ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GIDA ÜRÜNLERİNİN YÜZEY DEKONTAMİNASYONU AMACIYLA KULLANILMAK ÜZERE KIZILÖTESİ SİSTEM TASARIMI

Ayşe Hümeyra ERDAŞ

GIDA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA
2020

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAYI

Ayşe Hümeyra ERDAŞ tarafından hazırlanan **"Gıda Ürünlerinin Yüzey Dekontaminasyonu Amacıyla Kullanılmak Üzere Kızılötesi Sistem Tasarımı"** adlı tez çalışması 10/01/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU
Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Jüri Üyeleri :

Başkan : Prof. Dr. Behiç MERT
Orta Doğu Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Rahmi Ertan ANLI
Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU
Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Özlem YILDIRIM
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

10.01.2020



Ayşe Hümeyra ERDAŞ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GIDA ÜRÜNLERİNİN YÜZEY DEKONTAMİNASYONU AMACIYLA KULLANILMAK ÜZERE KIZILÖTESİ SİSTEM TASARIMI

Ayşe Hümeyra ERDAŞ

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Kızılötesi enerji (IR), elektromanyetik enerjinin bir formudur ve mikrodalga (1-1000 mm) ile görünür ışık (0,38-0,78 µm) arasındaki dalga boyu bölgesinde yer almaktadır. Kızılötesi enerji kısa dalga boyuna sahip olması ve gıdaların da düşük ısıl iletkenlik katsayılarına (<0,6 W/mK) bağlı olarak etkin bir yüzey ısınması sağlayabilir. Bu prensiple, kızılötesi enerji uygulaması gıda endüstrisinde yüzey pastörizasyonu/dekontaminasyonu amacı ile kullanılabilmektedir. Ayrıca, kızılötesi enerji uygulaması gıda endüstrisinde var olan geleneksel ısıtma yöntemlerine göre zaman ve enerji tasarrufu sağlamak gibi daha pek çok avantajı ile öne çıkmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada matematik modelleme ve optimizasyon teknikleri kullanılarak gıdalarda yüzey pastörizasyonu/dekontaminasyonu sağlayan bir kızılötesi sistemin tasarımı ve optimizasyonu amaçlanmıştır. Bu kapsamda, modelleme çalışmaları, çoklu fizik yöntemine dayalı bir HAD yazılımı kullanılarak (Comsol V.5.2, Comsol AB, Stockholm, İsveç) 2 (ön modelleme) ve 3 boyutlu olarak yapılmıştır. Model doğrulama amacı ile yapılan deneysel çalışmalarda ise alüminyum materyalli bir silindir ve bir gıda ürünü olarak da incir tercih edilmiştir. İncir, gerek ülkenin önemli ihraç ürünlerinden olması gerek se üretim ve depolama aşamalarında karşılaşılan problemleri açısından tercih edilmiştir. Bu problemlerin en başında ise aflatoksin tehlikesi gelmektedir. Mikrobiyal inaktivasyon çalışmaları ile söz konusu tehlikenin azaltılabileceği/ortadan kaldırılabileceği tez çalışmasının sonuçlarından biri olmuştur. Buna göre, ürün yüzey sıcaklığının 50°C'nin üzerine çıkmasıyla ve 300 s proses süresi ile yeterli bir inaktivasyon sağlanabilmektedir.

Ocak 2020, 92 sayfa

Anahtar Kelimeler: Kızılötesi enerji, yüzey dekontaminasyonu, sistem tasarımı, gıda endüstrisi, matematiksel modelleme

ABSTRACT

Master's Thesis

DESIGNING AN INFRARED PROCESSING SYSTEM FOR SURFACE DECONTAMINATION OF FOOD PRODUCTS

Ayşe Hümeyra ERDAŞ

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Science
Department of Food Engineering

Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU

Infrared energy (IR) is a form of electromagnetic energy and is located in the wavelength zone between microwave (1-1000 mm) and visible light (0,38-0,78 μm). Infrared energy can provide effective surface warming depending on the short wavelength and the low thermal conductivity coefficients (<0,6 W/mK) of foods. With this principle, infrared energy application can be used for surface pasteurization/decontamination in the food industry. In addition, the application of infrared energy stands out with many advantages such as saving time and energy according to traditional heating methods in the food industry. The aim of this study was to design and optimize an infrared system that provides surface pasteurization/decontamination in foods using mathematical modeling and optimization techniques. Modeling studies were carried out using a HAD software (Comsol V.5.2, Comsol AB, Stockholm, Sweden) 2 (pre-modeling) and 3-dimensional based on the multiple physics methods. In the experimental studies conducted for model validation, aluminum was used as a cylindrical object and fig as a food product. Fig is one of the important export products of the country and it has been preferred in terms of the problems encountered during the production and storage stages. Aflatoxin is one of the most important problems. It has been one of the results of the thesis study that can reduce/eliminate the danger with microbial inactivation studies. The results of this study show that the product surface temperature is above 50 °C and inactivation of 300 s is ensured with sufficient process time.

January 2020, 92 pages

Key Words: Infrared radiation, surface decontamination, designing of systems, food endustry, mathematical modelling

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Eğitimimin her aşamasında fikirleri ile bana yol gösteren, tecrübe ve birikimiyle hayata farklı bir açıdan bakmamı sağlayan, yardımını ve desteğini esirgemeyen, sorduğum her soruyu anlayışı ve sabrı ile cevaplayan değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ferruh ERDOĞDU'ya (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Yüksek lisans eğitim sürecimde tanışma fırsatı bulduğum, gösterdiği yakın ilgi ve desteği için Sayın Prof. Dr. Aziz TEKİN'e (Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı),

Modelleme çalışmalarımdaki katkılarından dolayı laboratuvar arkadaşım sevgili Ozan KARATAŞ'a,

Deneysel çalışmalarımda kullanılmak üzere incir örneklerimi tedarik eden Aksun Tarımsal Ürünler A.Ş. (Mersin, Türkiye)'ye,

Akademik bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarıma ışık tutan, değerli görüşlerini esirgemeyen ablam ve eniştem F. Ruveyda-Mustafa ALKAN'a,

Tüm fedakârlıkları ve duydukları güvenle bana her zaman güç veren, beni bugünlere sevgiyle yetiştiren canım annem ve babam Zübeyde-Abdülcelil ALTUNTAŞ'a bana her koşulda destek ve yardımcı oldukları için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, 16L0443006 nolu ve "Gıda Ürünlerinin Yüzey Dekontaminasyonu Amacıyla Kullanılmak Üzere Kızılötesi Sistem Tasarımı" başlıklı proje kapsamında Ankara Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) koordinasyon birimi tarafından desteklenmiştir.

Ayşe Hümeyra ERDAŞ
Ankara, Ocak 2020

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI
ETİK ..... **i**
ÖZET ..... **ii**
ABSTRACT ..... **iii**
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR ..... **iv**
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ ..... **vi**
ŞEKİLLER DİZİNİ ..... **viii**
ÇİZELGELER DİZİNİ ..... **xii**
1. GİRİŞ **1**
2. KAYNAK ÖZETLERİ **4**
2.1 Gıda Endüstrisinde Kullanılan Termal Dekontaminasyon Yöntemleri **4**
2.2 Kızılötesi Sistemlerde Isıl İşlem **6**
2.2.1 Kızılötesi enerji ve uygulama prensibi **6**
2.2.2 Gıdaların kızılötesi sistemlerde prosesi **9**
2.3 Tez Çalışmasında Kullanılması Tercih Edilen Gıda Ürünü 'İncir' **11**
3. MATERYAL ve YÖNTEM **15**
3.1.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan kızılötesi sistem **15**
3.1.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan ürünler **19**
3.2 Yöntem **23**
3.2.1 Deneysel çalışmalar **23**
3.2.2 Matematiksel model çalışmaları **24**
4. BULGULAR ve TARTIŞMA **39**
4.1 Matematiksel Modelleme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar **39**
4.1.1 İki boyutlu çalışmalar **39**
4.1.2 Üç boyutlu çalışmalar **49**
4.2 Model Doğrulama Çalışmaları **66**
4.2.1 Alüminyum silindir kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar **66**
4.2.2 İncir kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar **71**
5. PROSES TASARIM VE MİKROBİYAL İNAKTİVASYON ÇALIŞMALARI **78**
5.1 Proses Tasarım **78**
5.2 Endüstriyel Proses – Sistem Tasarımı **79**
5.3 Mikrobiyal İnaktivasyon **81**
6. SONUÇ VE ÖNERİLER **84**
KAYNAKLAR **86**
ÖZGEÇMİŞ **92**

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

cm	Santimetre
cm^3	Santimetreküp
c_p	Özgül ısısı (J/kgK)
dk	Dakika
g	Yerçekimi ivmesi (m^2/s)
h	Isı transferi katsayısı (W/m^2K)
k	Isıl iletkenlik katsayısı (W/mK)
K	Kelvin
kg	Kilogram
kW	Kilowatt
L	Uzunluk (cm)
m	Metre
m^3	Metreküp
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
Q	Isı (J)
r	Yarıçap (cm)
s	Saniye
sa	Saat
T	Sıcaklık (°C, K veya R olarak)
T_s	Yüzey sıcaklığı (°C, K veya R olarak)
v	Hız (m/s)
V	Volt
W	Watt
$\bar{T}$	Ortalama sıcaklık (°C)
ΔT	Sıcaklık farkı (°C)
Pa	Basınç
°C	Derece Celcius

λ	Dalga boyu
ρ	Yoğunluk (kg/m³)

Kısaltmalar

AB	Avrupa Birliği
FIR	Far-infrared, Uzak Kızılötesi
IR	Infrared, Kızılötesi
MIR	Mid-infrared, Orta Kızılötesi
NIR	Near-infrared, Yakın Kızılötesi
KOB	Koloni Oluşturan Birim

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Dekontaminasyon yöntemleri (Warriner 2011) 4
Şekil 2.2 Elektromanyetik spektrum (Rastogi 2015) 7
Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan kavite (a. kızılötesi sistem, b. kontrol paneli) 15
Şekil 3.2 Sistem içerisinde konumlanmış olan ısı kaynağı (https://www.ceramicx .com 2019) (a. kızılötesi seramik lamba, b. geometrik görüntüsü) 16
Şekil 3.3 Kullanılan güce bağlı olarak lamba sıcaklık değişimleri (https://www.ceramicx.com 2019) 17
Şekil 3.4 300 °C'ye ulaşana kadar bir kızılötesi kaynağın ortalama sıcaklık değişimi .. 18
Şekil 3.5 Deneylerde kullanılan alüminyum silindir ve sıcaklık değişimini ölçen ısıl çiftin konumu 20
Şekil 3.6 Seçilen 5 tane incirin ortalama fiziksel boyutları ile elde edilen geometri 22
Şekil 3.7 3-boyutlu kızılötesi sistem geometrisi ve kızılötesi kaynakların sistem içindeki konumu 23
Şekil 3.8 Ön modelleme çalışmaları için kullanılan 2-boyutlu kızılötesi sistem (a. 2-boyutlu olarak hazırlanmış olan sistem geometrisi, b 2-boyutlu sisteme ait ağ yapısı) 28
Şekil 3.9 2-boyutlu olarak hazırlanmış olan modellerdeki materyal tanımlamaları (a. kızılötesi lamba, b. reflektör, c. hava, d. alüminyum ürün) 29
Şekil 3.10 Modelleme çalışmaları için oluşturulan en basit geometri ve ağ yapısı 31
Şekil 3.11 Adım 5'e ait sistem geometrisi 34
Şekil 3.12 Adım 5'e ait ağ yapısı 35
Şekil 3.13 3-boyutlu olarak hazırlanan kızılötesi sistem geometrisi (a. sistemin fiziksel ölçüleri, b. kızılötesi lambaların sistem içerisindeki konumu) 37
Şekil 4.1 2-boyutlu sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve 2 ile 5 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu prosesin 40. dakikasındaki durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. 2 ve 5 numaralı kızılötesi lambaların sıcaklık değişimi, c. alüminyum ortalama ve yüzey sıcaklık değişimi, d. gıda ürünü ortalama ve yüzey sıcaklık değişimi) 40
Şekil 4.2 Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve tüm lambaların aktif olduğu prosesin 10. dakikasındaki durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. gıda ürününün ortalama merkez ve yüzey sıcaklık değişimi) 42
Şekil 4.3 2-boyutlu sistem içerisinde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün ve hava ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırılması, c. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimi ve d. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda ürün – hava ortalama sıcaklık değişimi karşılaştırılması) 44

Şekil 4.4 2-boyutlu sistem içerisinde radyasyon, doğal konveksiyon ve ürün içi kondüksiyonun eşzamanlı çözüldüğü durumda sistem içi sıcaklık ve akış hız profili değişimi (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün ve hava ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırılması, c. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimi ve d. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda ürün – hava ortalama sıcaklık değişimi karşılaştırılması) 46

Şekil 4.5 2-boyutlu sistem içerisinde gerçekleşen ısı transferi model varsayımlarının karşılaştırılması 48

Şekil 4.6 Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve sadece bir çift kaynağın bulunduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi) 49

Şekil 4.7 Sistem içerisindeki radyasyon ile kondüksiyonun eş zamanlı çözüldüğü ve sistemde sadece bir kaynağın bulunduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi) 51

Şekil 4.8 Sistem içerisindeki radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyonun eş zamanlı çözüldüğü ve sistemde sadece bir kaynağın bulunduğu durum (a. sistem içerisinde doğal konveksiyon ile ısınan havanın hareketi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi) 52

Şekil 4.9 Sistem iç kavitesindeki yansımanın ısı transferine dâhil edildiği durum (a. sistemde ısınan havanın hareketi; b. ürün yüzey sıcaklık değişimi) 54

Şekil 4.10 Sistem geometrisine bir çift lamba daha eklendiği durum (a. sistemde artan lamba sayısı ile sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi) 55

Şekil 4.11 Sistem geometrisine bir çift lamba daha eklenip sıcaklıklarının deneysel verilere göre belirlendiği durum (a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklık değişimi) 56

Şekil 4.12 Sistem geometrisinde iki çift lamba varken sistemde sadece radyasyonun modellendiği durum (a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi) 57

Şekil 4.13 Sistem geometrisinde iki çift lamba varken sistemde havanın tanımlı olmadığı durumda alüminyum ürün ile sadece radyasyonun modellendiği durum (a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklığı ile deneysel verilerin karşılaştırılması) 58

Şekil 4.14 Sistem geometrisinde iki çift lamba varken sistemde havanın da tanımlı olduğu durumda alüminyum ürün ile sadece radyasyonun modellendiği durum (a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklığı ile deneysel verilerin karşılaştırılması) 59

Şekil 4.15 Sistemdeki 3-4, 9-10 numaralı kızılötesi kaynakların çalıştığı durumda sadece radyasyon ile olan ısı transferi varsayımında (a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklığı ile deneysel verilerin karşılaştırılması) ... 60

Şekil 4.16 Modelin normal ve kaba ağ yapısı ile çalıştırılması sonucu ürün merkez sıcaklık değişimi 62

Şekil 4.17 Reflektör emissivite değeri 0,01 ve 0,1 iken ürün merkez sıcaklık değişimi 63

Şekil 4.18 Sistem iç kavitesinin emissivite değeri 0,05-0,7 iken ürün merkez sıcaklık değişimi 63
Şekil 4.19 Sistem kavitesinin emissivite değeri 0,1-0,5 aralığında iken ürün merkez sıcaklık değişimi 64
Şekil 4.20 Sistem kavitesinin emissivite değeri 0,3-0,35 ve 0,4 iken ürün merkez sıcaklık değişimi 65
Şekil 4.21 Sistem kavitesinin emissivite değeri 0,3 ve reflektör emissivite değeri 0,1 iken ürün merkez sıcaklık değişimi 65
Şekil 4.22 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında 3-4 ve 9-10 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi) 67
Şekil 4.23 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği 3-4 ve 9-10 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi) 67
Şekil 4.24 3-4 ve 9-10 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durumda alüminyum silindirin merkez noktasındaki sıcaklık değişimi 68
Şekil 4.25 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında 5-6, 7-8 ve 15-16 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi) 68
Şekil 4.26 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği 5-6, 7-8 ve 15-16 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi) 69
Şekil 4.27 5-6, 7-8 ve 15-16 numaralı lambaların aktif olduğu durumda alüminyum silindirin merkez noktasındaki sıcaklık değişimi 69
Şekil 4.28 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi) 70
Şekil 4.29 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum (a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi) 70
Şekil 4.30 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durumda alüminyum silindirin merkez noktasındaki sıcaklık değişimi 71
Şekil 4.31 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem ortam sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı 72
Şekil 4.32 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem ortam sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı 72
Şekil 4.33 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem ortam sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı 73

Şekil 4.34 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem ortam sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı 73

Şekil 4.35 Sistem ortam sıcaklığında iken 12-aktif kızılötesi lamba (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı lambalar) kullanılması durumunda (a. incir alt noktası ve b. incir yan noktalarından elde edilen deneysel sonuçların model sonuçları ile karşılaştırılması)..... 74

Şekil 4.36 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı 75

Şekil 4.37 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı..... 75

Şekil 4.38 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı 76

Şekil 4.39 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı..... 76

Şekil 4.40 Sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken 12-aktif kızılötesi enerji kaynağı (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kaynaklar) kullanılması durumunda (a. incir alt noktası ve b. incir yan noktalarından elde edilen deneysel sonuçların model sonuçları ile karşılaştırılması) 77

Şekil 5.1 12-aktif kızılötesi enerji kaynağı (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kaynaklar) kullanılması durumunda incir yüzey ortalama sıcaklık değişimi 78

Şekil 5.2 12-aktif kızılötesi enerji kaynağı (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kaynaklar) kullanılması ve başlangıç kızılötesi sistem içi sıcaklığının 97 °C olması durumunda incir yüzey ortalama sıcaklık değişimi 79

Şekil 5.3 Endüstriyel sistem tasarımı kapsamında kullanılan tünel görüntüsü (a. tasarlanan geometri, b. simülasyonlarda kullanılan ağ yapısı) 80

Şekil 5.4 Kızılötesi ısıl işlem sırasında incir yüzeyinde (a) *Cladosprium* sp. ve (b) *B. cinerea* için mikrobiyal inaktivasyon değişimi 82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Kızılötesi sistemin (kavitenin), içerisinde bulunan kaynakların ve her bir kaynağın etrafındaki reflektörlerin termofiziksel özellikleri 18
Çizelge 3.2 Alüminyum silindire ait termofiziksel özellikler 19
Çizelge 3.3 Deneysel çalışmalarda kullanılan incirlerin fiziksel boyutları 21
Çizelge 3.4 İncire ait termofiziksel özellikler (Chantani 2009) 22
Çizelge 3.5 2-boyutlu matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının fiziksel özellikleri 30
Çizelge 3.6 Adım 1'e ait ağ yapısının fiziksel özellikleri 32

1. GİRİŞ

Gıda güvenliği, halk sağlığı ve ekonomik boyutu nedeni ile daima önemini koruyan bir konudur. Gıda endüstrisinde bu amaçla uygulanan pek çok mikrobiyal inaktivasyon ve gıda koruma yöntemi mevcuttur. Bu yöntemlerden, sıcak hava uygulamaları, soğuk hava uygulamaları, kurutma, dondurma, koruyucu maddelerle muhafaza gibi, geleneksel olarak kabul edilen dekontaminasyon yöntemleri gıdaların bozulmasına yol açacak mikrobiyolojik ve enzimatik değişmeleri önlemek ve sınırlamak amacı ile gıda endüstrisinde kullanılmaktadır. Ancak geleneksel dekontaminasyon uygulamaları sonucu gıdalarda ortaya çıkabilen istenmeyen fiziksel ve kimyasal değişimler gıda endüstrisinde kullanılacak alternatif yöntemlere eğilimi arttırmıştır. Bu nedenle özellikle son birkaç on yılda geleneksel dekontaminasyon yöntemleri yerine gıdanın gerek duyusal özelliklerini ve gerekse de mikrobiyolojik kalitesini olumlu yönde etkileyecek yöntemler giderek önem kazanmaktadır. Bu yöntemler arasında vurgulu elektriksel alan, iyonize radyasyon, yüksek basınç, ultrasonik ses dalgaları, plazma sterilizasyon, mikrodalga – radyo frekans ve kızılötesi enerji uygulamaları vb. (veya kombinasyonları) bulunmaktadır (Sağdıç vd. 2008).

Gıda dekontaminasyon yöntemleri arasında yenilikçi olarak sayılabilecek bir yöntem de gıda endüstrisindeki kullanım alanı giderek artan kızılötesi ısıtma uygulamasıdır. Kızılötesi ısıtma uygulaması maddesel bir ara ortama ihtiyaç duymaksızın ürüne doğrudan etki edebilen ve radyasyonla ısı transferi modunda çalışan bir uygulamadır (Staack vd. 2008). Kızılötesi enerji uygulamasında amaç, 0,78 - 1000 μm aralığında değişen kısa dalga boyu ve gıda maddelerinin de düşük ısıl iletim katsayısına (<0,6 W/mK) bağlı olarak gıda ürünlerinde yüzey dekontaminasyonu/pastörizasyonu sağlayabilecek bir sıcaklık artışını kısa bir proses süresinde oluşturmaktır. Kızılötesi enerjinin su içeriği yüksek olan ürünlerde, su molekülleri tarafından absorbe edilmesi de ürün yüzey sıcaklığının hızlı yükselmesi ve bu uygulama amacı doğrultusunda gerekli mikrobiyal inaktivasyonun sağlanmasını kolaylaştırmaktadır (Ramaswamy vd. 2012). Bu prensiple, gıda endüstrisinde kızılötesi enerji uygulaması, ürün yüzeylerinin dekontaminasyonu amacıyla kullanılabilmektedir. Ayrıca, kızılötesi uygulama konvansiyonel ısıl işlem yöntemlerine göre daha kısa ısıtma süresi, proses sırasında

kalite ve besin kayıplarının azaltılması ve önemli oranda enerji tasarrufu sağlaması gibi avantajlarıyla da öne çıkmaktadır (Sakai ve Hanzawa 1994).

Bu doğrultuda, bu tez çalışmasında, kızılötesi enerji uygulamasının, gıda ürünlerinin yüzey dekontaminasyonu amacı ile kullanılabildiği bir kızılötesi sistemin, sayısal matematiksel modelleme uygulaması ile, tasarlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, tez çalışması, öncelikle deneysel çalışmalar ve sonrasında da modelleme çalışmalarının yapılması olarak iki bölümden oluşmaktadır.

Tasarlanan kızılötesi ısıtma sisteminde hem sistem içerisinde bulunan hava sıcaklığındaki değişimlerin (ısınan hava ile ortamda meydana gelecek doğal konveksiyonun da sistem içi sıcaklık dağılımına etkili olacağı açıktır) hem kızılötesi ısıtma sırasındaki radyasyonla meydana gelecek ısı transferinin hem de ürün içerisindeki kondüksiyonla gerçekleşecek ısı iletiminin modellenmesi zor ve karmaşık bir işlem olarak göze çarpmaktadır. Bu kapsamda, öncelikle Comsol çoklu fizik programı kullanılarak 2 ve 3-boyutlu olmak üzere matematiksel modelleme çalışmaları yapılmıştır. Ön modelleme çalışmaları olan 2-boyutlu çalışmalarda, geliştirilecek 3-boyutlu modelin parametrelerine karar verebilmek amaçlanmıştır. Deneylerde kullanılan sistem geometrisi ve ölçülerinde 2-boyutlu olarak yapılan bu simülasyonlarda sistem içerisinde sadece radyasyon ile ısı transferi olduğu varsayımı, konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği ve konveksiyon etkilerinin ihmal edilmediği 3 ayrı durum incelenerek ısı transferi gözlenmiştir. 3-boyutlu gerçek sistem boyutlarında aynı 3 durumda yapılacak olan simülasyonlar için önemli çıktılar elde edilmiştir. 3-boyutlu gerçek sistem boyutlarında yapılan simülasyonlarda ise öncelikle alüminyum silindir kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonrasında ise incir kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar modellenmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan kızılötesi sistem 18 tane kızılötesi kaynak ve her bir lambayı ayrı ayrı kontrol edebilen bir panelden oluşmaktadır. Kızılötesi sistemde ısıl işlem ile proses sırasında alüminyum bir silindir ve gıda ürünü olarak da incir kullanılmıştır. Alüminyum silindir kullanılarak yapılan çalışmalarda sistem içerisinde bulunan farklı sayıda kızılötesi kaynağın çalıştırılması ile 3 farklı deney seti; incir kullanılarak yapılan çalışmalarda ise, incirin farklı proses koşullarında proses edilmesi ile 2 farklı deney seti oluşturulmuştur.

Sonuç olarak yüzey dekontaminasyonu amacıyla kullanılabilecek etkin bir kızılötesi sistemin, deneysel verilerle model sonuçları karşılaştırılıp doğrulanarak ve içerisinde meydana gelen ısı transferi problemi çözülerek endüstriyel bir proses için gerekli parametreler belirlenmiş ve endüstriyel boyutta kullanılabilecek sistemlerde proses tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

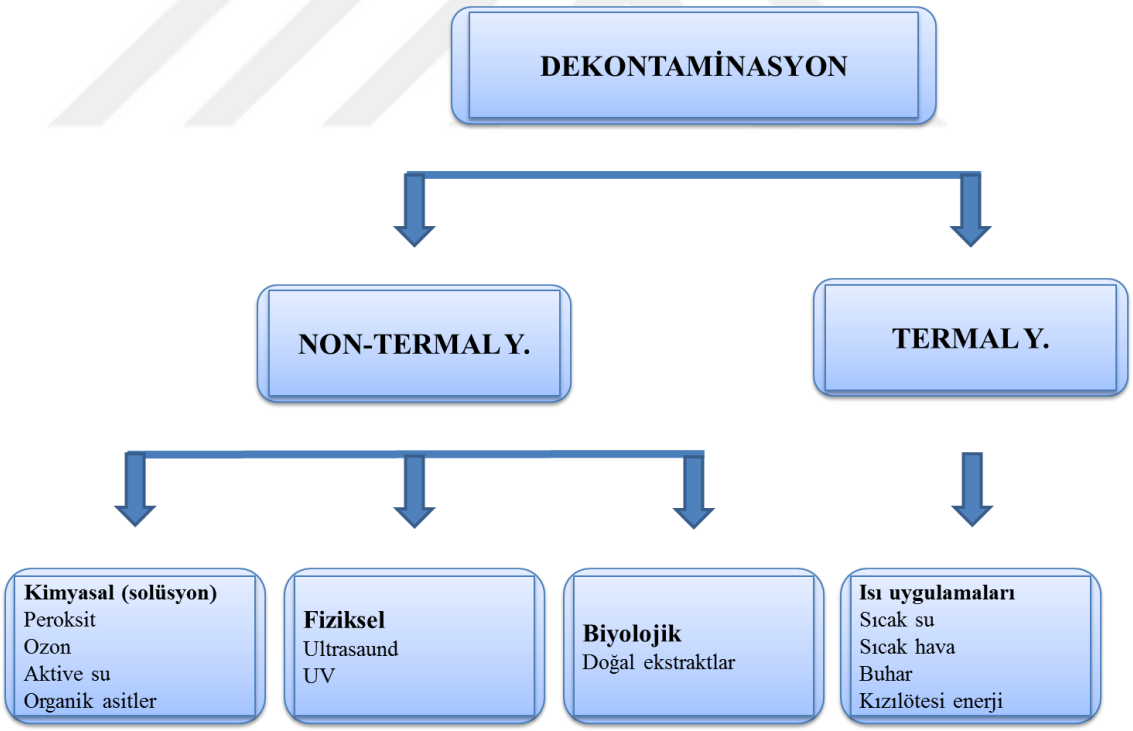
Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen kızılötesi ısıtma sırasında ürün ve ortam sıcaklık değişimlerinin belirlenmesinin, proses tasarımı ve optimizasyonu konusundaki çalışmalara bir temel teşkil edeceği ve yüzey dekontaminasyonu konusunda yapılacak proses tasarım çalışmaları için önemli bir temel oluşturacağı düşünülmektedir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1 Gıda Endüstrisinde Kullanılan Termal Dekontaminasyon Yöntemleri

Gıda güvenliği hem tüketici sağlığı hem de gıda endüstrisi açısından daima önemini koruyan bir mesele olarak dikkat çekmektedir. Bu kapsamda gıda kalitesini mümkün olduğunca koruyarak gıda güvenliğinin sağlanması esas amaçtır (Ramaswamy vd. 2012). Bu doğrultuda gıda ürünlerine uygulanan yöntem; dekontaminasyon, bir materyalin, ekipmanın veya ortamın tehlikeli (biyolojik, kimyasal, radyoaktif vb.) maddelerden arındırılarak güvenli hale getirilmesidir. Gıdalar açısından bu kavram, genel olarak gıdalardaki mikroorganizmaların uzaklaştırılması veya elemine edilmesi şeklinde tanımlanabilir (Solon ve Killeen 2015).

Aşağıda bazı dekontaminasyon yöntemleri gösterilmiştir:



Şekil 2.1 Dekontaminasyon yöntemleri (Warriner 2011)

Yukarıdaki gibi dekontaminasyon yöntemleri termal ve termal olmayan yöntemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır (Castell-Perez ve Moreira 2004). Termal yöntemlere

buhar ya da sıcak su uygulamaları, ohmik ısıtma, mikrodalga ısıtma, kızılötesi ısıtma gibi uygulamalar dâhilken, termal olmayan yöntemlere de vurgulu elektrik alan uygulaması, yüksek basınç uygulaması, ultrases ve ultraviole uygulamaları örnek olarak verilebilir (Skåra ve Rosnes 2016).

Gıda endüstrisinde kullanılan dekontaminasyon yöntemleri daha çok geleneksel olarak adlandırılan termal yöntemlerdir. Geleneksel termal dekontaminasyon yöntemleri genellikle sıcak su veya su buharı ile yüksek enerji girişine dayanan, mikrobiyal yükün kontrol altına alınması veya elemine edilmesi amaçlanan uygulamalardır (Skåra vd. 2014). Gıdalara uygulanan ısıl işlem ile mikroorganizma inhibisyonu sağlanarak güvenli gıda elde edilirken aynı zamanda gıdaların raf ömrü arttırılmaktadır (Weng 2006).

Örneğin, *Salmonella* inoküle edilen yumurtalara 57 °C'de 85 dk, 58 °C'de 65 dk su banyosunda pastörizasyon işlemi uygulandığında proses sonunda *Salmonella*'nın tamamının inaktif olduğu gözlenmiştir (Schuman vd. 1997). Başka bir çalışmada sıcak su ve sıcak hava kombinasyonu 57 °C- 25 dk sıcak su, 55 °C- 60 dk sıcak hava olarak uygulanan yumurtalardaki *S. enteritidis* sayısında 7 log KOB/g azalma sağlanmıştır (Hou vd. 1996).

Termal yöntemler, yani ısı ile gıdaların dekontaminasyonu sırasında mikroorganizmalar hedef alınırken aynı zamanda gıdaların yapısında bulunan bazı enzimler de inaktif hale gelir. Bu proses sırasında gıdaların besinsel değerini ve duyusal özelliklerini etkileyen bazı değişimler de olabilmektedir (Purnell ve James 2012). Bu uygulamaların uzun proses süreleri, fazlaca enerji gereksinimi, gıdalarda istenmeyen fiziksel veya kimyasal değişimlere sebep olmaları gibi dezavantajları yeni tekniklere duyulan ihtiyacı arttırmıştır. Son yıllarda gıda endüstrisinde kullanılan termal dekontaminasyon yöntemlerinden kızılötesi enerji uygulaması sağladığı pek çok avantaj ile giderek yaygınlaşmıştır (Rastogi 2012).

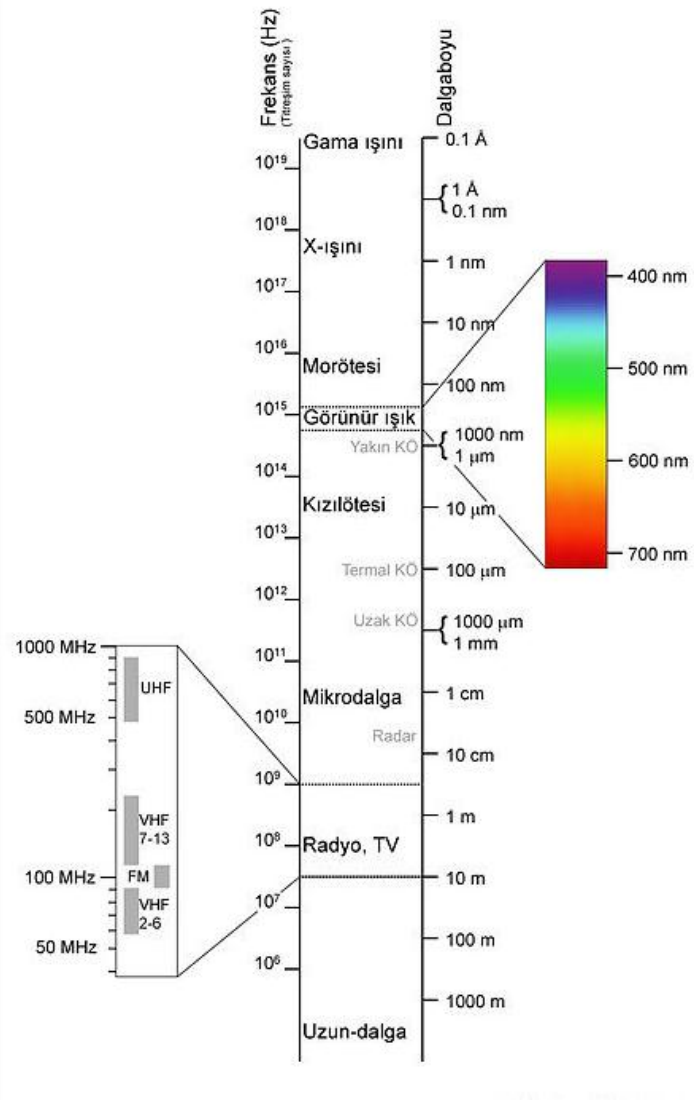
2.2 Kızılötesi Sistemlerde Isıl İşlem

2.2.1 Kızılötesi enerji ve uygulama prensibi

Isı, sıcaklık farkı sonucu bir sistemden diğerine aktarılabilen bir enerji türüdür. Isı transferi ise; iletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışınım (radyasyon) olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşmektedir (Yüncü ve Kakaç 1999). Bunlardan ışınım; ısı iletimi için hiçbir ortama ihtiyaç duymayıp elektromanyetik dalgalarla olan ısı transferi şeklidir. Örnek olarak kızılötesi enerji uygulaması verileblir.

Kızılötesi enerji uygulandığı materyal üzerinde sıcaklık artışı sağlayan elektromanyetik radyasyon (ışınım) uygulamasıdır (Rastogi 2015). Bir başka değişle kızılötesi enerji atom ve moleküllerin yüklü elektron ve proton hareketlerinden doğan, elektromanyetik dalga olarak bilinen, enerjinin bir formudur. Ayrıca kızılötesi enerji uygulaması ısı üretimi sağladığı için literatürde termal radyasyon (ısıl ışınım) şeklinde de adlandırılmaktadır (Çengel 2003).

