

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI
KONSTRÜKSİYON VE İMALAT BİLİM DALI**

**ELEKTROMANYETİK HİBRİT RETORT SİSTEMİ
TASARIMI VE İMALATI**

Handenur KARAOĞLU

**Danışman
Doç. Dr. Can ÇİVİ**

MANİSA-2025

**HANDENUR
KARAOĞLU**

**ELEKTROMANYETİK HİBRİT RETORT
SİSTEMİ TASARIMI VE İMALATI**

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

HANDENUR KARAOĞLU



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Elektromanyetik Hibrit Retort Sistemi Tasarımı ve İmalatı

Handenur KARAOĞLU

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Bölümü Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Can ÇİVİ

Günümüz dünyasında nüfus artışı ve yoğun iş temposu nedeniyle hazır gıdalara olan talep gitgide artış göstermektedir. Gıda ürünlerine herhangi bir işlem uygulanmadığı takdirde hızlı bir şekilde bozulmakta ve insan sağlığı açısından hassas olabilmektedir. Hazır paket gıdaların uzun raf ömrü sağlanması ve insan sağlığı açısından uzun vadede tüketilebilir olabilmesi için gerekli ısıl işlem den geçmeleri gerekmektedir. Gıdaların korunması amacıyla gerçekleştirilen ısıl işlemler retort teknolojisi ile gerçekleştirilmektedir. Günümüzde gıda endüstrisi alanında yaygın olarak kullanılan retort sistemleri genellikle katı yakıt gibi fosil kaynakların kullanıldığı yoğun enerji tüketen sistemlerdir. Retort sistemlerinin de yer aldığı gıda sektöründe üretim aşamaları esnasında yüksek oranda enerji tüketilmektedir. Bu nedenle retort sistemleri karbon emisyonu açısından önemli bir paya sahiptir.

Tez çalışmasında geleneksel olarak kullanılan buhar veya sıcak su ile çalışan basınçlı retort sistemlerinde aracı akışkan olan suyun elde edilmesinde kullanılan fosil yakıt tüketimine alternatif olarak elektrikle çalışan, retort sistemi tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında Comsol ve ANSYS/Maxwell programlarında eş zamanlı olarak yürütülen matematiksel model geliştirme çalışmaları ve analizleri gerçekleştirilmiştir. Sistem içerisinde ve ürün içerisinde meydana gelen manyetik alan dağılımı ve sıcaklık dağılımı değerleri incelenmiştir. Matematiksel modellerde sistem içerisinde kullanılacak frekans, amper değeri, bobin geometrisi ve sistem boyutları farklı değerlerde denenmiş ve optimum sistem değerleri alınmıştır. Frekans değerleri 10, 25, 100 kHz değerlerinde karşılaştırılmış ve optimum frekans değeri 25 kHz olarak belirlenmiştir. Bobin geometrisi hem dairesel hem de dikdörtgensel olarak analizlerde test edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Modelleme çalışmalarından elde edilen sonuçlar birbirine yakın elde edilmiştir. Sistemde ısıl işlemin gerçekleştirileceği ürünleri içeren konserveler 1, 3 ve 4 adet olarak tasarlanmış ve sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Dört adet konserve içeren tasarımda sıcaklık homojen bir şekilde dağılım göstermiş ve konserveler arasında ısı alışverişi gerçekleşmiş ve dengeli bir ısıtma sağlanmıştır. Sistem gövde malzemesi polimer FR4 için matematiksel modeller sonucunda farklı kalınlıklarda sisteme etkisi incelenmiş ve üretimi matematiksel model doğrulama çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Tez kapsamında elektrikle çalışma prensibine dayalı retort sistemi tasarımı tamamlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Sistem içerisinde yer alan konservelerin

ısıt ışılemi için ön deneme yapılmış ve hedef yüzey sıcaklığı olan 120  C sıcaklık değerine ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gıda endüstrisi, Retort, ısıt ışılem, İndüksiyon, Matematiksel model doğrulama, Bobin



ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Design and Manufacturing an Electromagnetic Hybrid Retort System

Handenur KARAOĞLU

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Doç. Dr. Can ÇİVİ

In today's world, due to population growth and bus work pace, the demand for ready to eat food is steadily increasing. In the absence of any preservation treatment, food deteriorates rapidly, posing significant risks to human health. Ready-to-eat products must undergo the necessary heat treatment to ensure a long shelf life and to be suitable for consumption in the long term from a human health perspective. Thermal treatments aimed at food preservation are carried out using retort technology. Today, retort systems, which are extensively employed in the food sector, are generally high energy consuming systems that utilize resources such as solid fuel and fossil fuel. During the production stages in the food industry, which also involve retort systems, a high amount of energy is consumed. Therefore, retort systems contribute significantly to carbon emissions.

In the study, an electrically operated retort system was designed and manufactured as an alternative to the fossil fuel consumption required for generating the working fluid steam or hot water in traditionally used pressurized retort systems. In the first stage of this research, mathematical model development studies and analyses were conducted simultaneously in Comsol and Ansys/Maxwell. The magnetic field distribution and temperature distribution within the system and the product were investigated. In mathematical model development studies, the frequency, ampere value, coil geometry and system dimensions to be used within the system were tested at different values and the optimum system values were obtained. The frequency values were compared at 10, 25 and 100 levels, and the optimal frequency was determined to be 25. The coil geometry has been tested and compared in both circular and rectangular analyses. The outcomes of the modeling research were found to be in close agreement. In the system, cans containing products to undergo thermal treatment were designed in quantities of 1, 3 and 4 and their temperature distributions were examined. In the design containing 4 cans, the temperature was distributed homogeneously, heat exchange occurred between the cans, and uniform heating was achieved. The effect of different thickness values on the system was examined as a result of mathematical modelling for polymer body material of FR4 and production was completed within the parameters of mathematical model development studies.

In the context of this thesis, the design of a retort system based on the principle of working with electric has been completed and production has been carried out. An

first experiment was carried out to thermal treatment of the canned within the system, and the target surface temperature of 120 ° C was achieved.

Keywords: Retort, Heat treatment, Induction, Mathematical model development studies, Coil



TEŞEKKÜR

Lisansüstü eğitim sürecimde bana her daim yol gösteren bilgisi ve tecrübesiyle yoluma ışık tutan hocam Doç. Dr. Can Çivi'ye teşekkür ederim.

Hayatımın her adımında ve anında yanımda olan aileme öncelikle bana hep yol gösteren ve destekleyen anneme, sevgili ablama ve babama, varlıkları ve destekleri için sevgili yeğenlerime minnettarım.

Ayrıca bu çalışma 129M099 numaralı Tübitak 1001 projesi ile desteklenmiştir.

Handenur KARAOĞLU
Manisa, 2025



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

LTLT	Düşük sıcaklık, uzun süre
HTST	Yüksek sıcaklık, kısa süre
UHT	Süper yüksek sıcaklık
R_L	Yük direnci
Z_L	İç direnç
I₁, I₂	Primer, sekonder akım
N₁, N₂	Primer, sekonder sarım sayısı
E	İndüklenen elektromotor kuvveti(volt)
ΦB	Manyetik akı (weber)
AC	Alternatif akım
I	Akım
R	İç direnç(Ω)
P	Güç(W)
E	Elektromotor kuvveti(V)
δ	Dalma derinliği
F	Frekans (Hz)
μ_r	Bağıl manyetik geçirgenlik
ρ	Öz direnç(Ω*m)
CMC	Karboksimetil selüloz
q''	Isı akısı
H*	Manyetik akı şiddeti eşleniği
E	Elektrik alan vektörü
ω	Frekans (rad/s)
σ	Elektriksel iletkenlik (S/m)

μ	Manyetik geçirgenlik
K_h	Histeresiz kaybı
K_e	Eddy akım kayıpları
K_e	Harmonik kaynaklı kayıp
H	Manyetize alan vektörü
B	Manyetik alan vektörü
E	Elektrik alan vektörü (V/m)
J	Serbest akım yoğunluğu (A/m ²)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
c_p	Özgül ısı kapasitesi(J/kg.K)
k	Isıl iletkenlik(W/m.K)
q	Isı akı vektörü (W/m ²)
u	Hız vektörü(m/s)
I	Birim matris
K	Viskoz stres tensörü
g	Yerçekimi ivmesi(m/s ²)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. İndüksiyon Isıtma Sistemi.....	7
Şekil 2. a) Trafo devresi b) İndüksiyonla ısıtma sistemi devresi	8
Şekil 3. Elektromanyetik indüksiyon ile ısıtmanın temel prensibi	10
Şekil 4. İndüksiyon ile Isıtma İşlemi	11
Şekil 5. a) DC akım b-c) AC akımı uygulanmış iş parçasında cilt etkisi gösterimi ..	12
Şekil 6. Farklı frekansta paslanmaz çelik silindirin yarıçapı boyunca girdap akımı yoğunluk dağılımı, deri etkisiyle oluşan akım ve güç yoğunluğu profilleri	13
Şekil 7. Frekans değerlerine bağlı deri derinliği ($f_1 < f_2 < f_3$).....	13
Şekil 8. Karbon çeliğinin elektromanyetik indüksiyon ile ısıtılması sırasında deri derinliğinde meydana gelen tipik değişimi	14
Şekil 9. Bir iletken manyetik alan dağılımı, (a) ve malzeme içerisinde akım yoğunluğu dağılımı(b).....	15
Şekil 10. Akımlar zıt yönlerde akarken oluşan yakınlık etkisiyle iletkenlerde meydana gelen manyetik alan dağılımı (a) ve akım yoğunluğu dağılımı(b)	15
Şekil 11. Akımlar aynı yönlerde akarken oluşan yakınlık etkisiyle iletkenlerde meydana gelen manyetik alan dağılımı (a) ve akım yoğunluğu dağılımı(b)	16
Şekil 12. Tek sarımlı bir bobine simetrik olarak yerleştirilmeyen iş parçasında meydana gelen yakınlık etkisi.....	17
Şekil 13. Mesafeye bağlı yakınlık etkisinin iletkenlerde oluşturduğu akım yoğunluğu dağılımı	17
Şekil 14. Dikdörtgen iletkende halka etkisi	18
Şekil 15. Silindirik iletkende halka etkisi	18
Şekil 16. a) bobin çevresinde iletken bir malzeme olmaması durumunda b) iletken malzeme olması durumunda c) bobin üzerinde akı yoğunlaştırıcı kullanılması halinde meydana gelecek akım dağılımları.....	19
Şekil 17. Standart otoklav işlemi	22
Şekil 18. Dikey retort	23
Şekil 19. Yatay retort	23
Şekil 20. Hidrostatik sterilizasyon sistemi	24
Şekil 21. Retort ısıtma işlemine ait temel sıcaklık eğrisi, 1; ısınma süresi, 2; bekletme/pişirme süresi, 3; soğuma süresi.....	25
Şekil 22. İmal edilecek retort sisteminin başlangıç gövde kurgusu tasarımı	31
Şekil 23. Analiz için oluşturulan ön model.....	38
Şekil 24. Alüminyum malzeme ön analiz sonuçları.....	39
Şekil 25. Çelik malzeme ön analiz sonuçları	39
Şekil 26. İndüksiyon işleminin uygulandığı silindirik kavitede sistem içerisinde oluşan (a) manyetik akı yoğunluğu değişimi(b) ısıtılan su dolu konserveler içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı (c) iso-sıcaklık kontörleri (d)	40
Şekil 27. Konservelerin hacimsel sıcaklık ortalama değişimleri	41
Şekil 28. 1 numaralı ürünün yüzey sıcaklığı ile hacimsel ortalama sıcaklık farkı.....	41

Şekil 29. Tek konserveli sistemde Cmsol yazılımında dikdörtgen bobinli(a); Ansys/Maxwell yazılımında dikdörtgen bobinli(b); Cmsol yazılımında dairesel bobinli(c).....	45
Şekil 30. Dört konserveli sistemde Cmsol yazılımında dikdörtgen bobinli(a); Ansys/Maxwell yazılımında dikdörtgen bobinli(b); Cmsol yazılımında dairesel bobinli(c).....	46
Şekil 31. Konserve Boyutları	47
Şekil 32. Tek konserveli sistemlerde dikdörtgen bobinli (a), dairesel bobinli (b), dört konserveli sistemlerde dikdörtgen bobinli(c), ve dairesel bobinli (d) sistemlerin ağ yapıları.....	48
Şekil 33. Tek konserveli, dikdörtgen bobinli sistemde 300 Amper indüksiyon gücünde 10, 25, 100 kHz sistem frekanslarında konserve yüzeylerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerleri	50
Şekil 34. 25 kHz, 3000 Amper akım ile çalıştırılan tek konserveli sistemde dairesel ve dikdörtgen bobin kullanımının ürün yüzeyindeki ortalama sıcaklık değişimine etkisi	51
Şekil 35. 3000 Amper ve 25 kHz sistemde tek konserveli dikdörtgen (a), dairesel (b) bobinli sistemlerin 20. saniyede sıcaklık profilleri	52
Şekil 36. 1200 Amper, 25 kHz frekans ile çalıştırılan dört konserveli sistemde dikdörtgen ve dairesel bobin kullanımının ürün yüzeyindeki ortalama sıcaklık değişimine etkisi	52
Şekil 37. 1200 Amper, 25 kHz frekans ile çalıştırılan dört konserveli dikdörtgen (a) ve dairesel (b) bobinli sistemlerin 30. Saniyede oluşan sıcaklık profilleri	53
Şekil 38. Keten ve FR4 materyalinin ürün sıcaklık dağılımına etkisi.....	53
Şekil 39. 3000 Amper, 25 kHz frekans ile çalıştırılan 2,3,4 mm kalınlığındaki FR4 materyalinin ürün ortalama sıcaklık değişimine etkisi.....	54
Şekil 40. Tek konserveli (a), üç konserveli (b), dört konserveli (c) sistemlerinin 5. Saniyedeki sıcaklık profilleri	55
Şekil 41. Konserve sayısına bağlı olarak oluşan sıcaklık dağılımı	55
Şekil 42. 3000 Amper, 25 kHz sisteminde geometrilerin sıcaklık dağılımına etkisi .	56
Şekil 43. 3000 Amper, 25 kHz sistemde 4 konserveli sistem geometrisinin sıcaklık dağılımına etkisi	56
Şekil 44. Sistem geometrisin asıl boyutu (a) 1.5 kat (b) 2 kat (c) 5 kat (d)	57
Şekil 45. Sistemin nihai geometrisi.....	58
Şekil 46. 1500 Amper tur, 25 kHz frekansta çalıştırılan sistemin sıcaklık profili	59
Şekil 47. 1500 amper tur, 25 kHz frekansta çalışılan sistemde akışkan gıdanın merkez noktasının zamana bağlı sıcaklık değişimi	59
Şekil 48. 1500 amper tur, 25 kHz frekansta çalışılan sistemde akışkan gıdanın zamana bağlı yüzey ortalama sıcaklık değişimi	59
Şekil 49. Dört konserveli 1200 Amper güç içeren sistemde 116 bin element içeren ağ yapısı ile Cmsol ve Ansys programlarından elde edilen ohmik kayıp faktörü değerleri.....	61
Şekil 50. Cmsol Multifizik yazılımı ile oluşturulan ürün tasarımı.....	61

Şekil 51. Tasarım çalışmasında kullanılan ABS polimeri (a), FR4 materyal ölçüleri (b), sistem iç görüntüsü (c)	62
Şekil 52. 1500 amper, 25 kHz frekansta çalışan tek konserveli sistemin 3D model geometrisi.....	63
Şekil 53. 1500 amper, 25 kHz frekansta çalışan tek konserveli sistemin maksimum, minimum ve merkez nokta sıcaklıkları	63
Şekil 54. 1500 amper, 25 kHz frekansta çalışan 3D modelde 70 (a), 140 (b) ve 210. (c) saniyede konserve sıcaklık dağılım profili	64
Şekil 55. Sistemin nihai tasarım çalışmasında kullanılan polimer gövdenin 3D tasarımı.....	64
Şekil 56. Cam elyaf takviyesinin çelik kalıp üzerine epoksi matris ile uygulanması	66
Şekil 57. PLC kontrollü ısıtma fırınında polimer gövdenin üretim süreci.....	66
Şekil 58. Kurlenme sonrası nihai ürün	66
Şekil 59. Polimer gövde ve konserve havuzunun program(a) ve gerçek (b) gösterimi	67
Şekil 60. Polimer gövde tasarımının manşon ve nipel bölümleri	68
Şekil 61. Elektromanyetik indüksiyon sisteminin modelleme ve üretilen nihai hali.	68
Şekil 62. Konserve kapatma makinesi	69
Şekil 63. Sistemin borulama ve pompa kısmı montajı (a) sistemin nihai hali (b)	70

TABLÖLAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 1. Isıtma sistemlerinin verimliliği.....	1
Tablo 2. Isıl İşlem Türleri	6
Tablo 3. Plackett Burman Deneme Deseni	30
Tablo 4. Model geometrisine ait boyut bilgileri.....	44
Tablo 5. Nihai sistem geometri ölçüleri.....	58
Tablo 6. 1200 ve 12000 Amper tur için Cmsol ve Ansys programları ile çözülen modellerde konserve yüzeyinde oluşan ortalama ohmik kayıp faktörü değerleri.....	60
Tablo 7. İndüksiyonla 120 ° C sıcaklıkta 4 dolu konservenin ısıtma ön deneme tablosu	70

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
GİRİŞ	1
1. Isıl İşlem.....	4
1.2 Isıl İşlem Çeşitleri	4
2.İndüksiyon ile Isıl İşlem.....	6
2.1 İndüksiyonla Isıtmada Temel Elektromanyetik Olaylar.....	7
2.2 Elektromanyetik İndüksiyon	9
2.2.1 Deri etkisi.....	12
2.2.2 Yakınlık etkisi.....	15
2.2.3 Yüzük Etkisi	18
2.2.4 Elektromanyetik Yuva Etkisi.....	19
3.Retort/Otoklav Sistemleri.....	20
4.Materyal ve Yöntem.....	27
4.1 Yöntem	28
5.Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları	32
5.1Matematiksel Model Çalışmalarının İndüksiyonla Isıtma Uygulaması Kapsamında Kurgulanması	32
5.2 Ansys Yazılımı Kullanarak Konserve Ürün Yüzey Akısının Belirlenmesi	33
5.3 Comsol Yazılımı ile İndüksiyonla Isıtma Uygulamasında Gerçekleşecek Konserve Yüzey Isı Akısı ve Ürün İçi Sıcaklık Değişiminin Belirlenmesi	34
6. Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar	38
7.Modelin Geliştirilmesi ve Parametrelerin Tanımlanması	43
7.1 Frekans Etkisi	49
7.2 Akım Etkisi.....	50
7.3 Bobin geometrisinin etkisi.....	51
7.4 FR4 Kalınlığının Etkisi	53
7.5 Konserve sayısının etkisi.....	54

7.6 Sistem Geometrisinin Boyut Etkisi	56
8.Comsol- Ansys/Maxwell Model Doğrulama Çalışmaları.....	60
9.Sistem Üretimi	64
10.SONUÇ VE ÖNERİLER	71
KAYNAKÇA.....	74
EKLER.....	78
Ek 1. Suyun malzeme özellikleri.....	78
Ek 2. 1010 çeliğinin malzeme özellikleri	78
Ek 3. Bakırın malzeme özellikleri	78
Ek 4. Hava özellikleri	79
Ek 5. FR4 özellikleri	79
Ek 6. Dikdörtgensel (a) ve dairesel (b) bobin geometrilerine sahip bobinlerin model ölçüleri.....	79
Ek 7. Dikdörtgensel ve dairesel bobin etkisinin 5 farklı matematiksel model ve ağ yapılarında araştırılması	80
Ek 8. Dairesel ve dikdörtgensel bobinlerin konserve ve konserve içerisinde 300. Saniyede oluşan sıcaklık profilleri	81
Ek 9. Konserve içerisinde bulunan saf suyun hacimsel ortalama sıcaklık değerleri	82
Ek 10. Sistem geometrisine bağlı FR4 materyallerinin karşılaştırılması	83
Ek 11. Dikey (a) yatay(b) pozisyonda konumlandırılan indüksiyon sisteminde konserve ve konserve içerisinde meydana gelen sıcaklık profili	83
Ek 12. İki farklı pozisyonda duran indüksiyon sisteminde, konserve içerisindeki saf suyun hacimsel sıcaklık ortalama değerlerinin karşılaştırılması	84
Ek 13. Dikey ve yatay pozisyonda konumlandırılmış indüksiyon sisteminde konserve yüzeyinin ortalama sıcaklık değişimi.....	84
Ek 14. Paslanmaz çelik konserve havuzu.....	85

GİRİŞ

Geçmişten günümüze kadar ısıtma, ateşin keşfedilmesinden beri kullanılmakta olup insanların yaşamlarında oldukça önemli bir alana sahiptir. Teknolojinin günden güne gelişmesi, yeni yakıt ve enerji kaynaklarının keşfedilmesiyle birlikte ısıtma sistemleri daha verimli hale gelmiştir. Elektriğin keşfedilmesinden sonra güç ve kontrol sistemlerindeki gelişmelerle ısıtma sistemlerinin verimliliği daha fazla artmıştır. Tablo 1’de indüksiyon, doğal gaz gibi farklı enerji kaynakları ve yakıt türleriyle çalışan ısıtma sistemlerinin verimliliği verilmiştir. Isıtma sistemlerinde kullanılan elektrik enerjisi ucuz, güvenilir, yüksek verimliliğe sahip ve temiz bir enerjidir. Sahip olduğu avantajlardan dolayı yaygın olarak endüstri de birçok alanda kullanılan elektrik enerjisi gıda endüstrisinde de yoğun enerji kullanımının gerçekleştirildiği sistemlere entegre edilmesi hedeflenmektedir(Furkan, 2019).

Tablo 1. Isıtma sistemlerinin verimliliği(Furkan, 2019)

Teknoloji	Verimlilik
İndüksiyon	%76
Konvansiyonel Elektrikli	%42
Doğal Gaz	%30

Günümüzde konserve ve hazır gıdalara olan talep insanların günlük tempolu yaşamlarından ve artan iş yüklerinden kaynaklı zamandan tasarruf sağlaması nedeniyle günden güne artmaktadır. Konserve ve paketlenmiş hazır gıdalar, otoklav/retort cihazı kullanılarak ısıtılarak üretilen başlıca ürünlerdir. Bu sistemlerde mikrobiyolojik olarak güvenli ürünler elde etmek için ısıtma yoluyla gıda koruma prosesi gerçekleştirilmektedir (Jimenez et al., 2024). Gıda endüstrisinde ürünlerin ısıtılmasına maruz kalması kullanılan hammaddelerin mikrobiyolojik olarak güvenliğini ve uzun ömürlü olmasını sağlar (Alekseev et al., 2020).

Gıda sektöründe yaygın kullanımı, fosil yakıt kullanımı ve yüksek enerji tüketimi sebebiyle retort sistemi yüksek karbon ayak izine sahiptir. Hazır yemeklere yönelik artan talep nedeniyle gıda endüstrisinin işleme düzeyi artmış ve bu da enerji kullanımında artışa sebep olmuştur. Tüm bunlar daha fazla karbon emisyonuna neden

olmaktadır(Muthu, 2019). Gıda üretim süreçlerinde ısıtma ve soğutma işlemleri sıklıkla uygulandığı için enerji yoğun olarak kullanılmaktadır. Gün geçtikçe enerjiye duyulan gereksinim artmaktadır ve sistemlerde kullanılan fosil yakıtların tükeniyor olmasından dolayı enerjinin verimli bir şekilde kullanılması gerekmektedir(Genç, 2017).

Gıda endüstrisi; gıda işleme, üretimi ve tüketimi prosesleri ile karbon emisyonlarının %20'sinden fazlasını oluşturmaktadır ve ilerleyen süreçlerde bu oranda artış beklenmektedir(Shabir vd., 2023). Oranlardaki bu yüksek değerlerin çoğu gıda işleme sırasında oluşmaktadır (Hannah Ritchie, 2019). Retort sistemleri de bunların içerisinde önemli bir pay oluşturmaktadır. Emisyonların temel kaynağı ise endüstride esas olarak büyük ölçüde fosil yakıtların kullanılmasıdır (Liu vd., 2023). Sanayileşmenin artmasıyla ve yoğun enerji kullanımı nedeniyle fosil yakıt tüketimini ve karbondioksit salınımını azaltmak amacıyla kabul edilen Paris İklim Anlaşması ile devletlere yükümlülük gelmiştir. Ülkemiz yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelme, karbondioksit salınımını ve fosil yakıtlara olan bağıllığı azaltma ve hedef olarak 2053 yılı için “sıfır emisyon” kararını bildirmiştir (Değirmen vd., 2023).

Günümüzde ısıtma işleminin gerçekleştirilebileceği pek çok ısıtma yöntemi bulunmaktadır. Bu yöntemlerden rahatlıkla bulunabilen, verimliliği yüksek ve ekonomik olanı elektrik enerjisidir. İndüksiyonla ısıtma rezistanlı, lazerli ve plazmalı ısıtma gibi elektrik enerjisiyle çalışan bir sistemdir. İndüksiyon yöntemi temeliyle sağlanan ısıtma, genellikle hacimsel ısıtma proseslerine ek olarak eddy akımlarına dayanan ve yüksek verimlilik ile çalışan bir uygulama türüdür. İndüksiyon sistemleri, kullanılan elektrik enerjisine rağmen, geleneksel dirençli ısıtma göre oldukça yüksek yaklaşık %80 oranında verimlilikle çalışmaktadır (Başaran vd., 2018). Son zamanlarda enerji verimliliğinin sağlanması için, karbon ayak izinin düşürülmesi ve otomasyona uygunluğun önem kazanmasıyla gıda sektörü de dahil olmak üzere birçok alanda geliştirilen uygulamaların önemli bir konusu haline gelmiştir. İlerleyen zamanlarda sürdürülebilirliği sağlamak amacıyla elektrik enerjisiyle çalışan sistemler önem kazanacaktır bu proje kapsamında bu husus temel alınarak elektromanyetik indüksiyon sistem tasarımı ve üretimi hedeflenmiştir.

Gıda endüstrisinde kullanılan sistem ve ekipmanların önemli bir kısmı yurt dışından temin edilmektedir. Sistemlerin bakım ve ek ekipmanlarının tedariği ile ilgili proseslerde dışa bağımlılık devam etmektedir. Aynı zamanda ülkemizde gıda endüstrisine yönelik bilgi birikimi eksikliği nedeniyle yerli olarak üretim yapılamamaktadır. Bu sebeple ülkemizde gıda endüstrisi alanında yerli üretim sağlayabilmek ve dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla yeni ve teknolojik sistemlerin tasarlanması gerekmektedir. Çalışma doğrultusunda dışa bağımlılığı azaltmak, karbon ayak izini düşürmek ve tamamen elektrik enerjisiyle çalışan gıda endüstrisinde yağın olarak kullanılan yeni bir retort sistemi tasarlanması ve üretilmesi hedeflenmiştir.

Bu çalışmada; gıda endüstrisinde kullanılan, fosil yakıt kullanımı nedeniyle sürdürülebilirliği olmayan ve yoğun enerji tüketen retort sistemlerinin sebep olduğu yüksek karbon emisyonunun azaltılması hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen çalışma kapsamında yakıt, doğal gaz ve fosil yakıtlar kullanan sistemlere alternatif olarak, elektrikle çalışan bir sistem tasarlanmıştır. Çalışmada sistem içerisinde ısıtma işlemi görecektir olan 4 adet konserve için manyetik ısıtma kullanan ve soğutma çevrimi içeren bir hibrit indüktif otoklav sistemi tasarlanmıştır. Sistem tamamen elektrik ile çalışan, elektrik enerjisini Eddy akımları ile yüksek oranda verimlilikle kullanabilen otomasyona uygun özgün bir sistemdir. Çalışma sonunda elektromanyetik indüksiyon ve soğutma çevrimi ile işlem prosesleri konserve ürünler üzerinden doğrudan gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmasının birinci basamağında, indüksiyon ile çalışan retort sisteminin içerisinde yerleştirilen 4 adet konservede oluşan sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi için öncelikle matematiksel model geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Matematiksel model geliştirme amacıyla Comsol V6.1(Comsol AB, Stockholm, İsveç) ve ANSYS/Maxwell Electronics 2019 R3 yazılımları eş zamanlı kullanılmış ve sonuçlar karşılıklı değerlendirilerek çalışmalar ilerlemiştir. Matematiksel modeller ile sistem teroik olarak kurgulanmıştır. Analizler ile sistemin enerji ihtiyacı ve gerekli etkiler dikkate alınarak ısıtma işlemi gerçekleştirmesi amacıyla bağlanacak olan yeterli güce sahip indüksiyon cihazı kullanılmıştır.

Çalışmanın ikinci basamağında teorik olarak gerçekleştirilen çalışmaların ardından sistemin üretimi gerçekleştirilmiştir. Sistemde konserveleme ön aşamada ısıtma denemeleri gerçekleştirilmiştir ve hedeflenen sıcaklık değerine ulaşılmıştır. Çalışmada elektromanyetik ısıtma ile verimli, çevreci ve sürdürülebilir bir sistem tasarımı ile endüstriye ve literatüre katkıda bulunulmuştur.

1. Isıl İşlem

Besinler bitkisel ya da hayvansal kaynaklardan üretilmektedirler. Besinlerin organik yapıları onları doğal şekilleri içerisinde kararsız hale getirmektedir bu sebeple gıda maddeleri herhangi bir işlem uygulanmadan bırakıldıkları zaman hızlı bir şekilde bozulmakta ve kısa bir süre içerisinde insanların tüketimi için zararlı bir hale gelebilmektedir(Soroka, 1995).Besinlerin raf ömürlerini uzatabilmek, sağlıklı ve güvenli gıda üretimi sağlayabilmek için gıda işlemede ısıtma, soğutma, kurutma, tuzlama, asitlendirme ve fermantasyon gibi çeşitli koruma yöntemleri bulunmaktadır(Üçüncü, 2007).

Termal işleme ısı kullanarak enzimleri ve mikroorganizmaları engelleyerek gıda güvenliğini sağlayan ve günümüzde uzun ömürlü gıdalara artan talep nedeniyle ilgi çeken bir tekniktir(Holdsworth & Simpson, 2016). Isıl işlem, ürünlerin güvenli, kimyasal içermeyen ve bozulmalarına sebebiyet veren mikroorganizmaları ısı etkisiyle engelleyerek uzun süre dayanıklılık sağlayan, raf ömrünü uzatan ve bu sebeplerle gıda endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bir termal işleme teknolojisidir(Jimenez vd., 2024)(Zhuk vd., 2021).

1.2 Isıl İşlem Çeşitleri

Pastörizasyon, sterilizasyon ve haşlama (blanching) teknikleri gıda muhafazasında kullanılan ısıtma türleri arasında öne çıkmaktadır. Bu yöntemlerin her biri gıdaların güvenliği ve kullanım ömürlerinin uzatılmasında farklı gıdalara uygulanır ve farklı bir amaç doğrultusunda kullanılır. Tablo 2’de üç farklı yöntemin uygulama teknikleri ve uygulandığı malzemeler verilmiştir (Maurya, 2025).

Pastörizasyon, gıdaları tüketimi uygun hale getirmek ve raf ömürlerini uzatmak amacıyla ilk olarak patojenik mikroorganizmaları hedef alan bir ısıl işlemdir. Pastörizasyon genellikle gıdaları 100° C'nin altında bir sıcaklıkta ısıtmayı içerir. Bu ısıl işlem ile spor oluşturmeyen bakteriler ortadan kaldırılırken gıdalar orijinal yapısının çoğunu korur. Düşük-Sıcaklık, Uzun-Süre (LTLT), Yüksek-Sıcaklık, Kısa-Süre (HTST) ve Süper-Yüksek Sıcaklık (UHT) gibi farklı pastörizasyon teknikleri mevcuttur (Maurya, 2025).

Haşlama, sebze, meyve ve kuruyemişlere dondurma, kurutma veya konserveleme öncesinde gerçekleştirilen bir ön işlem aşamasıdır. Haşlama, bozulmaya neden olan veya olabilecek enzimleri inaktif duruma getirir ve gıdaların rengini, dokusunu ve lezzetini korumak için gıdaların kısa bir süre kaynar suya daldırılmasını veya buhara maruz kalmasını sağlamaktadır (Maurya, 2025).

Sterilizasyon, soğutmaya ihtiyaç duymadan uzun süreli koruma gerektiren gıda ürünleri için 100° C'nin üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştirilen bir ısıl işlem sürecidir. Sterilizasyon, bakteri sporlarının da yer aldığı tüm mikroorganizmaları elimine eder ve bundan dolayı raf ömrü uzun konserve gıdalar gibi ürünler için vazgeçilmez bir süreç haline gelir. Sterilizasyonun en yaygın uygulamalarında bozulmayı önlemek amacıyla sterilitenin kesin gerekli olduğu otoklavlanabilir torbalar, konserve gıdalar ve tıbbi ürünler yer almaktadır. Retort/Otoklav işleminde aseptik işleme ve kuru ısı sterilizasyonu olmak üzere farklı sterilizasyon yöntemleri bulunmaktadır. Retort ile sterilizasyon kullanımı oldukça yaygın bir yöntemdir ve basınçlı buhar odalarına yerleştirilen paketlenmiş gıdalarda (konserve çorbalar, etler ve sebzeler) mikropların tamamen yok edilmesini sağlar. Bu sterilizasyon yöntemi tüm zararlı bakterileri ve sporları öldürmek için gıdaları genellikle 121° C sıcaklığında 15-30 dakika süre içerisinde ısıl işlem uygulanmasını sağlamaktadır (Maurya, 2025).

