İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRODALGANIN HACİM İÇERİSİNDE DAĞILIMININ SICAKLIK PROFİLİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Demet BÜYÜKKOYUNCU

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MİKRODALGANIN HACİM İÇERİSİNDE DAĞILIMININ SICAKLIK PROFİLİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Demet BÜYÜKKOYUNCU
503101104

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Isı Akışkan Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU

HAZİRAN 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 503101104 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Demet BÜYÜKKOYUNCU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"MİKRODALGANIN HACİM İÇERİSİNDE DAĞILIMININ SICAKLIK PROFİLİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU**.....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Lütfullah KUDDUSİ** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. A. Hasan HEPERKAN .....
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **2 Mayıs 2012**

Savunma Tarihi : **6 Haziran 2012**

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin pek çok noktasındaki sıcaklık değişimi deneysel ve analitik olarak incelenmiş; asıl olarak mikrodalganın ısıtılan hacim içerisindeki dağılımının, patatesin sıcaklık profiline etkisi deneysel ve teorik irdelenmiştir.

Bu yüksek lisans çalışmalarını yöneten, yönlendiren, değerli görüş ve eleştirileri ile tez çalışmalarımı destekleyen çok değerli danışman hocam Sn. Prof. Dr. Seyhan UYGUR ONBAŞIOĞLU'na teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yüksek lisans tez çalışmasının gerçekleşmesini sağlayan ve bunun için imkân ve olanaklarını sunarak bana destek olan Arçelik A.Ş. Araştırma ve Geliştirme Merkezi'ne, Sn. Dr. Cemil İNAN, Sn. Mak. Yük. Müh. Fatih ÖZKADI, Sn. Dr. Faruk BAYRAKTAR'a teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bu tez çalışmasını maddi olarak destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Çalışmanın her aşamasında bana gerekli desteklerini sunan, yüksek lisans çalışma hayatımda ve tez çalışmalarım boyunca değerli görüşleri ile bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman eksik etmeyen Sn. Dr. Levent AKDAĞ, Sn. Dr. Bekir ÖZYURT, Sn. Dr. S. Aslı KAYIHAN, Sn. Sezgi YIKILMAZÇINAR ve Sn. Mak. Yük. Müh. Ahmet Burak TOP'a çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalar sırasında verdikleri desteklerden ötürü başta Sn. Mehmet MARAŞLI olmak üzere, Sn. Barış ERDOĞAN, Sn. Nihat KARGI'ya ve Arçelik A.Ş. Ar-Ge Akışkanlar Dinamiği Ailesi teknisyenlerine teşekkür ederim.

Tez çalışmalarının sıkıntılı zamanlarını, beraber geçirdiğimiz keyifli anlar ve arkadaşlıklarıyla unutturan, bana her konuda destek olan başta çok değerli dostlarım; Bengül ASAR, Yeşim BOYLU ve Sinem AVCI olmak üzere Ar-Ge Termodinamik Teknoloji Ailesi ve Akışkanlar Dinamiği Teknoloji Ailesi yüksek lisans çalışma arkadaşlarıma tüm içtenliğimle teşekkür ederim.

Son olarak, tüm hayatım boyunca her daim yanımda olan, bugünlere gelmemde benden maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen çok kıymetli AİLEME en derin duygularımla teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Haziran 2012

Demet BÜYÜKKOYUNCU

Makina Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **iii**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **ix**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xi**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xiii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
2. MİKRODALGA ISITMA **3**
2.1 Mikrodalga Isıtmanın Temel Prensipleri 6
2.2 Gıdaların Mikrodalga İle Isıtılmasına Etki Eden Faktörler 8
2.3 Mikrodalga Isıtmanın Teorik Olarak İncelenmesi 11
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **19**
3.1 Mikrodalga Isıtmanın Modellenmesiyle İlgili Çalışmalar 19
3.2 Gıdaların Dielektrik Özellikleriyle İlgili Çalışmalar 33
4. DENEY SİSTEMİ **39**
4.1 Deney Düzeneğinin Tanıtılması 39
4.2 Deneyler 48
4.2.1 Mikrodalga ısıtma için güç çıkışı ve verim deneyleri 48
4.2.2 Mikrodalga ısıtma için homojenlik deneyleri 49
4.2.3 Kütle değişimi ve nem tayini deneyleri 52
4.2.4 Mikrodalga ısıtma için sıcaklık ölçüm deneyleri 57
4.3 Belirsizlik Analizi 64
5. ANALİTİK MODELLEME ÇALIŞMASI **67**
5.1 Modelleme Çalışmaları 67
5.1.1 Modelin kurulma aşaması 67
5.1.2 Isı ve kütle transferinin modellenmesi 83
5.2 Model Sonuçları 97
5.3 Modelin Doğrulanması 104
6. SONUÇLAR **119**
KAYNAKLAR **125**
ÖZGEÇMİŞ **129**

KISALTMALAR

FDTD **:** Finite Difference Time Domain (Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi)
FEM **:** Finite Element Method (Sonlu Eleman Yöntemi)
FKS **:** Fan Koruma Sacı
FVM **:** Finite Volume Method (Sonlu Hacim Yöntemi)
MC **:** Moisture Content (Nem İçeriği)
TS_EN **:** Türk Standardları Enstitüsü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : 23°C'deki meyve ve sebzelerin dielektrik özellikleri [6]. 10
Çizelge 3.1 : Sebze ve meyvelerin 2450 MHz frekansta sıcaklıkla değişen dielektrik kayıp faktörleri ε" için oluşturulan korelasyon için gerekli kat sayılar. 36
Çizelge 4.1 : Isıtılan hacim boyutları. 41
Çizelge 4.2 : Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim için güç çıkışının belirlenmesi ve verim deneyleri için elde edilen sonuçlar. 49
Çizelge 4.3 : Farklı mikrodalga ısıtma süreleri için 20 bardaktaki sudan alınan sıcaklıklar. 51
Çizelge 4.4 : Mikrodalga ısıtmada 900 W için kütle ve sıcaklık değişimleri. 53
Çizelge 4.5 : Mikrodalga ısıtmada 90 W için kütle ve sıcaklık değişimleri. 55
Çizelge 5.1 : Patates için literatürde bulunan özgül ısı değerleri. 68
Çizelge 5.2 : Patates için literatürde bulunan ısı iletim kat sayısı değerleri. 69
Çizelge 5.3 : Patates için literatürde bulunan yoğunluk değerleri. 70
Çizelge 5.4 : Patates için literatürde bulunan difüzyon kat sayısı değerleri. 71
Çizelge 5.5 : Patates için literatürde bulunan dielektrik özellikleri değerleri 74
Çizelge 5.6 : Mikrodalga ısıtmada 900 W deney sonuçları için dielektrik kayıp faktörü üzerinde nem ve sıcaklık etkisinin karşılaştırılması. 78
Çizelge 5.7 : Deneysel sonuçlardan elde edilen kütlesel akı değerinin kullanılması ile yapılan hesaplama sonucu ulaşılan h_m değerleri. 92
Çizelge 5.8 : Boyutsuz sayıların kullanılmasıyla elde edilen h_m değerleri. 93
Çizelge 5.9 : h_m değerlerinin karşılaştırılması. 93
Çizelge 5.10 : Modelde kullanılan parametrelerin özeti. 97
Çizelge 5.11 : Modelde kullanılan 7 ana hücre. 98
Çizelge 5.12 : Model 3 için seçilen; 5 yeni hücre ile oluşturan 7 hücre. 102
Çizelge 5.13 : Model 1'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar. 106
Çizelge 5.14 : Model 2'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar. 108
Çizelge 5.15 : Model 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar. 110
Çizelge 5.16 : Model 3'e ait yeni hücre grubu ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar. 112
Çizelge 5.17 : Model 1, 2 ve 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar. 113

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Dalga boyu, frekans ve bazı bilinen nesnelere kıyasla dalga boyları [3] ... 3
Şekil 2.2 : Mikrodalga ısıtmanın sistem bileşenleri [3] ... 5
Şekil 2.3 : Mikrodalga alan etkisiyle bir dipol bileşiğin hareketi [1] ... 6
Şekil 2.4 : Mikrodalga enerjinin dipolar ürüne etkisi [1] ... 7
Şekil 2.5 : Elektrik ve Manyetik alanların herhangi bir t anında yayınımı [7] ... 12
Şekil 3.1 : Maxwell Denklemlerinin belli bir ortamda FDTD kullanarak çözebilmek için kullanılan Yee birim hücresi. ... 21
Şekil 3.2 : t=20 s için mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin sırasıyla sıcaklık profili T (°C) ve ısı dağılımı Q (Wm^{-3}). ... 22
Şekil 3.3 : t=150 s için mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin sırasıyla sıcaklık profili T (°C) ve ısı dağılımı Q (Wm^{-3}). ... 22
Şekil 3.4 : Mikrodalga ortamda kartezyen koordinattaki (64x48x30) mm ölçülerindeki patatesin 60 s için modelde hesaplanan nem dağılımı (x-y düzlemi z=15 mm'de yerleştirilmiştir) ... 24
Şekil 3.5 : Mikrodalga ortamda kartezyen koordinattaki (64x48x30) mm ölçülerindeki patatesin 60 s için modelde hesaplanan sıcaklık dağılımı (x-y düzlemi z=15 mm'de yerleştirilmiştir) ... 25
Şekil 3.6 : Modelde hesaplan ve deneyden elde edilen sıcaklık sonuçlarının kartezyen koordinatta sırasıyla patatesin geometrik merkezi ve üst köşe noktası için karşılaştırılması. ... 25
Şekil 3.7 : %40 mikrodalga gücündeki ısıtmada patates püresinin modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (♦) 0.5 cm için deneysel sonuçlar, (▲) 1.5 cm için deneysel sonuçlar, (∗) 2.5 cm için deneysel sonuçlar, (-) model sonuçları. ... 28
Şekil 3.8 : %20 infrared ısıtma gücüyle desteklenmiş %30 mikrodalga gücündeki ısıtmada patates püresinin modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (♦) 0.5 cm için deneysel sonuçlar, (▲) 1.5 cm için deneysel sonuçlar, (∗) 2.5 cm için deneysel sonuçlar, (-) model sonuçları. ... 28
Şekil 3.9 : Farklı infrared ısıtma güçleriyle desteklenmiş %40 mikrodalga gücündeki ısıtmada patates püresinin 1.5 cm derinlik için modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (◊) %0 P_{inf} için deneysel sonuçlar, (□) %10 P_{inf} için deneysel sonuçlar, (Δ) %20 P_{inf} için deneysel sonuçlar, (∗) %30 P_{inf} için deneysel sonuçlar,(-) model sonuçları. ... 28
Şekil 3.10 : %20 infrared ısıtma gücüyle desteklenmiş farklı mikrodalga güçlerindeki ısıtmada patates püresinin, 1.5 cm derinlik için modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (◊) %30 P_{mw} için deneysel sonuçlar, (□) %40 P_{mw} için deneysel sonuçlar, (Δ) %50 P_{mw} için deneysel sonuçlar, (-) model sonuçları. ... 29

Şekil 3.11 : 2.5 cm yarı çapında (r), 4 cm uzunluğundaki (Z) silindirik kesite sahip patates için absorblanan mikrodalga güç değişimi (Q_{gen}). 29
Şekil 3.12 : Sırasıyla ısıtılan hacim (0.61 m x 0.375 m x 0.235 m), dalga kılavuzunun şeması ve elektromanyetik simülasyon için ANSYS programında oluşturulan sonlu eleman ağları. 30
Şekil 3.13 : Patates ve dalga kılavuzundan oluşan hacimde güç kaybının dağılımı. . 31
Şekil 3.14 : Jet impingement (sıcak hava ile ısıtma) destekli mikrodalga ısıtma model akış şeması. 31
Şekil 3.15 : Deneysel çalışmalar ve modelden elde edilen sıcaklık sonuçlarının yüzeye yakın bölgede sırasıyla mikrodalga ısıtma, jet impingement ısıtma ve jet impingement destekli mikrodalga ısıtma için karşılaştırılması. 32
Şekil 3.16 : Mikrodalga ortamda iki farklı güç için pişirilen ekmeğin ağırlık kaybı. (♦) %50; (■) %100. 33
Şekil 3.17 : Kırmızı elmanın dielektrik özelliklerinin, gıdanın nem içeriğine, sıcaklığına ve frekansa bağlı olarak değişimi. 34
Şekil 3.18 : 915 ve 2450 MHz frekansta, 22 ve 60 °C'deki kırmızı elmaların değişen nem içeriği ile dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp faktörü ε'' arasındaki ilişki. 35
Şekil 3.19 : Belirli nem miktarlarındaki sebze ve meyvelerin , 2450 MHz frekansta sıcaklıkla değişen dielektrik kayıp faktörleri ε'' 35
Şekil 4.1 : Deney sistemi bileşenleri ve genel görünüşü. 39
Şekil 4.2 : Isıtılan hacimin elemanlarının görünüşü. 40
Şekil 4.3 : Sırasıyla geleneksel ısıtılan hacim ile mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacimin fan koruma sacları. 41
Şekil 4.4 : 50x50x20 mm ölçülerinde patates ve metal kalıp. 42
Şekil 4.5 : Patates kütlesinin ölçümü. 43
Şekil 4.6 : Sırasıyla 4 kanallı sıcaklık ölçerin önden ve arkadan görünüşü. 43
Şekil 4.7 : Fiber optik prob. 44
Şekil 4.8 : Deneysel çalışmalarda kullanılan fiber optik probun yapısı [20]. 44
Şekil 4.9 : Deneysel çalışmalarda kullanılan fiber optik probun kısımları [20]. 45
Şekil 4.10 : Patates üzerinde sıcaklık ölçümü yapılacak hücreler. 45
Şekil 4.11 : Deney düzeneği şematik gösterimi. 46
Şekil 4.12 : Sırasıyla patateslerin ısıtma öncesi ve sonrası görünüşü. 46
Şekil 4.13 : Sıcaklık değerleri. 47
Şekil 4.14 : Elektromanyetik alan ölçer. 47
Şekil 4.15 : Nem tayin cihazı. 47
Şekil 4.16 : Mikrodalga ısıtma homojenlik deneyi için deney düzeneği. 50
Şekil 4.17 : Sırasıyla 1 ve 3 dk süre için homojenlik deneyi sıcaklık dağılımları. 52
Şekil 4.18 : Mikrodalga ısıtmada 900 W için kütle kaybı değişiminin grafiği. 53
Şekil 4.19 : Mikrodalga ısıtmada 900 W- 1 dk için kütle kaybı değişimin grafiği. .. 54
Şekil 4.20 : Mikrodalga ısıtmada 90 W için kütle kaybı değişiminin grafiği. 55
Şekil 4.21 : 900 W gücünde 5 dk mikrodalga ısıtma sonrası hücrelerin nem tayini. 56
Şekil 4.22 : Patatesin şematik gösterimi üzerinde örnek hücrelerin belirtilmesi. 58
Şekil 4.23 : Deneysel Çalışma 1 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri. 58
Şekil 4.24 : Deneysel Çalışma 1 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği. 59
Şekil 4.25 : Deneysel Çalışma 2 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri. 59
Şekil 4.26 : Deneysel Çalışma 2 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği. 60
Şekil 4.27 : Deneysel Çalışma 3 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri. 60
Şekil 4.28 : Deneysel Çalışma 3 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği. 61

Şekil 4.29 : Deneysel Çalışma 1, 2 ve 3. 62
Şekil 4.30 : Deneysel Çalışma 4 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri..... 63
Şekil 4.31 : Deneysel Çalışma 4 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği. 64
Şekil 5.1 : Patates model geometrisi. 67
Şekil 5.2 : Patatesin sıcaklığa bağlı dielektrik kayıp faktörün belirtilmesi. 75
Şekil 5.3 : 23°C'deki patatesin frekansa bağlı dielektrik özellikleri 76
Şekil 5.4 : 25°C ve 3 GHz frekanstaki patatesin dielektrik kayıp faktörünün nem içeriğine bağlı değişim grafiği ve 23°C ve 2.45 GHz frekanstaki 2 değeri. 76
Şekil 5.5 : 25°C ve 3 GHz frekanstaki patatesin dielektrik kayıp faktörünün nem içeriğine göre değişim grafiği ve oluşturulan korelasyon 77
Şekil 5.6 : Penetrasyon derinliği 1 cm olan madde için, madde yüzeyinden itibaren artan derinliğe bağlı olarak üretilen ısı akısının logaritmik azalışı [6]. . 79
Şekil 5.7 : Çeşitli gıda grupları için penetrasyon derinlikleri [6]. 80
Şekil 5.8 : 2.45 GHz frekansta gıda yüzeyi için elektrik alan şiddeti belirlenmesi . 81
Şekil 5.9 : CST MICROWAVE STUDIO analiz programı ile belirlenen; mikrodalga ısıtma özelliğine sahip hacim için elektrik alan şiddetinin, sırasıyla karıştırıcı açısının 22.5^{o} ve 292.5^{o} değerleri için analizi [34].. 82
Şekil 5.10 : Gıdanın yüzeylerine ait ısıya dönüşen kayıp mikrodalga gücü [13]. 83
Şekil 5.11 : Suyun buharlaşma entalpisinin (h_{fg}) sıcaklıkla değişim grafiği. 85
Şekil 5.12 : Patates boyutları. 86
Şekil 5.13 : MARC programında hazırlanan katı model 89
Şekil 5.14 : Model akışının özeti. 95
Şekil 5.15 : Model algoritması. 96
Şekil 5.16 : 13., 53. ve 65. hücrelerin model geometrisi üzerinde belirtilmesi. 99
Şekil 5.17 : Model 1 için elde edilen sıcaklık değerleri. 99
Şekil 5.18 : Model 2'ye ait yüzeylerdeki mikrodalga dağılımı. 100
Şekil 5.19 : Model 2 için elde edilen sıcaklık değerleri. 101
Şekil 5.20 : Model 3'e ait yüzeylerdeki mikrodalga dağılımı. 101
Şekil 5.21 : Model 3 için elde edilen sıcaklık değerleri. 102
Şekil 5.22 : 11. ve 15. hücrelerin model geometrisi üzerinde belirtilmesi. 103
Şekil 5.23 : Model 3'e ait yeni hücre grubu için elde edilen sıcaklık değerleri. 103
Şekil 5.24 : Model 1'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması. 105
Şekil 5.25 : Model 2'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması. 107
Şekil 5.26 : Model 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması. 109
Şekil 5.27 : Model 3'e ait yeni hücre grubu ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması. 111

SEMBOL LİSTESİ

A : Yüzey alanı
a, b, c : Kat sayılar
$\vec{B}$: Manyetik akı yoğunluğu
C_p : Maddenin özgül ısısı
$C_{p_{pat}}$: Patatesin özgül ısısı
D : Patates içinde su buharının difüzyon kat sayısı
$\vec{D}$: Elektrik akı yoğunluğu
D_0 : Arrhenius faktörü
D_{AB} : Difüzyon kat sayısı
D_{SH} : Su buharının hava içindeki difüzyon kat sayısı
d_p : Penetrasyon derinliği
E : Elektrik alan şiddeti
$\vec{E}^*$: $\vec{E}$ elektrik alan şiddetinin eşleniği
E_a : Nem yayılımının aktivasyon enerjisi
$F_{i,j}$: Görüş faktörü
f : Frekans
g : Yer çekimi ivmesi
Gr : Grashof sayısı
H : Manyetik alan şiddeti
$\vec{H}^*$: $\vec{H}$ manyetik alan şiddetinin eşleniği
h : Taşınımla ısı geçiş kat sayısı
h_{fg} : Suyun buharlaşma entalpisi
h_m : Taşınımla kütle geçiş kat sayısı
h_L : L uzunluğunda taşınımla ısı geçiş kat sayısı
I : Işınım şiddeti
İ : Birim zamanda birim hacimdeki kütle değeri
$\vec{J_s}$: Kaynak tarafından sağlanan elektrik akımı
j_A : Kütlesel akı
k : Isı iletim kat sayısı
k_{pat} : Patatesin ısı iletim kat sayısı
L : Geometriye ait karakteristik uzunluk
M : Kütle
m' : Kuru kütledeki nem içeriği
m_1 : Gıdanın ilk kütlesi
m_2 : Gıdanın ısıtıldıktan sonraki kütlesi
m_g : Havada bulunabilecek en çok su buharı miktarı
m_o : Başlangıç kütlesi
m_v : Havadaki su buharının miktarı
Nu_L : Nusselt sayısı
$\vec{n}$: Yüzeydeki birim, normal vektörü
$\dot{n}_A'''$: Birim hacimde, birim zamanda A bileşeninin üretimi

$\dot{n}_A'''$: Deneysel çalışmalardan elde edilen birim zamanda birim hacimdeki kütle değeri
P : Hesaplanan mikrodalga çıkış gücü
P_{av} : Ortalama ısıya dönüşen mikrodalga gücü
P_g : Havada bulunabilecek en çok su buharının basıncı
Pr : Prandtl sayısı
P_v : Havadaki su buharının basıncı
p : Kısmi basınç
$Q_{gen,\ mw}$: Mikrodalga ısıtmanın enerjisinden kaynaklanan iç ısı üretimi
Q_{MD} : Isı kaynağı terimi (ısıya dönüşen mikrodalga gücü)
R : İdeal gaz sabiti
R : Sistemde ölçülmesi gereken büyüklük
Ra_L : Rayleigh sayısı
Sc : Schmidt sayısı
Sh : Sherwood sayısı
t : Isıtma süresi
T : Sıcaklık
T_o : Başlangıç sıcaklığı
T_S : Patates yüzey sıcaklığı
T_∞ : Isıtılan hacim içindeki hava sıcaklığı
u : Hız
V : Hacim
$W_{giriş}$: Enerji girişi
$w_{GÜÇ}$: Mikrodalga ortamda ısıya dönüşen güç için toplam belirsizlik
w_R : R büyüklüğünün toplam belirsizliği
w_T : Sıcaklık büyüklüğünün toplam belirsizliği
w_m : Kütle büyüklüğünün toplam belirsizliği
X : Kütle kesri
X' : Yüzde olarak nem içeriği
X_{nem} : Patatesin nem içeriği
$X_{nem,o}$: Başlangıç nem içeriği
X_W : Nem kütle kesri
x_n : R büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler
Z : Uzunluk
α : Etki azalma faktörü (attenuation factor)
α_{yay} : Akışkanın ısıl yayılım kat sayısı
β : Isıl genleşme kat sayısı
ε' : Dielektrik sabiti
ε'' : Dielektrik kayıp faktörü
ε_0 : Boşluğun dielektrik sabiti
$\varepsilon_{ışınım}$: Yüzey emisivitesi
ε_r' : Maddenin dielektrik sabiti
ε_r'' : Maddenin dielektrik kayıp faktörü
$\varepsilon''_{(nem)}$: Nem içeriğine bağlı dielektrik kayıp faktörü
$\varepsilon''_{(sıcaklık)}$: Sıcaklığa bağlı dielektrik kayıp faktörü
ϵ : Gıdanın gözenekliliği
λ_0 : Boşluğun dalga boyu
μ_r' : Geçirgenlik
μ_r'' : Manyetik kayıp faktörü

η : Isıtılan hacimin verimi
ν : Akışkanın viskozitesi
ρ : Maddenin yoğunluğu
ρ : Su buharının yoğunluğu
$\vec{\rho}$: Poynting Vektörü
ρ_A : A bileşenin yoğunluğu
$\rho_{gıda}$: Gıdanın yığın yoğunluğu
$\rho_{katı}$: Gıda içindeki katı kısmın yoğunluğu
ρ_{pat} : Patatesin yoğunluğu
ρ_s : Yüzeydeki su buharının yoğunluğu
ρ_{su} : Suyun yoğunluğu
$\rho_{yük}$: Yük yoğunluğu
ρ_∞ : Kavite içindeki havanın yoğunluğu
$\emptyset_\infty$: Bağıl nem
σ : İletkenlik katsayısı
$\sigma_{ışınım}$: Stefan-Boltzman sabiti
ω : Açısal frekans

MİKRODALGANIN HACİM İÇERİSİNDE DAĞILIMININ SICAKLIK PROFİLİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Mikrodalga ısıtma, mikrodalga enerjinin sağladığı avantajlar sayesinde hızla ve geniş bir sahada gelişmektedir. Malzemelerin dielektrik kayıplarının kullanılarak, mikrodalga enerjisi ile ısıtılması, geleneksel ısıtma işlemlerine göre birçok avantaj sunmaktadır. Mikrodalga ile malzemelerin ısıtılmasında, mikrodalgalar malzemenin iç kısımlarına kadar ilerledikleri için daha hacimsel bir ısıtma sağlanmaktadır. Bu da sıcaklık gradyanının çok küçük olmasına neden olup, ısı transferinin hızlı ve ısıtma süresinin kısa olmasını sağlamaktadır.

Mikrodalga ısıtma sürecinde, malzeme içindeki sıcaklık dağılımı; güç kaynağının ürettiği elektrik alan şiddeti değerinin belirlenip, ısıya dönüşen mikrodalga güç değerinin hesaplanması ve bu değerin, ısı transfer denklemine dahil edilip, denklemin çözümü yapılarak elde edilmektedir. Isı transferi denkleminin çözümü için farklı sayısal teknikler bulunmaktadır. Bu tezde sonlu hacim yöntemi zamana bağlı olarak uygulanmıştır. Ayrıca ısıtılan hacim içerisindeki mikrodalga dağılımının, sıcaklık profiline olan etkisi incelenmektedir. Mikrodalganın, ısıtılan hacim içerisindeki dağılımı analiz programlarıyla ayrıntılı olarak belirleneceği gibi, bu tez kapsamında olduğu gibi ısıtılan maddenin yüzeyleri için basit oranlar verilerek de belirlenebilmektedir. Bu yüksek lisans tez çalışması, mikrodalga ortamda ısıl modelleme çalışması için başlangıç olup, bu konuda yapılan ilk çalışma olma özelliğine sahiptir.

Tezin ikinci bölümünde, mikrodalga ısıtma hakkında genel bilgi verilip, mikrodalga ısıtmanın temel prensipleri ve teorik olarak incelenmesi sunulmaktadır. Mikrodalga ısıtmanın teorik olarak incelenmesinde; elektromanyetik dalga büyüklükleri arasındaki bağıntıları gösteren Maxwell Denklemleri incelenmektedir.

Üçüncü bölümünde, mikrodalga ısıtmanın modellenmesi ve gıdaların dielektrik özelliklerinin açıklanmasına yönelik literatür taraması sunulmaktadır. Bu araştırmada önemli görülen noktalar şunlardır; ısıya dönüşen kayıp mikrodalga gücü, enerji korunumu denklemlerinde kaynak terimi olarak kullanılıp, kütle transferi hesabı üzerinde genellikle durulmayıp yada deneysel çalışmalardan yararlanılarak hesaplanıp, ısı transferi denklemlerinin çözümüyle sıcaklığın zamana göre değişimi belirlenmiştir. Sıcaklık değerleri genelde 1 yada 2 boyut için belirlenip, gıda ile çalışmanın, mikrodalga ortamda çalışmanın ve fiber optik problarla çalışmanın zorluğundan dolayı; sıcaklık ölçümleri belirli birkaç gıdanın belirli noktaları için yapılmıştır. Ayrıca, gıdaların dielektrik özelliklerinin neme, sıcaklığa ve frekansa bağlı olan değişimleri için bir genellemenin yapılamayacağı sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, mikrodalga ortamda ısıtılan gıdanın, ısıtma süresince sıcaklığını belirleyebilmek için kullanılan sistem ve deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm elemanları ile mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin farklı noktaları için elde edilen zamana bağlı sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Mikrodalga ortamda sıcaklık ölçümü yapabilmek için temin edilen fiber optik probların yapısı ayrıntılı olarak

sunulmaktadır. Deneysel çalışmalarda amaç mikrodalga ısıtmada sıcaklık ölçümü olup, bu deneylerin öncesinde hem kurulacak modele hem de sıcaklık ölçüm deneylerine hazırlık olması amacıyla mikrodalga ısıtma için güç çıkışı ve verim deneyleri, mikrodalga ısıtma için ısıtılan hacim içinde homojenlik deneyleri, kütle değişimi ve nem tayini deneyleri de yapılmıştır. Mikrodalga ortamda yapılan sıcaklık ölçümü sonuçları; 50 s'lik, geçici rejim süresi için sunulmaktadır.

Beşinci bölümde, mikrodalga ortamda ısıtılan gıdaya ait ısıl modelleme için kurulan yarı analitik modelin ayrıntıları sunulmaktadır. Modelde kütle transferi sınır şartı deneysel çalışmalardan elde edilmekte olup, kavite içindeki farklı mikrodalga dağılımlarında patatesin farklı noktalarına ait, elde edilen sıcaklık değerleri için model sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Model şartları deneysel sonuçlarla eş alınmıştır.

Son bölümde elde edilen sonuçların özeti ile öneriler sunulmuştur. Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip hacim içerisinde homojen bir dağılım olmadığı ve gıdanın her yüzeyinin farklı mikrodalga etkisi altında olduğu elde edilen sonuçlarla desteklenmiştir.

INVESTIGATION OF THE MICROWAVE DISTRIBUTION IN THE VOLUME ON THE TEMPERATURE PROFILE

SUMMARY

Microwave heating is an industrial process technique which was originally conceived about seventy years ago. Microwave heating of food has existed since 1949, and almost all household in the United States own a domestic microwave oven. In recent years, there has been a lack of growth in the development of microwave food products and processes. Currently, over 80% of American families are using microwave ovens. The popularity of microwaveable foods are increasing in the market. However, there are problems related with the use of the microwave energy such as unsatisfactory product quality – nonuniform temperature distribution, bad texture in the end product and unacceptable flavor development. These problems are based on the lack of sufficient understanding of simultaneous heat transfer, mass transfer, chemical reaction during microwave heating.

Compared with conventional heating, heat transfer is typically more difficult to study due to the complex interaction of the microwaves with the cavity and the food. This makes generalizations difficult. The two key issues in microwave heating of food are: the magnitude of the energy deposited by the microwave and the uniformity of the energy deposition. The magnitude and uniformity are affected by both food and oven.

Microwave heating using the dielectric loss of materials offers more advantages than conventional heating. Microwaves occupy the portion of the electromagnetic spectrum between 300 MHz and 30 GHz. Microwaves penetrate inside the materials, providing more volumetric heating. Because of the more volumetric heating, the temperature gradient is very small. In addition, heat transfer gets faster and the heating time gets shorter. Microwave processing involves complex interactions between a wide-ranged disciplines; such as electromagnetics, dielectric properties, heat transfer, moisture transfer, solid mechanics, fluid flow, food chemistry, food microbiology and packaging.

The characteristics of microwave heating compare to those of conventional heating as follows: It is quick. The rates of heating are much higher than in conventional heating. It is generally more uniform than conventional heating. It is selective; moist areas heat more than the dry areas. Such selectivity is absent in conventional heating. Unlike conventional heating, significant internal evaporation inside the microwave-heated materials leads to additional mechanisms of moisture transport that enhance moisture loss during heating. It can be turned on or off instantly, unlike conventional heating.

The characteristic of microwave heating can be beneficial or detrimental, depending on the application. For example, the selective heating of microwaves is extremely useful when the wet interior areas of a material need to be heated; they heat moist areas faster than the drier areas, driving out the moisture. On the other hand, when a

food with a crispy surface is reheated, the wet interior areas are heated more by the microwaves and too much moisture is transported to the surface, making the food soggy. The volumetric and fundamentally nonuniform heating of microwaves is dependent on many food and oven characteristics.

The electrical properties of materials known as dielectric properties are of critical importance in understanding the interaction of microwave electromagnetic energy with those materials. These properties, along with thermal and other physical properties and the characteristics of the microwave electromagnetic fields determine the absorption of microwave energy and consequent heating behavior of food materials in microwave heating and processing applications.

The temperature distribution within the material is obtained by solving the heat transfer equation with the electric field as the power source when microwave heating is used. There are different techniques to solve the heat transfer equation. In this thesis the time dependent finite volume method (FVM) is used to solve the heat transfer equation. The main objective of this study is to develop a three-dimensional FVM to simulate coupled heat and mass transfer in microwave heating of food material. Experimental time-dependent temperature results for slab-shaped potato specimens are obtained to verify the FVM. In addition, the effects microwave distribution in the volume on the temperature profile is investigated. The reason for this investigation is that the temperature distribution inside food heated with microwaves is determined by both the thermal properties of the food and the distribution of the absorbed microwave energy. The microwave distribution in this study is determined without the use of a commercial solver. Instead, simple rates are used. This study which is a first step for the modeling of microwave heating has significant assumptions about mass transfer. A mass transfer experiment is conducted in this study to obtain the surface mass flux. Mass losses of the sample at different temperature levels are collected. It is found that surface mass flux is a function of time. The resulting correlation is given in an equation.

General information about the microwave heating is given and microwave heating is described theoretically in the second part of this thesis. This part focuses on the nature of the electromagnetic fields inside a microwave volume and their mathematical descriptions as defined by Maxwell's Equations.

At the third section, general literature review is given for modelling of microwave heating and dielectric properties of food on microwave heating. First group of studies have modeled microwave heating by solving the heat and mass transfer equations and assuming a source term for implementing microwave heating. Dielectric properties of food are investigated on microwave heating, after numerical techniques for the microwave heating of food. The heating efficiency in a microwave volume is determined by dielectric properties in addition to thermal properties of foods. Dielectric properties that determine the microwave absorption in food are introduced. Depending on the dielectric properties of food, heat is generated inside the food- this leading to thermal diffusion and moisture transfer.

The systems used to measure the microwave volume, its working principles and experimental time-dependent temperature results for 50 second - temporary regime are presented in the fourth chapter. The new system, in which the maximum number of channels for temperature measurement is limited to four fiber optic probes, is explained in detail.

Fiber optic (glass) is a method of carrying information, such as copper wire. But unlike copper wire, fibers carry light (photons) instead of electricity (electrons). Some advantages of fiber optic are: immunity to electromagnetic fields, all dielectric material probe construction, robust, flexible, the ability to install chemically resistant probes in harsh environments, true intrinsic safety in explosive environments, minimal thermal shunting, relative ease of installation. Furthermore, efficiency and distribution experiments for microwave volume and mass transfer experiments are presented.

In the fifth section, a semi-analytical model is presented where microwave heating is modeled with a VISUAL BASIC program. Model results obtained for three different microwave distributions are compared with the experimental results. Model operating conditions are the same with the experimental conditions.

The final section offers suggestions with a summary of the results obtained. It is shown in the results of the model and experiments that there is nonuniform microwave distribution.

1. GİRİŞ

Mikrodalga enerjisinin, dielektrik kayıplarla ısıya dönüşmesi uygulama olarak endüstride kurutma, pişirme, sinterleme olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca bilimsel çalışmalarda da en çok çalışılan konulardan biridir. Kısa etki zamanına sahip olması ve malzemeyi içten ısıtmaya başlaması sebebiyle endüstride, ısıl işlemlerde geleneksel ısıtma yöntemlerinin yerini mikrodalga enerjisi almaktadır. Mikrodalga enerjisinin endüstride ısıtma olarak kullanılması 1950'lerden beri geliştirilen bir çalışmadır.

Amerika Birleşik Devletlerinde yılda yaklaşık 10 milyon adet olan mikrodalga fırın satış sayısı, Avrupa'da da bu sayıya oldukça yakındır [1]. Bu yüksek satış rakamları, mikrodalga ısıtmanın günümüzde ne kadar çok yaygınlaştığının bir göstergesidir. Mikrodalga uygulamalarının ilk denemelerinin yapıldığı 1921 yılından günümüze kadar gelişimi oldukça uzun zaman almıştır. İlk sürekli magnetron, 2. Dünya savaşında İngiliz ordusu tarafından radar sisteminde kullanılmak üzere Randall ve Boot tarafından geliştirilmiştir. Raytheon Şirketi, Amerika Birleşik Devletlerinde magnetron üretimi için patent almış ve 1945 yılında yumurtanın ve mısırın mikrodalga ısıtma sırasında patladığı tespit edilmiştir. Aynı yılda (1945) aldığı patent ile ilk defa "mikrodalga fırın" ismini kullanmıştır. 1960'lı yıllarda mikrodalga fırın sisteminin geliştirilmesi ve üretim maliyetinin düşmesi sonucu sistem ticari olarak üretilmiş ve beyaz eşya olarak satışa çıkarılmıştır [1].

Malzemelerin dielektrik kayıplarını kullanarak, mikrodalga enerjisi ile ısıtılması, klasik ısıtma işlemlerine göre birçok avantaj sunmaktadır. Mikrodalga ile malzemelerin ısıtılmasında, mikrodalgalar malzemenin iç kısımlarına kadar ilerledikleri için daha hacimsel bir ısıtma sağlanmaktadır. Bu da sıcaklık gradyanının çok küçük olmasına neden olup, ısı transferinin hızlı ve ısıtma süresinin kısa olmasını sağlamaktadır.

Maxwell denklemlerinin belirli bir geometriye uygulanmasıyla elektromanyetik alanların elde edilmesi, o geometriye ait elekromanyetik analizin yapılması anlamını

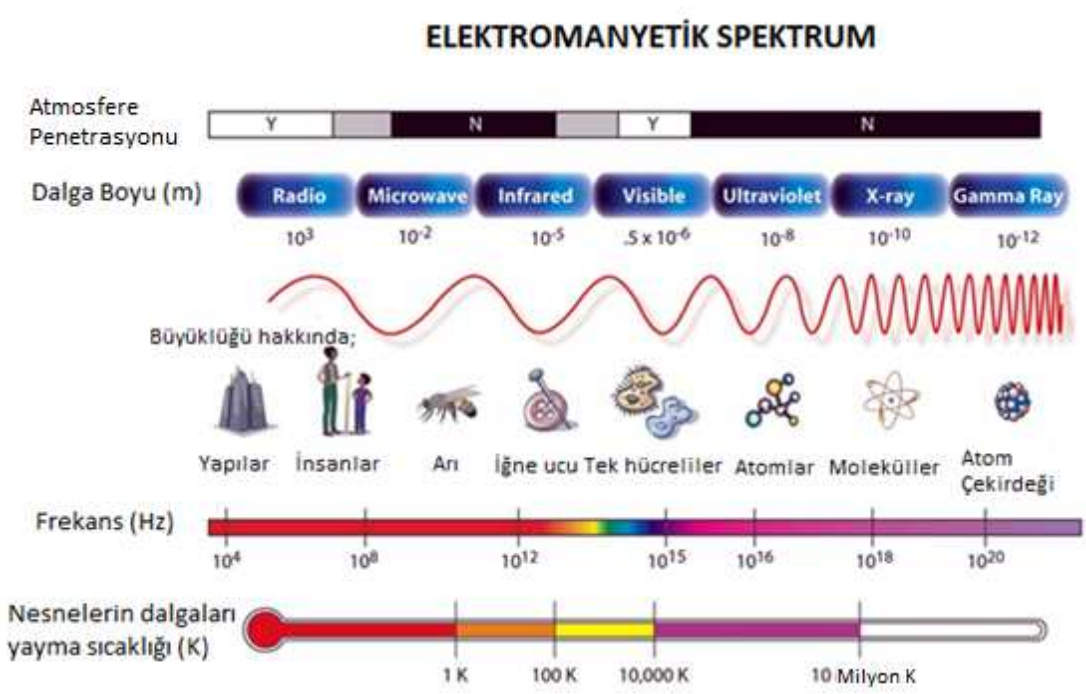
taşımaktadır. Eğer fiziksel geometri yeterince basit ise Maxwell denklemlerin analitik çözümü ile elektromanyetik analizin yapılması mümkündür.

Tez çalışması kapsamında, mikrodalga ısıtma modellenip; ısıtılan hacim içerisindeki farklı mikrodalga dağılımlarının gıdaya ait sıcaklık profiline etkisi incelenmektedir.

Tezin ikinci bölümünde, mikrodalga ısıtma hakkında genel bilgi verilip, mikrodalga ısıtmanın temel prensipleri ve teorik olarak incelenmesi sunulmaktadır. Üçüncü bölümünde, mikrodalga ısıtmanın modellenmesi ve gıdaların dielektrik özelliklerinin açıklanmasına yönelik literatür taraması sunulmaktadır. Dördüncü bölümde, mikrodalga ortamda ısıtılan gıdanın, ısıtma süresince sıcaklığını belirleyebilmek için kullanılan sistem ve deneysel çalışmalarda kullanılan ölçüm elemanları ile mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin farklı noktaları için elde edilen zamana bağlı sıcaklık değerleri gösterilmektedir. Beşinci bölümde, mikrodalga ortamda ısıtılan gıdaya ait ısıl modelleme için kurulan yarı analitik modelin ayrıntıları sunulmaktadır. Modelde kütle transferi sınır şartı deneysel çalışmalardan elde edilmekte olup, kavite içindeki farklı mikrodalga dağılımlarında patatesin farklı noktalarına ait elde edilen sıcaklık değerleri için model sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Son bölümde bu sonuçlar yorumlanıp, buna göre öneriler sunulmaktadır.

2. MİKRODALGA ISITMA

Mikrodalga teknikleri ve uygulamaları, askeri ekipmanların üretim ve dizaynı üzerine çabaların yoğun olduğu 2. Dünya Savaşı sırasında gelişmiştir [1]. Gıda sanayi açısından mikrodalga teknolojisindeki en önemli gelişme mikrodalga ısıtma uygulamalarıdır. "Mikrodalga" kelimesi, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi elektromanyetik spektrumda dalga boyunun 1 metreden kısa olduğu frekansları tanımlar. Buna göre mikrodalgalar elektromanyetik spektrumun bir parçası olup, 0.3 ve 300 GHz arasındaki frekanslarına karşılık gelen milimetrik (0.01 m) ve radyo dalgaları bölgesine düşmektedir [1]. Genel olarak ev tipi mikrodalga ısıtmalarda 2.45 GHz frekansı, endüstriyel proseslerde 2.45 GHz ya da 915 MHz kullanılmaktadır [2].



Şekil 2.1 : Dalga boyu, frekans ve bazı bilinen nesnelere kıyasla dalga boyları [3].

Mikrodalgalar, dalga ve parçacık özelliğine sahiptirler. Elektromanyetik dalgalar foton adı verilen enerji birimleri halinde emilmektedir [1]. Bir fotonun taşıdığı enerji, yayılmanın dalga boyu ve frekansına bağlıdır. Mikrodalgalar ışık dalgaları gibi hareket ederek, metallerden yansırlar, bazı dielektrik materyaller tarafından absorbe

edilir ve bazı dielektrik materyallerden önemli bir absorbsiyon etkisinde kalmadan geçebilirler.

Mikrodalgalar günümüz gıda sektöründe pişirme, ısıtma, dondurulmuş gıdaların çözündürülmesinde, ön pişirme, paketli gıdaların pastörizasyonu ve unlu mamüllerin kurutulması vb. gibi kullanım alanlarına da sahiptirler. Mikrodalga gıda işlemesi hızlı ve seçici ısıtma, yüksek enerji verimliliği, yerden kazanç, etkin proses kontrol ve yüksek besin kalitesi gibi bazı avantajlarının yanı sıra, tekdüze olmayan ısıtma, istenmeyen renk ve aroma kalitesi, nem kaybı ve doku kalitesindeki kayıplar gibi bazı olumsuz yönlere sahiptir.

Bu problemlerin ortadan kaldırılması amacıyla yeni gıda formülasyonları geliştirilmiş ve mikrodalga gıda prosesleri modellenmiştir. Bunun yanı sıra, son yıllarda mikrodalga fırınların dizaynı ve proses kontrolü geliştirilerek, diğer ısıtma metotlarıyla birlikte kullanılması konusunda çalışmalar yapılmış ve daha kısa sürede daha kaliteli gıdalar üretilmesi konusunda önemli yol alınmıştır. Diğer taraftan mikrodalga ısıtma işlemi sırasında sıcaklık profilinin belirlenememesi de önemli bir dezavantajdır. Ancak manyetik rezonans görüntüleme, kimyasal göstergeçler ve zaman-sıcaklık göstergeleri bu olumsuzluğa çözüm bulabilmek amacıyla geliştirilmiştir [1].

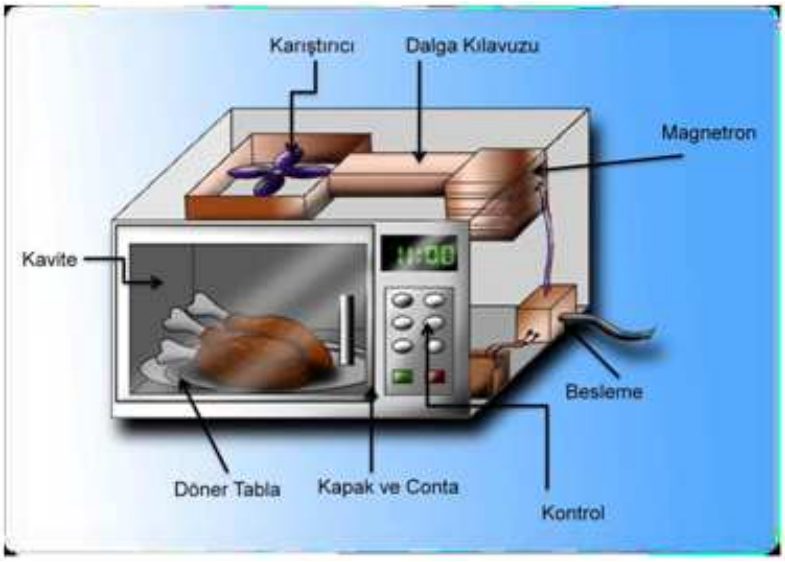
Genel olarak mikrodalga uygulamaları buhar, sıcak hava ve infrared ısıtma ile birleştirilerek yapılmaktadır [2]. Pişirme işleminde mikrodalganın kullanılması özellikle kümes hayvanları ve domuz etinin ön pişirme veya pişirme aşamaları için uygundur. Bu işlemin; tüketilen enerji miktarının düşük olması, ürün büzülmesinin kontrol altında tutulması ve ürünün renk, görünüm ve tadında genel olarak bir iyileşmenin gözlenmesi bakımından avantajları bulunmaktadır. Mikrodalga ile yapılan pişirme işleminde ısıtma süresinin kısa olması nedeniyle nişastanın hem jelatinizasyonu; hem de enzimatik olarak parçalanması yeterli ölçüde gerçekleşmemektedir. Ayrıca süreye bağlı olarak; gıdanın yüzeyinde karamelizasyon ve Maillard Reaksiyonlarının meydana gelmesi için gereken sıcaklık artışı sağlanamamaktadır. Bu reaksiyonların meydana gelmemesi sonucunda ürünlerde istenilen tat-aroma ve renk bileşikleri ve/veya pigmentleri oluşmamakta; oluşan bazı tat-aroma bileşikleri de mikrodalga fırında pişirme veya ısıtma süresince ürünlerden uçarak kaybolmaktadır. Genel olarak geleneksel fırınlarda pişirilen keklerde oluşan aromalar, mikrodalga ile pişirilen keklerde oluşmamaktadır. Mikrodalga fırında

pişirilen ürünlerde kabuk oluşumunu ve yüzey esmerleşmesini sağlamak amacıyla farklı modlarla desteklenen mikrodalga ısıtma tercih edilmektedir [2].

Mikrodalga ısıtma sisteminde ısıtılacak/pişirilecek gıdanın niteliklerine uygun mikrodalga gücü üretilmekte, bu güç mümkün olan en az kayıp ile yiyeceğin ısınması/pişmesi için fırın içerisine aktarılmaktadır [3]. Bir sonraki aşamada yiyeceğin uygun ve eşit pişmesi için bu gücün yiyeceğin her tarafına eşit dağıtılması amaçlanmakta ve son olarak kayıpları en aza indirmek ve sağlık açısından üretilen mikrodalga gücün fırının dışına çıkması engellenmeye çalışılmaktadır.

Mikrodalga ısıtmanın sistem bileşenleri; magnetron, besleme, dalga kılavuzu, karıştırıcı (yada döner tabla), kavite, kapak ve conta olarak sıralanmaktadır. Magnetron ve besleme, mikrodalga gücü üretmek için kullanılmaktadır. Dalga kılavuzu elde edilen gücün en az kayıpla iletilmesinde, karıştırıcı ve/veya döner tepsi ise ısınma ve pişme işleminin yiyeceğin her bölgesinde homojen olmasında kullanılmaktadır.

Kavite, mikrodalga yayılım modlarının oluşmasını ve mikrodalga gücün dağılım yapmasını gerçekleştirmektedir. Kapak ve conta tasarımı da sızıntı gücü minimuma indirerek hem veriminin yükseltilmesini hem de ürünün sağlığa zararlı olmamasını beraberinde getirmektedir. Son olarak çeşitli algoritmaları da barındıran bir kontrol ünitesi, kullanım kolaylığı ve çeşitliliği sağlamaktadır. Şekil 2.2'de mikrodalga ısıtmanın sistem bileşenleri görülmektedir.

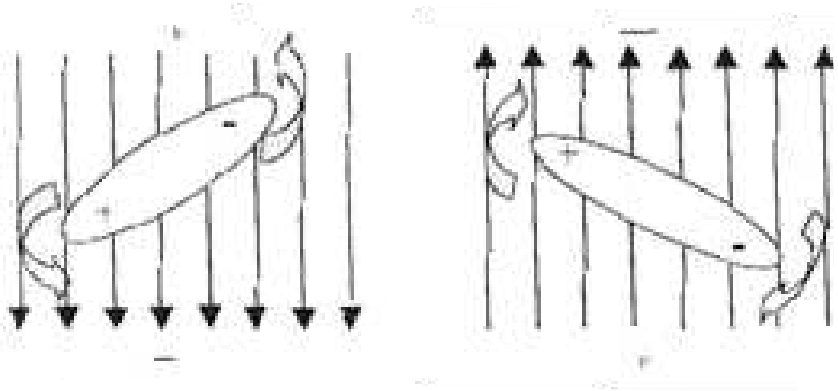


Şekil 2.2 : Mikrodalga ısıtmanın sistem bileşenleri [3].

Bileşenlerden döner tabla ve karıştırıcı yiyecek üzerinde eşit dağılım sağlamak amacı ile kullanılan parçalardır. Bu bileşenlerden aynı anda ikisi pek nadir kullanılmaktadır. Sadece karıştırıcı veya sadece döner tepsi kullanılması yeterlidir. Konvansiyonel ısıtma sistemlerinde sökülüp takılabilen ve yüksekliği ayarlanabilen tepsi kullanıldığından bu fırınlara mikrodalga sistem entegre edildiğinde karıştırıcı kullanılması daha uygundur [3].