Kızılötesi enerji, mikrodalga (1-1000 mm) ve görünür ışık (0,38-0,78 μm) arasındaki dalga boyu bölgesinde yer almakta ve dalga boyuna göre yakın kızılötesi (NIR – 0,78-1,4 μm), orta kızılötesi (MIR – 1,4-3 μm) ve uzak kızılötesi (FIR - 3-1000 μm) olmak üzere üç bölgede sınıflandırılmaktadır (Şekil 2.2) (Hudson 1969, Jun vd. 2010). Dalga boyunda oluşan maksimum radyasyon, IR ısıtıcının sıcaklığı olarak tanımlanmaktadır. Bu ilişki siyah cisim radyasyonu için Planck yasası, Wien yer değiştirme yasası ve Stefan Boltzman yasaları ile aşağıdaki şekilde açıklanabilir (Krishnamurthy vd. 2008).



Şekil 2.2 Elektromanyetik spektrum (Rastogi 2015)

Planck yasası:

Planck yasası, belirli bir sıcaklıktaki radyasyonun tamamını yayan siyah cisimden yayılan radyasyonun spektral dağılımını verir. IR ısı kaynağı farklı sıcaklıktaki binlerce noktadan oluşmaktadır. Bu noktaların kaynaklarının birleşmesiyle belli bir bölge için spektral dağılım elde edilebilir. Böylece ortalama yüzey sıcaklığı ve emissivite değerleri kullanılarak tahmini spektral dağılım elde edilebilir ve bu dağılım ile IR radyasyon tanımlanabilir.

Kırılma indisi n olan saydam bir ortamla sınırlanan siyah yüzeyde, spektral siyah cismin emissivite güç dağılımı için Planck eşitliği aşağıda belirtilmiştir:

$$E_{b\lambda}(T,\lambda) = \frac{2\pi h c_0^2}{n^2 \lambda^5 [e^{hc_0/n\lambda kT} - 1]} \quad (1)$$

Burada; k; Boltzmann sabiti (1,3806 x 10^{-23} J/K), n; ortamın kırılma indisi, λ; dalga boyu (μm), T; kaynağın sıcaklığı (K), c_0; ışık hızı (km/s) ve h; Planck sabiti (6,626 x 10^{-34} J.s)'dir.

Stefan-Boltzmann Yasası:

Mutlak sıfır derecenin üzerindeki sıcaklıklarda bütün cisimler ısıl ışınım yayarlar. T_s sıcaklığına sahip bir yüzeyden yayılabilecek maksimum ışınım hızı Stefan-Boltzmann Yasası ile aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$E_b(T_s) = \sigma A_s T_s^4$$

$$E_b(T_s) = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2)$$

Burada; σ; Stefan-Boltzmann sabiti (5,670 x 10^{-8} W/m^{2}K^4), A_s; yüzey alanı (m^2), ε ise yüzeyin yayıcılığıdır.

Wien Yer Değiştirme Yasası:

Wien yer değiştirme yasasıyla pikin dalga boyu (λ_{max}) belirlenebilir. Bu dalga boyunda siyah cisim tarafından yayılan ışınımın spektral dağılımı, maksimum emissivite gücüne ulaşır. İstenilen spektral dağılım için IR kaynak sıcaklığı (T) aşağıdaki formül ile tahmin edilebilir:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T}$$

Bu kapsamda, Wien kanununu göz önünde bulundurularak, kızılötesi enerjinin kısa dalga boyuna sahip olması bilgisi ile, bir (kara) cismin sıcaklığı ile yaydığı-absorbe ettiği enerjinin maksimum dalga boyu arasında basit bir ilişki vardır, denir. Örneğin, 700 K sıcaklığındaki bir kızılötesi kaynak ile en fazla 4,14 mikrometre dalga boyuna sahip bir enerji uygulanabilir. Buradaki sonuç, kızılötesi enerjinin kısa dalga boyuna ve gıdaların da düşük ısıl iletkenlik katsayılarına bağlı olarak, gıdalara derin şekilde penetre olamadığıdır. Bu prensiple kızılötesi enerji ürün yüzeyinde hızlı ve hatta homojen bir sıcaklık artışı sağlayarak gıdaların yüzey dekontaminasyonu amacıyla kullanılabilir. Ayrıca yine Wien kanunun bir sonucu olarak hava ve bu gibi gazların kızılötesi enerjiyi çok çok az absorbe etmeleri sebebiyle kızılötesi enerjinin ortamı ısıtma gerekliliği olmadan kullanılması oldukça önemli bir avantajdır.

2.2.2 Gıdaların kızılötesi sistemlerde prosesi

Kızılötesi enerjinin gıda endüstrisinde kullanımı 1950'li yıllarda kurutma çalışmaları ile başlamıştır (Ranjan vd. 2002). Ayrıca kızılötesi enerji uygulaması gıda endüstrisinde ısıl işlemler, gıdaların kimyasal kompozisyonunun spektroskopik yöntemlerle belirlenmesi ve temassız olarak gıdaların sıcaklarının ölçümü gibi konularda yarar sağlamaktadır (Trivittayasil 2014).

Kızılötesi enerji gıda endüstrisinde en çok,

- Kurutma (Savaş ve Basman 2016),
- Yüzey dekontaminasyonu (Hamanaka vd. 2011),
- Fırınlama (Turabi vd. 2008, Shyu vd. 2008),
- Pişirme (Sheridan ve Shilton 1999),
- Haşlama (Galindo vd. 2005),
- Kavurma (Kim vd. 2006, Uysal vd. 2009),
- Kabuk soyma (Rock 2011),
- Çözdürme (Sakai vd. 1995) vb. proseslerinde,

- Enerji etkinliğini arttırma,
- Ürün yüzeyinde hızlı ve homojen sıcaklık artışı sağlama,
- Son ürünün kalite kriterlerinde iyileşme,
- Sıcaklığın ve zamanın etkili kontrolü,
- Proses zamanında kısalma,
- Gıda endüstrisi açısından uygulanabilirlik ve pratiklik vb. avantajları ile kullanılmaktadır (Özkoç 2010, Pan ve Atungulu 2010, Rastogi 2015).

Kızılötesi enerji kullanımı özellikle proses sırasında ortamı ısıtmak için bir enerjinin harcanmasına gerek duymayıp direkt olarak ürün yüzeyine etki etmesi avantajıyla öne çıkmaktadır. Ayrıca, ürün yüzeyi tarafından absorbe edildiği ve çok az kısmı ürün içine nüfuz edebildiği (gıda ürünlerinin düşük ısıl iletkenlik katsayılarından dolayı) için benzersiz bir yüzey ısınması sağlayarak yüzey dekontaminasyonunda uygulanabileceği belirtilmektedir (Huang ve Sites 2008).

Kızılötesi enerjinin su içeriği yüksek olan ürünlerde, su molekülleri tarafından absorbe edilmesi de ürün yüzey sıcaklığının hızlı yükselmesi ve bu kapsamda gerekli mikrobiyal inaktivasyonun sağlanmasını kolaylaştırmaktadır (Ramaswamy vd. 2012). Hızlı yüzey ısınması ve gıda ürünlerinin düşük ısıl iletim katsayılarına (<0,6 W/mK) bağlı olarak, ürünün kızılötesi enerjiye maruz kalma zamanı ve şiddeti uygun şekilde kontrol edildiğinde ürün içerisinde fazla sıcaklık artışına sebep olmadan gıdaların yüzey sıcaklığının mikroorganizma sayısında belirli bir azalma sağlayacak dekontaminasyon değeri elde edilecek kadar yükseltilebileceği açıktır.

Gıdalarda yüzey dekontaminasyonu son yıllarda değişik araştırmalara konu olmuştur (Afzal ve Abe 1998, Kozempel vd. 2000, Marquenie vd. 2002, Huang 2004, James ve Evans 2006, Hauge vd. 2011, Bernini vd. 2015). Bu amaçla öne çıkan teknoloji ise kızılötesi enerjinin kullanımı ile yüzey dekontaminasyonunu gerçekleştirmektir.

Tanaka vd. (2007), çalışmasında kızılötesi uygulamanın çileklerin yüzey dekontaminasyonunu sağlayan alternatif bir teknik olduğunu göstermiştir. Benzer bir çalışmada, Trivittayasil vd. (2011) ve Tanaka vd. (2012), incirlerde farklı bozulma

etmeni olan ve problemlere sebep veren *Cladosporium* ve *Penicillium* türleri ve *Botrytis cinerea* ile *Monilinia fructigena* hedefli çalışmalarında kızılötesi uygulama ile yüzey dekontaminasyonu işleminin yapılabileceğini göstermiştir.

Erdoğdu ve Ekiz (2013) tarafından yapılan bir araştırmada karabiber tanelerinin kızılötesi enerji kullanımı ile yüzey dekontaminasyonu sonucu ürünün mikrobiyal yükü merak edilmiş, sonuçta tebliğde belirtilen toplam canlı mikroorganizma sayısında azalma sağlanabildiği görülmüştür.

Benzer çalışmalarda, Scheerlinck vd. (2004) ve Tanaka vd. (2007)'da çileklerde hasat sonrası yüzey dekontaminasyonu amacı ile *Botyrtis cinerea* ve *M. fructigena* hedefli kızılötesi uygulama kapsamında matematiksel modelleme çalışmaları yapmışlar ve çilekler için gerekli kritik yüzey sıcaklığı değerini 50 °C olarak belirlemişlerdir. Farklı küf ve mantar türleri için kinetik parametreler de Yamada (2010) ve Marquenie (2002) tarafından verilmiştir.

2.3 Tez Çalışmasında Kullanılması Tercih Edilen Gıda Ürünü 'İncir'

İncir; Anadolu'da yetişen kültür meyveleri içinde, en eski gelişme tarihine sahip olan bir meyvedir. İncirin anavatanı Türkiye olup buradan Suriye, Filistin ve daha sonra da Ortadoğu üzerinden Çin ve Hindistan'a yayılmıştır.

İncir Türkiye'nin tüm sahil kuşağında yetişebilmektedir. Aydın ve çevresi ise incir üretiminin %80'ini karşılamaktadır. Türkiye, hem incir hem de kuru incir üretiminde dünyada ilk sırada olup, üretimin %30'u taze olarak iç pazarda, %70'i ise kuru incir olarak iç ve dış pazarlarda tüketilmektedir. 2001-2010 yılları verilerine göre, Türkiye dünya ihracatının yarısından fazlasını karşılayarak dünyanın en büyük incir üreticisi ve ihracatçısı konumundadır. 2012 yılı itibari ile de kuru incir ihracatının %60'ı AB ülkelerine yapılmaktadır (Çiftçi 2013).

Sektörde, ihracat yapılan pazarların devamlılığı ve korunması, yeni pazarlar kazanılması, fiyatlarda istikrarın sağlanması, dış pazarlarda artan standartlara ve azalan

toleranslara cevap verebilecek özellikte güvenilir ürün elde edilmesinin sağlanması ve ürünün tanıtılmasını sağlayacak çalışmaların çok boyutlu olarak ele alınması gerekmektedir. Bu nedenle, incirin temiz, gerekli standartlara uygun ve kaliteli üretiminin sağlanması güncelliğini koruyan bir husus/sorun olarak görülmektedir (2012 Yılı Kuru İncir Raporu 2013).

İncir ve kuru incir üretiminde üretim aşamasında karşılaşılan ve olumsuz sonuçlara yol açan pek çok sorun bulunmaktadır. Bu sorunların başında gelen mikotoksin tehlikesi (Şen ve Nas 2010)., hem gıda güvenliğini etkileyerek sağlık açısından risk oluşturmakta hem de önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır (O'Riordan ve Wilkinson 2008). Kuru incir mikotoksin problemi açısından yüksek risk grubunda yer alan meyve türlerinden biri olup (Bircan vd. 2008), yapılan çalışmalarda en çok tespit edilen mikotoksinler, Aflatoksin ve Okratoksin A olarak belirlenmiştir (Şen ve Nas 2010). Aflatoksinler, *Aspergillus* küfleri tarafından üretilen toksik metabolitlerdir (Zinedine vd. 2007; Giorni vd. 2008; Bhat vd. 2010).

İncirde mikotoksin oluşumu, meyve henüz ağaçtayken başlayabilmekte, bunu takiben hasat ve depolama süresince de devam edebilmektedir. İncirler, hasat sonrası nem içeriklerinin düşürülmesi amacıyla güneşte kurutulabilmektedir (Jackson ve Al-Taher 2008). İncirin yetiştiği bölgelerdeki sıcaklık aralığı (27-30 °C) küf gelişimi için gerekli olan optimum sıcaklık aralığı ile çakışmakta (Jackson ve Al-Taher 2008), dolayısıyla da mikotoksin oluşumuna olanak sağlamaktadır. Hasat ve güneşte kurutma işlemleri de ayrıca mikotoksin oluşumuna katkıda bulunabilmektedir. İncirin depolanma aşamasında ise mikotoksin oluşumunu etkileyen faktörlerin başında nem içeriği, depo şartları ve meyve nem içeriğinin heterojen olması gelmektedir (Karbancıoğlu-Güler ve Heperkan 2008). Fabrikasyon aşamasında ise incirler öncelikle depo zararlılarını önlemek amacı ile fümigasyona tabi tutulmaktadır. Fumigant olarak kullanılan metil bromid'in 2005 yılında Montreal protokolü kapsamında gelişmiş ülkelerde ve 2007 yılında Türkiye'de kullanımı özel alanlar hariç yasaklanmasıyla fumigasyon uygulamalarında farklı kimyasal (fosfin, karbonil sülfit, sülfüril florit, karbon disülfit, ozon, etil format, metil iyodit vb.) ve kimyasal olmayan (değiştirilmiş atmosfer, yüksek basınç, sıcak/soğuk uygulamaları, radyo frekansı, radyasyon, vb.) birçok yöntemin denenmesi halen devam

etmektedir (Meyvacı ve Şen 2007). Fumigasyon aşamasından sonra incirler depolanmakta, boylarına göre sınıflandırılmakta ve aflatoksinli incirlerin ayrılması işlemine tabi tutulmaktadırlar (Karaca 2006). Daha sonra yıkama ve kurutma aşamalarıyla kuru incir prosesi tamamlanmaktadır.

Çiftçi (2013) tarafından da belirtildiği gibi, aflatoksin sorunu Türkiye'nin ihraç ettiği kuru incirde en önemli problemlerden olup; her yıl çok miktarda ürün aflatoksin problemi nedeni ile geri gönderilmekte, ayrıca aflatoksin bulaşmış incirin ayıklanması incir ihracatçıları için önemli masraflar çıkarmakta, aflatoksin miktarı yüksek çıkan ürünlerin imha edilmesi de söz konusu olmaktadır. Kuru incir ihracatımızda aflatoksin sorunu ilk olarak 1972 yılında Danimarka'ya yapılan ihracat sonrasında ortaya çıkmıştır (Kabak ve Var 2006). Yine 1972'de, ABD'ye ihraç edilen 48 parti incirden 38'i aflatoksin ile bulaşık olduğu gerekçesi ile geri gönderilmiştir (Kaya 1989).

Bu nedenle, incir üretiminde hasat öncesi – sonrası veya depolama aşamasında herhangi bir işlem basamağında ortaya çıkabilen bu tehlikenin azaltılması büyük bir öneme sahiptir. Halen, bu kapsamda uygulanan (zamanında ve tekniğine uygun şekilde budama yapılması, hasat döneminde yere düşen meyvelerin sık sık toplanması, kurutmanın tahta ızgaralar (kerevit) üzerinde yapılması, küf oluşumunun önlenmesi için tam kurutma sağlanması, sergiden alınırken hurda incirlerin ayıklanması gibi) yöntemler yetersiz kalmakta ve proses sonrası aflatoksinli incirlerin ayrılması gerekliliği de ekstra bir işlem basamağı ve proses maliyeti gerektirmektedir. Proses sonrası depolama sürecinde de, üründe doğal olarak var olan küflerin tehdit oluşturmaya devam etmesi de ayrıca problem yaratmaktadır. Bu nedenle, özellikle hasat sonrası, bir mikrobiyal inaktivasyon uygulamasının hem gıda güvenliğinin sağlanmasında hem de incirlerin raf ömrünün uzatılmasında etkin olacağı literatürde de belirtilmektedir (Tanaka vd. 2012).

Gıda güvenliği kapsamında, incir – kuru incir üretiminde aflatoksin oluşumunu azaltacak/engelleyecek endüstriyel olarak kullanımı kolay ve kuru incir prosesine kolaylıkla entegre olabilecek bir yöntemin geliştirilmesi ülke ekonomisi açısından önemli bir kazanç olacaktır. Söz konusu probleme bir çözüm bulma kapsamında, bu tez çalışması sonucunda kızılötesi enerji kullanımı ile matematiksel modelleme altyapısına

dayalı bir sistem tasarımının yapılması, bu tasarımın incir üretiminde yüzey dekontaminasyonu (aflatoksin oluşumuna sebep veren *Aspergillus* küfleri – *A. flavus, A. parasiticus, A. nomius ve A. niger*- hedef seçilerek) prosesinin kurutma öncesi ön işlem basamağı olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Tasarımı planlanan sistemin incir üretiminde kurutma öncesi ön-işlem basamağı olarak kullanılmasıyla proses sırası veya sonrasında, ilgili mikroorganizmanın inaktivasyonu ile, son üründe aflatoksin oluşma tehlikesinin önüne geçilmiş olacaktır. Ayrıca, kızılötesi uygulamanın üründe bulunabilecek farklı larva vb. üzerine olan etkisi de düşünüldüğünde (Pan vd. 2006), uygulanacak prosesin incir üretiminde kullanılan fumigasyon işleminde kullanılan kimyasal madde konsantrasyonu ve uygulama zamanının azaltılmasında etkili olabileceğinin gösterilmesi de çalışmanın sonuçlarından biri olabilecektir. Bu kapsamda, incirlere uygulanacak kızılötesi proses sırasında incir yüzey sıcaklık değişimleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) temelinde bir çoklu fizik programı Comsol (Comsol V.5.2, Comsol AB, Stockholm,İsveç) kullanılarak modellenmiş, ürün yüzey sıcaklık değişimleri (incirlerde özellikle ostiol bölgesindeki küf varlığının sorun yarattığı bilindiğinden bu bölgedeki sıcaklık değişimleri baz alınarak) ve kızılötesi sistem içi oluşan sıcaklık dağılımı değerleri sistem tasarımında kullanılarak proses tasarımı ve optimizasyon çalışmalarına bir temel oluşturulmuştur. Bu kapsamda, ürün ve kızılötesi kaynak – lamba uzaklıkları ve proses süresi açısından yapılması planlanan optimizasyon çalışmalarında ürün ortalama yüzey sıcaklık değişimi kullanılmıştır. Tanaka vd. (2012), 55 °C yüzey sıcaklık değerinin üzerinde incir tekstürel özelliklerinde problemlerin ortaya çıktığını belirtmektedir. Buna göre, kullanılacak olan incir çeşidinde hedef yüzey sıcaklık değeri, tez çalışmaları sırasında ısıl uygulama ve depolama sırasında olan değişimleri karşılaştırılarak belirlenmiştir. Belirtilen çalışmada (Tanaka vd. 2012) verilen 55 °C sıcaklığın, kullanılan incir türünde (*Ficus Carica L.*) ürün yüzeyinde görsel bir zarara sebep olmadığı ve Cladorsporium türlerinin inaktivasyonu için yeterli olduğu belirtilmektedir. Mikrobiyal inaktivasyon kapsamında, elde edilen ürün sıcaklık değişimleri kullanılarak mikrobiyel inaktivasyon birinci dereceden kinetik modelle tanımlanıp incir yüzeyindeki dekontaminasyon değeri ayrıca belirlenmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

3.1.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan kızılötesi sistem

Tez çalışması kapsamında yapılan matematiksel modellerin deneysel verilerle doğrulanması amacıyla tasarımı Prof. Dr. Ferruh Erdoğdu tarafından gerçekleştirilen bir kızılötesi sistem kullanılmıştır. Şekil 3.1'de kontrol ünitesi ile birlikte gösterilen bu sistem 56,1 cm genişlik, 52,2 cm derinlik ve 34,2 cm yüksekliğindedir. Sistem içerisinde 18 adet seramik kızılötesi ısı kaynağı (Şekil 3.2) ve her birinin etrafında alüminyum materyalinden yapılmış olan ve kızılötesi enerjiyi sistem içerisinde yer alan ürün yüzeyine yansıtma amacıyla kullanılan yuvalar – iç bükey reflektörler bulunmaktadır.



a



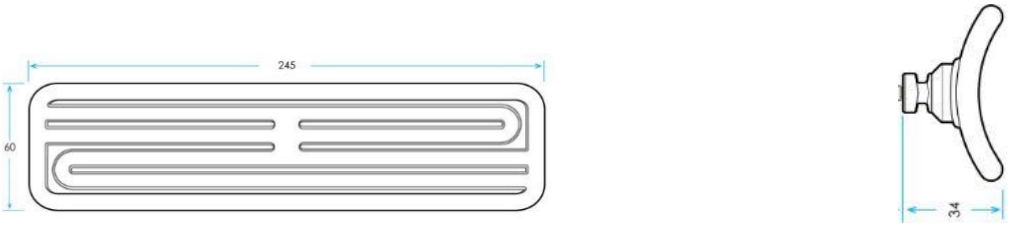
b

Şekil 3.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan kavite

(a. kızılötesi sistem, b. kontrol paneli)



a



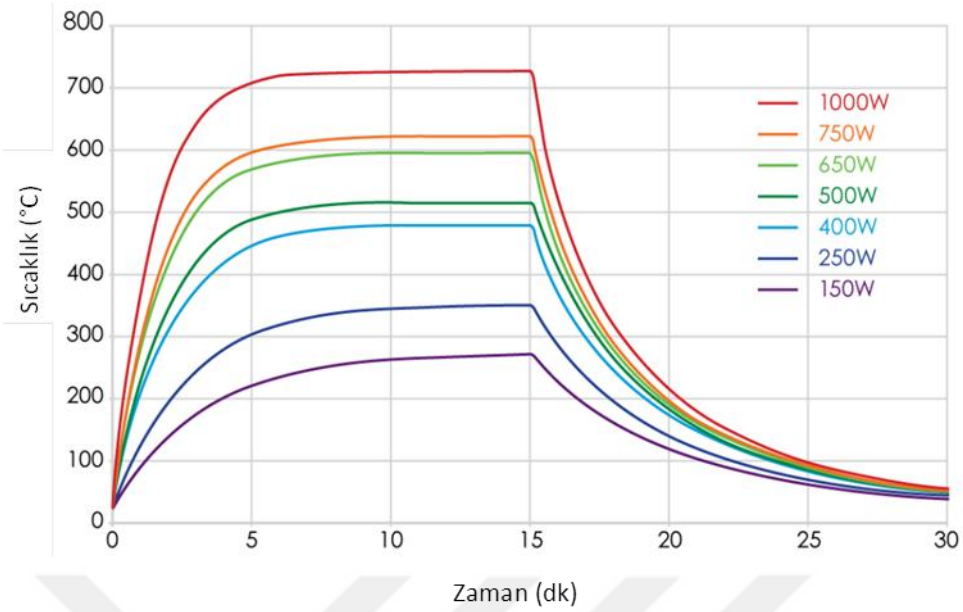
b

Şekil 3.2 Sistem içerisinde konumlanmış olan ısı kaynağı (https://www.ceramicx.com 2019)

(a. kızılötesi seramik lamba, b. geometrik görüntüsü)

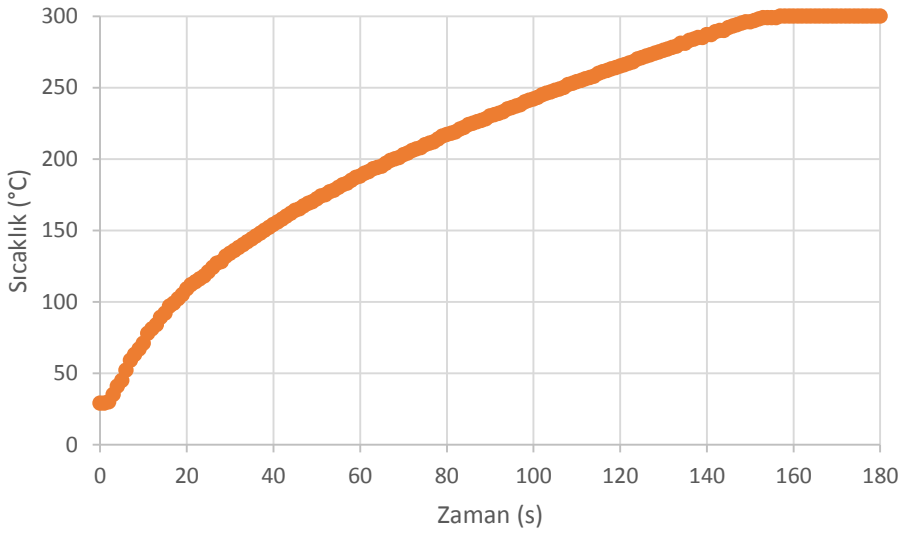
Seramik kızılötesi ısı kaynakları bu alüminyum reflektörler içerisine yerleştirilmiştir. Sistem üst yüzeyinde proses sırasında kızılötesi termal kamera ile görüntü alınmasını sağlayan 5,5 cm çapında bir gözlem açıklığı da bulunmaktadır. Sistem iç yüzeyi kızılötesi ışınların tamamının örnek üzerine yoğunlaşması amacı ile alüminyum ile kaplanmıştır. Sistemden dışarıya olabilecek ısı kaybı, sistemin dış yüzey ana malzemesi altına yerleştirilen özel ısı yalıtım malzemeleri ile engellenmiş, sistemde kullanılan tüm kabloların ısı yalıtımına özellikle dikkat edilmiştir.

Sistem içerisine yerleştirilmiş olan ve kızılötesi enerji kaynağı olarak kullanılan seramik lambalar 245 x 60 x 34 mm boyutlarında 230 V - 500 W gücünde olup (sistem toplam 9 KW gücünde çalışmaktadır) 2-10 µm dalga boyunda enerji yayma, 30 kW/m^2 ısı akısı ve maksimum 515 °C yüzey sıcaklığı özelliğine sahiptirler. Kullanılan seramik lambalar için verilmiş kullanılan güce bağlı olarak lamba sıcaklık değişimleri ise şekil 3.3'de gösterilmektedir (https://www.ceramicx.com 2019). Sistem içerisindeki kızılötesi enerji kaynakları, kızılötesi enerjinin gıda bileşenleri ve mikroorganizmalar tarafından geniş spektral dalga boyu aralığının bir sonucu olarak en çok uzak kızılötesi (FIR) bölgesinde absorbe edilebildiğinden (Rastogi 2015), FIR bölgede çalışan seramik lambalardan seçilmiştir.



Şekil 3.3 Kullanılan güce bağlı olarak lamba sıcaklık değişimleri (https://www.ceramicx.com 2019)

Deneysel çalışmalar sırasında proses başladığında başlangıçta ortam sıcaklığında olan kızılötesi ısı kaynakları 300 °C sıcaklığa ayarlanmış ve kaynakların bu sıcaklığa ulaşana kadar geçen süredeki sıcaklık değişimleri kaydedilmiştir. 180 s stabil çalışma sıcaklığına ulaşmak için yeterli bir süredir. Bu veriler matematiksel modelleme çalışmaları kapsamında oluşturulan simülasyonlarda kızılötesi enerji kaynakları yüzey sıcaklık değeri olarak kullanılmıştır. Şekil 3.4 bir kızılötesi ısı kaynağının 300 °C'ye ulaşana kadar ortalama sıcaklık değişimini göstermektedir.



Şekil 3.4 300 °C'ye ulaşana kadar bir kızılötesi kaynağın ortalama sıcaklık değişimi

Kızılötesi sistem iç kavite duvarlarının, kızılötesi sistem içinde yer alan kızılötesi seramik lambaların ve her bir kaynağın etrafında bulunan reflektörlerin termofiziksel özellikleri (ısıl iletkenlik katsayısı, özgül ısı kapasite değeri ve yoğunluk) Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Kızılötesi sistemin (kavitenin), içerisinde bulunan kaynakların ve her bir kaynağın etrafındaki reflektörlerin termofiziksel özellikleri

Materyal	Isıl iletkenlik katsayısı k (W/mK)	Yoğunluk ρ (kg/m^3)	Isı kapasitesi c_p (J/kgK)	Emissivite ε
Kızılötesi sistem kavitesi (Alüminyum)	238	2700	900	0.3
Kızılötesi seramik lamba	400	8700	386	0.95
Reflektör	238	2700	900	0.1

3.1.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan ürünler

Bu tez çalışması kapsamında deneysel çalışmalarda siyah cisim özelliği sağlamak amacıyla koyu – siyah boya ile (emissivite değeri ≈1 kabul edilebilen) boyanmış olan bir alüminyum silindir ve gıda ürünü olarak da incir kullanılmıştır. Alüminyum silindir kullanılarak gerçekleştirilen matematiksel model çalışmalarında kullanılan kızılötesi sistem malzemelerinin (duvarlar, kızılötesi kaynakların odaklanması amacıyla içerisine yerleştirildikleri alüminyum yuvalar) emissivite değerleri model doğrulama kapsamında deneme – yanılma yöntemleriyle belirlenmiştir. Daha sonra bu sistemde incir kullanılarak yüzey pastörizasyon işleminin etkinliği belirlenmiş ve bu kapsamda geliştirilerek ve doğrulanan model kullanılarak proses tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum silindir kullanılarak yapılan çalışmalarda sistem içerisinde farklı sayıda kızılötesi ısı kaynak konfigürasyonu kullanılarak model doğrulama çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda belirlenen tasarım parametreleri, özellikle sistem içerisinde kullanılan malzemelerin emissivite değerleri kullanılarak, incir yüzey pastörizasyon prosesi için proses tasarım model çalışmaları gerçekleştirilmiş ve yüzey dekontaminasyonu için alternatif endüstriyel sistem tasarımları ile tez çalışması tamamlanmıştır.

Kullanılan alüminyum silindir 10 cm çapında ve 3 cm yüksekliğinde olup (Şekil 3.5) ısısal özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir:

Çizelge 3.2 Alüminyum silindire ait termofiziksel özellikler

Materyal	Isıl iletkenlik katsayısı k (W/mK)	Yoğunluk ρ (kg/m^3)	Isı kapasitesi c_p (J/kgK)	Emissivite ε
Alüminyum silindir	238	2700	900	1.0



Şekil 3.5 Deneylerde kullanılan alüminyum silindir ve sıcaklık değişimini ölçen ısıl çiftin konumu

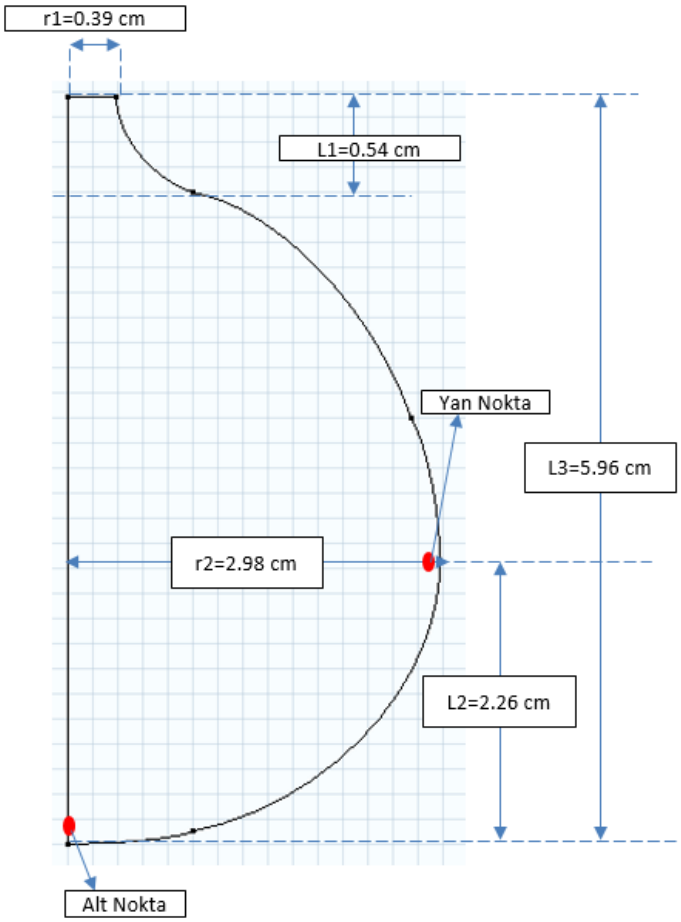
Alüminyum silindir kullanılarak yapılan deneysel çalışmalarda farklı kızılötesi kaynak konfigürasyonları ile sistem içinde proses ile birlikte meydana gelen ısı transferi olayı gözlenmiştir. Başlangıç sıcaklığı 27.77 ± 1.36 °C olan alüminyum silindirin deneyler sırasında kızılötesi enerji ile prosesi ile meydana gelen sıcaklık değişimi Cole Parmer Digi Sense veri kaydedici ile T tipi ısıl çift kullanılarak ölçülmüştür. Elde edilen veriler matematiksel model ile karşılaştırılmak üzere kaydedilmiştir. Yerleştirilen bir adet ısıl çiftin konumu şekil 3.5'de kırmızı nokta ile silindirin merkez noktası olarak belirtilmiştir.

Alüminyum silindir kullanılarak gerçekleştirilen ve sistem parametrelerinin belirlenmesi kapsamında hazırlanan model ve deneysel doğrulama çalışmalarından sonra gıda ürünlerinde yüzey pastörizasyon prosesi kapsamında Aksun Tarımsal Ürünler A.Ş. (Mersin, Türkiye) firmasından tedarik edilen incirler kullanılmıştır. Birbirine şekil olarak oldukça benzeyen 5 adet incir seçilerek fiziksel ölçüleri alınmış (Çizelge 3.3) ve elde edilen veriler ortalama ± standart sapma olarak değerlendirilerek modelleme çalışmalarında gereken incir geometrisi oluşturulmuştur. Şekil 3.6 eksensel simetri yaklaşımı ile oluşturulan incir geometrisinin dikey kesitini göstermektedir. Proses sırasında kullanılan sıcaklık ölçüm noktaları (alt ve yan yüzey) da bu şekilde verilmiştir. Bu noktalardan incir yan yüzeyindeki ısıl çift incir kabuğunun 1,5 mm içerisinde, alt yüzeyindeki ise incir kabuğunun 3 mm içerisindedir. Sıcaklık ölçümlerinde 30 gauge T tipi ısıl çiftler kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümünün gerçekleştirildiği alt (ostiol) ve yan noktalar özellikle tercih edilmiştir. Bu kapsamda, literatürde de, incirin özellikle ostiol (alt) ve pedicel (üst sap bölgesi) bölgelerinin küf problemine hassas olduğu belirtilmektedir (Gençdağ vd. 2019) Ancak, simülasyonlardan elde edilen ön sonuçlara göre pedicel bölge sıcaklığının diğer bölgelere göre daha hızlı yükselmesinden dolayı

pedicel bölge yerine yan yüzey sıcaklık değişiminin referans alınması ve deneysel doğrulama amacıyla kullanılmasının daha doğru olacağı düşünülmüştür. İncir termofiziksel özellikleri ise çizelge 3.4'de verilmiştir. Proses sırasında elde edilen termal kamera görüntüleri de incir yüzey sıcaklık dağılımını belirlemek amacıyla ayrıca kullanılmıştır.