Pastörizasyon ve sterilizasyon gibi gıdalara uygulanan ısıl işlemler gıdaların korunması amacıyla gerçekleştirilen işlemlerdir. Geleneksel ısıtma yöntemlerinde ürünün hedeflenen sıcaklığa gelmesini sağlayan enerji genellikle taşınım ve iletim yoluyla sağlanmaktadır. Bu yöntemlerde kullanılan ekipmanlarda meydana gelen ısı kayıpları ile ürünün merkezinde istenilen sıcaklığın sağlanması için geçen sürede üründe oluşabilecek zarar ve ısı transfer verimliliğinin düşük olması gibi istenmeyen

durumlar meydana gelebilmektedir. Tüketicilerin gün geçtikçe konserve ve hazır gıdalara aynı zamanda bu gıdalarda kalitenin sağlanmasına yönelik taleplerinde meydana gelen artışla birlikte gıdaların işlenmesinde yeni teknolojiler geliştirilmektedir. Geleneksel ısıtma yöntemlerine kıyasla kızılötesi, ohmik ve indüksiyonla ısıtma enerji tüketimini daha verimli bir şekilde gerçekleştirir (Kaya & İçier, 2019).

Tablo 2. Isıl İşlem Türleri(Maurya, 2025)

		Sıcaklık(°C)	Süre	Yaygın Uygulamalar
Pastörizasyon Türleri	LTLT	63 °C	30 dakika	Süt ve süt ürünleri
	HTST	72 °C	15 saniye	Et suyu, sıvı yumurta
	UHT	135 °C	2-5 saniye	Uzun raf ömrüne sahip süt, krema
Sterilizasyon Türleri	Geleneksel Sterilizasyon	110-130°C	10-60 dakika	Konserve sebze ve etler
	Retort Sterilizasyon	115-121°C	15-40 dakika	Otoklavlanabilir poşet gıdaları
	Aseptik İşleme	135-150°C	2-6 saniye	Uzun raf ömrüne sahip içecekler
Haşlama Türleri	Su ile Haşlama	80-100°C	1-5 dakika	Yapraklı sebzeler ve havuçlar
	Buharla Haşlama	85-100°C	2- 5 dakika	Bezelye, brokoli, fasulye
	Mikrodalga ile Haşlama	100°C	1- 3 dakika	Sebzeler

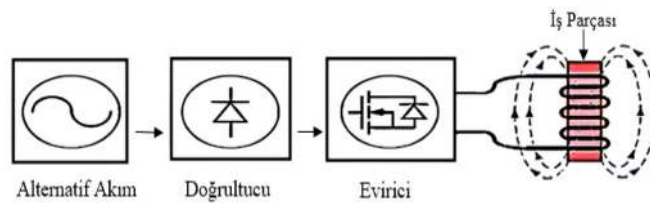
2.İndüksiyon ile Isıl İşlem

İndüksiyon, elektrik ve manyetik alanların etkileşimiyle oluşan elektrik akımına denilmektedir ve aynı zamanda elektromanyetik indüksiyon olarak da adlandırılmaktadır. Elektromanyetik indüksiyonla metalik malzemelerin ısıtılmasının temeli 1831 yılında Michael Faraday tarafından keşfedilmiştir. Faraday’ın indüksiyon yasasına göre, bir devrede indüklenen elektromotor kuvvet(emk), devreden geçen manyetik akının zaman içerisindeki değişim hızına doğru orantılıdır. Yasa manyetik alanın zaman içerisinde bir elektrik alanı oluşturduğunu ve oluşan alanın da iletken

elektrik akımı oluşturabileceğini belirtmektedir(Orgun, 2024)(Rudnev, 2017)(Özden, 2020). Bir süre sonra H.Lenz, indüklenen akımın her zaman manyetik akı değişimini engelleyen bir yöne sahip olduğunu göstermiştir bu eklentiyle birlikte elektromanyetik indüksiyon formülü, elektromanyetizmanın temel yapılarından biri olmuştur. James Joule elektrik devresinde oluşan ısıyı incelerken elektriksel ısıtmayı içeren Joule yasasını ortaya koymuştur (Mühlbauer, 2008). İlerleyen zamanda denklemler Maxwell tarafından formüle edilmiştir ve elektromanyetik alan denklemleri ile elektromanyetik dalgaların yayılma sistemleri ortaya konulmuştur. Nikola Tesla'nın alternatif akımı bugün kullanılan haliyle üretmeye başlamasıyla indüksiyon ile ısıtmanın temel yapısı oluşturulmuştur(Akkurt, 2024). İndüksiyonla ısıtma malzemelerin fiziksel özelliklerinin manyetik alan yoğunluğu, sıcaklık ve mikroyapıya bağlı olmasından dolayı birbiriyle ilişkili ve elektromanyetik, ısı transferi ve devre analizinin etkileşimini içeren fiziksel bir olgudur(Rudnev, 2017).

2.1 İndüksiyonla Isıtmada Temel Elektromanyetik Olaylar

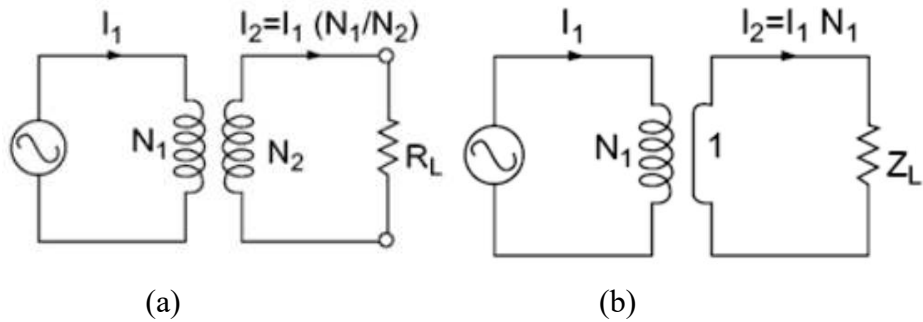
İndüksiyon ile ısıtma belirli sıcaklık ve sürelerde ısıtma işleminin gerçekleştirildiği ferromanyetik malzemelerin içerisinde oluşan elektrik akımlarına dayanan ürün ve ısıtıcı arasında temas olmadan gerçekleştirilen bir işlemdir. İndüksiyon sistemlerinde alternatif akımı sağlayan güç kaynağı, ısıtılacak olan iş parçası ve indüksiyon bobini temel bileşenlerdir(Kaya & İçier, 2019)(Çivi vd., 2019). Şekil 1'de indüksiyon ısıtma sistemi şematik olarak gösterilmiştir. Sistemde öncelikle alternatif gerilim doğrultulmaktadır ardından doğrultma işlemi sonrasında oluşan DC gerilimindeki dalgaların azaltılması amacıyla alçak geçiren filtre kullanılır böylelikle daha sabit bir doğru akım gerilimi elde edilir. Doğrultucu ile sağlanan doğru gerilim evirici bir devreyle yüksek frekanslı bir AC gerilimine dönüşmektedir. Sonrasında alternatif akım indüksiyon bobininden geçerek bir manyetik alan oluşumu sağlar ve ısıtma işlemi gerçekleştirilir(Özden, 2020)(İnanç, 2025)(Helimergin, 2025)(Altıntaş, 2016).



Şekil 1. İndüksiyon Isıtma Sistemi (İnanç, 2025)

İndüksiyonla ısıtma sistemi ve transformatör ya da kısa adıyla trafonun çalışma prensibi birbiriyle benzerlik göstermektedir. Trafolar iki veya daha fazla elektrik devresi arasındaki elektrik enerjisini elektromanyetik indüksiyonla birbirine bağlayan sistemlerdir. Trafo eş değer devresi Şekil 2.a'da gösterildiği üzere nüve ve nüve üzerine sarılmış iki adet primer ve sekonder sargıdan(N_1 - N_2) oluşmaktadır (Servet, 2010)(Çelik, 2005)(Özden, 2020)(Kurniati vd., 2019). Trafolar elektromanyetik indüksiyon prensibiyle çalışmaktadır. Bir bobinden geçen akım ile oluşan manyetik alan diğer bobin üzerinde gerilim indükler. Trafolarda güç kayıplarını önlemek için akım düşürülüp gerilim yükseltilir.

Şekil 2.b'de indüksiyonla ısıtma sisteminin eşdeğer devresi verilmiştir. Bu sistemde nüve bulunmamaktadır ve tek bobinden oluşmaktadır. İndüksiyon sisteminde sekonder sargının işlevini bobin içerisinde yer alan iş parçası tek turlu bir sekonder sargı görevi görerek işlevini yerine getirmektedir. İndüksiyon sisteminde primer kısım bobin, sekonder kısmı ise ısıtılacak olan iş parçası olarak düşünülebilir. Transformatör eşdeğer devresindeki yük direncinin yerini ürün sekonder sargının öz direncinden kaynaklanan iç direnci alacaktır. Bobinin sekonder kısmında tek tur sarım sayısı ile kısa devre yapılmasıyla, sekonder devrede oluşan yüksek akım ile ısı açığa çıkmaktadır (Servet, 2010)(Çelik,Ö, 2005)(Özden, 2020)(Kurniati et al., 2019)(Çetin, 2005).



Şekil 2. a) Trafo devresi b) İndüksiyonla ısıtma sistemi devresi(Servet, 2010)

Trafo devresindeki R_L yük direnci, ısıtılacak olan malzemenin sekonder sargının kendi malzeme direncinden oluşan iç direnci Z_L değerinin yerini alacaktır. I_1 primer akım, I_2 , sekonder akım, N_1 , primer sarım sayısı ve N_2 sekonder sarım sayısına karşılık gelmektedir. Trafo ideal olarak düşünüldüğünde Şekil 1.a'da da gösterildiği

üzere sarım sayısı- akım arasındaki bağlantı denklem 1’de verilmiştir. İndüksiyon eşdeğer devresin iş parçası sekonder sargı gibi davrandığı ve sistemde kısa devre meydana geldiği için primer akım ve sarım sayısı ile ilişkilendirilir (Denklem 2)(Çetin, 2005).

$$I_2=I_1 (N_1/N_2) \quad (1)$$

$$I_2=I_1 N_1 \quad (2)$$

İndüksiyonla ısıtma devresinde transformatöre göre sekonderde akım yükselir ve kaynaktan çekilen güç tamamen iş parçasına aktarılmaktadır. Malzemeye aktarılan güç ısı kaybını meydana getirmektedir. İndüksiyon sistemlerinde meydana gelen ısı kayıplarıyla iş parçasında ısıtma işlemi uygulanmaktadır(Çetin, 2005). İndüksiyonda ısıtma işlemi gerçekleştirilirken sekonderde en yüksek ısı enerjisi üretmek amaçlandığı için geçirgenliği yüksek, direnci düşük yük seçilir (Özden, 2020).

2.2 Elektromanyetik İndüksiyon

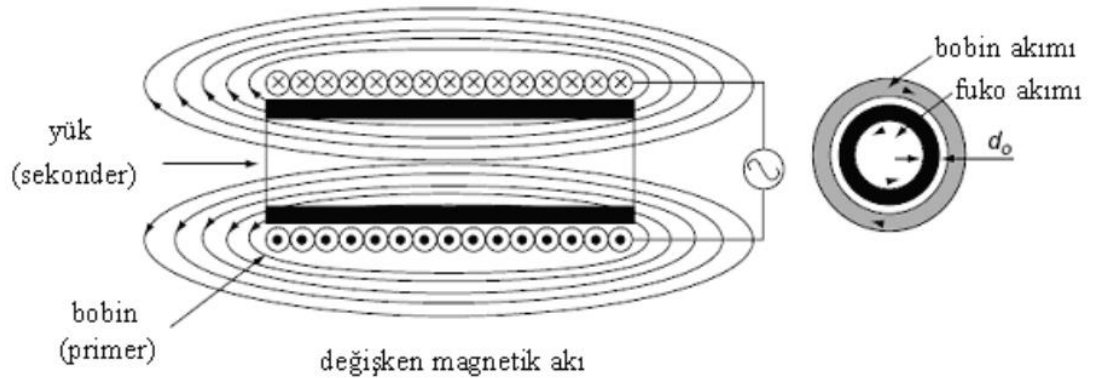
Elektromanyetik indüksiyon ile iki farklı şekilde gerilim iş parçasına indüklenebilir. İndüksiyon ısıtıcısının sabit olduğu ilk durumda üzerine uygulanan akımla bobin üzerinde Amper yasasına göre meydana gelen manyetik alandan geçen hareketli iletkenin ikinci durumda ise oluşan manyetik alan sabit iş parçasında Faraday Kanununa göre gerilim indüklenmesi oluşmasına sebebiyet verir ve Denklem 3 ile hesaplanmaktadır(Çelik.Ö, 2005)(Kelesoglu A., 2016).

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (3)$$

ε indüklenen elektromotor kuvveti (volt), Φ_B manyetik akı (weber), N bobindeki sarım sayısı, $\frac{d\Phi_B}{dt}$ manyetik akının zamana göre değişim hızını göstermektedir. Formül içerisinde yer alan ‘-’ işareti ise indüklenen akımın değişime karşı koyacağı yönde oluşan Lenz yasasını temsil etmektedir(Reisoğlu, 2017).

İndüklenen gerilimler sistem içerisinde yer alan iş parçasının içerisinde Şekil 3’te gösterildiği üzere girdap veya fuko akımının meydana gelmesini sağlamaktadır.

Sekonder ve primer tarafların ısı kayıpları toplamı sistemden kaynaklanan enerjiye eşittir (Çelik.Ö, 2005)(Kelesoglu A., 2016).

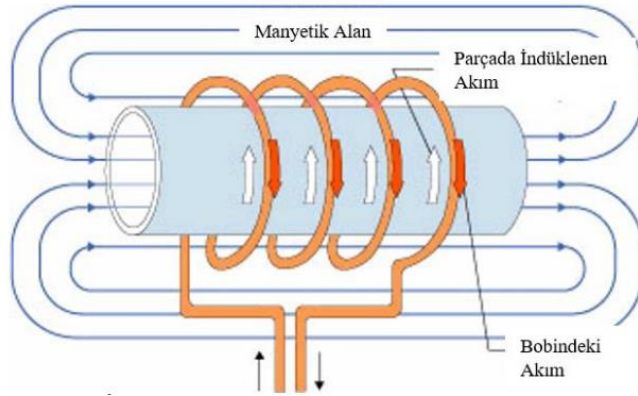


Şekil 3. Elektromanyetik indüksiyon ile ısıtmanın temel prensibi (Servet, 2010)

İndüksiyon bobinine uygulanan alternatif gerilim, bobin devresinde alternatif akım (AC) akışına neden olur. Bobin üzerinden geçen alternatif akım, zamanla değişen ve bobin akımıyla eş frekansta olan bir manyetik alan oluşturur. İş parçasının ısınmasına sebep olacak olan kısa devre akımları değişken manyetik alan içerisinde olduğu için manyetik alanın değişken olması gerekliliği oluşmaktadır. Oluşan manyetik alan ile bobinin içerisinde yer alan parçanın içerisinde bir gerilim indüklenir. Gerilimler sistem içerisinde yer alan ısıtılacak olan iş parçasının içerisinde bobin akımına ters yönde eddy(girdap) akımları oluşur. Şekil 4'te de yer aldığı üzere iş parçasının girdap akımlarına karşı gösterdiği direnç ile ısınma gerçekleşir(Rudnev, 2017)(Aydın E., 2022)(Alınca, 2012)(Reisoğlu, 2017). İndüklenen akımların yönü bobin akımının yönünün tersi olmasına rağmen bobin akımıyla aynı frekansa sahiptirler. Girdap akımlarının iş parçasının iç direncinde meydana getirdiği Joule etkisi(I^2R) ile ısı üretmektedirler (Denklem 4). Denklem İş parçasında indüklenen akım(A) I; iş parçasının iç direnci (Ω) R; iş parçası üzerinde indüklenen güç(W) P ve E elektro motor kuvveti(V) çarpanlarından oluşmaktadır (Rudnev, 2017)(Alınca, 2012).

$$P= E^2/R = I^2 R \quad (4)$$

İndüksiyonla ısıtma Joule ısıtması ve manyetik histerezis olmak üzere iki tekniğe bağlıdır. Histeresiz veya histerezis kayıpları manyetik alan altındaki moleküllerin yön değiştirmesi ve sürtünmesiyle oluşan bir ısı enerjisidir. Joule ısınması girdap akımlarının tam bir çevrim meydana getirme isteğiyle malzemede oluşan öz direnç ile oluşan ısınmadır. Histerezis ile meydana gelen ısı Joule ısıtmasının oluşturduğu etkiye kıyasla oldukça az olduğu için genel olarak ihmal edilmektedir(Kaya & İçier, 2019)(Çivi vd., 2019). Histerezis ferromanyetik maddelerin mıknatıs özelliğini yitirip paramanyetik hale geldiği sıcaklık olan Curie sıcaklığının altında yer alan manyetik malzemelerde görülür çünkü bu sıcaklığın üzerine çıkıldığında malzeme manyetik özelliğini kaybedecek ve kayıplar olmayacaktır (Akkurt, 2024)(Çivi vd., 2019). Elektromanyetik indüksiyon sisteminde malzemenin sıcaklığında artış olduğunda öz direncinde de bir artış oluşmakta ve manyetik bağıl geçirgenliğinde bir azalma meydana gelmektedir. Curie sıcaklığının üzerinde malzemenin manyetik bağıl geçirgenliği de hızla düşer ve yalnızca havanın manyetik geçirgenliğine denk olur (Aydın E., 2022).