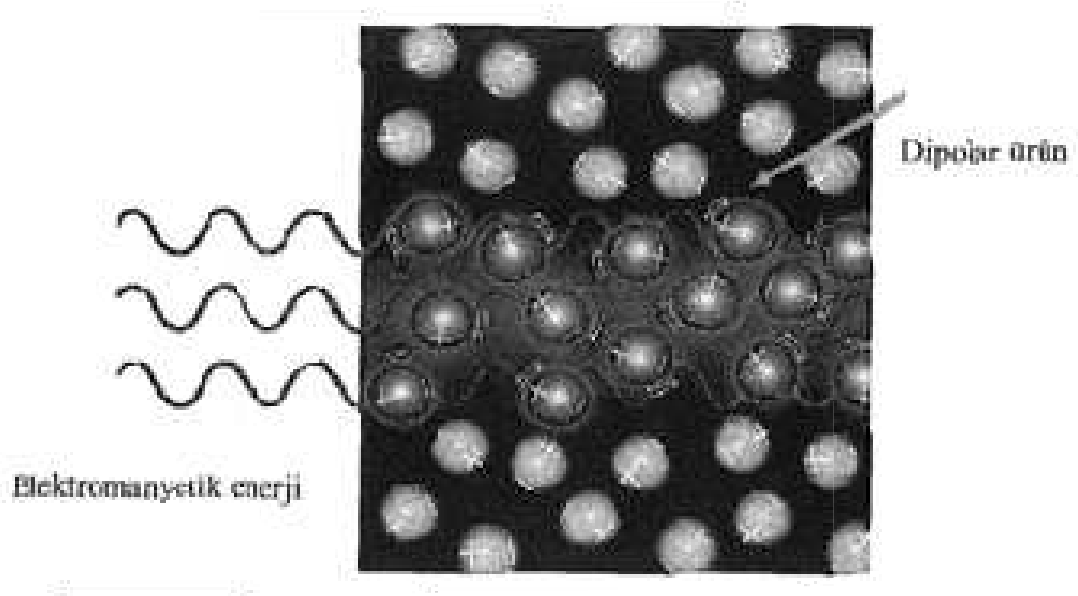
2.1 Mikrodalga Isıtmanın Temel Prensipleri

Mikrodalgalar tek başlarına ısı yaratamamaktadırlar. Mikrodalga, materyaller veya maddeler tarafından absorblanmakta ve absorblanan enerji ısıya dönüşmektedir [1]. Mikrodalga enerjinin ısıya dönüşümüne neden olan en önemli mekanizmalar oryantasyon polarizasyonu ve ara yüzey dağılımıdır. Dielektrik özellikteki çoğu materyal, alternatif alanların etkisiyle tekrar tekrar yer değiştirmeye yani oryantasyon polarizasyonuna maruz kalmaktadır. Ara yüzey dağılım ise heterojen sistemlerde bileşenlerin ara yüzeylerindeki yüklenmenin etkisiyle oluşmaktadır. Gıdalarda mikrodalga ile karşılaşan polar moleküller ısı oluşturmaktadır. Gıdanın içerisindeki en önemli polar molekül sudur. Su molekülü negatif ve pozitif kısma sahip polar bir moleküldür. Mikrodalga elektrik alanı varlığında mıknatısın demir parçasına etkisi gibi alan ile aynı düzene girmeye çalışmaktadır. Mikrodalga alanın polaritesi saniyede milyon kere tersine döndürüldüğünde su molekülü de aynı yönde hareket eder ve Şekil 2.3'de görüldüğü gibi manyetik alanın polarite değişimine bağlı olarak tekrar tekrar yön değiştirir. Bu hareket nedeniyle oluşan kinetik enerji ısıya dönüşmektedir.



Şekil 2.3 : Mikrodalga alan etkisiyle bir dipol bileşiğin hareketi [1].

Gıdanın içerisinde bulunan bazı yüklü parçacıklar mikrodalga frekans hızında salınıma neden olacak kuvvet doğurmaktadır. Oluşan net kuvvet, parçacıkları bir yönde döndürmekte, ardından tam ters yönde dönmelerini sağlamaktadır. Şekil 2.4'de görüldüğü gibi hareketlenen parçacıklar yakınındaki parçacıklarla çarpışmakta ve bu çarpışma etkisiyle ısı ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.4 : Mikrodalga enerjinin dipolar ürüne etkisi [1].

Gıdanın su içermesi mikrodalga ısıtma açısından en önemli özelliğidir. Suyun moleküler yapısı elektrik dipol oluşturacak negatif yüklü oksijen atomları ile pozitif yüklü hidrojen atomlarının her ikisini de içermektedir. Gıdaya mikrodalga uygulandığında, sudaki dipoller ve tuz gibi bazı iyonik bileşikler, oluşan alana göre hareket ederek pozisyon alır. Öyle ki hızla salınım yapan elektriksel alanın pozitiften negatife değişimi ve tekrar saniyeler içinde milyon kere geri dönmesi sonucu, dipoller de bu işlemi takip etmeye çalışırlar. Bu hızlı moleküler hareketler ise, sürtünme etkisiyle su moleküllerinde ısı oluşumuna neden olur. Su moleküllerindeki bu sıcaklık artışı, su moleküllerinin çevresindeki diğer gıda bileşenlerinin de iletim ve/veya taşınım yolu ile ısınmasını sağlar. Yaygın olarak "mikrodalga ısı içeriden dışarıya doğru gelişir" şeklinde ifade edilmekle birlikte, gerçekte dış kısımlar da iç kısımlardaki ile aynı enerjiyi almakta, ancak yüzey çevreyle olan iletişimi nedeniyle ısıyı daha çabuk kaybetmekte bu nedenle sıcaklık artışı daha geç gerçekleşmektedir [1].

2.2 Gıdaların Mikrodalga İle Isıtılmasına Etki Eden Faktörler

Dielektrik Özellikler : Gıdaların dielektrik özellikleri mikrodalga ile ısıtılmaları sırasında oldukça önemli bir etkendir [2]. Bu önemli özellikleri dielektrik sabiti (ε') ve dielektrik kayıp faktörü (ε'') belirlemektedir. Dielektrik sabiti, gıdanın enerjinin ne kadarını depolayabileceğini, dielektrik kayıp faktörü ise gıdanın enerjinin ne kadarını ısıya dönüştürebileceğini göstermektedir. Bunların dışında, diğer bir özellik ise kayıp tanjant (tan δ) dır. Kayıp tanjant, materyalin dielektrik kayıp faktörünün dielektrik sabitine oranı ($\varepsilon''/\ \varepsilon'$) olup ve elektromanyetik alanda materyale sızan mikrodalga enerjisinin ısı olarak tüketilme miktarını ifade etmektedir [5]. Çoğu materyalin dielektrik özellikleri su içeriğine, uygulanan elektrik alanının frekansına, materyalin sıcaklığına, yoğunluğuna, kimyasal bileşimine ve fiziksel yapısına bağlı olarak değişmektedir. Gıdaların temel bileşenleri olan su, yağ, karbonhidrat ve proteinlerin hepsi mikrodalga ile ısıtma üzerine doğrudan etkilidir [5].

Materyallerin dielektrik özellikleri permitivite ile **(2.1)** eşitliğindeki gibi ifade edilmiştir [2].

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \qquad \textbf{(2.1)}$$

Permitivitenin gerçek kısmına dielektrik sabiti (ε') ve sanal kısmına ise dielektrik kayıp faktörü (ε'') denilmektedir. Dielektrik sabiti (ε') materyalin oluşan enerjinin ne kadarını depolayabileceğini, dielektrik kayıp faktörü (ε'') materyalin oluşan enerjinin ne kadarını absorbe edip ısıya dönüştürebileceğini ve j'de $\sqrt{-1}$ değerini ifade etmektedir .

Mikrodalga enerjisinin bir materyali aşarken uğradığı enerji kaybı yani o materyalin kayıp faktörü, gıda için ne kadar yüksekse o gıda mikrodalga etkisiyle o kadar çabuk ısınmaktadır. Kayıp faktör değeri; elektromanyetik dalgaların frekansına, materyalin sıcaklığına, fiziksel durumuna ve bileşimine bağlı olarak değişmektedir.

Frekans : Elektromanyetik alanların gıdaya penetrasyon miktarı ~1/f ile orantılı olduğundan, kullanılan mikrodalga kaynağının frekansı muamele süresini etkilemektedir [2]. Kullanılan kaynağın frekansı arttıkça, gıdaya penetrasyon miktarı azalmaktadır. Bu yüzden ısıtılacak gıdanın büyüklüğüne göre frekans seçimi önemlidir [4].

Tüm koşullar sabit olduğunda dielektrik sabiti frekansın yükselmesiyle sabit kalır ya da azalır [1]. Dielektrik kaybı, frekans aralığına ve absorbsiyon prosesinin doğasına bağlı olarak frekansla değişir. Düşük değerlerden frekans yükseldiğinde, bir noktaya kadar polar moleküller elektrik alanın yönünü takip ederek hareket ederler ve frekans yükselmeye devam ederse, dipol hareket alanın yönünün değişmesiyle polar moleküller değişmeye devam edemez. Bunun sonucunda dielektrik sabiti bu bölgede frekansın yükselmesiyle azalır. Absorbe edilen enerji, dipol rotasyon ve alan arasında gecikme evresiyle sonuçlanır. Daha yüksek frekanslarda, dilelektrik sabiti yeniden yükselir ve optik değer olarak adlandırılan değere ulaşır, kayıp faktörü ise düşük değerlere azalır [1].

Sıcaklık : Gıdaların dielektrik özelliklerine etki etmektedir. Dielektrik kaybı materyale bağlı olarak sıcaklık ile birlikte artabilmekte veya azalabilmektedir [2]. Mikrodalga ile ısıtılan gıda maddelerinin başlangıç sıcaklığı kontrol edilmeli veya bilinmelidir. Böylece mikrodalganın gücü homojen bir son sıcaklık elde etmek için ayarlanabilmektedir. Gıdaların başlangıç sıcaklığı ne kadar yüksek ise mikrodalga ile ısıtılmaları o kadar hızlıdır.

Su İçeriği : Su, mikrodalga enerjisinin gıdalar tarafından absorbe edilmesinde önemli bir etkendir. Gıda içerisinde bulunan su moleküllerinin fazla olması, polarize olacak içerik miktarının artması anlamına gelmekte; diğer bir ifade ile o gıdanın dielektrik kayıp faktörünün büyümesi olarak sonuçlanmaktadır. Dolayısıyla gıda daha iyi ısınacaktır.

Yoğunluk : Gıdanın yoğunluğu gıdanın dielektrik sabitini etkilemektedir. Havanın dielektrik sabiti birdir ve endüstride ısıtma için kullanılan frekanslarda tamamen geçirgendir. Bu yüzden gıdanın yapısında bulunan hava miktarı arttıkça, o gıdanın dielektrik sabiti düşmektedir. Bununla birlikte; materyalin yoğunluğu arttıkça, dielektrik sabiti de genellikle doğrusal olarak artmaktadır.

Buraya kadar anlatılan etkiler çeşitli gıdalar için Çizelge 2.1’de görülmüştür. Dielektrik özelliklerin tanımlanabilmesi için, materyalin nem içeriğinin ve yoğunluğunun bilinmesi gerekir. Eğer materyalin nem değeri ve yoğunluğu biliniyorsa, sıcaklık ve frekans değerleri için gıdanın dielektrik özellikleri bulunabilir. Çizelgede nem ve yoğunluk değeri belirtilerek özelleştirilen gıdaların 23°C için 915 MHz ve 2.45 GHz frekanstaki dielektrik özellikleri verilmiştir.

Çizelge 2.1 : 23°C'deki meyve ve sebzelerin dielektrik özellikleri [6].

Sebze - Meyve	Nem İçeriği (%)	Yoğunluk (g/cm^3)	Dielektrik özellikler ($\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$)			
			915 MHz		2.45 GHz	
			ε'	ε''	ε'	ε''
Çilek	92	0.76	73	14	71	14
Elma	88	0.76	57	8	54	10
Havuç	87	0.99	59	18	56	15
Limon	91	0.88	73	15	71	14
Muz	78	0.94	64	19	60	18
Patates	79	1.03	62	22	57	17
Salatalık	97	0.85	71	11	69	12
Soğan	92	0.97	61	12	64	14
Şeftali	90	0.92	70	12	67	14

Mikrodalga Gücü ve Isıtma Hızı : Endüstride kullanılan birçok mikrodalga sistemi 5-100 kW arasında değişen mikrodalga gücünde çalışmaktadır. Sistemin gücü arttıkça, aynı miktardaki kütleyi ısıtma hızı da artmaktadır. Bu duruma bağlı olarak gıdanın ısıtılma süresi azaltmaktadır.

Gıdanın Kütlesi : Gıdanın kütlesi ile istenilen ısıtmanın gerçekleşmesi için gerekli olan mikrodalga gücü arasında direkt bir ilişki vardır. Büyük cisimler genellikle küçük cisimlere göre daha fazla mikrodalga gücü absorbe edebilmektedir. Ancak büyük cisimlerin mikrodalga fırın içerisinde ısıtılması daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Eğer toplam kütle az ise kesikli bir sistem işlem için daha uygundur. Kütle arttıkça, bantlı sistemlerin kullanımı daha elverişli olmaktadır .

Fiziksel Geometri: Mikrodalga ile ısıtılacak gıdanın boyutu, uygulanan elektromanyetik dalga boyuna veya penetrasyon derinliğine göre fazla ise homojen bir ısıtma yapılamamaktadır. Ayrıca gıdanın şekli ne kadar düzgün olursa gıda o derece homojen ısınacaktır. Keskin köşe ve kenarlar daha fazla ısınacağı için bunların aşırı ısınmasından kaçınmak gerekmektedir. Mikrodalgalar gıdaya her taraftan nüfuz ettikleri için gıdanın şekli mikrodalga ile ısıtmada önemli bir etkiye sahiptir. Mikrodalga ile ısıtma için ideal şekil küredir. Küreden sonra en iyi şekil silindirdir.

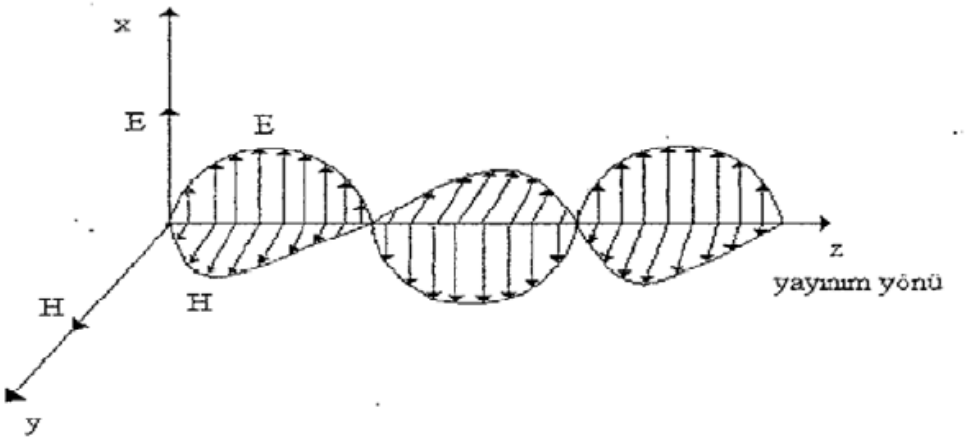
Isıl Özellikler : Isıtma işlemlerinde materyallerin özgül ısı ve ısıl iletkenlik değerleri önemli parametrelerdir. Özgül ısı, ısıtma işlemini gerçekleştirmek için gerekli olan enerji miktarının hesaplanmasında kullanılmaktadır. Özgül ısı değeri gıdanın nem içeriği ile yakından ilişkili olduğu için, bu değerin gıdaların mikrodalga ile ısıtma işlemi üzerine önemli etkileri vardır. Isıl iletkenlik, kütlesi fazla olan gıdaların ısıtılması sırasında penetrasyon derinliğinin ürünün homojen bir şekilde merkeze kadar ısınmasını sağlayacak kadar fazla olmadığı veya mikrodalga ile ısıtma süresinin uzun olduğu durumlarda önemli bir etkendir. Her bir gıda bileşeninin ısıl iletkenlik değerlerinin bilinmesi o gıdanın en uygun şekilde ısıtılmasını sağlamaktadır .

Elektriksel İletkenlik : Materyalde elektrik akımının iyon ve elektronların yer değiştirmesi ile taşınması olayıdır. Mikrodalga sistemlerinde ısının üretilmesi için genellikle dipolar dönme mekanizması etkili olurken, özellikle gıda maddelerinin ısıtılmasında iyonik kondüksiyonun önemli bir rolü olduğu düşünülmektedir. Mikrodalga ile ısıtılan ürüne tuz ilave edilmesi ürünün ısıtma hızını arttırmaktadır. Çünkü tuz ilavesi penetrasyon derinliğine doğrudan etki etmekte ve yüzeyde aşırı ısınmaya neden olabilmektedir [2].

2.3 Mikrodalga Isıtmanın Teorik Olarak İncelenmesi

Mikrodalga gücü, bir hacim içerisinde yayıldığı zaman, bu hacmin yüzeyinden itibaren belirli bir derinliğe kadar olan kısımda, malzeme ile elektromanyetik alan arasında karşılıklı bir etkileşim olur [7]. Malzemenin elektrik özellikleri, bu etkileşime bağlı olarak değişir. Burada, bu etkileşimin en belirgin özelliği, elektromanyetik enerjinin ısıya dönüşmesidir.

Malzeme ile dalga arasındaki etkileşim, elektromanyetik olaylarla oluştuğundan bu oluşumu inceleyebilmek için, Maxwell Denklemlerini göz önüne almak gerekir. Bu denklemler, elektromanyetik dalga büyüklükleri arasındaki bağıntıları gösteren denklemlerdir.



Şekil 2.5 : Elektrik ve Manyetik alanların herhangi bir t anında yayınımı [7].

Maxwell denklemleri şu iki temel kurala dayanmaktadır.

1. Zamana göre değişen elektrik alan, bir manyetik alan yaratmaktadır.
2. Zamana göre değişen manyetik alan, bir elektrik alan yaratmaktadır.

Maxwell dalga denklemleri, elektromanyetik dalganın iki bileşeni olan E elektriksel alanı ve H manyetik alanı arasındaki bağıntıları; **(2.2)** eşitliğindeki Maxwell Gauss Denklemi, **(2.3)** eşitliğindeki manyetizma için Maxwell Gauss Denklemi, **(2.4)** eşitliğindeki Maxwell Faraday Denklemi ve **(2.5)** eşitliğindeki Maxwell Ampere Denklemi olarak sunulmuştur.

$$\nabla . \vec{D} = \rho_{yük} \tag{2.2}$$

$$\nabla . \vec{B} = 0 \tag{2.3}$$

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{2.4}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J} \tag{2.5}$$

(2.2) eşitliğinden **(2.5)** eşitliğine kadar; $\vec{E}, \vec{H}, \vec{D}, \vec{B}$ sırasıyla elektrik ve manyetik alan şiddetleri, elektrik ve manyetik akı yoğunluklarıdır. $\vec{J_s}$ ve $\rho_{yük}$ sırasıyla kaynak tarafından sağlanan elektrik akımı ve yük yoğunluklarıdır.

Ortam ile elektromanyetik alanlar arasında bağıntılar ise, **(2.6)** eşitliğinden **(2.8)** eşitliğine kadar verilmiştir.

$$\vec{B} = \mu.\vec{H} \tag{2.6}$$

$$\vec{J} = \sigma.\vec{E} \tag{2.7}$$

$$\vec{D} = \varepsilon.\vec{E} \tag{2.8}$$

(2.4) ve **(2.5)** eşitliğinde, **(2.6)**, **(2.7)** ve **(2.8)** eşitlikleri yerine yazılıp **(2.9)** ve **(2.10)** eşitliklerinin elde edildiği görülmüştür.

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\frac{1}{\mu}\left(\nabla \times \vec{E}\right) \tag{2.9}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = -\frac{\sigma}{\varepsilon}\vec{E} + \frac{1}{\varepsilon}(\nabla \times \vec{H}) \tag{2.10}$$

(2.9) ve **(2.10)** eşitlikleri; x, y, z koordinatlarına bağlı olarak; **(2.11)** eşitliğinden **(2.13)** eşitliğine kadar manyetik alan bileşenleri için, **(2.14)** eşitliğinden **(2.16)** eşitliğine kadar elektrik alan bileşenleri için açık bir şekilde yazılmıştır.

$$\mu\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \tag{2.11}$$

$$\mu\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \tag{2.12}$$

$$\mu\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \tag{2.13}$$

$$\varepsilon\frac{\partial E_x}{\partial t} + \sigma E_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \tag{2.14}$$

$$\varepsilon\frac{\partial E_y}{\partial t} + \sigma E_y = \frac{\partial H_x}{\partial z} + \frac{\partial H_z}{\partial x} \tag{2.15}$$

$$\varepsilon\frac{\partial E_z}{\partial t} + \sigma E_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \tag{2.16}$$

Bir malzemenin elektrik enerjisini yutma özelliği, iki parametre ile tespit edilmiştir. **(2.17)** eşitliğinde görüldüğü gibi; bunlardan birisi σ iletkenlik katsayısı, diğeri de **(2.19)** eşitliğinde görüldüğü gibi; **(2.18)** eşitliğinden türetilen, ε_r dielektrik katsayısıdır. ε_r' maddenin dielektrik sabiti, ε_r'' ise maddenin dielektrik kayıp faktörüdür. Bu iki parametrenin değerlerine göre ortamdaki bir elektromanyetik ışımanın ısıya dönüşüp dönüşmediğinin karakterize etmek mümkündür.

$$\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_r'' \quad \textbf{(2.17)}$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad \textbf{(2.18)}$$

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'' \quad \textbf{(2.19)}$$

(2.20) eşitliğinde verilen μ_r' geçirgenlik, μ_r'' ise manyetik kayıp faktörüdür. **(2.21)** eşitliğinde verilen ω açısal frekansı ifade etmektedir [7].

$$\mu_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad \textbf{(2.20)}$$

$$\omega = 2\pi f \quad \textbf{(2.21)}$$

Maxwell denklemlerinden mikrodalga güç denklemini türetmek için **(2.22)** eşitliğinde görülen Poynting Vektörü, **(2.23)** eşitliğinde görüldüğü gibi alana göre integre edilmiştir [8].

$$\vec{\rho} = \vec{E} \times \vec{H} \ (\mathrm{W/m^2}) \quad \textbf{(2.22)}$$

$$\int_{S'} (\vec{E} \times \vec{H}^*).d\vec{S}' \quad \textbf{(2.23)}$$

(2.23) eşitliğinde verilen $\vec{H}^*$; $\vec{H}$ manyetik alan şiddetinin eşleniğidir.

(2.5) eşitliğinde verilen Maxwell'in dördüncü denkleminde, eşitlik **(2.8)** ve eşitlik **(2.18)** yerine yazıldığında eşitlik **(2.24)** elde edilmiştir.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \vec{E} \quad \textbf{(2.24)}$$

(2.24) eşitliğinde, **(2.7)** eşitliği, **(2.19)** eşitliği ve **(2.25)** eşitliği yerine yazıldığında **(2.26)** eşitliği elde edilmiştir.

$$\varepsilon''_{eff} = \varepsilon'' + \sigma/\omega\varepsilon_0 \tag{2.25}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + (\omega\varepsilon_0\varepsilon'' + J\omega\varepsilon_0\varepsilon')\vec{E} = \omega\varepsilon_0\varepsilon''_{eff}\vec{E} + j\omega\varepsilon_0\varepsilon'\vec{E} \tag{2.26}$$

(2.26) eşitliği eşlenik ifadelerle düzenlendiğinde **(2.27)** eşitliğinin elde edildiği görülmüştür.

$$(\nabla \times \vec{H}^*).\vec{E} = \omega\varepsilon_0\varepsilon''_{eff}\vec{E}.\vec{E}^* - j\omega\varepsilon_0\varepsilon'\vec{E}^*.\vec{E} \tag{2.27}$$

(2.27) eşitliğinde verilen $\vec{E}^*$, $\vec{E}$ elektrik alan şiddetinin eşleniğidir.

Maxwell'in **(2.4)** eşitliğinde verilen 3. denklemi $\vec{H}^*$ ile çarpılıp, **(2.28)** eşitliğine ulaşılmıştır.

$$(\nabla \times \vec{E}).\vec{H}^* = -J\omega\mu_0\mu'\vec{H}.\vec{H}^* \tag{2.28}$$

(2.28) eşitliğinden, **(2.27)** eşitliği çıkarılırsa **(2.29)** eşitliğinin elde edildiği görülmüştür.

$$\begin{aligned}(\nabla \times \vec{E}).\vec{H}^* - (\nabla \times \vec{H}^*).\vec{E} \\ = -j\omega\mu_0\mu'\vec{H}.\vec{H}^* + j\omega\varepsilon_0\varepsilon'\vec{E}.\vec{E}^* - \omega\varepsilon_0\varepsilon''_{eff}\vec{E}.\vec{E}^*\end{aligned} \tag{2.29}$$

(2.29) eşitliği, V hacmine göre integre edilirse, **(2.30)** eşitliğine ulaşılmıştır.

$$\begin{aligned}\int_V \nabla.(\vec{E} \times \vec{H}^*)dV = \int_{S'}(\vec{E} \times \vec{H}^*).d\vec{S}' \\ = -j\omega\int_V(\mu_0\,\mu'\vec{H}^*.\vec{H} - \varepsilon_0\varepsilon'\vec{E}.\vec{E}^*)dV - \int_V \omega\varepsilon_0\varepsilon''_{eff}\,\vec{E}.\vec{E}^*dV\end{aligned} \tag{2.30}$$

Ortalama gücü hesaplamak için **(2.30)** eşitliğinin, **(2.31)** eşitliğinde görüldüğü gibi sadece reel kısmı alınıp, imajiner kısmı ihmal edildiğinde, **(2.32)** eşitliğine ulaşılmıştır.

$$P_{av} = -\frac{1}{2}\int_s Real\,(\vec{E} \times \vec{H}^*).d\vec{S}' \tag{2.31}$$

$$P_{av} = \frac{1}{2}\omega\varepsilon_0\varepsilon''_{eff}\int_V(\vec{E}^*.\vec{E})dV \tag{2.32}$$

Elektrik alan şiddeti E, sabit değildir. Fakat burada özel bir durum olarak sabit kabul edilebilip; **(2.32)** eşitliğinde, **(2.33)** eşitliği yerine yazılarak, daha basit olan **(2.34)** eşitliği elde edilmiştir.

$$\vec{E}.\vec{E}^{*} = E^{2} \tag{2.33}$$

$$P_{av} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_{eff} E^2 V \tag{2.34}$$

$\varepsilon_0 = 8.8 \times 10^{-12}\ F/m$ ve **(2.21)** eşitliği, **(2.34)** eşitliğinde yerine yazılırsa **(2.35)** eşitliği elde edilip, istenilen eşitliğe ulaşılmaktadır. Böylece ısıya dönüşen güç (W) bulunmuştur.

$$P_{av} = 0.556 \times 10^{-10} f \varepsilon''_{eff} E^2 V \tag{2.35}$$

(2.35) eşitliğinde, E elektrik alan şiddeti (V/m), f frekans (Hz) ve V hacim (m^3) dür .

Bir başka deyişle; mikrodalga için birim hacim başına düşen ısı miktarı (W/m^3) **(2.36)** eşitliğinde görülmüştür.

$$\rho C_p \frac{\Delta T}{\Delta t} = 0.556 \times 10^{-10} f \varepsilon''_{eff} E^2 \tag{2.36}$$

Burada; C_p maddenin özgül ısısı ($Jkg^{-1}°C^{-1}$), ρ maddenin yoğunluğu (kg/m^3) ve $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ sıcaklık gradyanı (°C/s)'dır.

Dielektrik maddelerin elektrik alan şiddetleri yüzeyden *z* kadar bir mesafede **(2.37)** eşitliğinde görüldüğü gibi azalmıştır.

$$E = E_0 e^{-\alpha z} \tag{2.37}$$

Etki azalma faktörü (attenuation factor) α, maddenin dielektrik özelliklerine bağlı olup **(2.38)** eşitliğinde görülmüştür.

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0}\left[\frac{1}{2}\varepsilon'\left(\sqrt{1+\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2}-1\right)\right]^{1/2} \tag{2.38}$$

(2.38) eşitliğinde; λ_0 boşluğun dalga boyu 2.45 GHz'de 12.24 cm'dır.

(2.37) eşitliği, **(2.35)** eşitliğinde yerine yazılırsa **(2.39)** eşitliğinin elde edildiği görülmüştür.

$$P = P_0 e^{-2\alpha z} \tag{2.39}$$

Mikrodalga gücünün penetrasyon derinliği, yüzeyden giren gücün $1/e$ $(e = 2.718)$ kadar azaldığı uzaklık olarak tanımlanır. Penetrasyon derinliği d_p (m), **(2.40)** eşitliğinde görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$d_p = \frac{c}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2} - 1\right]}} \tag{2.40}$$

(2.40) eşitliğinde; f rekans (Hz) ve c boşluktaki ışık hızı $(3 \times 10^8 m/s)$'dır.

(2.38) ve **(2.40)** eşitlikleri karşılaştırıldığında bu iki eşitlik arasında, **(2.41)** eşitliğinde görüldüğü gibi bir bağlantı olduğu sunulmuştur [8].

$$\alpha = \frac{1}{2d_p} \tag{2.41}$$

Kütle transferi denklemi ise, ısı transferi denklemlerinin aksine daha sadedir. **(2.42)** eşitliğnde kütle transferi denklemi verilmiştir [6].

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D \frac{\partial M}{\partial x}\right) \tag{2.42}$$

(2.42) eşitliğinde; D difüzyon kat sayısı (m^2/s)'dır [6].

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

3.1 Mikrodalga Isıtmanın Modellenmesiyle İlgili Çalışmalar

Literatürde, mikrodalga ısıtma ve farklı modlarla desteklenen mikrodalga ısıtmanın, deneysel veya teorik olarak incelendiği çalışmalar mevcuttur. Yapılan çalışmalarda farklı modlarlar desteklenen mikrodalga ısıtmalarda genellikle mikrodalga ısıtmayla birlikte infrared ıstma ve jet impingement (sıcak hava ile) ısıtmanın birlikte kullanıldığı hibrid ısıtmalar modellenmiştir. Isıl modelleme çalışmalarında, dielektrik özelliklerin çoğunlukla sabit alındığı; sıcaklığa, neme ve frekansa ve bağlı değişimlerinin ihmal edildiği görülmüştür. Ayrıca mikrodalga kaynağının hacim içerisindeki dağılımından bahsedilmeyerek, çok az çalışmada analiz programları ile edilen dağılım sonuçlarından bahsedilmektedir.

Yoğun mikrodalga ısıtma altındaki iki fazlı gözenekli maddeler için ısı ve kütle transferinin hesaplandığı analitik bir çalışma Dincov ve diğerleri (2004) tarafından sunulmuştur. Zamanda sonlu farklar yöntemi (FDTD) ve sonlu hacim yöntemlerinin birlikte kullanılmasıyla çözülen denklemlerle elektromanyetik alan ve ısı-kütle transferi gözenekli ortam için tanımlanmıştır. Boşluktaki ve zamandaki elektromanyetik alan dağılımı Maxwell denklemleriyle yürütülmüştür. Maxwell denklemlerinin diferansiyel formu, elektrik alan şiddeti $\vec{E}$ ve manyetik alan yoğunluğuyla $\vec{H}$ ifade edilerek **(3.1)** eşitliğinden **(3.4)** eşitliğine kadar olan eşitlikler kullanılmıştır.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial(\mu\vec{H})}{\partial t} \quad \textbf{(3.1)}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma_{eff}\vec{E} + \frac{\partial(\varepsilon\vec{E})}{\partial t} \quad \textbf{(3.2)}$$

$$\nabla.(\varepsilon\vec{E}) = \rho \quad \textbf{(3.3)}$$

$$\nabla.\vec{H} = 0 \quad \textbf{(3.4)}$$

(3.1) eşitliğinden **(3.4)** eşitliğine kadar olan eşitliklerde; $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r'$ dielektrik kat sayısı ($(\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{12}\ F/m)$; boşluğun dielektrik sabiti), μ geçirgenlik ve ε_r' bağıl dielektrik sabitidir. Efektif iletkenlik σ_{eff} ise, maddenin efektif dielektrik kayıp faktörü ε_{eff}'' ile ilişkili olup, **(3.5)** eşitliğinde görülmüştür.

$$\sigma_{eff} = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' \tag{3.5}$$

Bu eşitliklerden türetilen mikrodalga ısı denklemi, **(3.6)** eşitliğinde sunulmuştur.

$$Q = \omega \varepsilon_0 \varepsilon_{eff}'' \left|\vec{E}\right|^2 + \omega \mu_0 \mu_{eff}'' \left|\vec{H}\right|^2 \tag{3.6}$$

(3.6) eşitliğinin manyetik alanla ilgili olan sağ kısmı, dielektrik maddeler manyetik özelliklere sahip olmadığından dolayı ihmal edilmiştir. **(3.6)** eşitliği, bu ihmalle **(3.7)** eşitliğine dönüşmüştür.

$$Q = \frac{1}{2} \sigma_{eff} |E_{max}|^2 \tag{3.7}$$

Elektromanyetik dalgalar, enerjinin absorblanmasıyla gıda yüzeyinden farklı derinliklere indikçe kayıplara uğramaktadır. Bu yüzden penetrasyon derinliği **(3.8)** eşitliğinde verildiği gibi hesaplanıp, modele dahil edilmiştir.

$$d = \frac{\lambda_0}{2\pi (2\varepsilon_r')^{1/2}} \left[\left(1 + \left(\frac{\varepsilon_{eff}''}{\varepsilon_r'} \right)^2 \right)^{1/2} - 1 \right]^{-1/2} \tag{3.8}$$

Mikrodalga ortam için sınır şartlar **(3.9)** ve **(3.10)** eşitliğinde görülmüştür.

$$\left(\vec{E}_2 - \vec{E}_1\right) \times \vec{n} = 0 \tag{3.9}$$

$$\left(\vec{H}_2 - \vec{H}_1\right) \times \vec{n} = 0 \tag{3.10}$$

(3.9) ve **(3.10)** eşitliğinde; $\vec{n}$ yüzeydeki birim normal vektörü temsil etmektedir.

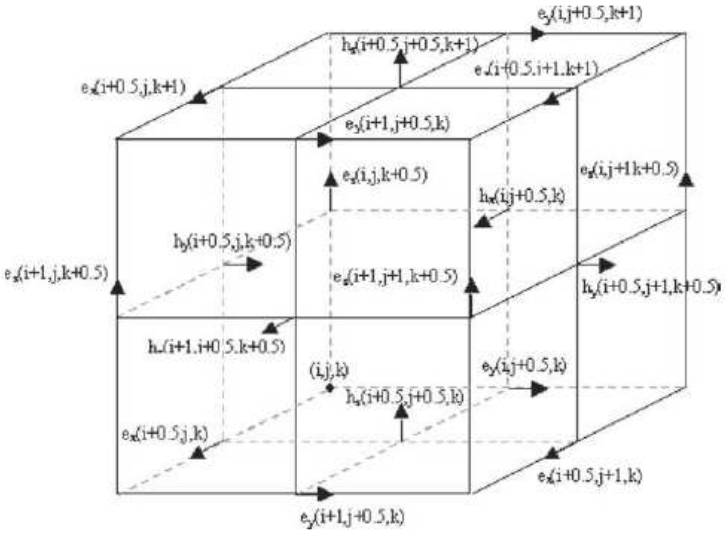
Isı transferi hesabı için yüzeydeki başlangıç ve sınır şartları **(3.11)** eşitliğinde görüldüğü gibi kullanılmıştır.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_c (T_s - T_a) + \sigma_{rad} \varepsilon_{rad} (T_s^4 - T_a^4) - \dot{m} L \tag{3.11}$$

(3.11) eşitliğinde; T_s yüzey sıcaklığı, T_a hava sıcaklığı, h_c taşınım ısı transfer katsayısı, σ_{rad} Stefan-Boltzmann sabiti, ε_{rad} yüzey emisivitesi, L buharlaşma gizli ısısı, $\dot{m}$ buharlaşan su buharı miktarı ve n yüzeyin normalini temsil eden ifade olarak sunulmuştur..

Modelde Maxwell Denklemlerinin hesaplanmasında kullanılan Yee Birim Hücresi, Zamanda Sonlu Farklar Yöntemi (FDTD) yönteminde temel alınmıştır.

Maxwell Denklemlerinin belli bir ortamda FDTD kullanarak çözebilmek için, ortamın birim hücrelere bölünmesi gerekir. Bu birim hücrelerin x yönünde genişlikleri Δx, y yönünde genişlikleri Δy ve z yönünde genişlikleri Δz 'dir. Birim hücre, koordinat sisteminde, orjin noktasına denk gelen köşeye numaralanan üç indis ile belirtilir. Bu indisler, Yee tarafından önerilen birim hücre Şekil 3.1'de sunulmuştur.

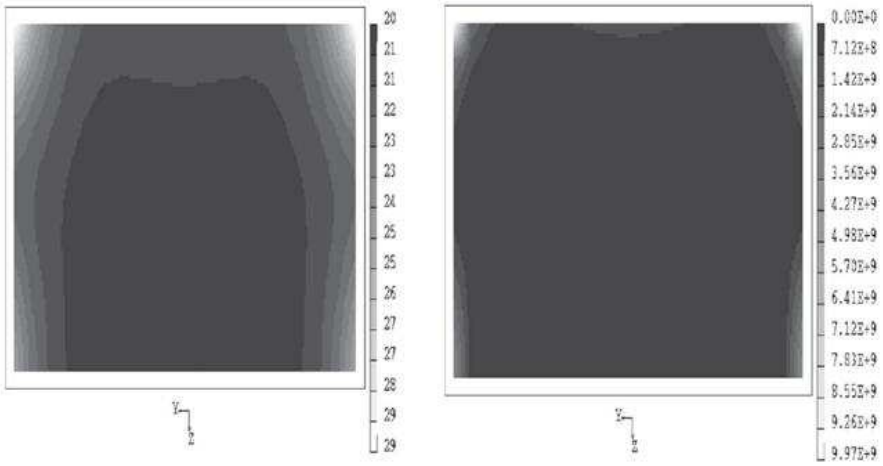


Şekil 3.1 : Maxwell Denklemlerinin belli bir ortamda FDTD kullanarak çözebilmek için kullanılan Yee birim hücresi.

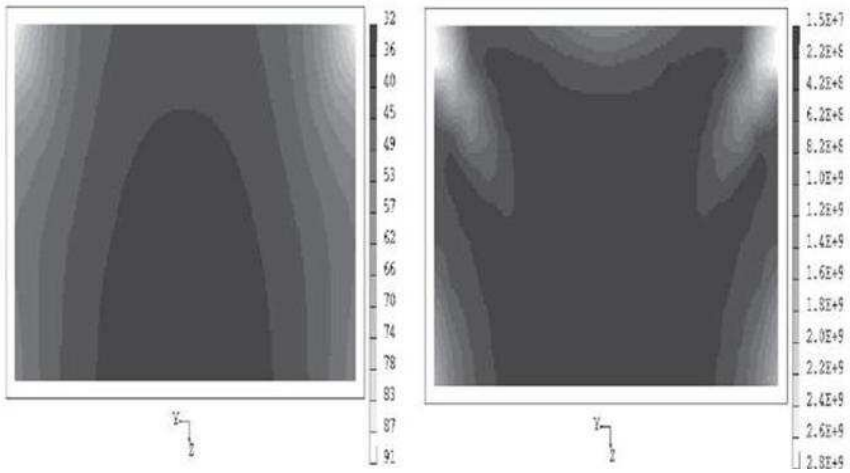
Yee hücresinde, elektrik alanın x bileşeni; x yönünde uzanan kenarın, y bileşenin; y yönünde uzanan kenarın, z bileşeni; z yönünde uzanan kenarın orta noktasına yerleştirilmiştir. Manyetik alanın x bileşeni; y-z düzlemindeki yüzeyin, y bileşeni; x-z düzlemindeki yüzeyin ve z bileşeni; x-y düzlemindeki yüzeyin orta noktasına yerleştirilmiştir.

Dielektrik sabiti ε ve iletkenlik σ, hücre merkezinde $\varepsilon(i,j,k)$ ve $\sigma(i,j,k)$ olarak özelleştirilmişlerdir. Her bir hücre merkezi için dielektrik özellikler tanımlanmıştır.

Kurulan model ile 20 s ve 150 s ısıtılan patateslerin sıcaklık profilleri ve ısı dağılımları, gıda yüzeyi için belirlenmiştir. Şekil 3.2'de 20 s için ve Şekil 3.3'de 150 s için mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin yüzey sıcaklık profili ve ısı dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.2 : t=20 s için mikrodalga ortamda ısıtılan patates yüzeyi için sırasıyla sıcaklık profili T (°C) ve ısı dağılımı Q (Wm^{-3}).



Şekil 3.3 : t=150 s için mikrodalga ortamda ısıtılan patates yüzeyi için sırasıyla sıcaklık profili T (°C) ve ısı dağılımı Q (Wm^{-3}).

Modelleme sonuçlarına göre; sıcaklık değişimi ve ısı dağılımı, gıdanın dielektrik özelliklere bağlıdır. Gıda içindeki ısı dağılımının; her bir hücrenin dielektrik özelliklerinin ayrı ayrı belirlenip bu hücrelerin toplanması ile belirlenebileceği sunulmuştur [9]. Sıcaklık dağılımı, sadece patates üst yüzeyi için 2 boyutlu olarak verildiğinden dolayı derinliğe bağlı sıcaklık değişimi ortaya konmamıştır. Bu da birim hücrelere ayrılan patatesin üst ve alt hücreleri arasındaki sıcaklık dağılımı farkını gösterememiştir.

Mikrodalga ortamda ısı ve kütle transferinin hesaplandığı bir başka analitik ve deneysel çalışma Zhou ve diğerleri (1994) tarafından sunulmuştur.

Kütle transferi için, **(3.12)** eşitliği verilmiştir.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla.(D\nabla M) \tag{3.12}$$

Buharlaşmadan dolayı gerçekleşen nem kaybı için sınır şartlar t>0 için **(3.13)** eşitliğinde ve t=0 için **(3.14)** eşitliğinde sunulmuştur.

$$D\nabla M.\vec{n} = -h_m(M_a - M_s) \tag{3.13}$$

$$M = M_0(x, y, z) \tag{3.14}$$

Yüzeydeki nem kaybı değeri $(\dot{m}_v/A)$, literatürde bulunamadığı için deneysel çalışmalardan yararlanılarak; farkı sıcaklık değerlerindeki nem kayıplarından bir korelasyon oluşturup, yüzeydeki nem kaybı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak sunulmuştur. Yüzeydeki nem kaybı $(\dot{m}_v/A)$, sıcaklığa bağlı ifade edilen kütlesel akı olarak **(3.15)** eşitliğinde görülmüştür.

$$(\dot{m}_v/A) = -9.5946 \times 10^{-4} + 5.5062 \times 10^{-5}T - 2.5469 \times 10^{-7}T^2 - 6.4326 \times 10^{-10} \times T^3 \tag{3.15}$$

(3.15) eşitliğinde; $(\dot{m}_v/A)$ (g/dak cm^2) ve T hava sıcaklığı (°C) olarak verilmiştir. Elde edilen yüzeydeki nem kaybı değeri yani kütlesel akı değerinden kütle transfer katsayısı bulunmuştur.

Yüzeydeki buharlaşma için yüzey kütle transfer katsayısı **(3.16)** eşitliğinde görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$h_m = \dot{m}_v/A \times V_H \tag{3.16}$$

(3.16) eşitliğindeki nem miktarının hacmi (cm^3/g) **(3.17)** eşitliğinden yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$V_H = \frac{2.24 \times (T + 273)}{273}\left(\frac{1}{28.8} + \frac{H}{18}\right) \tag{3.17}$$

(3.17) eşitliğinde, H nem miktarı (kg/kg) için **(3.18)** eşitliği kullanılmıştır.

$$H = \frac{18}{28.8}\left(\frac{p}{101.325 - p}\right) \quad \textbf{(3.18)}$$

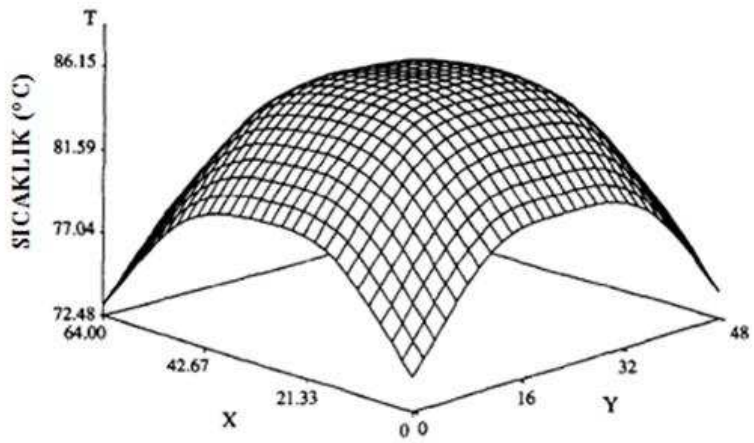
(3.18) eşitliğinde, p kısmi basınç için **(3.19)** eşitliği kullanılmıştır.

$$p = 0.72658exp(0.05647 \times T) \quad \textbf{(3.19)}$$

(3.16) eşitliğnde h_m (cm/s) ve **(3.17)**, **(3.19)** eşitliklerinde T (°C)' dir.

Modelde difüzyon katsayısı (D), 1.4x10^{-9} m^2/s olarak alınmıştır.

Mikrodalga ortamda kartezyen koordinattaki (64x48x30) mm ölçülerindeki patatesin 60 s için modelde hesaplanan nem dağılımı Şekil 3.4'de sunulmuştur. Patates merkezinde kenarlara ve köşelere göre nem içeriğinin daha fazla olduğu görülmüştür.



Şekil 3.4 : Mikrodalga ortamda kartezyen koordinattaki (64x48x30) mm ölçülerindeki patatesin 60 s için modelde hesaplanan nem dağılımı (x-y düzlemi z=15 mm'de yerleştirilmiştir).

Isı transferi için; **(2.34)** ve **(2.39)** eşitliğinden yararlanılmıştır. Birim hacim başına düşen ısı miktarı **(3.20)** eşitliğnde görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

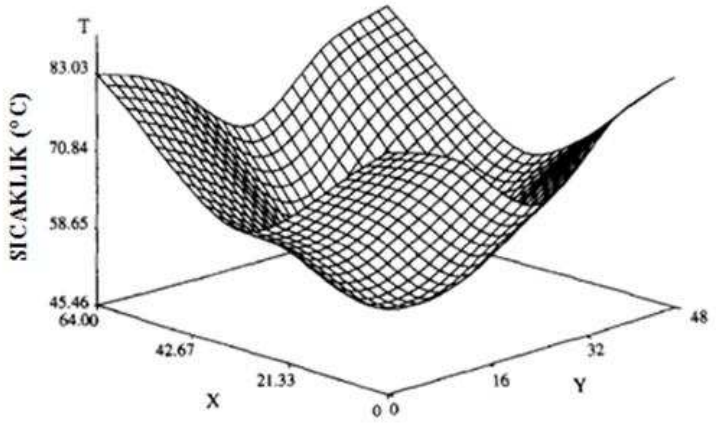
$$Q = \frac{\partial P_x}{\partial V} + \frac{\partial P_y}{\partial V} + \frac{\partial P_z}{\partial V} \quad \textbf{(3.20)}$$

Isı transferi için sınır şartlar t>0 için **(3.21)** eşitliğinde ve t=0 için **(3.22)** eşitliğinde görülmüştür.

$$k\nabla T.\vec{n} = -h(T_a - T_s) - \dot{m}_v / A\,\Delta H_V \quad \textbf{(3.21)}$$

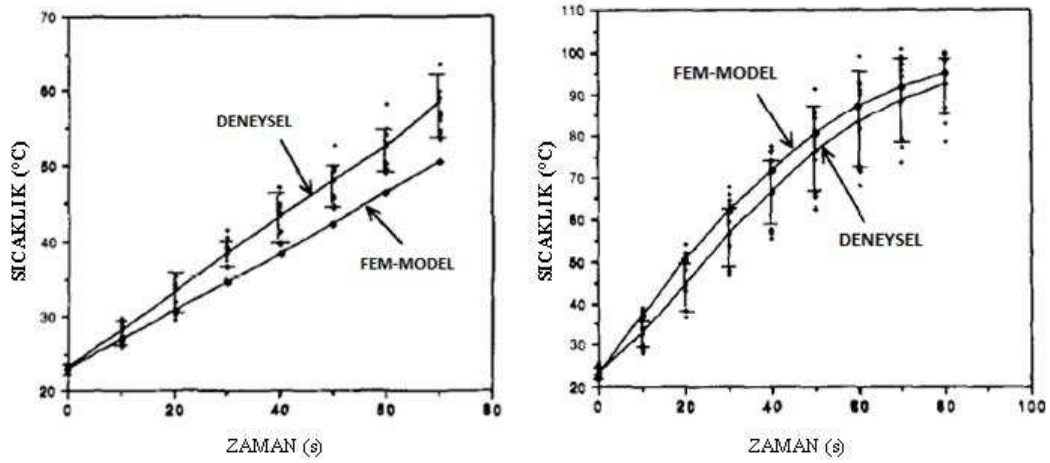
$$T = T_0(x, y, z) \quad \textbf{(3.22)}$$

Mikrodalga ortamda kartezyen koordinattaki (64x48x30) mm ölçülerindeki patatesin 60 s için modelde hesaplanan sıcaklık dağılımı Şekil 3.5'de görülmüştür. Patates merkezinde kenarlara ve köşelere göre sıcaklığın daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 3.5 : Mikrodalga ortamda kartezyen koordinattaki (64x48x30) mm ölçülerindeki patatesin 60 s için modelde hesaplanan sıcaklık dağılımı (x-y düzlemi z=15 mm'de yerleştirilmiştir).

Modelde hesaplan ve deneyden elde edilen sıcaklık sonuçları, kartezyen koordinatta sırasıyla patatesin geometrik merkezi ve üst köşe noktası için Şekil 3.6'da karşılaştırılmıştır. Patates merkezi için yapılan karşılaştırmada; modelden elde edilen sıcaklık değişimi deneysel çalışmadan elde edilen değere göre, üst köşe noktası için yapılan karşılaştırmada ise deneysel çalışmadan elde edilen sıcaklık değişimi modelden elde edilen değere göre daha düşük çıkmıştır. Bu da patatesin sıcaklık dağılımı için oluşturulan modelin, her bir nokta için ne kadar farklı ve detaylı çalışılması gerektiğini göstermektedir.



Şekil 3.6 : Modelde hesaplan ve deneyden elde edilen sıcaklık sonuçlarının kartezyen koordinatta sırasıyla patatesin geometrik merkezi ve üst köşe noktası için karşılaştırılması.

Deneylerle desteklenen modelin sonucunda görülmüştür ki; kartezyen koordinattaki patateste mikrodalga ısıtma sırasında sıcaklığın daha düşük olduğu ve nem içeriğinin daha yüksek olduğu bölgeler, geometrik merkezin yakınındaki noktalardır.

Deneysel sonuçlarla FEM modelinden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; sıcaklık farkının 8.1 °C yani %15.5 olduğu, nem farkının ise %2.4 olduğu görülmüştür [10].

Şumnu ve ark. (2009) tarafından yapılan çalışmada; donmuş patates püresinin mikrodalga ısıtma ve infrared destekli mikrodalga ortamda ısıtılması için kurulan modeller karşılaştırılmıştır.

İnfrared ısıtma, 0.5 ve 100 μm dalgaboyu arasındaki elektromanyetik spektrumun parçasıdır. İnfrared ısıtmanın dalga boyları; kısa (0.5-2 μm), orta (2-4 μm) ve uzun (4 μm'nin üstünde) olarak tanımlanmaktadır. Çalışmada, model kısa dalga boylu infrared ile desteklenen mikrodalga ısıtma için kurulmuştur.

Bir boyutlu kararsız durum için ısı iletim denklemleri kısa dalga boylu infrared ile desteklenen mikrodalga ısıtma için **(3.23)** eşitliğinde görüldüğü gibi kullanılmıştır.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho C_p T\right) = \frac{\partial}{\partial z}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) + Q_{gen} \qquad \textbf{(3.23)}$$

(3.23) eşitliğindeki, k ısıl iletkenlik (W/m°C) **(3.24)** eşitliğinde görüldüğü gibi sıcaklığa bağlı olarak tanımlanmıştır.

$$k(T) = 2.01 + 1.39 \times 10^{-3} \times T - 4.33 \times 10^{-6} \times T^2 \qquad \textbf{(3.24)}$$

(3.23) eşitliğindeki Q_{gen} toplam ısı üretim kaynağı olup ve **(3.25)** eşitliğinde görüldüğü gibi sunulmuştur.

$$Q_{gen} = Q_{gen,mw} + Q_{gen,inf} \qquad \textbf{(3.25)}$$

(3.25) eşitliğinde; $Q_{gen,mw}$ mikrodalga ısıtmanın enerjisinden kaynaklanan iç ısı üretimi (W/m^3) ve $Q_{gen,inf}$ infrared ısıtmanın enerjisinden kaynaklanan iç ısı üretimi (W/m^3)'dir.

İnfrared güç akısı, modelde mikrodalga gücünde olduğu gibi, benzer şekilde **(3.26)** eşitliğinde görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$Q_{gen,inf} = Q_{0,inf} e^{-(z/d_{p,inf})} \quad \textbf{(3.26)}$$

(3.26) eşitliğinde; $Q_{0,inf}$ infrared yüzey akısı ve $d_{p,inf}$ tam olarak mikrodalga penetrasyon derinliği gibi tanımlanan infrared penetrasyon derinliğidir. $d_{p,inf}$, patates için 3.5 mm olarak alınmaktadır. $Q_{0,inf}$, uygun deneysel datalardan deneyerek tahmini olarak alınmıştır.