Çizelge 3.3 Deneysel çalışmalarda kullanılan incirlerin fiziksel boyutları

İncir örneği	Sap Yarıçapı (r1) (cm)	Sap Uzunluk (L1) (cm)	Orta Yarıçapı (r2) (cm)	Alt Yükseklik (L2) (cm)	Toplam Yükseklik (L3) (cm)	Ortalama ± Standart Sapma
1	0,4	0,6	2,8	2,5	6	0,39±0,05
2	0,3	0,5	2,9	2,3	6	0,54±0,10
3	0,45	0,4	3,3	2,4	6,2	2,98±0,17
4	0,4	0,5	3	2,1	5,5	2,26±0,19
5	0,4	0,7	2,9	2	6,1	5,96±0,24



Şekil 3.6 Seçilen 5 tane incirin ortalama fiziksel boyutları ile elde edilen geometri

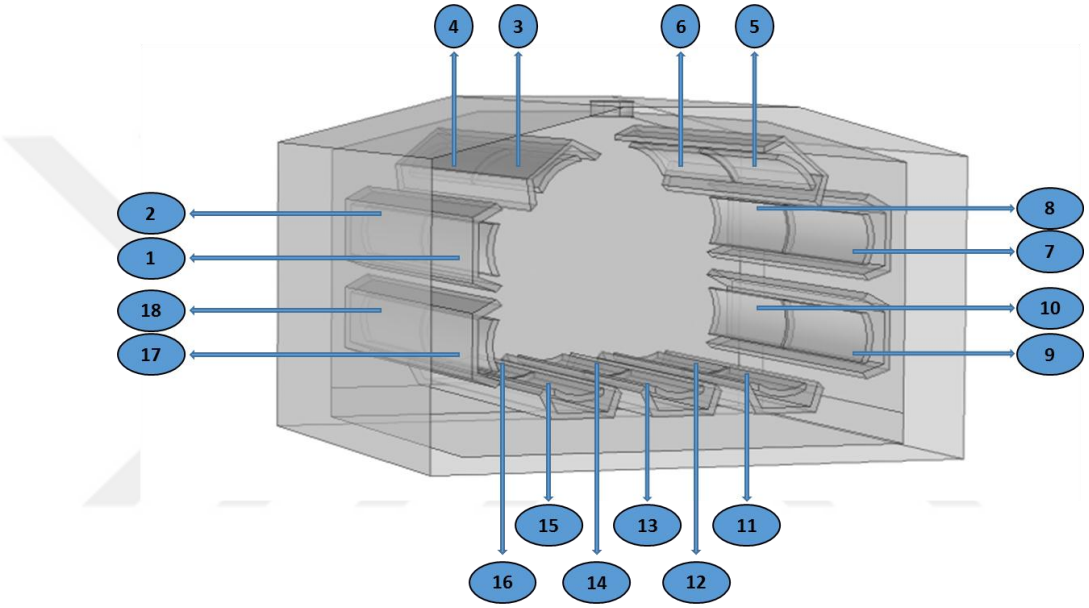
Çizelge 3.4 İncire ait termofiziksel özellikler (Chantani 2009)

Materyal	Isıl iletkenlik katsayısı k (W/mK)	Yoğunluk ρ (kg/m^3)	Isı kapasitesi c_p (J/kgK)	Emissivite ε
İncir örneği	0,5473	936,9	3550	0,95

3.2 Yöntem

3.2.1 Deneysel çalışmalar

Simülasyon çalışmalarının deneysel olarak doğrulanması amacıyla uygulanan ısıl işlem şekil 3.1'de gösterilmiş olan ve aşağıda 3-boyutlu geometrik çizimi yer alan kızılötesi sistemde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 3-boyutlu kızılötesi sistem geometrisi ve kızılötesi kaynakların sistem içindeki konumu

Şekil 3.7'te görülen sistemde 18 tane (1 - 18) kızılötesi ısı kaynağı şematik olarak gösterilmiştir. Her bir kızılötesi kaynak, ayrı ayrı açılabilme, kapanabilme ve sıcaklığının değiştirilebilmesi olarak, kontrol mekanizmasına bağlı olup etraflarında kızılötesi etkinliği arttırabilmek amacıyla yerleştirilmiş birer reflektör bulunmaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında her lamba için kaydedilen kızılötesi kaynak sıcaklık değişim değerleri modelleme çalışmalarında sınır koşulu olarak kullanılmıştır. Bu kapsamda bir kızılötesi kaynak için kaydedilen sıcaklık değişimi Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Deneysel çalışmalar alüminyum silindir ve incir kullanılarak ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum silindir kullanılarak yapılan çalışmalarda model doğrulama amacı ile 3-farklı koşulda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda sırasıyla 4 (3, 4, 9, 10 numaralı kızılötesi enerji kaynakları), 6 (5, 6, 7, 8, 15, 16 numaralı kızılötesi enerji kaynakları) ve 12 (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kızılötesi enerji kaynakları) sistem içerisinde (300 °C sıcaklıkta) aktif hale getirilmiş ve bu koşullarda uygulanan ısıl işlem sırasında alüminyum silindir merkez noktasındaki sıcaklık değerleri belirlenmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi bu ölçümler Cole Parmer Digi Sense - T tipi ısıl çift alüminyum silindirin merkez nokta konumunda kullanılarak elde edilmiştir (Şekil 3.5). Elde edilen sıcaklık değişimleri her koşulda, kızılötesi enerji kaynağı sıcaklık değişimleri ve ürün başlangıç sıcaklık değerinin sınır ve başlangıç koşulu olarak uygulanmasıyla çalıştırılan model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model ve deneysel sonuçların karşılaştırılması kapsamında sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin gerçekleştiği ve doğal konveksiyon etkisinin ihmal edildiği durumlar değerlendirilmiştir.

Gıda ürünü olarak incir kullanılıp yapılan deneysel çalışmalar ise 2-farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Birinci durumda ortam sıcaklığındaki incir yine ortam sıcaklığındaki sisteme yerleştirilip kızılötesi kaynakların 300 °C'ye ayarlanması ile prosesin başlatılması şeklindedir. İkinci durumda ise incir, kızılötesi kaynakların 300 °C'ye ayarlanıp iç ortam hava sıcaklığının yaklaşık 97 °C'de dengeye gelmiş olan, sistem içerisinde kızılötesi ısıl işlem prosesine tabi tutulmuştur. Deneyler, sistem içerisindeki kızılötesi ısıl işlemin de etkinliğini arttırmak ve model çalışmalarında sadece radyasyon modelini kullanmak amacıyla, 12-aktif kızılötesi enerji kaynağı (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kaynaklar) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.2.2 Matematiksel model çalışmaları

Gıda endüstrisinde yüzey dekontaminasyonu amacı ile kullanılabilecek, ısı transferi açısından etkin bir sistem tasarımı için öncelikle, sistem içi sıcaklık değişimleri ve ürün yüzey sıcaklık değişimi kapsamında bir matematiksel modelin geliştirilmesi gerekmektedir. Radyasyonla ısı transferinin yanında sistem içerisinde meydana gelecek konveksiyon ve ürün içerisinde oluşacak kondüksiyon eşitliklerinin proses tasarım

kapsamında kullanılabilmesi amacıyla COMSOL V5.2 (Comsol AB, Stockholm, Sweden) çoklu fizik yazılımının kullanılması tercih edilmiştir. Bu kapsamda model geliştirime çalışmalarına önce 2-boyutlu sistem boyutlarında başlanmış, gerekli model parametrelerine karar verildikten sonra da 3-boyutlu sistemde modelleme çalışmalarına geçilmiştir.

3.2.2.1 2-boyutlu matematiksel model çalışmaları

Model parametrelerine karar verebilmek amacıyla gerçekleştirilen ön modelleme çalışmalarında tez çalışması kapsamında yapılan ön çalışmalar Şekil 3.7'de gösterilen 3-boyutlu sistemin x-y kesiti geometrisinde 2-boyutlu olarak modellenmiştir. 2-boyutlu ön modelleme çalışmaları, 3-boyutlu problem çözümünde kullanılacak parametrelere karar verebilmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. 3-boyutlu sistem için gerekecek olan uzun hesaplama süreleri de bu kararda etkili olmuştur. Model çalışmalarında, ürün içerisinde oluşan kondüksiyonla ısı transferi, sistem içerisinde ısınmanın etkisi ile oluşan doğal konveksiyonla ısı transferi ve sistem içerisinde olan radyasyonla ısı transferi yer almıştır. Ancak bahsedilen sistemde eş zamanlı olarak ortaya çıkan kondüksiyon – konveksiyon ve radyasyonun yanı sıra yüksek sıcaklık farkının (örneğin 20 °C ürün başlangıç sıcaklığı olan bir sistemde seramik lambalara uygulanan 300 °C'lik bir sıcaklık sonucu ortaya çıkan sıcaklık farkı – ΔT sistem içerisine ani konveksiyon akımlarının oluşmasını da tetikleyecektir) da yer alması nedeniyle kompleks bir problem ortaya çıkmıştır.

2-boyutta yapılan model çalışmaları 3 aşamada gerçekleştirilmiştir:

- İlk aşamada ürün ve seramik kızılötesi kaynaklar arasında sadece radyasyonla ısı transferinin gerçekleştiği varsayılmıştır,
- İkinci aşamada ürün ve kızılötesi kaynaklar arasında yer alan hava ortamında doğal konveksiyonun ihmal edildiği ve hava içerisinde oluşan ısı transferinin kondüksiyonla gerçekleştiği varsayılmıştır,
- Üçüncü aşamada ise ilk iki aşamada kullanılan ve optimize edilen model parametreleri kullanılarak ürün ve kızılötesi kaynaklar arasında gerçekleşen

radyasyon, ürün içerisindeki kondüksiyon ve sistem içerisindeki hava ortamında gerçekleşen doğal konveksiyon ısı transferi eş zamanlı olarak çözülmüştür.

Ön simülasyon çalışmalarında, lamba yüzeylerinde meydana gelen ani ısınmaya bağlı olarak oluşan hava hareketinden dolayı (3. aşama modellerde) momentum denklikleri türbülans model kullanılarak çözülmüştür. Türbülans model tipi olarak da Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) yaklaşımı kullanılmıştır. Bu kapsamda ısı transferi eşitliği, yüzeyler arası radyasyonun modellenmesi için kullanılan eşitlik ve akış modelinde kullanılan eşitlikler aşağıda özetlenmiştir:

Süreklilik eşitliği:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

Momentumun korunumu (x, y ve z yönlerinde):

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\nu \cdot \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} - \left\langle u_i' u_j' \right\rangle\right)\right] \tag{2}$$

Enerjinin korunumu kanunu:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \rho \cdot U_j \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[k \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \cdot c_p \cdot \left\langle u_j' T' \right\rangle\right] \tag{3}$$

Burada U; ortalama hız (m/s), u'; hızın türbülanslı bileşimi, $<ui'uj'>$; hızın kararsız bileşeninin ortalama değeri, T; ortalama sıcaklık (K), T'; sıcaklığın değişen bileşeni (K), P; basınç (Pa), ρ; yoğunluk (kg/m^3), v; akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s), c_p ise ürünün ısı kapasitesi değeri (J/kgK) olup kullanılacak olan diferansiyel operatörler de aşağıda verilmiştir:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$$

$$U_j \cdot \frac{\partial}{\partial x_j} = U_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} + U_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} + U_z \cdot \frac{\partial}{\partial z} \qquad (4)$$

Yüzeyler arası radyasyonla ısı transferi modeli kapsamında aşağıda verilen radyosity denklikleri kullanılarak matematiksel modelleme çalışması yapılmıştır:

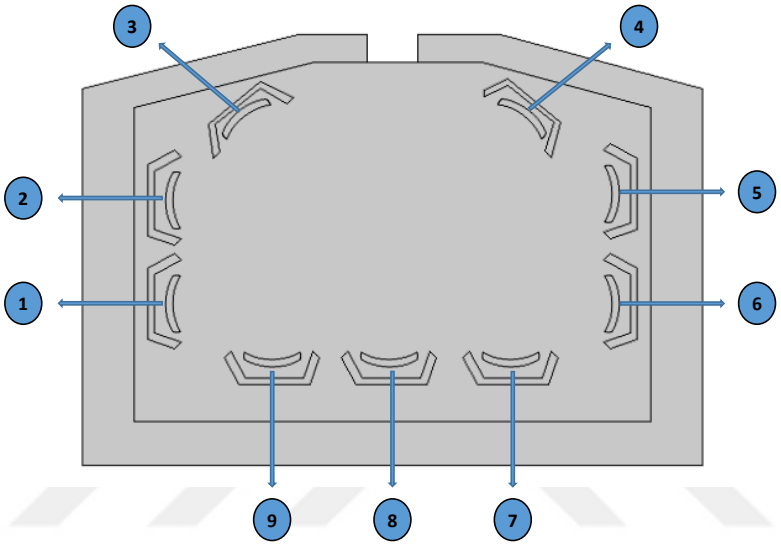
$$G_i = \frac{1}{S_i} \cdot \sum_{j=1}^{n} \left[\frac{n^i{}_j}{n_j} \cdot S_j \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_j{}^4 \right] \qquad (5)$$

$$n_j = N_p = \frac{S_j \cdot \varepsilon_j \cdot \sigma \cdot T_j{}^4}{\sum_{x=1}^{N} \left[S_x \cdot \varepsilon_x \cdot \sigma \cdot T_x{}^4 \right]} \qquad (6)$$

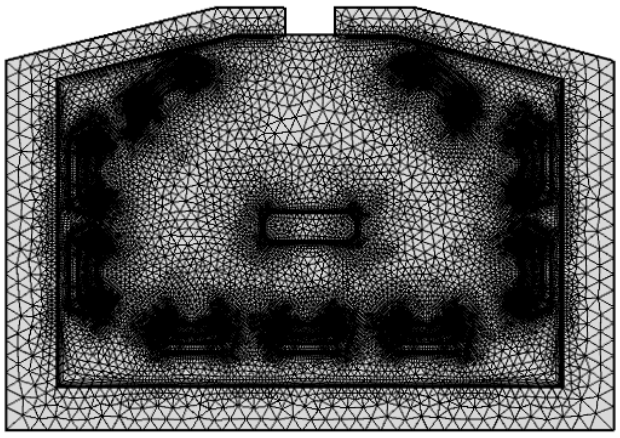
$$q_i = \varepsilon_i \cdot \sigma \cdot T_i^4 - \varepsilon_i \cdot G_i \qquad (7)$$

Yapılan çalışmalarda doğal konveksiyona ve yüksek kızılötesi kaynak yüzey sıcaklıklarına bağlı olarak türbülant – kargaşalı akış durumu sıkıştırılamayan akış (incompressible flow) varsayımı ile uygun başlangıç ve sınır koşulları (bu koşulları kızılötesi ısıtıcıların ve ürünlerin yüzey sıcaklığı ile belirlenmiştir) uygulanarak eşitlikler çözülmüştür. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda, yukarıda da belirtildiği şekilde, sistem içerisindeki hava ortamında laminer akış varsayımında model yakınsaması elde edilememiş ve sistem içerisinde ısı ve momentum transferi kapsamında oluşması beklenen simetrik dağılım oluşmamıştır. Özellikle seramik kızılötesi kaynak yüzeylerine yakın bölgelerde yüksek sıcaklık farkı nedeniyle oluşan lokal türbülant değişimleri nedeniyle uygulamalarda sistem içi sıcaklık ve akış değişiminde beklenen simetrinin elde edilemediği kabul edilmiş ve bu nedenle model çalışmalarında türbülans model uygulaması kullanılmıştır.

2-boyutlu olarak hazırlanmış olan geometri ve ağ yapısı Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Hazırlanan bu geometride, kullanılacak olan sistemde olduğu gibi sistem kavitesinde - alt, yan ve üst kısmında- kızılötesi kaynakların olduğu varsayılmıştır. 3-boyutlu sistemde toplam 18 adet olarak planlanan kızılötesi seramik lambalar iki boyutlu sistemde 9 adet olarak düşünülmüş ve simülasyonlar 300 °C seramik lamba sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



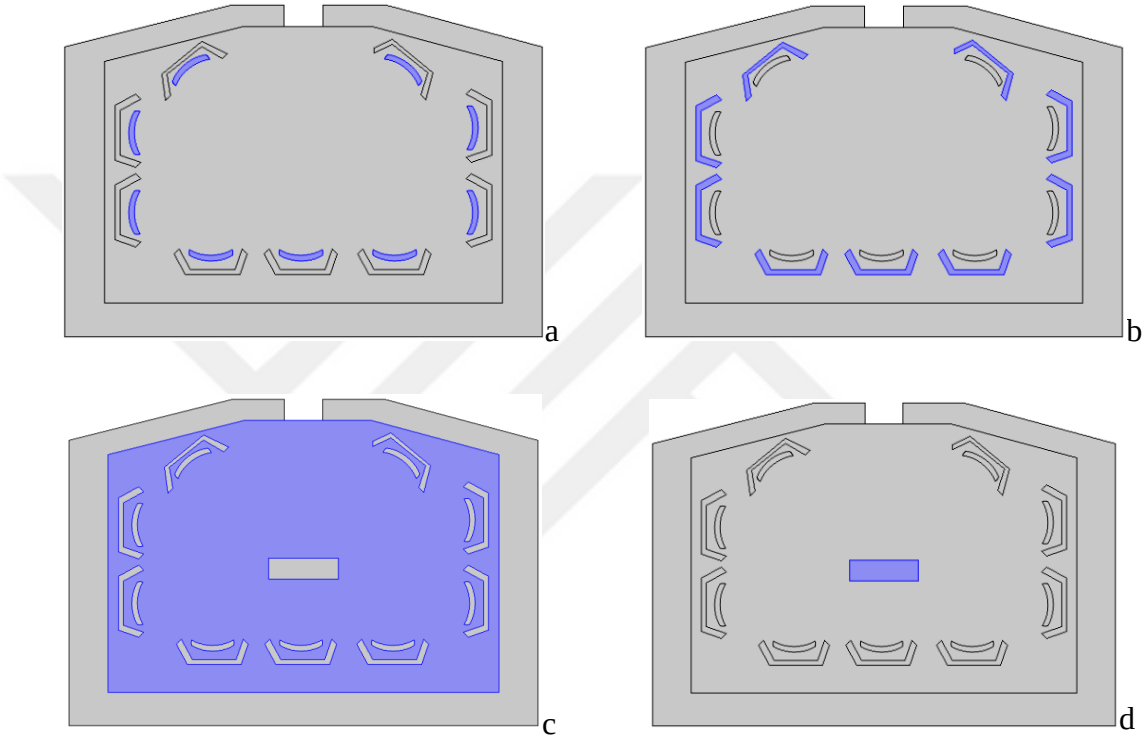
a



b

Şekil 3.8 Ön modelleme çalışmaları için kullanılan 2-boyutlu kızılötesi sistem
(a. 2-boyutlu olarak hazırlanmış olan sistem geometrisi, b 2-boyutlu sisteme ait ağ yapısı)

Buna göre, yukarıda açıklandığı şekilde önce sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu, daha sonra sistem içerisindeki havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği ve doğal konveksiyonun da hesaba katıldığı şekilde simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Model çalışmalarında kullanılan ısıl ve fiziksel özellikler Çizlge 3.1 ve 3.2'de gösterildiği şekilde kullanılmıştır. Model çalışmasında kullanılan materyal tanımlamaları Şekil 3.9'da gösterilmiştir:



Şekil 3.9 2-boyutlu olarak hazırlanmış olan modellerdeki materyal tanımlamaları
(a. kızılötesi lamba, b. reflektör, c. hava, d. alüminyum ürün)

Hem ürün hem de ısı kaynaklarının emissivite değerleri ise sistem içerisindeki radyasyonla ısı transferini net olarak gözleyebilmek amacıyla -1- olarak kullanılmıştır. Bu amaçla deneysel çalışmalarda sıcaklık serisi elde edebilmek amacıyla kullanılan alüminyum silindir yüksek sıcaklığa dayanıklı bir siyah boya ile mümkün olduğunca pürüzsüz olarak boyanmıştır. 2-boyutlu modelleme çalışmalarının ilk aşaması sistem içerisinde sadece radyasyon olduğu varsayımında hazırlanan simülasyonlarda toplam 8858 elementten oluşan (extremely fine) bir ağ yapısı kullanılmıştır. Sistem içerisindeki doğal konveksiyonun ihmal edildiği ve doğal konveksiyonun da dâhil edildiği simülasyonlarda ise sistem içi sıcaklık dağılımında simetrinin sağlanabilmesi amacıyla

kullanılan normal ağ yapısı şekil 3.8'de ve ağ yapısına ait fiziksel özellikler çizelge 3.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5 2-boyutlu matematiksel modellerde kullanılan ağ yapısının fiziksel özellikleri

Sistem	Ağ yapısı fiziksel özellikleri	
2-boyutlu kızılötesi sistem	Dörtgensel element sayısı	6575
	Üçgensel element sayısı	27762
	Köşe element sayısı	1705
	Tepe element sayısı	128
	Element sayısı	34337
	Ağ alanı (cm^2)	2993

3.2.2.2 Üç boyutlu çalışmalar

2-boyutlu model çalışmaları sonucunda 3-boyutlu gerçek sistem boyutları ile yapılacak model çalışmalarında, kullanılacak model parametrelerine karar verilmiş ve bu aşamadan sonra model çalışmaları bu doğrultuda gerçekleştirilmiştir. 3- boyutlu model çalışmalarında, 2-boyutlu model çalışmalarında yapıldığı şekilde,

- sadece radyasyonla ısı transferi olduğu durum,
- doğal konveksiyonun ihmal edildiği durum ve
- doğal konveksiyonun ihmal edilmeyip kondüksiyon, konveksiyon ve radyasyonun birlikte bulunduğu durum şeklinde aşamalandırılmıştır.

Bu aşamalar ise aşağıdaki adımlar ile basitten karmaşık olan adıma doğru ifade edilmiştir:

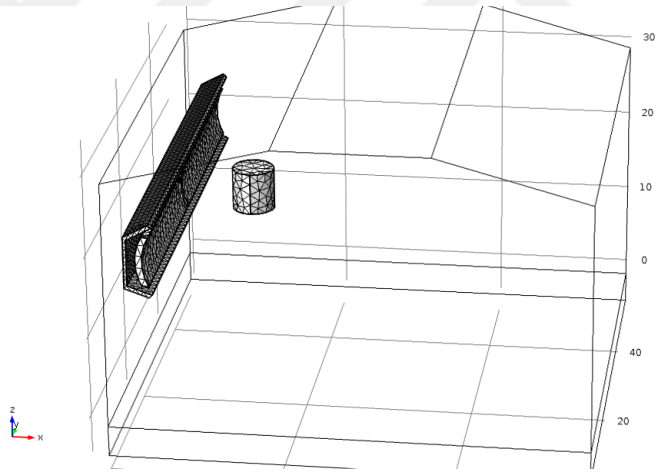
a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:

İlk aşamada yine sistem içerisinde sadece radyasyonun etkin olduğu ve sistem içerisindeki doğal konveksiyon etkisinin ihmal edildiği simülasyon çalışmaları yapılmıştır.

Adım 1:

a. Geometri:

Sisteme sadece 1 çift kızılötesi lamba ve lambalara ait reflektörler çizilerek sistem geometrisi sadeleştirilmiştir. Modelde ürün sıcaklık artışının daha hızlı gözlemlenebilmesi için ürün lambalara oldukça yakın konumlandırılmıştır. Ayrıca kızılötesi sitem kavitesi (kalınlığı) geometriye dâhil edilmemiştir. Reflektör kalınlığı 25 mm (ağ yapısı sebebi ile)'dir.



Şekil 3.10 Modelleme çalışmaları için oluşturulan en basit geometri ve ağ yapısı

b. Materyal:

Programda ürünün termal özellikleri; 0,55 W/mK, 1700 kg/m^3 ve 2000 J/kgK olarak tanımlanmıştır. Kızılötesi seramik lamba için termofiziksel özellikler ise 400 W/mK, 8700 kg/m^3 ve 386 J/kgK'dir. Alüminyum materyalli sistem kavitesinin ve reflektörlerin termofiziksel özellikleri ise Comsol programının içerisinde bulunan kütüphaneden direkt olarak seçilmiştir. Bu değerler çizelge 3.1'de mevcuttur.

c. Fizik:

Model çalışmasında kullanılan Comsol yazılımında "The Surface-to-Surface Radiation (rad) interface" kullanılıp Heat Transfer>Radiation>Heat Transfer with Surface to Surface Radiation (ht) modülü kullanılarak termal radyasyonun enerji kaynağından yüzeylere veya yüzeyler arasında taşıyıcı bir madde olmadan transferi modellenmiştir.

d. Başlangıç ve sınır koşulları:

Ürün başlangıç sıcaklığı 20 °C'dir. Ürün ve sistem kavitesinin emissivite değeri sırası ile 1 ve 0,05'tir. Ayrıca modelde T=427 °C sabit sıcaklık şartı lambaların yüzeylerine sınır koşulu olarak verilmiştir.

e. Ağ yapısı

Modelde toplam 6640 elementten oluşan normal ağ yapısı kullanılmıştır (Çizelge 3.6)

Çizelge 3.6 Adım 1'e ait ağ yapısının fiziksel özellikleri

Sistem	Ağ yapısı fiziksel özellikleri	
Laboratuvar ölçekli sistem	Dörtgensel element sayısı	6640
	Üçgensel element sayısı	4916
	Köşe element sayısı	754
	Tepe element sayısı	40
	Element sayısı	6640
	Ağ hacmi (cm^3)	583,1

b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:

Adım 2:

Bu modelde sistem geometrisi (bir çift kızılötesi lamba bulunuyor), reflektör kalınlığı ve bir gıda olarak tanımlanan ürünün termofiziksel özellikleri ilk model ile aynıdır. Farklı olarak sistem içerisinde bulunan hava da tanımlanmış, ancak havaya ait bir hacimsel kuvvet tanımlanmamıştır. Bu nedenle konveksiyonel etki gözlemlenmeyerek

sistemde radyasyonla olan ısı transferi ile birlikte havanın kondüksiyonla ısınması incelenmiştir.

c) Sistem içerisinde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edilmediği durum:

Adım 3:

Bu adım için sistem ve ürün geometrileri, ürün özellikleri, lamba sıcaklıkları Adım 1 ile aynı olup model 10 s çalıştırılmıştır. Farklı olarak sistem içindeki hava modelde tanımlanarak sistem içinde gerçekleşen ısı transferine dâhil edilmiştir.

Sistem içerisinde laminer akış fiziği ile tanımlı olan havadaki konveksiyonel hareketi gözlemleyebilmek amacıyla düzenlenen bu yeni simülasyonda hacimsel kuvvet hava için seçilmiş, böylece sistem içerisindeki doğal konveksiyonun ürün yüzey sıcaklığına etkisi gözlemlenmiştir. Ancak havanın dış sınır koşullarına bu modelde de herhangi bir diffüz yüzey tanımlanmamıştır. Böylece kızılötesi kavitenin iç yüzeyinde radyasyon ile ısı transferinden kaynaklı yansıma olmaksızın model oluşturulmuştur.

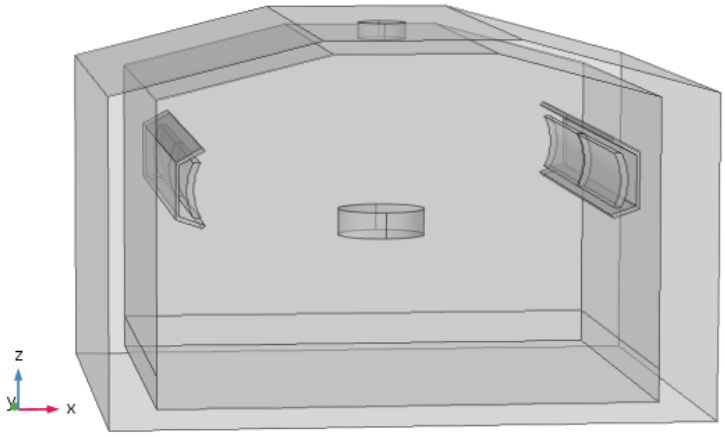
Adım 4:

Bu adımda havanın hareketi hacim kuvveti tanımlaması ile gözlemlenmiştir. Ayrıca sistem kavitesi de ısı transferine dâhil edilerek hava için diffüz yüzey tanımlaması yapılabilmiştir (yüzey emissivite değeri 0,05'tir). Böylece sistemde daha çok yansıma olacağından daha fazla ısınma beklenebilir.

Adım 5:

a. Geometri:

Sisteme var olan lambaların tam karşısına konumlanacak şekilde bir çift kızılötesi lamba daha eklenmiştir. Bu adımda ürün geometrisi deneylerde kullanılan 5 cm yarıçapında, 3 cm yüksekliğinde bir silindir, konumu ise sistemin ortası (deney pozisyonu) olarak güncellenmiştir.



Şekil 3.11 Adım 5'e ait sistem geometrisi

b. Materyal

Modelde sistem kavitesi ve reflektörler alüminyum olarak tanımlanmıştır. Sistem içinde tanımlanan hava ve alüminyum için bilinmesi gereken termofiziksel özellikler Comsol veri tabanında mevcuttur (https://www.comsol.com 2018).

Kızılötesi lambaların termofiziksel özellikleri 400 W/mK, 8700 kg/m^3 ve 386 J/kgK iken ürün için termofiziksel özellikler ise 0.55 W/mK, 1700 kg/m^3 ve 2000 J/kgK'dir.

c. Fizik:

"Heat Transfer with Surface- to- Surface" modülü kullanılmıştır.

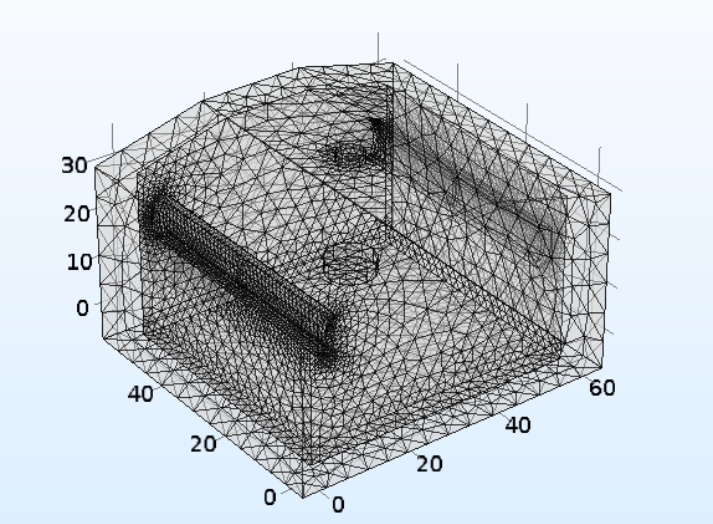
d. Başlangıç ve sınır koşulları:

Başlangıçtaki ortam sıcaklığı T=293,15 K'dir. Modelde lambalara T=600 K sabit sıcaklık tanımlaması yapılmıştır.

Kızılötesi sistem iç kavitesi, kızılötesi lambalar, reflektörler ve ürün için emissivite değeri sırası ile 0,05- 1- 0,01 ve 1'dir.

e. Ağ yapısı:

"User Controlled" ağ yapısı kullanılarak lambalar, reflektörler ve hava için ayrı ayrı oluşturulan ağ yapısı aşağıdaki şekilde görüldüğü gibidir.



Şekil 3.12 Adım 5'e ait ağ yapısı

Adım 6:

Bu adım ile birlikte yapılan deneysel çalışmalara olabildiğince yakın özellikteki bir simülasyon oluşturulmaya çalışılmıştır. Deneylerde kızılötesi lambaların sıcaklıkları 300 °C'ye gelene kadar geçen sürede kaydedilmiştir. Böylece lambaların sıcaklıkları deneylerdeki gibi artacak şekilde düzenlenerek simülasyonda bir güncelleme daha yapılmıştır. Ayrıca ürün olarak bir gıda özellikleri değil alüminyum silindir kullanılarak termofiziksel özellikleri model içine yerleştirilmiştir. Reflektör emissivite değeri 0,01, sistem kavitesinin emissivite değeri 0,05 olarak tanımlanmıştır. Bu modelde konveksiyon ve radyasyon ile olan ısı transferi birlikte çalışmaktadır. Deneylerde başlangıç sıcaklığı T=301,06 K olduğundan, modelde de bu değer bir girdi olarak kullanılmıştır.

Adım 7:

Bu adımda kızılötesi lambaların sıcaklıkları yine deneylerdeki gibi ayarlanmıştır. Ürün olarak bir gıda özellikleri tanımlanmış, ürün konumu ise sistemin ortasıdır. Sistemde hava tanımlı olmadığı için (hava için diffüz yüzey tanımlaması var iken) sadece radyasyon etkisi gözlemlenmiştir.

Adım 8:

Ürün yapılan deneyde olduğu gibi sistemin orta kısmına yerleştirilmiş, bir önceki modelden farklı olarak materyali alüminyum olarak seçilmiştir. Böylece deneylerde

kara cisim etkisi gösteren alüminyum örnekle aynı koşullar oluşturulmuştur. Lambaların sıcaklıkları deneysel verilere göre düzenlenmiştir. Sistemde sadece radyasyon etkisini görebilmek amacıyla modelde hava tanımlanmayıp model 2400 s çalıştırılmıştır.

Adım 9:

Adım 8'e ek olarak bu modelde hava tanımlanıp hava için bir hacimsel kuvvet tanımlanmamıştır. Bu nedenle konveksiyonel etki ve ısınan hava hareketi gözlemlenmemiştir.

Adım 10:

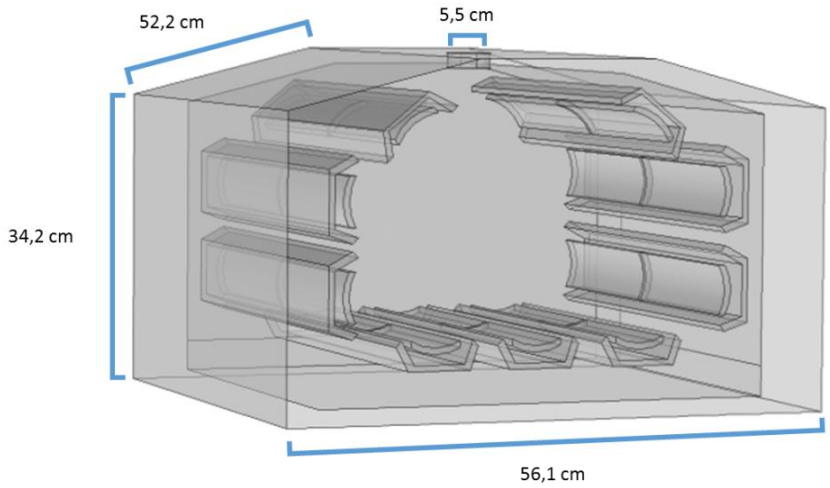
Sistem geometrisi, 9 çift lamba ile eksiksiz olarak çizilmiştir. Reflektör kalınlığı ise 50 mm'dir. Lambaların sıcaklıkları yine deneylerdeki gibi düzenlenmiş, alüminyum materyalli ürün sistemin ortasına konumlandırılmıştır. Hava tanımlanmadığı için sadece radyasyon etkisi gözlenmiştir. Şekil 3.11'de gösterilen 3-4, 9-10 numaralı kızılötesi kaynaklar 300 °C'ye ayarlanmış diğer lambalara sıcaklık tanımlaması yapılmamıştır. Modelin 2400 s çalıştırılmıştır.