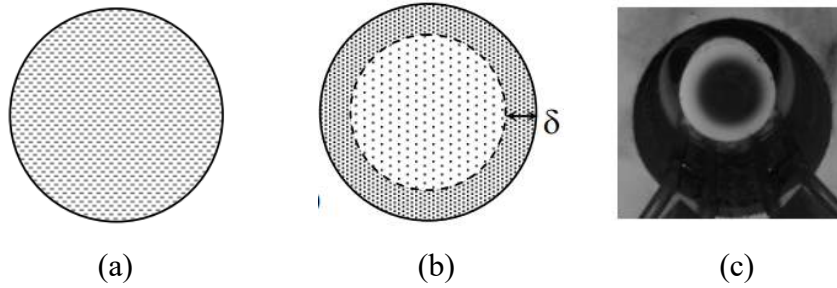
Şekil 4. İndüksiyon ile Isıtma İşlemi(Kaya & İçier, 2019)

Çeşitli elektromanyetik olaylardan dolayı indüktör ve iş parçası içerisindeki akım dağılımı düzgün değildir. Isı kaynağında oluşan düzensizlik iş parçasında sıcaklık gradyanlarına neden olmaktadır. Düzgün olmayan akım dağılımına neden olan çeşitli elektromanyetik olaylara;

1. Deri etkisi
2. Yakınlık etkisi
3. Yüzük etkisi
4. Slot etkisi örnek verilebilir (Rudnev, 2017)

2.2.1 Deri etkisi

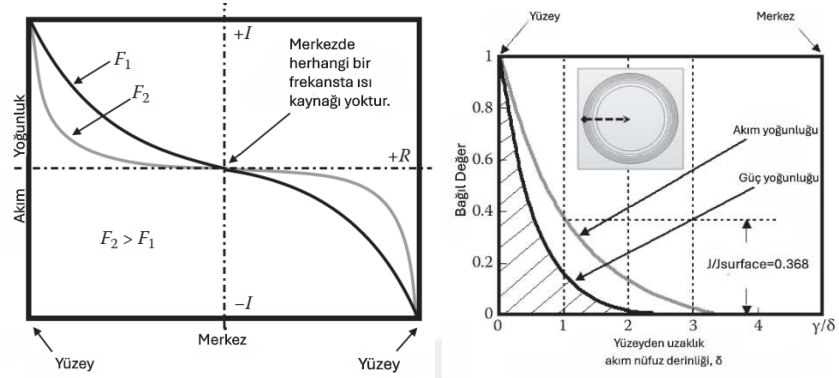
Doğru akım bir iş parçasının üzerinden geçtiğinde kesit üzerindeki akım dağılımı eşit olmaktadır. Ancak iş parçasına alternatif akım uygulandığında akım dağılımı eşit olmamaktadır ve büyük ölçüde frekansa bağlıdır. İletkenin merkezinde, iletken içerisindeki akımın frekansının artmasıyla daha yüksek direnç ve manyetik alan oluşmaktadır. Bu sebeple akım iş parçasının daha düşük dirence sahip dış yüzeyinden akma eğilimi göstermektedir. Merkezdeki reaktans frekans artışıyla birlikte artar ve iletkenin dış yüzeyinde bulunan akım reaktansın yüksek olmasına bağlı olarak yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaşır. Akım yoğunluğunun maksimum değeri her zaman numunenin yüzeyinde bulunur ve yüzeyden merkeze gidildikçe azalmaktadır. İletkenden alternatif akım geçirildiğinde kesit içerisindeki düzgün olmayan akım dağılımına deri etkisi denilmektedir. Deri etkisi indüksiyon bobini içerisinde bulunan iş parçalarında görülmektedir. İndüksiyonla ısıtmada iş parçası içerisinde belirli bir frekansta girdap akımları üretilmektedir. Alternatif akım ile oluşan deri etkisi sebebiyle girdap akımı dağılımı homojen olmayacaktır (Şekil 5)(Rudnev, 2017) (Okman, 2005)(Tezcan, 2019).



Şekil 5. a) DC akım b-c) AC akımı uygulanmış iş parçasında cilt etkisi gösterimi (Rudnev, 2017)(Okman, 2005)

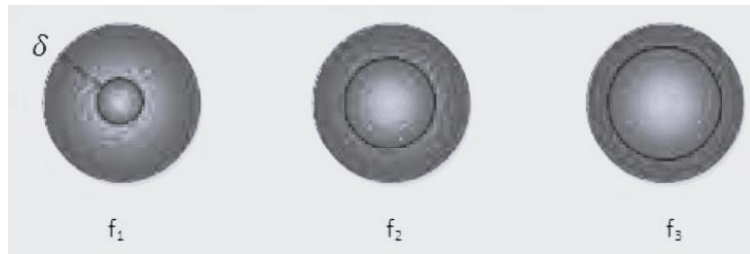
İletkenin direnci frekansın artmasıyla doğru orantılı olarak artacaktır. Frekansta meydana gelen artış merkez noktasındaki endüktansı da arttıracığından iş parçasının yüzeyinden merkezine doğru akım yoğunluğu üstel olarak azalacaktır. Şekil 6’da iki farklı frekans ile (F_1 - F_2) manyetik olmayan katı silindirin yarıçapı boyunca akım yoğunluğunun dağılımının karşılaştırması verilmiştir ve deri etkisi nedeniyle üretilen toplam gücün yaklaşık olarak %86’sı belirli bir derinlikte yoğunlaşmaktadır. Akımın ise %63’ü yüzeyde yoğunlaşmaktadır. Bu derinlik “dalma derinliği (akım

pentasyon) δ'' olarak adlandırılmaktadır(Rudnev, 2017) (Ahmet & Murat, 2015)(Yıldız, 2019). İş parçası yüzeyinden merkezine doğru gidildikçe akım yoğunluğundaki azalma, yüzeydeki değerin $1/e'$ sine denk geldiği dalma derinliği olarak kabul edilmektedir (Reisoğlu, 2017).



Şekil 6. Farklı frekansta paslanmaz çelik silindirin yarıçapı boyunca girdap akımı yoğunluk dağılımı, deri etkisiyle oluşan akım ve güç yoğunluğu profilleri(Rudnev, 2017)

Frekansın artmasıyla iletkenin üzerinden geçen akım iletkenin kenarlarında birikir ve merkezden geçen akımının önemli bir oranda akmadığı görülmektedir. Düşük frekanslarda ısıtma işlemi gerçekleştirildiğinde dalma derinliği ve alan genişliği daha fazla olmaktadır Yüksek frekans uygulandığında dalma derinliği sığ olur ve ısıtma dar yüzeylerde gerçekleşmektedir. Şekil 7’de akım yoğunluğunun fazla olduğu bölgeler belirtilmiş ve frekans arttıkça “dalma derinliğinin δ ” kayda değer bir biçimde azaldığı gösterilmiştir(Özden, 2020)(Tezcan, 2019).

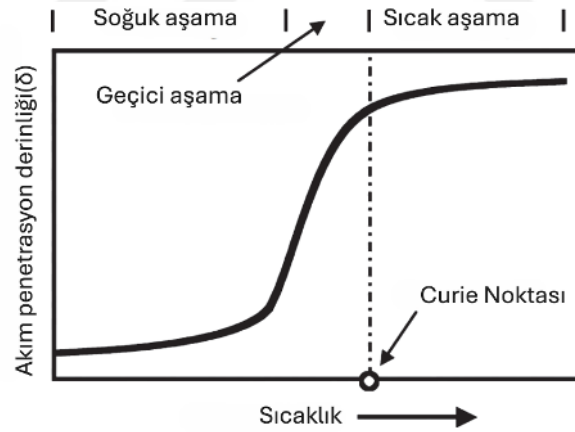


Şekil 7. Frekans değerlerine bağlı deri derinliği ($f_1 < f_2 < f_3$) (Tezcan, 2019)

Deri etkisinin derecesi iletken malzeme özelliklerine (ρ ve μ_r), frekansa ve iş parçasının geometrisine bağlıdır. Frekans (Hz) F , elektriksel iletken malzemenin öz direnci ($\Omega \cdot m$) ρ , bağıl manyetik geçirgenlik μ_r (m) ve Eddy akımları ile iş parçasında üretilen penetrasyon derinliği (m) δ denklem 5'e göre hesaplanmaktadır (Rudnev, 2017)

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r F}} \quad (5)$$

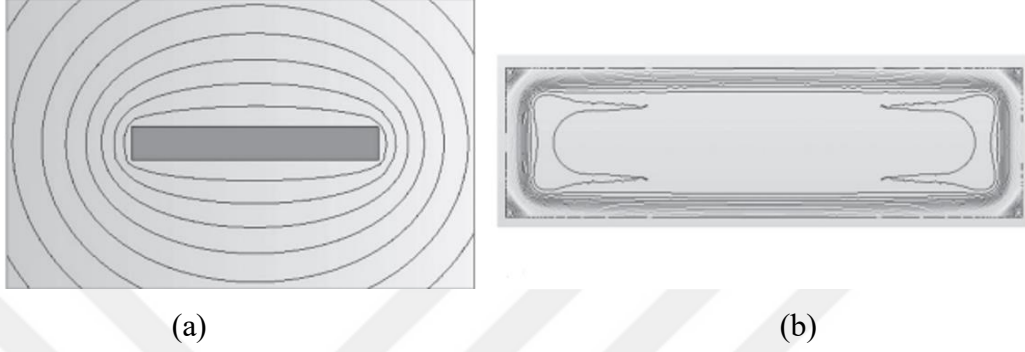
δ sıcaklığa bağlıdır ve indüksiyonla ısıtma uygulamalarında derinlik büyük ölçüde değişmektedir. Isıtmanın başlangıç aşamalarında direncin artmasıyla ve bağıl geçirgenliğin azalması nedeniyle karbon çeliğine nüfuz eden akım penetrasyon derinliği artmaktadır. Curie noktasına ulaşıldığında karbon çeliği manyetikliğini yitirdiği için bağıl manyetik geçirgenlik aniden bire düşer ve bu durumda derinlikte ani sıçramaya neden olmaktadır. Curie sıcaklığının üzerinde ısıtılmasıyla elektrik direncinde artış meydana gelecek ve bu nedenle deri derinliği hafifçe artış göstermeye devam edecektir. Sıcaklığın artmasıyla meydana gelen değişiklik Şekil 8'de yer almaktadır (Rudnev, 2017)(Okman, 2005).



Şekil 8. Karbon çeliğinin elektromanyetik indüksiyon ile ısıtılması sırasında deri derinliğinde meydana gelen tipik değişimi (Rudnev, 2017)

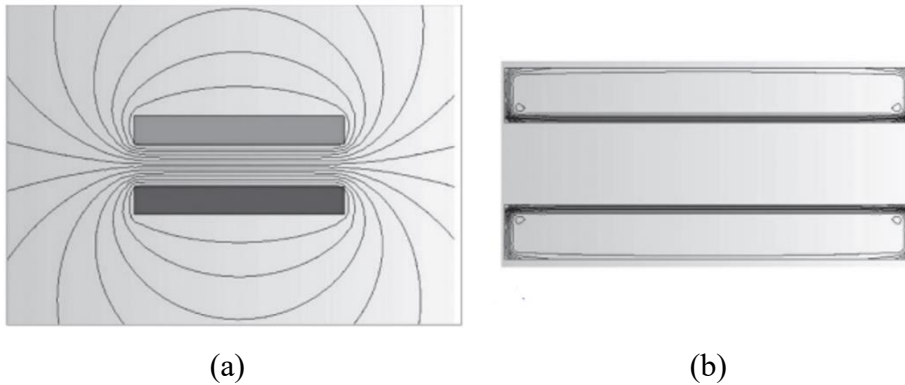
2.2.2 Yakınlık etkisi

İletkenlerin kendi manyetik alanları bulunmaktadır ve bu alanlar yakınlarında bulunan alanlar ile etkileşime girerek güç yoğunluğu dağılımını ve akım akışını etkilemektedir. Şekil 9’da tek bir iletkende malzeme içerisindeki akım yoğunluğu dağılımı ve manyetik alan dağılımı verilmiştir. Bu iletken iş parçasında deri etkisi belirgin bir şekilde Şekil 9b’de görülmektedir (Rudnev, 2017)



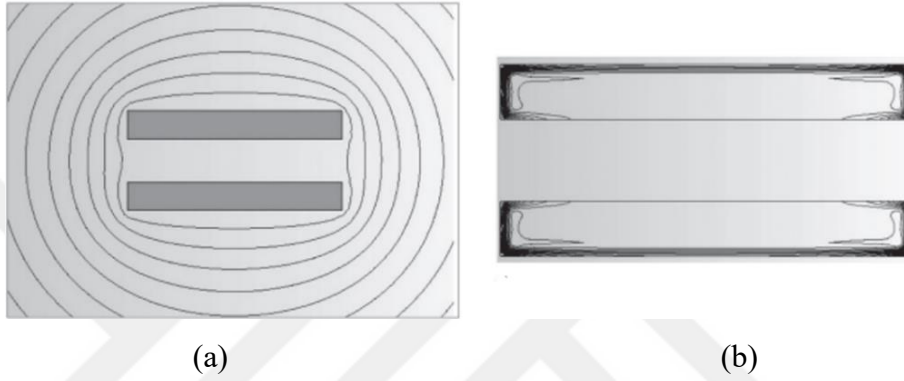
Şekil 9. Bir iletkende manyetik alan dağılımı, (a) ve malzeme içerisinde akım yoğunluğu dağılımı(b) (Rudnev, 2017)

Bir iletkenin yakınına akım taşıyan bir başka iletken yerleştirildiğinde her bir iletkenin var olan akımlar yeniden dağılmaktadır. Akımlar zıt yönde aktığında iletkenler arasında güçlü bir manyetik alan oluşmaktadır (Şekil 10.a) ve akımlar birbirlerine bakan iç alanlarda Şeki 10b’de gösterildiği üzere yoğunlaşmaktadır(Rudnev,2017)(Dughiero,2012). Akımlar iç alanlarda yoğun olmasından dolayı dış manyetik alan daha zayıf olacaktır. Manyetik alanda her bir iletken aynı yönde birbirini tamamlayan hayali manyetik alan çizgileri oluşturduğu içim manyetik alan güçlü bir şekilde meydana gelmektedir(Rudnev, 2017).



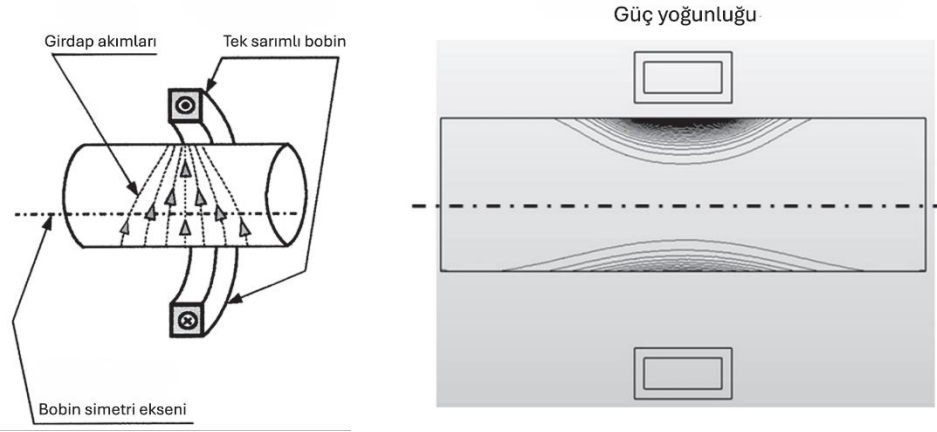
Şekil 10. Akımlar zıt yönlerde akarken oluşan yakınlık etkisiyle iletkenlerde meydana gelen manyetik alan dağılımı (a) ve akım yoğunluğu dağılımı(b) (Rudnev, 2017)

Akımların aynı yönde olması durumunda manyetik alan çizgileri iletkenler arasında zıt yönlerde sahip olacak ve Şekil 11.a'da görüldüğü üzere yönleri zıt iç kısımda meydana gelen manyetik alan çizgileri birbirlerini kesecek, engelleyecek ve zayıf bir manyetik alan oluşmasına sebebiyet verecektir. İki iletkenin de ürettiği hayali manyetik alan çizgileri birbirini tamamlayacak şekilde aynı yöne sahip olacağından, dış manyetik alan güçlü olacaktır. Akımların yönlerinin aynı olması durumunda akımlar iletkenlerin zıt kısımlarında Şekil 11.b'de yer aldığı gibi toplanacaktır (Rudnev, 2017).