Modelin çözümünde açık sonlu farklar metodu kullanılmıştır. Isı kapasitesi, ısıl iletkenlik ve penetrasyon derinliği sıcaklığa bağlı olarak kullanılmıştır. Modelde belirtilen çözüm yönteminde **(3.27)** eşitliğinden **(3.30)** eşitliğine kadar olan eşitlikler kullanılmıştır.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad \textbf{(3.27)}$$

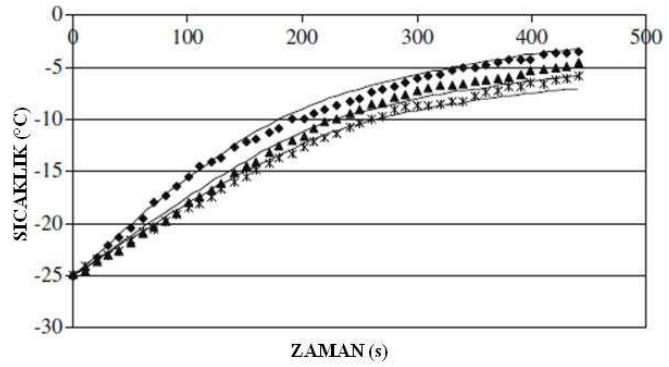
$$\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta z} \quad \textbf{(3.28)}$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(k(T)\frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{\partial k}{\partial T}.\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2 + k(T).\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \textbf{(3.29)}$$

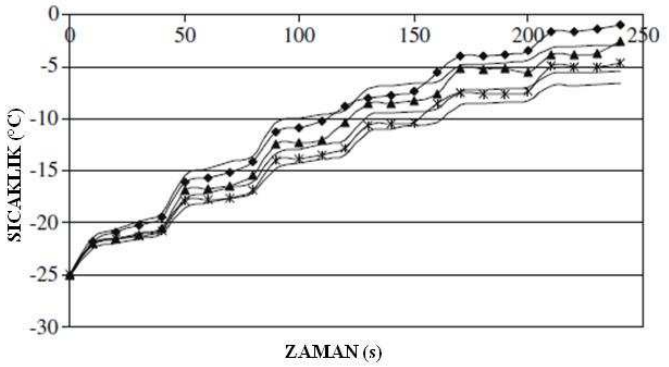
$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n}{(\Delta z)^2} \quad \textbf{(3.30)}$$

Deneysel çalışmalar ve modelden elde edilen sıcaklık sonuçları; mikrodalganın farklı güçleri ve farklı seviyelerdeki infrared ısıtma ile desteklenen farklı güçlerdeki mikrodalga ısıtmanın kullanıldığı hacimde, 2.5 cm kalınlığındaki patates püresinin farklı derinlikleri için Şekil 3.7'den Şekil 3.10'a kadar olan şekillerde karşılaştırılmıştır.

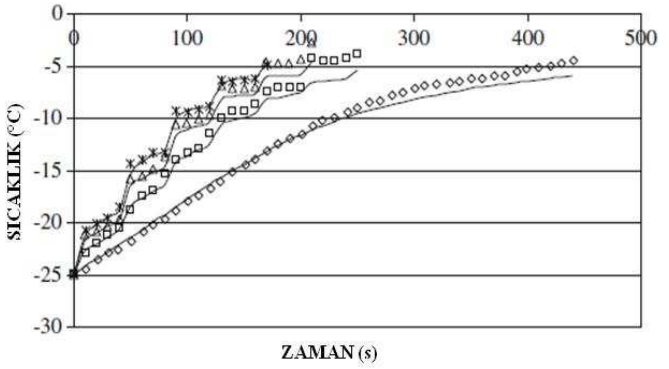
Şekil 3.7'de aynı güç seviyesinde, patates merkezindeki farklı derinliklerde sıcaklık dağılımının nasıl değiştiği görülmektedir. Derinlik arttıkça sıcaklık değerleri azalmaktadır. Bu da mikrodalga ısıtmada penetrasyon derinliğinin etkisini ortaya koymaktadır. Şekil 3.8, 3.9 ve 3.10 incelendiğinde, infrared ısıtma ile desteklenen mikrodalga ısıtmada, ısıtma süresinin kısaldığı yada güç seviyelerindeki değişim ile de sürenin kısalabileceği görülmüştür. Ayrıca gıda üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru artan derinliklerde sıcaklık değerinin daha düşük değerlerde kaldığı görülmektedir.



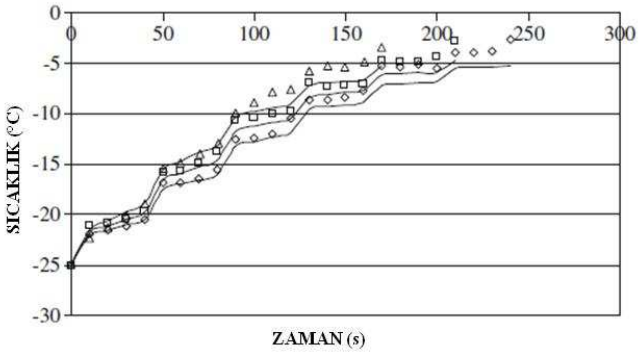
Şekil 3.7 : %40 mikrodalga gücündeki ısıtmada patates püresinin modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (♦) 0.5 cm için deneysel sonuçlar, (▲) 1.5 cm için deneysel sonuçlar, (∗) 2.5 cm için deneysel sonuçlar, (-) model sonuçları.



Şekil 3.8 : %20 infrared ısıtma gücüyle desteklenmiş %30 mikrodalga gücündeki ısıtmada patates püresinin modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (♦) 0.5 cm için deneysel sonuçlar, (▲) 1.5 cm için deneysel sonuçlar, (∗) 2.5 cm için deneysel sonuçlar, (-) model sonuçları.



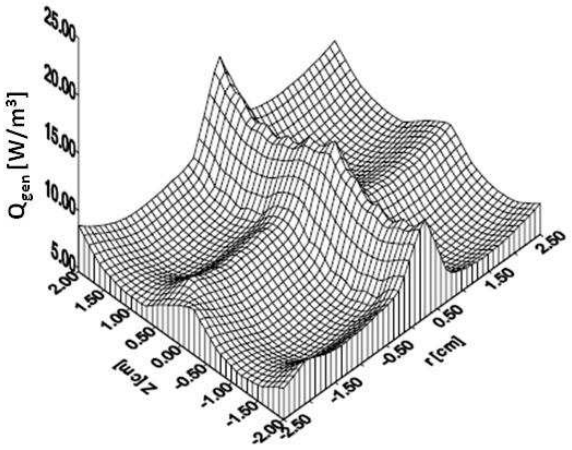
Şekil 3.9 : Farklı infrared ısıtma güçleriyle desteklenmiş %40 mikrodalga gücündeki ısıtmada patates püresinin 1.5 cm derinlik için modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (◊) %0 P_{inf} için deneysel sonuçlar, (□) %10 P_{inf} için deneysel sonuçlar, (Δ) %20 P_{inf} için deneysel sonuçlar, (∗) %30 P_{inf} için deneysel sonuçlar, (-) model sonuçları.



Şekil 3.10 : %20 infrared ısıtma gücüyle desteklenmiş farklı mikrodalga güçlerindeki ısıtmada patates püresinin, 1.5 cm derinlik için modelden elde edilen ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık sonuçlarının karşılaştırılması. (◊) %30 P_{mw} için deneysel sonuçlar, (□) %40 P_{mw} için deneysel sonuçlar, (Δ) %50 P_{mw} için deneysel sonuçlar, (-) model sonuçları.

Çalışma sonucu 3.7'den Şekil 3.10'a kadar olan şekillerde de olduğu gibi görülmüştür ki; mikrodalga ısıtma ve infrared destekli mikrodalga ısıtmada, sıcaklık dağılımları birbirinden çok farklıdır. Mikrodalga ısıtmada sıcaklık profili eğri şeklindeyken, infrared destekli mikrodalga ısıtmada sıcaklık profili kırık çizgi şeklindedir. Her iki ısıtmada da, gıda merkezinde derinlik arttıkça sıcaklık profilinin değeri düşmüştür. Mikrodalga yada infrared ısıtma gücündeki artış yada mikrodalganın ısıtmanın infrared ile desteklenmesi ısıtma süresini azaltmıştır [11].

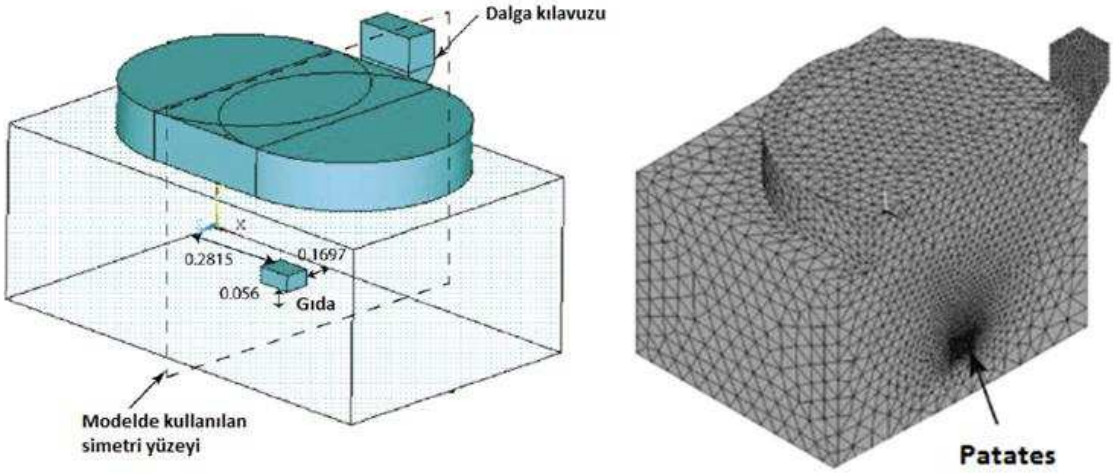
Pandit ve ark. (2003) tarafından yapılan çalışmada, mikrodalga ısıtma silindirik koordinatta modellendirilmiştir. 2.5 cm yarı çapında (r), 4 cm uzunluğundaki (Z) silindirik kesite sahip patates için absorblanan mikrodalga gücü (Q_{gen}) Şekil 3.11'de verilmektedir.



Şekil 3.11 : 2.5 cm yarı çapında (r), 4 cm uzunluğundaki (Z) silindirik kesite sahip patates için absorblanan mikrodalga güç değişimi (Q_{gen}).

Yapılan çalışmada, silindir şeklindeki patateste merkezden uzaklaşıp yüzeylere yaklaştıkça absorblanan mikrodalga gücünün, merkeze göre azaldığı görülmüştür [12].

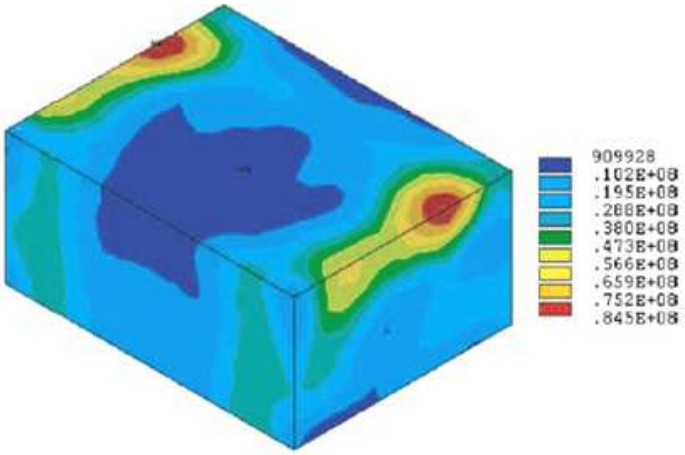
Datta ve diğerleri (2008) tarafından yapılan çalışmada; jet impingement (sıcak hava ile ısıtma) destekli mikrodalga ısıtma modellenmiştir. Mikrodalga güç kaybının (ısıya dönüşen gücün) hacim içinde dağılımı simülasyon programı ile belirlenip, model çalışmalarında patates için güç kaybı bu program ile hesaplanmıştır. Çalışmada, elektromanyetik hesaplamalar ANSYS programında, ısı transferi denklemlerinin çözümü ise FIDAP programında yapılmştır. Şekil 3.12' de sırasıyla ısıtılan hacim (0.61 m x 0.375 m x 0.235 m), dalga kılavuzunun şeması ve elektromanyetik simülasyon için ANSYS programında oluşturulan sonlu eleman ağları görülmüştür.



Şekil 3.12 : Sırasıyla ısıtılan hacim (0.61 m x 0.375 m x 0.235 m), dalga kılavuzunun şeması ve elektromanyetik simülasyon için ANSYS programında oluşturulan sonlu eleman ağları.

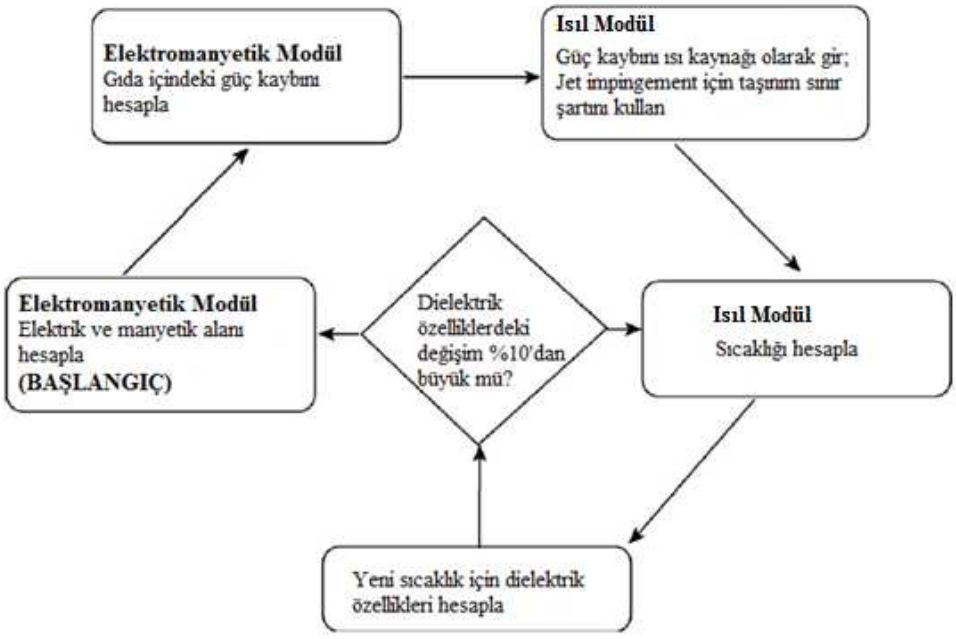
Elektromanyetik simülasyon için ağlara ayrılan ısıtılan hacim 120000 elemandan oluşmuştur. Bu ağlar kullanılarak güç kaybı hesaplanmıştır. Şekil 3.13'de ısıtılan hacim içinde hesaplanan güç kaybı (ısıya dönüşen güç) sunulmuştur. Isıtılan hacim içerisinde, gıda ve dalga kılavuzunun oluşturduğu hacimde güç kaybının en çok üst yan yüzeylerin birleştiği yerde olduğu görülmüştür. Bu analiz ile mikrodalga kaynağının hacim içerisindeki dağılımı ortaya konularak; gıdanın hangi yüzeyinin ne ne oranda mikrodalgadan etkilendiği belirlenerek, model içerisinde kullanılmıştır. Mikrodalga güç kaybının en çok üst yan yüzeylerin birleştiği yerde olduğunun

görülmesi; patatesin bu noktalarında, aynı süre içerisinde diğer noktalara göre sıcaklık değerlerinin daha yüksek olacağı anlamına gelmektedir.



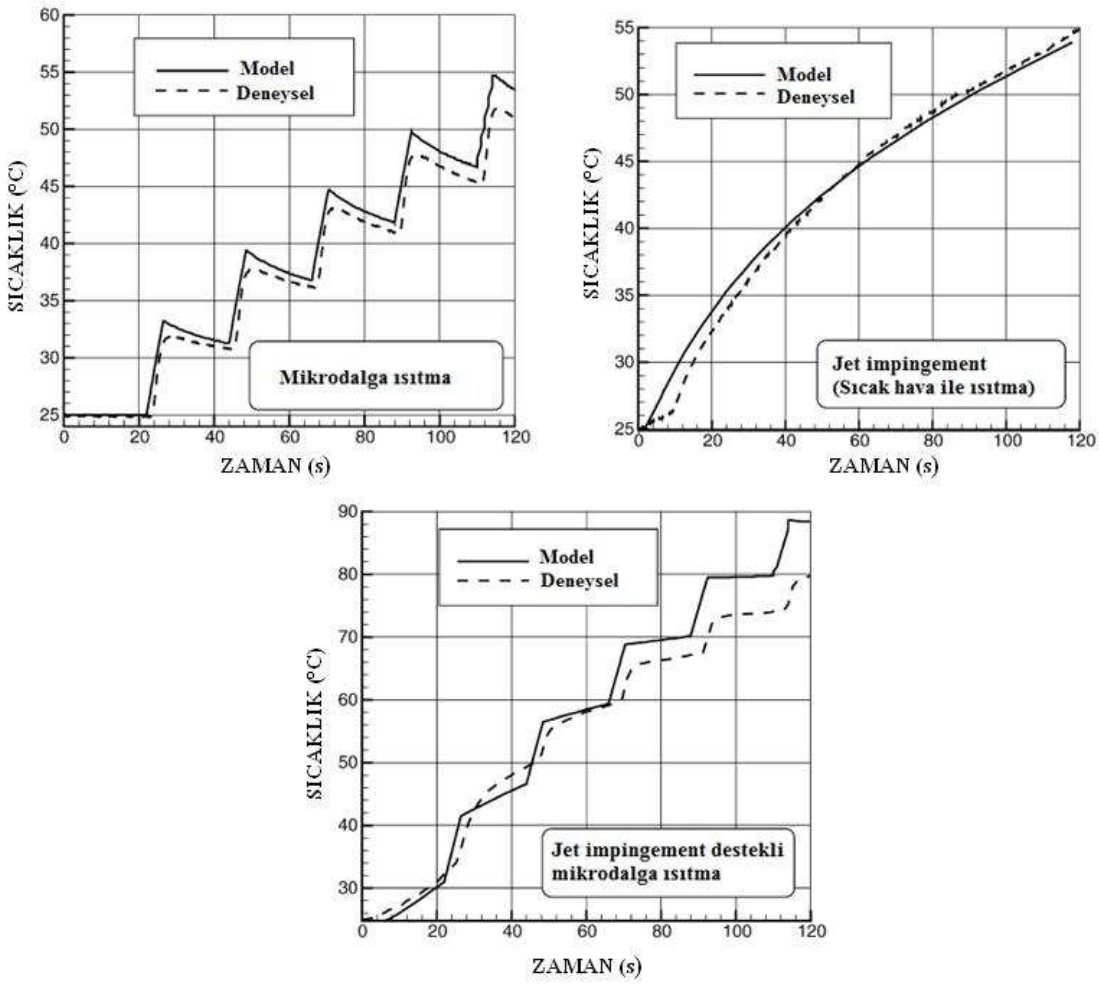
Şekil 3.13 : Patates ve dalga kılavuzundan oluşan hacimde güç kaybının dağılımı.

Şekil 3.14'de model akış şeması görülmüştür. Akış şemasında, dielektrik özelliklerdeki değişim %10'dan küçükse; ısıl modül kısmında sıcaklığın hesaplandığı, değişim %10'dan büyük ise; elektromanyetik modülden başlanarak ısıl modüle geçildiği belirtilmiştir. Mikrodalga ortam için yapılan ısıl hesaplamalarda jet impingement taşınım sınır şartı olarak kullanılarak, hesaplamalara dahil edilmiştir.



Şekil 3.14 : Jet impingement (sıcak hava ile ısıtma) destekli mikrodalga ısıtma model akış şeması.

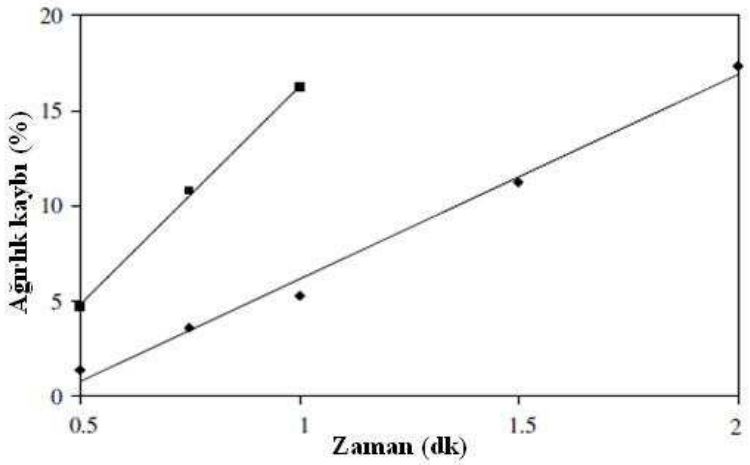
Şekil 3.15'de deneysel çalışmalar ve modelden elde edilen sıcaklık sonuçları karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.15 : Deneysel çalışmalar ve modelden elde edilen sıcaklık sonuçlarının yüzeye yakın bölgede sırasıyla mikrodalga ısıtma, jet impingement ısıtma ve jet impingement destekli mikrodalga ısıtma için karşılaştırılması.

Şekil 3.15'de de görüldüğü gibi, modelden elde edilen sonuçlara göre; jet impingement destekli mikrodalga ısıtmada başlangıçta patates yüzeyine yakın bölgelerde jet impingement ısıtma daha baskın olup, mikrodalga ısıtma ise patates merkezinde daha baskındır. Belli bir süreden sonra, yüzeye yakın bölgelerde mikrodalga ısıtma daha baskın olup, jet impingement ısıtma ise patates merkezinde daha baskındır. Patates yüzeyinde mikrodalga ısıtma ile elde edilen sıcaklık dağılımın kırık çizgiler oluşturması düşük güçteki mikrodalga ısıtma ile çalışılmasından kaynaklanmıştır [13].

Şumnu ve ark. (2004) tarafından yapılan deneysel çalışmada pişirme yöntemleri gıda parametrelerine göre kıyaslanmıştır. Şekil 3.16'da mikrodalga ortamda farklı iki güç için ekmeğin zamanla değişen ağırlık kaybı görülmüştür.



Şekil 3.16 : Mikrodalga ortamda iki farklı güç için pişirilen ekmeğin ağırlık kaybı. (♦) %50; (■) %100.

Deneysel çalışmalar sonucunda görülmektedir ki; mikrodalga gücü arttıkça ağırlık kaybı artmıştır [14].

3.2 Gıdaların Dielektrik Özellikleriyle İlgili Çalışmalar

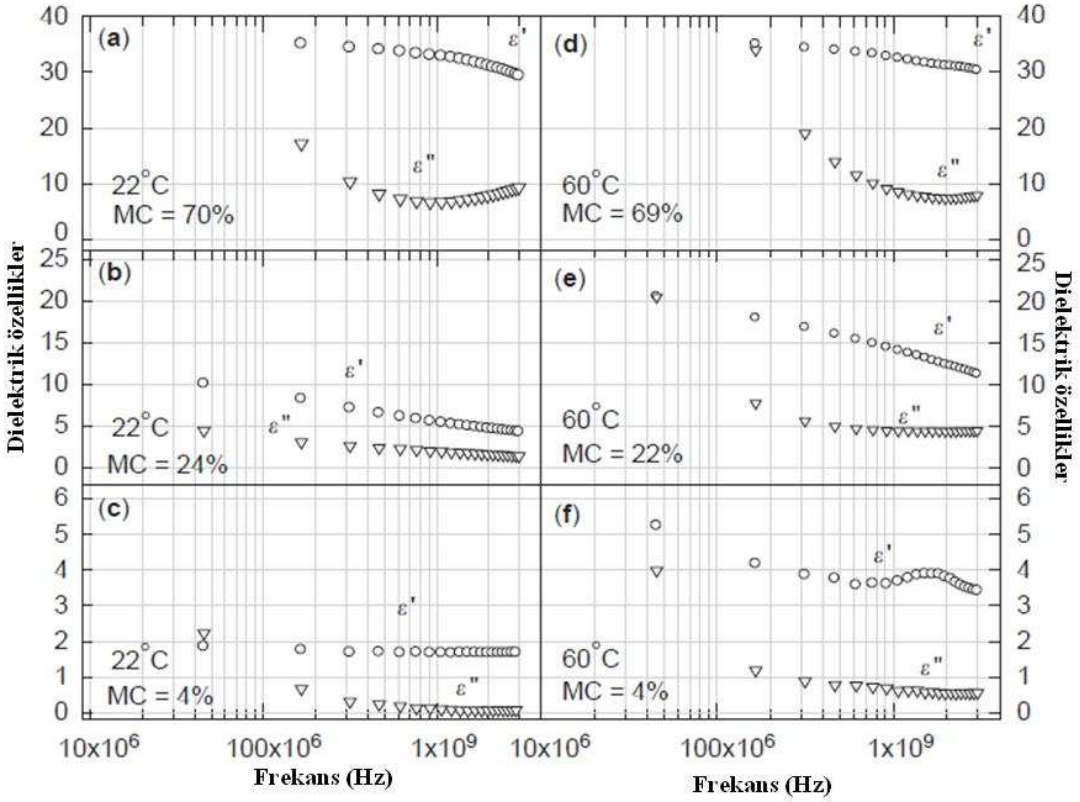
Bircan (2006) tarafından yapılan deneysel çalışmada, bazı gıda bileşenlerinin dielektrik özellikleri farklı frekans ve sıcaklıklarda belirlenmiştir.

Dielektrik özellikler, gerçek kısım (dielektrik sabiti, ε') ile sanal kısmın (dielektrik kayıp faktörü, ε'') birleşmesinden oluşan röletif kompleks bir sayıdır.

Gıdaların su ve iyonik içeriği, özellikle $Na^{+}Cl^{-}$, o gıdanın dielektrik özelliklerini etkileyen iki ana faktör olarak karşımıza çıkmıştır. Diğer gıda bileşenlerinin dielektrik özellikler üzerine etkilerinin ise belirtilen bu bileşiklerle karşılaştırıldığında çok daha az olduğu saptanmıştır.

Gıdaların dielektrik özellikleri, değişik frekanslara ve sıcaklıklara göre önemli değişiklikler göstermiştir. Genellikle gıda ısıtma işlemlerinde belirli frekanslar kullanılmakta ise de, dielektrik özelliklerin değişik frekanslardaki değerlerinin bilinmesi, bu gıda materyalinin ne kadar sürede istenilen düzeyde ısıtılacağının tespit edilmesi açısından önemlidir [15].

Komarov ve ark. (2005) tarafından yapılan çalışmada dielektrik özellikler ve ölçümlerinden bahsedilmiştir. Şekil 3.17'de kırmızı elmanın dielektrik özelliklerinin, gıdanın nem içeriğine (MC), sıcaklığına ve frakansa bağlı olarak değişimi sunulmuştur.

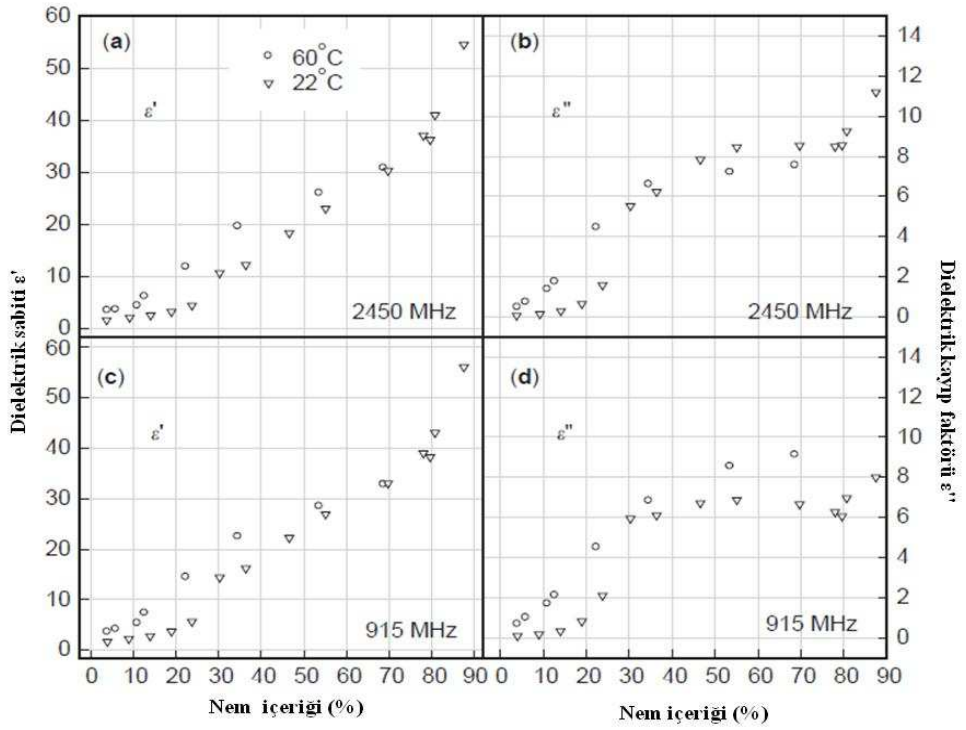


Şekil 3.17 : Kırmızı elmanın dielektrik özelliklerinin, gıdanın nem içeriğine, sıcaklığına ve frekansa bağlı olarak değişimi [16].

Yüksek nem içeriğinde (%70) artan frekansla, dielektrik sabiti ε' azalırken, dielektrik kayıp faktörü ε'' azalıp minimum değerini almış ve sonra frekansla artmıştır (Şekil 3.17 (a)-(d)).

Şekil 3.18'de 915 ve 2450 MHz frekansta, 22 ve 60 °C'deki kırmızı elmaların değişen nem içeriği (MC) ile dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp faktörü ε'' arasındaki ilişki görülmüştür.

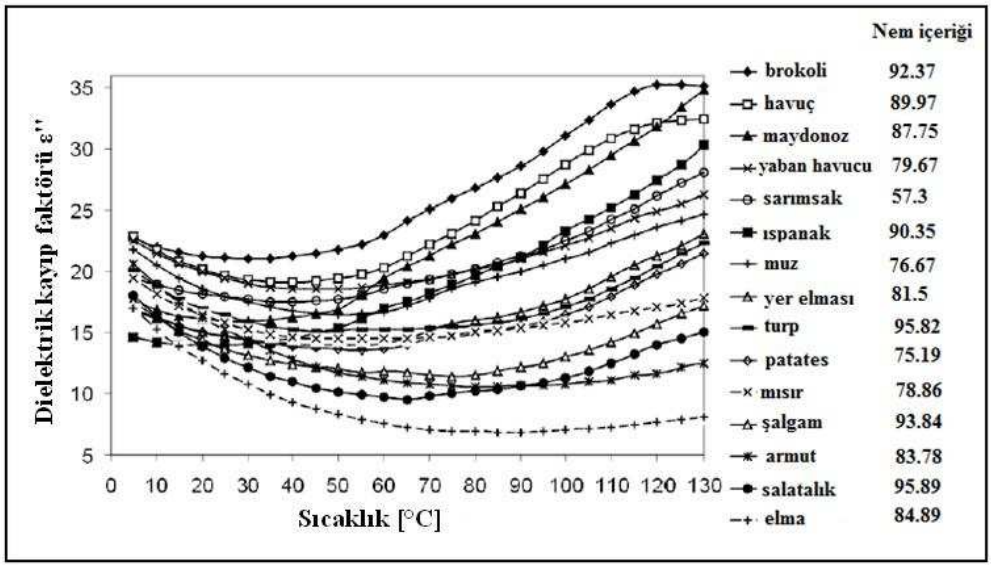
Genel olarak, dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp faktörü ε'', azalan nem içeriğine bağlı olarak azalmıştır. Aynı nem içeriği ve frekans değerine sahip elmalarda sıcaklık değeri daha yüksek olan elmanın genel olarak dielektrik özelliklerinin daha yüksek bir değerde olduğu görülmektedir. Aynı nem içeriği ve sıcaklık değerine sahip elmalarda frekans değeri daha yüksek olan elmanın genel olarak dielektrik özelliklerinin daha yüksek bir değerde olduğu görülmektedir. Yapılan bu yorumlar genel bir ifade olup; her nem, frekans ve sıcaklık değeri için aynı değildir. Gıdalar için böyle bir genelleme yapmak zordur [16].



Şekil 3.18 : 915 ve 2450 MHz frekansta, 22 ve 60 °C'deki kırmızı elmaların değişen nem içeriği ile dielektrik sabiti ε' ve dielektrik kayıp faktörü ε'' arasındaki ilişki [16].

Sipahioğlu ve ark. (2003) tarafından yapılan deneysel çalışmada, sebze ve meyvelerin dielektrik özellikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.19'da belirli nem miktarlarındaki sebze ve meyvelerin, 2450 MHz frekansta sıcaklıkla değişen dielektrik kayıp faktörleri ε'' görülmüştür.



Şekil 3.19 : Belirli nem miktarlarındaki sebze ve meyvelerin , 2450 MHz frekansta sıcaklıkla değişen dielektrik kayıp faktörleri ε'' [17].

Çizelge 3.1'de, Şekil 3.19'da verilen sebze ve meyvelerin 2450 MHz frekansta sıcaklıkla değişen dielektrik kayıp faktörleri ε'' için oluşturulan korelasyon ve korelasyon için gerekli kat sayılar sunulmuştur.

Çizelge 3.1 : Sebze ve meyvelerin 2450 MHz frekansta sıcaklıkla değişen dielektrik kayıp faktörleri ε" için oluşturulan korelasyon için gerekli kat sayılar.

	Dielektrik kayıp faktörleri ε'' ($a+bT+cT^2$)			
Gıdalar	**a**	**b**	**c**	**R^2**
Brokoli	20.89	-0.02420	0.001174	0.915
Havuç	21.68	-0.1040	0.0016	0.927
Sarımsak	19.62	-0.09577	0.001250	0.957
Maydonoz	16.45	-0.04048	0.001434	0.938
Yaban havucu	22.40	-0.1385	0.001332	0.893
Patates	17.79	-0.1357	0.001370	0.893
Turp	20.36	-0.1825	0.001517	0.846
Ispanak	14.17	-0.02897	0.001176	0.989
Şalgam	17.99	-0.1965	0.001471	0.907
Yer elması	17.59	-0.1192	0.001371	0.899
Elma	17.23	-0.2407	0.001348	0.974
Muz	21.28	-0.1536	0.001450	0.895
Mısır	19.02	-0.1355	0.001004	0.883
Salatalık	18.41	-0.2474	0.001746	0.916
Armut	20.95	-0.2498	0.001453	0.854

Dielektrik kayıp faktörü ε'', sıcaklığın ikinci derece bir fonksiyonu olarak önce azalıp sonra artmıştır [17].

Literatür araştırması ile görülmüştür ki; mikrodalga ısıtmanın modellenmesi farklı geometrideki gıdalar için uygulanmıştır. Çalışmalarda asıl olarak mikrodalga ısıtmanın modellenmesi üzerinde durularak, kütle transferi ya incelenmemiş ya da bazı kabuller, deneysel çalışmalar yardımıyla incelenmiştir. Mikrodalga ısıtma ve farklı ısıtma yöntemleriyle desteklenen mikrodalga ısıtmanın karşılaştırıldığı pek çok çalışmanın olduğu görülmüştür. Bu çalışmalarda, gıdayı ısıtma süresi bakımından avantaj sağlayan mikrodalga ısıtmanın diğer eksikleri farklı modlarla desteklenerek oluşturulan hibrid ısıtma ile giderilmeye çalışılıp, bu ısıtma modellenmiştir. Günümüze yakın tarihli çalışmalarda ise, mikrodalga güç kaybının hacim içinde dağılımının analiz programlarıyla belirlenmesiyle, daha doğru ve deneysel

çalışmalara daha yakın sonuçlar verebilen modeller kurulabilmiştir. Gıda parametreleri açısından bakıldığında da, gıdaların dielektrik özellikleri için kesin genellemeler yapmanın mümkün olamayacağı, her gıda tipi için dielektrik özelliklerin neme, sıcaklığa ve frekansa bağlı değişiminin birbirinden çok farklı olduğu yapılan literatür çalışmasından elde edilmiştir.

Literatür araştırması sonucunda görülen önemli bir nokta ise, enerji korunumunda kaynak terimi olarak kullanılan mikrodalganın, ısıya dönüşen kayıp mikrodalga gücü olarak adlandırılmasıdır. Mikrodalga gücü iletildiği zaman, kaynağa geri dönen gücün dışındaki güç ısıya dönüşür. İletilen güç ve yansıyan gücün farkı olan bu güç; cisim üzerinde harcanan kayıp güç olup, ısıya dönüşmektedir. Gıdalar kayuplı malzemelerdir. Yani, gücün bir kısmını yansıtır, bir kısmını geçirir ve önemli bir kısmını da üzerinde harcarlar. Bu nedenle ısıya dönüşen mikrodalga gücünün hesabında yer alan dielektrik kayıp faktörü önemli bir parametredir.

Literatür araştırmasında, modelleme çalışmalarında gıdaya ait özgül ısı (C_p), yoğunluk (ρ), ısı iletim kat sayısı (k), difüzyon kat sayısı (D) ve dielektrik kayıp faktörü (ε'') gibi değerlerin genellikle sabit alındığı; sıcaklık, nem gibi değişkenlere bağlı korelasyonlar oluşturulmadığı görülmektedir. Bu tez kapsamında gıdaya ait özellikler uygun değişkenlere bağlı olarak model içerisinde kullanılmaktadır. Böylece daha hassas ve daha doğru sonuçların elde edildiği düşünülmektedir.

Literatürde görülen modelleme çalışmalarında hesaplama kolaylığı ve kullanılan yöntemden dolayı gıdalar hücrelere ayrılmaktadır. Deneysel çalışmalarda genellikle gıda merkezi yada yüzeye yakın köşe noktalardan sıcaklık ölçümü yapılmaktadır. Yüzeye yakın olarak adlandırılan hücrelerin hangi yönde olduğu sunulmamaktadır. Bu sonuçlar, genelde patates içindeki sıcaklık dağılımını 3 boyut için ayrıntılı olarak gösterememektedir. Bunun nedeni olarak mikrodalga ortamda sıcaklık ölçümünün zor olduğu, kullanılan probların ısıtma sırasında gıda içerisinde sabit durmaması sunulup, deneylerde sıcaklık ölçümü yapılacak noktaların sınırlı olduğu vurgulanmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında patates içindeki pek çok hücre için sıcaklık ölçümü yapılıp, sıcaklık dağılımı farklı noktalardan ölçüm alınarak daha net olarak gösterilmektedir. Deneyler sırasında literatürde bahsedilen zorluklar gözlenmektedir.

Ayrıca, mikrodalganın ısıtılan hacim içerisinde dağılımı çok az sayıdaki çalışmada, analiz programlarıyla belirlenmekte olsa da gıdanın 6 yüzeyine etki eden güç dağılımı net olarak sunulmamaktadır. Bu tez çalışması kapsamında gıda yüzeyine etki eden mikrodalga kaynağının, hangi yüzeye ne oranda etki ettiği analiz programı kullanılmaksızın basit oranlarla denenerek belirlenmektedir. Modelden elde edilen sonuçlar, deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılarak; mikrodalga kaynağı için hacim içerisindeki en uygun dağılım bulunmaya çalışılmaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında asıl üzerinde durulmak istenen mikrodalga ısıtmanın modellenmesidir. Isı transferi sırasında kullanılan gıdaya ait özellikler genellikle nem içeriğine bağlı olduğundan dolayı, daha doğru sonuçlar alabilmek için kütle transferi de modele dahil edilmiştir. Asıl amaç, patates içerisindeki sıcaklık dağılımının belirlenmesidir. Kütle transferinden elde edilecek değerlerin bu dağılımı belirleme de yardımcı olması nedeniyle, kütle transferi de hesaplanmakta olup, bu hesaplamada deneysel çalışmalardan yararlanılmıştır. Bunun da literatürde örnekleri vardır.

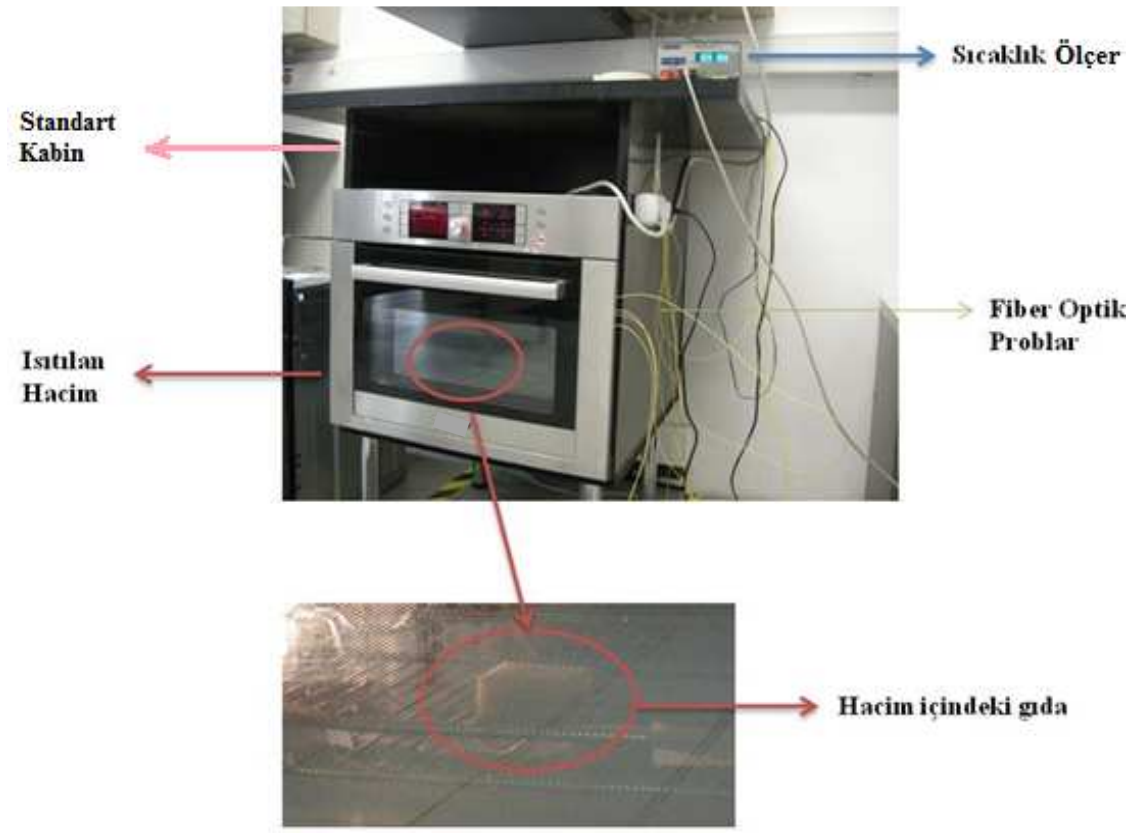
Literatür araştırmasında, yapılan modelleme çalışmalarında mikrodalga ortamda sıcaklık ölçümü için bilinen sistemlerin dışında farklı özellikte bir sistemin kullanıldığı görülmüştür. Mikrodalga ortamda elektrik alan şiddetinden etkilenmeyen fiber optik probların kullanıldığı sıcaklık ölçerler ile ölçüm yapılmıştır. Bu sebeble deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere Neoptix markasının V1001 Reflex model 4 kanallı fiber optik sıcaklık ölçeri tedarik edildi.

4. DENEY SİSTEMİ

Tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda, mikrodalga ısıtmanın kullanıldığı hacimlerde gıda içindeki sıcaklık dağılımını gözlemleyebilmek için sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

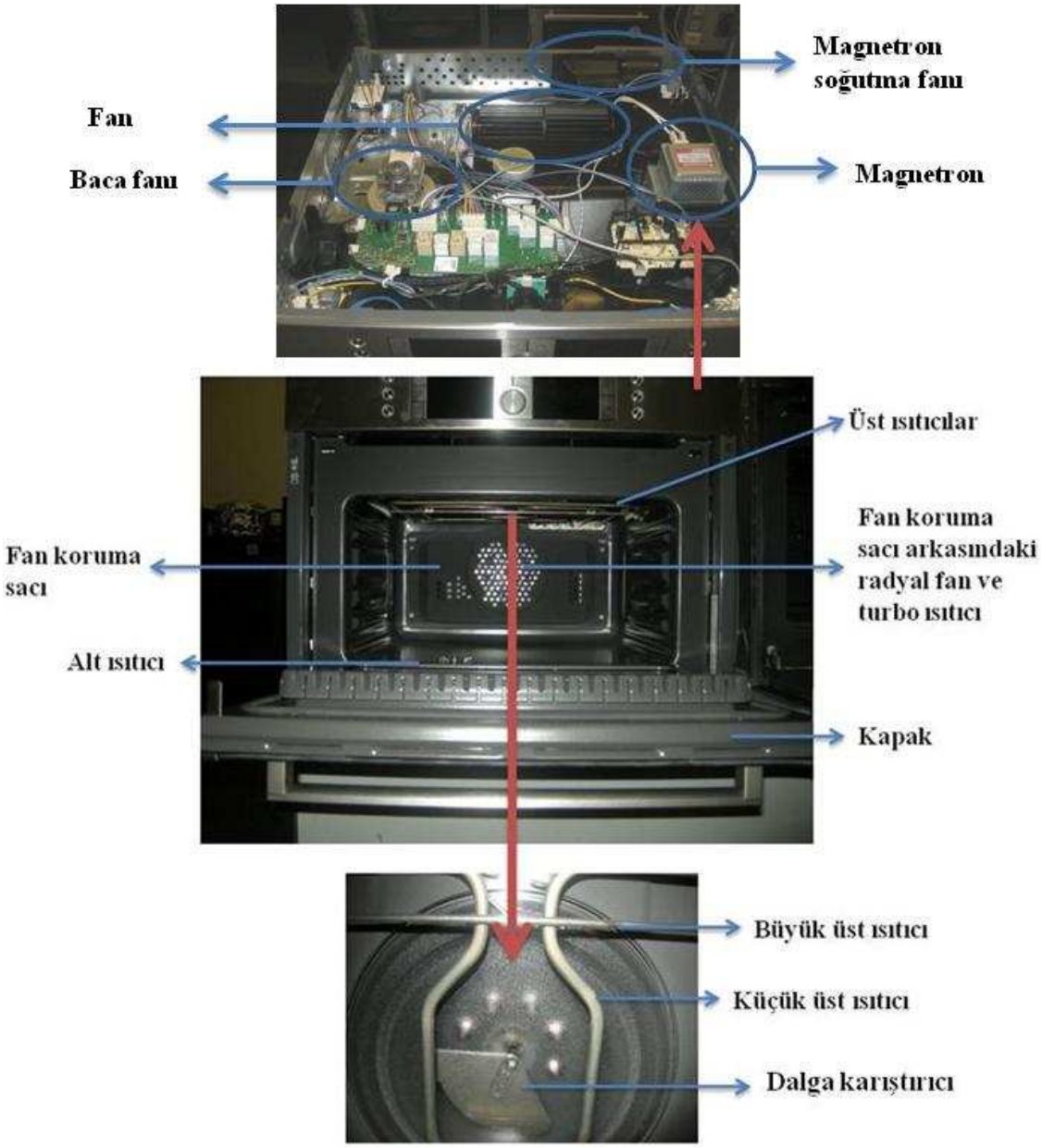
4.1 Deney Düzeneğinin Tanıtılması

Deneyler, ısıtılan hacmin bulunacağı mutfağı simgeleyen bir deney düzeneğinde yapılmaktadır. Deney yapılırken, ısıtılan hacim mutfaktaki mobilyayı temsil eden standart bir kabin içinde bulunmaktadır. Şekil 4.1'de standart kabin, ısıtılan hacim, sıcaklık ölçer, fiber optik problar ve gıdadan oluşan deney düzeneğinin görünüşü sunulmaktadır.



Şekil 4.1 : Deney sistemi bileşenleri ve genel görünüşü.

Yapılan deneylerde kullanılan ısıtılan hacimin elemanlarının detaylı gösterimi Şekil 4.2'de sunulmaktadır. Isıtılan hacim, geleneksel hacimlerin sahip olduğu ısıtıcılara ek olarak mikrodalga ısıtma özelliğini sağlayan magnetrona da sahip hibrid ısıtma yapabilen bir hacimdir.



Şekil 4.2 : Isıtılan hacimin elemanlarının görünüşü.

Isıtılan hacimin boyutları ise yükseklik, genişlik, derinlik ve hacim için Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1 : Isıtılan hacim boyutları.

Boyut	Değer
Yükseklik [mm]	454
Genişlik [mm]	595
Derinlik [mm]	531
Hacim [l]	45

Isıtılan hacmin yapısı, Bölüm 2'de ayrıntılı olarak anlatılıp ve Şekil 2.2'de görülmüştür. Bu yapıya ek olarak, 3 adet ısıtıcı bulunmaktadır [18]. Bu ısıtıcılarından turbo ısıtıcı olarak adlandırılan ve ısıtılan hacim pişirme bölgesinin arka tarafında bulunan ısıtıcı, pişirme bölgesinin dışındadır. Pişirme bölgesinin üst tarafına yerleştirilen üst ısıtıcı ise pişirme bölgesinin içerisindedir. Pişirme bölgesinin dışında bulunan alt ısıtıcı ise pişirme bölgesinin alt kısmında yer almaktadır. Turbo ısıtıcı tarafından sağlanan güç ile ısınan sıcak havanın pişirme bölgesine gönderilmesini sağlayan ve turbo ısıtıcı ile eş merkezli bir adet radyal fan bulunmaktadır. Turbo ısıtıcı, fanı çevreleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Radyal fan ve turbo ısıtıcı, üzerinde çeşitli noktalarında patlatmalar ve delikler bulunan fan koruma sacı ile ısıtılan hacmin, pişirme bölgesinden ayrılmıştır [18].

Deneylerde kullanılan mikrodalga ısıtma özelliğne sahip ısıtılan hacim, mikrodalga ısıtma özelliği olmayan hacimle karşılaştırıldığında, farklı bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip hacimde, fan koruma sacındaki basma delikleri uzun kanal şeklindeki açıklıklar yerine daha ufak ve dairesel olan deliklerdir, böylece mikrodalganın sacın arkasına kaçıp verimin düşmesi engellenmiş olur. Şekil 4.3'de mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim ile geleneksel ısıtılan hacimin fan koruma sacı karşılaştırılmaktadır.



Şekil 4.3 : Sırasıyla geleneksel ısıtılan hacim ile mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacimin fan koruma sacları.

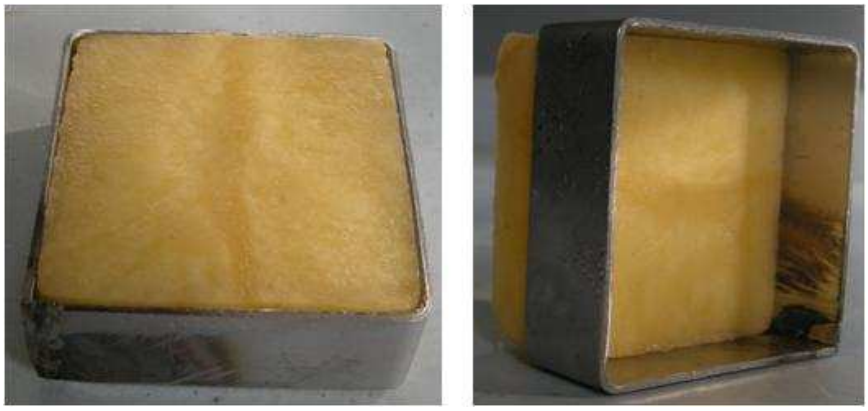
Deneysel çalışmalarda kullanılan ısıtılan hacimin, mikrodalga ısıtma, turbo ısıtma ve geleneksel (statik) ısıtma özellikleri tek başına kullanılabildiği gibi farklı ısıtma modlarının bir araya geldiği hibrid ısıtma özelliği de kullanılabilmektedir.