Adım 11:

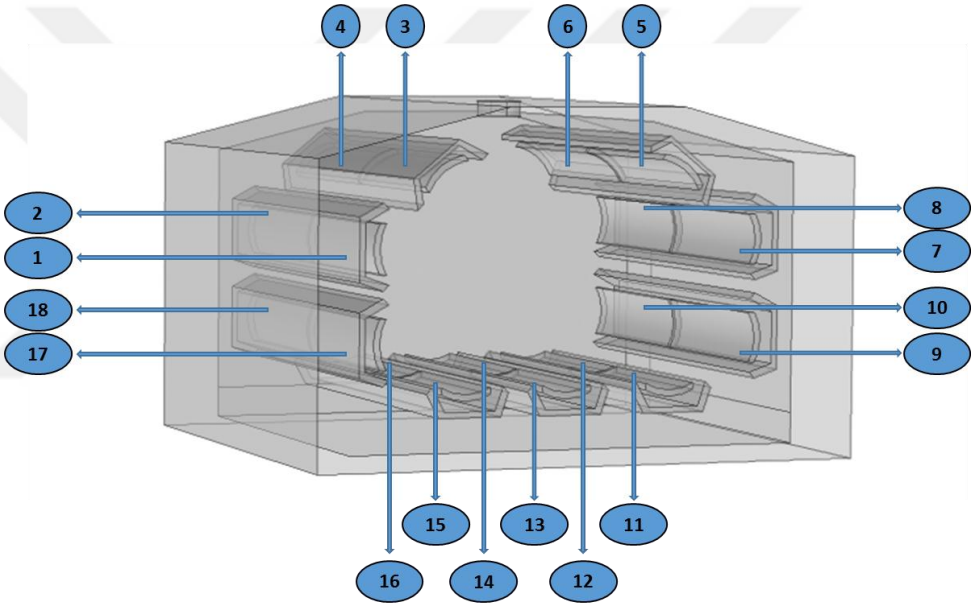
Yüksek RAM ve bilgisayar ihtiyacı sebebi ile bir önceki adımda yapılan model ağ yapısı değiştirilerek kaba ağ yapısı ile tekrar çalıştırılmıştır. Sonuçların etkilenmemesi durumunda bu ihtiyacın önüne geçilebileceği düşünülmektedir.

Adım 12:

Adım 10'daki model çalışması ile sonuçların deneysel verilere yaklaştığı görülmüştür. Aradaki farkın reflektör ve sistem kavitesinin emissivite değerlerinden kaynaklandığı düşünüldüğünden adım 10'da 0,01 olan reflektör emissivite değeri bu modelde 0,1 olarak değiştirilmiştir.



a



b

Şekil 3.13 3-boyutlu olarak hazırlanan kızılötesi sistem geometrisi

(a. sistemin fiziksel ölçüleri, b. kızılötesi lambaların sistem içerisindeki konumu)

Adım 13:

Emissivite çalışmaları kapsamında Adım 10'da 0,05 olan sistem kavitesinin emissivite değeri bu modelde 0,7 olarak güncellenmiştir.

Adım 14:

Reflektör emissivite değeri 0,1 olarak sabit tutulmuştur. Sistem kavitesinin emissivite değeri ise kullanılan programda parametrik tarama ile 0,1-0,5 aralığında değiştirilerek deneysel sonuçlara yaklaşılmaya çalışılmıştır.

Adım 15:

Modelde reflektör emissivite değeri 0,1'de sabit tutulup sistem kavitesinin emissivite değeri ise 0,3-0,35 ve 0,4 olarak tanımlanmıştır.

Adım 16:

Reflectör emissivite değeri 0,1 ve sistem kavitesinin emissivite değeri 0,3 olan ve geometride sadece 2 lambanın bulunduğu ve konveksiyonel etki ile radyasyonun birlikte çalıştığı 2400 s'lik bir model oluşturulmuştur.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1 Matematiksel Modelleme Çalışmalarından Elde Edilen Sonuçlar

4.1.1 İki boyutlu çalışmalar

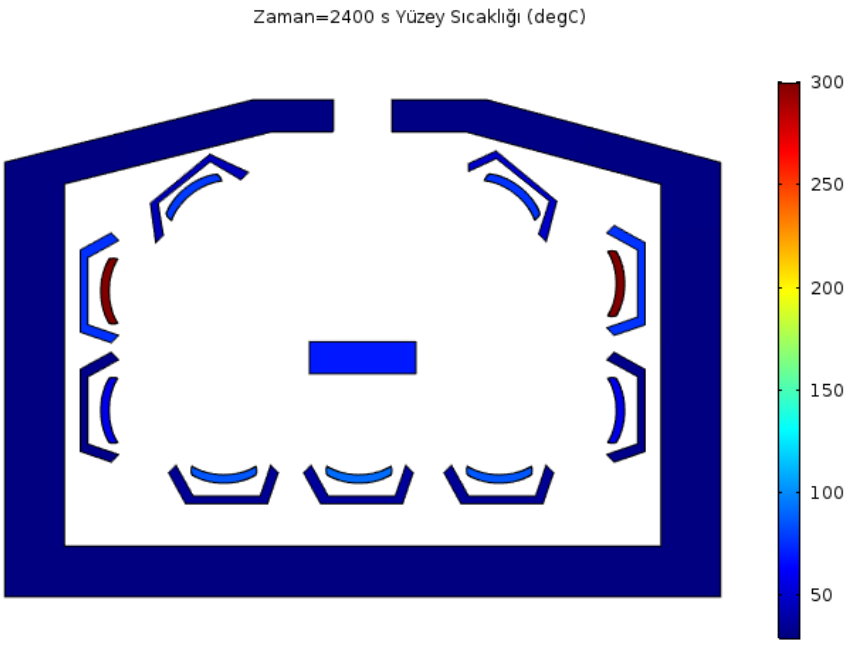
a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:

Şekil 4.1.a, kızılötesi uygulamanın 40. dakikasında, sistem içerisinde ürünle kızılötesi lambalar arasında sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu durumda sistem içi ve ürün sıcaklık değişimini göstermektedir. Bu sistemde kızılötesi lambalardan sadece 2 ve 5 numaralı lamba aktiftir (Şekil 3.5). 2 ve 5 numaralı kızılötesi lambaların, sabit sıcaklık sınır koşulu olarak da kullanılan sıcaklık değişimleri şekil 4.1.b'de gösterilmiştir. Sistem içerisinde yer alan diğer kızılötesi enerji kaynaklarının da sıcaklık artışları benzer eğilim göstermektedir. Buna göre 300 °C sıcaklıkta, Vien kanununa göre, elde edilen kızılötesi enerji kaynağı dalga boyu:

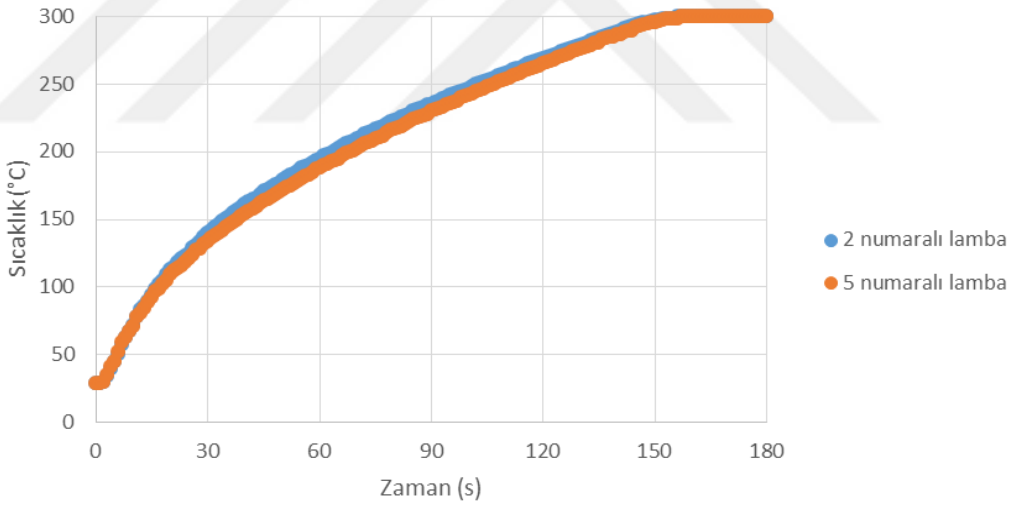
$$\lambda = \frac{2898}{300+273,15} = 5,06\ \mu m \qquad (13)$$

olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.1.c'de ise ürünün ortalama ve yüzey ortalama sıcaklık değişimi gösterilmektedir. Beklendiği gibi alüminyumun yüksek ısı iletkenlik katsayısına bağlı olarak lumped sistem mantığına göre ürün yüzey ve ortalama sıcaklık değişiminde bir değişim gözlenmemiştir.



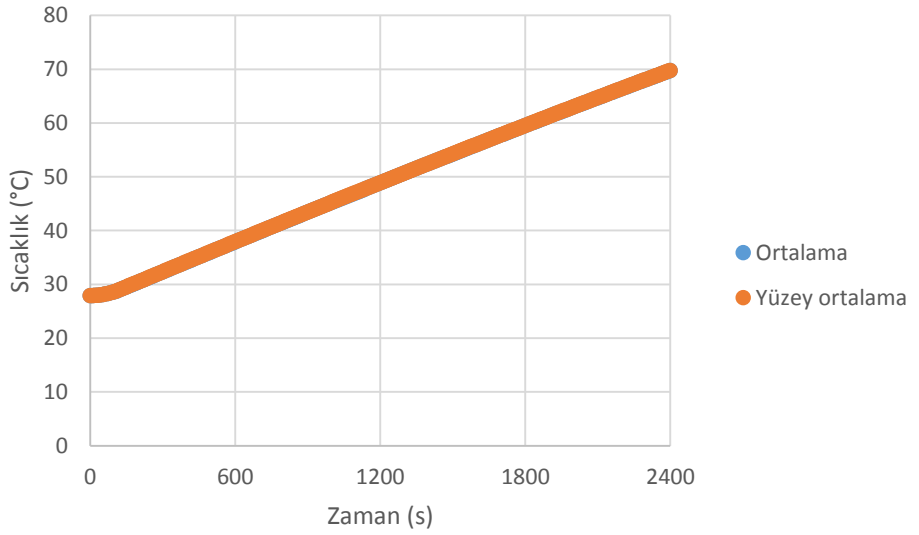
a



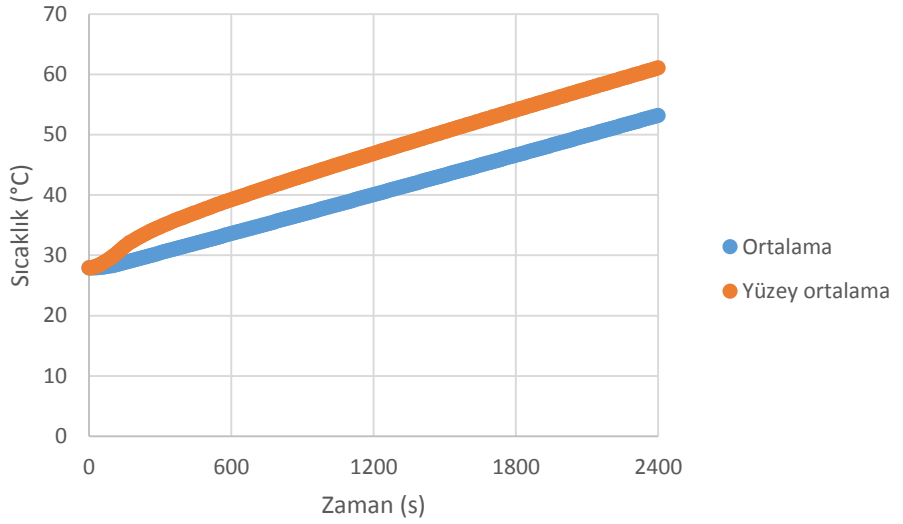
b

Şekil 4.1 2-boyutlu sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve 2 ile 5 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu prosesin 40. dakikasındaki durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. 2 ve 5 numaralı kızılötesi lambaların sıcaklık değişimi, c. alüminyum ortalama ve yüzey sıcaklık değişimi, d. gıda ürünü ortalama ve yüzey sıcaklık değişimi)



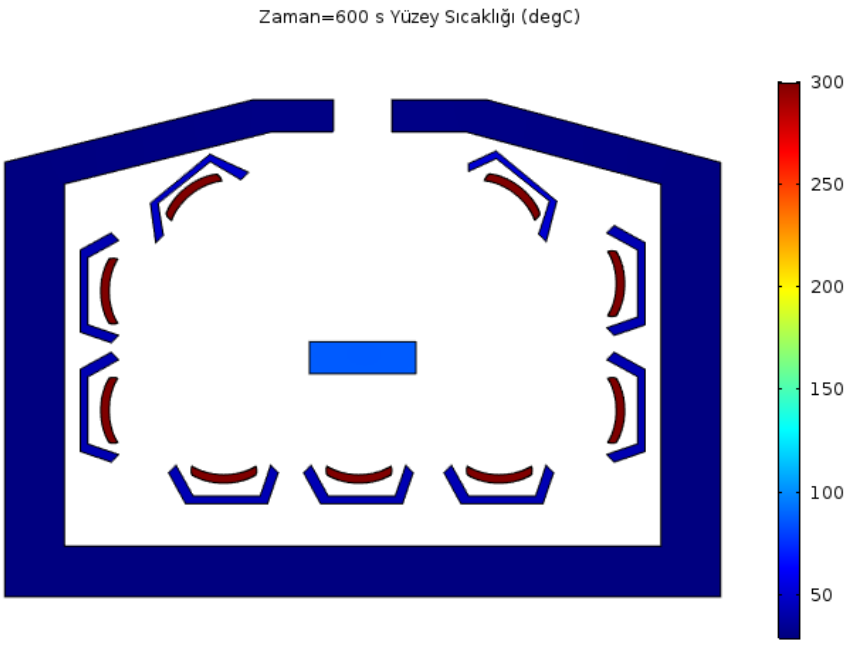
c



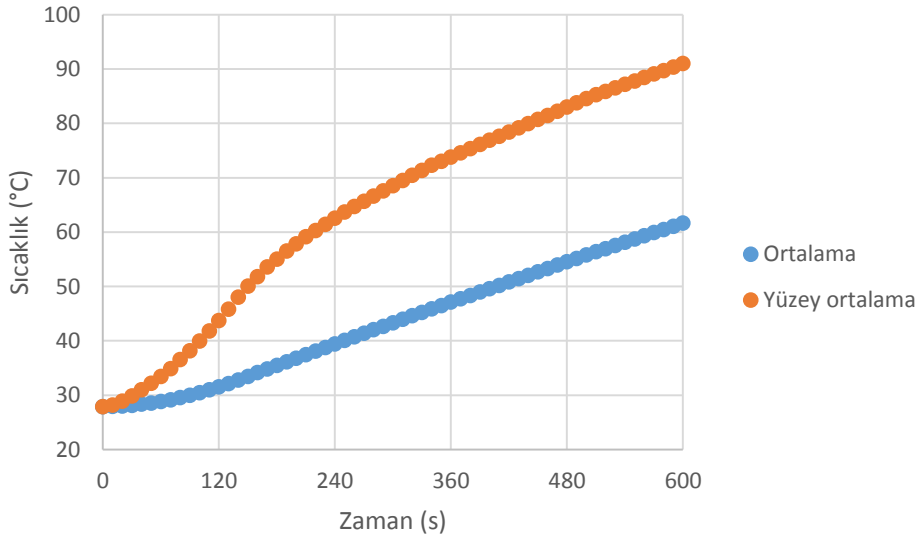
d

Şekil 4.1 2-boyutlu sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve 2 ile 5 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu prosesin 40. dakikasındaki durum (devam)

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. 2 ve 5 numaralı kızılötesi lambaların sıcaklık değişimi, c. alüminyum ortalama ve yüzey sıcaklık değişimi, d. gıda ürünü ortalama ve yüzey sıcaklık değişimi)



a



b

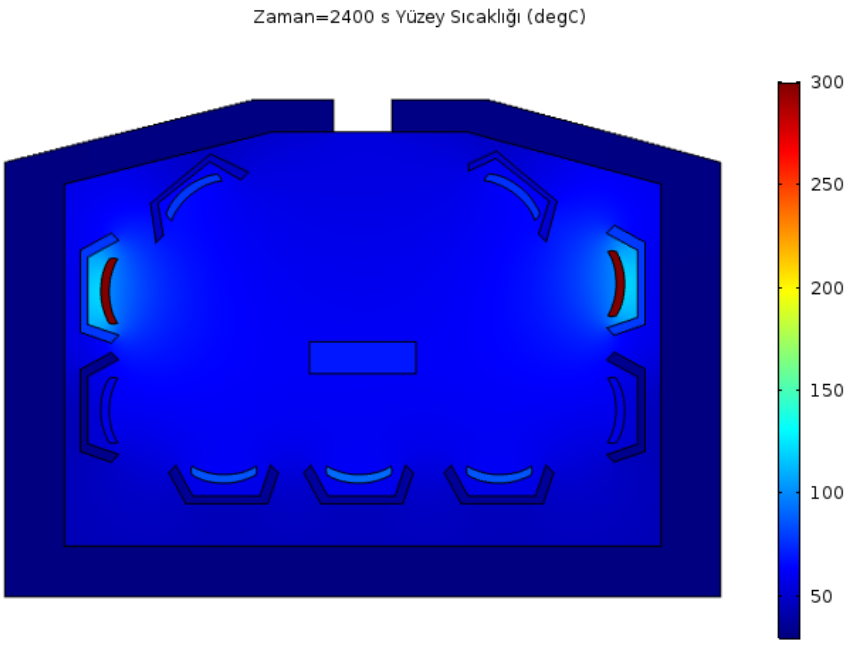
Şekil 4.2 Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve tüm lambaların aktif olduğu prosesin 10. dakikasındaki durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. gıda ürününün ortalama merkez ve yüzey sıcaklık değişimi)

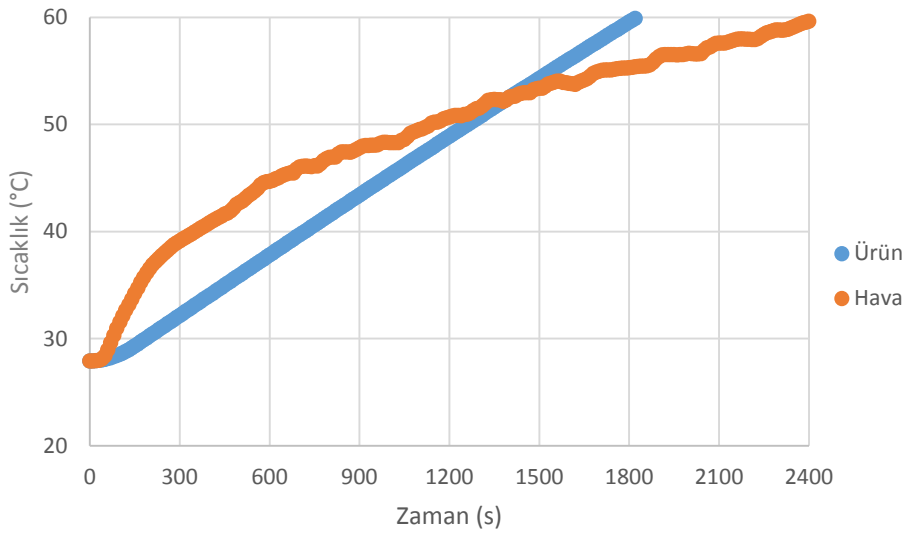
Alüminyum yerine gıda ürünü özellikleri (ısıl iletim katsayısı 0,5 W/mK; yoğunluğu 1050 kg/m³, ısı kapasitesi 3600 J/kg-K ve emissivite değeri 0,9) kullanılarak bir similasyon gerçekleştirildiğinde ise ürün yüzey ve ortalama sıcaklık değişiminde önemli bir fark olduğu (Şekil 4.1.d) gözlenmiş ve beklendiği gibi kızılötesi enerjiyle gerçekleşen ısı transferi sonucu ürün yüzeyinde önemli bir sıcaklık artışı elde edilmiştir. Ürünün düşük ısı transfer katsayısına bağlı olarak da ürün yüzeyi hızla ısınırken ürün içi sıcaklık değişimi kondüksiyonla ısı transferine bağlı olarak sınırlı bir artış göstermiştir. Bu simülasyon çalışmasında şekil 4.1.a'da sıcaklık değişimi "beyaz" renkle gösterilen kızılötesi ısıtıcıların (2 ve 5 numaralı kızılötesi enerji kaynakları) aktif olduğu varsayımı yapılmıştır. Sistem içerisindeki kızılötesi kaynakların ürün sıcaklık değişimine etkisini göstermek için ise bütün lambaların aktif olduğu varsayımıyla simülasyon tekrar edilmiştir. Şekil 4.2.a,b; bütün lambaların ürün sıcaklık değişimine etkisini proses süresinin 10. dakikasında göstermektedir.

b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:

Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olması durumunda sistem içerisinde gerçekleşen ısı transferinin ve bütün yüzeylerde kullanılan lambaların etkinliği şekil 4.1 ve 4.2'de gösterilmiştir. Simülasyonların 2. aşamasında ise sistem içerisinde bulunan havada gerçekleşecek doğal konveksiyon etkileri ihmal edilerek simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.3.a sistem içi ve ürün sıcaklık değişimini göstermektedir. Şekil 4.3.b'de gösterilen ürün yüzey sıcaklık değişiminin, şekil 4.1.c'de sistem içerisinde sadece ürünle kızılötesi kaynaklar arasında radyasyonla ısı transferi olduğu duruma göre daha yüksek çıkmasının sebebi, prosesin ilk 1200 s'de sistem içerisindeki havanın ısınması ile ürüne ortamdan da bir ısı transferinin gerçekleşmesi ile açıklanabilmektedir. Bu simülasyonlarda ürün olarak alüminyum kullanılmıştır. Bu durum 6-kızılötesi lambanın (1, 2, 5, 6, 7 ve 9 numaralı kızılötesi lambalar) aktif olarak kullanılması durumunda ise çok daha net olarak görülebilmektedir. Şekil 4.3.c; 6 kaynağın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimini gösterirken, şekil 4.3.d ürün ve hava ortalama sıcaklık değerlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir.



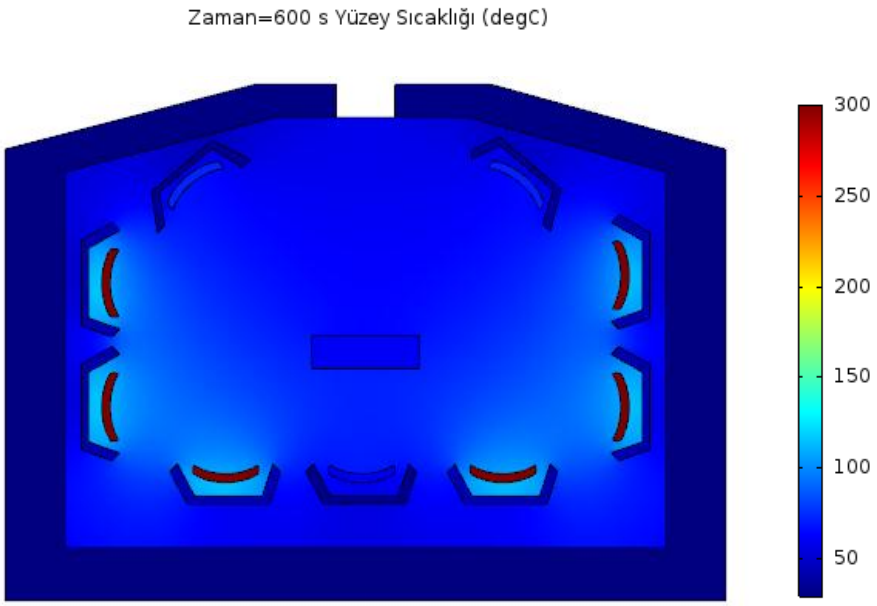
a



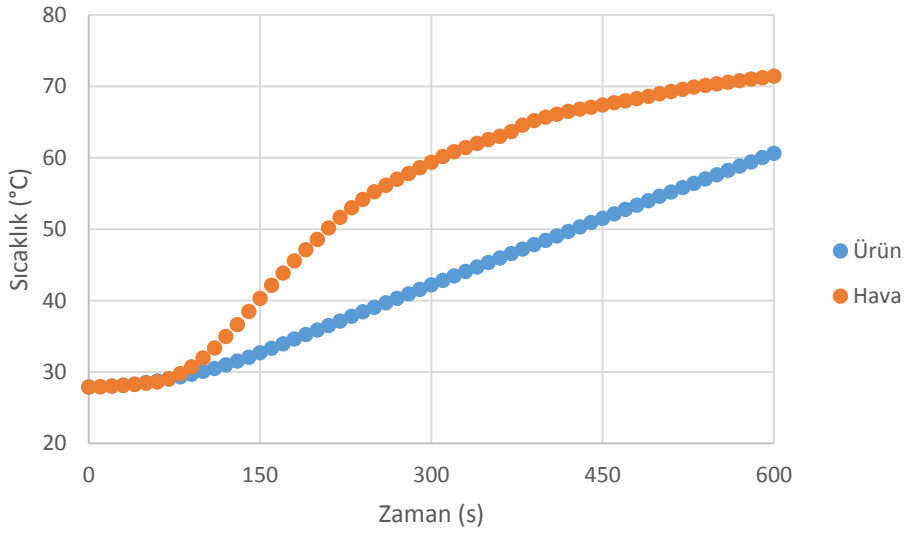
b

Şekil 4.3 2-boyutlu sistem içerisinde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün ve hava ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırılması, c. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimi ve d. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda ürün – hava ortalama sıcaklık değişimi karşılaştırılması)



c



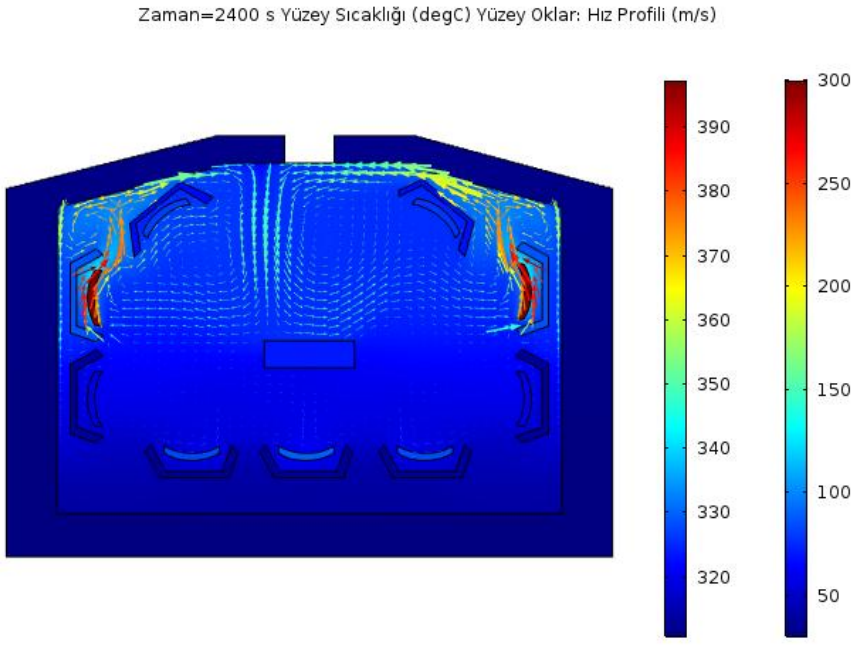
d

Şekil 4.3 2-boyutlu sistem içerisinde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum (devam)

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün ve hava ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırılması, c. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimi ve d. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda ürün – hava ortalama sıcaklık değişimi karşılaştırılması)

c) Sistem içerisinde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edilmediği durum:

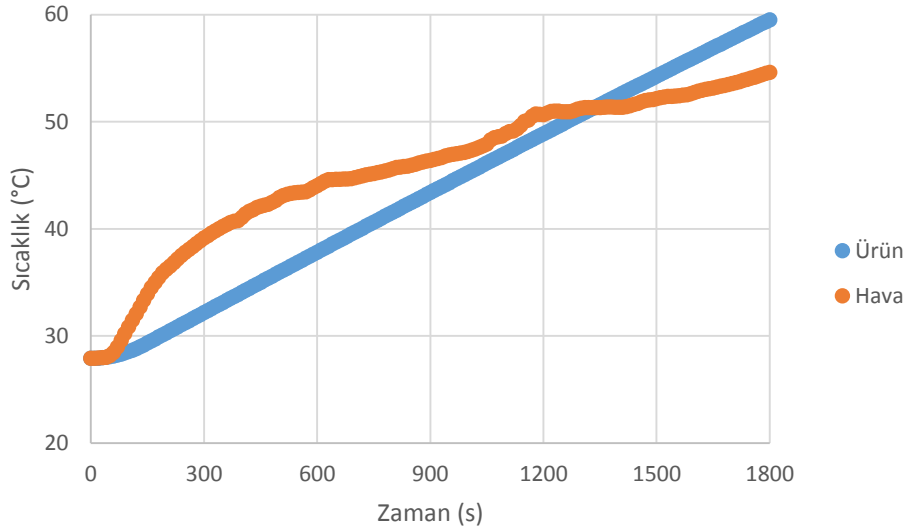
Sistem içerisinde radyasyon, doğal konveksiyon (havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edilmediği) ve ürün içi kondüksiyonun eşzamanlı çözüldüğü ve 2 (2 ve 5 numaralı kızılötesi lambalar) - 6 (1, 2, 5, 6, 7, 9 numaralı kızılötesi lambalar) kızılötesi ısı kaynağının aktif olduğu durumda sistem içi sıcaklık ve akış hız profili değişimi şekil 4.4'de prosesin 10. dakikası için gösterilmiştir. 2-boyutlu geometri tasarlanan ve deneylerde kullanılan sistemin x-y kesit boyutları kullanılarak hazırlanmış olup, imalat sırasında sistem içerisindeki ölçülendirmeler de simetri koşulundan sapma meydana getirmiştir. Ayrıca aktif durumda olan kızılötesi lambaların sıcaklık değişimleri de farklılık gösterdiğinden şekil 4.4'de elde edilen ve doğal konveksiyona bağlı olarak meydana gelen hava akış profilinde de mükemmel bir simetri oluşumu meydana gelmemiştir.