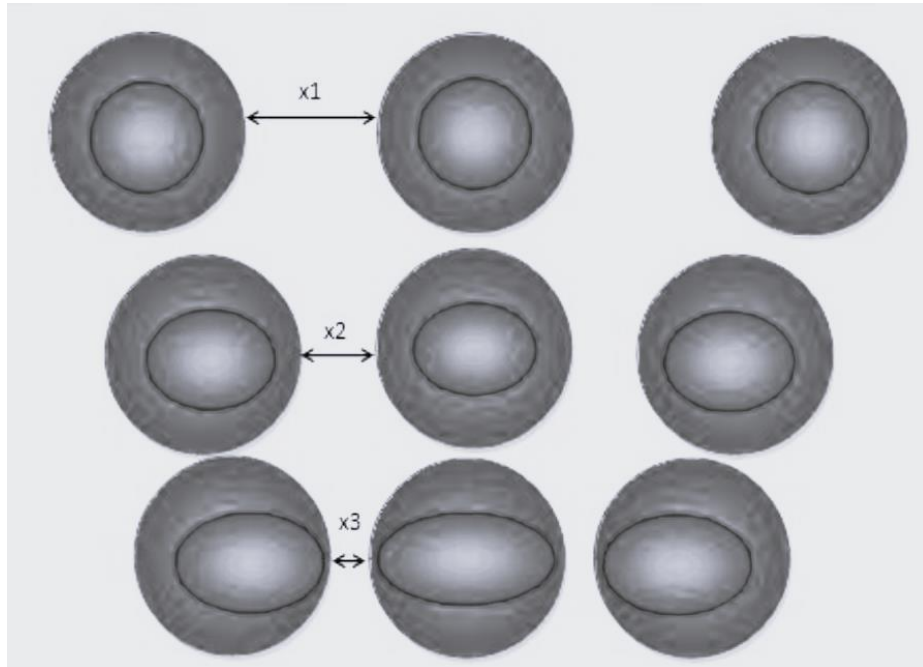
Şekil 11. Akımlar aynı yönlerde akarken oluşan yakınlık etkisiyle iletkenlerde meydana gelen manyetik alan dağılımı (a) ve akım yoğunluğu dağılımı(b) (Rudnev, 2017)

İndüksiyonla ısıtma işleminde iş parçasında oluşan girdap akımları bobinin tersi yönünde bir manyetik alan oluşturmaktadır. İndüksiyon bobini ile iş parçası arasındaki mesafe yakınlık etkisinden dolayı önem arz etmektedir. İş parçası simetrik olmadığı durumda, aradaki mesafenin daha az olduğu küçük bir boşlukta, iş parçasında indüklenen girdap akımları bobin akımı tarafından büyük ölçüde etkilenmektedir. Akımlar bobine yakın kısımda iş parçasının yüzey alanının altında dar bir hacme yerleşmekte ve o bölgede yoğun ısı oluşumu meydana geldiği Şekil 12'de görülmektedir. İki cisim arasında mesafe arttığında yakınlık etkisinin gücü azalır ve girdap akımlarının dağılımı, iş parçasının yüzeyinde daha geniş bir alanda yayılacaktır. Isı oluşumunun derinliği azalacaktır (Okman, 2005).



Şekil 12. Tek sarımlı bir bobine simetrik olarak yerleştirilmeyen iş parçasında meydana gelen yakınlık etkisi (Rudnev, 2017)

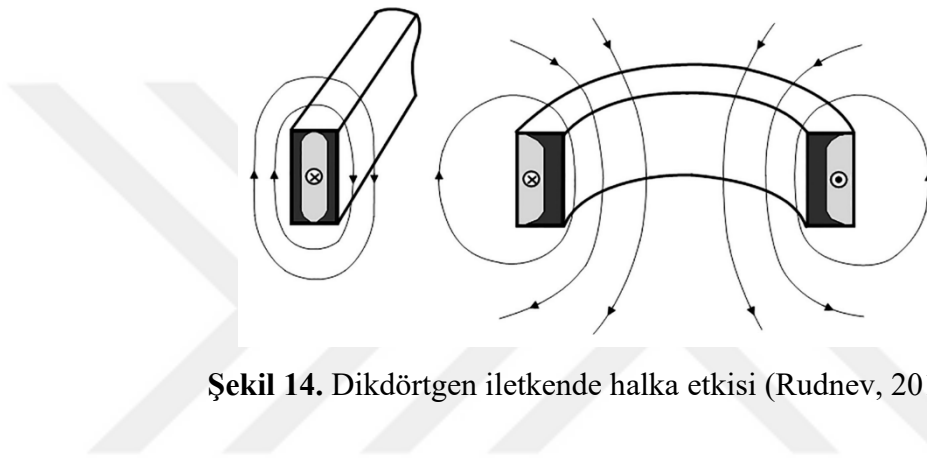
Örneklendirilen tek sarımlı bobine ek olarak bobinlerin sarımları yan yana olduğu için bir sarımın meydana getirdiği manyetik alan, çevresinde var olan etkileşim mesafesindeki diğer sarım üzerinde girdap akımlarının indüklenmesine sebep olmaktadır. İletkenler arasındaki mesafe azaldıkça bu etki şiddetlenir ve iletken kenarlarına doğru akım yoğunluğu giderek artarak iletkenin alternatif akım direncinin dahada artmasına sebebiyet verir (Şekil 13)(Tezcan, 2019).



Şekil 13. Mesafeye bağlı yakınlık etkisinin iletkenlerde oluşturduğu akım yoğunluğu dağılımı(Tezcan, 2019)

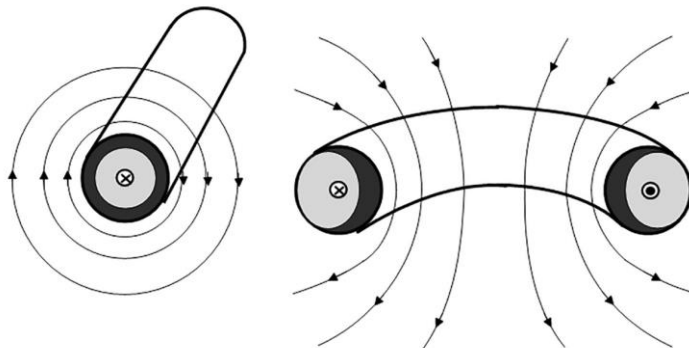
2.2.3 Yüzük Etkisi

Bobin kesitindeki akım dağılımını bobinin geometrisinden etkilenmektedir. Şekil 14'te akım taşıyan dikdörtgen bir iletken halka olacak şekilde bükülürse akım yeniden dağıtılacaktır. Halkanın iç kısmında manyetik akı çizgileri yoğunlaşacak ve burada manyetik akı yoğunluğunu artıracaktır. Halkanın ince iç yüzey tabakası en kısa mesafeye ve en düşük empedans yoluna sahip olacağından akımın çoğunluğu bu bölümde akacaktır. Halkanın dış kısmında manyetik akı çizgileri dağılacaktır (Rudnev, 2017).



Şekil 14. Dikdörtgen iletkende halka etkisi (Rudnev, 2017)

Şekil 15 silindirik iletkenlerde elektromanyetik halka etkisini göstermektedir. Bu etki indüksiyon bobininin iç yüzeyinde akımın yoğunlaşmasını sağlar. Halka etkisi tek sarımlı indüktörlerde olduğu gibi çok sarımlı bobinlerde de gerçekleşmektedir(Rudnev, 2017).



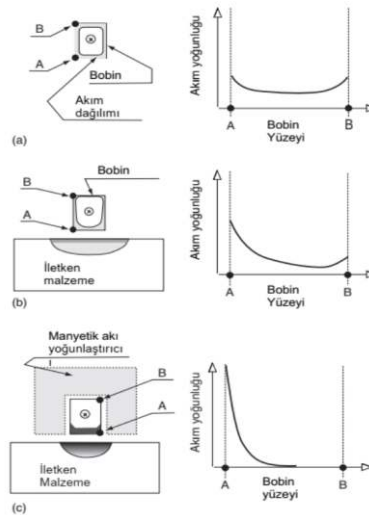
Şekil 15. Silindirik iletkende halka etkisi(Rudnev, 2017)

Geleneksel bir indüksiyon ısıtma sistemine yerleştirilen iş parçasında halka etkisi olumlu bir rol oynamaktadır. Deri etkisi ve yakınlık etkisiyle birlikte bobin akımının bobin iç çapında yoğunlaşmasına sebebiyet vermektedir. Böylelikle bobin ve iş parçası arasındaki elektromanyetik etkileşim gelişir ve bobin verimliliğinde artış sağlanır (Rudnev, 2017).

2.2.4 Elektromanyetik Yuva Etkisi

Elektriksel olarak iletken bir cisim bir iş parçası yakınına yerleştirildiğinde manyetik alan ve akım yoğunluğu yeniden dağılım göstermektedir. Manyetik alan indüktör ve iş parçası arasındaki boşlukta sıkışarak bu bölgede en yüksek manyetik akı yoğunluğunun oluşmasını sağlar. İndüktör akımının çoğunluğu iş parçasına bakan iletken yüzeyinin yakınında akar ve geri kalan kısmı iletkenin yan yüzeylerine dağılır (Rudnev, 2017).

İndüksiyon ısıtma sistemlerinde, ısınma verimliliğini doğrudan etkileyen akım yoğunluğu ve manyetik alan oldukça önemlidir. Isıtılacak yüzeylerin istenilen özellik ve yüksek verimlilikte olabilmesi manyetik alan ve akım yoğunluğunun kontrolü ile sağlanılabilmektedir. Bobin üzerinde belirlenen bir bölgede bir manyetik akı yoğunlaştırıcı ile güç ve manyetik alan yoğunluğu yoğunlaştırılabilir. Şekil 16’da farklı durumlarda bobin üzerinde oluşabilecek akım dağılımları gösterilmiştir(Akkurt, 2024).



Şekil 16. a) bobin çevresinde iletken bir malzeme olmaması durumunda b) iletken malzeme olması durumunda c) bobin üzerinde akı yoğunlaştırıcı kullanılması halinde meydana gelecek akım dağılımları (Akkurt, 2024)

Şekil 16.a’da iletken bobin üzerinde herhangi bir iletken olmadığı durumda meydana gelen akım dağılımı gösterilmiştir. Akım homojen bir şekilde bobin üzerine dağılmıştır. Bobin çevresine iletken bir malzeme yerleştirildiğinde yakınlık etkisi nedeniyle malzemeye yakın olan bölgede akım yoğunluğu artmaktadır (Şekil 16.b). İletkenin etrafına Şekil 16.c’de gösterildiği üzere C şekilli bir manyetik akı yoğunlaştırıcı yerleştirildiğinde manyetik yoğunlaştırıcı manyetik alan için düşük manyetik dirençli bir yol sağlamaktadır. Manyetik yoğunlaştırıcı sayesinde bobin üzerindeki akım iş parçasına bakan yüzeyde yoğunlaşacaktır. Manyetik yoğunlaştırıcı, indüktör akımını yoğunlaştırıcının açık yüzeyine, yuvanın açık alanına sıkıştırır bu olaya elektromanyetik yuva etkisi denilmektedir. Manyetik akı yoğunlaştırıcılar manyetik alan yolu boyunca düşük direnç oluşturur ve böylelikle ilerlemesinin daha kolay olmasını sağlar. Akı yoğunlaştırıcılar sayesinde indüksiyon ile ısıtılma yapılacak parçalarda elektromanyetik yuva etkisi seçili bölgelerin ısıtılmasında ve harici manyetik alanın önemli ölçüde azaltılmasında yaygın olarak kullanılmaktadır. Böylelikle indüktör ve iş parçası arasındaki elektromanyetik etkileşim gelişir ve bu da indüksiyon ile ısıtmanın elektriksel verimliliğini arttırmaktadır (Rudnev, 2017)(Akkurt, 2024).

Yuva etkisi iş parçası olmadan da meydana gelebilmektedir. İletken içerisinde akım yeniden dağılıma uğrar ancak yine de akımın büyük bir kısmı yuvanın açık yüzey bölgesinde yoğunlaşmaktadır. Elektromanyetik yuva etkisi yalnızca indüksiyonla ısıtma ile bağlantılı değil aynı zamanda motor jeneratörleri, alternatif ve doğrudan akım makineleri gibi diğer endüstriyel makinelerin tasarımında ve elektriksel iletken bileşenlerin elektromanyetik olarak korunmasının gerektiği durumlarda kullanılmaktadır (Rudnev, 2017).

3.Retort/Otoklav Sistemleri

Mikroorganizmaların sebep olduğu gıda bozulması önemli bir problem oluşturmaktadır ve bu nedenle mantarlar bozulmaya bakteriler ise gıda kaynaklı hastalıklara yol açmaktadır. Bazı sporlar oksijensiz koşullarda gelişebildikleri ve genellikle de yüksek sıcaklıklara dayanabildikleri için sağlık problemi oluşturabilmektedirler. Sağlık risklerinin önüne geçebilmek amacıyla sterilizasyon ve pastörizasyon gibi işlemlerin uygulanması oldukça önemlidir (Jimenez et al., 2024).

Sterilizasyon gıda kalitesi ve besin bileşimindeki değişiklikleri en aza indirerek besin değerlerini koruyan bir prosestir (Yang, 2022).

Termal sterilizasyon; uzun süreli raf ömrü sağlama amacıyla konserve gıdalar için kullanılan bir işlemdir. Gıdaların büyük çoğunluğu kaplara yerleştirildikten sonra ısı işlem aşamasından geçirilmektedir. Geriye kalan küçük bir kısımda öncelikle gıda ile ambalaj malzemesi ayrı ayrı steril edilir ardından aseptik dolum ile paketleme işleminden önce ısı işlem aşamasından geçirilmektedir (Al-Baali, 2006) (Rahman, 2007). Gıda ısı işlem süreçleri her iki durumda da öncelikle patojen mikroorganizmaları yok etmek, depolama şartlarında bozulmaya sebep olan mikroorganizma ve enzimleri inaktive etmek ve bu işlemler ile üründe minimum kalite kaybını sağlayarak raf ömrünü uzatmayı amaçlamaktadır. Isıl işlemler bahsedildiği üzere paketleme öncesi veya sonrasında yapılabilmektedir. Benzer temel hedefleri içeren bu süreçlerde et, balık, meyve-sebze ve hazır gıda gibi birçok endüstride ambalajlama sonrası ısı işlem veya konserveleme işlemi de denilen proses gerçekleştirilmektedir. Konserve gıdaların termal sterilizasyonu günümüzde yaygın kullanılan yöntemlerden birisini oluşturmaktadır.

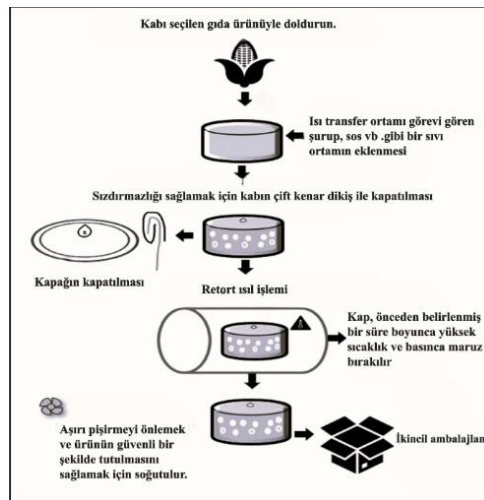
Gıda bozulmaları genel olarak bahsedildiği üzere çoğunlukla çeşitli mikroorganizmalardan kaynaklanır ve ısı işlemin temel olarak amacı bu tehdidi önlemek, önüne geçmektir. Isıl işlem, paketlenmiş raf ömrü uzun, taze kalan yüksek standartlarda ürünlerin üretilmesini sağlamak ve gıdaları korumak için uygulanan bir işlemdir (Al-Baali, 2006) (Fabulya & Hampel, 2015) (Gokhale & Lele, 2014). Ürünün ısınma hızı, başlangıç gıda sıcaklığı, hedef sıcaklığa ulaşma süresi, yüzey ısı transfer katsayısı, kalite faktörü ve ısı işlemde sterilizasyonun ölçüsü olan F_{ref} değeri gibi birçok faktörün fonksiyonundan oluşan bir süreçtir. Sterilizasyon işleminde gıdaların besin içeriğinin etkilenmesinden dolayı hem yararlı hem de yıkıcı etkilerin dengede tutulması gerekmektedir (Al-Baali, 2006).