Turbo ısıtma olarak adlandırılan zorlanmış taşınım modunda, turbo ısıtıcı ve radyal fan birlikte çalışmaktadır. Geleneksel modda ise ısıtılan hacmin alt ve üst kısmına yerleştirilen alt, üst ısıtıcı beraber çalışmaktadır.

Deneylerde gıda olarak patates kullanılmıştır. Patates, literatürde Solanum Tuberosum olarak da adlandırılan bir kök bitkidir. Patateste nem içeriği genelde % 75-85 arasındadır [19]. Geri kalan kısım % 18 karbohidrat, % 1-2 protein ve aminoasit, % 0,1 yağ, % 0,1' den az oranda da vitamin ve mineral içermektedir [19]. Deneylerde gıda olarak patatesin seçilme nedenleri ise şu şekildedir;

- Patatesin termal ve dielektrik özellikleri pek çok çalışmada incelendiği için bu bilgilere ulaşmak daha kolaydır,
- Yüksek nem içeriğine (%75-85) sahiptir,
- İstenen şekil kolayca verilmektedir,
- Piştikten sonra şeklini kaybetmemektedir,
- Literatürde patatesin mikrodalga ortamda pişirilmesiyle ilgili pek çok yayın araştırma vardır,
- Ucuz ve kolayca bulunabilecek bir gıdadır.

Patatesler, 50x50x20 mm ölçülerinde ve 50±2 gr olarak bir yüzü keskin metalden hazırlanan kalıptan yararlanarak hazırlanmıştır. Şekil 4.4'de dikdörtgenler prizması şeklindeki patates ve kalıp görülmektedir.



Şekil 4.4 : 50x50x20 mm ölçülerindeki patates ve metal kalıp.

Patateslerin kütleleri, 50±2 gr olarak belirlenmiştir. Belirli ölçülerde kesilen her patatesin 50 gr olması zor olacağı için ±1 gr sınırlarında patates kütlesi kabul edilmiştir. Şekil 4.5'de patates kütlesinin ölçümü görülmektedir.



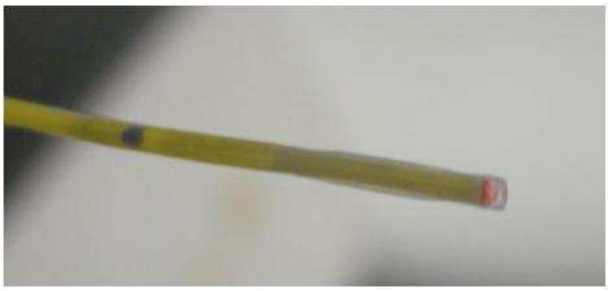
Şekil 4.5 : Patates kütlesinin ölçümü.

Sıcaklık ölçümleri, mikrodalga özelliğine sahip olmayan ısıtmalarda termokulplar ile yapılabilmektedir. Fakat, mikrodalga ısıtmada ark oluşumu sebebiyle sıcaklık ölçümü termokupl ile yapılamamaktadır. Bu sebeple mikrodalga ortamda çalışma esnasına fiber optik sıcaklık probuna sahip sıcaklık ölçer kullanılmaktadır. Sıcaklık ölçer 4 kanallı olup, mikrodalga ısıtmada gıdanın ve ısıtılan hacimin aynı anda 4 farklı noktasında sıcaklık ölçümünü yapabilmektedir. RS-232 bağlantısı ile cihazdan alınan ölçümler belirlenen zaman sıklığında kaydedilmektedir. Cihazın doğruluğu ±0.1°C'dir. Şekil 4.6'da sıcaklık ölçer görülmektedir.



Şekil 4.6 : Sırasıyla 4 kanallı sıcaklık ölçerin önden ve arkadan görünüşü.

Termokuplun yapımında genellikle bakır, demir, konstantan, platin, mangan, nikel gibi metaller kullanılır. Bu malzemeler de mikrodalga ortamda ark oluşumuna neden olmaktadır. Sıcaklık ölçer için kullanılan fiber optik problar ise elektriksel alandan etkilenmeyip, ark oluşturmamaktadır. Bu probların sıcaklık aralığı -80 ile 300^{o}C arasındadır. Şekil 4.7'de fiber optik prob görülmektedir.



Şekil 4.7 : Fiber optik prob.

Fiber optik, çok hassas üretilmiş saf bir cam ip üzerinden ışığın iletilmesi prensibiyle çalışan bir sistemdir. Bu şekilde üretilmiş kabloların tercih edilmesinin en büyük sebebi, çevresel şartların ağır olduğu; nemli, rutubetli, elektriksel alan parazitlerinin yoğun olduğu yerlerden etkilenmemesi ve her zaman tutarlı bir bağlantı sunmasıdır.

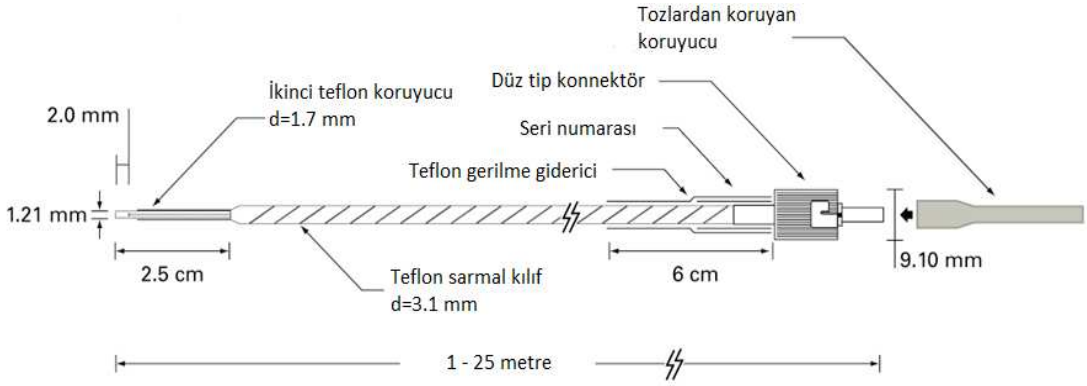
Şekil 4.8'de deneysel çalışmalarda kullanılan fiber optik probun yapısı ve katmanları görülmektedir.



Şekil 4.8 : Deneysel çalışmalarda kullanılan fiber optik probun yapısı [20].

Fiber optik problar cam veya camsı plastik liflerden oluşur. Bu liflerin üstü çeşitli plastik karışımlardan oluşan bir kaplama ile izole edilip daha sonra kullanım yerine göre veya ortam şartlarına göre dayanım sınıfları farklı olan başka kaplama malzemeleri ile imal edilip piyasaya sürülürler. Bu kaplamalar şekil 4.7'de de görüldüğü gibi teflon yada epoksi gibi malzemelerden olabilmektedir.

Şekil 4.9'da deneysel çalışmalarda kullanılan fiber optik probun boyutları ve kısımları verilmektedir.



Şekil 4.9 : Deneysel çalışmalarda kullanılan fiber optik probun kısımları [20].

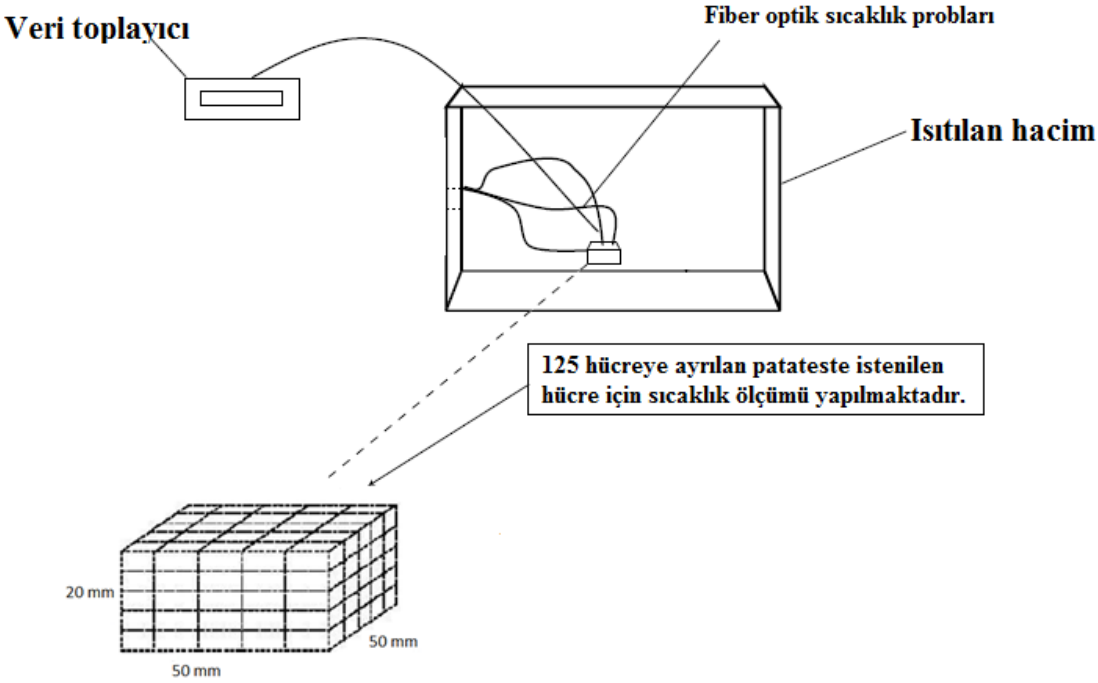
Probların boyutları 1 ile 25 metre arasında değişmektedir. Problarla çalışmak, termokulplarla yapılan çalışmaya göre daha fazla dikkat gerektirmektedir. Çünkü problar çok hassas ve pahalıdır. Teflon kılıfın içindeki fiber optik kısım, ezilemelerde hemen kırılmaktadır.

Patatesler için sıcaklık ölçümü yapılmadan önce modelde kullanılan hücreler patates üzerinde gösterilmiştir. Böylece hangi hücreden sıcaklık ölçümü yapılacağı daha kolay bir şekilde belirlenebilmiştir. Patatesin her yüzeyi 25 eşit parçaya bölünüp, 125 hücre oluşturulmuştur. Şekil 4.10'da sıcaklık ölçümü yapmak için belirlenen hücreler görülmektedir.



Şekil 4.10 : Patates üzerinde sıcaklık ölçümü yapılacak hücreler.

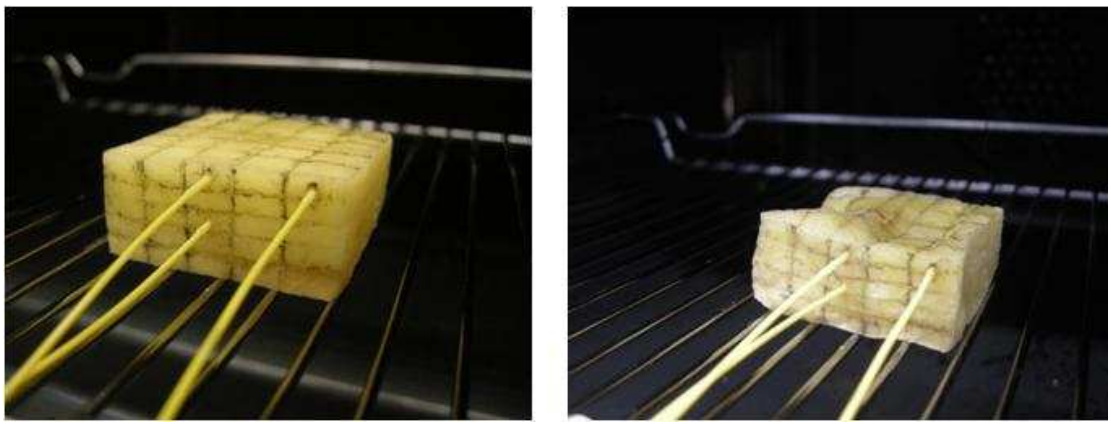
Açıklanan elemanlardan oluşan sistemin şematik gösterimi Şekil 4.11'de verilmektedir.



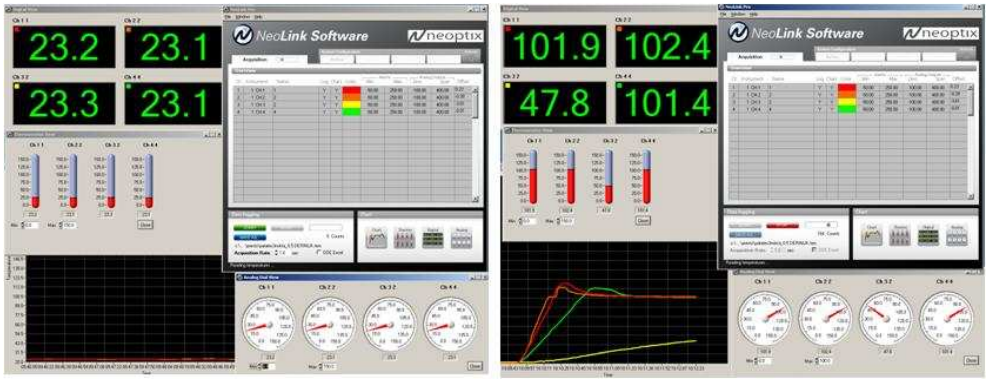
Şekil 4.11 : Deney düzeneği şematik gösterimi.

Deneyler, 23±2 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilmelidir. Deneylerin yapıldığı laboratuvar içerisinde, ortam sıcaklığının bu değerler arasında kalması ve fazla değişmemesi için hava şartlandırma üniteleri kullanılmaktadır.

Patatesler ısıtılan hacimin merkezine, ızgara üstüne yerleştirilmiştir. Şekil 4.12'de hacim içine yerleştirilen patateslerin ısıtma öncesi ve sonrası hali verilmektedir. Şekil 4.13'de ise bilgisayar yardımı ile okunan sıcaklık değerleri görülmektedir.



Şekil 4.12 : Sırasıyla hacim içindeki patatesin ısıtma öncesi ve sonrası görünüşü.



Şekil 4.13 : Sıcaklık değerleri.

Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip hacimde, mikrodalga sızıntısı yada kaçağı olması ihtimaline karşı, deney sırasında hacimin etrafında özellikle ısıtılan hacimin kapağına yakın bölgelerde elektromanyetik alan ölçer ile ölçüm yapılmaktadır. Şekil 4.14'de elektromanyetik alan ölçer sunulmaktadır. Cihaz 3 KHz-60 GHz bant aralığında mW/cm^2 cinsinden ölçüm alabilmektedir. Standartlar 5 mW/cm^2'ye kadar izin vermektedir [21]. Fakat deneysel çalışmalar sırasında 1 mW/cm^2 değerine bile ulaşılmamaktadır.



Şekil 4.14 : Elektromanyetik alan ölçer.

Çiğ yada pişmiş patatesler için nem tayini, halojen lambalı nem tayin cihazıyla yaplmaktadır. 1.5 ile 3.5 gr arasında konan numunelerin, içindeki nem miktarına göre 50-80 dk kadar bir sürede nem içerikleri tayin edilmektedir. Şekil 4.15'de halojen lambaya sahip nem tayin cihazı görülmektedir.



Şekil 4.15 : Nem tayin cihazı.

4.2 Deneyler

Deneysel çalışmalarda amaç mikrodalga ısıtmada sıcaklık ölçümlerinin belirlenmesi olup, bu deneylerin öncesinde hem kurulacak modele hem de sıcaklık ölçüm deneylerine hazırlık olması amacıyla mikrodalga ısıtma için güç çıkışı ve verim deneyleri, mikrodalga ısıtma için ısıtılan hacim içinde homojenlik deneyleri, kütle değişimi ve nem tayini deneyleri yapılmıştır.

4.2.1 Mikrodalga ısıtma için güç çıkışı ve verim deneyleri

British standartları (EN 60705:1999) ve TS_EN_60705 "Mikrodalga Fırınlar - Ev ve Benzeri Yerlerde Kullanılan - Performans Ölçme Metotları" dikkate alınarak, mikrodalga ısıtma için mikrodalga güç çıkışının belirlenmesi ve verim deneyleri yapılmıştır.

Mikrodalga Güç Çıkışının Belirlenmesi : Ölçümler, cam bir kaba konan su ile yapılmaktadır. Suyun sıcaklığı başlangıçta oratm sıcaklığının altındadır ve mikrodalga ortamda ısıtılarak yaklaşık olarak ortam sıcaklığına yükseltilmektedir. Bu metot, Kabın ısı kapasitesi ve ısı kaybının az etki etmesi konusunda güvence sağlamaktadır. Ancak herhangi bir durumda bir düzeltme faktörü tanımlanır. Fakat bu metot, su sıcaklığının kesin olarak ölçülmesini gerektirmektedir.

Deneyler için borosilikat camdan yapılmış silindirik bir kap kullanılır. Bu kabın, en az 3 mm'lik kalınlığı, yaklaşık 190 mm'lik çapı ve yaklaşık 90 mm'lik yüksekliği olmalıdır. Kabın kütlesi 1157 gr olarak belirlenmektedir.

Deneyin başlangıcında, ısıtılan hacim ve boş kap ortam sıcaklığındadır. Deney için (10±1)°C başlangıç sıcaklığına sahip su kullanılmaktadır. Su sıcaklığı, kaba dökülmeden hemen önce ölçülmektedir. (100 ± 5) g su kullanılıp, su sıcaklığının (20±2)°C'a ulaşması için geçen süre ölçülmektedir. Su, sıcaklığı ölçülmeden önce karıştırılmaktadır.

Mikrodalga güç çıkışı **(4.1)** eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$P = \frac{4.187 m_w (T_2 - T_1) + 0.55 m_c (T_2 - T_0)}{t} \qquad \textbf{(4.1)}$$

(4.1) eşitliğinde, P güç (W), m_w suyun ağırlığı (g), m_c kacın ağırlığı (g), T_0 ortam sıcaklığı (°C), T_1 suyun başlangıç sıcaklığı (°C), T_2 suyun son sıcaklığı (°C) ve t zaman (s) olarak ifade edilmektedir.

Verim : Mikrodalga güç çıkışının belirlenmesi deneyindeki enerji ölçülmektedir. Isıtılan hacimin verimi **(4.2)** eşitliğinde görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$\eta = 100.\frac{P.t}{W_{giriş}} \qquad \textbf{(4.2)}$$

(4.2) eşitliğinde, P hesaplanan mikrodalga çıkış gücü (W), t ısıtma süresi (s), η ısıtılan hacimin verimi ve $W_{giriş}$ enerji girişi (W.s) olarak ifade edilmektedir [22].

Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacimin üretici tarafından belirlenen güç kademeleri için yapılan güç çıkışının belirlenmesi ve verim deneyleri için elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2'de görülmektedir.

Çizelge 4.2 : Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim için güç çıkışının belirlenmesi ve verim için elde edilen sonuçlar.

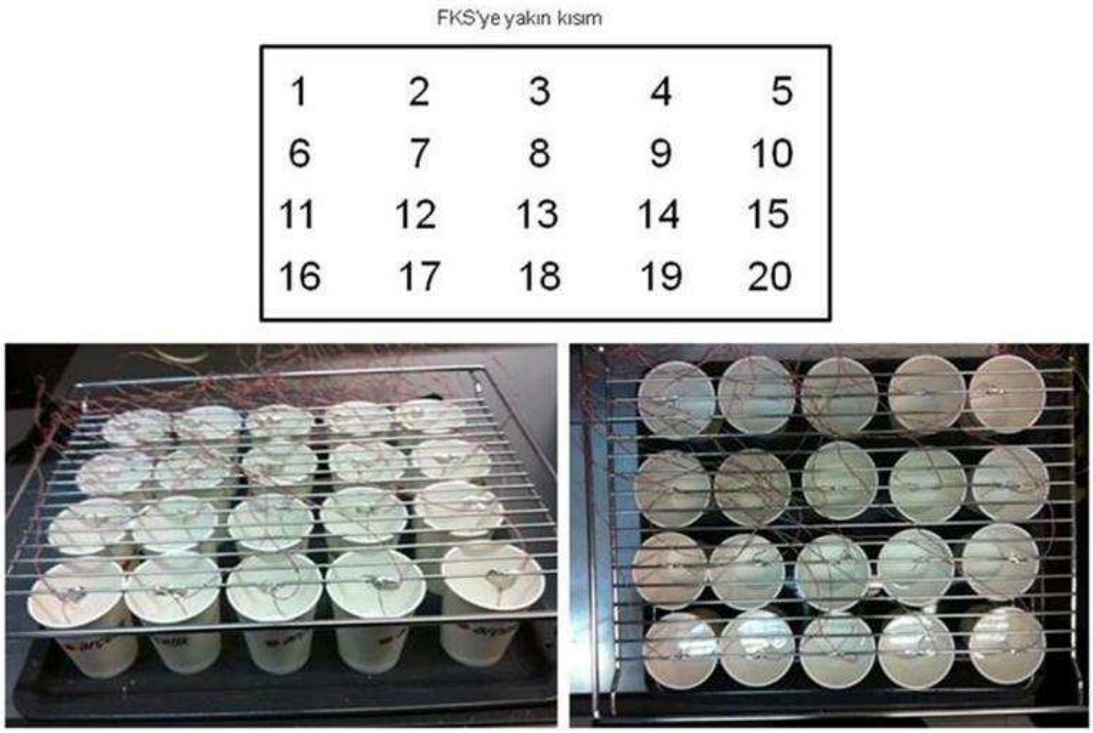
MİKRODALGA ÇIKIŞ GÜCÜNÜN VE VERİMİNİN BELİRLENMESİ				
ISITMA	**ZAMAN [dk]**	**GÜÇ [W]**	**HESAPLANAN GÜÇ [W]**	**VERİM (%)**
MİKRODALGA	00:50	900	726	35
MİKRODALGA	01:30	600	524	35
MİKRODALGA	02:00	360	274	33

Verim deneyi, ısıtılan hacimin sahip olduğu en yüksek güç seviyesi için yapılmadır. Üretici tarafından ısıtılan hacim için belirlenen 5 farklı güç seviyesi vardır. Bunlar 90, 180, 360, 600 ve 900 W'dır. En yüksek güç seviyesi olan 900 W dışında 600 W ve 360 W güç seviyelerinde de deneyler yapılmıştır. Fakat ısıtılan hacimin verimi en yüksek güç seviyesinden elde edilen %35 değeridir.

4.2.2 Mikrodalga ısıtma için homojenlik deneyleri

British standartları (EN 60705:1999) ve TS_EN_60705 "Mikrodalga Fırınlar - Ev ve Benzeri Yerlerde Kullanılan - Performans Ölçme Metotları" dikkate alınarak, performans tayini yani homojenlik deneyi yapılmaktadır.

Şekil 4.16'da mikrodalga ısıtma homojenlik deneyleri için hazırlanan deney düzeneği sunulmaktadır.



Şekil 4.16 : Mikrodalga ısıtma homojenlik deneyi için deney düzeneği.

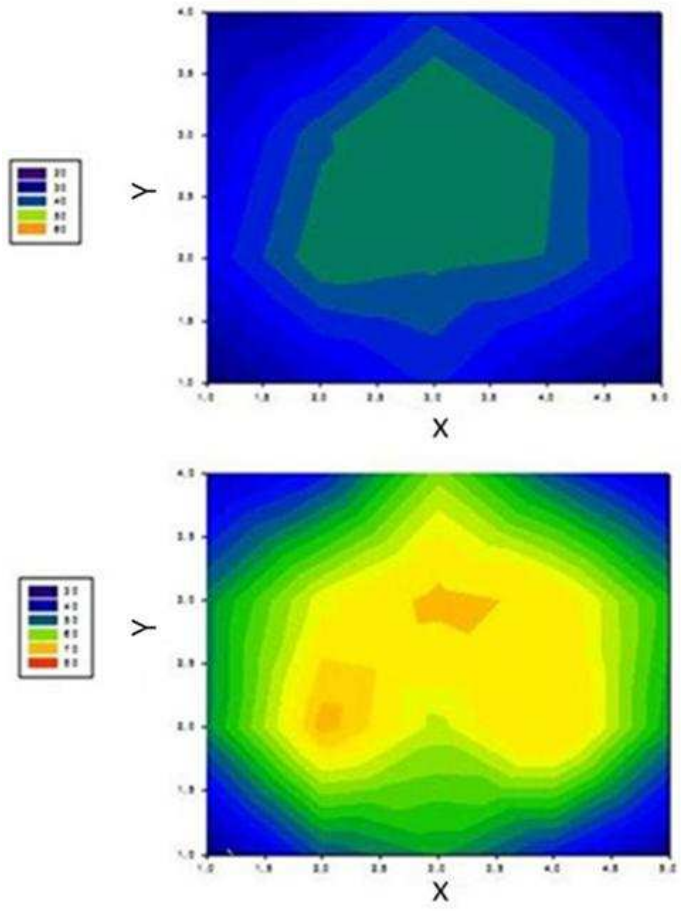
Deneyler; tepsiye 20 adet içinde 50 cc su bulunan ped bardağın dizilmesiyle yapılmaktadır. Bardakların içindeki sular eşit ve oda sıcaklığında olup, ısıtılan hacimden çıkan bardakların sıcaklıkları hazırlanan düzenek yardımıyla aynı anda ölçülmektedir [22]. 20 adet termokulp, bardakların üstüne gelecek şekilde ızgaraya bağlanmıştır. Böylece ısıtılan hacimden çıkan bardakların üstüne ızgaranın konulmasıyla bardak içindeki suların sıcaklıkları aynı anda ölçülmektedir.

Çizelge 4.3'de farklı ısıtma süreleri için 20 bardaktan alınan sıcaklık değeleri verilmektedir. Deneyler, ısıtılan hacimin sahip olduğu en yüksek mikrodalga gücünde 1, 3, 10 ve 12 dk'lık ısıtmalar için yapılmaktadır. Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacimden alınan sonuçlara göre, köşe noktalarda merkeze göre sıcaklıklar daha düşük ölçülmektedir. Merkez ile köşeler arasındaki fark ısıtma süresi arttıkça daha da artmaktadır. Dolayısıyla mikrodalga ortamda homojen bir dağılıma ulaşmanın, zor olduğu görülmektedir. Mikrodalga ısıtma için en büyük problemlerden biri, mikrodalgaların hacim içerisinde dağılımının her yönden eşit olmaması, bazı yüzeylerde fazlayken bazı yüzeyde az olmasıdır. Bu da ısıtılan maddelerdeki sıcaklık dağılımını etkilemektedir.

Çizelge 4.3 : Farklı mikrodalga ısıtma süreleri için 20 bardaktaki suya ait sıcaklıklar.

BARDAK NO	1. DENEY (900 W 1 dk)	2. DENEY (900 W 3 dk)	3. DENEY (900 W 10 dk)	4. DENEY (900 W 12 dk)
1	**28.77**	**39.48**	**69.09**	**69.84**
2	30.13	45.09	81.67	84.34
3	37.21	59.14	89.77	80.75
4	32.81	47.9	83.62	89.32
5	**28.56**	**39.49**	**69.07**	**72.15**
6	**32.32**	**50.96**	**81.9**	**88.14**
7	39.45	63.36	90.88	93.13
8	45.14	69.31	90.93	91.55
9	40.43	66.93	90.78	93.06
10	**33.7**	**54.5**	**79.41**	**84.12**
11	**34.44**	**51.31**	**82.71**	**86.84**
12	41.59	69.18	91.64	93.11
13	40.6	61.16	91.58	92.24
14	39.9	69.97	91.39	92.45
15	**34.77**	**52.52**	**80.83**	**84.39**
16	**26.51**	**34.89**	**54.28**	**62.42**
17	32.51	48.25	83.93	88.41
18	36.48	52.26	87.52	92.12
19	30.82	45.17	77.19	84.31
20	**26.63**	**36.33**	**59.51**	**66.94**
ΔT_{max}	**18.51**	**35.08**	**37.36**	**30.71**

1 ve 3 dk süre için yapılan deneylerin sıcaklık dağılımları Şekil 4.22'de sunulmaktadır. 3 dk için elde edilen sonuçlara bakıldığında, merkezde sol yan ve arka kısımlarda sıcaklıkların biraz daha fazla olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar modelleme çalışmaları için yol göstermektedir. Isıtılan hacim içerisinde mikrodalga eşit şekilde dağılmadığından dolayı, gıdadaki 125 hücre için de mikrodalga gücünün eşit şekilde dağıtılamayacağı görülmektedir. Bardakların olduğu tepsi ve gıda, ısıtılan hacim içerisinde tabandan aynı yükseklikte olacak şekilde yerleştirilmektedir. Merkeze yerleştireceğimiz gıdaya da benzer şekilde, bazı bölgelerde daha fazla ısıya dönüşen mikrodalga gücünün ulaşması beklenmektedir.



Şekil 4.17 : Sırasıyla 1 ve 3 dk için homojenlik deneyi sıcaklık dağılımları.

Şekil 4.17'deki sonuçlar x ve y ekseni için verilmektedir. Kurulacak model 3 boyutlu olup, mikrodalga ısıtma için yapılan homojenlik deneyleri, z ekseni için yol gösterememektedir.

4.2.3 Kütle değişimi ve nem tayini deneyleri

Kütle değişimleri, Şekil 4.5'de görüldüğü gibi ölçülmektedir.

Mikrodalga ortamda ısıtma boyunca kütle değişimi ölçülememektedir. Bu yüzden, mikrodalga ortamda ısıtılan patatesler için belli aralıklarda kütle ölçümü yapılmıştır. Her ölçüm için yeni bir patates kullanılıp, kütle ölçümü yapılan patates tekrar ısıtılan hacime konulmamıştır. Mikrodalga ısıtmanın farklı güçleri için kütle değişim grafikleri oluşturlup, bu grafiklerden korelasyonlar elde edilmektedir. Modelleme çalışmaları, 900 W gücündeki mikrodalga ısıtma için yapılmaktadır. 90 W gcündeki mikrodalga ısıtma için zamana bağlı kütle değişim grafiği örnek olması, karşılaştırabilmek ve istenen her güç seviyesi için grafiklerin oluşturulabileceğini göstermek amacıyla verilmektedir.

Kütle değişimi, **(4.3)** eşitliğinde görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$\Delta m = m_1 - m_2 \qquad \textbf{(4.3)}$$

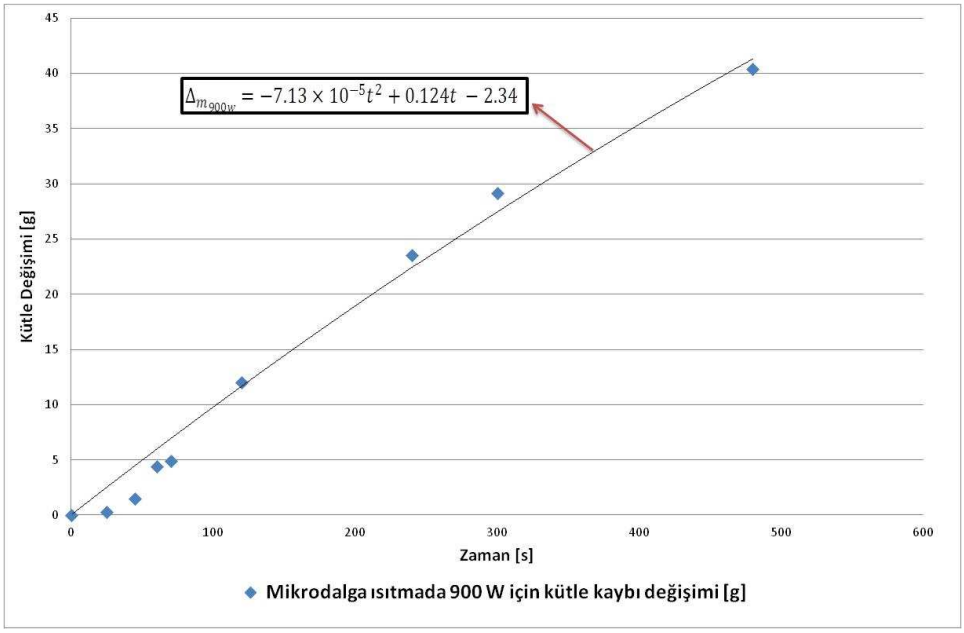
(4.4) eşitliğinde; Δm kütle değişimi (g), m_1 gıdanın ilk kütlesi (g), m_2 gıdanın ısıtıldıktan sonraki kütlesidir.

Kütle değişimlerinde; gıda içindeki katı kısmın kütlesinin sabit kaldığı ve kütle değişiminin gıda içindeki nem için gerçekleştiği kabul edilmektedir. Toplam kütle için verilen kütle değişimi değerleri, gıda içindeki nemin değişimidir.

Mikrodalga ısıtmada 900 W için kütle ve sıcaklık değişimleri Çizelge 4.4'de ve kütle kaybının zamana bağlı değişiminin grafiği ise Şekil 4.18'de görülmektedir.

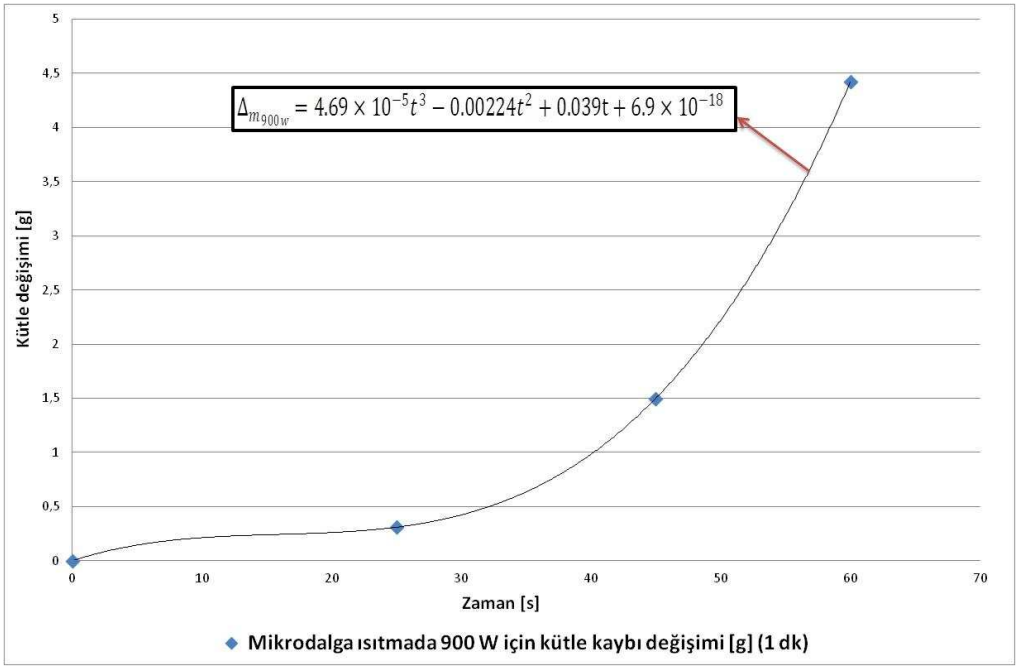
Çizelge 4.4 : Mikrodalga ısıtmada 900 W için kütle ve sıcaklık değişimleri.

ZAMAN (s)	MER. SIC. [°C]	m_1 [g]	m_2 [g]	m_1-m_2 [g]
0	23	50	50	0
25	43	49.97	49.66	0.31
45	64	49.9	48.4	1.5
60	90.8	49.72	45.3	4.42
70	100	50	45.1	4.9
120	101.1	49.92	37.9	12.02
240	101.8	50	26.42	23.58
300	107.8	49.1	19.9	29.2
480	195	50.5	10.09	40.41



Şekil 4.18 : Mikrodalga ısıtmada 900 W için kütle kaybı değişiminin grafiği.

Deneysel çalışmalarda sıcaklık sonuçları geçici rejimde 50 s'lik bir zaman diliminde incelendiğinden, Şekil 4.18'de sunulan 900 W için kütle kaybının zamana bağlı değişimi grafiği, 1 dakika için genişletilmektedir. Şekil 4.19'da, 900 W gücündeki mikrodalga ısıtmada 1 dakikalık zaman dilimi için kütle kaybının zamana bağlı değişiminin grafiği sunulmaktadır.



Şekil 4.19 : Mikrodalga ısıtmada 900 W- 1 dk için kütle kaybı değişimi grafiği.

900 W gücündeki mikrodalga ısıtmada, zamana bağlı kütle kaybı değişimi için oluşturulan korelasyon **(4.4)** eşitliğinde görülmektedir.

$$\Delta_{m_{900w}} = 4.69 \times 10^{-5}t^3 - 0.00224t^2 + 0.039t + 6.9 \times 10^{-18} \qquad \textbf{(4.4)}$$

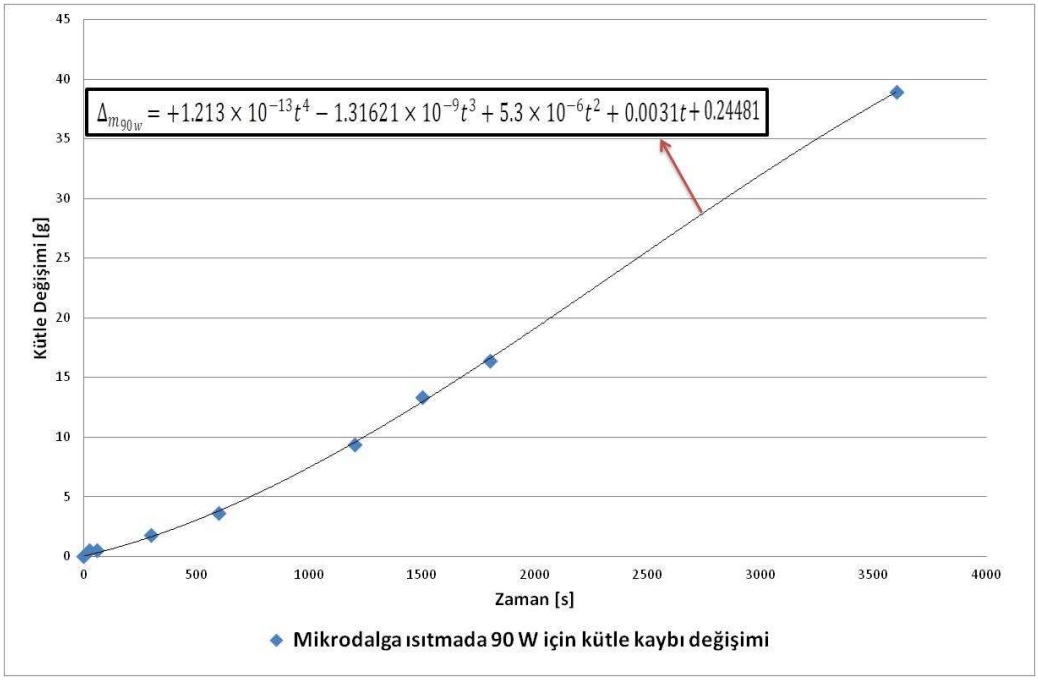
(4.4) eşitliğinde, t zaman (s) ve R^2=1'dir.

(4.4) eşitliği; modelleme çalışmalarında, patates yüzeyindeki hücrelerin enerji korunumu denkleminde ve kütle transferi denklemlerinde sınır şartı olarak yer almaktadır. Korelasyondan elde edilen değerler (g)'dır. İfade akı yada birim zamanda birim hacimdeki kütle değeri olarak kullanıldığında gerekli birimlere dönüştürülüp, model içerisinde öyle kullanılmaktadır. Bölüm 5'de bu yaklaşım detaylı olarak anlatılmaktadır.

Mikrodalga ısıtmada 90 W için ise, zamana bağlı kütle ve sıcaklık değişimleri Çizelge 4.5'de ve kütle kaybının zamana bağlı değişiminin grafiği Şekil 4.20'de görülmektedir.

Çizelge 4.5 : Mikrodalga ısıtmada 90 W için kütle ve sıcaklık değişimleri.

ZAMAN (s)	MER. SIC. [°C]	m_1 [g]	m_2 [g]	m_1-m_2 [g]
0	21	50	50	0
25	24	49.93	49.46	0.47
60	28	49.52	49.01	0.51
300	57.7	49.89	48.1	1.79
600	82.2	49	45.4	3.6
1200	98.8	50	40.64	9.36
1500	100	50	36.67	13.33
1800	98	49.2	32.8	16.4
3600	86	49.5	10.58	38.92



Şekil 4.20 : Mikrodalga ısıtmada 90 W için kütle kaybı değişiminin grafiği.

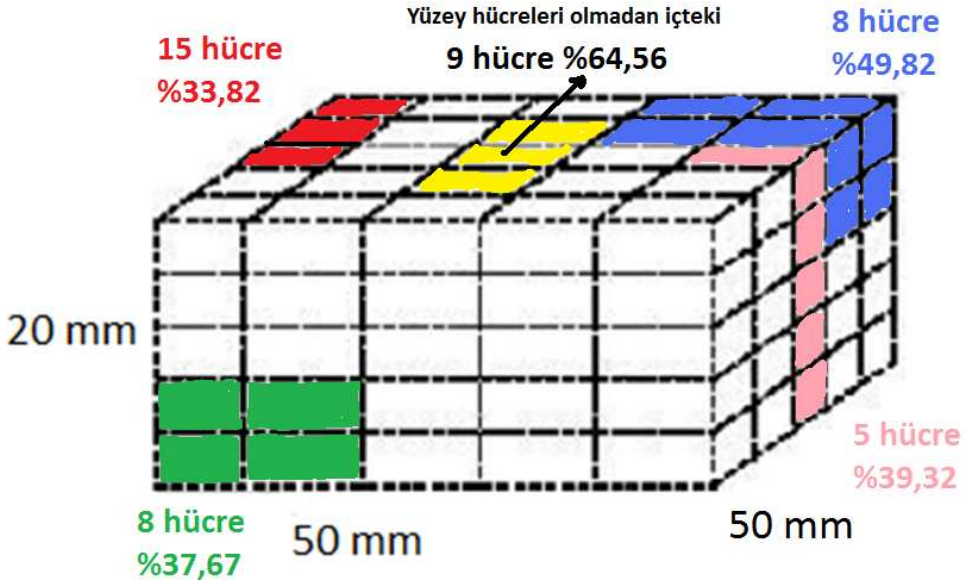
90 W gücündeki mikrodalga ısıtmada, zaman bağlı kütle kaybı değişimi için oluşturulan korelasyon **(4.5)** eşitliğinde görülmektedir.

$$\Delta_{m_{90w}} = +1.213 \times 10^{-13}t^4 - 1.31621 \times 10^{-9}t^3 + 5.3 \times 10^{-6}t^2 + 0.0031t + 0.24481 \quad \textbf{(4.5)}$$

(4.5) eşitliğinde t zaman (s) ve R^2=0.9996'dir.

Patates numuneleri için nem tayini Şekil 4.14'de görülen nem tayin cihazıyla yapılmaktadır. Çiğ patates için nem değeri %79-80 arasında belirlenmektedir. 5 dk

süre ile mikrodalga ısıtma özelliğine sahip hacimde 900 W gücünde ısıtılan patateslerde tek bir nem değerinin olmadığı ve patatesin farklı noktalarında farklı nem değerlerinin olduğu görülmektedir. Şekil 4.21'de, 5 dk süre ile 900 W mikrodalga gücünde ısıtılan, 125 hücreye ayrılmış patates numunesinde belirli sayıdaki hücre grupları için ortalama nem değerleri görülmektedir. Nem tayin cihazına en az 1.5 g numune konulması gerektiği için cihaza tek hücre yerine beşli, sekizli, dokuzlu yada on beşli hücre grupları konulmaktadır.



Şekil 4.21 : 900 W gücünde 5 dk mikrodalga ısıtma sonrası hücrelerin nem tayini.

Şekil 4.21'de görüldüğü gibi hücre gruplarının nem içeriği değerleri birbirinden oldukça farklıdır. %79 nem içeriği değerindeki patates numunesinin mikrodalga ortamda 5 dk ısıtılması ile elde edilen ortalama sonuçlara göre; merkezde yüzeyin altındaki 9 hücrede nem içeriği değeri %64,56 ile diğer hücre gruplarından fazladır. Köşe ve yüzeylerdeki diğer hücre gruplarının da birbirinden farklı nem içeriği değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Sol köşedeki hücre gruplarının nem içeriği değeri sağ köşedeki hücre gruplarının nem içeriği değerinden daha düşüktür. Sol ön ve alt hücrelerde ise nem içeriği değerinin sol arka ve üst hücrelerden daha fazla olduğu görülmektedir.

Bu deneysel çalışma, kurulacak modelde kütle transferi hesabı yapmadan sadece ısı tansferi hesabı yapmanın yeterli olamayacağını göstermektedir. Çünkü gıdaya ait parametreler, nem içeriği değerine göre değişmektedir. 125 hücre için aynı nem içeriği değerinin alınmasının uygun olmadığı, bu deneysel çalışma ile görülmektedir.

4.2.4 Mikrodalga ısıtma için sıcaklık ölçüm deneyleri

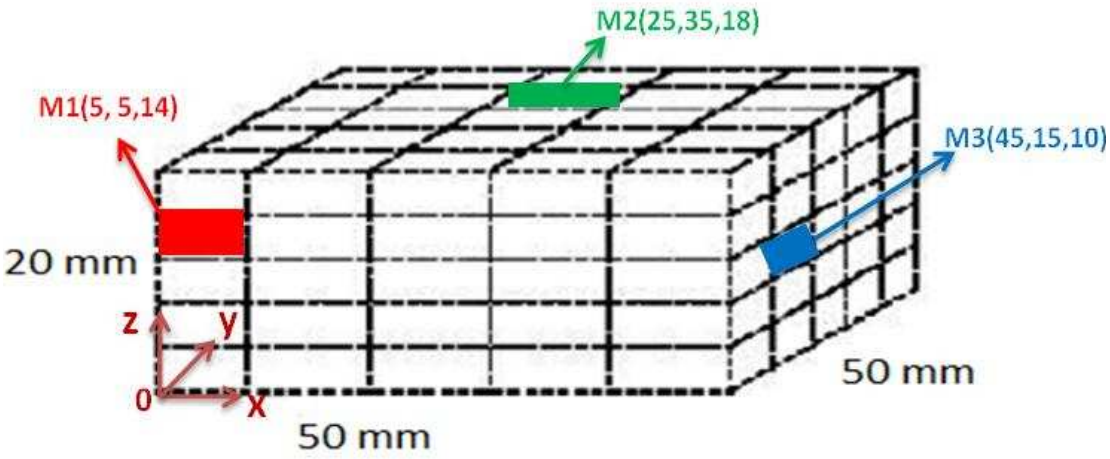
Mikrodalga ısıtma için sıcaklık ölçüm deneyleri, bu tez çalışması kapsamında özellikle üzerinde durulması gereken, asıl yapılması gereken ve kurulacak modelle birebir ilişkisi olan deneysel çalışmalardır. Pataes içerisinde sıcaklık ölçümü yaparken pek çok aksilikle karşılaşılmıştır. Fiber optik problar çok hassas olduğu için sıcaklık ölçere bağlantı yerleri en ufak bir temasda etkilenmekte olup, sonuçlar tam olarak alınamamaktadır. Isıtılan patates zamanla yumuşadığı için fiber optik problar yerinden oynayıp kayarak, hücre merkezlerinden uzaklaşmaktadır. Bu nedenle deneyler çok tekrarlı yapılmaktadır. Fakat tekrarlı deneylerde alınan sonuçlar bazen birbirinden çok farklı olabilmektedir. Bu hem probun yapısından, hem de ısıtılan gıdanın zamanla yapısının değişmesinden kaynaklanmaktadır.

Patates içerisinde belirlenen 125 hücrenin çok büyük bir kısmı için sıcaklık ölçümü yapılmaya çalışılmıştır. Fakat mikrodalganın hacim içerisindeki etkisini ortaya koymak için üst-alt, sol-sağ ve ön-arka yüzeylerin merkez hücreleri ve patates merkez hücresi için çok tekrarlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneysel çalışmalar, patatesin 6 yüzeyi için ne oranda mikrodalganın etki ettiği konusunda yol gösterici olmaktadır.

Deneysel çalışmalarda görülmüştür ki; patates hücre merkezleri yaklaşık 100^{o}C sıcaklığa ulaştıklarında, sıcaklık değerleri sabit rejimde devam etmektedir. Deneysel çalışmalarda, zamana bağlı sıcaklık değerleri sabit rejime ulaşmadan geçici rejimde incelenmektedir. Bu yüzden 50 s'lik bir zaman dilimi, hücrelerin geçici rejimdeki zamana bağlı sıcaklık değerlerini incelemek ve karşılaştırmak için belirlenmiştir.

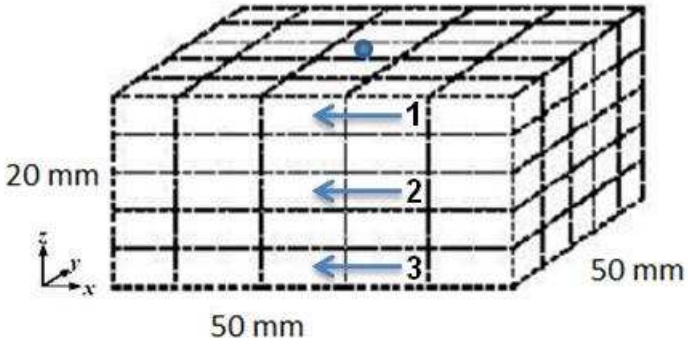
Sıcaklık ölçümleri; daha iyi anlaşılabilmesi için gruplara ayrılıp, bu deneysel çalışmalar numaralandırılmıştır. Hücre yerlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için ise hücreler, patatesin şematik gösterimi üzerinde belirtilmeye çalışılmıştır. Ayrıca hücrelerin koordinat eksenindeki yerleri de belirtilmektedir.

İlgili hücrelerin merkezi M(x,y,z) mm şeklinde gösterilmektedir. Şekil 4.22'de patatesin şematik gösterimi üzerinde örnek hücrelerin nasıl adlandırıldığı verilmektedir. Kırmızı renk ile gösterilen 1. hücre; M1(5,5,14) mm, yeşil renk ile gösterilen 2. hücre; M2(25,35,18) mm ve mavi renk ile gösterilen 3. hücre; M3(45,15,10) mm şeklinde ifade edilmektedir. Bundan sonra sunulacak deneysel çalışmalarda hücreler bu şekilde ifade edilecektir.



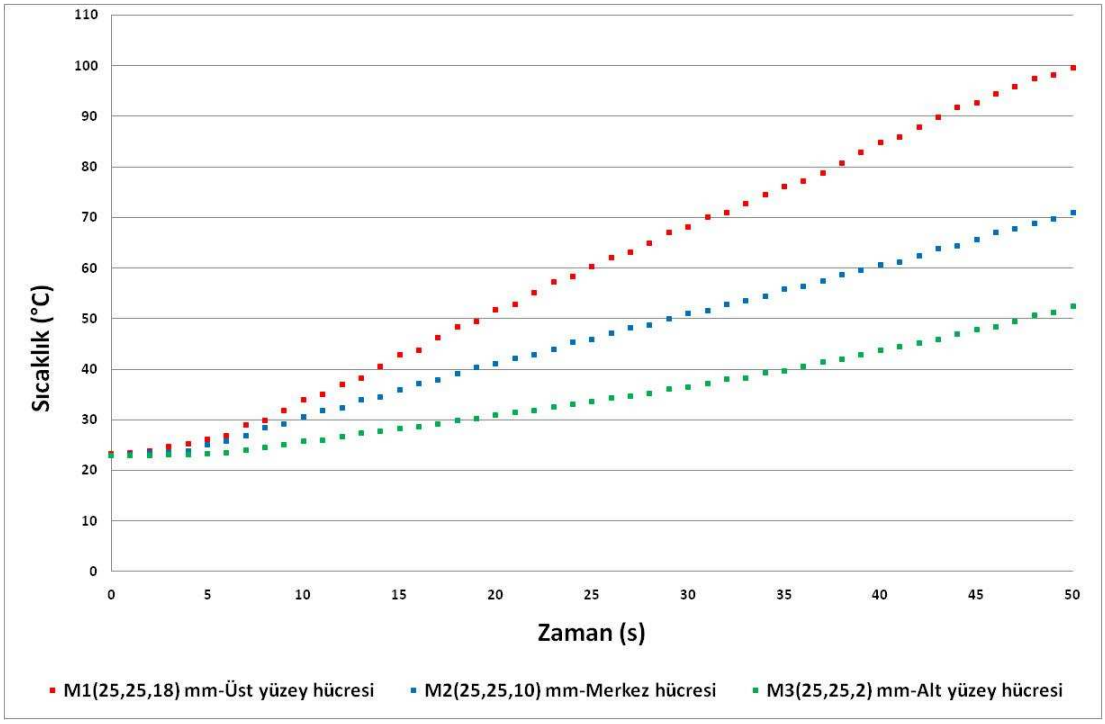
Şekil 4.22 : Patatesin şematik gösterimi üzerinde örnek hücrelerin belirtilmesi.

