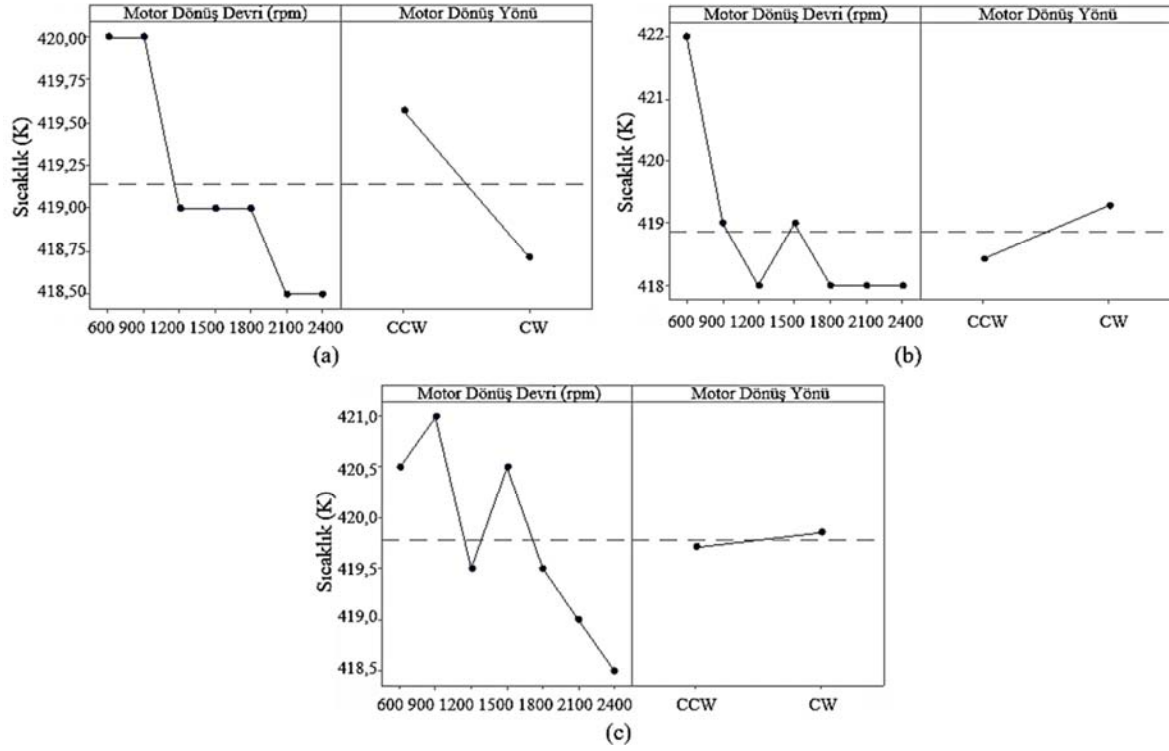
Minitab programında yapılan tüm bu değerlendirmelere ek olarak programın ANOVA → Genel Doğrusal Model bölümündeki optimizasyon aracı kullanılarak en uygun motor dönüş devri ve dönüş yönü belirlenmiştir [20]. Optimizasyon için düzlemler üzerindeki ortalama hız değerleri maksimum olarak hedeflenmiştir. Bunun nedeni hızın artmasıyla taşınım ısı transferinin de artması ve bunun sonucunda pişirme süresinin kısılmasıdır (hızlı pişirme). Bir diğer hedef olarak düzlemler üzerindeki standart sapma değerleri minimum olarak hedeflenmiştir. Bunun nedeni ise düzlemler üzerindeki lokal hız değerleri birbirine ne kadar yakınsa o kadar homojen bir hız dağılımı elde edilmektedir. Elde edilen bu homojenite ise gıdanın her tarafının eşit bir şekilde pişmesini sağlamaktadır (homojen pişirme). Belirlenen bu hedeflere göre yapılan veri analizinde en uygun koşul olarak motor dönüş devri ~2100 rpm, motor dönüş yönü radikal bir fark olmasa da saat yönü olarak bulunmuştur.