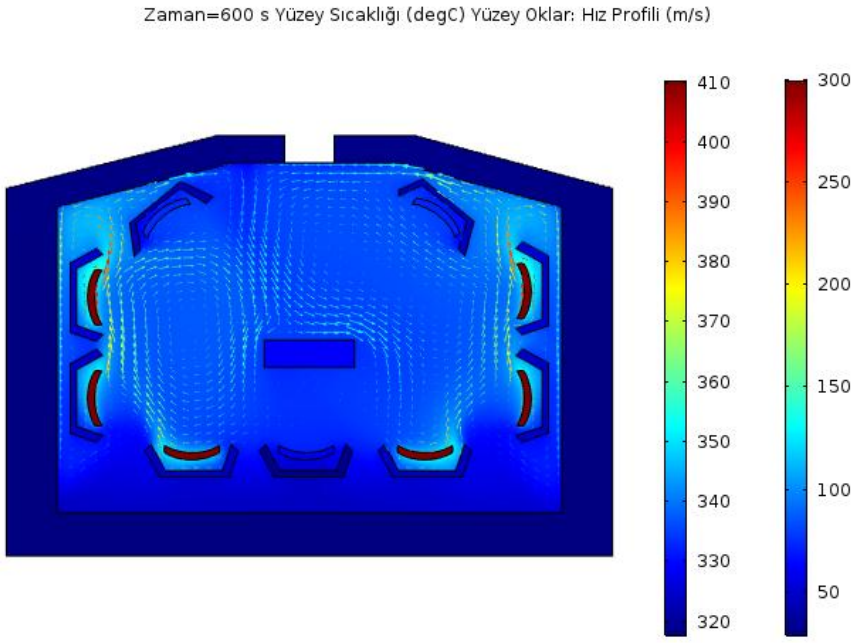
a

Şekil 4.4 2-boyutlu sistem içerisinde radyasyon, doğal konveksiyon ve ürün içi kondüksiyonun eşzamanlı çözüldüğü durumda sistem içi sıcaklık ve akış hız profili değişimi

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün ve hava ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırılması, c. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimi ve d. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda ürün – hava ortalama sıcaklık değişimi karşılaştırılması)



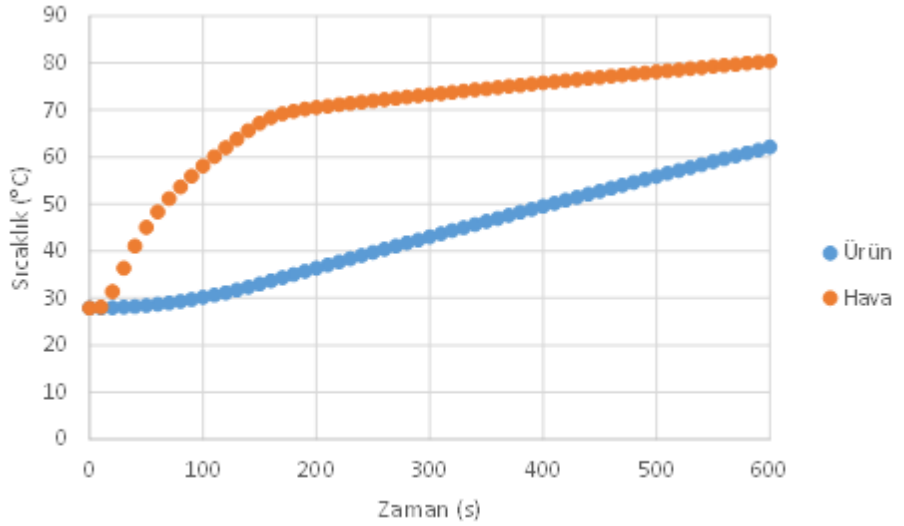
b



c

Şekil 4.4 2-boyutlu sistem içerisinde radyasyon, doğal konveksiyon ve ürün içi kondüksiyonun eşzamanlı çözüldüğü durumda sistem içi sıcaklık ve akış hız profili değişimi (devam)

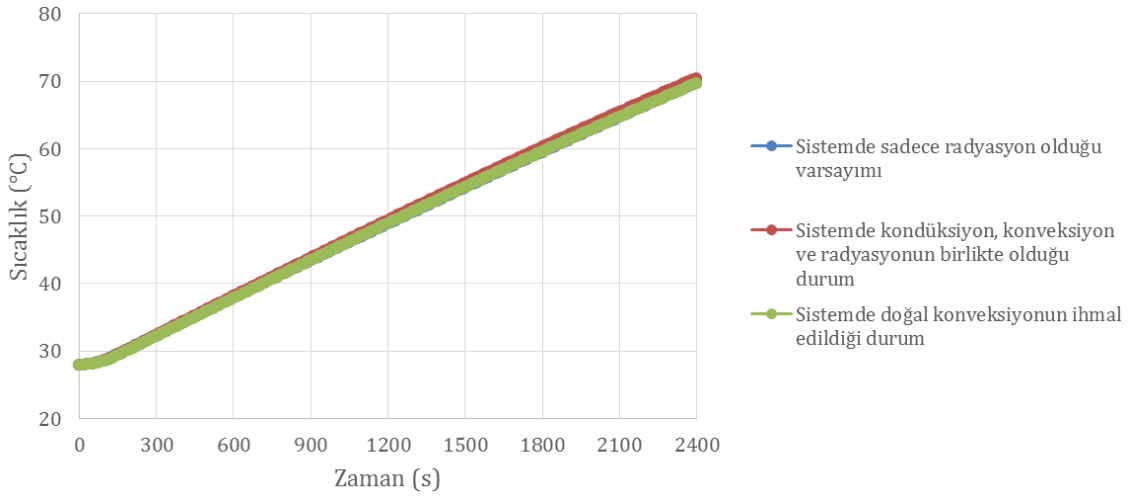
(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün ve hava ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırılması, c. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimi ve d. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda ürün – hava ortalama sıcaklık değişimi karşılaştırılması)



d

Şekil 4.4 2-boyutlu sistem içerisinde radyasyon, doğal konveksiyon ve ürün içi kondüksiyonun eşzamanlı çözüldüğü durumda sistem içi sıcaklık ve akış hız profili değişimi (devam)

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün ve hava ortalama sıcaklık değişiminin karşılaştırılması, c. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda sistem içi sıcaklık değişimi ve d. 6 kızılötesi lambanın aktif olması durumunda ürün – hava ortalama sıcaklık değişimi karşılaştırılması)



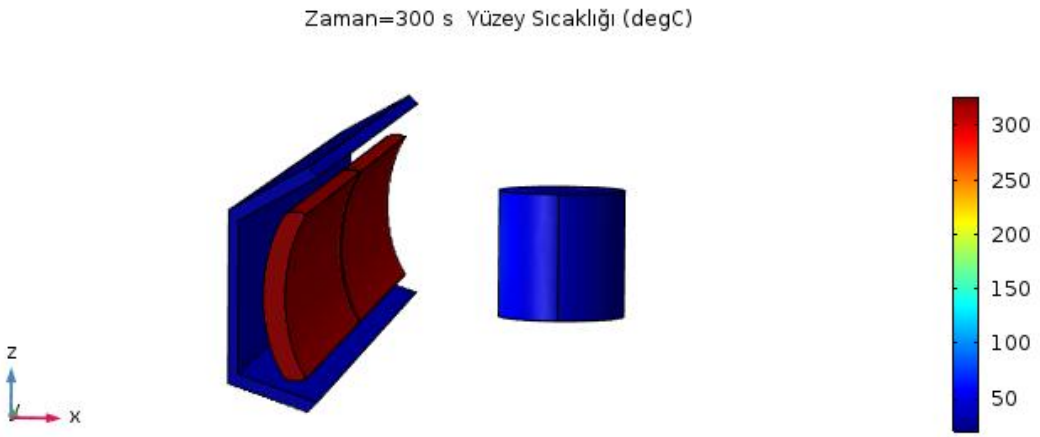
Şekil 4.5 2-boyutlu sistem içerisinde gerçekleşen ısı transferi model varsayımlarının karşılaştırılması

4.1.2 Üç boyutlu çalışmalar

a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:

Adım 1:

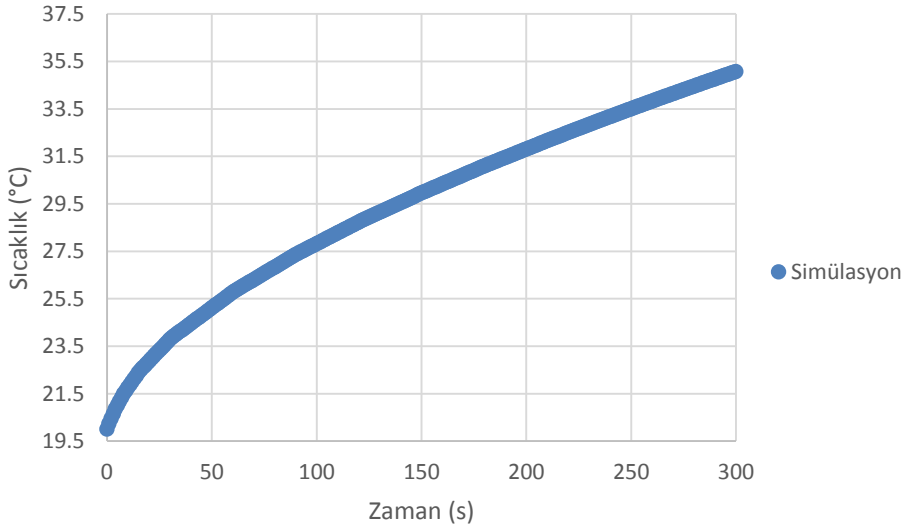
Simülasyon kızılötesi seramik lambalar 427 °C sıcaklığında iken 300 s süre ile başarılı bir şekilde çalıştırılmış aşağıdaki gibi bir sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Sonuçta ürünün ortalama sıcaklığında 8 derecelik artış görülmüştür. Başlangıç sıcaklığı 20 °C olan ürünün ortalama yüzey sıcaklığındaki 15 °C'lik ise şekil 4.5.b'de görülmektedir. Bu adımda hazırlanan simülasyonda sistem içerisindeki hava tanımlı olmadığından sistemde sadece radyasyon ile gerçekleşen ısı transferinin sorunsuz çalıştığı görülmüştür.



a

Şekil 4.6 Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve sadece bir çift kaynağın bulunduğu durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)



b

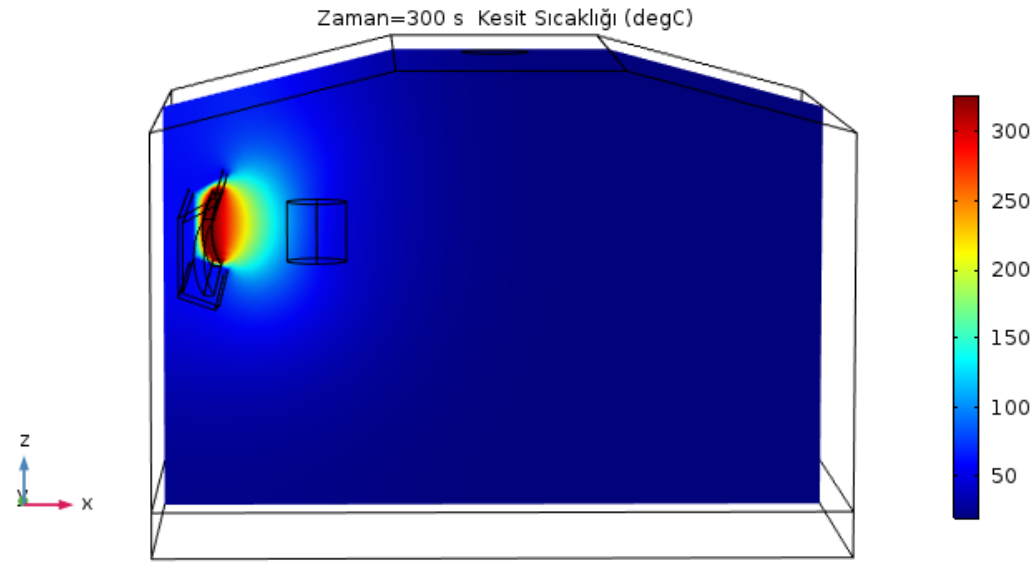
Şekil 4.6 Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin olduğu ve sadece bir çift kaynağın bulunduğu durum (devam)

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)

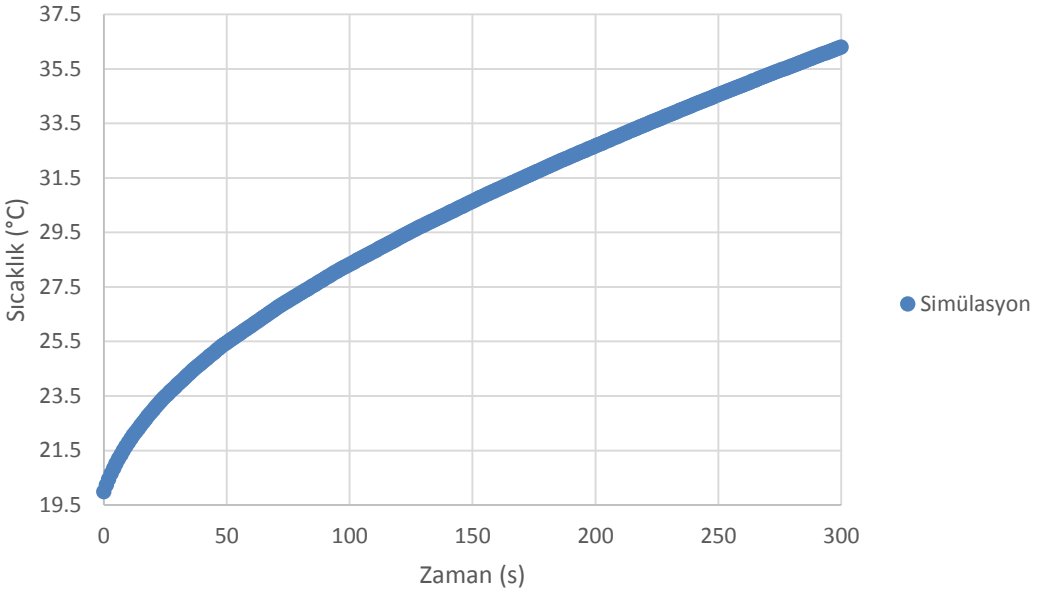
b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:

Adım 2:

Bu simülasyonda sistem içerisindeki hava tanımlı ancak hava için bir hacimsel kuvvet tanımlı değildir. Gerçekleşecek olan konvansiyonel etki ihmal edilmiştir. Sistem içerisindeki havanın kondüksiyon ile ısınıp ısınan havanında yine kondüksiyonla ürünü ısıtması beklenmektedir. Ancak başlangıç sıcaklığı 20 °C olan ürünün ortalama yüzey sıcaklığında görülen 16 °C'lik artış ile, sistemde kondüksiyon ile ısınan havanın ürün yüzey sıcaklığına pek te etkisi olmamıştır, yorumuna ulaşılmıştır.



a



b

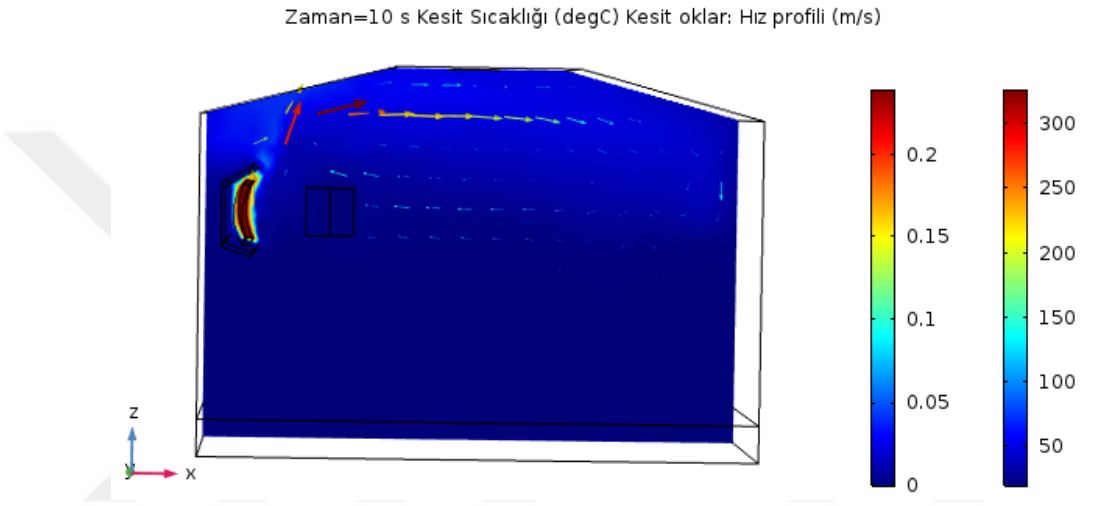
Şekil 4.7 Sistem içerisindeki radyasyon ile kondüksiyonun eş zamanlı çözüldüğü ve sistemde sadece bir kaynağın bulunduğu durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)

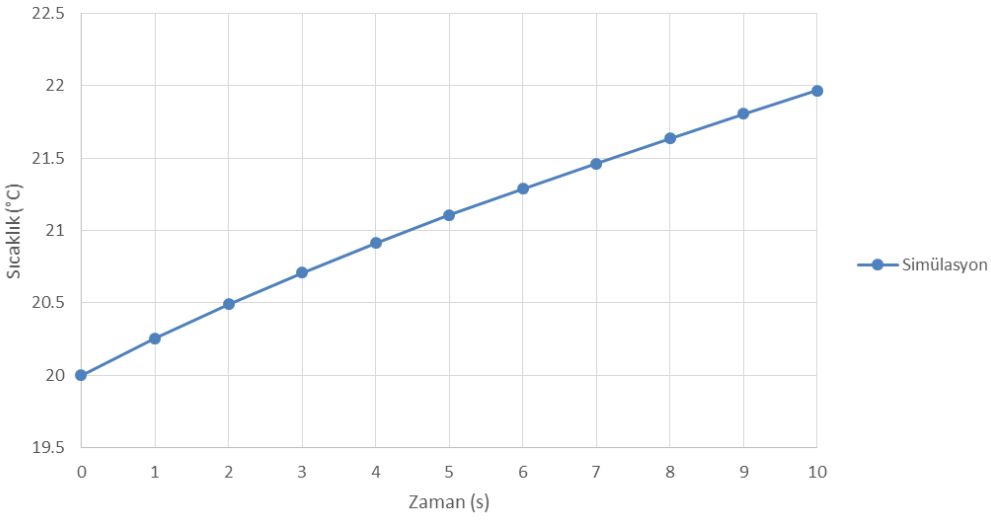
c) Sistem içerisinde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:

Adım 3:

Bu aşamada, sistem içinde gerçekleşen kondüksiyonla ısı transferi, konveksiyonla ısı transferi ve radyasyonla ısı transferi modellenmiştir. Sistemdeki hava için hacimsel kuvvet tanımlaması ile havanın ısınması ve yoğunluğunun azalmasına bağlı olarak yükarı ve havanın tekrar soğuması ile aşağı yönlü hareketi şekil 4.7.a' da görülmektedir. 10 s sonunda ürün yüzeyinde 2 °C'lik sıcaklık artışı meydana gelmiştir.



a



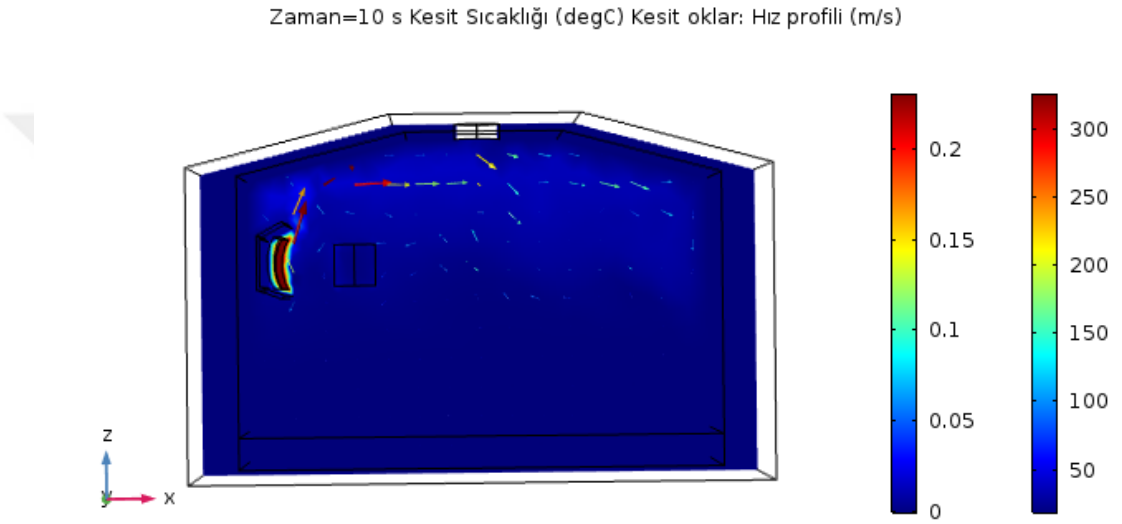
b

Şekil 4.8 Sistem içerisindeki radyasyon, konveksiyon ve kondüksiyonun eş zamanlı çözüldüğü ve sistemde sadece bir kaynağın bulunduğu durum

(a. sistem içerisinde doğal konveksiyon ile ısınan havanın hareketi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)

Adım 4:

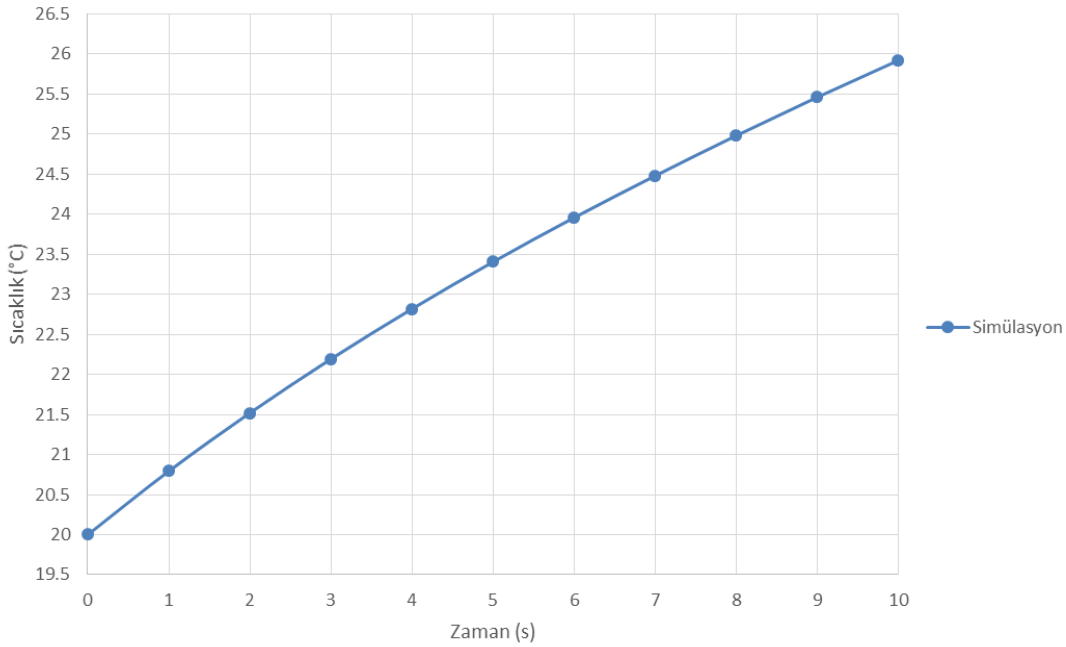
Bu adımdaki simülasyonda şekil 4.8'de konveksiyonel ısı transferinin etkisiyle oluşan havanın hareketi açıkça gözlenebilmektedir. Adım 3'ten farklı olarak modelde kızılötesi sistem kavitesinin iç yüzeyindeki diffüz yüzey tanımının etkisi, radyasyon enerjisinin duvarlardan yansıması ve böylece kızılötesi enerjinin ürüne daha fazla etki ederek üründe daha fazla bir sıcaklık artışı sağlaması şeklinde gözlemlenmiştir. 10 s çalışan modelin sonucunda ürün yüzeyinde 6 °C'lik sıcaklık artışı sağlanmıştır.



a

Şekil 4.9 Sistem iç kavitesindeki yansımanın ısı transferine dâhil edildiği durum

(a. sistemde ısınan havanın hareketi; b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)



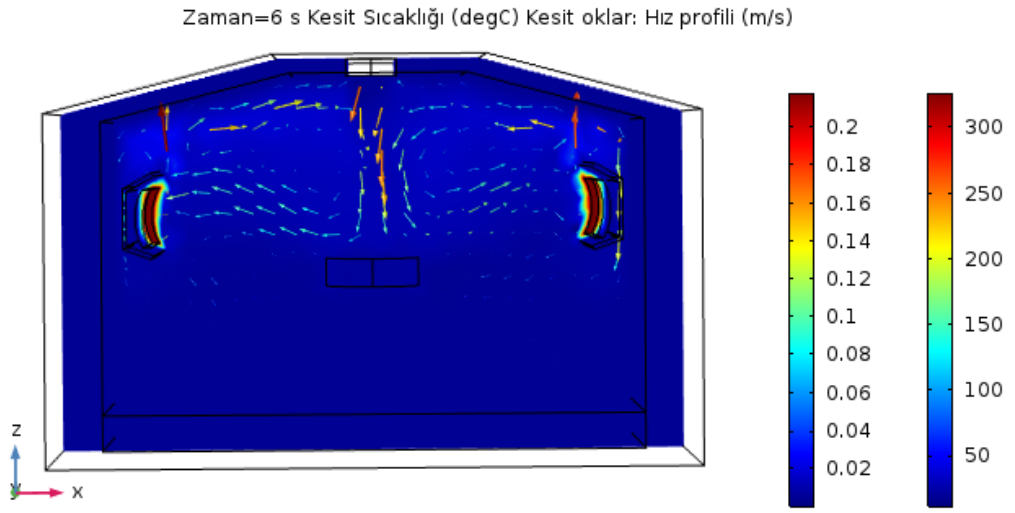
b

Şekil 4.9 Sistem iç kavitesindeki yansımanın ısı transferine dâhil edildiği durum (devam)

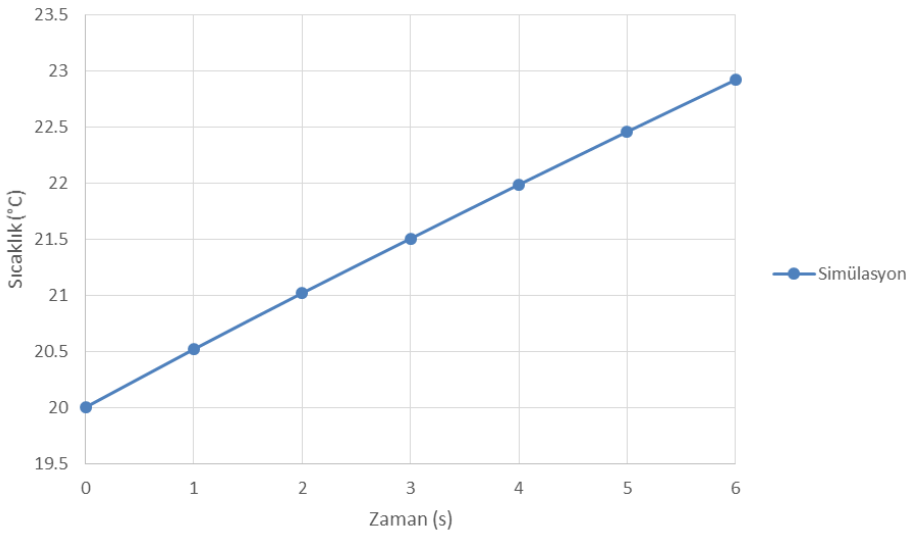
(a. sistemde ısınan havanın hareketi; b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)

Adım 5:

Bu adımda güncellenen geometride deneysel düzenekte çalışan 2 çift lambanın ürünü ısıtması modellenmiştir. Beklenildiği gibi bu sistemde 2 çift lamba olduğu için 6 s'de diğer modele göre (bir önceki bir çift lamba kullanılmış adıma göre) ürün daha fazla ısınmıştır. Isınan havanın hareketi ise şekil 4.9'daki gibidir. Aşağıda 6 s sonra elde edilen simülasyon sonucunda konveksiyonel ısı transferi ile havanın her iki lambanın etrafında dönme hareketi yaptığı görülmektedir. Lambaya yakın konumlarda havanın daha hızlı hareket ettiği anlaşılmaktadır. Yine konveksiyonel ısı transfer etkisiyle belirli bir simetri görülmektedir.



a



b

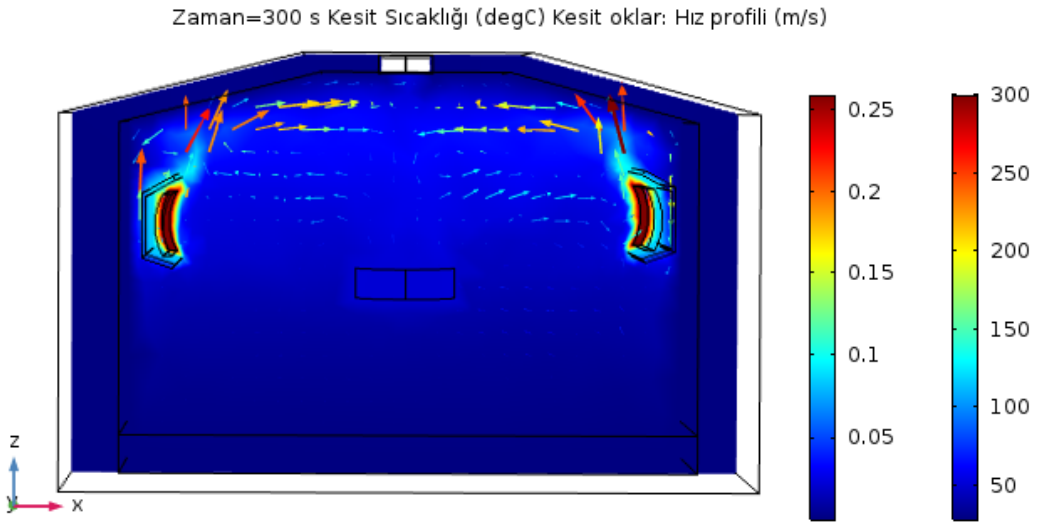
Şekil 4.10 Sistem geometrisine bir çift lamba daha eklendiği durum

(a. sistemde artan lamba sayısı ile sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)

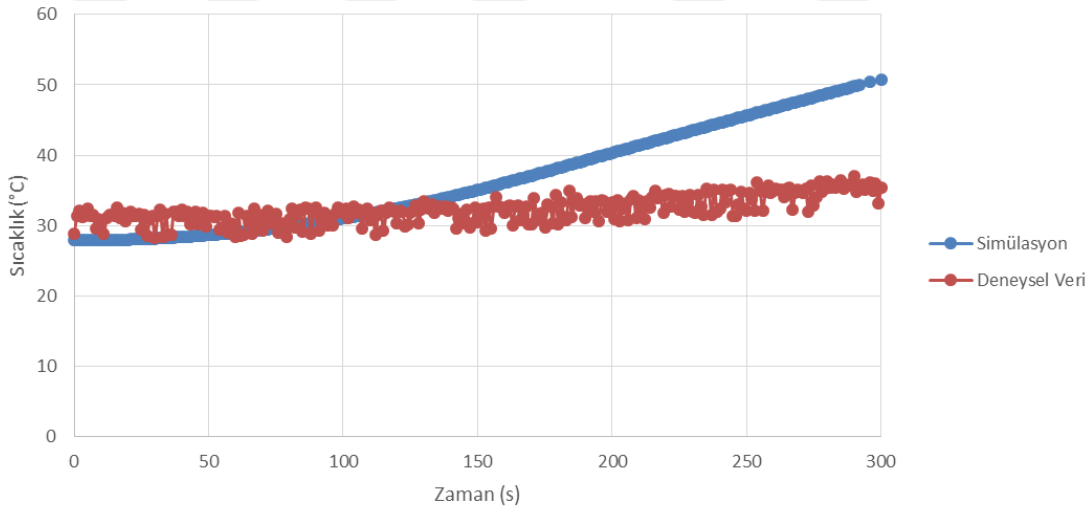
Adım 6:

Bu adımda, Adım 5'ten farklı olarak lambaların sıcaklıkları deneysel verilere göre artan şekilde tanımlanarak (şekil 3.6) gerçek sisteme biraz daha yaklaşılmıştır. Aşağıda 300 s sonra elde edilen simülasyon sonucunda konveksiyonel ısı transferi ile havanın her iki lambanın etrafında dönme hareketi yaptığı görülmektedir. Lambaya yakın konumlarda havanın daha hızlı hareket ettiği anlaşılmaktadır. Yine konveksiyonel ısı transferinin etkisiyle belirli bir simetri meydana geldiği görülmektedir. Ayrıca deneysel sonuçlar ile

modelleme çalışması sonrasındaki ürün merkez sıcaklığı değerleri şekil 4.10.b'de mevcuttur.



a



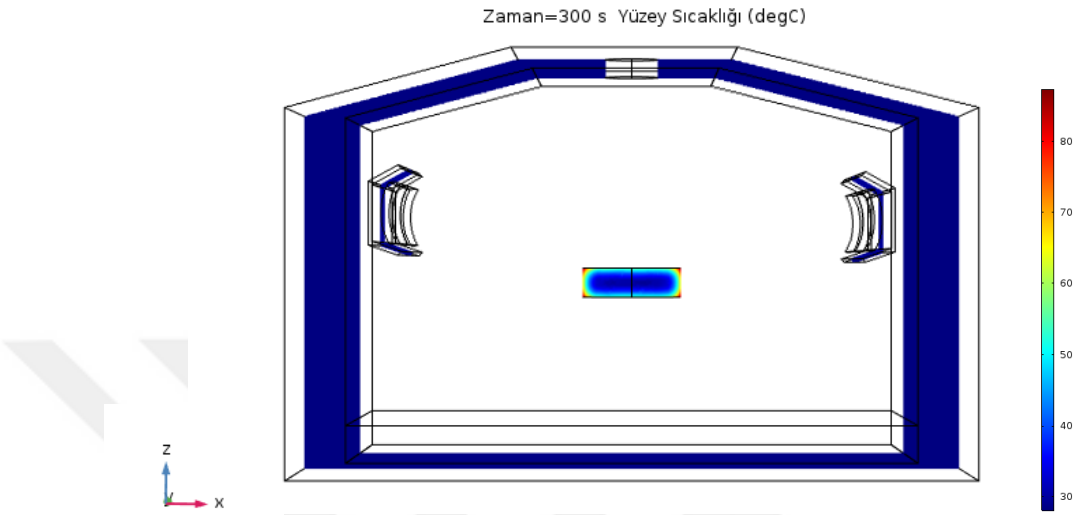
b

Şekil 4.11 Sistem geometrisine bir çift lamba daha eklenip sıcaklıklarının deneysel verilere göre belirlendiği durum

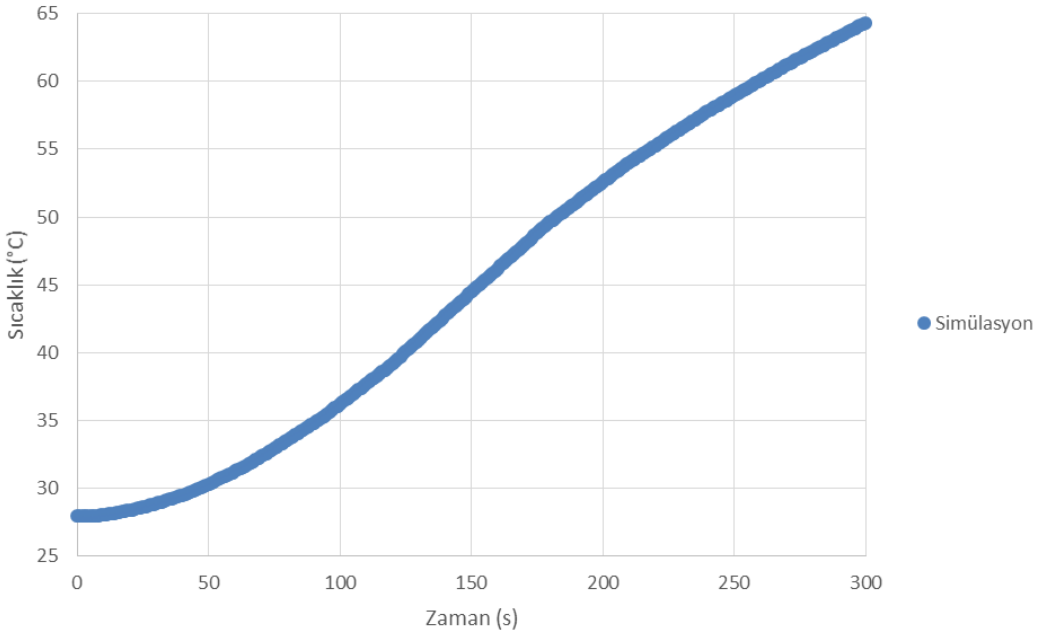
(a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklık değişimi)

Adım 7:

Bu modelde sadece radyasyon etkisi ile olan ısı transferi gözlemlenmiştir. 300 s sonunda başlangıç sıcaklığı 27.77 ± 1.36 °C olan alüminyum silindirin yüzey sıcaklığı 36 °C artarak 64.34 °C olmuştur.



a



b

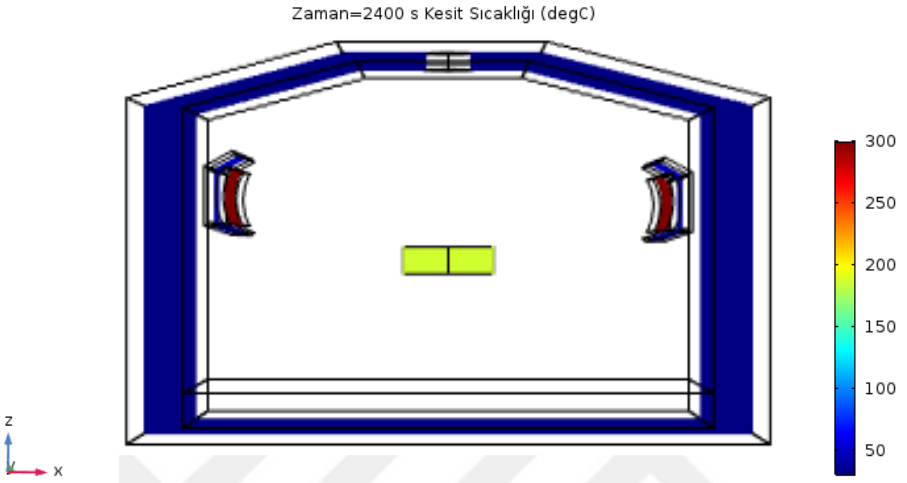
Şekil 4.12 Sistem geometrisinde iki çift lamba varken sistemde sadece radyasyonun modellendiği durum

(a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün yüzey sıcaklık değişimi)

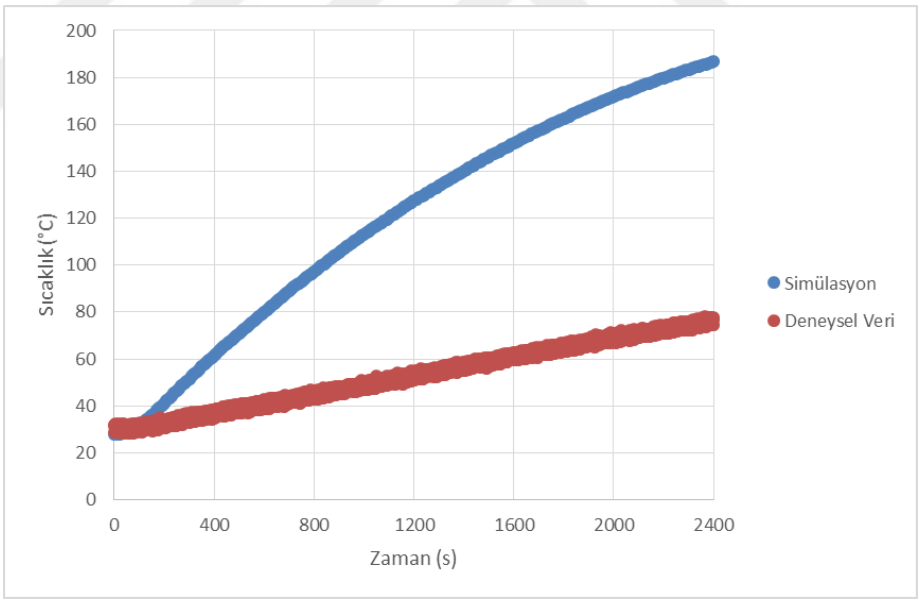
Adım 8:

Modelin 2400 s çalışması sonunda ürünün sıcaklığı 186 °C'ye yükselmiştir.