Deneysel Çalışma 1, 900 W mikrodalga ısıtma gücünde, patatesin merkezinde farklı derinliklerdeki 3 hücre için yapılmaktadır. Hücrelerin sadece derinlikleri yani z eksenindeki yerleşimleri farklıdır. Bu deneysel çalışmada; mikrodalganın patatesin üst ve alt yüzeylerine ne oranda etki ettiği görülmek istenmektedir. 1. hücre merkezi M1(25,25,18) mm, 2. hücre (bütün patatesin merkez hücresi) merkezi M2(25,25,10) mm ve 3. hücre merkezi M3(25,25,2) mm olarak Şekil 4.23'de patates şekli üzerinde görülmektedir.



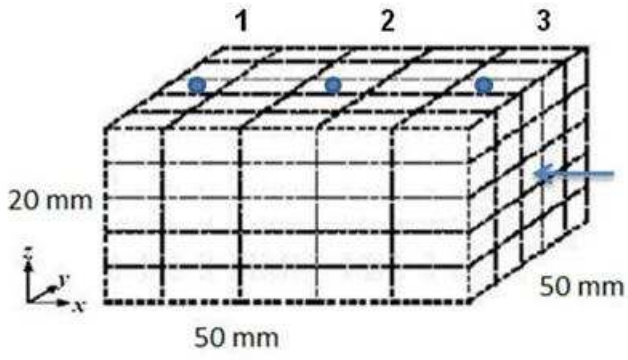
Şekil 4.23 : Deneysel Çalışma 1 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri.

Deneysel Çalışma 1 için ölçülen sıcaklıkların zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.24'de sunulmaktadır. Bu deneysel çalışmada, birbirine çok yakın derinliklerde, (z=2, 10 ve 18 mm) sıcaklık-zaman eğrisinin ne kadar farklı değerler alabileceği görülmektedir. Bu durum, penetrasyon derinliğine göre gücün logaritmik olarak azalışının etkisini kanıtlamaktadır. Çok küçük bir patates numunesi içinde bile değişik noktalarda bu kadar farklı sıcaklık değeri sonuçları alınabilmektedir.



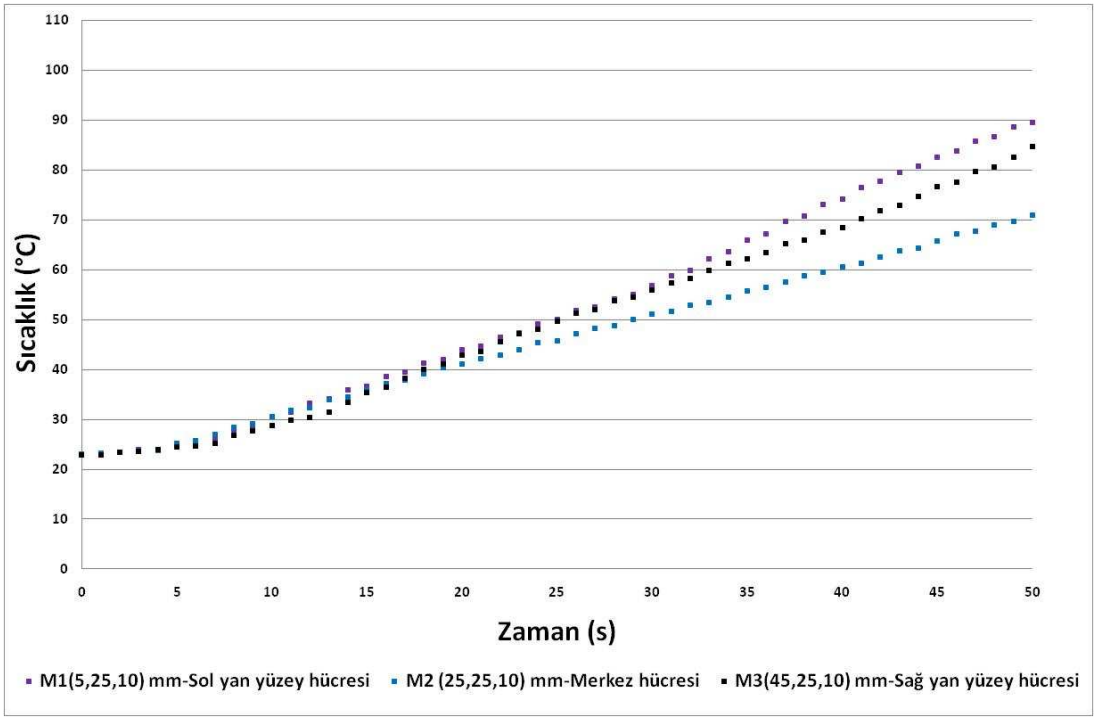
Şekil 4.24 : Deneysel Çalışma 1 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği.

Deneysel Çalışma 2, 900 W mikrodalga ısıtma gücünde, patatesin merkezinde aynı derinlikte soldan sağa doğru yanyana 3 hücre için yapılmaktadır. Hücrelerin sadece x eksenindeki yerleşimleri farklıdır. Bu deneysel çalışmada; mikrodalganın patatesin sol ve sağ yüzeylerine ne oranda etki ettiği görülmek istenmektedir. 1. hücre merkezi M1(5,25,10) mm, 2. hücre (bütün patatesin merkez hücresi) merkezi M2(25,25,10) mm ve 3. hücre merkezi M3(45,25,10) mm olarak Şekil 4.25'de patates üzerinde görülmektedir.



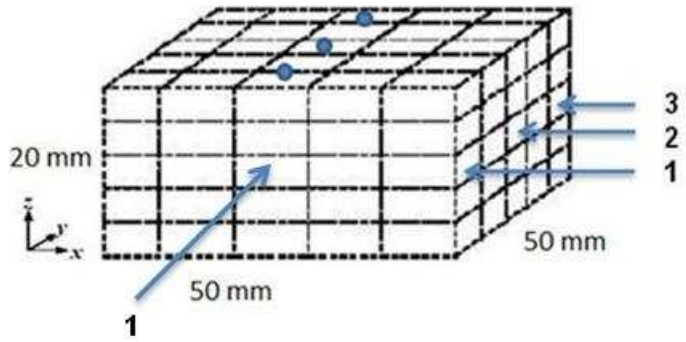
Şekil 4.25 : Deneysel Çalışma 2 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri.

Deneysel Çalışma 2 için ölçülen sıcaklıkların zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.26'da sunulmaktadır.



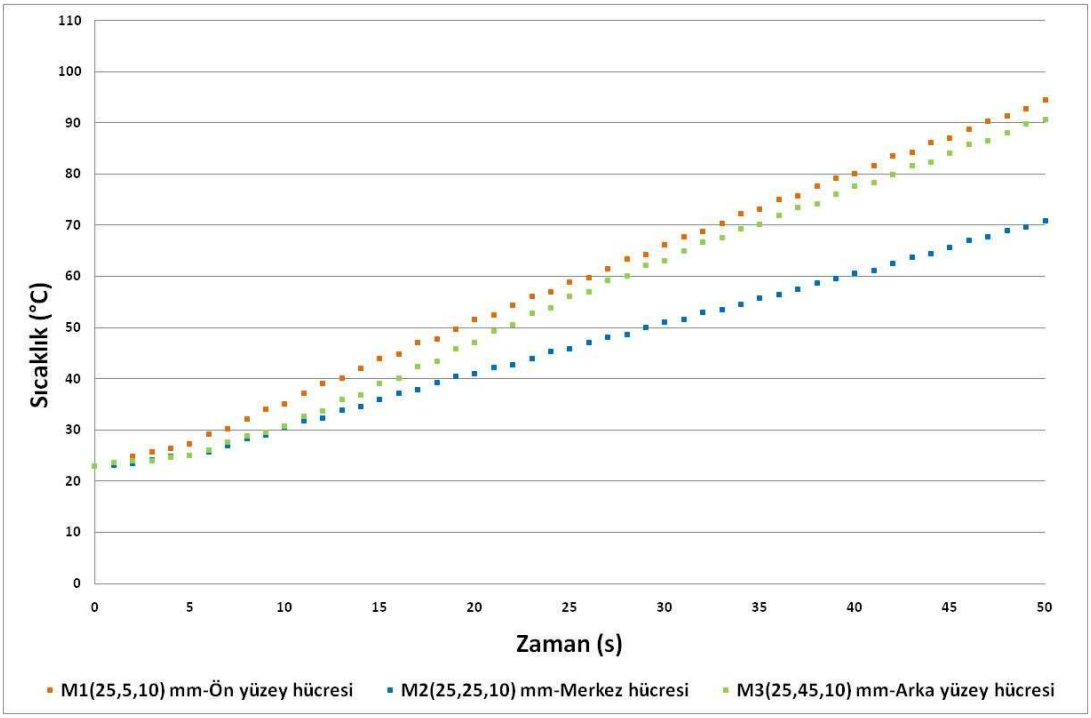
Şekil 4.26 : Deneysel Çalışma 2 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği.

Deneysel Çalışma 3, 900 W mikrodalga ısıtma gücünde, patatesin merkezinde aynı derinlikteki önden arkaya doğru sıralanan 3 hücre için yapılmaktadır. Hücrelerin sadece y eksenindeki yerleşimleri farklıdır. Bu deneysel çalışmada; mikrodalganın patatesin ön ve arka yüzeylerine ne oranda etki ettiği görülmek istenmektedir. 1. hücre merkezi M1(25,5,10) mm, 2. hücre (bütün patatesin merkez hücresi) merkezi M2(25,25,10) mm ve 3. hücre merkezi M3(25,45,10) mm olarak Şekil 4.27'de patates üzerinde görülmektedir.



Şekil 4.27 : Deneysel Çalışma 3 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri.

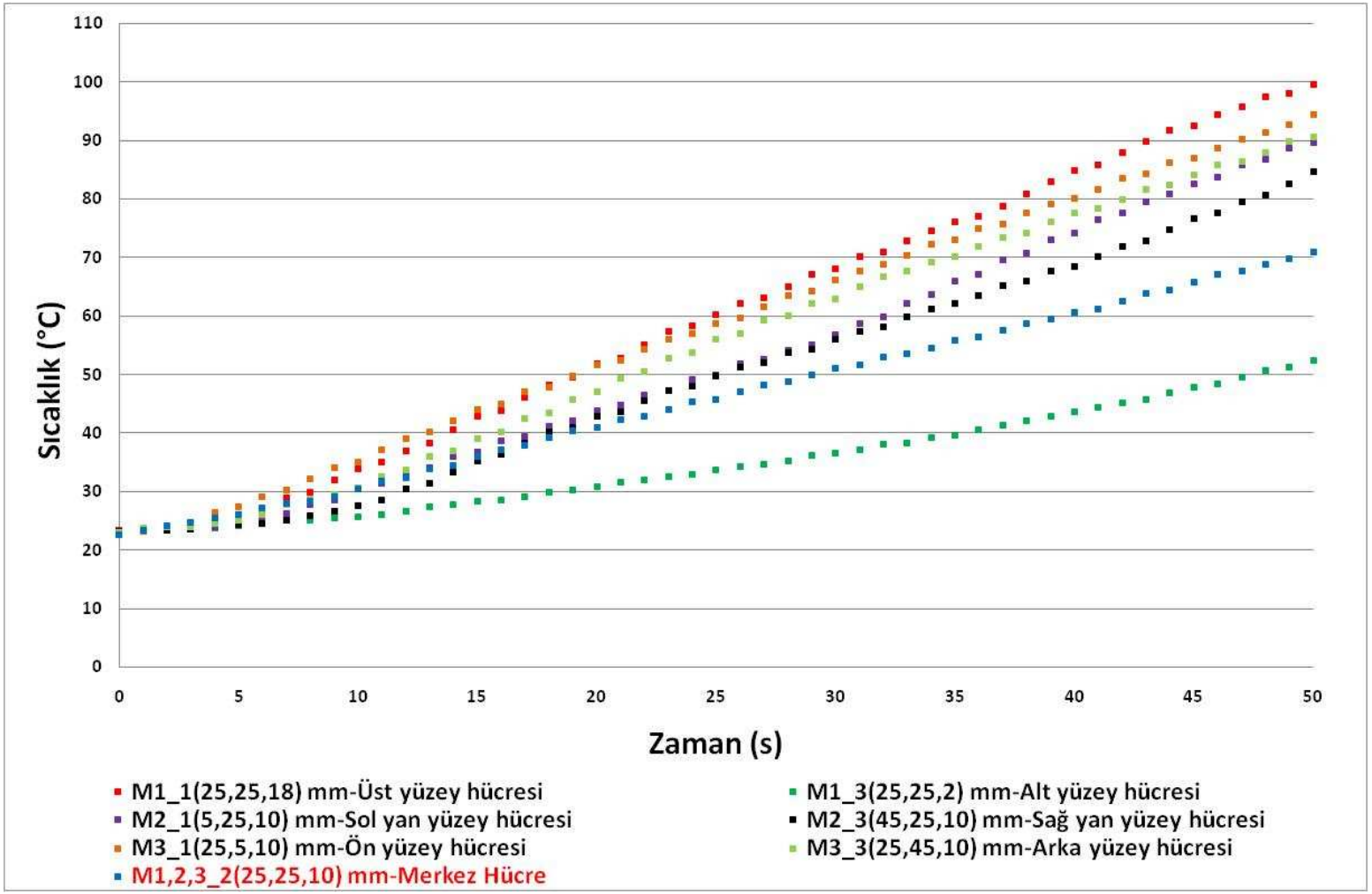
Deneysel Çalışma 3 için ölçülen sıcaklıkların zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.28'de sunulmaktadır.



Şekil 4.28 : Deneysel Çalışma 3 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği.

Deneysel Çalışma 1, 2 ve 3; hacim içerisindeki mikrodalga dağılımını en net şekilde ortaya koyacak olan deneylerdir. Bu üç deneyde de patatesin merkez hücresi yer almaktadır. Deneylerin merkez hücreleri üst üste çakışacak şekilde 1 hücre ve diğer 6 hücre; aralarındaki ilişkinin daha net görülebilmesi için aynı grafik üzerinde, Şekil 4.29'da görülmektedir. 3 deneyin bir arada yer aldığı bu grafikte; merkez hücre dışındaki diğer 6 hücre; patatesin 6 yüzeyinin merkez hücreleridir. Hücreler, yüzeylere yakındır.

Şekil 4.29'da da görüldüğü gibi patates yüzey hücrelerine ait sıcaklıklarda en yüksek değerlere ulaşan sıcaklık-zaman eğrisi üst yüzey hücresine, en düşük değerlere ulaşan sıcaklık-zaman eğrisi ise alt yüzey hücresine aittir. Yüzeyler arasında bir sıralama yapmak gerekirse; üst yüzeyi sırasıyla ön yüzey, arka yüzey, sol yüzey, sağ yüzey ve alt yüzey izlemektedir. Alt yüzey merkez hücresine ait sıcaklık-zaman eğrisi, patates merkez hücresine ait sıcaklık-zaman eğrisinden daha düşük değerlere sahiptir. Hücrelerin belli bir zaman sonunda aynı sıcaklık değerine ulaşamaması, mikrodalga ortam özelliklerinden ve gıda yapısından kaynaklanmaktadır. Mikrodalganın hacim içinde dağılımı, gıdanın ısıtma süresince bileşimindeki değişimler ve reaksiyonlar, probların zamanla gıda içinde yer değiştirmesi sıcaklık-zaman eğrisini etkilemektedir.

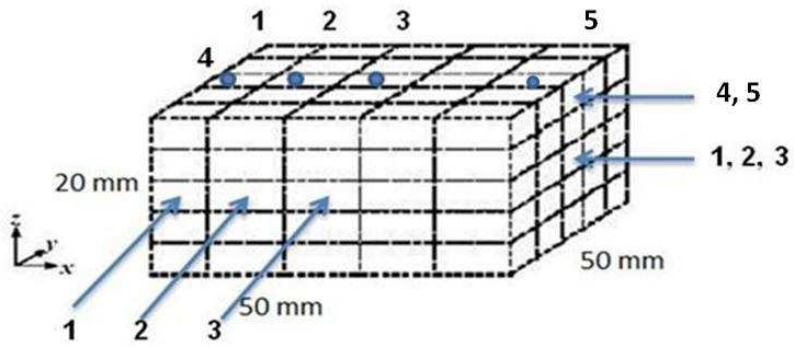


Şekil 4.29 : Deneysel Çalışma 1, 2 ve 3.

Patatesteki sıcaklık dağılımını daha iyi belirlemek için daha farklı hücreler de incelenmiştir. Böylece bir hücrenin solundaki, sağındaki, önündeki, arkasındaki, üstündeki ve altındaki komşu hücreleriyle olan ilişkileri daha net ortaya konmaya çalışılmıştır. Deneysel Çalışma 4, bu amaçla yapılan diğer deneysel çalışmadır.

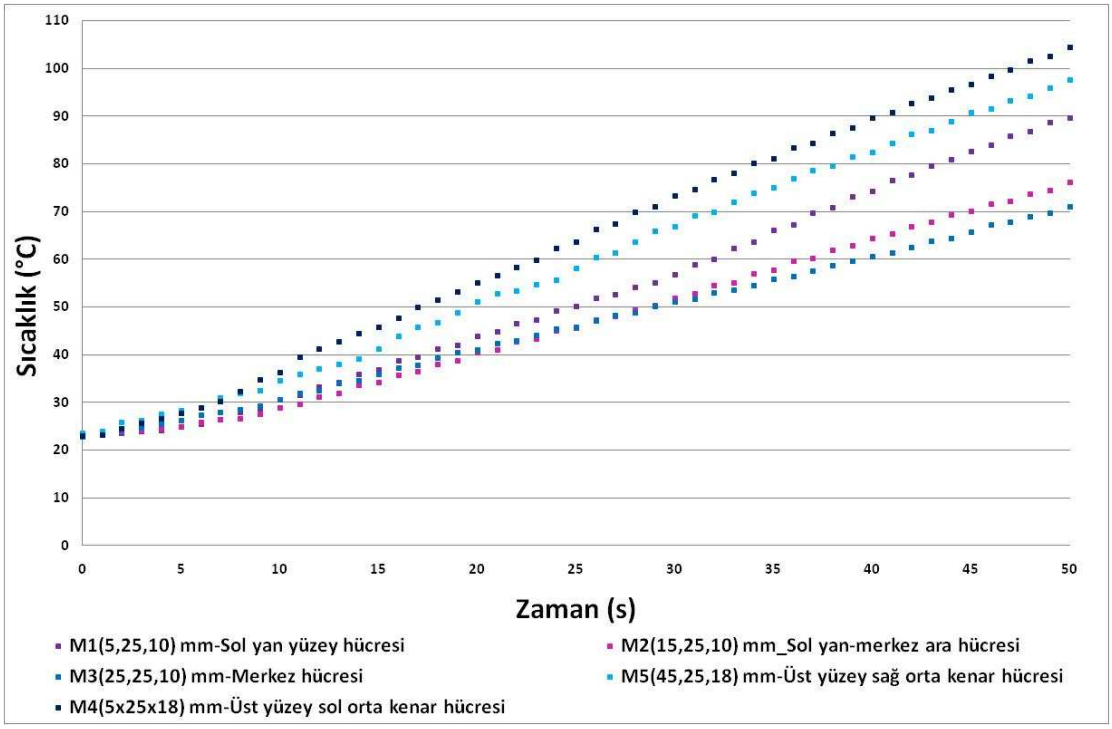
Deneysel Çalışma 4, 900 W mikrodalga ısıtma gücünde, patatesin merkezinde aynı derinlikdeki soldan sağa doğru sıralanan yan yana 3 hücre için yapılmaktadır. Deneysel çalışmada 2'deki 1. ve 2. hücrelerin arasına bir hücre daha eklenmektedir. Ayrıca, deneysel çalışma 2'deki 1. hücrenin üzerine üst yüzeye yakın olarak bir hücre daha eklenerek üst yüzeyden alt yüzeye doğru olan ilişki sol kenara yakın hücreler içinde gözlenmektedir. Bu üst yüzey sol kenar hücresinin simetrisi; üst yüzey sağ kenar hücresi de incelenerek de üst yüzeyde, sol kenardan sağa kenara doğru ilerledikçe olan değişim görülmektedir. Böylece 5 hücre arasındaki ilişki incelenmektedir.

1. hücre merkezi M1(5,25,10) mm, 2. hücre merkezi M2(15,25,10) mm, 3. hücre (bütün patatesin merkez hücresi) merkezi M3(25,25,10) mm, 4. hücre merkezi M4(5,25,18) mm ve 5. hücre M5(45,25,18) olarak Şekil 4.30'da patates üzerinde görülmektedir.



Şekil 4.30 : Deneysel Çalışma 4 için sıcaklık ölçümü yapılan hücre merkezleri.

Deneysel Çalışma 4 için ölçülen sıcaklıkların zamana bağlı değişim grafiği Şekil 4.31'de sunulmaktadır. Üst yüzey hücresi olan 4. ve 5. hücreye ait sıcaklık-zaman eğrilerinin aynı sürede daha yüksek değerlere ulaştığı görülmektedir. Ayrıca sol yan yüzeyden merkez hücresine doğru ilerledikçe hücrelere ait sıcaklık-zaman eğrisinin aynı sürede daha düşük değerlerde kaldığı görülmektedir. Bu durum mikrodalganın en fazla üst yüzeye ve sol yan yüzeye merkezden daha çok etki ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.31 : Deneysel Çalışma 4 için sıcaklığın zamana bağlı değişim grafiği.

Yapılan deneysel çalışmalarla birbirleriyle bağlantılı 10 farklı hücrenin, zamana bağlı sıcaklık değişimi incelenmiştir. Bu 7 ana ve 3 destekleyici toplam 10 farklı hücre ile mikrodalganın hacim içerisindeki dağılımı en iyi şekilde ortaya konmaya çalışılmıştır.

4.3 Belirsizlik Analizi

Deneysel çalışmalar sırasında ölçülen sıcaklık değeri için belirsizlik analizi yapılmaktadır. Yapılan deneysel çalışmalarla ilgili ölçüm belirsizliklerinin belirlenmesi, ölçüm sistemi ve sonuçlarının güvenilirliği açısından önem taşımaktadır.

Ölçüm belirsizliği hesabında Kline ve McClintock tarafından ileri sürülen ve daha hassas olan yöntem kullanılmıştır [23]. Bu yönteme göre, sistemde ölçülmesi gereken büyüklük R, ve bu büyüklüğe etki eden n adet bağımsız değişkenler ise (x_1, x_2, x_3…. x_n) olsun. Bu durumda R büyüklüğü **(4.6)** eşitliğinde görüldüğü gibi ifade edilir. Her bir bağımsız değişkene ait belirsizlik değerleri (w_1, w_2, w_3,… w_n) ve R büyüklüğünün toplam belirsizliği w_R ise R büyüklüğünün belirsizliği **(4.7)** eşitliğinde sunulduğu gibi hesaplanmaktadır [23].

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad \textbf{(4.6)}$$

$$w_R = \pm\left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1}\, w_1\right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2}\, w_2\right)^2 + \cdots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n}\, w_n\right)^2\right]^{1/2} \quad \textbf{(4.7)}$$

Yapılan deneysel çalışmalarda sıcaklık (T) değeri önemli olmaktadır. Deneysel çalışmalarda, mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacimlerde sıcaklık ölçümü fiber optik problarla yapılmaktadır.

Sıcaklık ölçümünde meydana gelen belirsizliğin hesaplanmasında **(4.6)** ve **(4.7)** eşitliklerinden yararlanılmaktadır. Sistemde ölçülmesi gereken büyüklük; sıcaklık (T) olup, **(4.6)** eşitliğinde görüldüğü gibi bu büyüklüğe (sıcaklığa) etki eden bağımsız değişkenler (x_1, x_2, x_3…. x_n) bulunmamaktadır. Bu durumda T büyüklüğü, **(4.8)** eşitliğinde görüldüğü gibi ifade edilmektedir. Sıcaklık büyüklüğüne ait belirsizlik değerlerinin (w_1, w_2) **(4.7)** eşitliğinde yerine yazılmasıyla, sıcaklık büyüklüğünün toplam belirsizliği w_T **(4.9)** eşitliğinde sunulduğu gibi hesaplanmaktadır.

$$T \neq T(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad \textbf{(4.8)}$$

$$w_T = \pm[(w_1)^2 + (w_2)^2]^{1/2} \quad \textbf{(4.9)}$$

Sıcaklık ölçümü için iki adet belirsizlik bulunmaktadır. Bunlar fiber optik problar için;

- Bağlantıdan gelen belirsizlik: $w_1 = \pm 0.1℃$
- Ölçümden gelen belirsizlik: $w_2 = \pm 0.1℃$

olarak belirlenmektedir.

Bunlara göre sıcaklık ölçümü için belirsizlik değeri; $w_T = \pm 0.141℃$ olarak elde edilmektedir.

Kütle ölçümü için ise cihazın belirsizliği 0.01 g olarak belirtilmektedir. Sıcaklık büyüklüğü için yapılan belirisizlik analizi, kütle büyüklüğü için de aynı şekilde yapıldığında kütle ölçümü için belirsizlik değeri; $w_m = \pm 0.01$ g olarak elde edilmektedir.

Hesaplamadan gelen belirsizliğin belirlenmesinde; pek çok denklem olduğu için en önemli denklem, mikrodalga ortamda ısıya dönüşen gücü veren **(2.35)** eşitliğinde

sunulan denklem kullanılmaktadır. Mikrodalga ortamda ısıya dönüşen güç eşitliği içerisinde yer alan, dielektrik kayıp faktörü ε'', hesaplamalarda sıcaklığa bağlı olarak kullanılmaktadır. Mikrodalga ortamda ısıya dönüşen gücü veren **(2.35)** eşitliği için, **(4.7)** eşitliğinde sunulduğu gibi belirsizlik değerini belirleyebilmek için **(4.10)** eşitliği yazılmaktadır.

$$w_{G\ddot{U}\dot{C}} = \pm\left[\left(2\pi f \varepsilon_0 E^2 V \frac{\partial \varepsilon''}{\partial T}\, w_T\right)^2\right]^{1/2} \quad \textbf{(4.10)}$$

(4.10) eşitliğinde yer alan dielektrik kayıp faktörünün (ε''), sıcaklığa bağlı eşitliği **(4.11)** eşitliğinde sunulmaktadır.

$$\varepsilon''(T) = [17.19 - 0.1357T + 0.001370T^2] \quad \textbf{(4.11)}$$

Mikrodalga ortamda ısıya dönüşen gücün hesaplanmasındaki belirsizlik %$\pm$0.67 olarak bulunmaktadır.

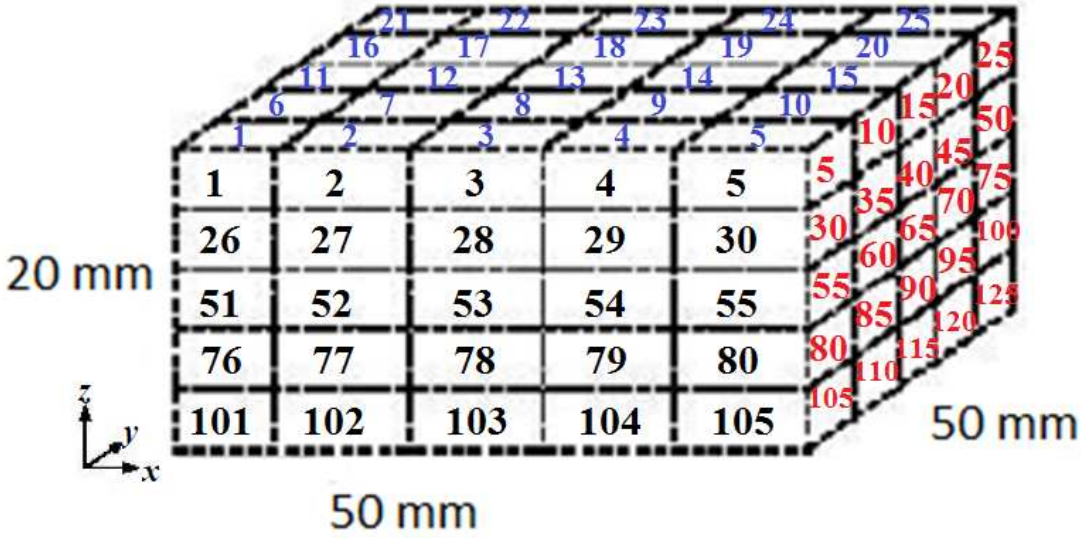
5. ANALİTİK MODELLEME ÇALIŞMASI

5.1 Modelleme Çalışmaları

Yüksek lisans tez çalışması kapsamında, mikrodalga ısıtma ile ısıtılan gıdanın sıcaklık dağılımının belirlenmesi, deneysel çalışmalar dışında analitik olarak da incelenmektedir. Modelleme çalışmasında mikrodalga kaynağının hacim içinde dağılımının sıcaklık profiline olan etkisi ortaya konmaya çalışılmaktadır.

5.1.1 Modelin kurulma aşaması

Patates için sonlu hacim yaklaşımıyla 3 boyutlu ısı ve kütle transferi modeli oluşturulmuştur. Patatesin her boyutunda 5 eşit parçaya bölündüğü kabul edilmiş ve kontrol hacmi toplam 125 elemana ayrıklaştırılmıştır. Patates modelinin geometrisi Şekil 5.1'de gösterilmektedir. Hücrelerin numaralandırılmasına üst yüzeyden sağ tarafa doğru başlanılmaktadır.



Şekil 5.1 : Patates model geometrisi.

Mikrodalga ısıtma modelleme çalışmalarında mikrodalganın 900 W gücü kullanılmaktadır. Mikrodalga gücünden kaynaklanan ısı, kaynak terimi olarak modelde yer almaktadır. Kütle transferi model denklemlerinin oluşturulmasında, su buharının gıda içerisindeki hareketinin belirmesi temel alınmıştır. Patates içindeki

hücrelerde, oluşan su buharının sadece yayılımı izlendiği için bu hücrelerde buharlaşma ile kaybedilen ısı ihmal edilmektedir. Yüzeyde sınır şatı olarak kütlesel akı değeri kullanılıp, yüzeydeki hücreler için buharlaşma enerjisi genel enerji denklemine dahil edilmektedir. Yani yüzeylerdeki buharlaşma sonucunda yüzeylerden kaybedilen ısı modele kullanılmaktadır. Modelde patates içindeki su ve su buharı toplamı nem olarak ifade edilmiştir. Patates içerisindeki su buharının uzaklaşmasıyla, patatesin nem içeriği değeri de azalmaktadır.

Modelde gıdaya ait ısıl özellikler, kütle transfer özellikleri ve dielektrik özellikleri; neme, sıcaklığa yada her ikisine birden bağlı olarak korelasyonlar halinde verilmektedir.

Isıtılan hacim 2.45 GHz sabit frekansında olup, patates için %79 nem ve 23°C sıcaklık başlangıç değerleridir.

Patatesin özgül ısısı (C_p) için literatürde bulunan değerler Çizelge 5.1'de verilmektedir.

Çizelge 5.1 : Patates için literatürde bulunan özgül ısı değerleri.

Nem içeriği (%)	Özgül ısı (kJ/kg K)	Kaynak
80	3.64	[6]
80	3.5	[9]
~85	3.63	[10]
-	3.63	[12]
-	3.9	[13]
79,8	3.634	[24]
75	3.483	[24]
75	3.52	[25]
85<	3.9	[26]

Çizelge 5.1'de de görüldüğü gibi literatürde patatesin özgül ısısı için farklı değerler bulunmaktadır. Özgül ısı değeri için genelde gıda bileşenlerinden oluşturulan korelasyonlar kullanılmıştır [24]. Gıdaların su, protein, karbonhidrat, yağ ve kül olarak 5 bileşenden oluşması üzere (5 bileşenin oranlarının toplamı 1 olarak kabul edilmektedir), bu 5 bileşeni içeren bir korelasyon oluşturulmuştur. **(5.1)** eşitliğinde gıdaların özgül ısılarının bulunmasında kullanılan eşitlik görülmektedir.

$$C_p = 1.424X_c + 1.549X_p + 1.675X_f + 0.837X_a + 4.187X_w \quad \textbf{(5.1)}$$

(5.1) eşitliğinde C_p özgül ısı (kJ/kg K), X kütle kesri; alt indisler ise c; karbonhidrat, p; protein, f; yağ, a; kül ve w; nemdir [24].

(5.1) eşitliğini model içinde kullanmanın zor olacağı düşünülmektedir. Çünkü her nem değeri için gıdanın diğer bileşenlerini hesaplamak karışık olup, tezde üzerinde durmak istenen asıl konuyla ilgisi olmayacağı için modelde kullanılmak üzere sadece neme bağlı bir eşitlik araştırılmıştır. **(5.2)** eşitliğinde sadece nem değerinin değişimiyle oluşturan korelasyon sunulmaktadır [27].

$$C_p = 1.382 + 2.805\ X_w \quad \textbf{(5.2)}$$

(5.2) eşitliğinde C_p özgül ısı (kJ/kg°C), X kütle kesri, alt indis w ise; nemdir [27].

%79 nem içeriğine sahip patates için, **(5.2)** eşitliği kullanılarak **C_p değeri 3.6 (kJ/kg°C)** olarak bulunmaktadır.

Patatese ait bir başka ısıl özellik olan ısı iletim kat sayısı (k) için literatürde bulunan değerler Çizelge 5.2'de verilmektedir.

Çizelge 5.2 : Patates için literatürde bulunan ısı iletim kat sayısı değerleri.

Nem içeriği (%)	Isı iletim kat sayısı	Kaynak
80	0.6 (W/mK)	[9]
~85	0.648 (W/m°C)	[10]
-	0.648 (W/m°C)	[12]
-	0.4 (W/mK)	[13]
81.5	0.554 (W/mK)	[24]
-	0.554 (W/mK)	[25]
85<	0.4 (W/mK)	[26]

Çizelge 5.2'de de görüldüğü gibi literatürde patatesin ısı iletim kat sayısı için farklı değerler bulunmaktadır. Isı iletim kat sayısı değeri için aynı özgül ısı değerinde olduğu gibi, genellikle gıda bileşenlerinden oluşturulan korelasyonlar kullanılmıştır [24]. **(5.3)** eşitliğinde gıdaların özgül ısılarının bulunmasında kullanılan eşitlik görülmektedir.

$$k = 0.25X_c + 0.155X_p + 0.16X_f + 0.135X_a + 0.58X_w \quad \textbf{(5.3)}$$

(5.3) eşitliğinde k ısı iletim kat sayısı (W/mK), X kütle kesri (yüzde olarak); alt indisler ise c; karbonhidrat, p; protein, f; yağ, a; kül ve w; nemdir [24].

C_p özgül ısı değerinde de olduğu gibi, model çalışmalarında kolaylık olması için sadece gıdanın nem içeriğine bağlı olarak bir eşitlik araştırılmıştır. **(5.4)** eşitliğinde sadece nem değerinin değişimiyle oluşturan korelasyon sunulmaktadır [27].

$$k = 0.148 + 0.493\ X_w \quad \textbf{(5.4)}$$

(5.4) eşitliğinde k ısı iletim kat sayısı (W/m°C), X kütle kesri (yüzde olarak); alt indis ise w; nemdir [27].

%79 nem içeriğine sahip patates için, **(5.4)** eşitliği kullanılarak **k değeri 0.537 (W/m°C)** olarak bulunmaktadır.

Patatese ait bir başka özellik olan yoğunluk (ρ) için literatürde bulunan değerler Çizelge 5.3'de verilmektedir.

Çizelge 5.3 : Patates için literatürde bulunan yoğunluk değerleri.

Nem içeriği (%)	Yoğunluk (kg/m^3)	Kaynak
80	1050	[9]
~85	1067	[10]
-	1067	[12]
-	1000	[13]
79	1030	[6]
85<	1000	[26]

Literatürden patates için farklı yoğunluk değerleri bulunmaktadır. Başlangıç nemi olarak %79 kabul ettiğimiz için bu nem değerindeki patatesin yoğunluğu olarak 1030 (kg/m^3) olarak kullanılmaktadır.

Patates içindeki su ve katı kısımların yüzdelerine göre, patates içindeki katının yoğunluğu belirlenip buna uygun bir eşitlik, **(5.5)** eşitliğinde görüldüğü gibi oluşturulmaktadır.

$$\rho_{patates} = X_{su} \cdot \rho_{su} + X_{katı} \cdot \rho_{katı} \quad \textbf{(5.5)}$$

(5.5) eşitliğinde ρ yoğunluk (kg/m^3), X kütle kesridir. %79 nem içeriğine sahip patates için, ρ_{su}=1000 kg/m^3 alınırsa, $\rho_{katı}$=1142.86 kg/m^3 olarak hesaplanmaktadır.

Patatesin difüzyon kat sayısı (D) için literatürde çok fazla değer bulunamamaktadır. Literatürde bulunan, patates içindeki su buharının difüzyon kat sayısı (D) değerleri Çizelge 5.4'de görülmektedir.

Çizelge 5.4 : Patates için literatürde bulunan difüzyon kat sayısı değerleri.

Kuru kütledeki nem içeriği (kg/kg)	Sıcaklık (°C)	Yayılım kat sayısı (m^2/s)	Kaynak
-	-	$1.4x10^{-9}$	[10]
0.05-1.5	30-90	$1.1x10^{-10}$ - $4.5x10^{-10}$	[28]
-	50	$2x10^{-10}$	[29]

Kuru kütledeki nem içeriği, **(5.6)** eşitliğinde görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$m' = \frac{Nem\ miktarı}{Kuru\ madde\ miktarı} \quad \textbf{(5.6)}$$

(5.6) eşitliğinde m' kuru kütledeki nem içeriği (kg/kg); %79 nem içeriğindeki 50 g patates için 3.76 kg/kg olarak hesaplanmaktadır.

Difüzyon kat sayısı için bulunan korelasyonlar nem ve sıcaklığa bağlı olarak genellikle Arrhenius tipi eşitliğe benzer eşitliklerdir.

Literatürde difüzyon kat sayısının sıcaklıkla artışı çoğunlukla Arrhenius tipi **(5.7)** eşitliğinde görüldüğü gibi ifade edilmektedir [30].

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \textbf{(5.7)}$$

(5.7) eşitliğinde, D difüzyon kat sayısı (m^2/s), D_0 Arrhenius faktörü (m^2/s), E_a nem yayılımının aktivasyon enerjisi (kJ/mol), R ideal gaz sabiti (kJ/kmol K) ve T sıcaklık (K)'dir [30].

(5.7) eşitliğine benzer şekilde oluşturan bir başka eşitlik ise **(5.7)** eşitliğinde sunulmaktadır [31].

$$D(m', T) = D_0 exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) exp(-(AT + B)M) \quad \textbf{(5.8)}$$

(5.8) eşitliğinde D_0 2.14x10-7, A kat sayısı 0.0239 (1/K), B kat sayısı 9.597, E_a aktivasyon enerjisi 15.18 (kJ/mol), m' kuru kütledeki nem içeriği (kg/kg) ve T madde sıcaklığı (K)'dır [31].

Bir başka eşitlik ise **(5.9)** eşitliğinde görüldüğü gibi m' kuru kütledeki nem içeriği (kg/kg) ve T madde sıcaklığı (K) için verilmektedir [30].

$$D(m',T) = 1.29 \times 10^{-6}\left(-\frac{7.25 \times 10^{-2}}{m}\right)\exp\left(-\frac{2044}{T}\right) \quad \textbf{(5.9)}$$

(5.9) eşitliği 0.03<m'<5 ve 60°C<T<100°C aralıklarındaki patates için kullanılabilmektedir.

(5.10) eşitliği de yine benzer şekilde sunulmaktadır [32].

$$D(m',T) = 7.18 \times 10^{5}\exp\left(-\frac{31580}{RT}\right)\exp\left[(-0.0025T + 1.22)m\right] \quad \textbf{(5.10)}$$

(5.10) eşitliği 0.25<m'<2 ve 40°C<T<85°C aralıklarında yaklaşık olarak (45x20x10) mm ölçülerine sahip kartezyen koordinattaki patates için kullanılabilmektedir.

Açıklanan korelasyonlar, belirlenen nem değeri ve sıcaklık için literatürde bulunan değerleri yaklaşık olarak vermediğinden dolayı başka bir eşitlik bulunmaya çalışılmıştır.

Çizelge 5.4'deki değerler ve korelasyonlar incelendiğinde model içerisinde difüzyon kat sayısının, kuru kütledeki nem içeriğine ve sıcaklığa bağlı bir eşitlik olarak verilmesi uygun görülüp, model içerisinde en uygun eşitlik olarak görülen **(5.11)** eşitliği kullanılmaktadır [27].

$$D = 10^{-10}\left\{4842 + 0.5735m'^{-4.34} + 34.212\left[\frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)^2}\right]\right\} exp\left(\frac{-18.8}{RT}\right) \quad \textbf{(5.11)}$$

(5.11) eşitliğinde; m' gıdanın kuru kütle içindeki nem içeriği (kg/kg), R ideal gaz sabiti (kJ/kmol K), T sıcaklık (K), E_a aktivasyon enerjisi için ise 4.5 kcal/mol yada 18.8 kJ/mol değeri kullanılabilmekte olup, ϵ gıdanın gözenekliliğidir.

ϵ gıdanın gözenekliliği, **(5.12)** eşitliğinde verilmektedir.

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_{gıda}}{\rho_{katı}} \quad \textbf{(5.12)}$$

(5.12) eşitliğinde $\rho_{gıda}$; gıdanın yığın yoğunluğu (kg/m^3) ve $\rho_{katı}$, gıda içindeki katı yoğunluğu (kg/m^3)'dur.

(5.11) eşitliğinde görüldüğü gibi difüzyon kat sayısı gıda sıcaklığına, gıdanın kuru kütle içindeki nem içeriğine ve gıda gözenekliliğe bağlıdır. Gözenekli gıdalarda difüzyon kat sayısı, gözenekliliğin gelişmesinden dolayı genellikle nem içeriğinin artmasıyla artmaktadır.

%79 nem içeriğine sahip 50 g patates için gözeneklilik değeri ϵ = 0.09875 bulunup, **difüzyon kat sayısı da D = 2.425x10^{-10} m^2/s** olarak hesaplanmaktadır. Bulunan gözeneklilik değerinin (ϵ=0.09875), difüzyon kat sayısının belirlenmesi için **(5.11)** eşitliğinde yerine yazılması ile bulunan değer Çizelge 5.4'de verilen değerlere yakındır.

Kütle transferi hesaplamalarında, yüzey sınır şartı olarak **(3.13)** eşitliğinde görüldüğü gibi taşınımla kütle transferi kullanılmamaktadır. Eşitlikteki h_m değeri hesaplanmadan ve bu bağıntı kullanılmadan, daha önce deneysel verilerden elde edilen ve Bölüm 4.2.4'de açıklanan **(4.4)** eşitliği kullanılmaktadır. Bölüm 3.1'de açıklanan Zhou ve diğerleri (1994) tarafından yapılan çalışmada yer alan, **(3.15)** eşitliğine benzer şekilde deneysel sonuçlardan yararlanılarak kütlesel akı oluşturulmaktadır. Sınır şartı olarak kütlesel akısı değeri kullanılmaktadır. Yüzeydeki hücreler için sınır şartı yarı ampirik bir şekilde ifade edilmektedir. **(4.4)** eşitliğindeki değerler, (g) olarak elde edilmektedir. Kütle akısı (kg/m^{2}s) biriminde olduğu için, bulunan korelasyonlar birim zamanda birim yüzeydeki kütle geçişine uygun olarak gerekli değerlerle çarpılıp kütle akısı (kg/m^{2}s) olarak kullanılmaktadır. Elde edilen kütlesel akı değerinden hesaplanan h_m değeri ile boyutsuz sayılardan elde edilen h_m değeri Bölüm 5.1.2'de karşılaştırılmaktadır. Yapılan kabulün nedeni ve bu yaklaşımın uygunluğu açıklanmaktadır.

Kütle kaybının sadece gıda içindeki nemde olduğu ve katı kısmın sabit kaldığı kabul edilmektedir. Gıda içindeki nem değeri başlangıç olarak %79 alınıp, 50 g patates için 10.5 g katı kütlesi ve 39.5 g nem kütlesi bulunmaktadır. Nem yüzdesinin değişimi **(5.13)** eşitliğinde görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$X_{nem} = 100.\frac{Nem\ k\ddot{u}tlesi - \Delta_{m_{nem}}}{Toplam\ k\ddot{u}tle - \Delta_{m_{nem}}} \quad \textbf{(5.13)}$$

(5.13) eşitliğinde, $\Delta_{m_{nem}}$ patatesin nem miktarındaki değişimdir. Gıdaya ait özelliklerin nem değerine bağlı değişiminde, patatese ait nem içeriği değeri yüzde olarak yada kuru gıda içerisindeki değeri (kg/kg) olarak kullanılmaktadır.

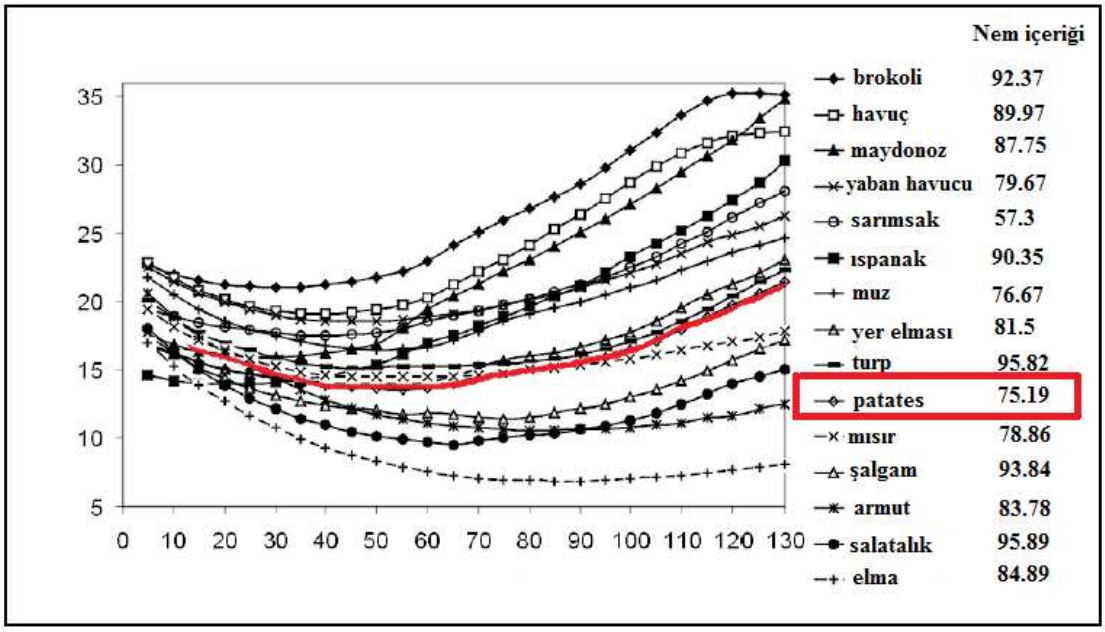
Gıda ait özelliklerden en önemlisi olan dielektrik özellikler (ε', ε'') için literatürde pek çok değer bulunmaktadır. Bulunan bu değerler Çizelge 5.5'de görülmektedir.

Çizelge 5.5 : Patates için literatürde bulunan dielektrik özellikleri değerleri.

Nem içeriği (%)	Sıcaklık (°C)	Frekans (MHz)	ε'	ε''	Kaynak
79	23	2450	57	17	[6]
~85	23	2450	58	13	[10]
-	-	2450	58	13	[12]
-	23	2450	50.5	15.12	[13]
85<	23	2450	50.5	15.5	[26]
82	22	2000	61.9	21	[27]
82	22	2400	61.5	19.5	[27]
82	23	2450	51.5	16.3	[27]
79.5	25	3000	57.3	15.7	[27]
81.2	25	3000	62.9	17.2	[27]
85	25	3000	65	18	[27]
83.3	25	3000	69.1	17	[27]
80	23	2500	54	20	[27]
76.4	25	915	65	19	[27]
76.4	25	2450	64	14	[27]
76.4	50	915	58	27	[27]
76.4	50	2450	58	13	[27]
-	25	3000	66	19	[27]
-	65	3000	64	17	[27]
-	20	900	68	20	[27]
-	60	900	59	26	[27]

Çizelge 5.5'de de görüldüğü gibi, patates için dielektrik özellikler nem içeriği, sıcaklık ve frekansa göre değişmektedir. Bölüm 3.2'de de açıklandığı gibi, gıdalar için nem içeriğine, sıcaklığa yada frekansa bağlı olarak dielektrik özelliklerin tam olarak arttığı yada azaldığı söylenememektedir. Çünkü bu değerler her gıda tipinin yapısına ve gıda bileşimindeki reaksiyonlara bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Yapılan deneysel çalışmalarda ve modelleme çalışmalarında 2450 MHz sabit frekans değeri kullanıldığından bu frekans değerinde dielektrik özellikler için sıcaklığa ve neme bağlı korelasyonlar araştırılmıştır.

3. Bölümde açıklanıp ve Şekil 3.19'da sunulduğu gibi gıdaların dielektrik kayıp faktörleri için deneysel çalışmalar yapılıp, bu çalışmalardan korelasyonlar oluşturulabilmektedir. Şekil 5.2'de farklı gıdalar için dielektrik kayıp faktörünün sıcaklığa göre değişimi grafiğinde model çalışmaları için seçilen patatese ait eğri belirtilmektedir.



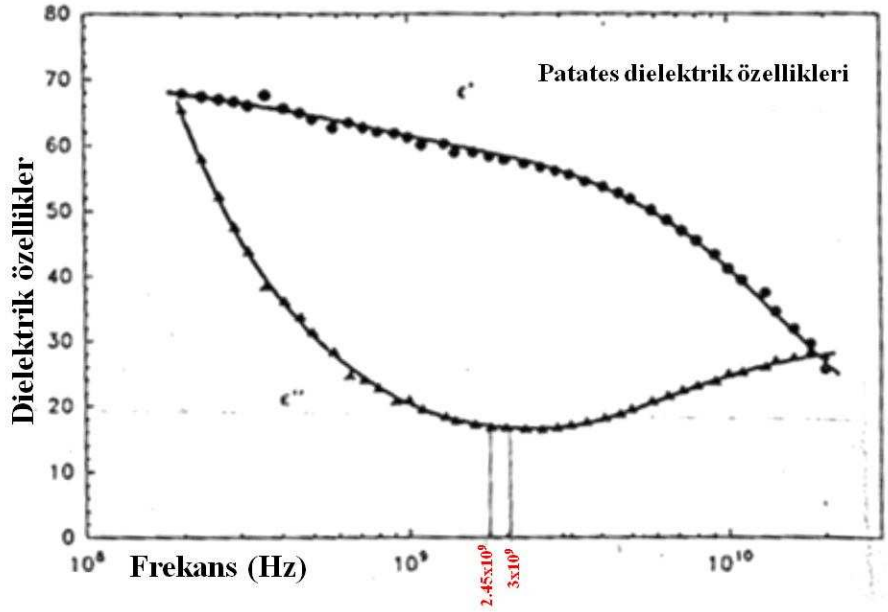
Şekil 5.2 : Patatesin sıcaklığa bağlı dielektrik kayıp faktörün belirtilmesi.

Bu eğri için oluşturan korelasyon modelleme çalışmalarında kullanılmaktadır. **(5.14)** eşitliğinde, patatesin dielektrik kayıp faktörünün sıcaklığa bağlı eşitliği sunulmaktadır.

$$\varepsilon''_{(sıcaklık)} = a + bT + cT^2 \qquad \textbf{(5.14)}$$

(5.14) eşitliğinde, T sıcaklık (°C) ve a, b, c katsayıları sırasıyla 17.79, -0.1357, 0.001370 olarak verilmektedir. 23 °C'deki patates için dielektrik kayıp faktörü değeri 15.39 olarak bulunmaktadır.