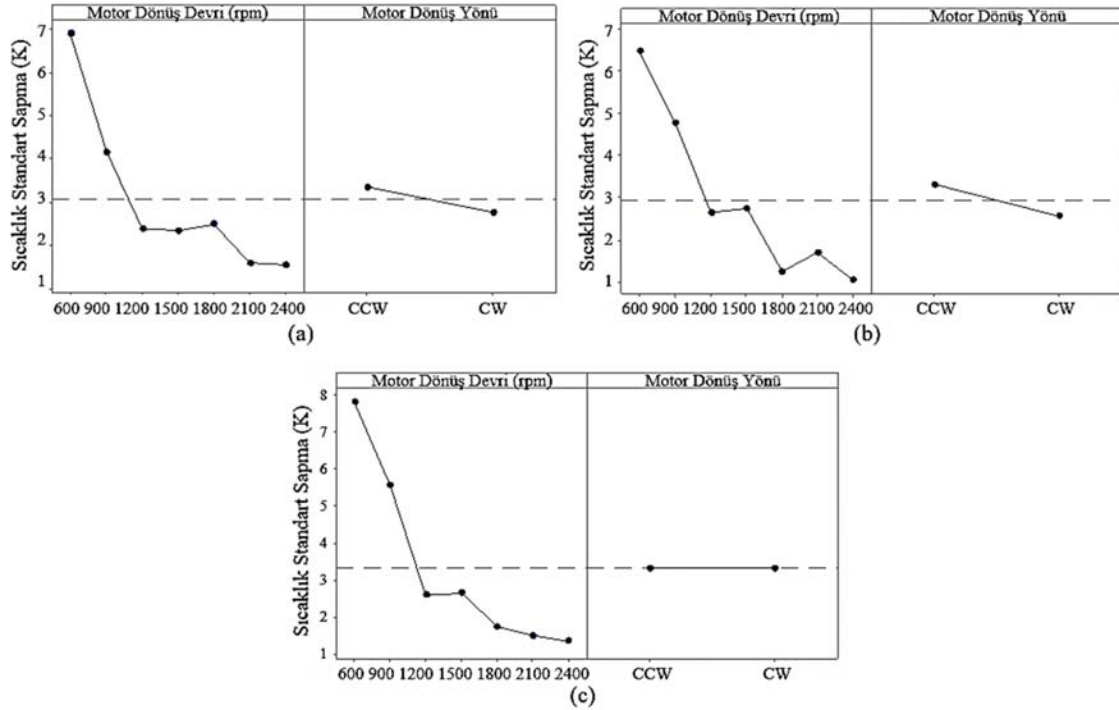
Şekil 24. (a) Üst düzlem, (b) Orta düzlem, (c) Alt düzlem üzerindeki ortalama hız değişimi
(Average velocity on the (a) upper plane, (b) middle plane, (c) bottom plane)



Şekil 25. (a) Üst düzlem, (b) Orta düzlem, (c) Alt düzlem üzerindeki standart sapma
(Standard deviation on the (a) upper plane, (b) middle plane, (c) bottom plane)



Şekil 26. Motor dönüş devri ve dönüş yönünün (a) Üst düzlem, (b) Orta düzlem, (c) Alt düzlem üzerindeki ortalama sıcaklıklara etkisinin ana etki grafiği (Main effect plot of the effect of motor rotation speed and rotation direction on the average temperature on the (a) upper plane, (b) middle plane, (c) bottom plane)



Şekil 27. Motor dönüş devri ve dönüş yönünün (a) üst düzlem, (b) orta düzlem, (c) alt düzlem üzerindeki standart sapmaya etkisinin ana etki grafiği (Main effect plot of the effect of motor rotation speed and rotation direction on the standard deviation on the (a) upper plane, (b) middle plane, (c) bottom plane)

3.5. Kavite İçi Sıcaklık Dağılımı Veri Analizleri (Data Analysis of Temperature Distribution in the Cavity)

Motor dönüş devri ve yönünün üst düzlem, orta düzlem ve alt düzlem üzerindeki ortalama sıcaklıklara etkisi Şekil 26 a, b ve c’de görülmektedir.