Gıdalarda ısı işlem sırasında mikroorganizmaların yok edilmesiyle birlikte vitaminlerinde zarar görmesine neden olan sıcaklığa bağlı olarak kimyasal ve biyokimyasal reaksiyonlar gerçekleşir. Vitaminlerin parçalanması enzimlerin ve mikroorganizmaların yok edilme süresinin oldukça üzerinde olmasından dolayı termal

ısıt işlemler sırasından daha yüksek sıcaklıklar ve kısa süreler tercih edilmektedir (Al-Baali, 2006)(Fellows, 2002).

Gıdaların oda sıcaklığında uzun sürelerde korunup saklanabilmesi amacıyla uygulanan ısıt işlemlerin gerçekleştirildiği sistemler ürünü belirli bir süre boyunca oldukça yüksek sıcaklıklara çıkarabilecek şekilde tasarlanmıştır. Bu işlemlerde kullanılan sıcaklıklar suyun kaynama noktasını aşar ve bu sebeple ekipmanların bu koşullara dayanabilecek özellikte olması gerekmektedir (Paul Singh & Heldman, 2009). Isıt işlem, kapalı ve basınçlı kaplar olan retort sistemlerinde de yapılabilmektedir.

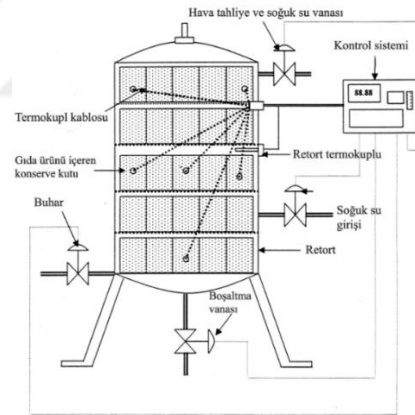
Retort sistemleri gıda endüstrisinde uygulanan ısıt işlem süreçlerinde önemli bir yere sahiptir. Et, tavuk, mısır, deniz ürünleri, hazır yemek ve soslar gibi farklı ürünlerin işlenmesinde sıkça tercih edilmektedir (Walden & Emanuel, 2010)(Featherstone, 2015)(Peesel vd., 2016). Retort sistemleri yatay ve dikey yapılarda olabilir ve sistem içerisinde ürünler sepetlere yerleştirilebilir veya direk daldırma yöntemiyle ısıt işlem gerçekleştirilebilmektedir(Fabulya & Hampel, 2015). Isıt işlem uygulanarak gerçekleştirilen retort sistemleri, ısıtma yoluyla mikrobiyolojik olarak güvenli ürünler elde etmeyi hedefleyen bir gıda koruma tekniğidir. Statik retortlar ortam olarak buharla ısıtılan ve sonrasında su, buhar veya su püskürtmeli sistemler şeklinde farklı versiyonları da bulunan uzun süredir kullanılan sistemlerdir. Retort sistemlerinde kapalı bir kaptaki ısı kullanılarak sıcaklık artırılır ve sterilizasyon işlemi Şekil 17’de gösterildiği gibi gerçekleştirilmektedir (Jimenez vd., 2024).



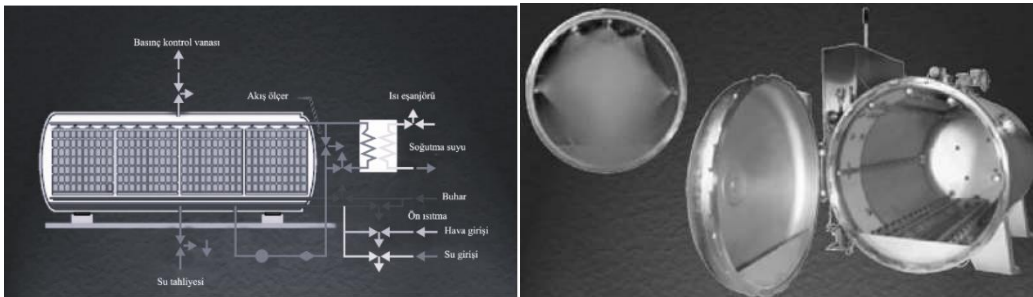
Şekil 17. Standart otoklav işlemi(Jimenez vd., 2024)

Sterilizasyonda doymuş buhar paketlenmiş gıdalar için yaygın olarak kullanılan ısı ortamıdır. Retort işlemi ürünlerin sızdırmaz bir şekilde kapatılmasından sonra retorta konulması, kabın kapatılması ve buharla ısıtılması esasına dayanmaktadır. Isıtma işlemi esnasında buhar kabın yüzeyinde yoğunlaşır ve böylelikle oldukça yüksek yüzey ısı transfer katsayısı(h) oluşur. Isı, kabın duvarından iç kısımlarına doğru içerisindeki gıdanın ısı özelliklerine ve kabın boyutuna göre değişiklik göstermektedir (Al- Baali, 2006).

Sterilizasyon için kullanılan sistemler parti tipi, sürekli ve aseptik sistemler olmak üzere üçe ayrılmaktadır. Parti tipi ve sürekli sistemlerde ısı işlem, ürün ambalaja yerleştirildikten sonra gerçekleştirilmektedir. Yatay ve dikey konumda olabilen retortlar Şekil 18 ve Şekil 19’da gösterilmiştir. Parti tipi retortlar Şekil 19’da görüldüğü üzere ürünü suyun kaynama noktasının üzerindeki sıcaklıklara maruz bırakmak üzere tasarlanmış sistemlerdir ve bu sistemler 475 kPa’a kadar ve 135-150 °C aralığında yüksek buhar sıcaklıklarını sürdürebilmek için gerekli basınçları koruyabilmektedir (Paul Singh & Heldman, 2009).

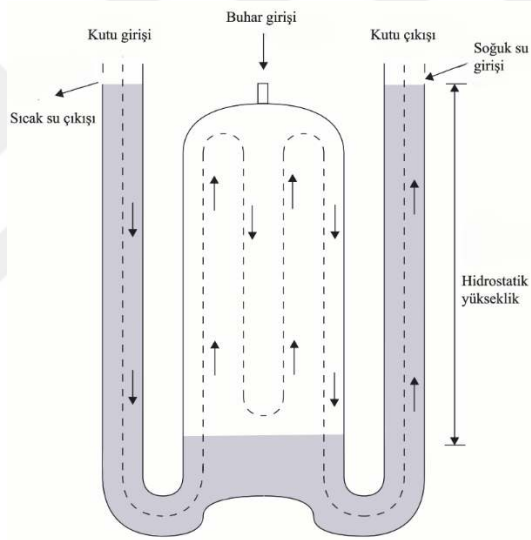


Şekil 18. Dikey retort[(Kumar vd., 2001



Şekil 19. Yatay retort(Paul Singh & Heldman, 2009)

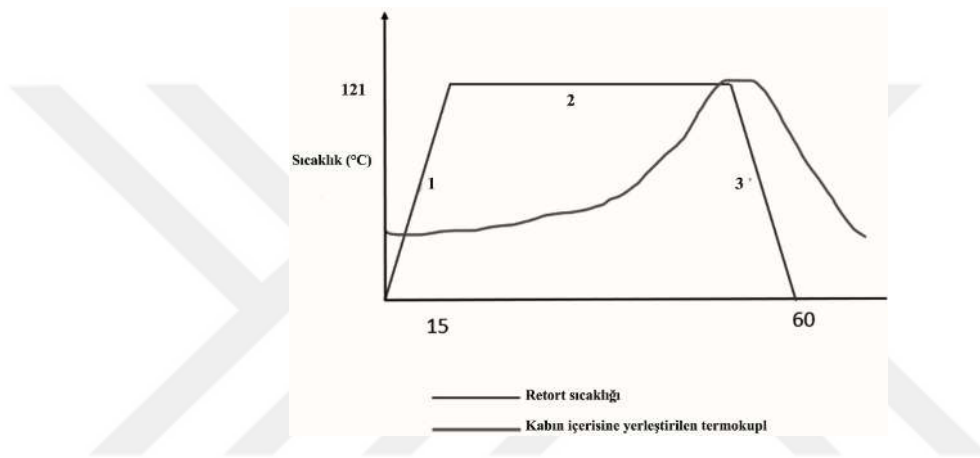
Geleneksel retort sistemlerine ek retort içerisinde ve sürekli bir şekilde sterilizasyonun sağlandığı farklı sistemler geliştirilmiştir. Yarı sürekli bir işlem olan kasasız retortlama bu sistemlerden birisidir ve ürün kaplarının sisteme otomatik olarak doldurulmasını ve boşaltılmasını sağlar. Sürekli sterilizasyon işlemi, ürün kaplarının geçişi esnasında yüksek basınçlı buhar ortamını koruyabilmek için bir kule ve iki su sütunu kullanılarak hidrostatik sterilizasyon sistemi ile gerçekleştirilir (Şekil 20). Ürünler konveyör bir sistem ile retort içerisine sürekli olarak beslenilmektedir. Su sütunlarının yüksekliği hedeflenen sıcaklık ve buhar basıncını sürdürebilecek seviyededir. Bu sistemlerde kaplar sistem içerisine sıcak su sütunu içerisinden beslenir ve ısınma başlar. Ardından ısıtılma işlemi, kaplar buhar ortamı içerisinde ilerlerken tamamlanır ve son aşamada kaplar soğuk su sütunu içerisinden geçerken soğutulmaktadır (Paul Singh & Heldman, 2009).



Şekil 20. Hidrostatik sterilizasyon sistemi (Paul Singh & Heldman, 2009)

Retortların çalışma döngüsü, sıcaklığın 121 °C'ye kadar ısıtılmasıyla başlayan bir döngüdür. Sistem içerisindeki buhar, retort ve kutular arasındaki tüm havanın uzaklaştırılması amacıyla kaptan geçirilmektedir. Ardından sistem çalışma basıncı ve işlem sıcaklığına getirilmektedir. Buhar akışı kesilir ve retorta soğutma suyu ve hava karışımı verilir böylelikle kutular soğutulur. Soğutma suyu verildikten sonra yoğunlaşan buhardan dolayı azalan basınç dengelenmektedir. Bu sayede kutuların iç ve dış basınç dengesi sağlanmış olur (Paul Singh & Heldman, 2009)(Al- Baali, 2006).

Sterilizasyon işlemi Şekil 21’de de gösterildiği üzere 3 aşamadan oluşmaktadır (Jimenez vd., 2024)(Fabulya & Hampel, 2015). Suyun kaynama noktasını yükseltmek ve daha yüksek sıcaklıklara çıkabilmesini sağlamak için retort sistemlerinin tümünde basınç uygulanmaktadır. İlk aşama atmosfer basıncının yaklaşık 1-1.4 bar üzerinde gerekli basınca ve yaklaşık 115-121 °C retort sıcaklığına ulaşması için gereken süredir. İkinci aşamada ise ulaşılan sıcaklık ve basınç korunarak mikrobiyal öldürücülük gerçekleştirilir. Son aşamada sıcaklığın düşmeye devam etmesi amacıyla soğutma suyu eklenir böylelikle termofilik mikroorganizmaların gelişimi de engellenir (Jimenez vd., 2024).



Şekil 21. Retort ısıtma işlemine ait temel sıcaklık eğrisi, 1; ısınma süresi, 2; bekletme/pişirme süresi, 3; soğuma süresi (Jimenez vd., 2024)

Retort sistemleri konservelere, poşetlere ve diğer ambalaj türlerine uygulanabilir. Konserve üretiminde, dayanımı sağlanmak istenilen ürün; alüminyum poşet, cam veya laklanmış teneke kutu vb. ambalajlara doldurulmakta, ambalaj hermetik “geçirimsiz” olarak kapatılmakta ve retort sistemlerinde 100 °C’ den yüksek sıcaklıkta ve basınç altında ısıtma işlemi yapıldıktan sonra soğutma prosesi ile ambalajların emniyetli bir şekilde işlem adımlarının tamamlanmasından oluşmaktadır. Isıtma işlem koşullarının belirlenmesinde ticari, dayanıklı ve steril bir ürün için termal ölüm sürelerinin hesaplanması, hedef mikroorganizma seçimi ve gerekli sıcaklık-zaman konserve ürünler için oldukça önemlidir. Ambalajlama sonrası uygulanan ısıtma işlemi; düzenli olmayan sıcaklık dağılımı ve ısıtma penetrasyon hızına bağlı olarak ürünün kalitesinde ve besin değerinde önemli bir azalmaya neden olabilmektedir (Pursito vd., 2020).

Doymuş buhar konserve gıdaların sterilizasyonunda en yaygın kullanılan ısıtma ortamıdır (Al- Baali, 2006). Retort sistemlerinde aracı akışkan (buhar jeneratörlerinde elde edilen buhar veya sıcak su) ile ısıtma işlemi tamamlandıktan sonra, su ile soğutma işlemi gerçekleştirilmektedir. Geleneksel sistemlerde soğutma ve ısıtma aşamasında aracı akışkan olan su, sarf olarak kullanılmaktadır. Sistemlerde konserve ısıtma esnasında aracı akışkanın elde edilmesi sırasında katı yakıt veya dirençli elektrikli ısıtma sistemleri kullanılmakta olup sistemlerde buhar elde edilme ve taşınmasında yüksek oranda kayıplar oluşmaktadır. Sistemlerde konserve ısıtılmasında makine ve su kalitesine bağlı olarak hasar ve korozyon oluşabilmekte ve ısıtma esnasında kullanılan su/buhar miktarına bağlı maliyette artış olabilmektedir (Paul Singh & Heldman, 2009)(Featherstone, 2014).

Kumar vd. Newtonumsu olmayan karboksimetil selüloz (CMC) model sıvı olarak kullanılarak hareketsiz bir retort sisteminde dik pozisyonda bir metal kutu içerisindeki doğal konveksiyon ile ısınmaya olan etkisi incelenmiş ve simüle edilmiştir. Sıvının viskozitesi sıcaklığa bağlı olduğu kabul edilmiş ve sonuçlar doğal konveksiyonun en soğuk olduğu bölgenin kutunun alt kısımlarında oluştuğunu göstermiştir. Konveksiyon ile ısı transferi, sıvı içerisindeki sıcaklık farkları ile oluşan yoğunluk değişimlerinden kaynaklanmaktadır. Sıvının ısınmasıyla yoğunluk azalır ve yukarıya doğru hareket başlar. Daha yoğun olan soğuk sıvı alt kısımda kalır ve bu sebeple soğuk bölge kutunun alt kısmında oluşmaktadır (Yang, 2022)(Kumar vd., 2001).

Termal gıda işlemi süreçleri olan sterilizasyon ve pastörizasyon süreçlerinin tasarımında en yavaş ısınan bölge ve gıdanın merkezindeki sıcaklığın bilinmesi gerekmektedir. Genellikle sistem içerisine yerleştirilen termokupl ile ölçülen sıcaklıklarda, farklı noktalara yerleştirilen termokupllar akış profilini bozması nedeniyle ölçümlerde hataya yol açabilmektedir. Sabit bir konumda olmadığı için en yavaş ısınan bölgede sıcaklık ölçülmesi zordur ve ısıtma işlemi boyunca sürekli olarak yer değiştirmektedir. Bu bilgiler doğrultusunda termal işlemlerin yapıldığı durumlarda gıda sıcaklığını tahmin edebilmek için matematiksel modellerin kullanılması yaygınlaşmaya devam etmektedir(Al- Baali, 2006).

Matematiksel modelleme yapılan çalışmalarda kutularda meydana gelen sıcaklık dağılımı sterilizasyon için önemli bir basamağı oluşturmaktadır. Sterilizasyon aşamasında mikroorganizmaların inaktive edilmesi için gıdanın belirlenen koşullarda ve sürede beklemesi gerekmektedir. Termal işlem gerçekleştirilmeye başlanıldığında mikroorganizmaların inaktif hale gelmesi, retort sıcaklığının 121°C'ye yaklaştığı duvara yakın bölgelerde ısıtmanın ön aşamalarında başlamaktadır. Bakteri yoğunluğu ve mikroorganizmaların inaktif hale gelmesi için diferansiyel denklem, momentum ve enerji denklemleriyle matematiksel modellemenin kullanılması gerekmektedir(AI-Baali, 2006).

Tez çalışmasında konservelerin ısıl işlemi incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda günümüzde konserve ısıl işleminde uygulanan endüstriyel süreçler hakkında bilgi alınmıştır. Yerel konserve üreticileri tarafından her biri 830 gram bezelye içeren 10.000 adet konservenin sterilizasyonunda 2 saatin üzerinde bir işlem süresinin gerektiği ve bu işlem esnasında 130-210 KW elektrik ve 162-180 kg LNG kullanıldığı tespit edilmiştir. Sadece konservelerin ısıl işlemi esnasında 3 GJ seviyesinde bir enerji yeterlikten 10 GJ'dan fazla enerji kullanıldığı ve aradaki farkın aracı akışkanın ısıtma sürecinde ve sistem verimsizliğine bağlı kayıplardan meydana geldiği belirtilmiştir. Yapılan proje kapsamında kayıpların minimize edileceği ve yüksek oranda bir enerji tasarrufu sağlanacağı ön görülmektedir.