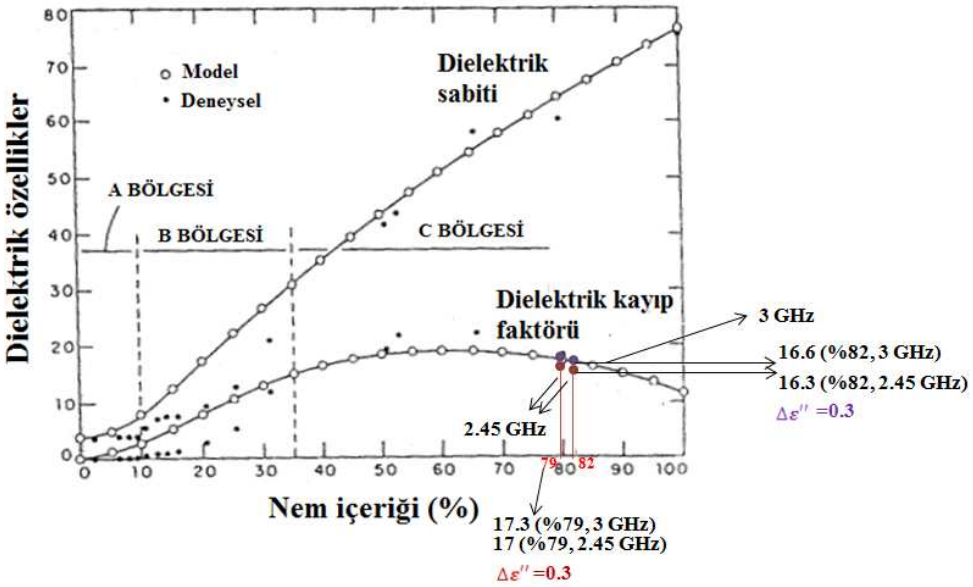
Dielektrik kayıp faktörünün sıcaklıklığa bağlı değişiminin yanı sıra nem içeriğine bağlı değişimi de araştırılmıştır. Literatürde 25°C ve 3 GHz frekanstaki patatesin dielektrik kayıp faktörünün nem içeriğine bağlı değişimi bulunabilmektedir. Modelleme çalışmalarında 2.45 GHz frekansındaki değerler kullanılmaktadır, ancak 3 GHz ve 2.45 GHz frekanslarındaki değerlerin Şekil 5.3' de sunulduğu gibi birbirine yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.3 : 23°C'deki patatesin frekansa bağlı dielektrik özellikleri

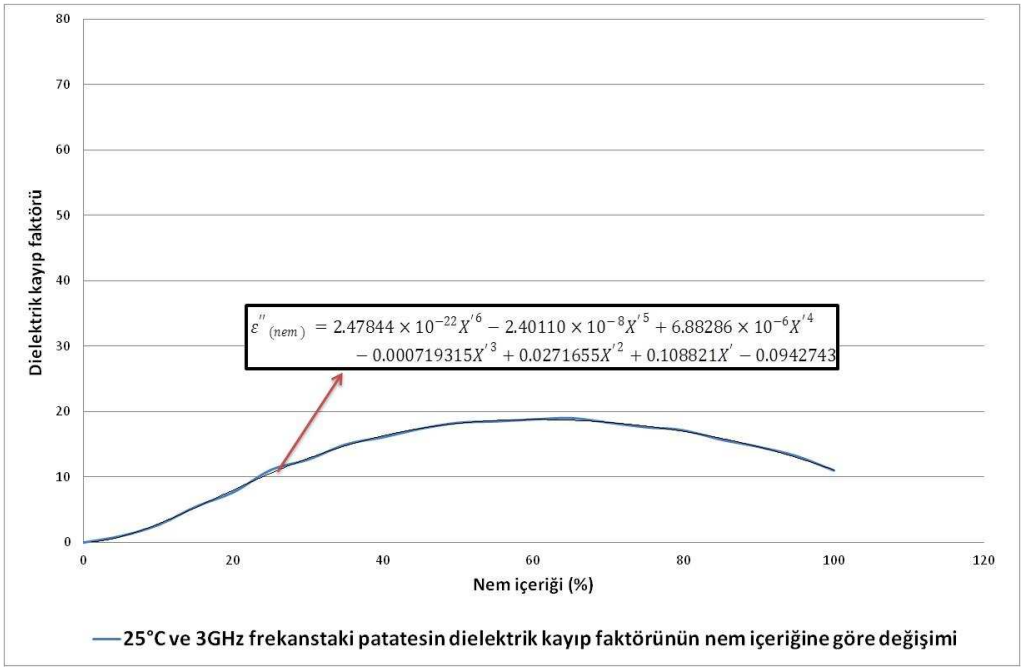
Şekil 5.3'de 23°C'deki patatesin 2.45 GHz için dielektrik kayıp faktörü 16.5 olarak okunurken, 3 GHz için 16.2 olarak okunmaktadır. $\Delta\varepsilon^{''}$= 0.3 gibi küçük bir değer bulunmaktadır. Birbirine yakın frekans değerlerinde dielektrik kayıp faktörünün çok az değiştiği görülmektedir.

Şekil 5.4'de ise 25°C ve 3 GHz frekanstaki patatesin dielektrik kayıp faktörünün nem içeriğine bağlı değişim grafiği ve 23°C ve 2.45 GHz frekanstaki 2 değeri görülmektedir.



Şekil 5.4 : 25°C ve 3 GHz frekanstaki patatesin dielektrik kayıp faktörünün nem içeriğine bağlı değişim grafiği ve 23°C ve 2.45 GHz frekanstaki 2 değeri.

Şekil 5.4'de görüldüğü gibi, 2.45 GHz ve 3 GHz frekanslarında, %79 ve %82 nem içeriğinde belirlenen dilektrik kayıp faktörleri için $\Delta\varepsilon^{"}$= 0.3 değeri bulunmaktadır. Bu yüzden nem içeriğine bağlı dielektrik kayıp faktörü değişim grafiği, 25°C ve 3 GHz frekanstaki grafik olarak kullanılabilmektedir. Bu grafik için okunan değerlerle, Şekil 5.5'de görüldüğü gibi bir korelasyon oluşturulup, oluşturulan korelasyonun eşitliği, **(5.15)** eşitliğinde sunulmaktadır.



Şekil 5.5 : 25°C ve 3 GHz frekanstaki patatesin dielektrik kayıp faktörünün nem içeriğine göre değişim grafiği ve bu değişim için oluşturulan korelasyon.

$$\varepsilon''_{(nem)} = 2.47844 \times 10^{-22}X'^{6} - 2.40110 \times 10^{-8}X'^{5} + 6.88286 \times 10^{-6}X'^{4} - 0.000719315X'^{3} + 0.0271655X'^{2} + 0.108821X' - 0.0942743 \quad \textbf{(5.15)}$$

(5.15) eşitliğinde, X' yüzde olarak nem içeriği olup, eşitlik için R^2=0.9989 olarak bulunmaktadır. %79 nem içeriğine sahip patates için dielektrik kayıp faktörü değeri 17.3 olarak hesaplanmaktadır.

Model içerisinde dielektrik kayıp faktörünü kullanırken, hem neme hem de sıcaklığa göre olan korelasyonlarını kullanmak karışıklık yaratacağından ve başlangıç durumu (T_0=23°C) için hesaplanan değerler birbirinden farklı bulunduğu için en çok etkileyen değere göre olan eşitliğin kullanılmasının daha uygun olabileceği düşünülmektedir. Başlangıç durumu için patatesin 23°C'de ve %79 neme sahip

olduğu kabul edilmektedir. Bu durumda 15.39 (sıcaklığa bağlı) ve 17.3 (nem içeriğine bağlı) olarak 2 farklı dielektrik kayıp faktörü bulunmaktadır. Bu nedenle 4. Bölümde açıklanan deney sonuçları için dielektrik kayıp faktörü üzerinde nem ve sıcaklıktan hangisinin daha etkili olduğuna bakılmaktadır. Çizelge 5.6'da deney sonuçları için dielektrik kayıp faktörü üzerinde nem ve sıcaklık etkisi görülmektedir.

Çizelge 5.6 : Mikrodalga ısıtma 900 W deney sonuçları için dielektrik kayıp faktöründe nem ve sıcaklık etkisinin karşılaştırılması.

ZAMAN (sn)	**MER. SIC. [°C]**	**m_1 [g]**	**m_2 [g]**	**m_1-m_2 [g]**	**Nem içeriği (%)**	**$\varepsilon''_{(sıcaklık)}$**	**$\varepsilon''_{(nem)}$**
0	23	50	50	0	79	15.39	17.3
25	39	49.97	49.66	0.31	78.8	14.58	17.63
45	64	49.9	48.4	1.5	78.35	14.72	17.7
60	90.8	49.72	45.3	4.42	76.96	16.76	17.92
70	100	50	45.1	4.9	76.7	17.92	17.96
120	101.1	49.92	37.9	12.02	72.35	18.07	18.55

Çizelge 5.6 incelendiğinde, dielektrik kayıp faktörü, patates için 23°C'deki başlangıç durumundan 100°C sıcaklığa geldiğinde, $\Delta\varepsilon''_{(sıcaklık)} = \%16.44$ ve $\Delta\varepsilon''_{(nem)} = \%3.8$ değerleri bulunmaktadır. 23°C'deki başlangıç durumundan 101.1°C sıcaklığa geldiğinde ise, $\Delta\varepsilon''_{(sıcaklık)} = \%17.4$ ve $\Delta\varepsilon''_{(nem)} = \%7.2$ değerleri hesaplanmaktadır. Bulunan değerler ile; dielektrik kayıp faktörünün sıcaklığa göre olan değişiminin, neme göre olan değişiminden daha fazla olduğu; yaklaşık 2-4 katı kadar olduğu görülmektedir. Bu nedenle, model içerisinde dielektrik kayıp faktörü değerinin sıcaklığa göre değişimini içeren **(5.14)** eşitliği kullanılmaktadır. Sıcaklığı değişen patatesin nem içeriği de değişeceğinden dolayı, sadece sıcaklığa bağlı bir değişimin kullanılmasının yeterli olacağı düşülmektedir. Böylece 23°C'de başlangıç sıcaklığındaki patates için dielektrik kayıp faktörü 15.39 olarak belirlenmektedir.

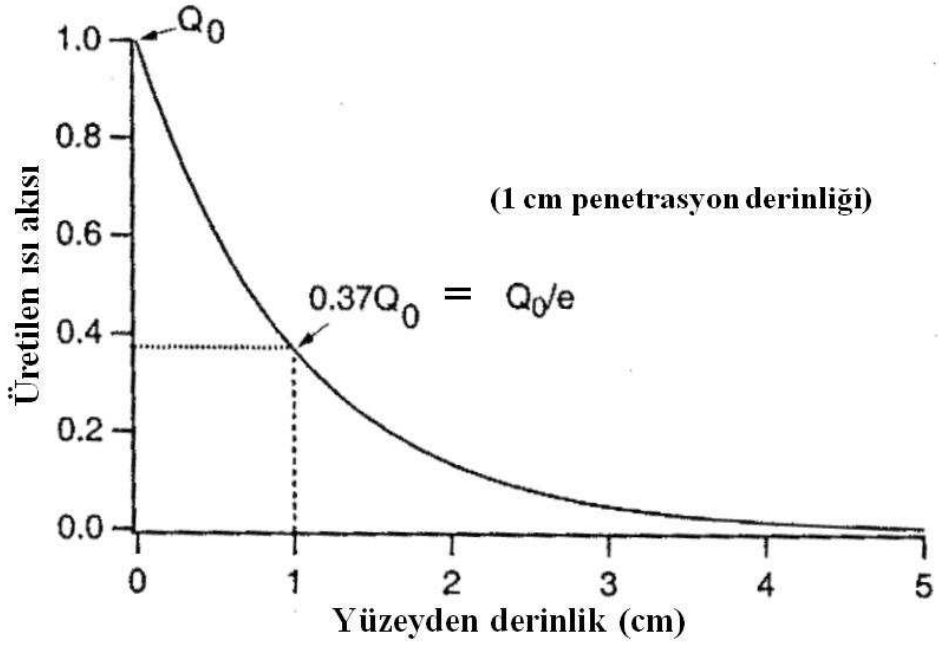
Bir diğer dielektrik özellik olan dielektrik sabiti için de benzer şekilde bir korelasyon araştırılmıştır. Deneysel sonuçlardan yararlanılarak oluşturulan korelasyonda hem sıcaklığın hem de nem içeriğinin etkisi yansıtılmaktadır [27]. 2400-2500 MHz frekans aralığında sebze ve meyveler için kullanılabilen eşitlik **(5.16)** eşitliğinde sunulmaktadır.

$$\varepsilon' = X'(1.10596 - 0.000900T) - 15.1288 \qquad \textbf{(5.16)}$$

(5.16) eşitliğinde, X' yüzde olarak nem içeriği, T sıcaklık (K) olup, eşitlik için R^2=0.711 olarak sunulmaktadır [27]. %79 nem içeriğine sahip 23°C'deki patates için dielektrik sabitinin değeri 51.2 olarak bulunmaktadır.

Dielektrik kayıp faktörü, **(2.35)** eşitliğinde görülen ısıya dönüşen mikrodalga gücü genel eşitliğinde kullanıldığı gibi ayrıca dielektrik sabiti ile birlikte **(2.40)** eşitliğinde sunulduğu gibi penetrasyon derinliğinin hesabında da kullanılmaktadır.

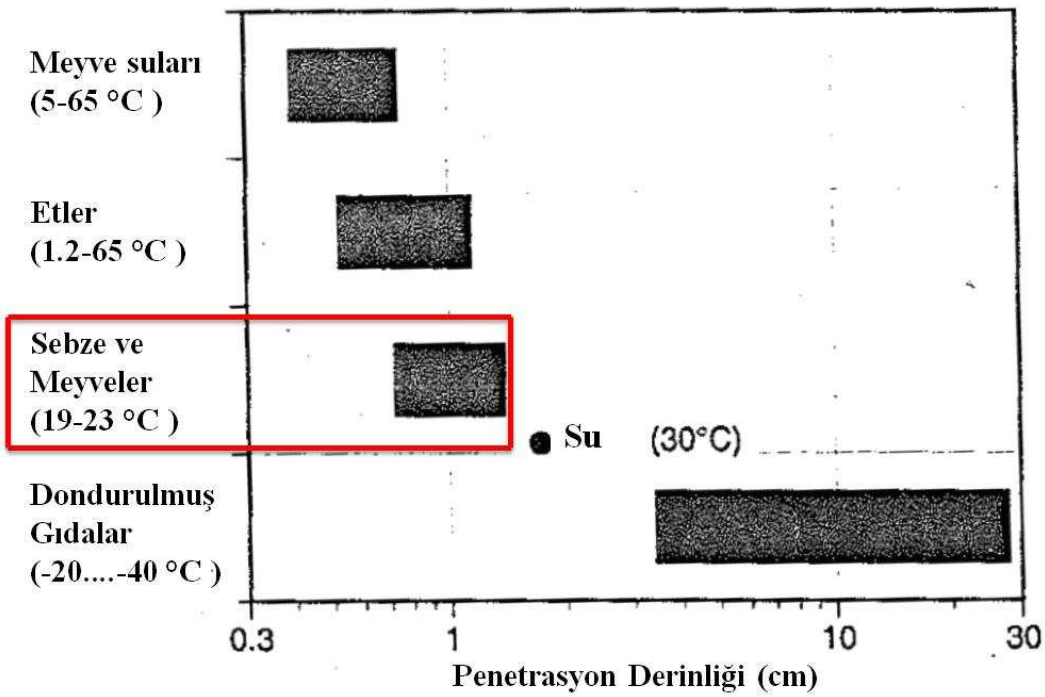
Penetrasyon derinliği, gıda yüzeyinden etki eden mikrodalga gücünün artan derinlikle logaritmik olarak azalışını ifade eden bir değerdir. Genel bir ifadeyle yüzeydeki gücün 0.37 katına düştüğü derinlik, penetrasyon derinliğidir. Şekil 5.6'da penetrasyon derinliği 1 cm olan madde için artan derinlikle üretilen ısı akısının logaritmik azalışı görülmektedir.



Şekil 5.6 : Penetrasyon derinliği 1 cm olan madde için, madde yüzeyinden itibaren artan derinliğe bağlı olarak üretilen ısı akısının logaritmik azalışı [6].

Şekil 5.6'da görüldüğü gibi mikrodalga ortamdaki maddenin yüzeyinden başlayarak azalan derinlikle beraber ısı akısı azalmaktadır. Bu nedenle penetrasyon derinliği model içerisinde kullanılan önemli bir değerdir.

Literatürde patates için penetrasyon derinliği, 25°C'deki patates için 0.9 cm olarak bulunmaktadır [33]. 19-23°C arasındaki sebze ve meyveler için daha genel bir aralık Şekil 5.7'de sunulmaktadır.

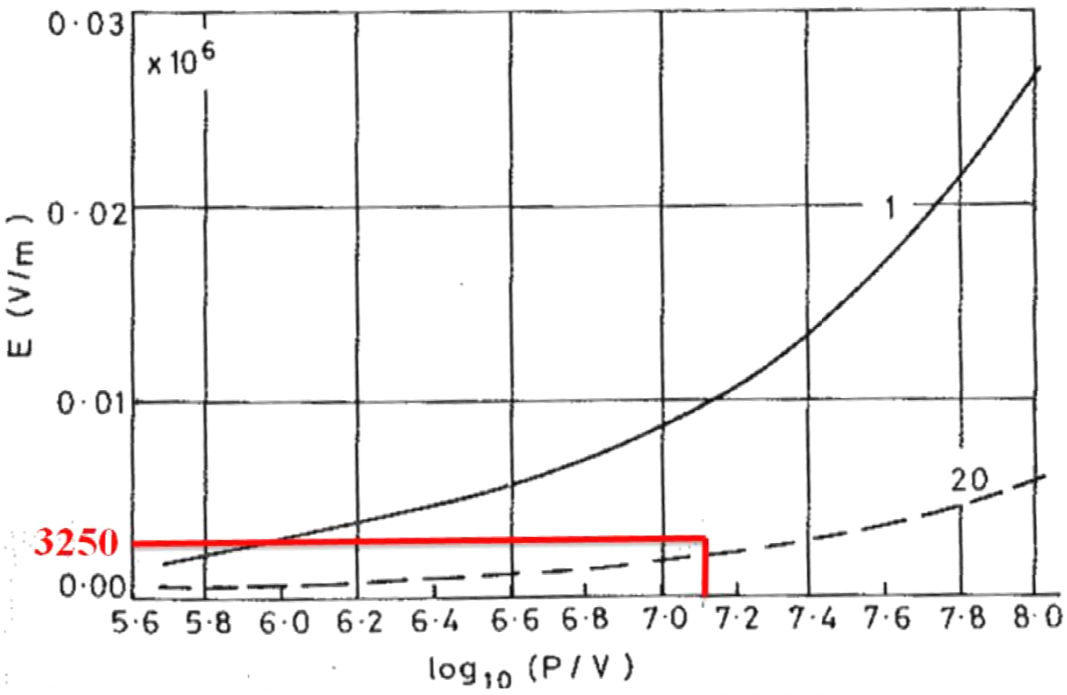


Şekil 5.7 : Çeşitli gıda grupları için penetrasyon derinlikleri [6].

Şekil 5.7'de, 19-23°C arasındaki sebze ve meyveler için penetrasyon derinliği 0.7-1.3 cm olarak görülmektedir. Modelleme çalışmalrında kullanılan patates de bu gruba girdiği için penetrasyon derinliği yaklaşık olarak bu aralıkta olmalıdır.

(2.40) eşitliğinde, penetrasyon derinliğinin dielektrik özelliklere bağlı eşitliği sunulmaktadır. 23°C'deki patates için **penetrasyon derinliği 0.916 cm** olarak bulunmaktadır. Penetrasyon derinliğinin tersi olan etki azalma faktörü (attenuation factor) α değeri de **(2.41)** eşitliğinden yararlanılarak 0.546 cm olarak bulunmaktadır.

(2.35) eşitliğinde sunulan genel mikrodalga güç denkleminde yer alan ve hesaplanması gereken diğer bir değer elektrik alan (E) şiddetidir. Yapılan literatür araştırmasında elektrik alan şiddetinin hesabı için çok fazla kaynak bulunamamıştır. Elektrik alan şiddeti, literatürde **(2.35)** eşitliğinde görülen ısıya dönüşen mikrodalga gücü genel eşitliğinin çıkarılışında sabit olarak kabul edilip, integral alınırken sabit bir terim olarak integral dışına çıkarılmaktadır [8]. Bu nedenle elektrik alan şiddeti; mikrodalga ortamın güç çıkışı, frekansı ve gıdanın hacmine, başlangıç durumu için belirlenen dielektrik kayıp faktörüne bağlı sabit bir değer olup, gıda yüzeyi için hesaplanmaktadır. Daha sonra bu değer, değişen penetrasyon derinliği ile gıda içerisindeki derinliğe bağlı olarak **(2.37)** eşitliğinde görüldüğü gibi farklılaşmaktadır. Şekil 5.8'de elektrik alan şiddetinin tablodan okuşunu sunulmaktadır.



Şekil 5.8 : 2.45 GHz frekansta gıda yüzeyi için elektrik alan şiddeti belirlenmesi.

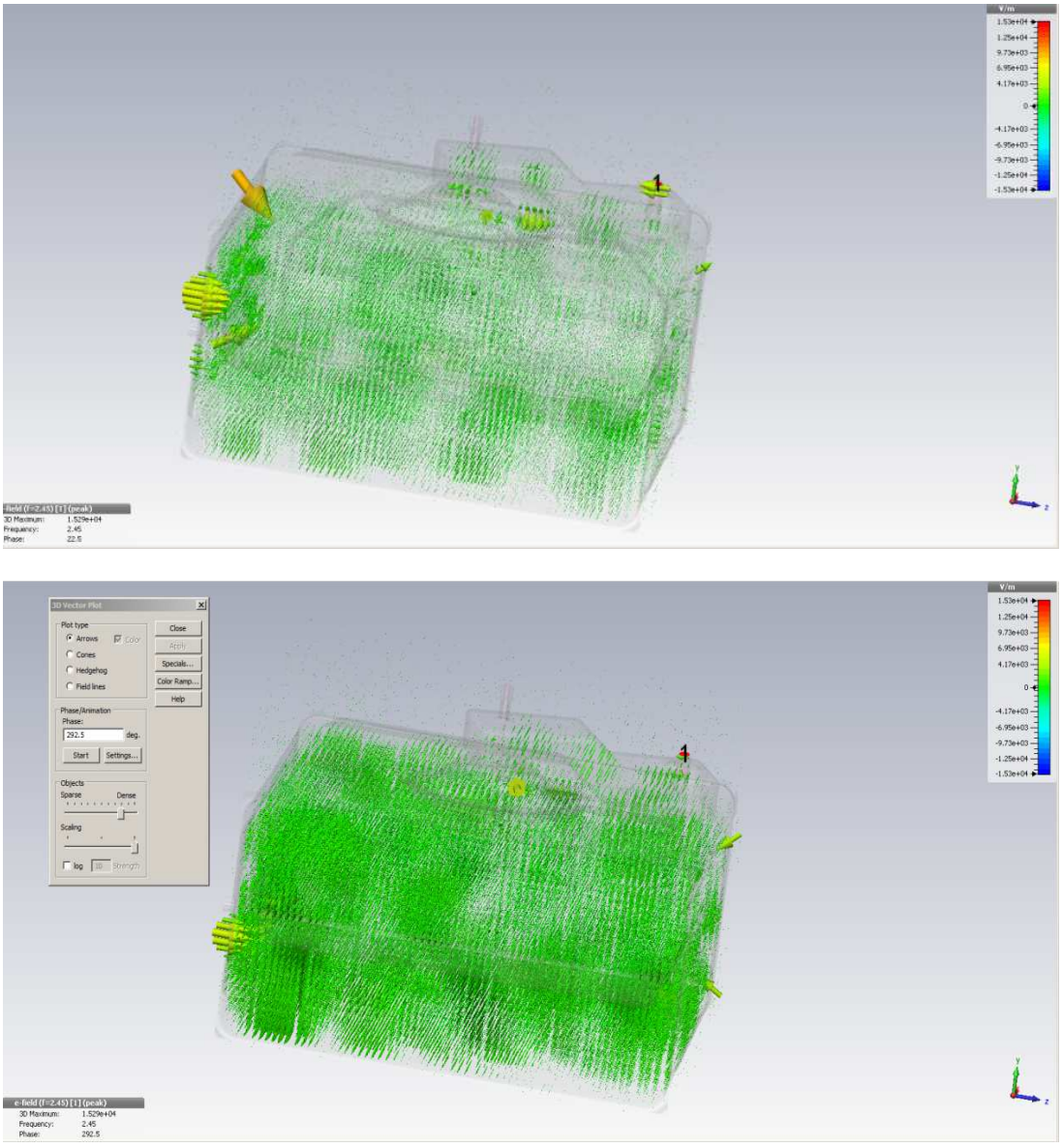
Şekil 5.8'de, E elektrik alan şiddeti (V/m); 2.45 GHz frekanstaki mikrodalga ortamda güç yoğunluğunun (W/m^3) ve dielektrik kayıp faktörünün bir fonksiyonu olarak sunulmaktadır. Dielektrik kayıp faktörü 15.39 ve gıda hacmi $5x10^{-5}$ m^3 olarak alınmaktadır. 900 W gücündeki çıkış gücü değeri 4. Bölümde açıklandığı gibi 726 W olarak hesaplanıp, 900 W gücündeki mikrodalga ısıtma için elektrik alan şiddeti 3250 (V/m) olarak tablodan okunmaktadır.

Elektrik alan şiddetinin, değişen penetrasyon derinliği ile gıda içerisindeki derinliğe bağlı olarak değişmesi, ısıya dönüşen mikrodalga gücünün de aynı şekilde faklılaşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle elektrik alan şiddeti için yazılan **(2.37)** eşitliği gibi, **(2.39)** eşitliği de ısıya dönüşen mikrodalga gücü için yazılmaktadır.

Isıya dönüşen mikrodalga gücünün hacim içerisindeki dağılımını hesaplamak oldukça karmaşıktır. Bu konu başka bilim dalları tarafından incelenmekte olup, gıda yüzeyi için hesaplanan güç değerinin gıdanın hangi yüzeyine ne oranda etki ettiğinin açıklanması oldukça zordur. Bunun hesabı için pek çok analizin yapılması gerekmektedir. 4. Bölümde açıklanan homojenlik deneyleri de göstermiştir ki; hacim içerisinde eşit bir güç dağılımı yoktur. Sıcaklık ölçümü deneysel çalışmaları, yapılacak model için basit bir şekilde yol göstermektedir. Şekil 4.27'de görüldüğü gibi patates yüzeylerine ait sıcaklıklarda en yüksek değerlere ulaşan sıcaklık-zaman

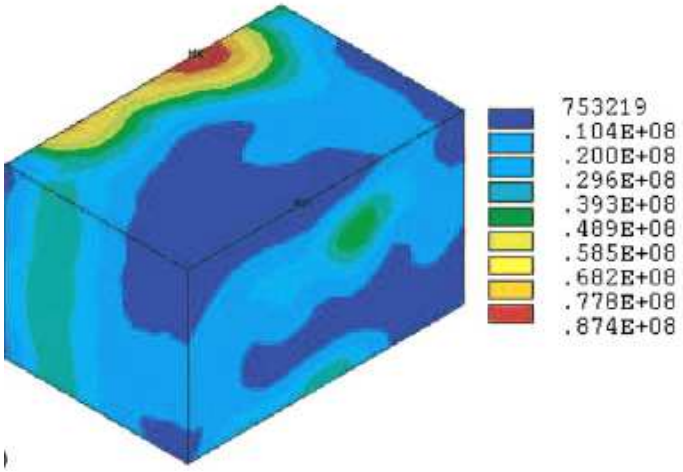
eğrisi üst yüzeyde, en düşük değerlere ulaşan sıcaklık-zaman eğrisi ise alt yüzeydedir. Yüzeyler arasında bir sıralama yapmak gerekirse; üst yüzeyi sırasıyla ön yüzey, arka yüzey, sol yüzey, sağ yüzey ve alt yüzey izlemektedir.

Daha ayrıntılı bir hesaplama için yüksek frekans aralığında elektromanyetik alan analizi ve tasarımı için kullanılan CST MICROWAVE STUDIO yazılım paketi gibi analiz programları kullanılmaktadır. Şekil 5.9'da CST MICROWAVE STUDIO analiz programı ile belirlenen; mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim için elektrik alan şiddetinin, sırasıyla dalga kılavuzu açısının 22.5^{o} ve 292.5^{o} değerleri için analizi görülmektedir.



Şekil 5.9 : CST MICROWAVE STUDIO analiz programı ile belirlenen; mikrodalga ısıtma özelliğine sahip hacim için elektrik alan şiddetinin, sırasıyla karıştırıcı açısının 22.5^{o} ve 292.5^{o} değerleri için analizi [34].

Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim içerisine yerleştirilen gıdanın yüzeylerindeki kayıp mikrodalga gücü bu program ile hesaplanabilmektedir. Program; ısıtılan hacimin boyutlarına, mikrodalga ortamın frekansına ve güç yoğunluğuna, maddenin hacmine, maddenin ısıtılan hacim içerisindeki konumuna, dielektrik ve manyetik özelliklerine göre hesaplama yapmaktadır. Program elektrik alan ve manyetik alan şiddetlerini, **(2.22)** eşitliğinde görüldüğü gibi kullanarak, kaviteye basılan mikrodalga gücünü vermektedir. Şekil 5.10'da mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim içindeki gıdanın yüzeylerine ait kayıp mikrodalga gücü görülmektedir.



Şekil 5.10 : Gıdanın yüzeylerine ait ısıya dönüşen kayıp mikrodalga gücü [13].

Isıya dönüşen mikrodalga gücünün hacim içerisindeki dağılımı ile ilgili açıklananlar göz önüne alındığında, bu tez çalışmasının amacı ortaya çıkmaktadır. Herhangi bir analiz programı kullanmaksızın; basit bir şekilde mikrodalga gücü, gıdanın yüzeylerine farklı oranlarda paylaştırılarak en uygun dağılıma ulaşılabilir. Öyleyse, deneysel çalışmaların yol göstermesi ile gıdanın 6 yüzeyine farklı oranlarda mikrodalga gücü paylaştırılıp, ısıtılan hacim içinde en uygun mikrodalga dağılımı ortaya konulmaya çalışılmaktadır. Bu tez çalışmasındaki asıl amaç, en uygun mikrodalga dağılımını basitçe belirleyip, onu deneysel çalışmalarla desteklemektir.

5.1.2 Isı ve kütle transferinin modellenmesi

Mikrodalga ısıtma için enerji korunumu denklemi ve yüzeydeki sınır şartı denklemi sırasıyla **(5.17)** ve **(5.18)** eşitliklerinde sunulmaktadır [6]. Bu eşitliklerden yararlanılarak, kurulan model için yapılan kabullere uygun olarak denklemler oluşturulmuştur.

$$\underbrace{\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}}_{\substack{Enerji \\ birikimi}} + \underbrace{\rho C_p u \frac{\partial T}{\partial x}}_{Taşınım} = \underbrace{k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}}_{Difüzyon} + \underbrace{\underbrace{Q}_{\substack{Isı\ kaynağı \\ (Mikrodalga)}}}_{\substack{Isı\ kaynağı \\ (Mikrodalga)}} - \underbrace{h_{fg}\dot{I}}_{\substack{Buharlaşma \\ enerjisi}} \quad \textbf{(5.17)}$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x_n} = \underbrace{h(T - T_\infty)}_{\substack{Taşınım\ ısı \\ kazancı \\ yada\ kaybı}} + \underbrace{\dot{m}_w h_{fg}}_{\substack{Buharlaşma \\ ısı\ kaybı}} + \underbrace{\sigma_{ışınım} \epsilon_{ışınım} \left(T - T_{S_n}\right)^4}_{\substack{Işınım \\ ısı\ kaybı\ yada \\ kazancı}} \quad \textbf{(5.18)}$$

(5.17) eşitliğinde, ρ maddenin yoğunluğu (kg/m^3), C_p maddenin özgül ısısı (kJ/kgK), u hız (m/s), Q ısı kaynağı (mikrodalga) (W/m^3), h_{fg} suyun buharlaşma entalpisi (kJ/kg) ve İ birim zamanda birim hacimdeki kütle (kg/m^{3}s) değeridir. Enerji korunumu denkleminde değer, W/m^3'dür. **(5.18)** eşitliğinde, T maddenin yüzey sıcaklığı (K), T_∞ ortam sıcaklığı (K), T_{S_n} maddeye ait olmayan hacim içerisindeki yüzeylerin sıcaklığı (K), h taşınımla ısı geçiş kat sayısı ve $\dot{m}_w$ kütlesel akı (kg/m^{2}s) olarak verilmiştir. **(5.18)** eşitliğinde sunulan yüzey için sınır şartı eşitliğinde değer, W/m^2'dir [6].

(5.17) eşitliği, modelleme çalışmalarında mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin yüzey hücreleri için **(5.19)** eşitliğinde sunulduğu gibi, iç hücreleri için ise **(5.20)** eşitliğinde sunulduğu gibi kullanılmaktadır.

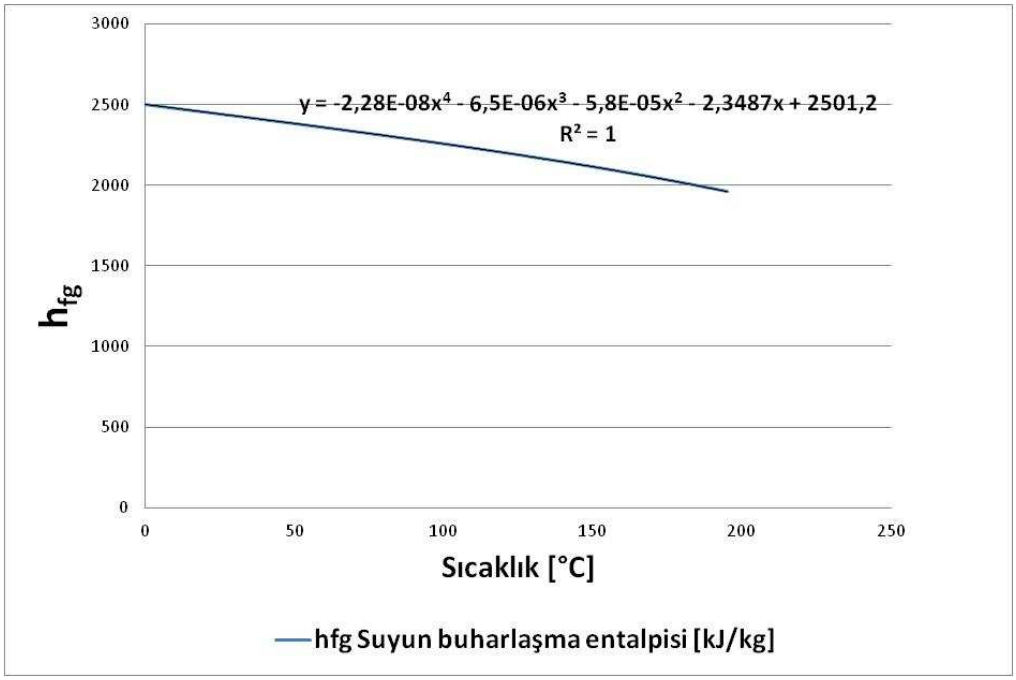
$$\rho_{pat} C_{p_{pat}} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{pat} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_{MD} - \dot{n}_A''' h_{fg} \quad \textbf{(5.19)}$$

(5.19) eşitliğinde, **(5.17)** eşitliğinde sunulan enerji korunumu denklemindeki taşınım terimi ihmal edilip ve ısı kaynağı terimi olarak Q_{MD} (ısıya dönüşen mikrodalga gücü) yazılıp, İ birim zamanda birim hacimdeki kütle (kg/m^{3}s) değeri, $\dot{n}_A'''$ olarak kullanılmaktadır. $\dot{n}_A'''$ birim zamanda birim hacimdeki kütle (kg/m^{3}s) değeri, Bölüm 4.2.3'de açıklanan deneysel çalışmadan elde edilmektedir. Patatesin, sadece yüzey hücrelerinde buharlaşma olduğu kabul edilip, **(5.19)** eşitliğinde sunulan yüzey hücrelerine ait enerji korunumu denkleminde buharlaşma ısı kaybı; $\dot{n}_A''' h_{fg}$ ifadesi ile gösterilmektedir. $\dot{n}_A'''$ terimi; **(4.4)** eşitliğinde sunulan, patatesin zamana bağlı nem kaybı eşitliğinin, birim zamanda birim hacimdeki kütle (kg/m^{3}s) değerine uygun şekilde ifade edilip, düzenlenmesiyle **(5.19)** eşitliğinde kullanılmaktadır. Patates içindeki hücrelerde ise, su buharının oluşumu ihmal edilip, oluşan su buharının

sadece hareketi incelendiğinden dolayı, içteki hücreler için genel enerji denklemi, **(5.20)** eşitliğinde sunulduğu gibi kullanılmaktadır.

$$\rho_{pat} C_{p_{pat}} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{pat} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_{MD} \qquad \textbf{(5.20)}$$

(5.19) eşitliğinde sunulan h_{fg}, suyun buharlaşma entalpisinin sıcaklığa bağlı değişimi için Şekil 5.11'de görüldüğü gibi bir grafik oluşturulup, **(5.21)** eşitliğinde görülen bir korelasyonla bu değişim, eşitlik halinde sunulmaktadır. Çengel (1996)'e ait çalışmada yer alan tabloların kullanılmasıyla oluşturulan, bu korelasyon model içerinde kullanılmaktadır.

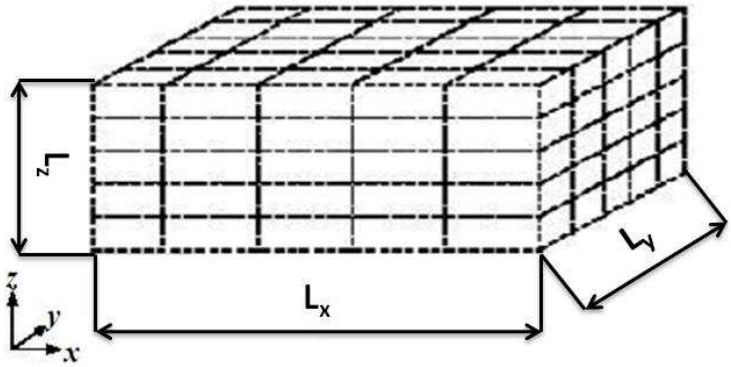


Şekil 5.11 : Suyun buharlaşma entalpisinin (h_{fg}) sıcaklıkla değişim grafiği.

$$h_{fg} = -2.28 \times 10^{-8} T^4 - 6.5 \times 10^{-6} T^3 - 5.8 \times 10^{-5} T^2 - 2.3487T + 2501.2 \qquad \textbf{(5.21)}$$

(5.21) eşitliğinde, T sıcaklık (°C) olarak sunulmaktadır.

Şekil 5.12'de patates boyutları gösterilerek yüzey için sınır şartı eşitliklerine geçilmektedir.



Şekil 5.12 : Patates boyutları.

(5.18) eşitliği, mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin yüzey sınır şartı olarak **(5.22), (5.23)** ve **(5.24)** eşitliklerinde sunulduğu gibi, 3 boyut için de verilmektedir.

(5.22) eşitliğinde, x=0 ve x=L_x, 0<y<L_y, 0<z<L_z için sınır şartı sunulmaktadır.

$$-k_{pat}\frac{\partial T}{\partial x}\Big|_s = Q_{Taşınım} + Q_{Buharlaşma} + Q_{Işınım} \qquad \textbf{(5.22)}$$

(5.23) eşitliğinde, y=0 ve y=L_y, 0<x<L_x, 0<z<L_z için sınır şartı verilmektedir.

$$-k_{pat}\frac{\partial T}{\partial y}\Big|_s = Q_{Taşınım} + Q_{Buharlaşma} + Q_{Işınım} \qquad \textbf{(5.23)}$$

(5.24) eşitliğinde ise, z=0 ve z=L_z, 0<x<L_x, 0<y<L_y için sınır şartı görülmektedir.

$$-k_{pat}\frac{\partial T}{\partial z}\Big|_s = Q_{Taşınım} + Q_{Buharlaşma} + Q_{Işınım} \qquad \textbf{(5.24)}$$

(5.25) eşitliğinde başlangıç koşulları ve **(5.26)** eşitliğinde taşınımla ısı geçişi hesabı sunulmaktadır.

$$T(x, y, z, t_0) = T_0 \qquad \textbf{(5.25)}$$

$$Q_{Taşınım} = h.A.(T_s - T_\infty) \qquad \textbf{(5.26)}$$

(5.26) eşitliğinde, h taşınımla ısı geçiş kat sayısı (W/m^{2}K), A yüzey alanı (m^2), T_∞ ısıtılan hacim içindeki hava sıcaklığı (K) ve T_s patates yüzey sıcaklığı (K)'dır.

Model içerisinde taşınımla ısı geçiş kat sayısının hesabında **(5.27)** eşitliğinden yararlanılmaktadır.

$$Nu_L = \frac{h_L . L}{k} \quad \textbf{(5.27)}$$

(5.27) eşitliğinde, h_L L uzunluğunda taşınımla ısı geçiş kat sayısı (W/m^{2}K), L geometriye ait karakteristik uzunluk (m), k havanın ısı iletim kat sayısı (W/mK) ve Nu_L Nusselt sayısıdır.

Nu_L Nusselt sayısının belirlenmesinde, doğal taşınım için geçerli olan korelasyon **(5.28)** eşitliğinde sunulmaktadır [36].

$$Nu_L = \left\{0.825 + \frac{0.387 {Ra_L}^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}}\right\}^2 \quad \textbf{(5.28)}$$

(5.28) eşitliğinde yer alan, Ra_L Rayleigh sayısı, **(5.29)** eşitliğinde görüldüğü gibi Grashof ve Prandtl sayılarının çarpımına eşittir.

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{v^2} \times \frac{v}{\alpha_{yay}} \quad \textbf{(5.29)}$$

(5.29) eşitliğinde, g yer çekimi ivmesi (9.81 m/s^2), β ısıl genleşme kat sayısı (1/K), T_∞ akışkanın sıcaklığı (K), T_s madde yüzey sıcaklığı (K), L geometriye ait karakteristik uzunluk (m), v akışkanın viskozitesi (m^2/s) ve α_{yay} akışkanın ısıl yayılım kat sayısı (m^2/s)'dir. Bu tez çalışmasında, α ifadesi mikrodalga ortam için kullanılan **(2.37)** eşitliğinde sunulan etki azalma faktörü (attenuation factor) olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden, akışkanın ısıl yayılım kat sayısı; α_{yay} ifadesi ile sunulmaktadır. Modelleme çalışmalarında, L geometriye ait karakteristik uzunluk olarak, patatesin x yönündeki boyu olan 0.05 m değeri kullanılmaktadır.

Modelleme çalışmalarında akışkana (kavite içindeki havaya) ait; v viskozite (m^2/s), k ısı iletim kat sayısı (W/mK) ve Pr Prandtl boyutsuz sayısı değeri tablodan belirlenmektedir [36]. Değişen sıcaklık değerleriyle bu değerler de değişmektedir. Mikrodalga ısıtmanın bir özelliği olarak; ısıtma süresince, mikrodalga kavite içindeki havayı ısıtmadan direkt olarak gıda merkezine etki etmektedir. Bu yüzden ısıtılan hacim içindeki hava ısınamamakta ve patates merkez sıcaklığı, deneysel çalışmaların süresi olan 50 s için 23-75°C arasında değişirken, ısıtılan hacim içindeki hava için, aynı sürede erişilen sıcaklık 23-27.5°C arasında değişmektedir. Bu durumda,

modelde bu değerler için korelasyon oluşturulmadan 25°C'deki değerleri kullanılmaktadır.

Işınım ısı transferinin hesaplanması için gri yüzeylerden oluşan kapalı çerçevelerde ışınımla ısı geçişi kabulü yapılmaktadır [36]. *N* adet yüzeye sahip kapalı bir çerçeve içindeki *i* numaralı herhangi bir yüzeye diğer yüzeylerden (eşitliklerde *j* alt indisiyle gösterilmiştir) ışınımla transfer edilen ısının hesaplanması için **(5.30)** eşitliğinden **(5.32)** eşitliğine kadar sunulan eşitlikler kullanılmaktadır.

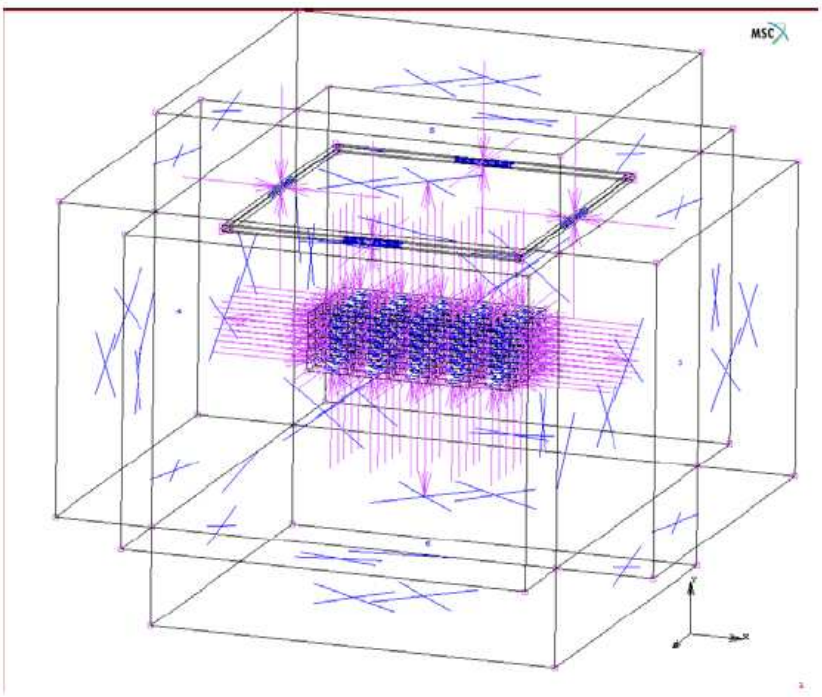
$$I_{gelen,i} = \sum_{j=1}^{N} F_{i,j}.\, I_{giden,j} \tag{5.30}$$

$$I_{giden,i} = \varepsilon_{\text{ışınım}_i}\sigma_{\text{ışınım}}\, T_i^4 + \left(1 - \varepsilon_{\text{ışınım}_i}\right).\, I_{gelen,i} \tag{5.31}$$

$$Q_{\text{ışınım},j} = \frac{A_i.\, \varepsilon_{\text{ışınım}_i}}{(1 - \varepsilon_{\text{ışınım}_i})}\left[\sigma_{\text{ışınım}}.\, T_i^4 - I_{giden,j}\right] \tag{5.32}$$

(5.30) eşitliğinde; $F_{i,j}$ görüş faktörü ve I ışınım şiddeti (W/m^2)'dir. **(5.32)** eşitliğinde ise; $\sigma_{\text{ışınım}}$ Stefan-Boltzman sabiti (W/m^{2}K^4), $\varepsilon_{\text{ışınım}}$ yüzey emisivitesi, A alan (m^2) ve T sıcaklık (K)'dir. Bu tez çalışmasında, σ ifadesi mikrodalga ortam için iletkenlik kat sayısı ve ε ifadesi mikrodalga ortam için dielektrik kat sayısı olarak kullanılmaktadır. Bu yüzden, Stefan-Boltzman sabiti; $\sigma_{\text{ışınım}}$ ifadesi ile yüzey emisivitesi ise; $\varepsilon_{\text{ışınım}}$ ifadesi ile sunulmaktadır.

Mikrodalga ortamda ısıtılan patatesin modellenmesinde, ışınım görüş faktörlerinin hesaplanması için MARC yapısal analiz programı kullanılmaktadır. Fırın kavitesinin üst bölümünde yer alan ısıtıcının 4 adet dikdörtgenler prizması şeklinde olduğu varsayılıp, 16 adet ısıtıcı yüzeyi, 6 adet ısıtılan hacim yüzeyi ve 150 adet patates hücre yüzeyi olmak üzere toplam 172 adet yüzey için ışınım görüş faktörleri ($F_{i,j}$) Şekil 5.13'de görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.



Şekil 5.13 : MARC programında hazırlanan katı model.

Elde edilen görüş faktörü verisi kullanılarak her bir yüzeyden giden ve gelen ışınım değerleri hesaplanıp, **(5.32)** eşitliğinde yerine yazılırsa, patates yüzeyinden ışınımla transfer edilen ısı hesaplanmaktadır.

(5.33) eşitliğinde genel kütle transferi eşitliği sunulmaktadır [36].

$$\frac{1}{D_{AB}}\frac{\partial \rho_A}{\partial t} = \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho_A}{\partial z^2} + \frac{\dot{n}_A'''}{D_{AB}} \qquad \textbf{(5.33)}$$

(5.33) eşitliğinde; ρ_A A bileşenin yoğunluğu (kg/m^3), D_{AB} difüzyon kat sayısı (m^2/s) ve $\dot{n}_A'''$ birim hacimde, birim zamanda A bileşeninin üretimi (kg/m^{3}s) olarak sunulmaktadır. **(5.33)** eşitliği, patates yüzeyine ait hücreler için geçerli olup, patates içindeki hücrelerde, bu eşitlik değişmektedir. Çünkü, modelde patatesin içindeki hücreler için üretim terimi, yani su buharının oluşumu ihmal edilip, kütlesinde artış olmadığı kabul edilmektedir ($\dot{n}_A''' = 0$). Bu hücrelerde, sadece su buharının hareketi izlenmektedir. Bu durumda, **(5.33)** eşitliğinde sunulan genel kütle transferi eşitliği, patatesin yüzeyindeki hücreler için **(5.34)** eşitliğinde sunulduğu gibi, patates içindeki hücreler için ise, **(5.35)** eşitliğinde sunulduğu gibi kullanılmaktadır.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2}\right) + \dot{n}_A''' \qquad \textbf{(5.34)}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \rho}{\partial z^2}\right) \quad \textbf{(5.35)}$$

(5.33) ve **(5.34)** eşitliklerinde, ρ su buharının yoğunluğu (kg/m^3), D patates içinde su buharının difüzyon kat sayısı (m^2/s) ve **(5.33)** eşitliğinde, $\dot{n}_A'''$ birim hacimde, birim zamanda su buharının üretimi (kg/m^{3}s)'dir. $\dot{n}_A'''$ değeri, daha önce sunulan **(5.19)** eşitliğinde de yer alıp, deneysel çalışmalardan elde edilmektedir.

Kütle transferinin hesabında sınır şartı olarak yüzeyde kütlesel akı değeri kullanılmaktadır. Kütlesel akı j_A (kg/m^{2}s) değeri; $\dot{n}_A'''$ değerinin belirlenmesinde olduğu gibi, Bölüm 4.2.3'de açıklanan ve **(4.4)** eşitliği ile sunulan deneysel çalışmaların sonuçlarından oluşturulan bir korelasyon ile belirlenmektedir. Bu değerinin bütün yüzeyler için aynı olduğu kabul edilmektedir.

(5.36) eşitliğinde, x=0 ve x=L_x, 0<y<L_y, 0<z<L_z için sınır şartı sunulmaktadır.

$$-D\left.\frac{\partial \rho}{\partial x}\right|_s = j_A \quad \textbf{(5.36)}$$

(5.37) eşitliğinde, y=0 ve y=L_y, 0<x<L_x, 0<z<L_z için sınır şartı verilmektedir.

$$-D\left.\frac{\partial \rho}{\partial y}\right|_s = j_A \quad \textbf{(5.37)}$$

(5.38) eşitliğinde ise, z=0 ve z=L_z, 0<x<L_x, 0<y<L_y için sınır şartı görülmektedir.

$$-D\left.\frac{\partial \rho}{\partial z}\right|_s = j_A \quad \textbf{(5.38)}$$

Sınır şartı olarak, kütlesel akı değeri yerine taşınım kütle geçişi değeri kullanılsaydı, **(5.39)** eşitliğinde sunulan eşitlik kullanılmalıydı.

$$j_A = h_m\,(\rho_S - \rho_\infty) \quad \textbf{(5.39)}$$

(5.39) eşitliğinde, h_m taşınımla kütle geçiş kat sayısıdır.