Şekil 26’da görüldüğü gibi turbo motor dönüş devri arttıkça kavite içi orta nokta sıcaklık değeri için hedeflenen 418K değerine yaklaşmaktadır. Aynı zamanda yine aynı grafikte görüldüğü gibi turbo motor dönüş yönü saat yönü tersinden saat yönüne döndüğü zaman üst düzlem ortalama sıcaklık değeri de düşmektedir. Şekil 26 (b) ve Şekil 26 (c)’de görüldüğü gibi turbo motor dönüş yönünün düzlem üzerindeki ortalama sıcaklık değerine etkisi neredeyse yok denecek kadar azdır. Aynı zamanda turbo motor dönüş devri arttıkça genel olarak düzlemler üzerindeki ortalama sıcaklık değerleri 418K değerine yaklaşmaktadır.

Düzlemler üzerindeki sıcaklık dağılımının homojenlik seviyesini ve aynı zamanda pişirmenin de homojenlik seviyesini tespit edebilmek için düzlemler üzerindeki sıcaklıkların standart sapma değerleri incelenmiştir. Turbo motor dönüş devri ve dönüş yönüne göre üst düzlem, orta düzlem ve alt düzlem üzerindeki sıcaklıkların standart sapmaları Şekil 27 a, b ve c’de verilmiştir.

Üç düzlem için de grafikler ayrı ayrı incelendiğinde, motor dönüş devri arttıkça düzlemler üzerindeki sıcaklık standart sapma değerinin azaldığı görülmektedir. Diğer yandan motor dönüş yönünün düzlemler üzerindeki sıcaklık standart sapma değerleri üzerinde radikal bir etkisi olmadığı da görülmektedir. Üç düzlem de hesaba katılarak Minitab programında optimum koşulu bulmak üzere veri analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan optimizasyon aracında hedeflenen değerler Tablo 5’de verilmiştir.

Tablo 5. Optimizasyon hedef girdileri (Optimization target inputs)

Veriler	Hedef
Üst Düzlem Ort. Hedef Sıcaklık	418 K
Orta Düzlem Ort. Hedef Sıcaklık	418 K
Alt Düzlem Ort. Hedef Sıcaklık	418 K
Üst Düzlem Standart Sapma	Minimum
Orta Düzlem Standart Sapma	Minimum
Alt Düzlem Standart Sapma	Minimum

Yapılan veri analizi sonucunda düzlemler üzerinde standart sapmanın en düşük olduğu ve düzlemler üzerinde ortalama sıcaklığın hedeflenen sıcaklığa en yakın olduğu durum olarak ~2272 rpm motor dönüş devri ve radikal bir fark olmasa da saat yönü motor dönüş yönü bulunmuştur.

4. Sonuçlar (Conclusions)

Yapılan çalışma kapsamında turbo motorun dönüş devri 600 rpm’ den 2400 rpm’e kadar 300 rpm’ lik artışlarla incelenerek tüm bu dönüş devirlerinde saat yönünde ve saat yönünün tersinde çözümler yapılmıştır. İki aşamada gerçekleştirilen sayısal çözümlerde ilk aşamada kavite içi sirkülasyon debisi ve kavite içi hız dağılımları ile akış patikaları incelenirken ikinci aşamada kavite içindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Çalışma kapsamında sayısal çözüm için farklı türbülans modelleri incelenmiş olup türbülans modelleri arasında çözüme en yakın ve en kararlı sonucu veren model olarak k-w SST modeli uygun bulunmuştur. Kavite içi sirkülasyon debileri incelendiğinde deneysel ve sayısal sonuçların birbirlerine uyumlu olduğu görülmüştür. 600 rpm’ den 2400 rpm’ e çıkan motor dönüş