Çalışmada tamamen elektrikle çalışan, Eddy akımları aracılığıyla elektrik enerjisini oldukça yüksek oranda verimlilikle kullanan, otomasyona uygun konserve kutularının bireysel ve hızlı ısıtma ile ısıl işlemin gerçekleştirildiği bir retort sistemi tasarımı gerçekleştirilmiş ve üretimi tamamlanmıştır. Geleneksel retort sistemlerinden farklı olarak elektromanyetik ısıtma uygulaması ve soğutma amaçlı termodinamik soğutma çevrimi kullanılmış ve sistemin ön deneysel sonuçları gerçekleştirilmiştir.

4. Materyal ve Yöntem

Tez çalışmasında başlangıçta ardışık sıralı 4 adet konservenin ısıl işleme maruz kaldığı ölçeklendirmeye uygun bir ön prototip geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu hedef doğrultusunda, üründe meydana gelecek sıcaklık- zaman kombinasyonunu ve elde edilmesi gereken sterilizasyon değerini sağlayacak sistem parametreleri belirlenmiştir.

Sistem parametrelerinin belirlenmesinde çoklu fizik sistem içerisindeki elektrik alan profili ve ürün içerisindeki sıcaklık değişimlerinin belirlenmesi amacıyla sonlu eleman analizleri ile matematiksel model geliştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sonrasında bu modelin kullanılmasıyla sistem tasarımı tamamlanmış ve ardından prototip imalatı gerçekleştirilmiştir.

4.1 Yöntem

Sistem prensip olarak konserve kutu yüzeyinde oluşturulacak Faraday kafesi teorisine dayanmaktadır. Konserve kutusu yüzeyinde manyetik alan etkisiyle bir ısı akışı ve sıcaklık artışı elde edilecek ve artan sıcaklık artışıyla konserve yüzeyinden ürüne ısı transferi temelinde yüksek sıcaklık bölgesinden düşük sıcaklık bölgesine doğru bir akış gerçekleşecektir. Konserve içerisindeki ısı işleme maruz kalan ürün manyetik alandan etkilenmeyecek ve manyetik alan etkisi sadece kutu yüzeyinde gerçekleşecektir. Üretilen sistem gövdesinde elektromanyetik alandan etkilenmeyen ve yüksek sıcaklık ve yüksek basınca karşı dayanıklı polimer matrisli kompozit polimer tüp gövdeden oluşan bir sistem tasarlanmış ve üretilmiştir. İndüksiyon temelli ısı işleme çalışmalarında konserve geometrisini korumak amacıyla, gövde içerisinde ısı işleme boyunca konserve içerisindeki basıncı dengeleyebilmek adına endüstriyel proseslerde de uygulandığı üzere 2 bar basınç (atmosferik basınç+ 1 bar) kullanılmıştır. Konservelerin içinde yer alacağı tüp şeklindeki gövde üzerinde su ve hava giriş çıkışına olanak sağlayacak ventiller bulunmaktadır. Sistemde gövde yüzeyine ısı işleminin sağlanması amacıyla bobin ağ örtüsü sarılmış ve sistemin enerji ihtiyacı için yapılan hesaplamalar ve analizler ile yeterli güce sahip indüksiyon cihazı kullanılmıştır.

Isı işleme aşaması tamamlanan sistemde soğutma çevrimi konserveleri hızlı bir şekilde soğutmalıdır. Böylelikle proses süresi kısılacak ve ürünlerde meydana gelen kalite kayıplarının önüne geçilecektir. Sistemin ilerleyen aşamasında konserve kutuların içerisine saf su ve materyalin stabilitesi, viskozite ölçüm kolaylığı nedeniyle %0.25 CMC (karboksi metil selüloz) çözeltisi model gıda olarak seçilmiş ve materyalin içerisine doldurularak sıcaklık değişimleri incelenmesi hedeflenmiştir. Saf su ve %0.25 CMC çözeltisi düşük ve yüksek viskoz değerine sahip Newtonumsu ve Newtonumsu olmayan sıvı örnekleridir. Çalışma kapsamında sıcaklık ölçümleri

hermetik olarak kapatılacak konserve kutu içerisine yerleştirilecek olan kablosuz sıcaklık ölçüm sensörü ile gerçekleştirilecektir. Sıcaklık ölçüm sensörleri konserve kutu ortasına konumlandırılacaktır. Konserve kutu merkezine sıcaklık ölçüm sensörünün sabit durması için halka şekline sahip yalıtkan bir profil ile desteklenmesi planlanmıştır. Sensörün yerleştirilmesinden sonra çözelti ile doldurulan kutu, konserve kapatici ile kapatılacak ve deney boyunca sıcaklık verileri tüm ısı işlem ve soğutma süreçleri tamamlanmasından sonra konserve açılımı yapıldıktan sonra sağlanacaktır. İndüksiyon, elektromanyetik dalgaların meydana getirdiği Eddy akımları aracılığıyla iş parçası üzerinde ısı üretimi esasına dayanmaktadır. Faraday kafesi etkisi, elektrik alanlarının ve elektromanyetik dalgaların bir iletken tarafından engellendiği olgudur (Hewett & Hewitt, 2016). Bu sebeple, konserve yüzeyi Faraday kafesi etkisi göstereceği için sıcaklık ölçüm sensörü indüksiyon akımından etkilenmeyecektir.

Öncelikle çalışma kapsamında hedef tasarımın basamağı niteliğinde bir ön çalışma yapılmıştır. Öncelikle matematiksel doğrulama çalışmaları kapsamında konserve malzemeleri alüminyum ve çelik olarak kullanılmış ve hedef ölçülerdeki konserve kutuları CEIA marka 12 kW indüksiyon cihazında denenmiş ve ön denemelerde ısıtma açısından başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Sistemde temel hesaplamalarda kritik parametreler; sistem iç ve dış basıncı, indüksiyon uygulama süresi ve gücü, soğutma süresi ve konserve ürün özellikleri olacak şekilde planlanmıştır.

Matematiksel modelleme çalışmalarında sistem tasarımı bobin boru çapı, bobin kesit şekli (dairese ve dikdörtgen), sarım sıklığı, indüksiyon frekansı, indüksiyon güç ayarı, sistem basıncı, işlem süresi ve konserve arası mesafe parametreleri ışığında gerçekleştirilmiş ve ön prototip sonlu eleman analizleri ile teorik olarak kurgulanmış ve sistem üretilmiştir. Sayısal ve deneysel çalışmalarda kullanılacak olan bağımsız değişkenler ve değişkenlerin seviyeleri Tablo 3'te yer alan deneme desenine göre belirlenmiştir.

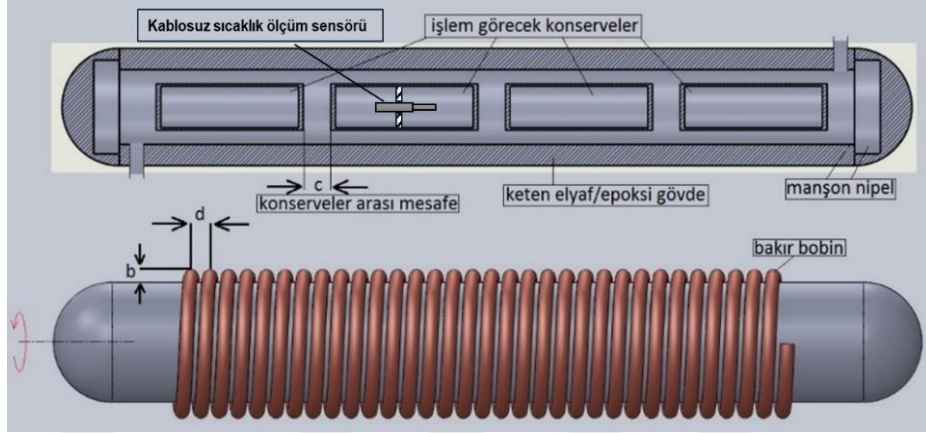
Tablo 3. Plackett Burman Deneme Deseni

Deneme	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9
1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1
2	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1
3	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1
4	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1
6	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	1	-1	1	1	-1	1
8	-1	-1	1	1	1	-1	1	1	-1
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	1
10	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1
11	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
12	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Öncelikle tasarım sürecinde denemeler yapılmıştır. Modelleme sürecinde konserve yüzeyinde sabit sıcaklık (120-145 °C) sağlayacak bir bobin sarım düzeneği için çalışma gerçekleştirilmiştir. Konserve iç yüzeyi ile gıda arasında sabit ve salınım olması durumunda konveksiyon ile sıcaklık dağılımını incelemek için simülasyon çalışması Tablo 3'te verilen desen dikkate alınarak yapılmıştır. Bilgisayar destekli simülasyon süreçleri ile konserve merkez sıcaklığının belirlenen sıcaklığa ulaşması ve sonrasında soğutma suyu ile konserve dış yüzeyindeki soğumaya bağlı merkez noktasının soğuma koşulu sağlanmıştır. Sistem tasarım parametreleri toplamda 9 adet bağımsız değişkenden oluşmaktadır. Seçilen parametrelerin değer aralıkları mevcut literatür bulguları göz önüne alınarak tanımlanmıştır. Bobin boru çapı P1(Amarulloh et al., 2022)bobin kesit şekli (dairese (-1), dikdörtgen (0)) P2 (Tavakoli et al., 2013), sarım sıklığı (1-5 mm) P3, indüksiyon frekansı (10-200 kHz) P4 (Waluyo et al., 2022), indüksiyon güç ayarı (10- 60 kW) P5, sistem basıncı (1- 2.6 bar) P6, işlem süresi veya konserve arası mesafe P7, soğutma suyu sıcaklığı 3 seviye (10, 20 ,30 °C) P8 ve soğutma suyu debisi (1L/ dakika- 3L/ dakika) P9 olmak üzere 9 parametreden oluşmaktadır.

Sistemin ilk olarak ön analizleri yapılmış ve ardından sistem parametreleri dikkate alınarak çalışma detaylandırılmıştır. Başlangıçta yapılan ANSYS/ Maxwell ve Comsol yazılımlarına bağlı ön analiz sonuçlarına göre sistem ön tasarımı gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon akımından etkilenmeyen, ısı işlem için gerekli basınç koşullarına dayanıklı sistem geometrisi Şekil 22'de verilmiştir. Çalışma ön deneme

alışmalarına bağlı olarak detaylandırılmış ve tasarım parametreleri matematiksel model çalışmalarından elde edilerek sistemde optimum değerler belirlenmiştir. İdeal değerlere bağlı olarak nihai tasarım gerçekleştirilmiştir.



Şekil 22. İmal edilecek retort sisteminin başlangıç gövde kurgusu tasarımı

Çalışmada kullanılacak olan ısıtma sistemi indüktif prensibine bağlı olan elektromanyetik ısıtma sistemidir. Elektromanyetik ısıtma sistemlerinde ısıtılacak bölge odaklanmasıyla oldukça hızlı bir ısıtma işlemi gerçekleştirilmektedir. Isıtma işlemi esnasında termodinamik yasalar perspektifinden bakıldığında konvektif bir ısı kaybı olmaktadır. Ancak meydana gelen kayıp indüktif(ışınım) yoluyla gerçekleşen ısıtma sisteminin sağladığı ısıtmanın yanında oldukça düşük kalacaktır. İndüksiyon ile ısıtma sistemi kullanılacağından indüksiyon bobinlerinin boyutları ve konumları ısıtma işleminde oldukça önemli parametrelerdir. Şekil 22’de yer alan b bobinlerin tüp gövdesine uzaklığını ve bobin çapını, d bobin sarım sıklığını ve c konservelerin birbirine olan uzaklığını göstermektedir. Matematiksel model çalışmaları sonucunda optimum sistem uzunluğuna bağlı analizlerde elde edilecek ısıtma bölümü, sistemi saracak şekilde üretilecek indüksiyon bobin sarım sayıları, boru çapları ve bobin iç çapı hesaplamalarına bağlı üretilmiştir. Isıl işlem için gerekli ısıtma parametreleri ve hedef çevrimi elde etmek için farklı bobin tasarımları kullanılmıştır. Bobin tasarımında ısıtmanın ideal verimde olması sağlanılmıştır. Sistemin soğutma sistem tasarımı ve imalatında sistem içerisine gönderilecek sıcak- soğuk suyun hazırlanması için gerekli ısı değiştiriciler sistem kapasitesine uygun olarak tasarlanmıştır.

5. Matematiksel Model Geliştirme Çalışmaları

Tasarım parametrelerinin belirlenmesi kapsamında fizik temelli bir matematiksel model çalışması gerçekleştirilmiştir. Konserve boyutları ve geometrisinde bir ürünün sistem içerisinde tanımlanması, retort sisteminin dış gövdesinin etrafına bakır bobin sarımı ve bu bağlamda gerekli parametrelerin belirlenmesi (uygulama frekansı, akım şiddeti vb.) matematiksel model geliştirme çalışmaları kapsamında gerçekleştirilmiştir. Böylelikle ürün sıcaklık değişimi ile hedef sıcaklık ve sürenin belirlenmesi amacıyla değişken parametreler; bobin sarım sayısı, indüksiyon gücü ve frekansı, bobin sarım çapı, sıklığı ve bobin kesiti olacaktır. Matematiksel model geliştirme aşamasında öncelikle sistem içerisinde oluşan manyetik alan değişimi tespit edilmiş ve buna paralel olarak sıralı 4 adet konserve yüzeyinde oluşan ısı akısı hesaplanmıştır. Diğer aşamada ürün içerisinde meydana gelişen sıcaklık profili belirlenmiştir.

Matematiksel model geliştirme amacıyla ANSYS/Maxwell Electronics ve Comsol yazılımları eş zamanlı kullanılmış ve her iki yazılımdan elde edilen sonuçlar doğrulanarak çalışmalar tamamlanmıştır. Ön aşamada var olan bir sistem bulunmadığı için iki yazılımdan elde edilen konserve geometrisi yüzey ısı akısı değerleri karşılaştırılmıştır.

5.1 Matematiksel Model Çalışmalarının İndüksiyonla Isıtma Uygulaması Kapsamında Kurgulanması

Faraday ve Ampere yasalarıyla indüksiyon ile ısıtma işlemlerinin temel prensipleri açıklanmaktadır. Faraday ve Ampere yasaları kullanılarak, doğrusal bir sistemde; bobine alternatif akım uygulandığında, bobin aynı frekansta alternatif bir manyetik akı üretmektedir. Manyetik akının içerisinde iletken olması durumunda iletken üzerinde alternatif akım kaynağıyla aynı frekansta Eddy akımları indükleneyecektir. Eddy akımlarının yönü Lentz kanununa göre bobin manyetik akısının tersine yönde bir manyetik akı oluşturacak şekilde olduğundan iletkende indüklenen eddy akımları da Joule etkisine bağlı ısı üretecektir. Manyetik malzemeler içerisinde histerezis nedeniyle bir ısı üretimi meydana gelse de ilgili değer genellikle eddy akımlarından oldukça düşüktür (Yu vd., 2017). İndüksiyon ısıtma sistemlerinde sistem içerisinde gerçekleştirilecek uygulamaya bağlı olarak genellikle frekanslar 10-50 kHz seviyelerinde, akımlar 200-300 amperden 2000-3000 amper seviyelerine kadar

yükselebilmektedir. Belirtilmiş olan değerler sistemin ısı akısı ihtiyacını karşılayacak şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Nerg & Partanen, 2001).