(5.40) eşitliğinde, ideal gaz kabulüyle belirlenen bağıl nem ifadesi ($\emptyset_\infty$) sunulmaktadır [35].

$$\emptyset_\infty = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V/(R_v T)}{P_g V/(R_g T)} = \frac{P_v}{P_g} = \frac{\rho_\infty}{\rho_{doymuş}(T_\infty)} \quad \textbf{(5.40)}$$

$$P_g = P_{doyma,T} \quad \textbf{(5.41)}$$

(5.40) eşitliğinde, m_v havadaki su buharının miktarı (kg), m_g ise, m_v ile aynı sıcaklıktaki havada bulunabilecek en çok su buharı miktarı (kg)'dır.

Bağıl nem ifadesi, **(5.39)** eşitliğinde yerine yazılırsa **(5.42)** eşitliği elde edilmektedir.

$$j_A = h_m \left[\rho_{doymuş}(T_S) - \emptyset_\infty \, \rho_{doymuş}(T_\infty)\right] \quad \textbf{(5.42)}$$

(5.42) eşitliğinde, $\emptyset_\infty$ ısıtılan hacimin, kavitenin bağıl nem değeridir.

Kavitenin bağıl nem değeri; sabit bir değer alınarak, taşınımla kütle geçişi de sınır şart olarak kullanılabilir. Kavite içindeki bağıl nemin belirlenebilmesi için kavite içine nem sensörü yerleştirilmelidir. Fakat sensör malzemesi metal olduğundan, mikrodalga ortamda ark oluşturup sisteme zarar vereceğinden ve sağlıklı bir ölçüm yapılamayacağından dolayı, mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim için kullanımı uygun değildir. Ölçüm yapılamadığından ve literatürde de mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim için bir bağıl nem değeri bulunamadığından dolayı, yanlış bir bağıl nem değeri kullanmamak için kütle transferi sınır şartı olarak; kütlesel akı değeri kullanılmaktadır. Bu tez kapsamında, yapılacak çalışmaya en uygun kütle transferi sınır şartının, kütlesel akı değerinin kullanılması olduğu belirlenmiştir. Mikrodalga ortamda, kavite içindeki bağıl nemin değeri; bundan sonra yapılacak çalışmalarda uygun nem sensörleri ile belirlenebilip, sınır şartı olarak taşınımla kütle geçişi kullanılabilir. Bu konu, yeni yapılacak çalışmalar için güzel bir araştırma konusu olup, bu kısma ağırlık verilebilir.

Kütle transferi sınır şartı için kütlesel akı değerinin kullanılmasının ne kadar doğru bir yaklaşım olduğu görebilmek için, bu akı değerinden elde edilen h_m değeri ile boyutsuz sayılardan elde edilen h_m değeri karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 5.7'de deneysel sonuçlardan elde edilen kütlesel akı değerinin **(5.42)** eşitliğinde kullanılmasıyla ulaşılan h_m değerleri görülmektedir. **(5.42)** eşitliğinde, yer alan $\emptyset_\infty$ ısıtılan hacimin bağıl nem değeri için, ısıtılan hacimin baca çıkışında belirlenen bağıl nem kullanılmaktadır. Mikrodalga ortamda, nem sensörünün metal olmasından dolayı kavite içindeki bağıl nem değeri belirlenemediği için yaklaşık bir

değer bulmak adına baca çıkışındaki nem değeri belirlenip, hesaplamalar buna göre yapılmaktadır. Baca çıkışında belirlenen bağıl nem değeri, kavite içindeki havanın bağıl nem değerinden farklıdır. Fakat hesaplamaları yapmak için bir bağıl nem değeri gerekli olup; baca çıkışından ölçülen değer, kavite içindeki bağıl nem değeri olarak kullanılmaktadır. Çengel (1996)'e ait çalışmada yer alan tabloların kullanılmasıyla, hesaplamalarda yer alan ρ_s ve ρ_∞ değerleri belirlenmektedir.

Çizelge 5.7 : Deneysel sonuçlardan elde edilen kütlesel akı değerinin kullanılması ile yapılan hesaplama sonucu ulaşılan h_m değerleri.

Zaman (s)	j_A (kg/m^{2}s)	T_s (°C)	ρ_s (kg/m^3)	T_∞ (°C)	ρ_∞ (kg/m^3)	$\emptyset_\infty$ (%)	**$h_m x10^3$ (m/s)**
40	2.25x10^{-3}	80.4	0.303	25.1	0.0138	60	**7.63**
45	3.5 x10^{-3}	91.2	0.443	26.5	0.015	60	**8.06**
50	5 x10^{-3}	100.1	0.625	27.5	0.016	60	**8.13**

h_m değeri, boyutsuz sayılardan yararlanılarak da hesaplanmaktadır. **(5.43)** eşitliğinde görüldüğü gibi boyutsuz Sherwood sayısından, h_m değerine ulaşılmaktadır.

$$h_{m_L} = Sh_L \left(\frac{D_{SH}}{L}\right) \quad \textbf{(5.43)}$$

(5.43) eşitliğinde, D_{SH} su buharının hava içindeki difüzyon kat sayısı (m^2/s) ve L karakteristik uzunluk (m)'tur. L karakteristik uzunluk olarak, patatesin x yönündeki boyu 0.05 m değeri kullanılmaktadır. D_{SH} su buharı ile hava arasındaki difüzyon kat sayısı olarak, 25^{o}C için literatürden bulunan 2.44x10^{-5} (m^2/s) değeri kullanılmaktadır [36]. Yapılan hesaplamalarda, kavite içerisindeki hava sıcaklığı 23-27.5^{o}C arasında olduğu için, difüzyon kat sayısının 25^{o}C'deki değeri kullanılmaktadır .

(5.44) eşitliğinde, Sherwood sayısına ulaşmak için kullanılan eşitlik sunulmaktadır [37].

$$Sh_L = 0.73 + \frac{(GrSc)^{1/4}(Sc/Pr)^{1/12}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad \textbf{(5.44)}$$

(5.44) eşitliğinde, yer alan Schmidt sayısı, **(5.45)** eşitliğinde sunulmaktadır.

$$Sc = \frac{\nu}{D_{SH}} \quad \textbf{(5.45)}$$

Çizelge 5.8'de hesaplamalarda kullanılan değerler ve boyutsuz sayıların **(5.44)** eşitliğinde kullanılmasıyla elde edilen h_m değerleri görülmektedir.

Çizelge 5.8 : Boyutsuz sayıların kullanılmasıyla elde edilen h_m değerleri.

Zaman (s)	T_s (°C)	T_∞ (°C)	ν x10^6 (m^2/s)	α_{yay} x10^6 (m^2/s)	D_{SH}x10^5 (m^2/s)	Gr_L x10^{-6}	Pr	Sc	Sh_L	**h_m x10^3 (m/s)**
40	80.4	25.1	15.65	2.2	2.44	0.93	0.705	0.641	15.4	**7.52**
45	91.2	26.5	15.8	22.4	2.44	1.1	0.7053	0.648	16.22	**7.92**
50	100.1	27.5	15.9	22.57	2.44	1.28	0.7045	0.652	16.97	**8.28**

Çizelge 5.7 ve 5.8'de sunulan h_m değerleri, Çizelge 5.9'da karşılaştırılmaktadır. Elde edilen değerlerin, birbirine yakın olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.9 : h_m değerlerinin karşılaştırılması.

Zaman (s)	Deneysel sonuçlardan elde edilen kütlesel akı değerinin kullanılmasıyla ulaşılan h_m değerleri (m/s)	Boyutsuz sayıların kullanılmasıyla elde edilen h_m değerleri (m/s)	**Fark (%)**
40	7.63 x10^{-3}	7.52 x10^{-6}	**1.46**
45	8.06 x10^{-3}	7.92 x10^{-6}	**1.77**
50	8.13 x10^{-3}	8.28 x10^{-6}	**1.85**

Çizelge 5.9'dan da görülebileceği gibi, yüzey sınır şartı olarak kütlesel akı değerinin kullanılması kütle transferi için yapılan hesaplamaları yanlış bir noktaya götürmemektedir. Yine de değerler arasındaki bu fark; bağıl nem değerinin, kavite içi için belirlenemeyip, onun yerine baca çıkışındaki değerinin kullanılmasından kaynaklı olabilmektedir. Zaten, kavite içindeki bağıl nem değeri hesaplanabilseydi, kütle transferi sınır şartı olarak deneysel sonuçlardan elde edilen kütlesel akı değeri yerine taşınımla kütle geçişi kullanılabilirdi. Burada, kavite içindeki bağıl nem değerinin, baca çıkışındaki bağıl nem değeri olarak kabulu ile, h_m değerleri hesaplanmıştır. Böylece h_m değerleri karşılaştırılıp, sınır şartı olarak kütlesel akı değerinin kullanılmasının hesaplamaları ne şekilde etkileceği görülmeye çalışılmıştır.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda; mikrodalga ortamda kavite içindeki bağıl nem değeri $\emptyset_\infty$; mikrodalga ortamda kullanılabilecek uygun bir nem sensörü ile belirlenebilirse, deneysel çalışmalardan elde edilen değerlere gerek kalmadan, kütle transferi sınır şartı olarak taşınımla kütle geçişi kullanılabilir.

Kütle transferi için sınır şartının belirlenmesinin ardından, **(5.46)** eşitliğinde kütle transferi başlangıç koşulu sunulmaktadır.

$$\rho(x, y, z, t_0) = \rho_0 \tag{5.46}$$

Kaynak terimi mikrodalga için ise sınır şartları; **(5.47)** eşitliğinde elektrik alan şiddeti için, **(5.48)** eşitliğinde manyetik alan şiddeti için sunulmaktadır [9].

$$\left(\vec{E}_2 - \vec{E}_1\right) \times \vec{n} = 0 \tag{5.47}$$

$$\left(\vec{H}_2 - \vec{H}_1\right) \times \vec{n} = 0 \tag{5.48}$$

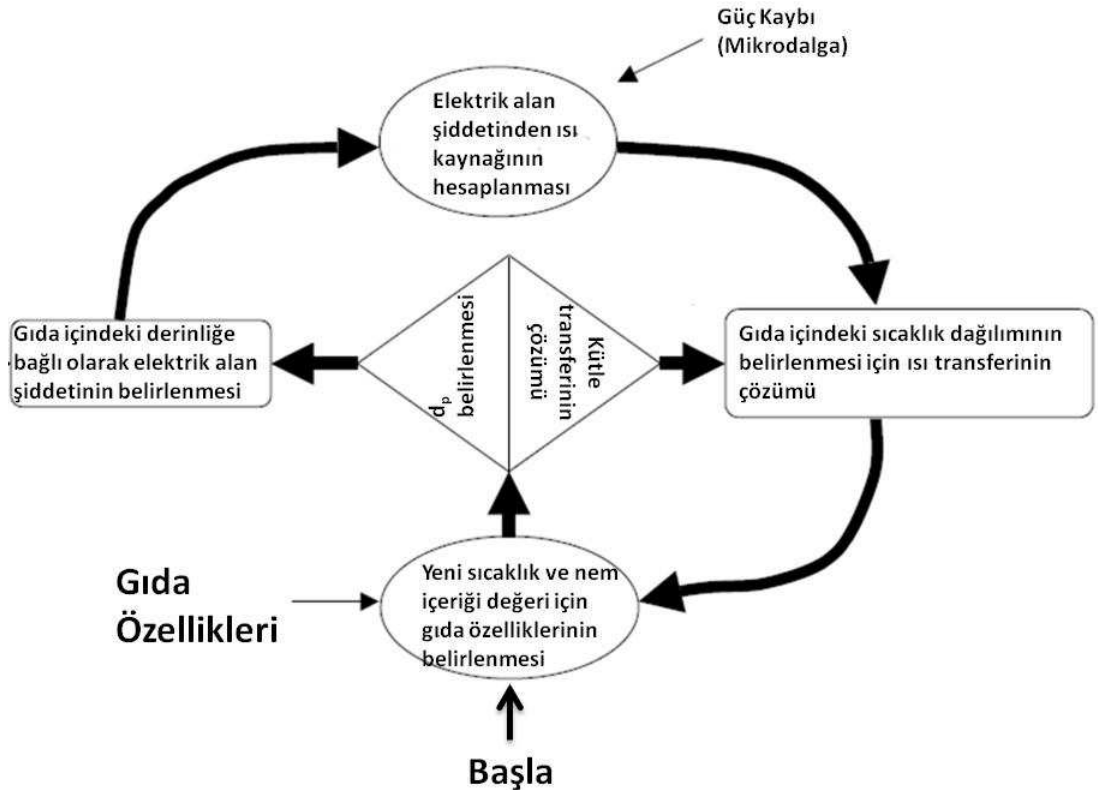
Hava-patates ara yüzeyinde $E_{teğetsel} = 0$ olarak alınmaktadır [13].

Mikrodalga kaynak terimi için başlangıç koşulu **(5.49)** ve **(5.50)** eşitliklerinde verilmektedir [13].

$$E(x, y, z, t_0) = E_0(x, y, z)e^{jwt} \tag{5.49}$$

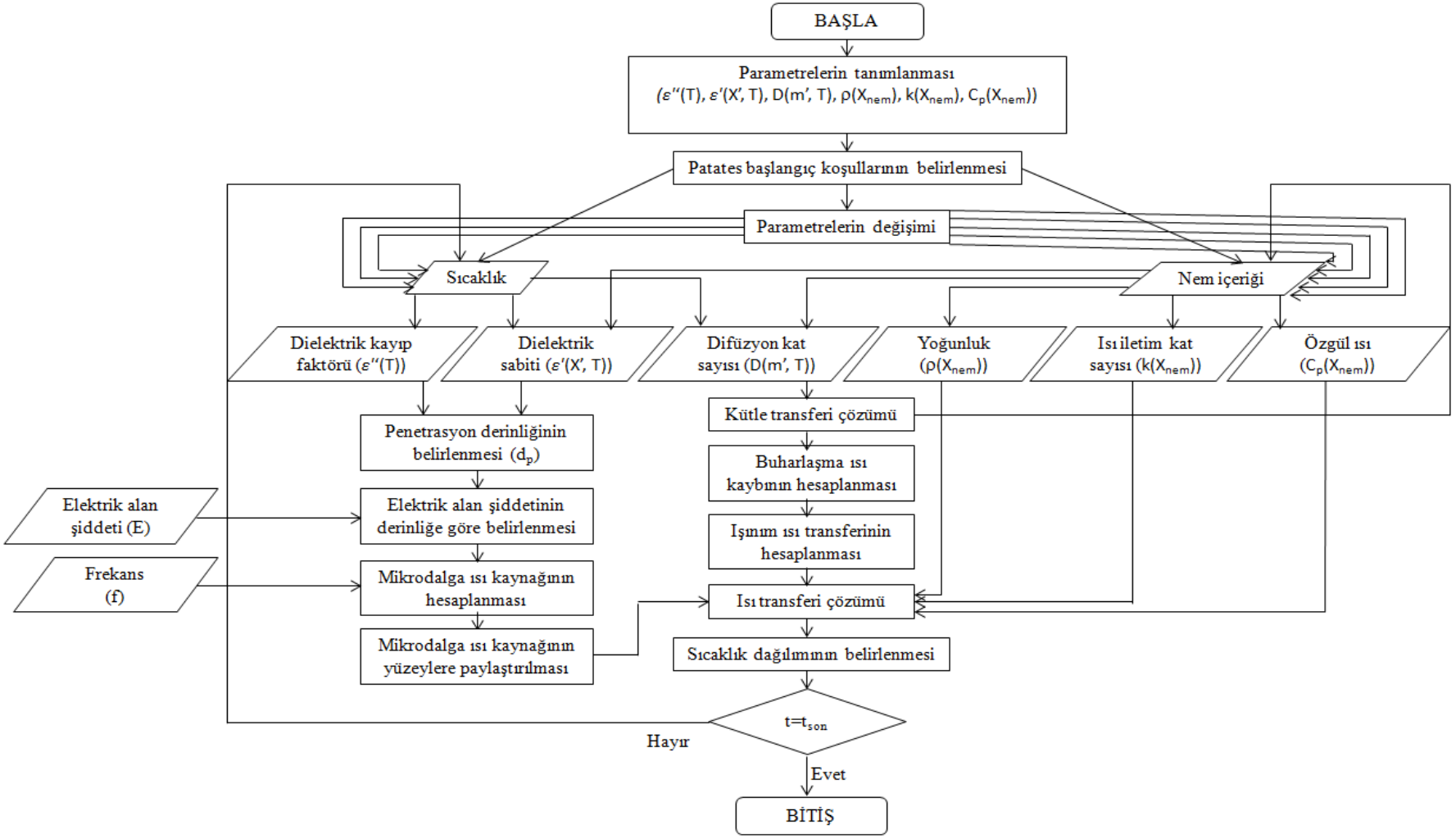
$$H(x, y, z, t_0) = H_0(x, y, z)e^{jwt} \tag{5.50}$$

Isı-kütle transferi hesabının açıklanmasından sonra kurulan modeli kısaca özetlemek için Şekil 5.14 sunulmaktadır. Şekil 5.14'de d_p penetrasyon derinliğidir. Her yeni sıcaklık ve nem içeriği değerine göre gıdaya ait özellikler belirlenmektedir. Dielektrik özelliklerin belirlenmesiyle; penetrasyon derinliği hesaplanıp ve bu derinliğe göre elektrik alan şiddetinin, gıda yüzeyinden merkezine doğru logaritmik olarak azalışı hesaplanmaktadır. Elektrik alan şiddetinin hesaplanmasından sonra, ısı kaynağı olan Q_{MD} değeri belirlenmektedir. Q_{MD} değeri; aslında ısıya dönüşen kayıp mikrodalga gücüdür. Bölüm 2 ve 3'de de açıklandığı gibi, mikrodalga gücündeki kayıp; ısıya dönüşerek gıdaya ulaşmaktadır. Kütle transferinin çözümü ve kaynak teriminin belirlenmesiyle, ısı transferi denklemleri çözülüp, patates içindeki 125 hücrenin zamana bağlı sıcaklık değerleri yani, patatese ait ısı dağılımı 3 boyutta belirlenmektedir.



Şekil 5.14 : Model akışının özeti.

Şekil 5.14'de görüldüğü gibi patatese ait özellikler her yeni sıcaklık ve nem içeriği değeri için değişmektedir. Bu değerlerle, her bir hücre için ayrı ayrı önce kütle transferi sonra ısı transferi hesaplanmaktadır. Kütle transferi hesabında difüzyon kat sayısı sıcaklık ve nem içeriğine bağlı olduğu için elde edilen yeni sıcaklık değerine göre bu kat sayısı değişmektedir. Patatesin ısıl özellikleri de nem içeriğine bağlı olduğundan, yeni nem içeriği değerine göre sürekli değişmektedirler. Yani birbiriyle sürekli bağlantılı olarak ısı ve kütle transferi denklemleri çözülmektedir. Diğer taraftan ısıya dönüşen kayıp mikrodalga gücü hesaplanıp, tüm hücrelerin dielektrik özelliklerine ve hücre merkezinin konumuna bağlı olarak hücrelere dağıtılmaktadır. Tüm bu hesaplamalar için VISUAL BASIC programlama dilinde kod yazılmıştır. Hazırlanan programda zaman adımı 1 saniye alınmıştır. Geliştirilen matematiksel modelin algoritması ayrıntılı olarak, Şekil 5.15'de sunulmaktadır.



Şekil 5.15 : Model algoritması.

5.2 Model Sonuçları

Model kurulumunun açıklanması ve model algoritmasının sunulmasının ardından, VISUAL BASIC programlama dilinde kod yazılarak hesaplanan değerler model sonuçlarında verilmektedir. Çizelge 5.10'da modelde kullanılan parametrelerin özeti görülmektedir.

Çizelge 5.10 : Modelde kullanılan parametrelerin özeti.

Özellik	Başlangıç değerleri	Model	Kaynak
Özgül ısı, $C_{p_{pat}}$ (J/kg^{o}C)	3.6	**(5.2)** eşitliği	[27]
Isı iletim kat sayısı, k_{pat} (W/m^{o}C)	0.537	**(5.4)** eşitliği	[27]
Yoğunluk, ρ_{pat} (kg/m^3)	1030	**(5.5)** eşitliği	Model
Gözeneklilik, ϵ_{pat}	0.09875	**(5.12)** eşitliği	[27]
Difüzyon kat sayısı, D (m^2/s)	2.425x10^{-10}	**(5.11)** eşitliği	[27]
Dielektrik kayıp faktörü, ε''	15.39	**(5.14)** eşitliği	[17]
Dielektrik sabiti, ε'	51.2	**(5.16)** eşitliği	[27]
Penetrasyon derinliği, d_p (cm)	0.916	**(2.40)** eşitliği	[8]
Elektrik alan şiddeti, E (V/m)	2600	-	[8]
Frekans, f (GHz)	2.45	-	Model
Taşınımla ısı geçiş kat sayısı, h (W/m^{2}K)	12.53	**(5.27)** eşitliği	Model
Emisivite, $\varepsilon_{ışınım}$ (patates)	0.88	-	[26]
Emisivite, $\varepsilon_{ışınım}$ (emaye yüzey)	0.86	-	[38]
Yüzey sınır şartı; kütlesel akı, j_A (kg/m^{2}s)	-	**(4.4)** eşitliği	Deneysel
Birim zamanda birim hacimdeki kütle değeri, $\dot{n}_A'''$ (kg/m^{3}s)	-	**(4.4)** eşitliği	Deneysel
Patates başlangıç sıcaklığı, T_o (^{o}C)	23	-	Model
Patates başlangıç nem içeriği, X_{nem} (%)	79	-	Model
Patates başlangıç kütlesi, m_o (kg)	0.05	-	Model

Çizelge 5.10'da görülen parametrelerle ısı ve kütle transferi hesaplamaları yapılarak patates için sıcaklık profili belirlenmektedir.

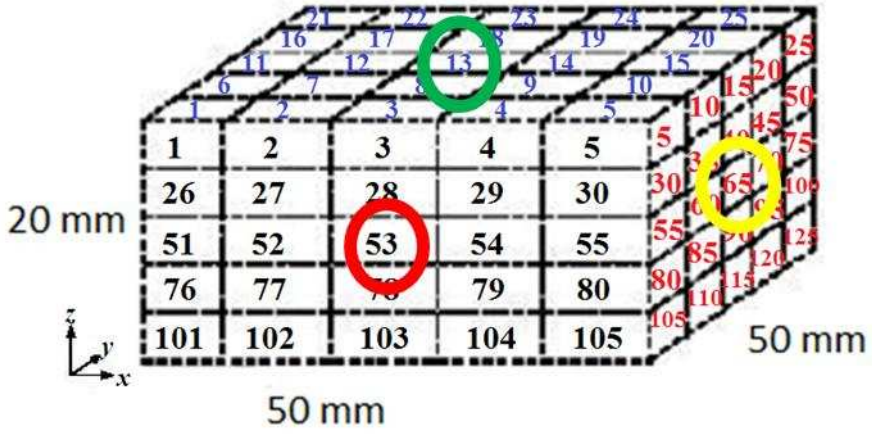
Modelde mikrodalganın hacim içerisinde dağılımının belirlenebilmesi için, farklı oranlarda dağıtımlar denenerek en uygun dağılımın bulunması amaçlanmıştır. Farklı dağılımların olduğu 3 model ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla, yüzeyler için en uygun mikrodalga dağılımı belirlenmeye çalışılmıştır.

Mikodalganın, ısıtılan hacim içindeki dağılımını en iyi şekilde ortaya koyacak hücreler; merkez hücre ve 6 adet yüzeyin merkezindeki hücrelerdir. Bu nedenle, mikrodalganın farklı oranlarda dağıtıldığı 3 farklı modelden hangisinin daha uygun olduğunu belirleyebilmek için bu 7 ana hücreye ait belirlenen sıcaklık değerleri karşılaştırılmaktadır. Bu 7 ana hücre, Çizelge 5.11'de sunulmaktadır. Çizelge 5.11'de sunulan 7 hücrenin, patates üzerindeki konumu belirtilip, daha iyi anlaşılması için deneysel çalışmalarda sunulduğu gibi koordinatları ve model içerisindeki numaraları verilmektedir. Model içerisinde; 125 adet hücre, Şekil 5.1'de belirtildiği gibi her birine verilen numaralar ile belirtilmektedir. Model sonuçları sunulurken hücreler, 1'den 125'e kadar değişen numaralar ile adlandırılacaklardır.

Çizelge 5.11 : Modelde kullanılan 7 ana hücre.

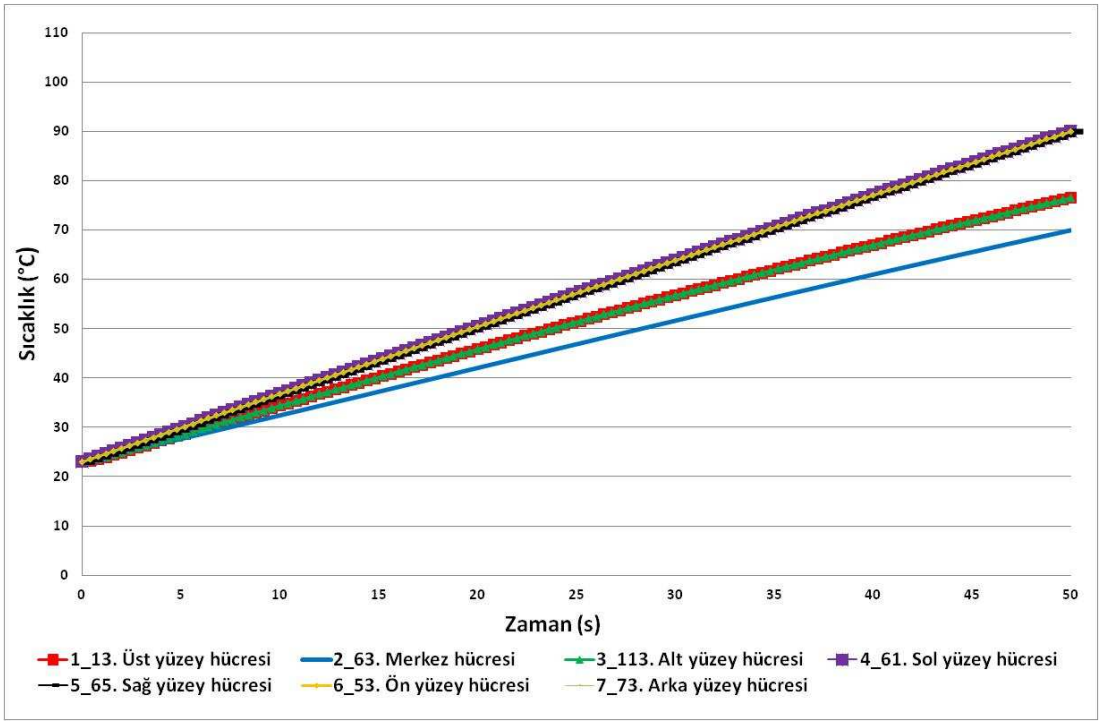
Hücreler	**Hücre konumu**	**Hücre no (Şekil 5.1'de sunulan)**	**Hücre koordinatı M(x,y,z)**
1	Üst yüzey hücresi	13	M(25,25,18)
2	Merkez hücre	63	M(25,25,10)
3	Alt yüzey hücresi	113	M(25,25,2)
4	Sol yüzey hücresi	61	M(5,25,10)
5	Sağ yüzey hücresi	65	M(45,25,10)
6	Ön yüzey hücresi	53	M(25,5,10)
7	Arka yüzey hücresi	73	M(25,45,10)

Şekil 5.16'da, Çizelge 5.11'de sunulan 13., 53. ve 65. hücrelerin patates model geometrisi üzerinde belirtilmektedir.



Şekil 5.16 : 13., 53. ve 65. hücrelerin model geometrisi üzerinde belirtilmesi.

Modelleme çalışmalarında, öncelikle yüzeylere gelen mikrodalga etkisini tam olarak anlayabilmek için tüm yüzeylerin eşit şekilde mikrodalga etkisinde olduğu düşülmüştür. Deneysel çalışmalar belli oranlar için yol gösterse de, akla ilk gelebilecek durum olan, bütün yüzeylere eşit mikrodalga etkisi; incelenmesi gereken bir durumdur. Model 1'de, 6 adet yüzeye eşit olarak; %16.66 oranında mikrodalganın etki ettiği durum incelenmektedir. Şekil 5.17'de Model 1'e ait 7 ana hücre için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.

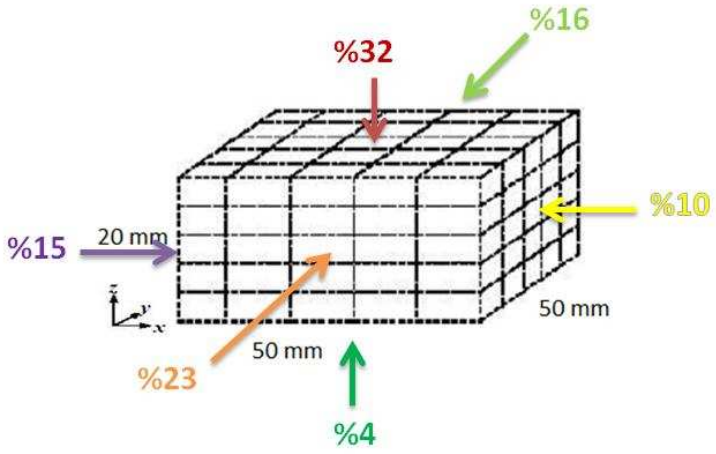


Şekil 5.17 : Model 1 için elde edilen sıcaklık değerleri.

Bütün yüzeylere eşit şekilde mikrodalganın etki ettiği Model 1'de sol, sağ, ön ile arka yüzeylerin sıcaklık-zaman eğrileri ve üst ile alt yüzeyin sıcaklık-zaman eğrileri

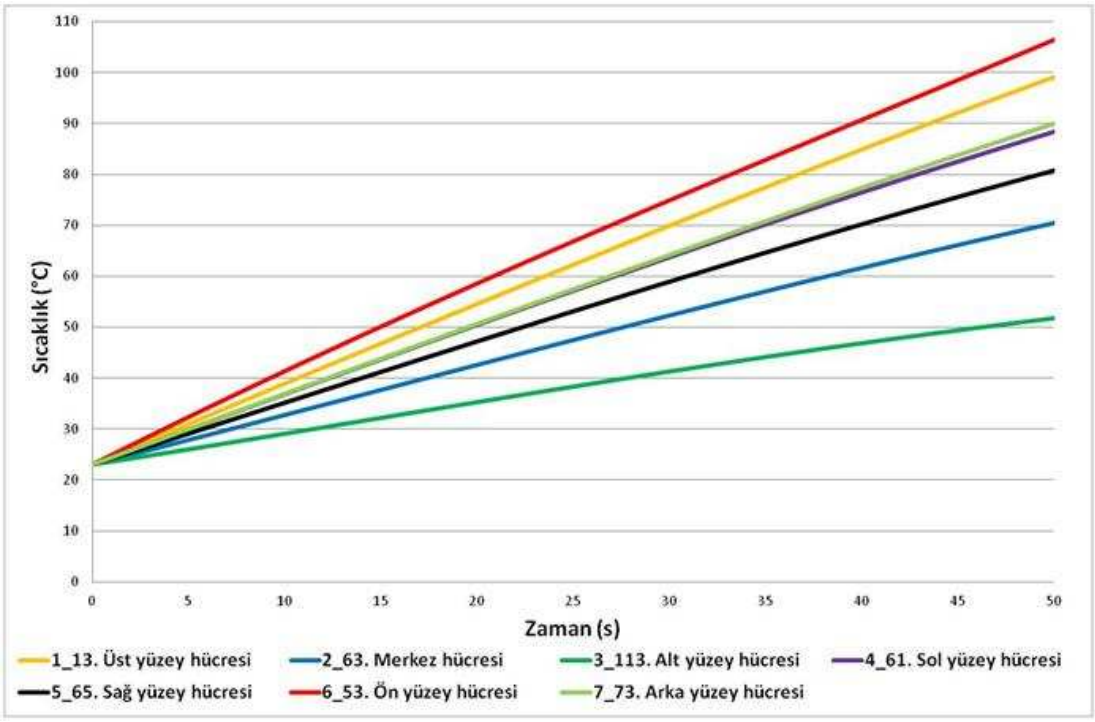
aynı değerler sahiptir. Bu durum patatesin sahip olduğu (50x50x20) mm ölçülerinden kaynaklanmaktadır. Patatesin yüksekliği 20 mm olduğu için üst yüzey ve alt yüzey merkez hücrelerinin, merkezlerinin ilgili oldukları yüzeyden uzaklıkları 2 mm'dir. Benzer şekilde patatesin eni ve derinliği 50 mm olduğu için sol, sağ, ön ve arka yüzey merkez hücrelerinin merkezlerinin ilgili oldukları yüzeyden uzaklıkları 5 mm'dir. Bu uzaklıklardan dolayı; sol, sağ, ön ve arka yüzeylerin sıcaklık-zaman eğrileri, üst ve alt yüzeyin sıcaklık-zaman eğrilerine göre daha yüksek değerlere sahiptir. Çünkü bu uzaklıklar penetrasyon derinliklerini etkileyerek hücrelerin maruz kaldığı ısıya dönüşen mikrodalga gücünü etkilemektedir. Merkez hücresinin, yüzeylerdeki gücün penetrasyon derinliğiyle azalmasından dolayı, diğer hücrelere göre sıcaklık-zaman eğrisi daha düşük değerlerde kalmaktadır.

Deneysel çalışmalarda, mikrodalganın en çok üst yüzeye en az alt yüzeye etki ettiği belirlenmiştir. Bu sonuçtan yola çıkarak, Model 2'de mikrodalganın; üst yüzeyde %32, alt yüzeyde %4, sol yan yüzeyde %15, sağ yan yüzeyde %10, ön yüzeyde %23 ve arka yüzeyde %16 olarak etki ettiği durum incelenmektedir. Şekil 5.18'de Model 2'ye ait yüzeylerdeki mikrodalga dağılımı görülmektedir.



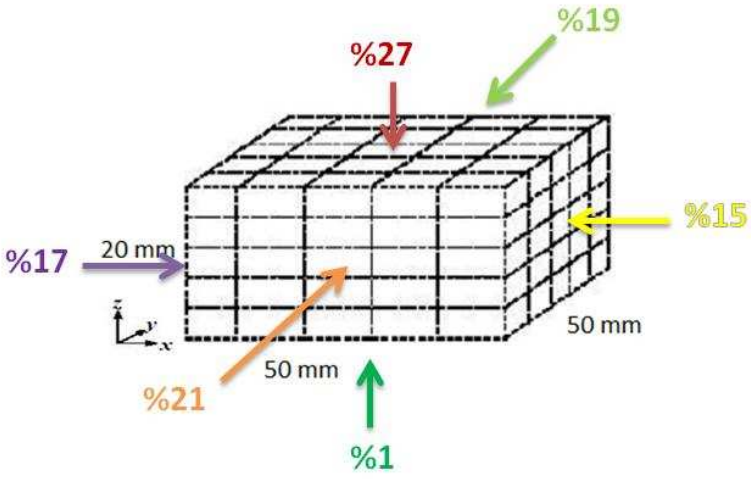
Şekil 5.18 : Model 2'ye ait yüzeylerdeki mikrodalga dağılımı.

Şekil 5.19'da Model 2'ye ait 7 ana hücre için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Model 2'de mikrodalga etkisi en fazla üst yüzeyde en az da alt yüzeyde olup, sol ve arka yüzeyin birbirlerine yakın etkiye sahip olduğu görülmektedir. Ön ve sağ yüzeylerin ise birbirine çok da yakın olmayan bir mikrodalga etkisinde olduğu görülmektedir. Penetrasyon derinliğine bağlı olarak artan derinlikle mikrodalga etkisinin azalmasından dolayı, merkez hücresine ait sıcaklık değerleri yüzey hücrelerine ait değerlerden daha düşük kalmaktadır.



Şekil 5.19 : Model 2 için elde edilen sıcaklık değerleri.

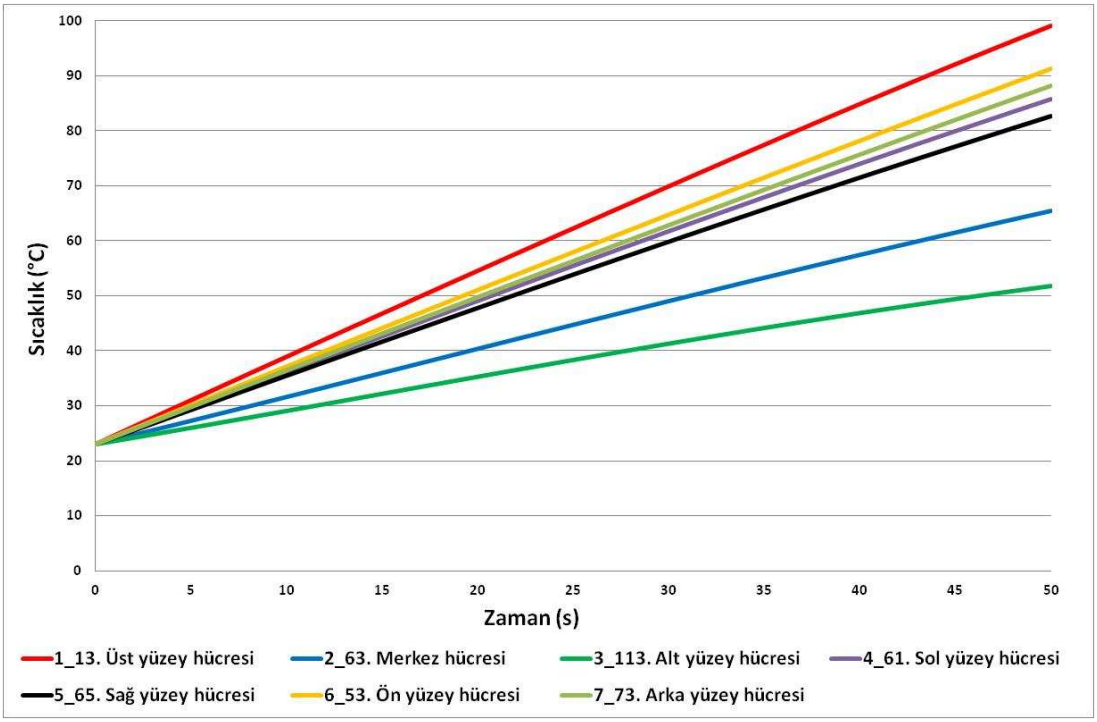
Model 3'de daha uygun bir dağılım için mikrodalganın yüzeylere etki oranı daha detaylı olarak değiştirilmiştir. Model 3'de mikrodalganın; üst yüzeyde %27, alt yüzeyde %1, sol yan yüzeyde %17, sağ yan yüzeyde %15, ön yüzeyde %21 ve arka yüzeyde %19 olarak etki ettiği durum incelenmektedir. Şekil 5.20'de Model 3'e ait yüzeylerdeki mikrodalga dağılımı görülmektedir.



Şekil 5.20 : Model 3'e ait yüzeylerdeki mikrodalga dağılımı.

Şekil 5.21'de ise, Model 3'e ait 7 ana hücre için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Model 3'de yine Model 2'de olduğu gibi, mikrodalga etkisi en fazla üst yüzeyde en az da alt yüzeydedir. Fakat, Model 2'ye göre üst ve alt yüzeyin mikrodalga etki oranı

azaltılmaktadır. Sol, sağ, ön ve arka yüzeylerdeki mikrodalga etkisinin de birbirine yakın olduğu görülmektedir.



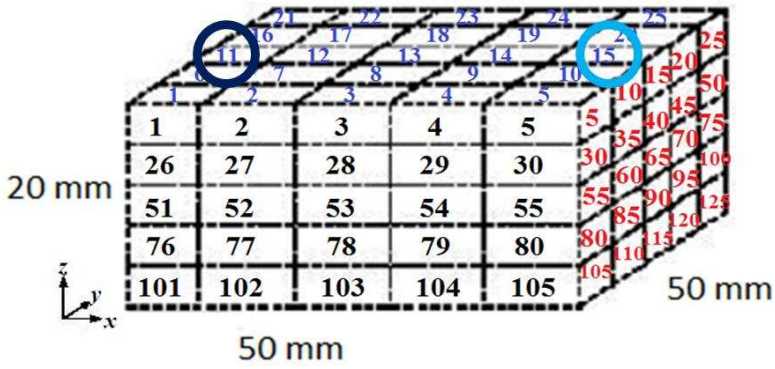
Şekil 5.21 : Model 3 için elde edilen sıcaklık değerleri.

Daha uygun bir mikrodalga dağılımına ulaşılan Model 3 için aralarında 2 ana hücrenin de bulunduğu 5 hücre için de model sonuçları alınmıştır. Bu 5 hücre Çizelge 5.12'de sunulmaktadır. Çizelge 5.12'de sunulan 5 hücrenin, patates üzerindeki konumu belirtilip, daha iyi anlaşılması için deneysel çalışmalarda sunulduğu gibi koordinatları ve model içerisindeki numaraları verilmektedir.

Çizelge 5.12 : Model 3 için seçilen; 5 yeni hücre ile oluşturan 7 hücre.

Hücreler	**Hücre konumu**	**Hücre no (Şekil 5.1'de sunulan)**	**Hücre koordinatı M(x,y,z)**
1	Sol yüzey hücresi	61	M(5,25,10)
2	Sol yan-merkez ara hücresi	62	M(15,25,10)
3	Merkez hücre	63	M(25,25,10)
4	Üst yüzey sol orta kenar	11	M(5,25,18)
5	Üst yüzey sağ orta kenar	15	M(45,25,18)

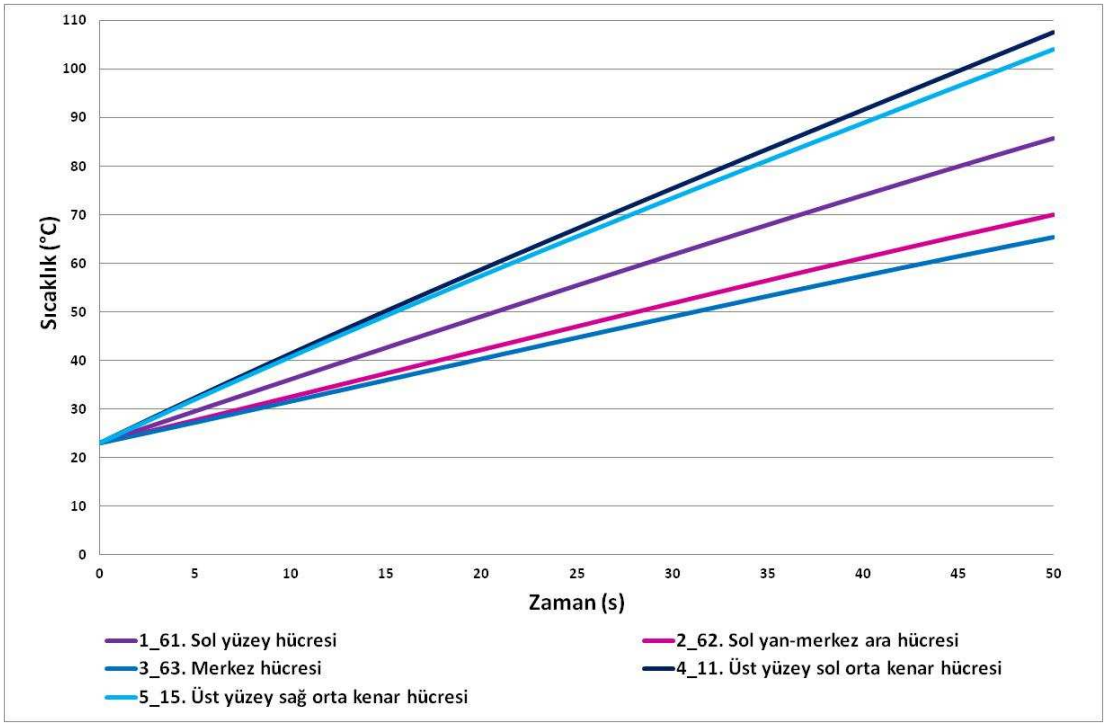
Şekil 5.22'de; Çizelge 5.12'de sunulan 11. ve 15. hücrelerin yerleri patates model geometrisi üzerinde belirtilmektedir.



Şekil 5.22 : 11. ve 15. hücrelerin model geometrisi üzerinde belirtilmesi.

Bu 5 hücreden 3 tanesi; 61. sol yan yüzey hücresi, 63. merkez hücre ve bu iki hücre arasındaki 62. hücredir. 61. hücrenin 2 hücre üstü yüzey hücresi olan 11. üst yüzey sol orta kenar hücresi ile simetrisi olan 15. üst yüzey sağ kenar hücresi de bu yeni hücre grubuna eklenmektedir. Yüzeylerin merkezlerindeki hücrelerin (6 ana yüzey merkez hücresi) dışındaki, ara hücreler için ve yüzeyin kenarındaki hücreler için de model sonuçların nasıl çıkacağı bu yeni hücre grubu ile gözlemlenebilecektir.

Şekil 5.23'de Model 3'e ait 5 yeni hücre grubu için elde edilen sonuçlar sunulmaktadır.



Şekil 5.23 : Model 3'e ait yeni hücre grubu için elde edilen sıcaklık değerleri.

Model 3' göre sol yüzey merkez hücresi ile patates merkez hücresi arasındaki 62. sol yan-merkez ara hücresinin sıcaklık-zaman eğrisi; olması gerektiği gibi sol yüzey

merkez hücresi ile patates merkez hücresi sıcaklık-zaman eğrilerinin arasında kalmaktadır. Patates üst yüzeyinin sol ve sağ kenarındaki hücrelerde ise sıcaklı-zaman eğrisi daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Çünkü bu hücreler hem üst yüzeyden hem de sol ve sağ yüzeylerden yüksek mikrodalga etkisi altında kalmaktadırlar.

Bundan sonraki bölümde, model ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, hangi modelin mikrodalga dağılımına en uygun olduğu belirtilmeye çalışılacaktır. Ayrıca en uygun dağılım; 10 faklı hücre ile en iyi şekilde ortaya konulup, model ile deneysel çalışmanın birbirleriyle ne kadar uyumlu olduğunun sunulması amaçlanmaktadır.

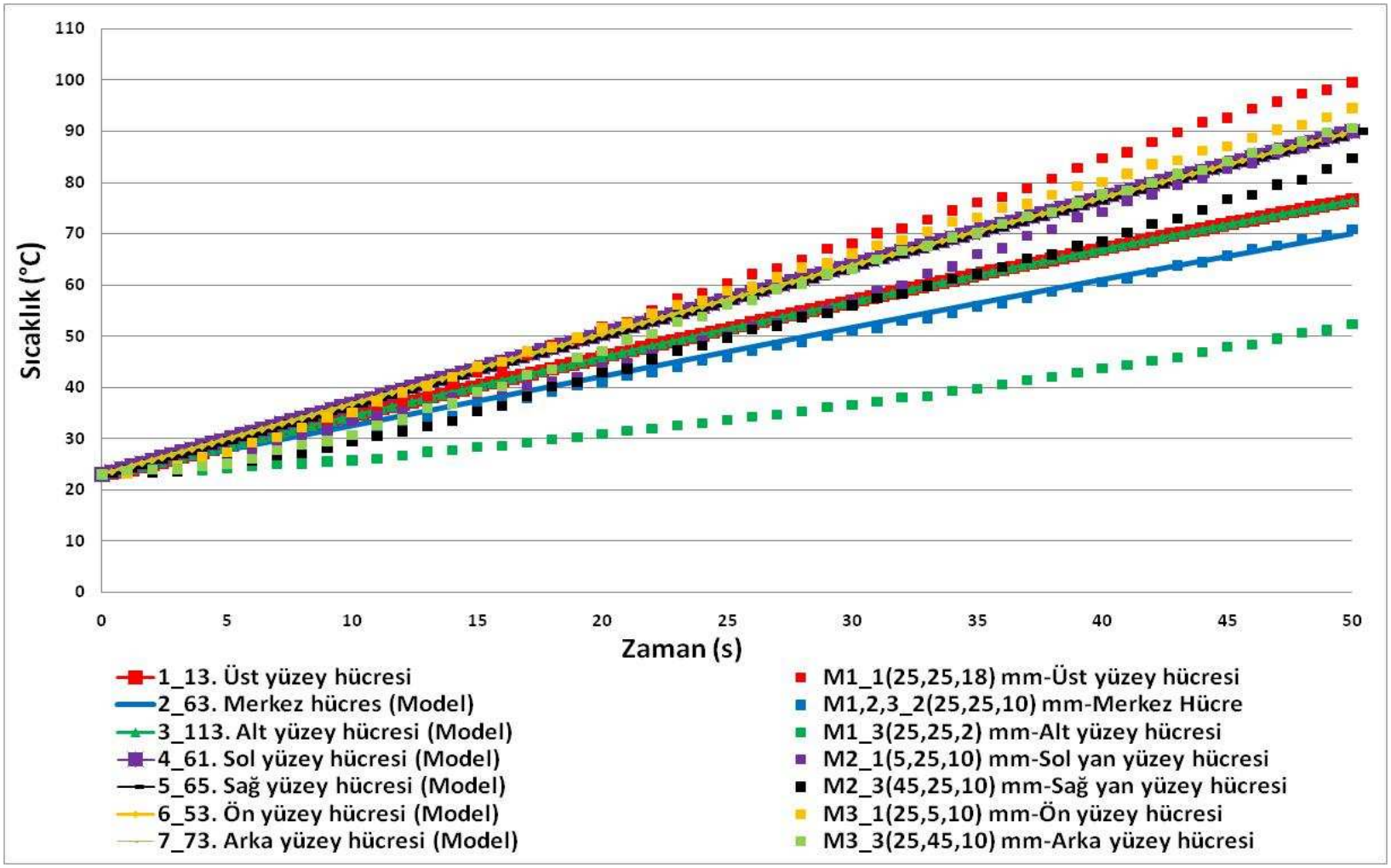
5.3 Modelin Doğrulanması

Modelin doğrulanmasında öncelikle, farklı mikrodalga dağılımlarına sahip modellerden hangisinin deneysel çalışmalara en yakın dağılıma sahip olduğu ortaya konmaya çalışılmıştır. En uygun dağılım 7 ana hücre ile belirlendikten sonra, daha detaylı bir karşılaştırma için model, yüzeylerin merkezlerindeki hücrelerin (6 ana yüzey merkez hücresi) dışındaki, ara hücrelerle ve yüzeyin kenarındaki hücrelerde de karşılaştırılıp, modelin en iyi şekilde desteklenmesi amaçlanmıştır.

Deneysel çalışmalarda kullanılan patates, ortam şartlarındadır. Laboratuvar ortamı da Bölüm 4.1'de belirtildiği gibi, 23±2 °C ortam sıcaklığına sahiptir. Deneylerin yapıldığı laboratuvar içerisinde, ortam sıcaklığının bu değerler arasında kalması ve fazla değişmemesi için hava şartlandırma üniteleri kullanılmaktadır. Fakat modelleme çalışmalarında, tek bir sıcaklık değeri kullanabilmek için başlangıç sıcaklığı olarak 23 °C girilmektedir.

Mikrodalganın hacim içindeki dağılımını en uygun şekilde ortaya koyan 7 ana hücre sırasıyla Model 1, 2 ve 3 ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 5.24'de, Model 1'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması, Çizelge 5.13'de ise bu karşılaştırmaya ait farklar sunulmaktadır. Şekil 5.24'de sunulan grafikte, modele ait değerlerde üst yüzey hücresi ile alt yüzey hücresi üst üstedir. Yine benzer şekilde 4 yan yüzey; sol, sağ, ön ve arka yüzey hücreleri de üst üstedir. Patates merkez hücresi ise, yüzey hücrelerinden daha farklı bir sıcaklık-zaman eğrisine sahiptir.