devirlerinde 7 l/s’den 29 l/s’e varan sirkülasyon debilerine ulaşılmıştır. Kavite içi sirkülasyon debisi için sayısal çalışmaların çıktıları deneysel sonuçlar ile karşılaştırıldığında en yüksek %9’ luk bir sapma olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda motor dönüş devri arttıkça sayısal ve deneysel sonuçlar arasındaki farkın azalarak %3’ lere kadar düştüğü belirlenmiştir. Kavite içi düzlemler üzerinde ortalama hız değerlerine motor dönüş yönünün radikal bir etkisi olmadığı görülmüşüne rağmen akış patikaları incelendiğinde motorun saat yönü ve saat yönünün tersi dönmesi durumlarında hava hızlarının motor dönüşüne bağlı olarak aynı konumlarda farklı mertebelerde olduğu görülmüştür. Bu durumda motor dönüş yönünün düzlemler üzerindeki ortalama hız değerlerine radikal bir etkisi olmamasına rağmen kavite içi akış patikasına kritik etkisi olduğu belirlenmiştir. Kavite içi hava hız dağılımında deneysel olarak sıcak tel prob ile hız ölçümleri yapılmış olup sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlarla arasında en fazla %12 sapma olduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasındaki inceleme kapsamında fırın içi hava sıcaklık dağılımında motor dönüş devri arttıkça üst, orta ve alt düzlemlerdeki sıcaklık standart sapma değerlerinin azaldığı görülmüştür. Motor dönüş yönünün etkisinin dönüş devrine göre daha az olduğu da tespit edilmiştir. Homojen pişirme için düzlemler üzerinde standart sapmanın en düşük olduğu ve düzlemler üzerinde ortalama sıcaklığın hedeflenen sıcaklığa en yakın olduğu durum ~2272 rpm motor dönüş devri ve saat yönü motor dönüş yönü olarak belirlenmiştir.

Kavite içi düzlemler üzeri standart sapma değerlerini düşürmek ve pişirme homojenitesini artırmak için pişirme esnasında motorun dönüş yönünün ritmik olarak değiştirilmesi önerilmektedir. Motor dönüş yönünün düzlemler üzeri standart sapma ve ortalama hız değerlerine tekil olarak bakıldığında radikal bir etkisi olmamasına rağmen akış patikalarında oluşturdıkları kritik ve simetrik değişiklikler pişirme esnasında motor yönünün ritmik değiştirilmesiyle daha homojen bir pişirme sağlayacağı öngörülmektedir. Ek olarak bu çalışma kapsamında fırın içinde gıda olmadığı durumda boş fırın üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Gelecekte çalışmanın devamı olarak fırın içinde homojenlik kontrolü kapsamında küçük keklerin ya da pişme kontrolü kapsamında büyük hacimli tavuk gibi gıdaların pişirilmesi üzerine bir çalışma yapılabilir. Ayrıca fırın içine ilave edilebilecek rib ya pin tarzı yapıların homojen akış dağılımı üzerindeki etkilerini incelemek için bir çalışma yapılabilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Yazarlar, Arçelik Pişirici Cihazlar İşletmesi Araştırma ve Geliştirme Birimine vermiş olduğu destekler için teşekkür eder.