Yapılan simülasyonda deneysel verilerle aradaki farkın oldukça fazla olduğu görülmektedir. Deneyde ürünün sıcaklığı 74.6 °C iken simülasyonda 186 °C'dir.



a



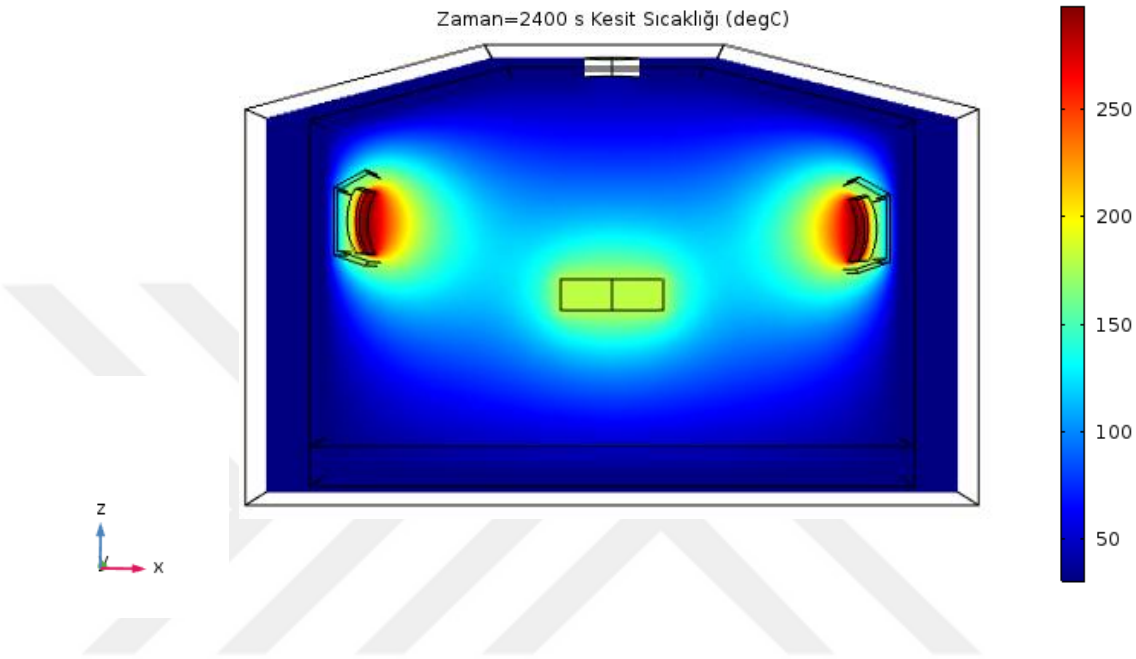
b

Şekil 4.13 Sistem geometrisinde iki çift lamba varken sistemde havanın tanımlı olmadığı durumda alüminyum ürün ile sadece radyasyonun modellendiği durum

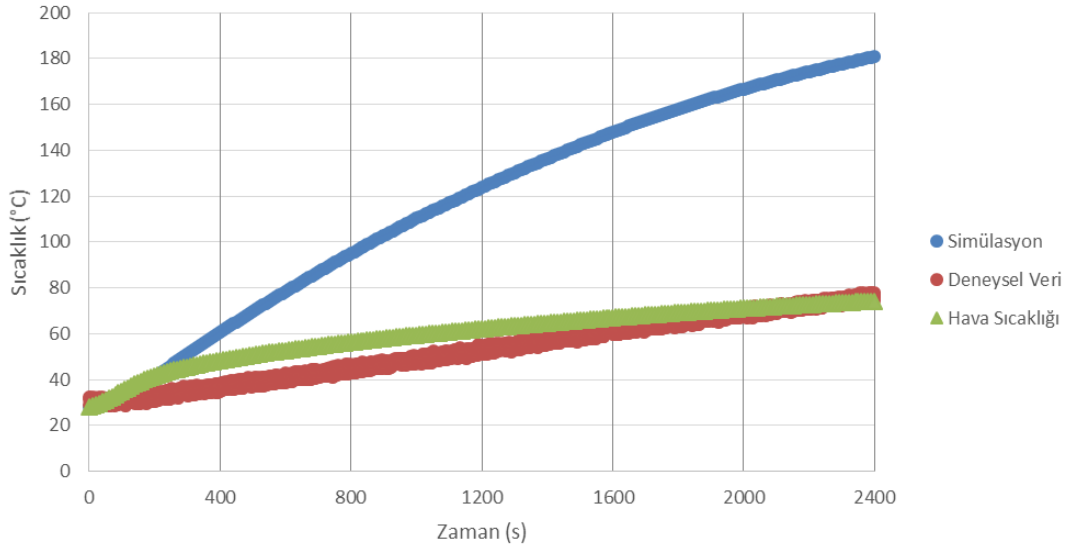
(a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklığı ile deneysel verilerin karşılaştırılması)

Adım 9:

Ürün yüzey ortalama sıcaklığı 180 °C, hava ise 74 °C'ye kadar ısınmıştır. Radyasyon etkisinin yanında havanında modellemeye dâhil edilmesiyle ürünün sıcaklığı 6 °C'ye kadar düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni ise kızılötesi lambalardan yayılan enerjinin bir kısmının havaya transfer edilmesidir.



a



b

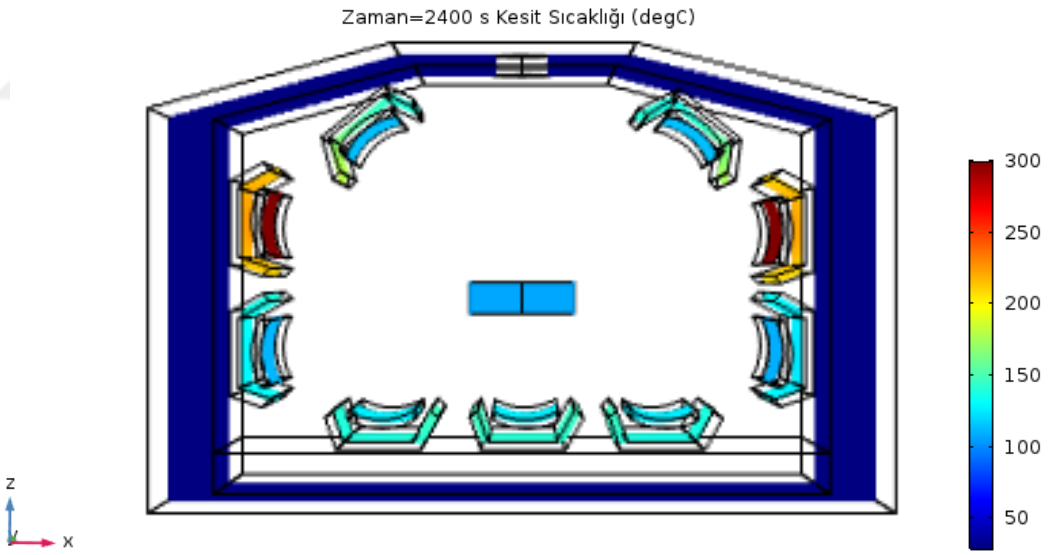
Şekil 4.14 Sistem geometrisinde iki çift lamba varken sistemde havanın da tanımlı olduğu durumda alüminyum ürün ile sadece radyasyonun modellendiği durum

(a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklığı ile deneysel verilerin karşılaştırılması)

Adım 10:

Tüm geometrinin oluşturularak modele dâhil edilmesiyle ürün sıcaklık değişiminin deneysel verilere yaklaştığı aşağıdaki grafikte görülmektedir. Simülasyonda ürün yüzey sıcaklığı 2400 s sonra Adım 9'da 180 °C iken bu adımda 107,41 °C'ye kadar düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni ise kızılötesi sistem kavitesinden olacak yansımaların geometriye bu simülasyonda eklenen lambalar tarafından engellenmesi nedeniyle ürün üzerine daha az radyasyonla ısı transfer edilmesi olduğu düşünülmektedir.

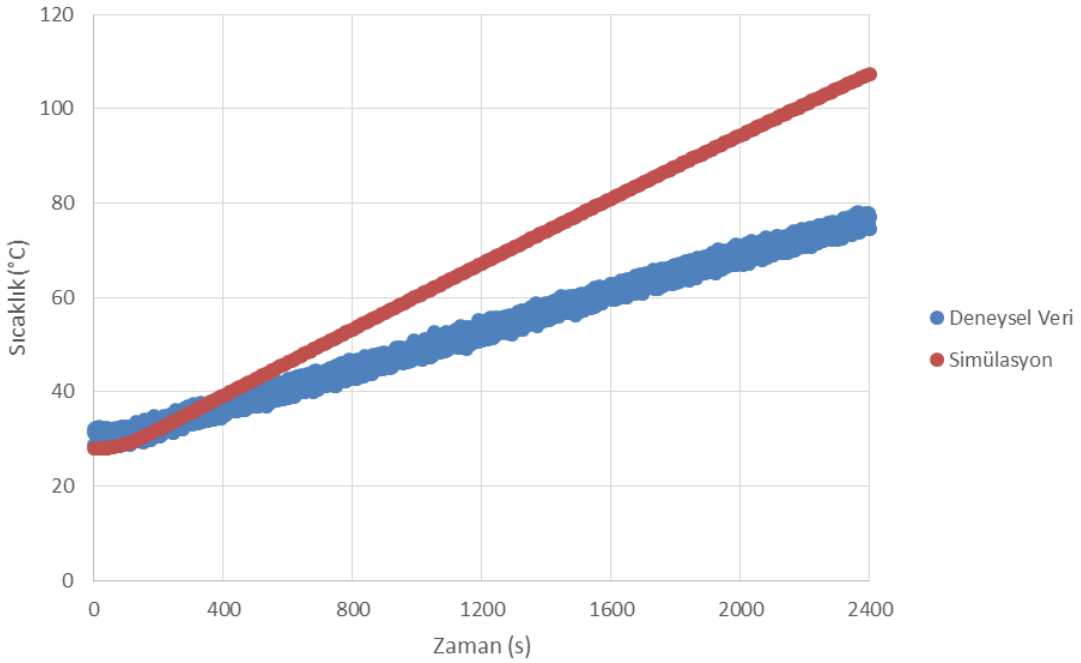
Bundan sonraki çalışmalarda model ile deneysel sonuçlar arasındaki farkı doğuran reflektör ve sistem kavitesinin emissivite değerleri değiştirilerek sonuca daha da yaklaşmaya çalışılacaktır. Ayrıca sisteme hava da dâhil edildiğinde ürün sıcaklığı daha düşük değerde olacaktır. Çünkü kızılötesi lambalardan yayılan enerji havayı da ısıtmak zorunda kalacağı için ürün son sıcaklığının deneydeki sıcaklığına daha yakın olacağı tahmin edilmektedir.



a

Şekil 4.15 Sistemdeki 3-4, 9-10 numaralı kızılötesi kaynakların çalıştığı durumda sadece radyasyon ile olan ısı transferi varsayımında

(a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklığı ile deneysel verilerin karşılaştırılması)



b

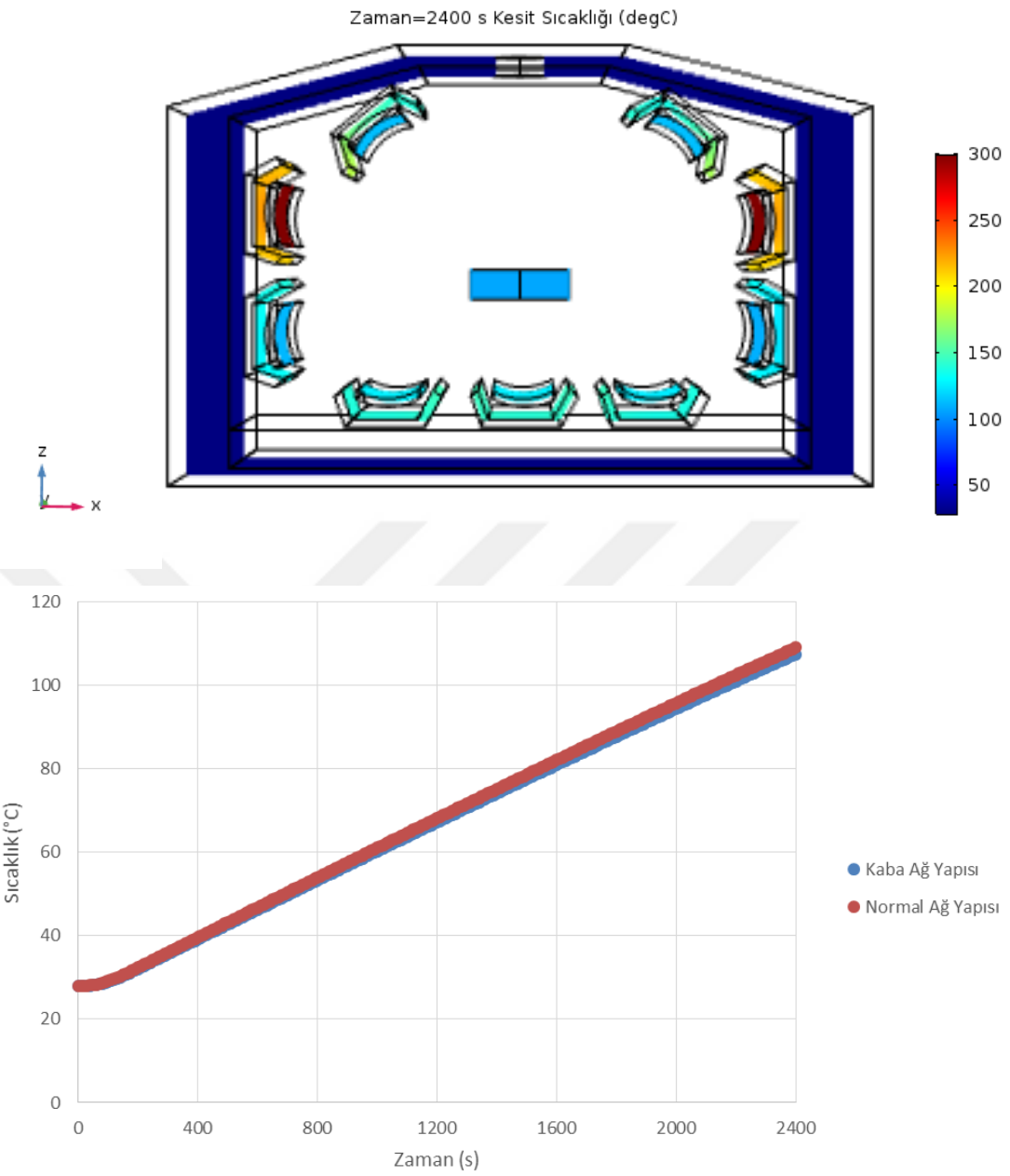
Şekil 4.15 Sistemdeki 3-4, 9-10 numaralı kızılötesi kaynakların çalıştığı durumda sadece radyasyon ile olan ısı transferi varsayımında (devam)

(a. sistemin sıcaklık değişimi, b. ürün merkez sıcaklığı ile deneysel verilerin karşılaştırılması)

d) Ağ yapısı çalışmaları:

Adım 11:

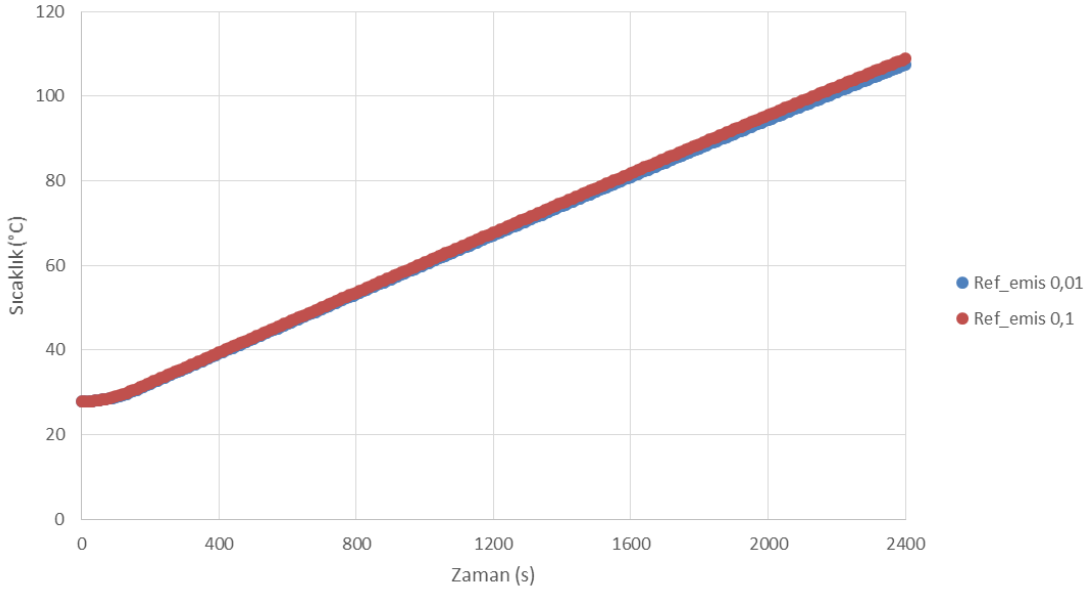
Bu model 41660 elementten oluşan normal ağ yapısı ile 23401 elementten oluşan kaba ağ yapısı arasındaki farkı görmek için Adım 10 düzenlenerek yapılmıştır. Ancak bir fark gözlenmemiştir. Elde edilen sonuçla çözümün ağ yapısından bağımsız olduğu belirlenmiştir. Çünkü hava tanımlı olmadığı için hava için bir ağ yapısı da tanımlanmamıştır. Bu nedenle bundan sonraki simülasyonlarda RAM ve bilgisayar ihtiyacını azaltacağından kaba ağ yapısı tercih edilmiştir.



Şekil 4.16 Modelin normal ve kaba ağ yapısı ile çalıştırılması sonucu ürün merkez sıcaklık değişimi

e) Emissivite çalışmaları:

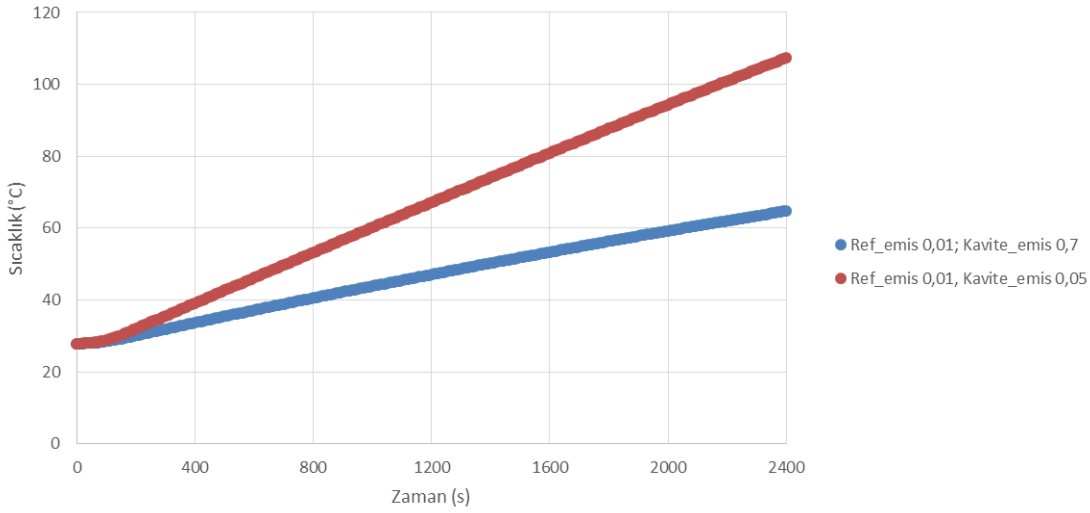
Adım 12: Adım 10'da 0,01 olan reflektör emissivite değeri bu modelde 0,1 olarak değiştirilmiştir. Ancak bir fark ortaya çıkmamıştır.



Şekil 4.17 Reflektör emissivite değeri 0,01 ve 0,1 iken ürün merkez sıcaklık değişimi

Adım 13:

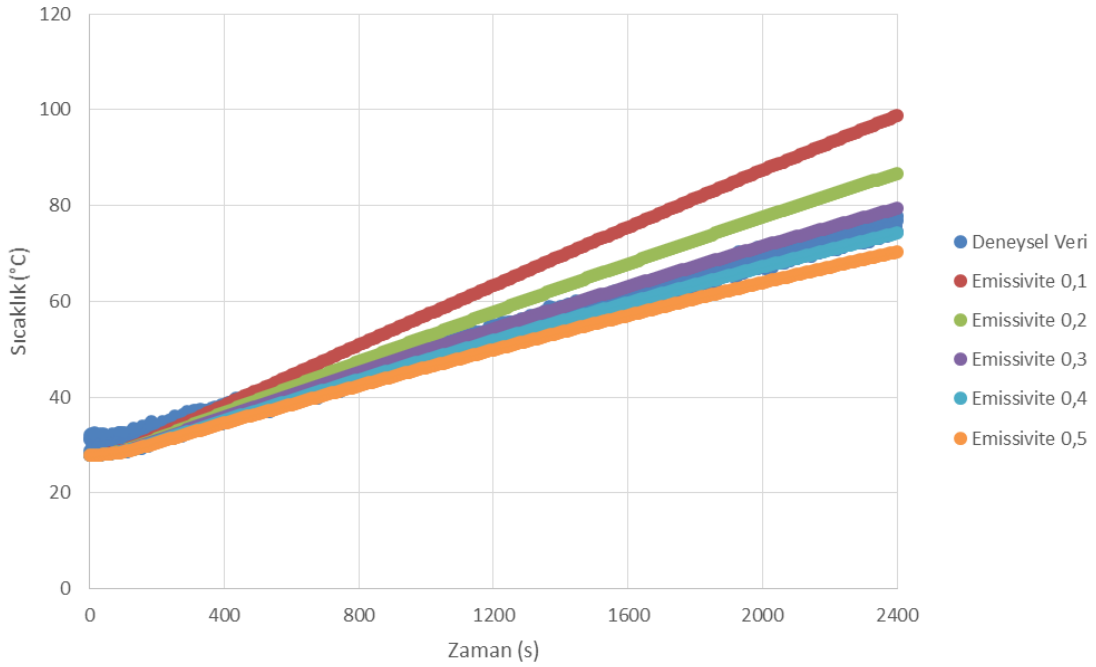
Modelde sistem kavitesinin emissivite değerinin 0,7 olarak güncellenip 2400 s çalışması ile ürün merkez sıcaklık değeri 107 °C'den 64 °C'ye düşmüştür. Isınma durumunda ciddi bir fark ortaya çıktığı için bu adımdan sonraki modellerde sistem kavitesinin emissivite değeri kapsamında çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 4.18 Sistem iç kavitesinin emissivite değeri 0,05-0,7 iken ürün merkez sıcaklık değişimi

Adım 14:

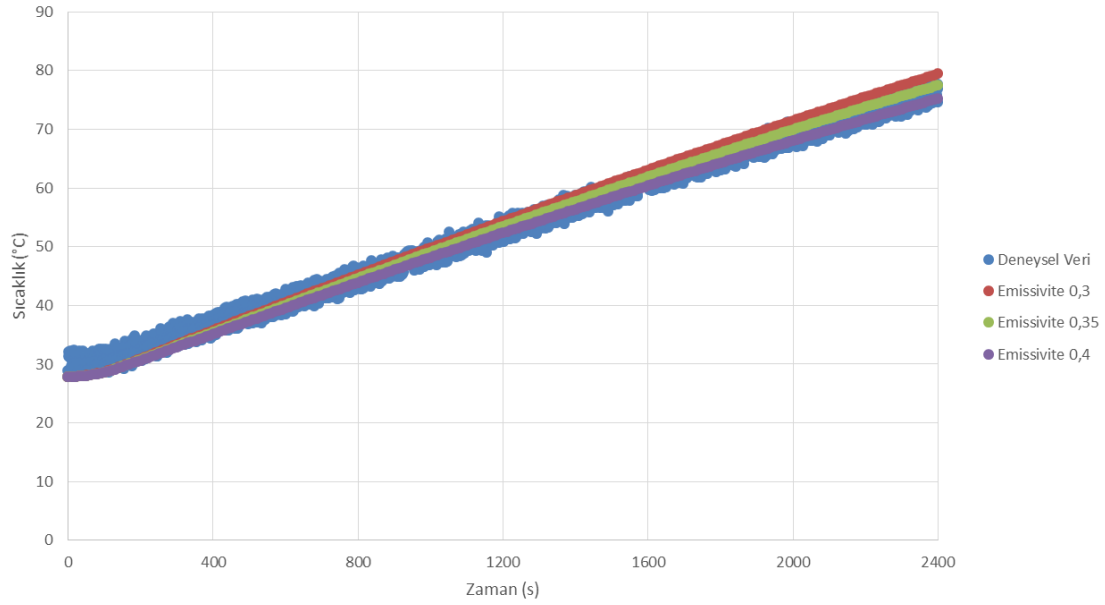
Aşağıdaki sonuçlarda görüldüğü gibi emisivite değerinin 0,3-0,4 değerleri arasında olduğu durumda deneysel verilere en yakın simülasyon elde edilmektedir. Bu nedenle bu emissivite aralığı için bir çalışma daha (adım 15) yapılmıştır.



Şekil 4.19 Sistem kavitesinin emissivite değeri 0,1-0,5 aralığında iken ürün merkez sıcaklık değişimi

Adım 15:

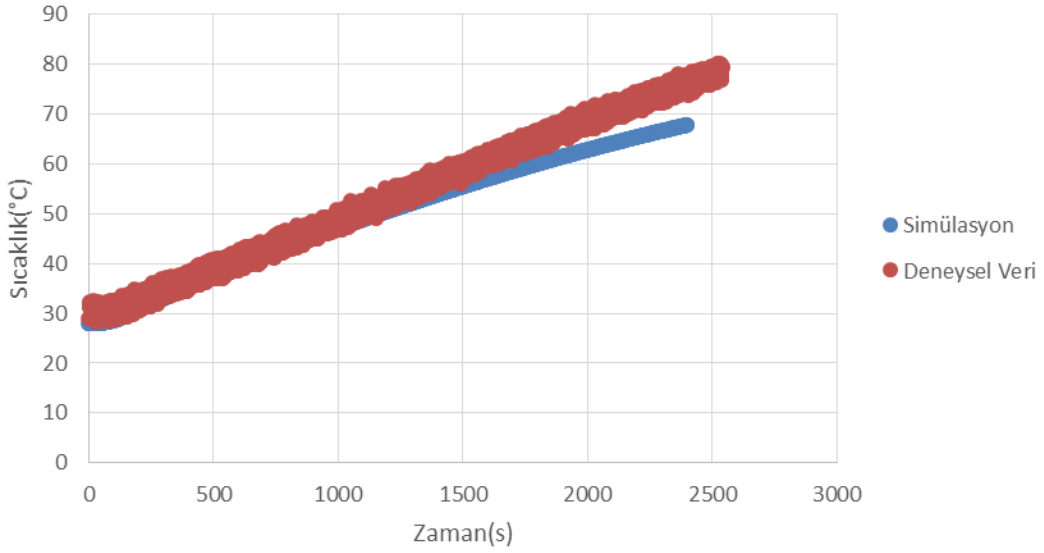
Modelde reflektör emissivite değeri 0,1'de sabit tutulup sistem kavitesinin emissivite değeri ise 0,3-0,35 ve 0,4 olarak tanımlanmıştır. Aşağıdaki grafikte ürün merkez sıcaklığının zamana göre değişimi verilmiştir Deney sonuçlarına yaklaşım açısından en iyi değerin 0,3 olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 4.20 Sistem kavitesinin emissivite değeri 0,3-0,35 ve 0,4 iken ürün merkez sıcaklık değişimi

Adım 16:

Reflektör ve sistem kavitesinin emissivite değerleri sırasıyla 0,1; 0,3 olarak belirlenmiştir. Bu güncelleme dışındaki tüm ayarlamalar bir önceki adım ile aynıdır.



Şekil 4.21 Sistem kavitesinin emissivite değeri 0,3 ve reflektör emissivite değeri 0,1 iken ürün merkez sıcaklık değişimi

4.2 Model Doğrulama Çalışmaları

Materyal ve Yöntem bölümünde detaylı olarak açıklanan matematiksel model çalışmalarından sonra, geliştirilen modellerin deneysel olarak doğrulanma çalışmaları için laboratuvar ölçekli kızılötesi sistemde alüminyum materyalli bir silindir kullanılarak deneyler gerçekleştirilmiş ve deney sonuçları ile matematiksel model sonuçları hacimsel ortalama sıcaklık ve noktasal sıcaklık değişimi açısından karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda 3 farklı kızılötesi lamba konfigürasyonu ve kızılötesi sistem içerisindeki ısı transferinin sadece radyasyon ile gerçekleştiği ve konveksiyonun ihmal edildiği 2 farklı varsayımı ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

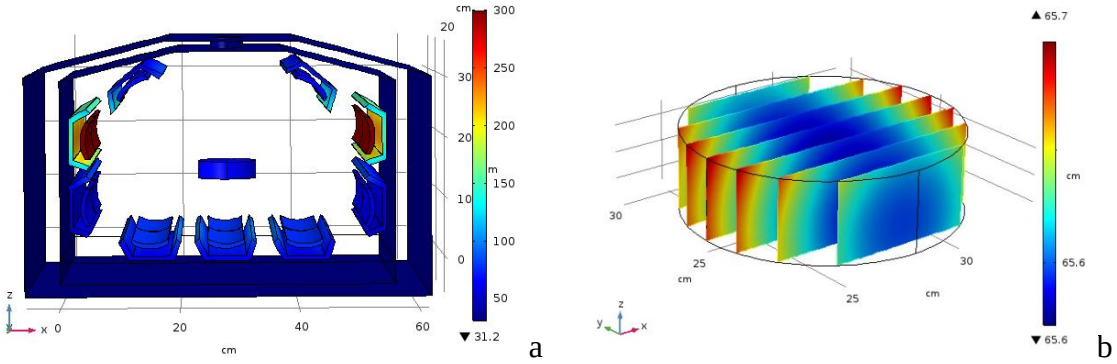
4.2.1 Alüminyum silindir kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar

Alüminyum silindirin örnek olarak kullanıldığı deneysel çalışmalarda alüminyum silindirin başlangıç sıcaklığı 27,77 ± 1.36 °C olarak belirlenmiştir. Model çalışmalarında ise alüminyum silindirin başlangıç sıcaklığı 27,91 °C'dir. Aynı zamanda kızılötesi seramik lambaların simülasyonlardaki başlangıç sıcaklığı 27,91 °C'dir. Model çalışmalarında sistemdeki havanın tanımlı olduğu ancak doğal konveksiyonun ihmal edildiği simülasyonlarda havanın başlangıç sıcaklığı ise 27,91 °C'dir. Bu bilgiler ile birlikte alüminyum silindirin model doğrulama amacı ile kullanıldığı çalışmalarda 3 farklı lamba konfigürasyonu ve sistemde gerçekleşen ısı transferi varsayımları aşağıda yer almaktadır:

Konfigürasyon 1 (3-4 ve 9-10 numaralı lambaların aktif olduğu)**:**

a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:

Sistem içerisindeki sadece radyasyon ile olan ısı transferinin modellendiği bu çalışmada, ısıl işlem ile proses edilen alüminyum silindiri ısıtmak üzere 3-4 ve 9-10 numaralı kızılötesi lambalar aktif hale getirilmiştir. Proses süresi 2100 s olarak belirlenmiştir.