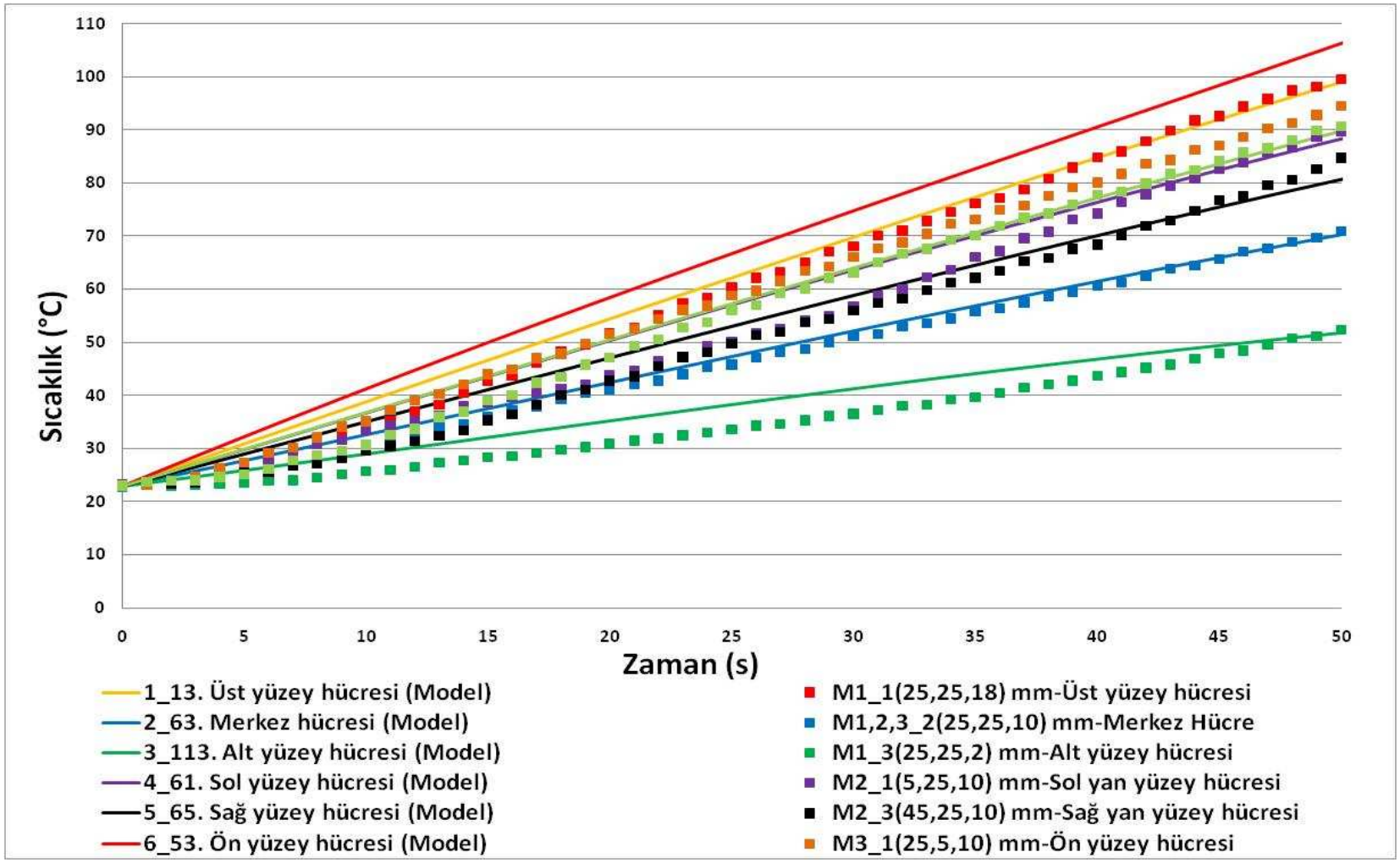
Şekil 5.24 : Model 1'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Çizelge 5.13 : Model 1'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar.

Hücreler	Hücre konumu	Hücre no	M(x,y,z)	Model 1 ile Deneysel Çalışma Arasındaki Fark (%)
1	Üst yüzey hücresi	13	M(25,25,18)	**-27.4**
2	Merkez hücre	63	M(25,25,10)	**6.25**
3	Alt yüzey hücresi	113	M(25,25,2)	**46.2**
4	Sol yüzey hücresi	61	M(5,25,10)	**17.6**
5	Sağ yüzey hücresi	65	M(45,25,10)	**24.6**
6	Ön yüzey hücresi	53	M(25,5,10)	**-5.6**
7	Arka yüzey hücresi	73	M(25,45,10)	**21.8**

Çizelge 5.13'e göre Model 1'de uygulanan bütün yüzeylere eşit şekilde mikrodalga etkisi deneysel çalışmalara çok fazla uymamaktadır. Özellikle alt yüzey hücresi için belirlenen %46.2 ve üst yüzey için belirlenen %27.4 değerindeki farklar çok fazladır. Arka yüzey ve sağ yüzey hücresi belirlenen farklar da %20'den fazladır. Bu durumda Model 1 için belirlenmiş bütün yüzeylere eşit mikrodalga etkisi, uygun bir dağılım değidir. Çünkü bu dağılımla üst ve alt yüzey hücreleri için elde edilen sonuçlar, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara hiçbir şekilde yakın değildir. Alt yüzey hücresi için belirlenen %46.2 değerindeki bir fark, kabul edilemeyecek kadar fazladır.

Şekil 5.25'de ise, Model 2'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması, Çizelge 5.14'de ise bu karşılaştırmaya ait farklar sunulmaktadır. Şekil 5.25'e göre, model değerleri genellikle deneysel çalışmadan elde edilen değerlerin üstünde kalmaktadır. Üst yüzey için belirlenen %32 oranında mikrodalga etkisinin, diğer yüzeylerin oranlarına kıyasla olması gerekenden daha fazla olarak belirlendiği görülmektedir. Bu durumda, bir sonraki modelde oranlar belirlenirken üst yüzey hücresi için belirlenecek oranın %32'den az olması gerekmektedir. Sol, sağ, ön ve arka yüzey hücrelerine ait modelden elde edilen sıcaklık değerlerinin, deneysel çalışma ile olan farklarının; 4 yan yüzey için de birbirine benzer olduğu görülmektedir. Model ile deneysel çalışma arasında farkın en az merkez hücresi için olduğu, bu hücreye ait modelden ve deneysel çalışmalardan elde edilen sıcaklık-zaman eğrilerinin birbirine daha yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 5.25 : Model 2'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

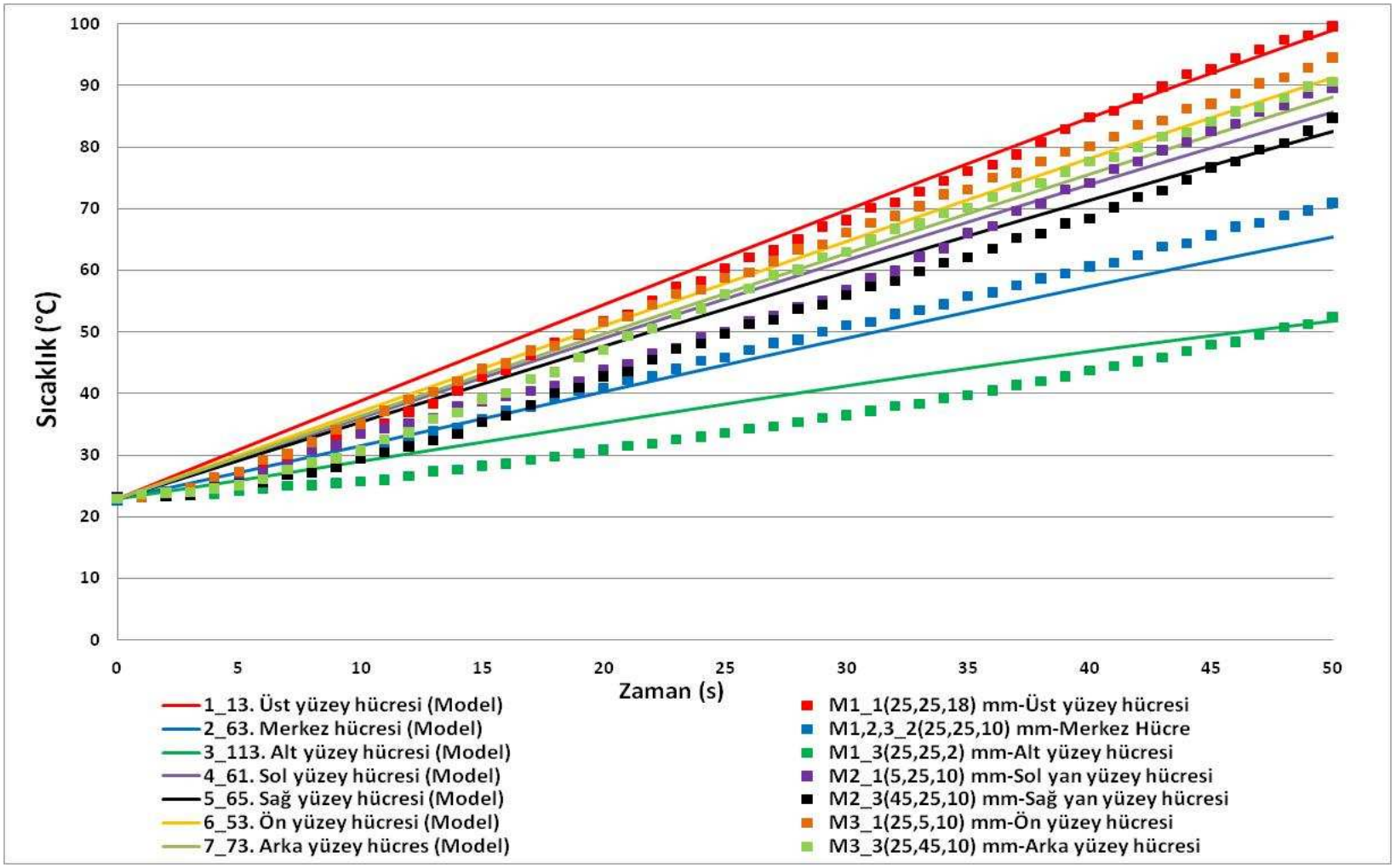
Çizelge 5.14 : Model 2'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar.

Hücreler	Hücre konumu	Hücre no	M(x,y,z)	Model 2 ile Deneysel Çalışma Arasındaki Fark (%)
1	Üst yüzey hücresi	13	M(25,25,18)	**23.6**
2	Merkez hücre	63	M(25,25,10)	**5.5**
3	Alt yüzey hücresi	113	M(25,25,2)	**16.8**
4	Sol yüzey hücresi	61	M(5,25,10)	**16.6**
5	Sağ yüzey hücresi	65	M(45,25,10)	**19.1**
6	Ön yüzey hücresi	53	M(25,5,10)	**5.8**
7	Arka yüzey hücresi	73	M(25,45,10)	**16.2**

Çizelge 5.14'e göre, Model 2'de uygulanan, üst yüzeyde %32 alt yüzeyde %4, sol yan yüzeyde %15, sağ yan yüzeyde %10, ön yüzeyde %23 ve arka yüzeyde %16 mikrodalga dağılımı, Model 1'e göre deneysel çalışmalara daha fazla uygunluk gösterse de üst yüzey için %32 oranında bir etkinin fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca sol, sağ, ön ve arka yüzeyler için belirlenen oranların da değiştirilip, belirlenecek farkların biraz daha azalması gerekmektedir.

Model ile deneysel çalışma arasındaki farkın en fazla %15 olması, modelin uygunluğu açısından önemlidir. Çünkü yapılan literatür araştırmasında yaklaşık %15'lik farkların olduğu görülmektedir. Bölüm 3.1'de sunulan literatür çalışmalarında, mikrodalga ortamda fiber optik problarla yapılan deneysel çalışmalarda, model ile deneysel çalışmalar arasındaki farkın çok da az olmadığı görülmüştür. Zhou ve diğerleri (1994) tarafından sunulan çalışmada model ile deneysel çalışma arasındaki sıcaklık farkının, 8.1 °C yani %15.5 olduğu sonucuna varılmıştır. Modelin doğrulanması ile ilgili sonuçlar sunulurken, hataların neden kaynaklandığı ve neden bu kadar fazla olduğu yada literatürde nelerle karşılaşıldığı sunulacaktır.

Model 3 için 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması Şekil 5.26'da görülmektedir. Şekil 5.26'da görüldüğü gibi, Model 3'de uygulanan üst yüzeyde %27, alt yüzeyde %1, sol yan yüzeyde %17, sağ yan yüzeyde %15, ön yüzeyde %21 ve arka yüzeyde %19 mikrodalga dağılımı, Model 1 ve Model 2'ye göre deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara daha yakındır.



Şekil 5.26 : Model 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Çizelge 5.15'de ise, Model 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalar arasındaki fark, her bir hücre için sunulmaktadır.

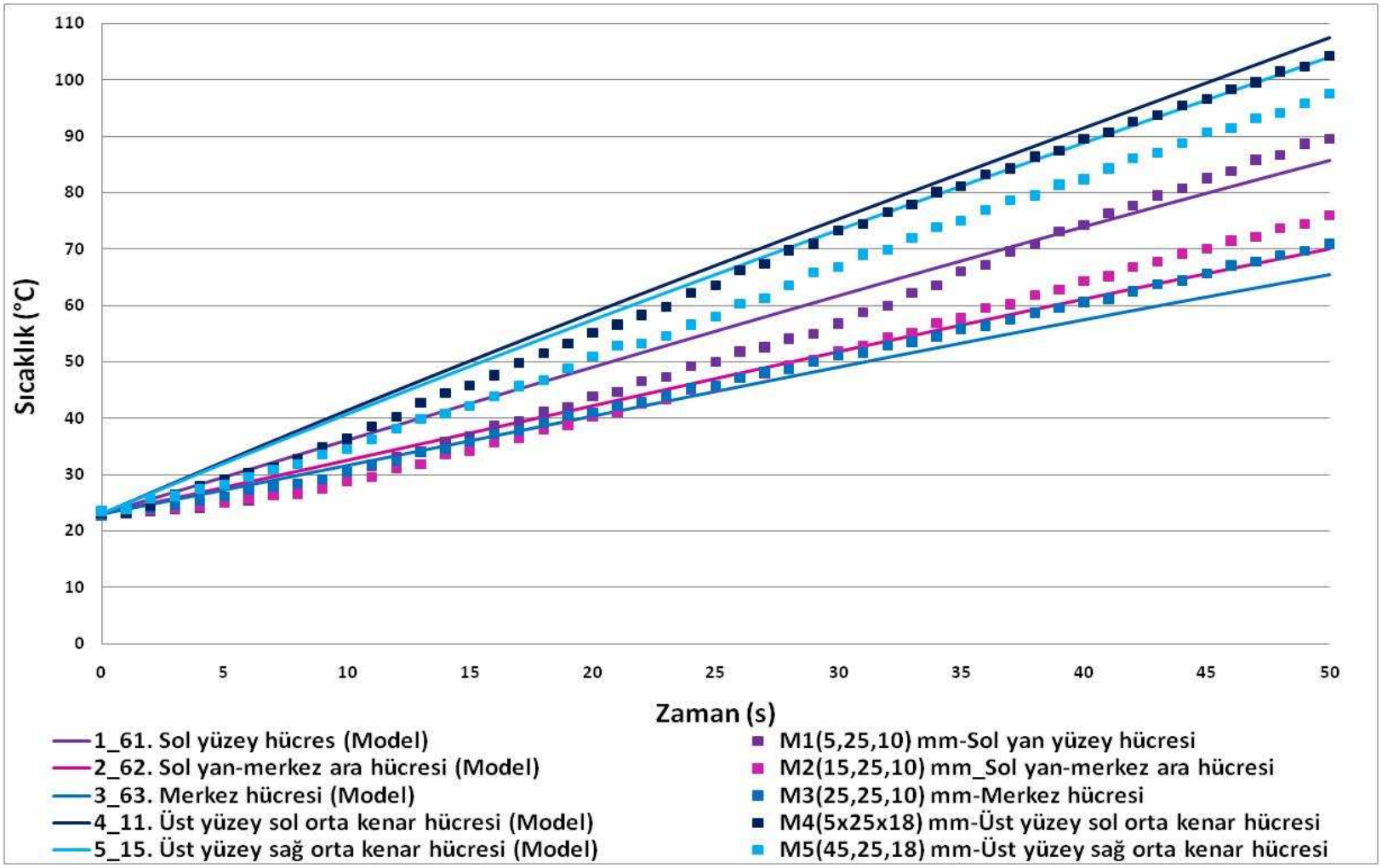
Çizelge 5.15 : Model 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar.

Hücreler	**Hücre konumu**	**Hücre no**	**M(x,y,z)**	**Model 3 ile Deneysel Çalışma Arasındaki Fark (%)**
1	Üst yüzey hücresi	13	M(25,25,18)	**8.8**
2	Merkez hücre	63	M(25,25,10)	**-6.4**
3	Alt yüzey hücresi	113	M(25,25,2)	**11.9**
4	Sol yüzey hücresi	61	M(5,25,10)	**11.6**
5	Sağ yüzey hücresi	65	M(45,25,10)	**13.4**
6	Ön yüzey hücresi	53	M(25,5,10)	**4.3**
7	Arka yüzey hücresi	73	M(25,45,10)	**12.8**

Çizelge 5.15'e göre, model ile deneysel çalışma arasındaki fark, hiçbir hücre için %15 değerini geçmemektedir. Bu da literatürde karşılaşılan değerlerle uyumludur. Farkın en az ön yüzey en fazla ise sağ yüzey için olduğu görülmektedir. Bu farklar belirlenirken, model ile deneysel çalışma arasındaki en büyük fark alınmaktadır. Farkın en çok ilk 15 s için olduğu, 15 s'den sonra daha yüksek sıcaklıklarda bu farkın giderek azaldığı görülmektedir. Yani tabloda belirlenen farklar, yüksek sıcaklıklarda daha düşük değerlere düşmektedir. İlk 15 s'de modele ait sıcaklık-zaman eğrilerinin, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlara göre biraz daha hızlı arttığı görülmektedir.

Daha önce de belirtildiği gibi, deneysel çalışmalarda kullanılan patatesler ortam sıcaklığındadır. Ortam ise, 23±2 °C sıcaklığındadır. Fakat modelde tek bir sıcaklık değeri kullanılarak başlangıç sıcaklığı her zaman 23 °C alınmaktadır. Ayrıca modelde 125 hücre için tek bir sıcaklık değeri girilirken, gerçekte patatesin farklı hücrelerinde sıcaklık değerleri az da olsa birbirinden farklıdır.

Model 3'deki dağılımın uygunluğunu daha iyi ortaya koyabilmek için, Deneysel Çalışma 4'ü kapsayan 3 yeni hücrenin eklendiği yeni hücre grubu ile de deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma ve karşılaştırmaya ait farklar, sırasıyla Şekil 5.27'de ve Çizelge 5.16'da sunulmaktadır.



Şekil 5.27 : Model 3'e ait yeni hücre grubu ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılması.

Şekil 5.27'ye göre, diğer hücre grubunda olduğu gibi ilk 15 s'de model ile deneysel çalışma arasındaki farkın daha fazla olduğu görülmektedir. Çizelge 5.16'daki farklar belirlenirken, en büyük hatalar alınmaktadır.

Çizelge 5.16 : Model 3'e ait yeni hücre grubu ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar.

Hücre	**Hücre konumu**	**Hücre no**	**M(x,y,z)**	**Model 3 ile Deneysel Çalışma Arasındaki Fark (%)**
1	Sol yüzey hücresi	61	M(5,25,10)	**11.6**
2	Sol yan-merkez ara hücresi	62	M(15,25,10)	**-8.6**
3	Merkez hücre	63	M(25,25,10)	**-6.4**
4	Üst yüzey sol orta kenar	11	M(5,25,18)	**13.7**
5	Üst yüzey sağ orta kenar	15	M(45,25,18)	**14.8**

Çizelge 5.16'ya göre, ara hücre için belirlenen fark, patates merkez hücresi için belirlenen farka çok benzerdir. Fakat, yüzey hücrelerinden farklı olarak ara hücrelerin ve yüzeyin kenarındaki hücrelerin incelendiği bu grupta farkların biraz daha arttığı görülmektedir. Üst yüzeyin sol orta kenar ve sağ orta kenar hüreleri, üst yüzeye etki eden yüksek mikrodalga etkisinde oldukları gibi, bunun yanında sol ve sağ yüzeylere de etki eden yüksek mikrodalga etkisindedirler. Bu durumda, sıcaklıkları, 50 s'de incelen diğer hücrelere göre daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Çünkü, bu hücreler hem üst yüzeye hem de sol ve sağ yan yüzeylere yakın olmalarından dolayı, yüksek mikrodalga etkisindedirler. Bu hücreler, modellenmesi daha zor olan hücrelerdir. Bu nedenle farkın diğer hücrelere göre yüksek çıkması beklenen bir sonuçtur.

Yapılan literatür araştırmasında, fiber optik problarla mikrodalga ortamda ısıtılan gıda içerisinde ölçüm yapmanın zorlukları görülmüştür. Bu sebeple, literatürde deneysel çalışmalar genellikle gıda merkez hücresi yada üst yüzey hücreleri için gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, 125 hücreye ayrılan patatesin, ara ve yüzey kenar hücreleri için de sıcaklık ölçümleri yapılıp, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar kurulan modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Böylece modelin sadece yüzey hücreleri için uyumlu olmadığı gösterilmeye çalışılmaktadır. Fakat fiber optik problarla yapılan deneysel çalışmalar sırasında literatürde bahsedilen probların gıda içinden kayması, yer değiştirmesi gibi hassas yapısından

kaynaklanan zorluklar yaşanmıştır. Bu yüzden deneysel çalışmalar çok tekrarlı yapılarak en uygun sonuçlara tez çalışmasında yer verilmiştir.

Modeller arasındaki farkı daha iyi görebilmek için, 3 modelin beraber olduğu Çizelge 5.17 oluşturulmuştur. Çizelge 5.17'de, Model 1, 2 ve 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar bir arada sunulmaktadır.

Çizelge 5.17 : Model 1, 2 ve 3'e ait 7 ana hücre ile deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında belirlenen farklar.

No	Hücre konumu	Model 1		Model 2		Model 3	
		Yüzeylere Dağılım (%)	Deneysel Çalışma ile Arasındaki Fark (%)	Yüzeylere Dağılım (%)	Deneysel Çalışma ile Arasındaki Fark (%)	Yüzeylere Dağılım (%)	Deneysel Çalışma ile Arasındaki Fark (%)
1	Üst yüzey hücresi	16.66	**-27.4**	32	**23.6**	27	**8.8**
2	Merkez hücre	-	**6.25**	-	**5.5**	-	**-6.4**
3	Alt yüzey hücresi	16.66	**46.2**	4	**16.8**	1	**11.9**
4	Sol yüzey hücresi	16.66	**17.6**	15	**16.6**	17	**11.6**
5	Sağ yüzey hücresi	16.66	**24.6**	10	**19.1**	15	**13.4**
6	Ön yüzey hücresi	16.66	**-5.6**	23	**5.8**	21	**4.3**
7	Arka yüzey hücresi	16.66	**21.8**	16	**16.2**	19	**12.8**
SONUÇ		**Uygun olmayan dağılım**		**Uygun olmayan dağılım**		**Uygun dağılım**	

Çizelge 5.17'ye göre, en uygun dağılım: Model 3 için belirlenen; üst yüzeyde %27, alt yüzeyde %1, sol yan yüzeyde %17, sağ yan yüzeyde %15, ön yüzeyde %21 ve arka yüzeyde %19 mikrodalga dağılımıdır. Uygun olan bu dağılımda farkların %15'i geçmemesi esas alınmıştır. Tabloda belirlenen farklar, model ile deneysel çalışma arasındaki en büyük farklardır.

Uygun modelde (Model 3), belirlenen farkların daha yüksek sıcaklıklarda azaldığı görülmektedir. Tez çalışmasında, çizelgelerde yer alan farklar için her zaman model ile deneysel çalışma arasındaki en büyük fark değeri sunulmaktadır. Hücreler için belirlenen farklar farklı da olsa, her zaman modele ait sıcaklık-zaman eğrisi ile deneysel çalışmaya ait sıcaklık-zaman eğrisinin aynı karakterde; artma eğiliminde olduğu belirlenmiştir.

Bölüm 4.2'de açıklanan; mikrodalga ortamda ısıya dönüşen gücün hesaplanmasındaki belirsizlik değeri, çok küçük bir değer olarak elde edilmektedir. Fakat deneysel çalışma ile model arasındaki fark, belirlenen bu belirsizlikten çok daha fazladır. Bunun sebepleri literatürde araştırılıp, yapılan çalışmada belirlenen nedenlerle karşılaştırılmıştır. Belirlenen bu nedenler açıklanmaya çalışılmıştır.

Elektrik alan şiddeti; mikrodalga ortamda ısıya dönüşen gücü veren, **(2.35)** eşitliğinde sunulan denklemde sabit ve ortalama bir değer olarak kullanılmaktadır. Literatürde böyle bir kabul yapılıp, bilinen tüm elektromanyetik alan denklemleri bu kabule göre elde edilmektedir. Gerçekte, mikrodalganın yani elektriksel alanın hacim içindeki değişimi, ısıtılan hacim içindeki karıştırıcının her açısında ve her fazda farklı bir değer almaktadır. Bu kadar ayrıntılı bir çalışma ancak, hacim içindeki mikrodalga dağılımının analiz programları yardımıyla belirlenmesiyle yapılabilmektedir. Mikrodalga dağılımın her yüzeyde eşit alınması yada yüzeylere farklı oranlarda dağıtılması bile çok kaba bir yaklaşımdır. Çünkü bir yüzeyin her noktasına, farklı şekilde mikrodalga etki etmektedir. Bu tez çalışması kapsamında da olduğu gibi, mikrodalga dağılımın bir yüzeydeki her noktaya her an aynı şekilde etki ettiğini kabul etmek, modelleme çalışmasından elde edilecek sonuçları etkilemektedir.

Bölüm 3.1'de sunulan literatür çalışmalarında, mikrodalga ortamda fiber optik problarla yapılan deneysel çalışmalarda, model ile deneysel çalışmalar arasındaki farkın çok da az olmadığı görülmüştür. Zhou ve diğerleri (1994) tarafından sunulan çalışmada model ile deneysel çalışma arasındaki sıcaklık farkının, gıda merkez hücresi için 8.1 °C yani %15.5 olduğu sonucuna varılmıştır. Datta ve diğerleri (2008) tarafından sunulan bir başka mikrodalga ortamda fiber optik problarla yapılan deneysel çalışmada da model ile deneysel çalışma arasındaki fark %6'ya yakındır. %6'lık bir fark az olarak kabul edilmiştir. Bunun nedeni, hacim içerisindeki mikrodalga dağılımının analiz programıyla tam ve net olarak belirlenip, bir yüzeyin her noktasında her an aynı etki olmaksızın modele yansıtılmasıdır. Buz tezde olduğu gibi analiz programı olmadan belirlenen dağılımlarda, model ile deneysel çalışma arasındaki fark daha da artmaktadır. Ayrıca literatür araştırmasında belirlenen bir başka durum ise, kurulan modellerde enerji korunumu denklemlerinde buharlaşma ile kaybolan enerjinin ihmal edilmesi yada kütle transferinin hesaplanmasında deneysel çalışmalardan alınan sonuçların kullanılmasıdır. Bu da, model ile deneysel

çalışmalar arasındaki farkın yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında, kütle transferi sınır şartı için deneysel çalışma sonucundan yararlanılması, literatürde olduğu gibi model sonuçlarını etkileyebilmektedir.

Yapılan literatür çalışmasında model ile deneysel çalışmalar arasındaki farkın yüksek olduğu, fakat bu farkın kabul edilebilir olduğu görülmüştür. Bu farkın, daha çok deneysel çalışmalardan kaynaklı olduğu belirtilmiştir. Bu farkın en büyük sebebi olarak, gıda ile çalışmanın zorluğu gösterilmiştir. Çünkü ısıtma boyunca gıdada gerçekleşen reaksiyonlar sonucu gıdanın bileşimi ve yapısı değişmektedir. Bu durum gıdaya ait parametreleri etkilemekte ve ısıtma boyunca probların aynı noktada sabit bir şekilde kalmayıp, kaymasına ve yer değiştirmesine neden olmaktadır. Bir başka sebep ise fiber optik probların çok hassas olması, en ufak bir değişiklikten hemen etkilenmeleri, gıda içinde sabit duramamaları yani gıda içinde harekete çok müsait olmaları olarak sunulmuştur. Bir diğer sebep olarak, mikrodalganın hacim içindeki dağılımının zaman içerisinde değişiklik göstermesi verilmiştir. Tüm bu sunulanlara ek olarak, enerji korunumu denklemlerinde buharlaşma ile kaybolan enerjinin ihmal edilmesi yada kütle transferinin hesaplanmasında deneysel çalışmalardan alınan sonuçların kullanılmasının model sonuçlarını etkilemesi de eklenmektedir.

Baysal (2011)'a ait çalışmaya dayanarak; mikrodalga ısıtmanın etkinliğini, konvansiyonel ısıtmada olduğu gibi tam olarak incelemek, kullanılan farklı teknikler veya yöntemlere dair ve materyaller hakkında ayrıntı olmaması nedeniyle çok güç olmaktadır. Diğer gıda işleme uygulamalarında olduğu gibi mikrodalga uygulaması da kendine özgü problemler içermektedir. Düzensiz yada eşit olmayan sıcaklık dağılımı mikrodalga uygulamalarında en önemli problemdir. Gıdalarda tekdüze olmayan ısı dağılımına neden olan mikrodalga ısıtma çalışmalarında karşılaşılan zorluklar şu şekilde sıralanmaktadır:

- Bir mikrodalga alanda sıcaklık ölçümü için uygun yöntemlerin kısıtlı olması ve yöntemlerin detaylı olarak bilinmemesi,
- Tutarsız mikrodalga alan dağılımları, gıdanın fiziksel ve elektriksel yapısı nedeniyle tekdüze olmayan ısıtma ihtimalinin oluşu,
- Mikrodalga ısıtma uygulanmış gıdaların sıcaklığını belirli bir seviyede kontrol edebilmenin mümkün olmaması,

- Mikrodalga ısıtma sırasında gıdada buharlaşma kayıplarının gerçekleşmesi ve bunun sonucu olarak çözünür maddelerin konsantrasyonunun artışının ihtimalidir [1].

Tüm bu sunulanlar ve sayılan sebepler; mikrodalga ortamda yapılan deneysel çalışmalar ile mikrodalga ortam için yapılan modelleme çalışması arasındaki farkın neden %15'e yakın olduğunu ortaya koymaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, model ile deneysel çalışma arasındaki farklar belirlenirken, en büyük fark değeri dikkate alınmaktadır. Bu en büyük farkında genellikle ilk 15 s içinde olduğu görülmüştür. Bunun nedeni şu şekilde açıklanabilmektedir: Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim içerisindeki karıştırıcı sürekli dönmektedir. Karıştırıcı; ısınma işleminin yiyeceğin her bölgesinde homojen olmasında kullanılmaktadır. Karştırıcının performansı da, hücrelere ait sıcaklık-zaman eğrisinin karakterini etkilemektedir. Ayrıca, karıştırıcının her bir açısında elektrik alan şiddeti değişmektedir. Isıtmanın ilk saniyelerindeki, karıştırıcının dönme açılarında elektrik alan şiddeti daha düşük değerlerde kalabilir. Daha önce de belirtildiği gibi, modelleme çalışmasında yer alan elektrik alan şiddeti değeri, gıda yüzeyi için belirlenen ortalama bir değerdir. Analiz programı kullanmadan yapılan çalışmalarda, tablolardan gıda yüzeyi için okunan ortalama değerler kullanılmaktadır.

Ayrıca mikrodalganın gıdaya etki edip su moleküllerini titreştirmesi, onları harekete geçirmesi ilk saniyeden itibaren olmayıp, biraz geçiyor olabilir. Böyle bir durumda deneysel çalışma ile model arasındaki farkın ilk saniyelerde biraz daha fazla olmasına sebep olabilir.

Elektromanyetik dalgalar, ışık dalgalarıyla benzer özelliklere sahiptir. Kavite içindeki dalgalar aynı fazda ise üst üste geldikleri için birbirlerini kuvvetlendirirken, farklı fazlarda birbirlerini sönümlerler. Dolayısıyla, dalgaların bazı anlarda birbirlerini kuvvetlendirmesi yada sönümlemesi, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlarını etkileyebilecek bir durumdur.

Modelleme çalışmasında kütle transferi hesaplamasında sınır şartı için, yapılan kabulle, deneysel çalışmalardan elde edilen kütlesel akı değerinin kullanılması da model sonuçlarını etkilemektedir. Deneysel çalışmaların sonucu olarak belirlenen kütle kaybı değerinin, zamana bağlı değişimi için oluşturulan eğrinin, ilk

saniyelerdeki artışının gerçekten biraz daha uzak olması da model ile deneysel çalışma arasındaki farkı etkileyebilmektedir. Mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim içerisinde ısıtılan gıdanın her saniye için kütle kaybının belirlenmesi çok zor olacağından dolayı ilk saniyeler için uydurulan eğri gerçekten biraz uzak olabilir.

Gıdanın ısıtılması ile zamanla kimyasal ve fiziksel yapısındaki değişim de sıcaklık-zaman eğrilerin karakterini etkileyen başka bir nedendir. Daha önce de belirtildiği gibi, gıda ile çalışmanın zorlukları ve fiber optik probların ilk defa kullanılması yani yeni bir sistem olması da deneysel çalışmaları etkileyen bir durumdur.

6. SONUÇLAR

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, mikrodalga ısıtma özelliğine sahip ısıtılan hacim içerisindeki mikrodalga dağılımının, patates sıcaklık profiline etkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Ayrıca bu yüksek lisans tez çalışması, mikrodalga ortamda ısıl modelleme çalışması için başlangıç olup, bu konuda yapılan ilk çalışma olma özelliğine sahiptir.

Çalışmada, mikrodalga ısıtmanın temel prensipleri ile ilgili kitap bilgisi sunularak başlanılmakta ve mikrodalga ısıtmanın modellenmesine yönelik literatür araştırması ile gıdaların dielektrik özelliklerinin ayrıntılarını sunan çalışmalar verilmektedir.

Tez çalışmasının deneysel kısmında mikrodalga ortamda ısıtılan gıdanın, ısıtma süresince 50 s'lik, geçici rejim süresine ait sıcaklığının zamana göre değişim sonuçları farklı hücreler için verilmiştir. Mikrodalganın, ısıtılan hacim içerisindeki dağılımının etkisini görebilmek için 6 yüzeyin merkez hücreleri ile patates merkez hücresinin zamana bağlı sıcaklık değişimleri ayrıntılı olarak sunulmaktadır. Mikrodalga dağılımının etkisini daha da iyi görebilmek için üst yüzeye ait 2 hücre ve patates içindeki ara bir hücrenin de sıcaklık değerleri sunulmaktadır. Böylece 7 ana ve 3 yardımcı hücreye ait sonuçlar sunulup, yorumlanmaktadır.

Tez çalışmasının teorik kısmında VISUAL BASIC programı içerisinde ısı ve kütle transferi modellenerek, patatesin sıcaklık profili belirlenmektedir. Patatese ait özellikler her yeni sıcaklık ve nem içeriği değeri için değişmekte olup, bu değerlerle her bir hücre için ayrı ayrı önce kütle transferi sonra ısı transferi hesaplanmaktadır. Isı kaynak terimi olan; ısıya dönüşen kayıp mikrodalga gücü hesaplanıp, tüm hücrelerin dielektrik özelliklerine ve hücre merkezinin konumuna bağlı olarak hücrelere dağıtılmaktadır. Modelde kütle transferi sınır şartı deneysel çalışmalardan elde edilmekte olup, kavite içindeki farklı mikrodalga dağılımlarında patatesin farklı noktalarına ait, elde edilen sıcaklık değerleri için model sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmaktadır.

Yapılan yüksek lisans tez çalışması dâhilinde ulaşılan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

- 7 ana ve 3 yardımcı hücreye ait sıcaklığının zamana göre değişim sonuçları, mikrodalganın, düzgün geometriye sahip gıdanın 6 yüzeyine eşit şekilde etki etmediğini göstermektedir. Patates yüzey hücrelerine ait sıcaklıklarda en yüksek değerlere ulaşan sıcaklık-zaman eğrisi üst yüzey hücresine, en düşük değerlere ulaşan sıcaklık-zaman eğrisi ise alt yüzey hücresine aittir. Yüzeyler arasında bir sıralama yapmak gerekirse; üst yüzeyi sırasıyla ön yüzey, arka yüzey, sol yüzey, sağ yüzey ve alt yüzey izlemektedir. Alt yüzey merkez hücresine ait sıcaklık-zaman eğrisi, patates merkez hücresine ait sıcaklık-zaman eğrisinden daha düşük değerlere sahiptir.
- Deneysel çalışmalar, gıda yüzeylerinden merkeze doğru inildikçe sıcaklık değişimin azalması, ısıya dönüşen mikrodalga gücünün etkisinin penetrasyon derinliğine bağlı olarak azaldığını ortaya koymaktadır.
- Model içerisinde gıdaya ait özellikler için literatürden bulunan deneysel çalışmalardan oluşturulan korelasyonlar kullanılmaktadır.
- Bu tez çalışması, mikrodalga ortamda ısıl modelleme çalışması için başlangıç olup, kurulan modelde önemli kabuller yapılmıştır. Mikrodalga ortamda ısıl modelleme konusunda, bu tez çalışmasından sonra yapılacak çalışmalar için incelenecek ve detaylandırılacak pek çok nokta vardır.
- Mikrodalga ortamda, elektriksel alandan etkilenip ark oluşturarak sisteme zarar verdiğinden dolayı metal nem sensörü ile kavite içindeki havanın bağıl nem değeri belirlenememektedir. Bu yüzden, kabul yapılıp kütle transferi sınır şartı olarak deneysel çalışmalardan elde dilen kütlesel akı değeri kullanılmaktadır.
- Enerji korunumunda, buharlaşma ile enerji kaybının belirlenmesinde, kabul yapılıp deneysel çalışmalardan elde edilen birim zamanda birim hacimdeki kütle değeri kullanılmaktadır.
- Model 1, mikrodalga dağılımının her bir yüzeye eşit şekilde etki etmesi durumunu ortaya koymaktadır. Bu model de göstermektedir ki, mikrodalga gıdanın her yüzeyine farklı oranlarda etki etmektedir. Alt yüzey hücresi için

%46.2 olarak belirlenen model ile deneysel çalışma arasındaki fark, kabul edilemeyecek bir farktır.

- Model 2 için belirlenen dağılıma göre, üst yüzey hücresi için model ile deneysel çalışma arasındaki farkın %20'den fazla olduğu görülmektedir.
- Model 3 için belirlenen; üst yüzeyde %27, alt yüzeyde %1, sol yan yüzeyde %17, sağ yan yüzeyde %15, ön yüzeyde %21 ve arka yüzeyde %19 mikrodalga dağılımı en uygun dağılımdır. Bu dağılımla hiç bir hücre için model ile deneysel çalışma arasındaki farkın %15'i geçmediği görülmektedir.
- Model ile deneysel çalışma arasındaki farkın genellikle, en fazla ilk saniyeler içinde olduğu belirlenmektedir. Farklar yüksek sıcaklıklarda azalmaktadır. Bir hücre için model ile deneysel çalışma arasındaki fark belirtilirken en yüksek fark sunulmaktadır.
- Literatür çalışmalarında genellikle yer verilmeyen, yüzey ile merkez hücreleri dışındaki ara ve kenar hücreler de incelenerek, model ile deneysel çalışma arasındaki farklar belirlenmiştir. Bu hücrelerde farkın, yüzey merkez hücrelerine göre biraz daha fazla olduğu görülmektedir.
- Deneysel çalışma ile modelleme çalışmaları arasındaki fark literatürde karşılaşılan durumlara benzemektedir. Zhou ve diğerleri (1994) tarafından sunulan çalışmada model ile deneysel çalışma arasındaki sıcaklık farkının, gıda merkez hücresi için 8.1 °C yani %15.5 olduğu sonucuna varılmıştır. Datta ve diğerleri (2008) tarafından sunulan bir başka mikrodalga ortamda fiber optik problarla yapılan çalışmada da model ile deneysel çalışma arasındaki fark %6'ya yakındır. %6'lık bir fark az olarak kabul edilmiştir. Bunun nedeni, hacim içerisindeki mikrodalga dağılımının analiz programıyla tam ve net olarak belirlenip, bir yüzeyin her noktasında her an aynı mikrodalga etkisi olmaksızın modele yansıtılmasıdır.
- Literatür araştırmasında belirlenen bir başka durum ise, kurulan modellerde enerji korunumu denklemlerinde buharlaşma ile kaybolan enerjinin ihmal edilmesi yada kütle transferinin hesaplanmasında deneysel çalışmalardan alınan sonuçların kullanılmasıdır. Bu da, model ile deneysel çalışmalar arasındaki farkın yüksek çıkmasına neden olmaktadır. Açıklanan bu durum, bu tez çalışması için de geçerli olmaktadır.

- Deneysel çalışma ile modelleme çalışması arasında farkın fazla olmasının, literatürde de karşılaşıldığı gibi pek çok nedeni vardır. Bu nedenlerden birincisi; Maxwell Denklemlerinden türetilen elektromanyetik alan denklemlerinde, elektrik alan şiddetinin ortalama sabit bir değer olarak alınıp ısıya dönüşen mikrodalga gücüne ulaşılmasıdır. Analiz programlarıyla yapılan çalışmalarda elektrik alan şiddetinin karıştırıcının her açısında ve her bir açıda değişen fazlarda değiştiği görülmektedir. Elektrik alan şiddeti dağılımının ortalama sabit bir değer alınması doğru bir yaklaşımdır. Fakat analiz programıyla belirlenip, ısı transferi hesabına dahil edilmesi, literatürde de görüldüğü gibi, daha doğru sonuçlar verebilmektedir.
- Deneysel çalışma ile modelleme çalışması arasındaki bu farkın diğer nedeni ise, gıda ile çalışmanın zorluğudur. Çünkü ısıtma boyunca gıdada gerçekleşen reaksiyonlar sonucu gıdanın bileşimi ve yapısı değişmektedir. Bu durum gıdaya ait parametreleri etkilemekte ve ısıtma boyunca probların aynı noktada sabit bir şekilde kalmayıp, kaymasına ve belirlenen hücre merkezinde kalmamasına, yer değiştirmesine neden olmaktadır.

Bu çalışmanın devamı olarak aşağıdaki sunulan önerilerin yararlı olabileceği düşünülmektedir:

- ✓ Bu tez çalışması, mikrodalga ortamda ısıl modelleme çalışması için başlangıç olup, kurulan modelde önemli kabuller yapılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalar için, mikrodalga ortamda ısıl modelleme konusunda incelenecek önemli noktalar vardır.
- ✓ Mikrodalga ortamda, elektriksel alandan etkilenip ark oluşturarak sisteme zarar verdiğinden dolayı metal nem sensörü ile kavite içindeki havanın bağıl nem değeri belirlenememektedir. Bu yüzden, kütle transferi sınır şartı olarak deneysel çalışmalardan elde dilen kütlesel akı değeri kullanılmaktadır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, mikrodalga ortamda kullanılabilecek bir malzemeye sahip nem sensörü tedarik edilmesiyle, kavite içerisindeki bağıl nem değeri belirlenip, kütle transferi sınır şartı olarak taşınımla kütle geçişi kullanılabilir.
- ✓ Bu tez çalışması kapsamında, mikrodalga analiz programı kullanılmadan mikrodalga dağılımı yüzeyler için verilen basit oranlarla belirlenmeye

çalışılmıştır. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, mikrodalga dağılımı analiz programı ile belirlenip, ısı transferi hesabına dahil edilirse, deneysel çalışmalarla daha uyumlu bir model elde edilebilir. Çünkü, ısıtılan hacim içerisindeki mikrodalga dağılımı karıştırıcının her açısında ve her bir açıdaki faz değişiminde farklılaştığı için, analiz programı kullanmadan belirlenen dağılım çok basit bir yaklaşım olarak kalmaktadır.

- ✓ Bu tez çalışması kapsamında, gıda olarak gözenekli yapıya sahip patates kullanılmıştır. Patatesin gözenekli yapısının etkisi difüzyon kat sayısına için sunulup, kütle transferine etkisi görülmüştür. Fakat patatesin gözenek yapısının, patates içindeki mikrodalga penetrasyonuna olan etkisi incelenmemiştir. Gözenekliliğin dielektrik özelliklere olan etkisi bundan sonra yapılacak çalışmalarda incelenebilir.

KAYNAKLAR

[1] **Baysal T., İçier F. and Baysal A. H.** (2011). *Güncel Elektriksel Isıtma Yöntemleri* (1. Sürüm) (Sf. 6-11,128,132-133,143). Sidas Yayınevi, İzmir.

[2] **Konak, Ü. İ., Certel, M. and Helhel, S.** (2009). Gıda Sanayisinde Mikrodalga Uygulamaları. *Gıda Teknolojileri Dergisi*, 4, 20-31.

[3] **Pozar, D. M.** (2005). *Microwave Engineering* (3.Sürüm) (Sf. 70-155). J. Wiley, New York.

[4] **Schiffmann, R. F.** (1986). Food Product Development for Microwave Processing. *Journal of Food Technologies*, 40, 94-98.

[5] **George, R. M. and Burnett, S. A.** (1991). General Guidelines For Microwaveable Products. *Journal of Food Control*, 2, 35-44.

[6] **Datta A. K., Anantheswaran R. C.** (2001). *Handbook of Microwave Technology for Food Applications*. (4. Sürüm) (Sf. 83-95,116-141). Marcel Dekker, New York.

[7] **Biçer, H.** (2006). Dielektrik Isıtmanın FTDT Metoduyla Modellenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.

[8] **Metaxas A. C. and Meredith R. J.** (1993). *Industrial Microwave Heating* (3. Sürüm) (Sf.70-100). Peter Peregrinus, London.

[9] **Dincov D. D., Parrott, K. A. and Pericleous K. A.** (2004). Heat and Mass Transfer in Two-Phase Porous Materials under Intensive Microwave Heating. *Journal of Food Engineering*, 65, 403-412.

[10] **Zhou, L., Puri, V. M., Anantheswaran R. C. and Yeh, G.** (1994). Finite Element Modeling of Heat and Mass Transfer in Food Materials During Microwave Heating – Model Development and Validation. *Journal of Food Engineering*, 25, 509-529.

[11] **Sumnu, G., Seyhun, N., Ramaswamy H., Sahin S. and Ahmed, J.** (2009). Comparison and Modeling of Microwave Tempering and Infrared Assisted Microwave Tempering of Frozen Potato Puree. *Journal of Food Engineering*, 92, 339-344.

[12] **Pandit, R. B. and Prasad, S.** (2003). Finite Element Analysis of Microwave Heating of Potate – Transient Temperature Profiles. *Journal of Food Engineering*, 60, 193-202.

[13] **Datta, A. K., Geedipalli, S. and Rakesh, V.** (2008). Heat Transfer in a Combination Microwave – Jet Impingement Oven. *Journal of Food and Bioproducts Processing*, 86, 53-63.

[14] **Sumnu, G., Keskin, S. O. and Sahin, S.** (2004). Bread Baking in Halogen Lamp – Microwave Combination Oven. *Journal of Food Research International*, 37, 489-495.

[15] **Bircan, C.** (2006). Bazı Gıda Bileşenlerinin Dielektrik Özelliklerinin Farklı Frekans ve Sıcaklıklarda Belirlenmesi. *ADÜ Ziraat Fakültesi Dergisi*, 3, 5-9.

[16] **Komarov, V., Wang S. and Tang, J.** (2005). Permittivity and measurement. Chang (eds.). *The Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering*, John Wiley & Sons, New York, 4, 3693-3711

[17] **Sipahioglu, O. and Barringer, S. A.** (2003). Dielectric Properties of Vegetables and Fruits as a Function of Temperature, Ash and Moisture Content. *Journal of Food Science*, 68, 234-239.

[18] **Kadal, M.** (2011). Isıtılan Hacimlerde Saçınımı Azaltma ve Enerji Verimliliğini İyileştirme Çalışmaları, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] **Yıldız, A.** (2005). Patateslerin Kızartılması Sırasında Isı ve Kütle Transfer Parametrelerinin Belirlenmesi, (Yüksek Lisans Tezi), Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.

[20] **Neoptix (**Corporation**)** (2011). *The corporation* [DVD], Manual and User Guide, Kanada.

[21] **TS EN 60335-2-25,** (2001). Güvenlik Kuralları-Ev ve Benzeri Yerlerde Kullanılan Elektrikli Cihazlar İçin-Bölüm 2.25: Mikrodalga Fırınları İçin Özel Kurallar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[22] **TS EN 60705**, (2001). Mikrodalga Fırınlar-Ev ve Benzeri Yerlerde Kullanılan-Performans Ölçme Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

[23] **Genceli, O.F.** (2005). *Ölçme Tekniği*, (1. Sürüm) (Sf. 30-60), Birsen Yayınevi, İstanbul

[24] **Singh, R. P. and Heldman, D. R.** (2001). *Introduction to Food Engineering*. (3. Sürüm) (Sf.216-222, 597-604), Academic Press, London.

[25] **Geankoplis, C. J.** (2003). Transport Processes and Separation Process Principles. (4. Sürüm) (Sf. 992-995). Pearson Education, Inc., New Jersey.

[26] **Almeida, M. F.** (2009). Modeling Infrared and Combination Infrared-Microwave Heating of Foods in an Oven, (Doktora Tezi), The Faculty of the Graduate School of Cornell University, ABD.

[27] **Rao, M. A., Rizvi, S. S. H.** (2001). *Engineering Properties of Foods*. (1. Sürüm) (Sf.99-139, 169-223, 389-495). Dekker, ABD.

[28] **Chen, D. C. and Mujumdar, A. S.** (2008). *Drying Technologies in Food Processing*. (1. Sürüm) (Sf.32-33). Blackwell Pub., Oxford, UK.

[29] **Berk Z.** (2001). *Food Process Engineering and Technology*. (1. Sürüm) (Sf. 472). Macmillan, ABD.

[30] **Hui, Y. H., Calry C. and Farid, M. M.** (2008). *Food Drying Science and Technology : Microbiology, Chemistry, Applications*. (1. Sürüm) (Sf. 8-20). DEStech Publications, Lancaster.

[31] **Hassini, L., Azzouz, S. and Belghith, A.** (2004). Estimation of the Moisture Diffusion Coefficient of Potato During Hot-Air Drying, *Drying-Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*, Brazil, Vol B, pp. 1488-1495.

[32] **Kahveci, K. and Cihan A**. (2008). *Drying of Food Materials : Transport Phenomena*. (1. Sürüm) (Sf. 170-175). Nova Science Publishers, New York.

[33] **Url 1** <*http://www.pueschner.com/basics/eindringtiefe_en.php*> alındığı tarih: 20.01.2012

[34] **CST_MWS** Computer Simulation Technology (2003). CST of America, Inc. *The corporation* [DVD]. Los Angeles, ABD.

[35] **Çengel, Y. A. and Boles, M. A.** (1996). *Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik* (2. Sürüm) (Sf. 788-801) Çeviren; Derbentli, T., Literatür Yayıncılık, İstanbul.

[36] **Incropera, F. P. and DeWitt, D. P.** (2007). *Isı ve Kütle Geçişinin Temelleri* (5. Sürüm) (Sf. 48-65, 304-352, 371-471, 518-545, 688-718, 778-808, 850-880) Çevirenler; Derbentli, T., Genceli, O., Güngör, A.,Hepbaşlı, A., İlken, Z., Özbalta, N., Özgüç, F., Parmaksızoğlu, C., Uralcan, Y., Literatür Yayıncılık, İstanbul.

[37] **Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lightfoot, E. N**. (2002). *Transport Phenomena*. (2. Sürüm) (Sf. 676-699). J. Wiley, New York.

[38] **Tolay, M., Akar, B., İbicek, T. Şumnu, G., Şahin, S., Turabi, E.** (2005). ANN 714 Pişirmenin Modellenmesi Ön Çalışmaları Raporu, Arçelik A.Ş., İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Demet Büyükkoyuncu

Doğum Yeri ve Tarihi: Bursa- 05/04/1988

E-Posta: demetbuyukkoyuncu@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi / Makine Mühendisliği (2006-2010)