Kaynaklar (References)

1. Piaia J. C. Z., Claumann C. A., Quadri M. B. ve Bolzan A., Air Flow CFD Modeling in an Industrial Convection Oven, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018.
2. Verboven P., Scheerlinck N., Baerdemaeker J. ve Nicola B., Computational fluid dynamics modeling and validation of the temperature distribution in a forced convection oven, Journal of Food Engineering, 43, 2000.
3. Kişin B., Burhan M., Dede O., İleri K., Çelik C. ve Özalp A., Fırın içi momentum ve ısı transferi mekanizmalarının nümerik incelenmesi, Simülasyon ve Simülasyon Tabanlı Ürün Geliştirme Sempozyumu, 2019.
4. Smolka J., Nowak A. J. ve Rybarz D., Improved 3-D temperature uniformity in a laboratory drying oven based on experimentally validated CFD computations, Journal of Food Engineering, 97 (3), 373-383, 2010.
5. Smolka J., Bulinski Z. ve Nowak A. J., The experimental validation of a CFD model for a heating oven with natural air circulation, Applied Thermal Engineering, 54, 387-398, 2013.

6. Mirade P.S., Daudin J.D., Ducept F., Trystram G. ve Clement J., Characterization and CFD modelling of air temperature and velocity profiles in an industrial biscuit baking tunnel oven, *Food Research International*, 37, 1031-1039, 2004.
7. Therdthai N., Zhou W. ve Adamczak T., Three-dimensional CFD modelling and simulation of the temperature profiles and airflow patterns during a continuous industrial baking process, *Journal of Food Engineering*, 65, 599-608, 2004.
8. Khatir Z., Paton J., Thompson H., Kapur N., Toropov V., Lawes M. ve Kirk D., Computational fluid dynamics (CFD) investigation of air flow and temperature distribution in a small scale bread-baking oven, *Applied Energy*, 89, 89-96, 2012.
9. Boulet M., Marcos B., Dostie M. ve Moresoli C., CFD modeling of heat transfer and flow field in a bakery pilot oven, *Journal of Food Engineering*, 97, 393-402, 2010.
10. Stigter J. D., Scheerlinck N., Nicolai B. ve Van Impe J. F., Optimal heating strategies for a convection oven, *Journal of Food Engineering*, 48 (4), 335-344, 2001.
11. Mistry H., Ganapathi-subbu, Dey S., Bishnoi P. ve Castillo J. L., Modeling of transient natural convection heat transfer in electric ovens, *Applied Thermal Engineering*, 26 (17-18), 2448-2456, 2006.
12. Al-Nasser M., Fayssal I. ve Moukalled F., Numerical simulation of bread baking in a convection oven, *Applied Thermal Engineering*, 116252, 2020.
13. Shaughnessy B. ve Newborough M., Energy Performance of a Low-Emissivity Electrically Heated Oven, *Applied Thermal Engineering*, 20, 813-830, 1999.
14. Yalçınkaya O. ve Durmaz U., Numerical analysis of jet impingement cooling with elongated nozzleholes on a curved surface roughened with V-shaped ribs, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 3453-3470, 2024.
15. Valbracht, R. A., Laboratory methods of testing induced flow fans for rating, the development of AMCA standard 260-07, In *AMCA International Engineering Conference*, 1-9, 2008.
16. Newnes Mühendislik ve Fizik Bilimleri Cep Kitabı, 370-381, 1993.
17. Robert J. M., Describing the uncertainties in experimental results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1, 3-17, 1988.
18. Introduction to ANSYS Meshing, Lecture-7: Mesh quality & Advanced topics, 2021.
19. Hoang M.L., Verboven P., De Baerdemaker J. ve Nicolai B.M., Analysis of the air flow in a cold store by means of computational fluid dynamics, *International Journal of Refrigeration*, 23 (2), 127-140, 2000.
20. Mirade P.S. ve Daudin J.D., Numerical simulation and validation of the air velocity field in a meat chiller, *International Journal of Applied Science and Computations*, 5 (1), 11-24, 1998.
21. Sheehy P., Navarro D., Silvers R., Keyes V., Dixon D. ve Picard D., *The Black Belt Memory Jogger, Goal/QPC*, 2020.