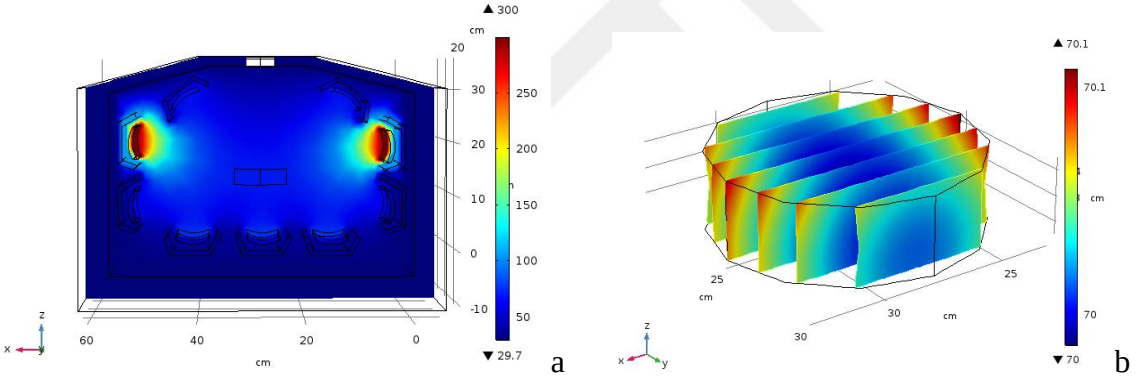


a b

Şekil 4.22 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında 3-4 ve 9-10 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi)

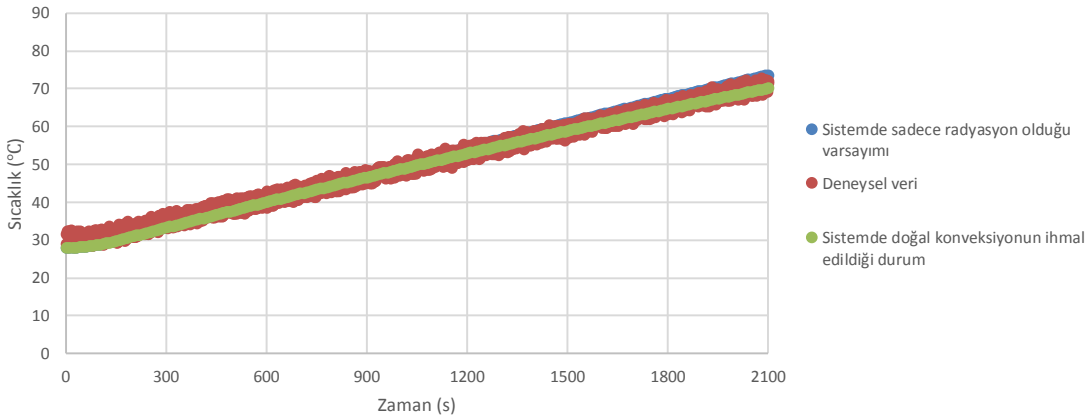
b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:



a b

Şekil 4.23 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği 3-4 ve 9-10 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum

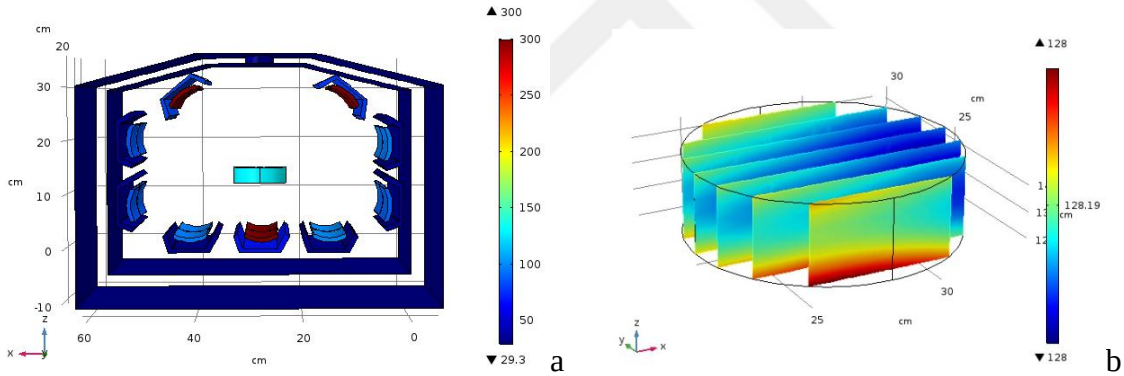
(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi)



Şekil 4.24 3-4 ve 9-10 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durumda alüminyum silindirin merkez noktasındaki sıcaklık değişimi

Konfigürasyon 2 (5-6, 7-8 ve 15-16 numaralı lambaların aktif olduğu)**:**

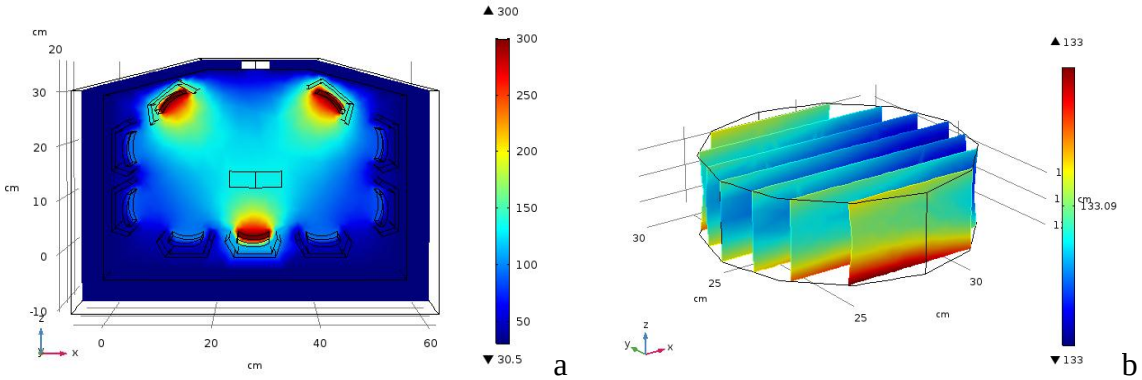
a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:



Şekil 4.25 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında 5-6, 7-8 ve 15-16 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi)

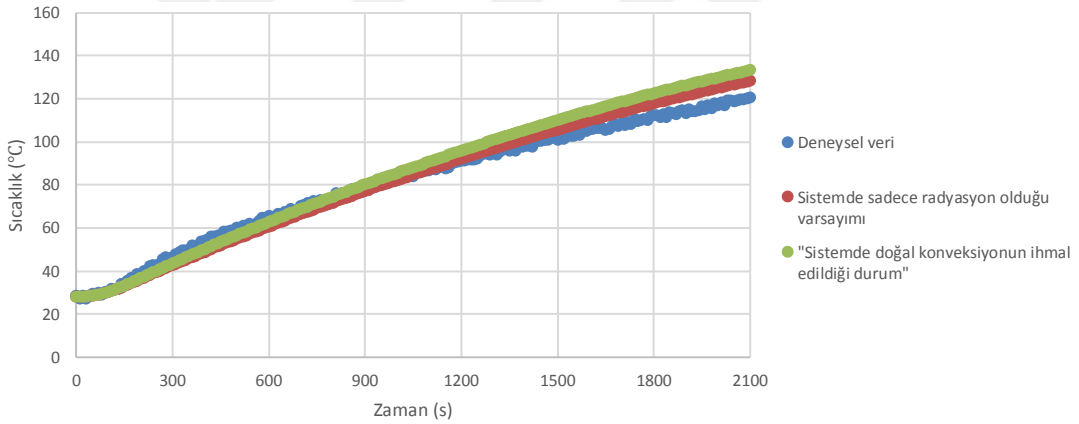
b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:



a b

Şekil 4.26 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği 5-6, 7-8 ve 15-16 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum

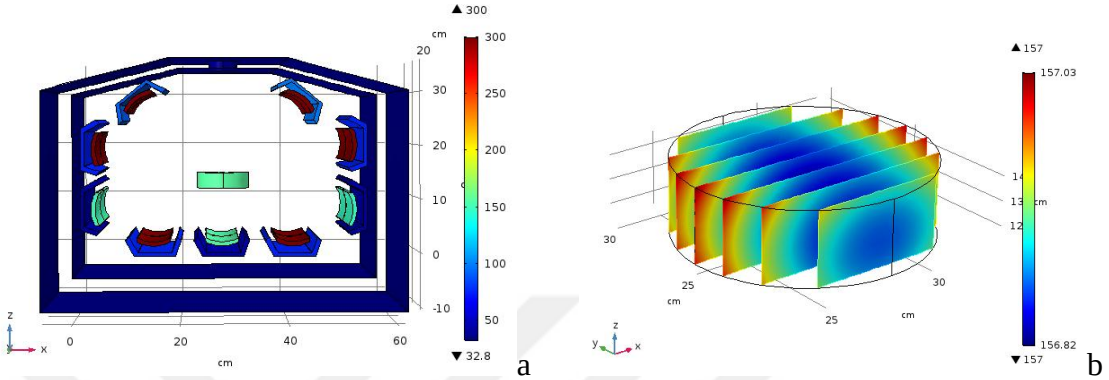
(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi)



Şekil 4.27 5-6, 7-8 ve 15-16 numaralı lambaların aktif olduğu durumda alüminyum silindirin merkez noktasındaki sıcaklık değişimi

Konfigürasyon 3 (3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı lambaların aktif olduğu)**:**

a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:

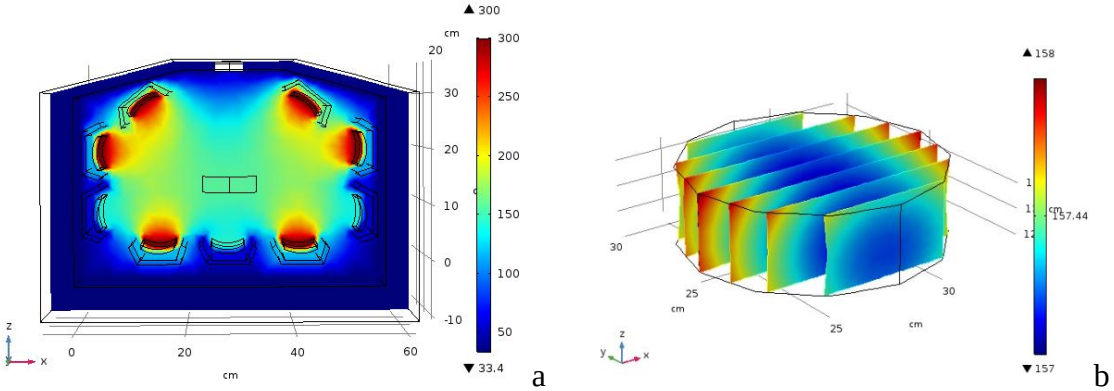


a b

Şekil 4.28 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi)

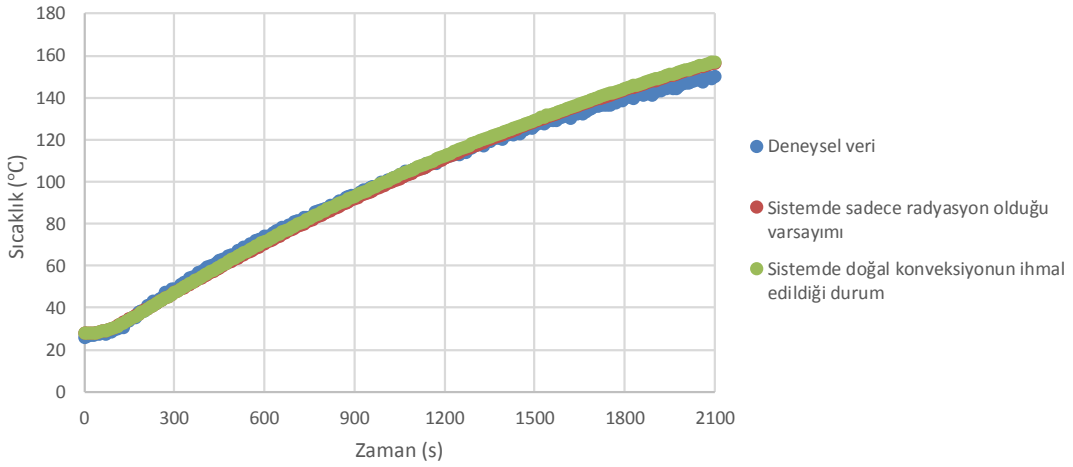
b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:



a b

Şekil 4.29 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durum

(a. sistem içi sıcaklık değişimi, b. alüminyum silindirin sıcaklık değişimi)



Şekil 4.30 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı kızılötesi lambaların aktif olduğu durumda alüminyum silindirin merkez noktasındaki sıcaklık değişimi

Şekil 4.24, 4.27 ve 4.30 sırasıyla 4, 6 ve 12 kızılötesi ısı kaynağının aktif olduğu durumlarda elde edilen sonuçların deneysel verilerle karşılaştırılmasını göstermektedir. Bu grafiklerde model sonuçları ile deneysel veriler arasında bir uyum gözlenmiş ve sistem içi doğal konveksiyon etkisinin (daha önce sadece model sonuçları ile gösterilmiş olan) ihmal edilebileceği deneysel olarak da belirlenmiştir. Bu kapsamda, sistem içerisinde kızılötesi ısıtmanın etkinliği arttıkça (yani sistem içerisinde kullanılan aktif kızılötesi enerji kaynağı sayısı arttıkça) sistem içerisinde doğal konveksiyonun ve hava sıcaklık değişimlerinin ürün sıcaklık değişimine etkisinin azaldığı ve sadece kızılötesi model yaklaşımının doğru olacağı görülmektedir.

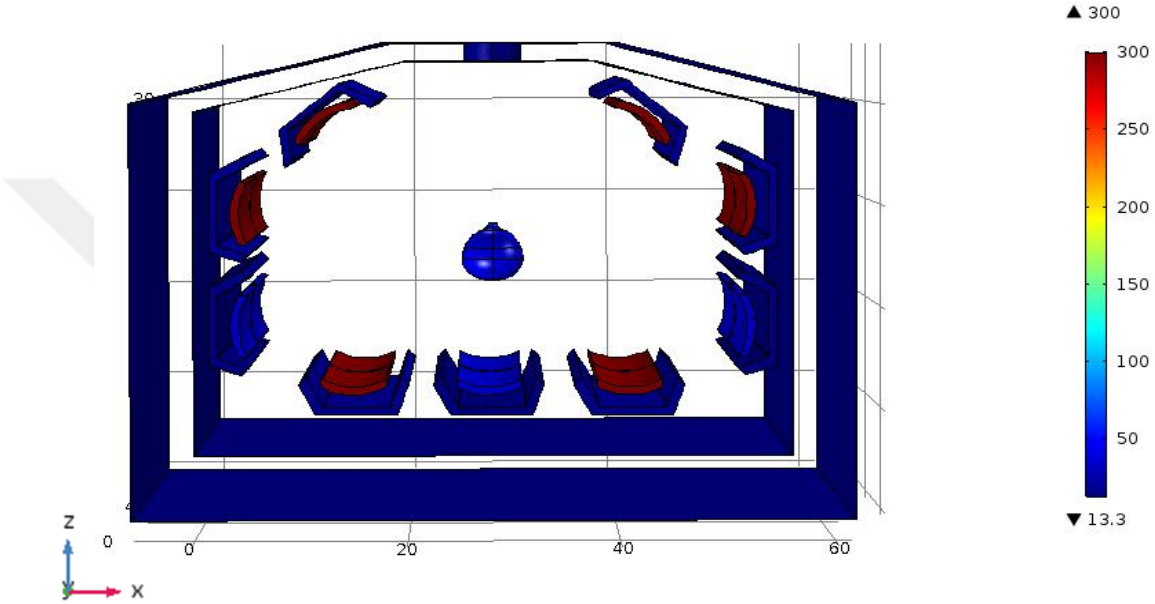
4.2.2 İncir kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar

Bu kısımda yapılan deneysel çalışmalarda sistem içerisindeki 3-4, 5-6, 7-8, 9-10, 13-14 ve 17-18 numaralı kızılötesi kaynaklar aktiftir (konfigürasyon 3 kullanılmıştır). Ürün olarak tercih edilen incir her bir deneyde 300 s proses edilmiştir. İncir alt ve yan yüzeyindeki ölçüm noktaları ise incir yüzeyinden sırası ile 3 mm ve 1,5 mm içeridedir. İncir tercih edilerek yapılan deneyler 2 farklı koşulda gerçekleştirilmiştir. Birincisi sistem içerisindeki hava ve kızılötesi lambalar ortam sıcaklığındayken deneylerin başlatılması, ikincisi ise lambalar 300 °C ve sistem içerisindeki hava da yaklaşık 97 °C' de iken deneylerin başlatılması şeklindedir.

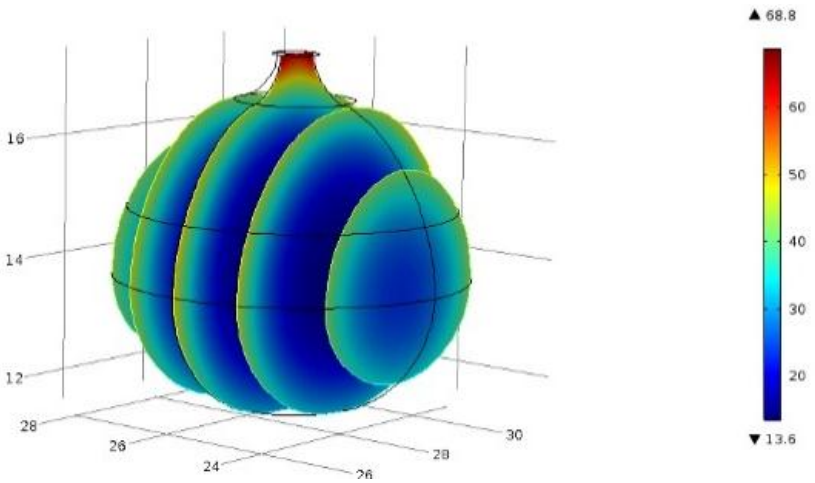
Koşul 1 (sistem ortam sıcaklığında iken)**:**

a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:

Bu model için seramik lambaların başlangıç sıcaklığı 14,68 °C'dir. İncir başlangıç sıcaklığı ise 13.5 ± 3.9 °C olarak ölçülmüştür.



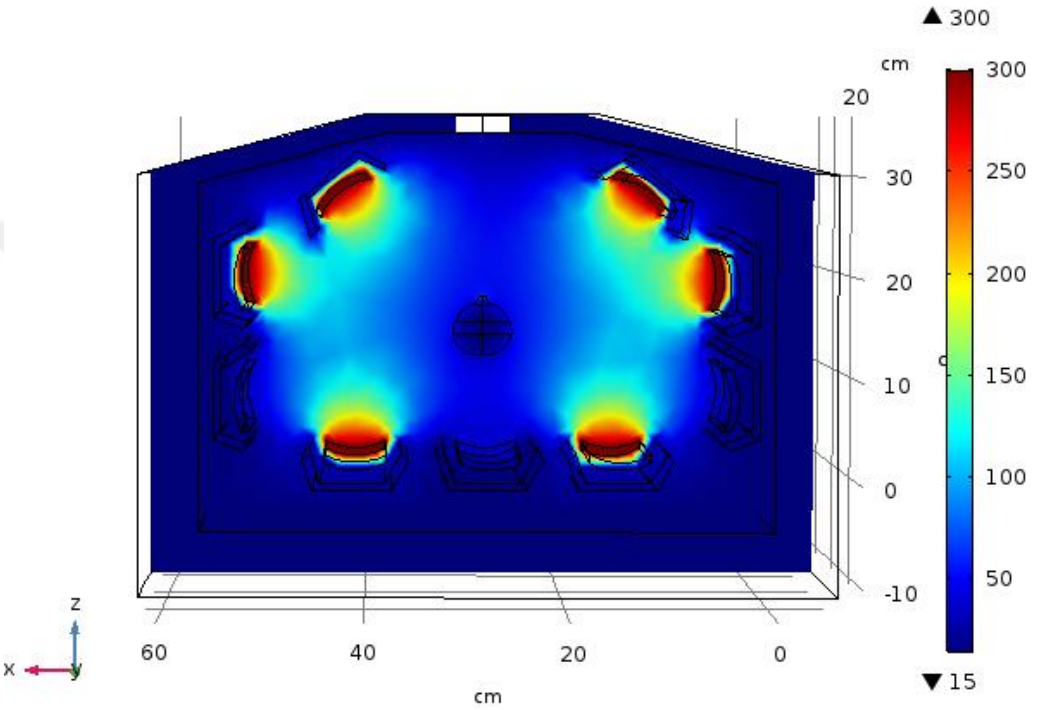
Şekil 4.31 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem ortam sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı



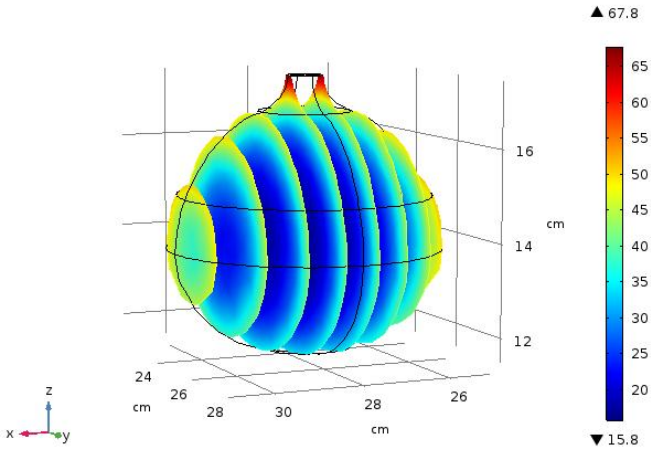
Şekil 4.32 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem ortam sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı

b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:

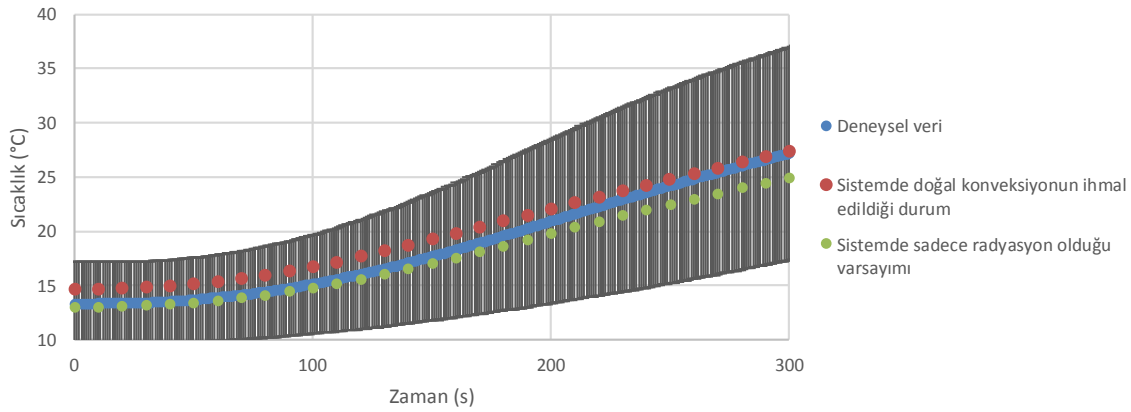
Bu modelde de seramik lambaların başlangıç sıcaklığı 14,68 °C'dir. İncir başlangıç sıcaklığı ise 13.5 ± 3.9 °C olarak ölçülmüştür. Ayrıca sistem içerisindeki havanın başlangıç sıcaklığı da 14,68 °C'dir.



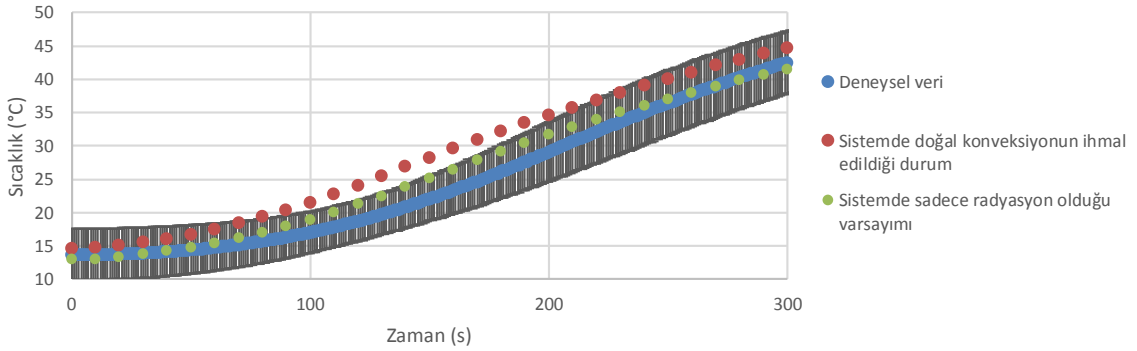
Şekil 4.33 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem ortam sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı



Şekil 4.34 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem ortam sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı



a



b

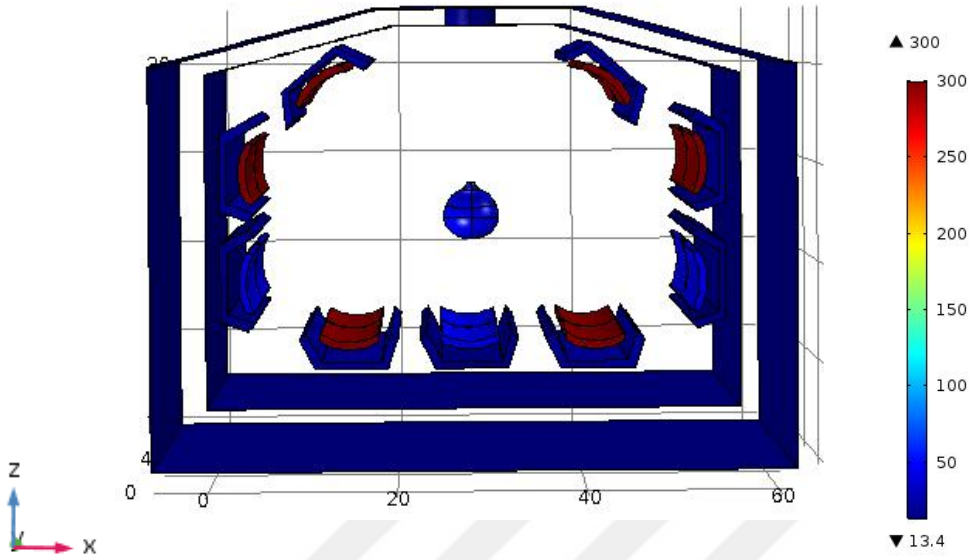
Şekil 4.35 Sistem ortam sıcaklığında iken 12-aktif kızılötesi lamba (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı lambalar) kullanılması durumunda

(a. incir alt noktası ve b. incir yan noktalarından elde edilen deneysel sonuçların model sonuçları ile karşılaştırılması)

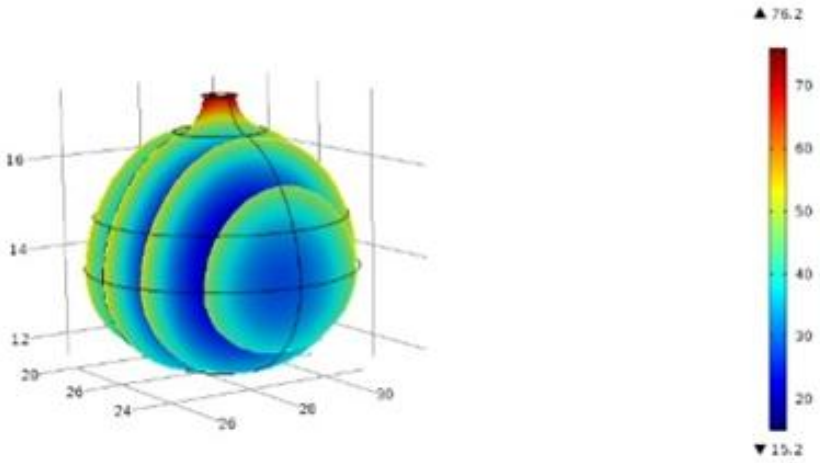
Koşul 2 (sistem içerisindeki hava ve lambalar sıcak iken)**:**

a) Sistem içerisinde sadece radyasyonla ısı transferinin varsayıldığı durum:

Kızılötesi seramik lambaların başlangıç sıcaklığı 300 °C olarak belirlenmiştir. İncir başlangıç sıcaklığı ise 16,52 ± 0,83 °C olarak ölçülmüştür.



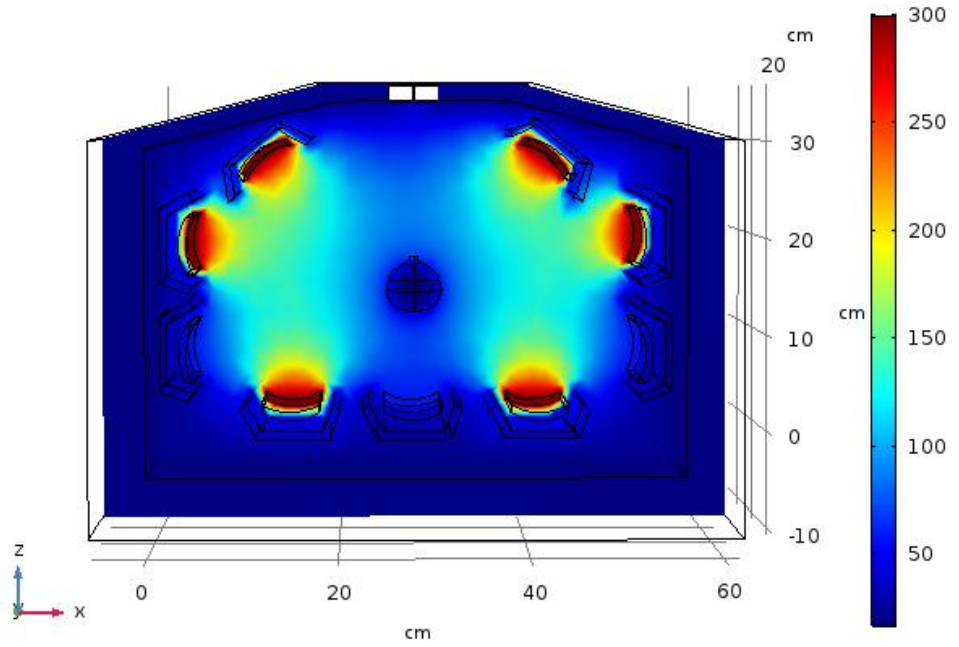
Şekil 4.36 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı



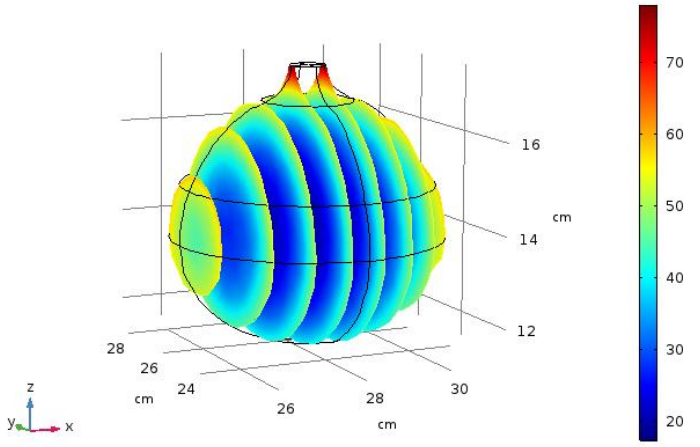
Şekil 4.37 Sistemde sadece radyasyonla ısı transferi olduğu varsayımında sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı

b) Sistem içerisinde bulunan havada doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durum:

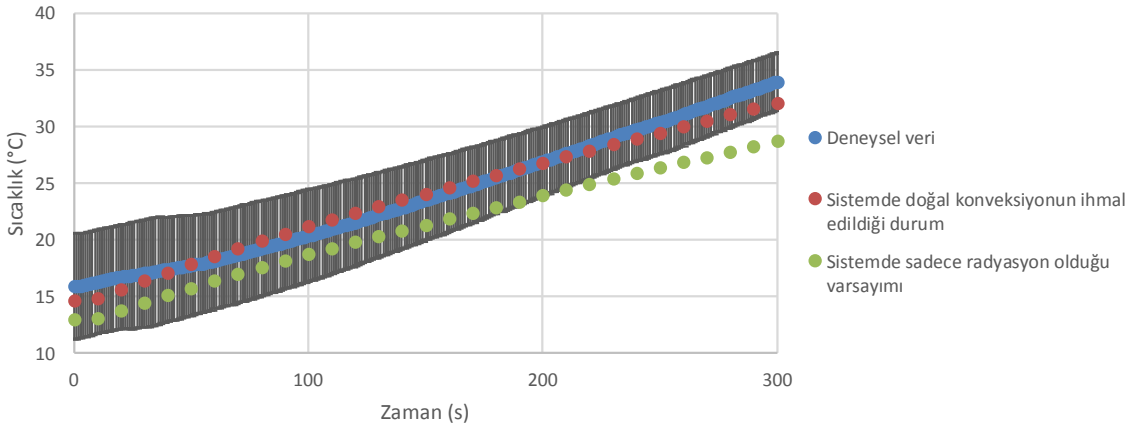
Sistem içerisindeki havanın başlangıç sıcaklığı 97 °C'dir. Kızılötesi seramik lambaların başlangıç sıcaklığı ise 300 °C olarak belirlenmiştir. İncir başlangıç sıcaklığı da 16.52 ± 6.12 °C ölçülmüştür. Bu değerler model için bir girdi olarak kullanılmıştır.



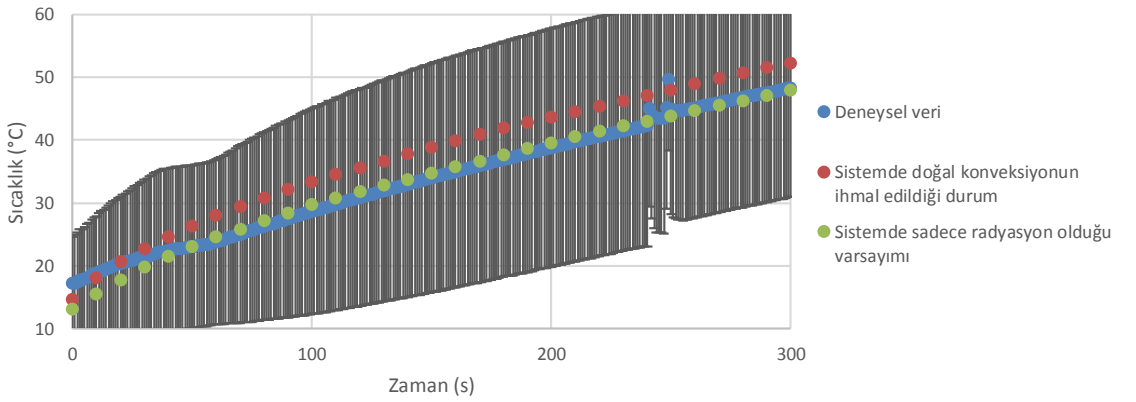
Şekil 4.38 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken sistem içi sıcaklık dağılımı



Şekil 4.39 Sistemde doğal konveksiyon etkilerinin ihmal edildiği durumda sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken incirin sıcaklık dağılımı



a



b

Şekil 4.40 Sistem yaklaşık 97 °C sıcaklığında iken 12-aktif kızılötesi enerji kaynağı (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kaynaklar) kullanılması durumunda

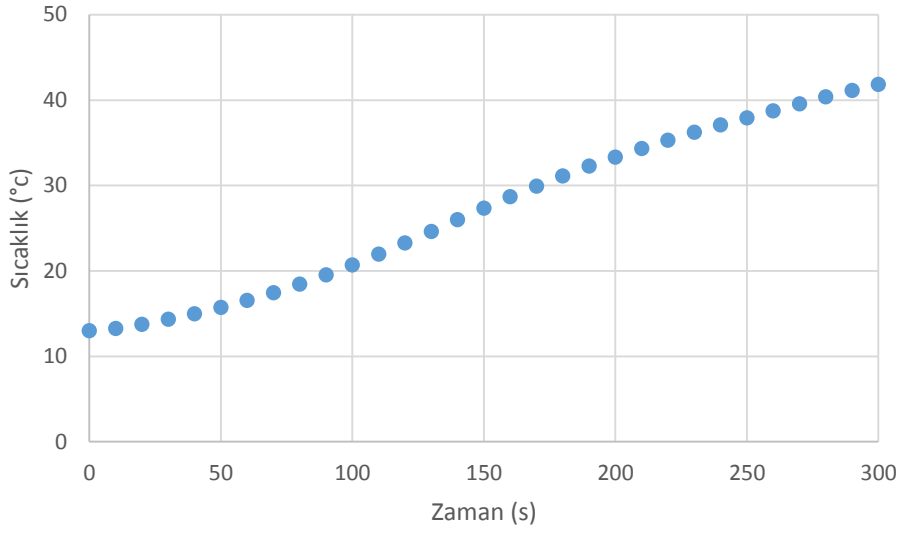
(a. incir alt noktası ve b. incir yan noktalarından elde edilen deneysel sonuçların model sonuçları ile karşılaştırılması)

5. PROSES TASARIM VE MİKROBİYAL İNAKTİVASYON ÇALIŞMALARI

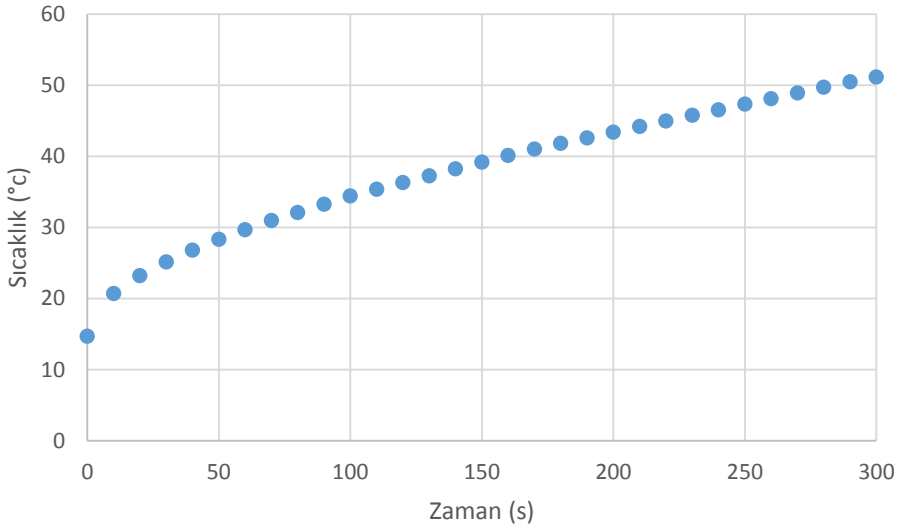
5.1 Proses Tasarım

Tez çalışması kapsamında, ürün olarak sadece alüminyum silindir ile yapılan kızılötesi model kullanılıp doğrulama çalışmaları tamamlandıktan sonra endüstriyel bir prosesi tanımlamak ve ürün yüzeyinde meydana gelen sıcaklık artışı ile birlikte ürün yüzey dekontaminasyonunu değerlendirmek amacı ile model doğrulama çalışmaları içerisinde ürün olarak incir örneklerinin kullanıldığı daha önce hazırlanmış olan simülasyonlardan yararlanılmıştır. Bu aşamada, sürekli bir sistemde incirler proses edilmeye başlanmış ve içerisindeki hava sıcaklığı artmış bir ortamda bulunmaları durumunda sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amaçlanmış ve incirler önceden ısıtılmış olan sistem içerisine yerleştirildikten sonra (yine 12 kızılötesi enerji kaynağının aktif olduğu durumda) sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi gerçekleştirilmişti. Şekil 3.39 yine incirlerin alt ve yan yüzeylerinden elde edilen sıcaklık değişimlerinin model sonuçları ile karşılaştırılmasını göstermektedir.

Bu çalışmada sistem içi hava sıcaklık başlangıç değeri 97 °C olarak alınmış ve incirlerin bu ortamda yüzey dekontaminasyonu/pastörizasyonu işlemine tabi tutuldukları varsayımıyla endüstriyel bir proses ortamı uygulaması yapılmıştır.



Şekil 5.1 12-aktif kızılötesi enerji kaynağı (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kaynaklar) kullanılması durumunda incir yüzey ortalama sıcaklık değişimi

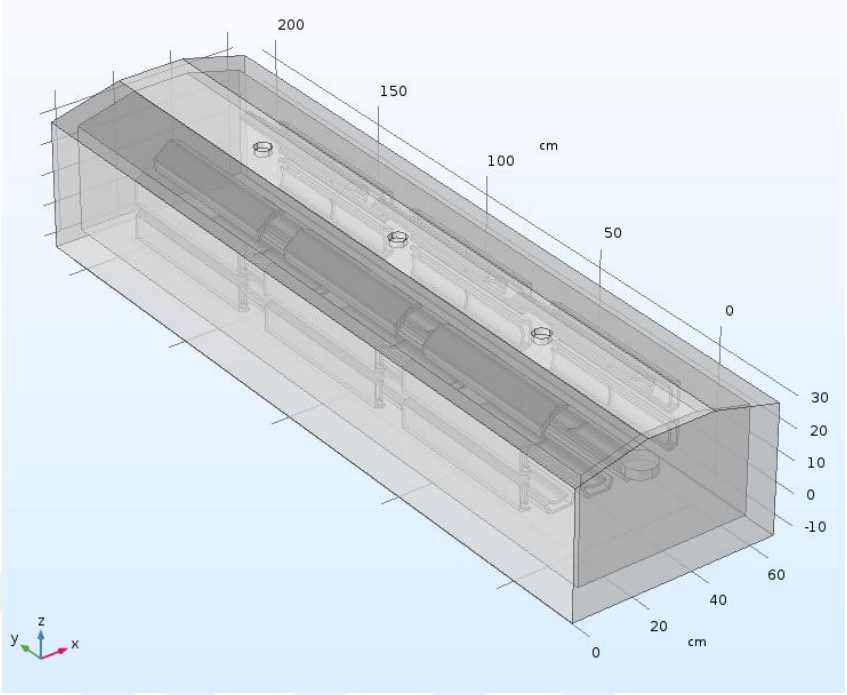


Şekil 5.2 12-aktif kızılötesi enerji kaynağı (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18 numaralı kaynaklar) kullanılması ve başlangıç kızılötesi sistem içi sıcaklığının 97 °C olması durumunda incir yüzey ortalama sıcaklık değişimi

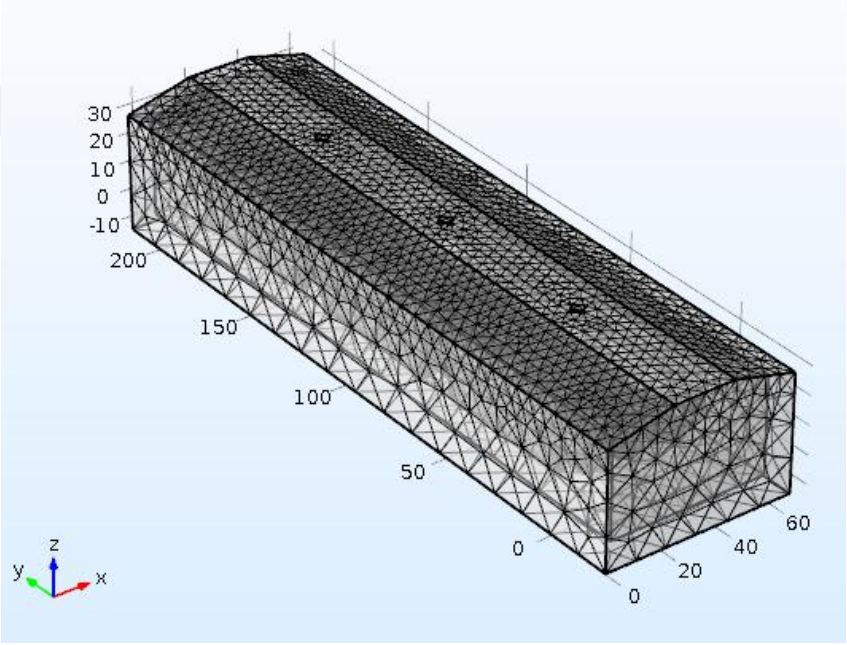
5.2 Endüstriyel Proses – Sistem Tasarımı

Çalışmanın bu aşamasında, deneysel olarak doğrulanan matematiksel modeller kullanılarak, endüstriyel boyutta bir sistem tasarımı gerçekleştirilmiştir. Kesit olarak, şekil 3.7'de gösterilen ve deneysel çalışmalarda kullanılan sistem geometrisinde olan bu tasarımda ürünün proses sürecinde hareket etmesi ve bu süreçte üründe gerçekleşen sıcaklık değişimleri simüle edilmiştir.

Ürün olarak, deneylerde kullanılan alüminyum silindir boyutlarında ve incir ısısal – fiziksel özelliklerinde bir geometri kullanılmıştır. Bu kapsamda simülasyonlarda kullanılan sistem geometrisi ve ağ yapısı Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Bu sistemde toplam 54 adet kızılötesi enerji kaynağının bulunduğu ve hepsinin 300 °C sıcaklıkta olduğu varsayımıyla, 2-simülasyon çalışması yapılmıştır. İlk aşamada sistem içerisindeki hava sıcaklığı ihmal edilmiş ve sadece ürün ile kızılötesi enerji kaynakları arasında gerçekleşen radyasyonla ısı transferi modellenmiş, 2. aşamada ise sistem içerisindeki hava sıcaklığının (deneysel çalışmada olduğu şekilde) 97 °C olduğu kabul edilerek (ve sistem içerisindeki doğal konveksiyon etkisi ihmal edilerek) ısı transferi modeli yapılmıştır.



a



b

Şekil 5.3 Endüstriyel sistem tasarımı kapsamında kullanılan tünel görüntüsü

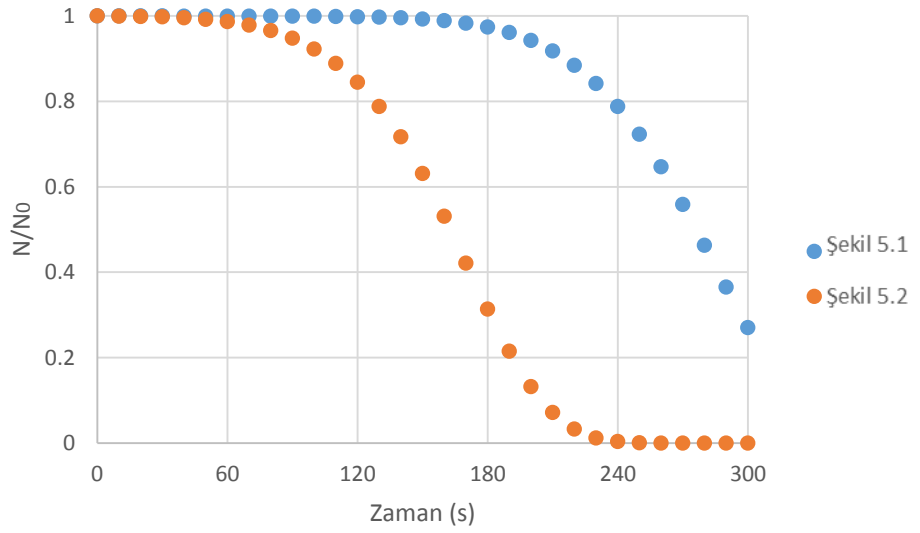
(a. tasarlanan geometri, b. simülasyonlarda kullanılan ağ yapısı)

5.3 Mikrobiyal İnaktivasyon

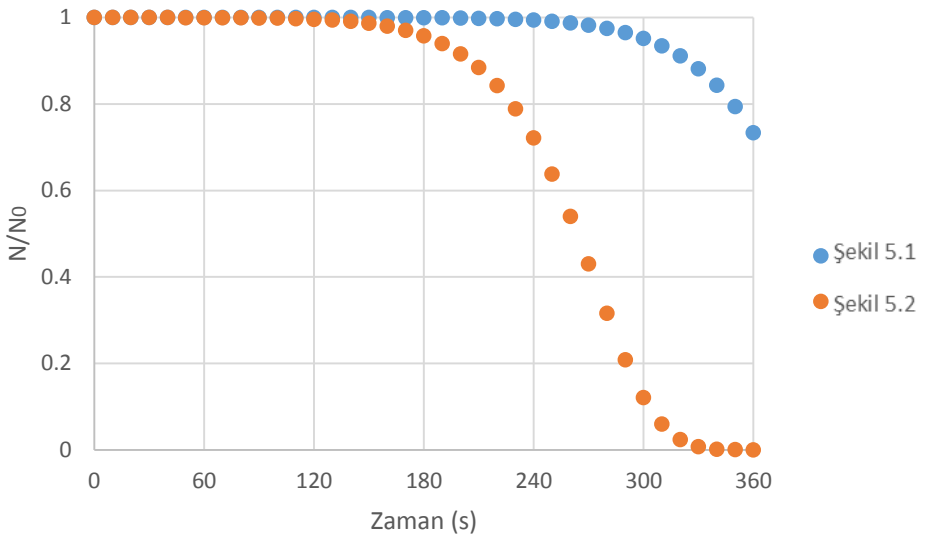
Deneysel doğrulama çalışmaları kapsamında gıda ürünü olarak "incir"in özellikle seçildiği yukarıda da belirtilmişti. İncir üretiminde karşılaşılan ve ekonomik olarak olumsuz sonuçlara sebep olan aflatoksin problemi, hem gıda güvenliğini etkileyerek sağlık açısından risk oluşturmakta hem de önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır (O'Riordan ve Wilkinson 2008). Bu nedenle, incir üretiminde herhangi bir işlem basamağında ortaya çıkabilen bu tehlikenin azaltılması büyük bir öneme sahiptir. Özellikle hasat sonrası – kurutma işlemi öncesi, bir mikrobiyal inaktivasyon işlem uygulamasının hem gıda güvenliğinin sağlanmasında hem de incirlerin raf ömrünün uzatılmasında etkin olacağı literatürde de belirtilmektedir (Tanaka vd. 2012). Trivittayasil vd (2011) ve Tanaka vd. (2012), incirlerde farklı bozulma etmeni olan ve problemlere sebep veren küflerin inaktivasyonunun hedeflendiği bir çalışmada kızılötesi uygulama ile yüzey pastörizasyonu işleminin yapılabileceğini göstermişlerdir. Tanaka vd. (2012) tarafından açıklandığı ve Marquenie (2002) tarafından belirtildiği şekilde üründe ısıl işleme bağlı olarak meydana gelebilecek doku hasarlarının (tissue damage) önüne geçebilmek amacıyla ürün sıcaklığının 55 °C'nin altında tutulması gerekmektedir. Bu kapsamda, şekil 5.4'de gösterilen ve endüstriyel proses koşullarında gerçekleşebileceği varsayılan simülasyon sonucuna göre uygun bir proses süresinin uygulandığı görülmektedir.

Çizelge 5.1 Kinetik parametreler (Tanaka vd. 2012).

	T_{ref} (K)	k_{ref} (s^{-1})	E_a (J/mol)
Cladosprium sp.	316	0. 0408	2.59E5
B. Cinerea	316	0.00205	3.36E5



a



b

Şekil 5.4 Kızılötesi ısıl işlem sırasında incir yüzeyinde (a) *Cladosprium* sp. ve (b) *B. cinerea* için mikrobiyal inaktivasyon değişimi

Küf gelişimi ürün yüzeyinde olacağından hareketle ürün yüzey sıcaklık değişimi kullanılarak bir mikrobiyal inaktivasyon çalışması incirlerde problem olan küfler (*Cladosprium* sp. ve *B. Cinerea*) için belirlenen kinetik parametreler (Çizelge 5.1) kullanılarak aşağıda açıklandığı şekilde gerçekleştirilmiştir.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -kN$$
$$k(T) = k_{ref} \exp\left[\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (15)$$

Bu değerlere göre, yukarıda verilen 1. dereceden deaktivasyon modeli ve şekil 5.1-5.2'den elde edilen incir yüzey ortalama sıcaklıklarına göre çizelge 1'de verilen kinetik parametreleri kullanılarak analiz yapıldığında şekil 5.4'de elde edilen mikrobiyal inaktivasyon eğrileri elde edilmiştir. Şekil 23'de gözlendiği şekilde ürün yüzey sıcaklığının 50 °C'nin üzerine çıkmasıyla ürün yüzeyinde *Cladosprium sp*. için yeterli derecede bir deaktivasyon sağlanırken *B. Cinerea* için daha yüksek sıcaklık değerlerine ulaşılması gerekmiştir Bu kapsamda proses süresinin 1 dk uzatılması ile ürün yüzey ortalama sıcaklığının, literatürde de belirtildiği gibi 50 °C'nin üzerine çıkması ile (55 °C limitine ulaştığı) ürün yüzeyinde yeterli bir inaktivasyon sağlanabileceği belirlenmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması kapsamında, gıda endüstrisinde kullanılan dekontaminasyon/ pastörizasyon alternatif olacak ya da bu yöntemlerle kombine biçimde kullanılabilecek yenilikçi olarak adlandırılabilen kızılötesi uygulama prosesi sırasında ürün sıcaklık değişimini belirlemek amacıyla matematiksel model çalışmaları gerçekleştirilmiş ve bu modeller deneysel verilerle doğrulanarak farklı proses tasarım amacıyla kullanılmıştır.

Çalışma sırasında izlenen adımlar ve alınan sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmektedir:

- Matematiksel model çalışmaları yukarıda da anlatıldığı şekilde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, tez çalışmaları için tasarlanan sistemin x-y kesiti boyutlarında 2-boyutlu olarak model çalışmaları yapılmış ve bu kapsamda 3-boyutlu modellerde kullanılacak parametrelere karar verilmiş ve bu parametrelerle sistem gerçek boyutları kullanılarak 3-boyutlu modeller geliştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında sistem içerisinde bulunan kızılötesi enerji kaynaklarının proses sırasında etkinliklerinin belirlenmesi amacıyla farklı sayıda kaynak kullanılarak model sonuçları incelenmiştir. Ayrıca, sistem içerisindeki havada gerçekleşen ısı transferinin ürün sıcaklık değişimine etkisini gösterebilmek amacıyla da çalışmalar yapılmıştır.

- Bu kapsamda sistem içerisinde havanın ısınmasına bağlı olarak gerçekleşen doğal konveksiyon etkilerinin belirlenmesi amacıyla da model çalışmaları gerçekleştirilmiş ve 3-boyutlu modeller de yüksek RAM ve prosessor ihtiyacına bağlı olarak doğal konveksiyon etkileri ihmal edilmek zorunda kalınmıştır. Ayrıca, sistem içerisinde gerçekleşen radyasyonun, özellikle kızılötesi enerji kaynağı kullanım sayısının artması ile, etkisinin baskın olduğu model çalışmaları ile gösterilmiştir.

- Bu çalışmada, gıdalarda yüzey dekontaminasyonu amacıyla kullanılabilecek olan bir kızılötesi tasarımı, sistem geometrisi ve ürün yüzey sıcaklık değişimi kapsamında yapılmış, geliştirilen matematiksel modeller deneysel verilerle iki

ayrı özellikte ürün (alüminyum silindir ve gıda ürünü olarak incir) kullanılarak doğrulanmıştır. Tasarım çalışmasında, tasarlanan sistem geometrisinde geliştirilen matematiksel model sonuçları ve yine bu sistem geometrisi temelinde ürün sıcaklık değişimine bağlı olarak geliştirilen matematiksel model kullanılmıştır. Tasarlanan kızılötesi ısıtma isteminde hem sistem içinde bulunan hava sıcaklığındaki değişimler (bu kapsamda deneysel ve matematiksel olarak doğrulandığı şekilde sistem içi hava ortamında sıcaklık değişimi ile meydana gelen doğal konveksiyon etkileri ihmal edilmiştir) hem kızılötesi ısıtma sırasındaki radyasyonla meydana gelecek ısı transferi hem de ürün içerisinde kondüksiyonla gerçekleşen ısı iletimi geliştirilen matematiksel modelde kullanılmıştır.

- Kızılötesi sistemlerde gerçekleşen radyasyonla ısı transferi problemlerinde, kızılötesi ısı kaynağının yüzey sıcaklığı yanında sistem içindeki konumu - radyasyon kaynağının ürünü görüş açısı- da ürün sıcaklık değişiminde etkili olacaktır. Bu nedenle, gıda ürünlerinin sistem içi olası konumlarının etkisi de geliştirilecek olan matematiksel model kullanılarak incelenebilecek ve sistem içerisinde, endüstriyel bir proseste olduğu gibi, çok sayıda ürün olması durumunda ürün sıcaklık değişimine göre sistem tasarımı yapılabilecektir. Bu kapsamda, 2- ve 3-boyutlu modeller bölümünde sistem içerisinde farklı konumlarda bulunan kızılötesi enerji kaynaklarının aktif olması durumunda ürün ve sistem içi sıcaklık değişiminde meydana gelen değişimler de tez çalışması kapsamında gösterilmiştir.

- Böylece ısıl işlem sırasında ürün içi kondüksiyon, sistem içi konveksiyon ve radyasyon ısı transfer mekanizmalarının etkinlikleri belirlenerek sistem içi homojen sıcaklık ve ısı akısı dağılımı ve ürün yüzeyi homojen sıcaklık artışı kapsamında, etkin bir ürün yüzey dekontaminasyonu prosesi için sistem tasarımı açısından önemli çıktılar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

Afzal, T. M. and Abe, T. 1998. Diffusion in potato during far infrared radiation drying. Journal of food engineering, 37(4), 353-365.

Anonymous. 2018. Web Sitesi: https://www.comsol.com/blogs/solutions-linear-systems-equations-direct-iterative-solvers/ Erişim Tarihi: 22.10.2018.

Bernini, V., Dalzini, E., Lazzi, C., Bottari, B., Bisotti, S., Fontana, M. and Neviani, E. 2015. A multi-sampling approach to evaluate an infrared surface treatment for reducing Listeria monocytogenes contamination on whole Gorgonzola cheese rinds. Food control, 55, 75-81.

Bhat, R., Rai, R. V., & Karim, A. A. 2010. Mycotoxins in food and feed: present status and future concerns. Comprehensive reviews in food science and food safety, 9(1), 57-81.

Bircan, C., Barringer, S. A., Ulken, U. and Pehlivan, R. 2008. Aflatoxin levels in dried figs, nuts and paprika for export from Turkey. International Journal of Food Science and Technology. 43(8), 1492-1498.

Castell-Perez, M. E. and Moreira, R. G. 2004. Decontamination systems. Preharvest and Postharvest Food Safety: Contemporary Issues and Future Directions, 337-348.

Çengel, Y. A. 2003. Heat transfer: a practical approach, 2nd ed. McGraw-Hill Companies.

Çiftçi, H. 2013. Türkiye'de kuru incir ihracatı ve AB'ne ihraç edilen kuru incirlerde aflatoksin sorununun değerlendirilmesi: İzmir İli Örneği. Gıda Bilimi. http://www.gidabilimi.com/index.php/tr/makaleler-1/3070-kuru-incirlerde-aflatoksin-sorununun-degerlendirilmesi. Erişim Tarihi: 30-03-2015.

Erdoğdu, S. B. and Ekiz, H. İ. 2011. Effect of ultraviolet and far infrared radiation on microbial decontamination and quality of cumin seeds. Journal of food science, 76(5), M284-M292.

Erdoğdu, S. B. and Ekiz, H. İ. 2013. Far infrared and ultraviolet radiation as a combined method for surface pasteurization of black pepper seeds. Journal of food engineering, 116(2), 310-314.

Galindo, F. G., Toledo, R. T. and Sjöholm, I. 2005. Tissue damage in heated carrot slices. Comparing mild hot water blanching and infrared heating. Journal of food engineering, 67(4), 381-385.

Gençdağ, E., Görgüç, A. ve Yılmaz, F. M. 2019. Kuru İncirin İşlenmesi, Kalite Problemleri ve Gıda Endüstrisinin Geliştirdiği Yenilikçi Yöntemler. Akademik Gıda, 17(3), 378-388.

Giorni, P., Battilani, P., Pietri, A. and Magan, N. 2008. Effect of a_w and CO_2 level on *Aspergillus flavus* growth and aflatoxin production in high moisture maize post-harvest. International Journal of Food Microbiology, 122(1-2), 109-113.

Hamanaka, D., Norimura, N., Baba, N., Mano, K., Kakiuchi, M., Tanaka, F. and Uchino, T. 2011. Surface decontamination of fig fruit by combination of infrared radiation heating with ultraviolet irradiation. Food Control, 22(3-4), 375-380.

Hauge, S. J., Wahlgren, M., Røtterud, O. J. and Nesbakken, T. 2011. Hot water surface pasteurisation of lamb carcasses: Microbial effects and cost-benefit considerations. International journal of food microbiology, 146(1), 69-75.

Hou, H., Singh, R. K., Muriana, P. M. and Stadelman, W. J. 1996. Pasteurization of intact shell eggs. Food Microbiology, 13(2), 93-101.

Huang, L. 2004. Infrared surface pasteurization of Turkey frankfurters. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 5(3), 345-351.

Huang, L. and Sites, J. 2008. Elimination of Listeria monocytogenes on hotdogs by infrared surface treatment. Journal of food science, 73(1), M27-M31.

Hudson, R. D. 1969. Infrared system engineering (Vol. 1, p. 642). New York: Wiley-Interscience.

Jackson, L. S. and Al-Taher, F. 2008. Factors affecting mycotoxin production in fruits. In Mycotoxins in fruits and vegetables (pp. 75-104). Academic Press.

James, S. J. and Evans, J. A. 2006. Predicting the reduction in microbes on the surface of foods during surface pasteurisation—the 'BUGDEATH'project. Journal of food engineering, 76(1), 1-6.

Jun, S., Krishnamurthy, K., Irudayaraj, J. and Demirci, A. 2010. Fundamentals and theory of infrared radiation. Pan, Z., and Atungulu, GG, eds., Infrared heating for food and agricultural processing: Boca Raton, Florida, CRC Press, 1-9.

Kabak, B. ve Var, I. 2006. Ülkemiz açısından sorun olan mikotoksinler ve riskli gıda maddeleri. Türkiye, 9, 24-26.

Karaca, H. 2006. Kuru incirlerin aflatoksin, patulin, ergosterol içeriği ve farklı koşullarda aflatoksinlerin parçalanma düzeyleri. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Müh. Anabilim Dalı, Denizli, 103s.

Karbancıoğlu-Güler, F. and Heperkan, D. 2008. Natural occurrence of Ochratoxin A in dried figs. Analytica chimica acta, 617(1-2), 32-36.

Kaya, S. 1989. Yem ve besinlerdeki mikotoksinler: İnsan sağlığı açısından önemleri. Ankara Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi 36: 226-253.

Kim, S. Y., Jeong, S. M., Jo, S. C. and Lee, S. C. 2006. Application of far-infrared irradiation in the manufacturing process of green tea. Journal of agricultural and food chemistry, 54(26), 9943-9947.

Kozempel, M., Goldberg, N., Radewonuk, E.R. and Scullen, O.J. 2000. Commercial testing and optimization of the surface pasteurization process of chicken. Journal of Food Process Engineering. 23(5), 387-402.

Krishnamurthy, K., Jun, S., Irudayaraj, J. and Demirci, A. L. I. 2008. Efficacy of infrared heat treatment for inactivation of staphylococcus aureus in milk. Journal of Food Process Engineering, 31(6), 798-816.

Marquenie, D. 2002. Evaluation of physical techniques for surface disinfection of strawberry and sweet cherry.

Marquenie, D., Lammertyn, J., Geeraerd, A. H., Soontjens, C., Van Impe, J. F., Nicolaı, B. M. and Michiels, C. W. 2002. Inactivation of conidia of *Botrytis cinerea* and *Monilinia fructigena* using UV-C and heat treatment. International Journal of Food Microbiology, 74(1-2), 27-35.

Meyvacı, K.B. ve Şen, F. 2007. Magnezyum fosfit uygulamalarının kuru incir meyve kalitesine etkileri. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 44(1), 29-40.

Mujumdar, A. S. 2014. Handbook of industrial drying. (pp. 606-633). CRC press.

O'Riordan, M.J. and Wilkinson, M.G. 2008. A survey of the incidence and level of aflatoxin contamination in a range of imported spice preparations on the Irish retail market. Food Chemistry. 107:1429–35.

Özkoç, S.Ö. 2010. Kızılötesi ve kızılötesi-kombinasyon ısıtma teknolojilerinin gıda işleme uygulamalarında kullanımı. Gıda. 35(3), 211-218.

Pan, Z., Khir, R., Lewis, R., Godfrey, L., Salim, A. and Thompson, J. F. 2006. Simultaneous rough rice drying and disinfestation using infrared radiation. ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Pan, Z. and Atungulu, G. G. 2010. Infrared heating for food and agricultural processing. CRC Press.

Purnell, G. and James, C. 2012. Advances in food surface pasteurisation by thermal methods. In Microbial Decontamination in the Food Industry (pp. 241-273). Woodhead Publishing.

Ramaswamy, R., Krishnamurthy, K. and Jun, S. 2012. Microbial decontamination of food by infrared (IR) heating. In Microbial Decontamination in the Food Industry (pp. 450-471). Woodhead Publishing.

Ranjan, R., Irudayaraj, J. and Jun, S. 2002. Simulation of infrared drying process. Drying technology, 20(2), 363-379.

Rastogi, N. K. 2012. Recent trends and developments in infrared heating in food processing. Critical reviews in food science and nutrition, 52(9), 737-760.

Rastogi, N. K. 2015. Infrared heating of foods and its combination with electron beam processing. In Electron beam pasteurization and complementary food processing technologies (pp. 61-82). Woodhead Publishing.

Ratti, C. and Mujumdar, A. S. 2006. Infrared drying. In Handbook of industrial drying (pp. 448-463). CRC Press.

Rock, C., Yang, W., Goodrich-Schneider, R. and Feng, H. 2012. Conventional and alternative methods for tomato peeling. Food Engineering Reviews, 4(1), 1-15.

Sağdıç, O., Ekici, L. ve Yetim, H. 2008. Gıdaların muhafazasında yeni mikrobiyal inaktivasyon metotları. Türkiye, 10, 949-952.

Sakai, N. and Hanzawa, T. 1994. Applications and advances in far-infrared heating in Japan. Trends in Food Science & Technology, 5(11): 357-362.

Sakai, N., Morita, N., Qiu, P. and Hanzawa, T. 1995. 2-dimensional heat-transfer analysis of the thawing process of tuna by far-infrared radiation. Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology-NIPPON SHOKUHIN KAGAKU KOGAKU KAISHI, 42(7), 524-530.

Savas, K. and Basman, A. 2016. Infrared drying: a promising technique for bulgur production. Journal of Cereal Science, 68, 31-37.

Scheerlinck, N., Marquenie, D., Jancsók, P. T., Verboven, P., Moles, C. G., Banga, J. R. and Nicolaï, B. M. 2004. A model-based approach to develop periodic thermal treatments for surface decontamination of strawberries. Postharvest Biology and Technology, 34(1), 39-52.

Schuman, J. D., Sheldon, B. W., Vandepopuliere, J. M. and Ball Jr, H. R. 1997. Immersion heat treatments for inactivation of Salmonella enteritidis with intact eggs. Journal of applied microbiology, 83(4), 438-444.

Sheridan, P. and Shilton, N. 1999. Application of far infra-red radiation to cooking of meat products. Journal of Food Engineering, 41(3-4), 203-208.

Shyu, Y. S., Sung, W. C., Chang, M. H. and Hwang, J. Y. 2008. Effect of far-infrared oven on the qualities of bakery products. Journal of Culinary Science & Technology, 6(2-3), 105-118.

Skåra, T., Valdramidis, V. P., Rosnes, J. T., Noriega, E. and Van Impe, J. F. 2014. A novel model to assess the efficacy of steam surface pasteurization of cooked surimi gels inoculated with realistic levels of Listeria innocua. Food microbiology, 44, 64-70.

Skåra, T. and Rosnes, J. T. 2016. Emerging Methods and Principles in Food Contact Surface Decontamination/Prevention. In Innovation and Future Trends in Food Manufacturing and Supply Chain Technologies (pp. 151-172). Woodhead Publishing.

Solon, J. G. and Killeen, S. 2015. Decontamination and sterilization. Surgery (Oxford), 33(11), 572-578.

Şen, L. ve Nas, S. 2010. Kuru incir, üzüm ve kırmızıbiberlerde mikotoksin varlığı. Akademik Gıda, 8(3), 24-32.

Tanaka, F., Verboven, P., Scheerlinck, N., Morita, K., Iwasaki, K. and Nicolaï, B. 2007. Investigation of far infrared radiation heating as an alternative technique for surface decontamination of strawberry. Journal of Food Engineering, 79(2), 445-452.

Tanaka, F., Chatani, M., Kawashima, H., Hamanaka, D. and Uchino, T. 2012. CFD modeling of infrared Thermal Treatment of FIGS (*Ficus carica L.*). Journal of Food Process Engineering, 35(6), 821-828.

Trivittayasil, V., Tanaka, F. and Uchino, T. 2011. Investigation of deactivation of mold conidia by infrared heating in a model-based approach. Journal of food engineering, 104(4), 565-570.

Trivittayasil, V., Tanaka, F., Hamanaka, D. and Uchino, T. 2014. Prediction of surface temperature of figs during infrared heating and its effect on the quality. Biosystems engineering, 122, 16-22.

Turabi, E., Sumnu, G. and Sahin, S. 2008. Optimization of baking of rice cakes in infrared–microwave combination oven by response surface methodology. Food and Bioprocess Technology, 1(1), 64-73.

Uysal, N., Sumnu, G. and Sahin, S. 2009. Optimization of microwave–infrared roasting of hazelnut. Journal of Food Engineering, 90(2), 255-261.

Warriner, K. 2011. Surface contamination of Foods: Reduction. In encyclopedia of agricultural, food and biological engineering.

Weng, Z. J. 2006. Thermal processing of canned foods. Food Scıence and Technology-New York-Marcel Dekker, 150, 335.

Yamada, H. 2010. Investigation of factors affecting microbial sterilization effect by electromagnetic waves. M.Sc. Thesis, Kyushu University.

Yüncü, H. ve Kakaç, S. 1999. ‘Temel Isı Transferi’, Bilim Kitapevi, Ankara.

Zinedine, A., González-Osnaya, L., Soriano, J. M., Moltó, J. C., Idrissi, L. and Manes, J. 2007. Presence of aflatoxin M1 in pasteurized milk from Morocco. International Journal of Food Microbiology, 114(1), 25-29.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ayşe Hümeyra ERDAŞ

Doğum Yeri : Yenimahalle / ANKARA

Doğum Tarihi : 20/03/1990

Medeni Hali : Evli

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl):

Lise : Nermin-Mehmet ÇEKİÇ Anadolu Lisesi (2008)

Lisans : Gaziosmanpaşa Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü (2014)

Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı (Eylül 2014 - Ocak 2020)

Yayın (SCI):

Altuntas, A. H., Ketenoglu, O., Cetinbas, S., Erdogdu, F., & Tekin, A. 2018. Deacidification of Crude Hazelnut Oil Using Molecular Distillation–Multiobjective Optimization for Free Fatty Acids and Tocopherol. European journal of lipid science and technology, 120(4), 1700369.

Uluslararası Kongre Sunum:

Altuntas, H., Karatas, O., Uyar, R., Erdogdu, F. 2018. "Mathematical Modeling of Infrared Heating for Process Design," 13. International Conference of Food Physicists, Antalya, Turkey, 2018. Poster Sunumu.