5.2 Ansys Yazılımı Kullanarak Konserve Ürün Yüzey Akısının Belirlenmesi

İndüksiyon ile ısıtmada ürün yüzeyinde meydana gelen ısı akısı değişimi Poynting vektörü ile hesaplanmaktadır (Denklem 6) (Chew.,2020). Konservelerin yüzeyinde elektromanyetik alan ile oluşan enerji akışı vardır.

$$q'' = S_{ort} = \frac{1}{2} \text{Re} [E \times H^*] \quad (6)$$

H^* , manyetik akı şiddetinin kompleks eşleniği, q'' ısı akısı, E elektrik alan vektörü ve Re gerçek kısım yani gerçek ölçülebilir güç bileşenidir. Uygulamada kullanılan materyale ve boyutlara göre sistem modellenmesi çalışma kapsamında gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ile ısıtılacak olan konserve kutuları elektriksel iletken oldukları için, yüzeylerinde çok ince bir tabakada alternatif elektromanyetik alan oluşacaktır. Bu tabakanın kalınlığı genellikle “nüfuz derinliği (yüzey kalınlığı) δ ” olarak bilinir ve Denklem 7’de yer alan formülle hesaplanmaktadır (Ji vd., 2020).

$$\delta = \sqrt{2 / \omega \mu \sigma} \quad (7)$$

Formülde δ nüfuz derinliği, ω akı frekansı (rad/s), σ elektriksel iletkenlik (S/m), μ manyetik geçirgenliği (H/m) ifade etmektedir. İndüksiyon ile ısıtma işleminde modelleme ve analiz işlemlerine doğru bir başlangıç için deneysel nüve kaybı denklemleri ile uygulanacak frekans ve akım değerleri hesaplanmalıdır. Temelde zamana bağlı değişen manyetik alan içerisindeki bir malzemede meydana gelen nüve kayıpları denklem 8’e göre hesaplanmaktadır. Formül manyetik malzemelerdeki toplam kayıpları ifade etmektedir. Malzeme içerisindeki kayıplar elektromanyetik enerjinin ısıya dönüşmesini kapsamaktadır.

$$P_{kayıp} = K_h \frac{1}{\pi} \frac{\partial B}{\partial t} + K_c \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 + K_e \frac{1}{c_e} \left[\left(\frac{\partial B}{\partial t} \right)^2 - 0.5 \right] \frac{\partial B}{\partial t} \quad (8)$$

Toplam nüve kaybı üç bölüme ayrılmıştır. K_h çarpanına ait olan ilk kısım histerezis kayıplarını temsil etmektedir. K_h değeri indüksiyon ile ısıtma sistemlerinde elektrik makinalarında olduğu gibi yüksek değildir. K_c çarpanı malzeme içerisinde indüklenen eddy akımı kayıplarını temsil etmektedir ve indüksiyon ile ısıtmanın temel kaynağıdır. K_e çarpanı akım harmoniklerinden kaynaklanan kayıpların hesaplanmasında kullanılmaktadır. Toplam kayıp $P_{kayıp} = P_h + P_c + P_e$ olarak yazılabilir. Denklem özellikle ferromanyetik malzemelerin içerisindeki kayıpların frekansa ve manyetik alan değişimine bağlı olduğunu göstermektedir. İndüksiyonla ısıtma sistemlerinde $\partial B / \partial t$ manyetik akı değişim hızına karşılık gelmektedir. Manyetik değişim hızı ne kadar yüksekse frekans yükselmesiyle, kayıplar o kadar artmaktadır ve daha fazla ısı oluşmaktadır. Saf sinüzoidal bir akım ile sistem olduğu varsayılırsa bu durumda 0 olur. Pratikte denklemdeki K katsayıları malzemeler için farklı akı ve frekans değerlerindeki yapılan ölçümler sonucu belirlenir ve indüksiyon ile ısıtma sistemi ön tasarımı için malzeme seçimi, çıkış gücü, frekansı, bobin sarım sayısı ve iletken kesiti gibi parametrelerin seçiminde yardımcı olacaktır. Denklem sistemleriyle birlikte tasarlanması planlanan sistem geometrisi içerisindeki manyetik alan oluşumuna bağlı olarak meydana gelen ısı akısı belirlenmiş ve Comsol yazılım çıktıları ile karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda optimum sistem parametreleri ile sistem üretimi gerçekleştirilmiştir.

5.3 Comsol Yazılımı ile İndüksiyonla Isıtma Uygulamasında Gerçekleşecek Konserve Yüzey Isı Akısı ve Ürün İçi Sıcaklık Değişiminin Belirlenmesi

Analizler sonucunda meydana gelecek ürün içerisindeki sıcaklık dağılımının belirlenmesi için öncelikle sistem içerisindeki manyetik alan değişiminin ve buna bağlı ürün geometrisi yüzey akı değişiminin belirlenmesi gerekmektedir. ANSYS yazılımı ile konserve kutu yüzeyinde meydana gelecek olan ısı akısı değeri Comsol yazılımı değerleri ile karşılaştırılmıştır ve ürün içi sıcaklık değişimi hesaplamaları yapılmıştır. Konserve yüzeyinde indüksiyonla oluşan ısı akısı değeri sınır koşulu olarak kullanılmış ve ürün başlangıç sıcaklık değeri sabit kabul edilmiştir. Comsol yazılımında verilecek olan denklemler eş zamanlı bir çözüm elde edilmesi amacıyla kullanılacaktır. Magnetic field modül sistemi içi elektromanyetik alan değişiminin ve ürün yüzeyinde meydana gelen ısı akısı değerinin belirlenmesi amacıyla denklik 9 kullanılacaktır (Chew, 2020)(Butler & Zhang, 2016)(Comsol).

$$\begin{aligned}
\nabla \times H &= J \\
B &= \nabla \times A \\
J &= \sigma E
\end{aligned}
\tag{9}$$

Denkliklerde H ve B manyetize ve manyetik alan vektörleri (tesla), E elektrik alan vektörü (V/m), J serbest akım yoğunluğu (A/ m²) değişimlerini, σ ortamın iletkenliği(S/m) ve A uygulanan akım değerini göstermektedir. İlgili denklkler elektromanyetik ısıtma problemlerinin manyetik alan kısmının temelini oluşturmaktadır. Bu üç denklikte bobinden geçirilen akım, çevresinde manyetik alan meydana getirmektedir. Manyetik alandan manyetik akı doğar ve değişen manyetik akı ile elektrik alan indüklenir ve böylelikle iletken bölgede ısı üretimi, indüksiyonla ısıtma gerçekleşmektedir. Sistem dış yüzeyinde manyetik alan izolasyon sınır koşulu kullanılmıştır. Denklem 10 manyetik vektör potansiyelinin teğetsel bileşeninin sıfır olmasını ifade etmektedir(Comsol).

$$n \times A = 0 \tag{10}$$

Denklem yüzeye dik vektörün çarpımı n ve manyetik vektör potansiyelinin (A) çarpımının yüzeyde sıfıra eşit olması gerektiğini göstermektedir. Manyetik akının sistem dışına çıkmadığı varsayımı temsil edilmektedir. Sınırın manyetik olarak yalıtılmış olduğunu göstermektedir. Sınır yüzeyinden manyetik akı geçişinin olmadığını ve manyetik alan çizgilerinin yüzeyi kesmeden sistem içerisinde kapalı olarak kaldığı kabul edilmektedir. Bu çalışmada ürün içi sıcaklık dağılımındaki değişimlerin tespit edilebilmesi için kullanılan ısı transferi Denklem 11’de verilmiştir(Heat Transfer Module User’s Guide, 1998).

$$\begin{aligned}
\rho c_p u \nabla T + \nabla q &= q'' \\
q &= -k \nabla T
\end{aligned}
\tag{11}$$

Yoğunluk p (kg/m³), özgül ısı kapasitesi c_p (J/kg. K), k ısıl iletkenliği (W/ m.K), vektörel formda ısı akı vektörü q (W/m²), ürün hız profil değişimi u , sıcaklık değişim T ve yüzey ısı akısı q'' (W/m²) ile ifade edilmektedir. Konveksiyon ve iletim yoluyla ısı transferi denklkler ile modele dahil edilmektedir. Denkliğin ilk kısmında yer alan $\rho c_p u \nabla T$ akışkanın sıcaklık farkı nedeniyle taşıdığı ısıyı ifade etmektedir. ∇q , ısının yayılmasını iletimle olduğunu göstermektedir. Akışkanın sıcaklık gradyanı ile

akış hızı(u) ile çarpılarak ısı taşınma hızı hesaplanmaktadır. Formülde yer alan eksi işareti, sıcaklık farkı doğrultusunda ısı akışının yüksekten düşük sıcaklığa doğru gerçekleştiğini belirtmektedir.

Ürün içi sıcaklık değişimiyle oluşan doğal konveksiyona bağlı olarak akış profilinin belirlenmesi için laminar akış modülü kullanılmıştır. Konserve yüzeyinde indüksiyonla oluşan ısı akı değerine göre ürünler içerisinde gerçekleşen ısı transferine bağlı olarak doğal konveksiyon oluşacaktır. Bu sebeple ürün içerisindeki basınç değişimlerinin ve akış profilinin belirlenebilmesi amacıyla Navier- Stokes denklemi kullanılarak modellenmiştir. Konserve yüzeylerinde sınır koşulu olarak kaymama koşulu kullanılacaktır. Çalışmada konserve kutu içerisinde yer alan sıvı-gaz ürün ara yüzeyine bağlı olarak modelleme yaklaşımları uygulanacaktır (Denklem 12)(Pipe Flow Module User's Guide, 1998)(Comsol, 2023).

$$\begin{aligned}\rho(u \cdot \nabla)u &= \nabla \cdot [-pI + K] + F \\ \rho \nabla \cdot u &= 0 \\ F &= \rho g\end{aligned}\tag{12}$$

Denklikte yer alan yoğunluk ρ (kg/m^3), hız vektörü $u(\text{m/s})$, birim matris I , viskoz stres tensörü $K(\text{Pa})$, hacim kuvvet vektörü $F(\text{N/m}^3)$, yerçekimi ivmesi $g(\text{m/s}^2)$ ve basınç p (Pa) değerlerine karşılık gelmektedir. Bu ifade akışkanın hareketini, momentum dengesini tanımlamaktadır. İlk denklikte $(u \cdot \nabla) u$ atalet kuvvetlerini, denkliğin diğer kısmında ise basınç, viskoz ve dış kuvvetler etki etmektedir. Süreklilik denklemi $\rho \nabla \cdot u = 0$, akışkanın sıkıştırılmaz olduğu varsayımında kullanılmıştır. Akışkanın kütle miktarı dengededir, kütle korunumu sağlanmaktadır. $F = \rho g$ denklemi akışkana etki eden hacim kuvvetini göstermektedir ve dış kuvvet olarak sıcaklık farkından kaynaklanan doğal konveksiyon etkisi dahil edilmiştir.

Matematiksel model doğrulama çalışmalarında doğrulanmış model kullanılarak termal ölüm süresi-letalite ve sterilizasyon değeri ürün içi soğuk bölge sıcaklık değişimi ile hesaplanacaktır. Gerekli proses süresi farklı işlem parametrelerine göre belirlenecektir (Denklem 13)(Praharaştı vd., 2020)(Lee vd., 1990)(Deák, 2014).

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T(z) - T_{ref}}{z}} dt\tag{13}$$

T_{ref} referans sıcaklık olan $121,1^{\circ}\text{C}$ 'yi, T ürünün o anki sıcaklığını, z değeri (hedef mikroorganizmanın veya enzimin D değerini $1/10$ 'a düşürmek için gerekli sıcaklık artışını) göstermektedir. D değeri belirli bir sıcaklıkta, bir mikroorganizmanın sayısını %90 azaltmak ve geriye kalanların onda birini bırakmak için gereken süreyi kapsamaktadır. Soğuk noktanın T sıcaklığında durma süresi t olarak ifade edilmiştir. Her sıcaklık değişiminin meydana geldiği süreler toplamında oluşan mikrobiyal azalma toplam letaliteye karşılık gelmektedir. F_0 değeri, referans sıcaklıkta eşdeğer öldürme süresini hesaplamaktadır. Bu değer zamanla değişen sıcaklık profilinin referans sıcaklıkta genellikle $121,1^{\circ}\text{C}$ 'de oluşacağı eşdeğer ısı etkiyi temsil etmektedir. Mikrobiyal azalma için ticari sterilizasyon dikkate alınarak düşük asitli gıda ürünlerinde hedef mikroorganizma olarak kullanılan *Clostridium botulinum* için D_{121} ve z değerleri sırasıyla 0,21 dakika ve 10°C olarak kullanılacaktır (Paul Singh & Heldman, 2009)(Featherstone, 2014).

Sistemin deneysel doğrulaması için simülasyon sonuçları ve sıcaklık verileri arasındaki sonuçların karşılaştırılmasında RMSE değeri hesabı kullanılacaktır. RMSE değeri deneysel veriler ve nümerik model sonuçları arasındaki ortalama sapmayı istatistiksel olarak ifade etmektedir ve modelin genel doğruluk düzeyini sayısal olarak ifade etmektedir. RMSE değerinin 5'ten küçük olması model doğrulama kapsamı dahilinde yeterli olacaktır. RMSE denkliği Denklem 14'te verilmiştir(Son vd., 2022). T ölçüm noktasındaki deneysel sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$), $T_{simulation}$ aynı noktadaki simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) ve N toplam veri sayısını oluşturmaktadır. İlgili denklik ile tüm ölçüm noktalarındaki sıcaklık farklarının karelerinin karekökü alınarak model ve deney arasındaki genel hata büyüklüğü belirlenmektedir. RMSE değerinin düşük olması, simülasyon sonuçlarının deneysel verilere yüksek doğrulukla uyduğunu göstermektedir.

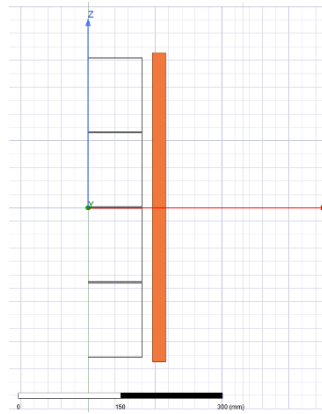
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T - T_{simulation})^2} \quad (14)$$

Belirlenmiş olan parametreler ile değerlerin fiziksel olarak elde edilebilir ve üretimde kullanılabilir olması önemli bir tasarım adımı olmuştur. Çalışmada ürün içi sıcaklık değişimleri bağımlı değişken, değişken frekans, güç ve bobin çapı, et kalınlığı, sarım sayısı vb. işlem parametreleri ise bağımsız değişkenler olmuştur.

Modelleme çalışmalarında bobin geometri analizi için MUMPS, zamana bağlı çözümler ve frekans analizleri için direkt çözücü MUMPS ve iteratif çözücü olarak BICGStab (Biconjugate gradient stabilized method), izotermal olmayan akış profili çözümü PARDISO (parallel sparse direct solver) kullanılmıştır.

6. Gerçekleştirilen Ön Çalışmalar

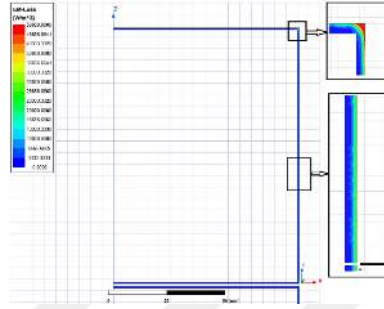
Çalışma kapsamında öncelikli olarak bir ön çalışma gerçekleştirilmiş olup sonrasında çalışma detaylandırılmıştır. Ön çalışma ile sistemin teorik olarak çalışması kontrol edilip sonrasında parametreler detaylandırılarak çalışmaya devam edilmiştir. Tezin ön çalışmasında, ANSYS/Maxwell ve Comsol sonlu eleman yazılımları kullanılmış ve elektromanyetik yaklaşımla konserve materyalinin sıcaklık dağılımının elde edilmesinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ön çalışmada ilk örnek analiz için ANSYS/Maxwell programında Z ekseninde 2 boyutlu model oluşturulmuştur. Öncelikli olarak iki boyutlu olarak sistem geometrisinin hazırlanma nedeni matematiksel modellerde daha az ağ yapısına ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 23'te elektromanyetik tasarımı etkileyen 4 adet konserve kutusu ve indüksiyon sargısı gösterilmiştir.



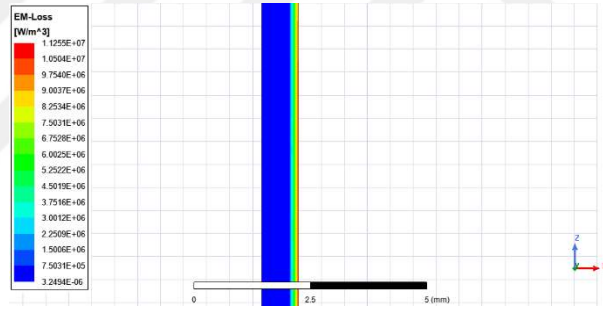
Şekil 23. Analiz için oluşturulan ön model

Ön çalışmalarda 200 Amper sarım ve 50 kHz frekans bir ön analiz yapılmıştır. Konserve materyalleri alüminyum ve çelik tabanlı olmak üzere 2 ayrı simülasyonda incelenmiştir. Elektromanyetik kayıp değerleri karşılaştırılan iki malzeme de konserve kutularının çelik malzemeden olması durumunda daha fazla ısı akısı olduğu belirlenmiştir. Artan elektromanyetik kayıplar, yüzeyde daha yoğun ısı üretimi

anlamına gelmektedir. Bu sebeple çelik malzemede indüksiyon ısınması daha etkili, sıcaklık gradyanı daha yüksek ve ısı verim daha düşüktür. Alüminyum ve çelik esaslı malzemeler için elektromanyetik güç yoğunluğu dağılımının yer aldığı ön analiz sonuçları verilmiştir (Şekil 24- 25).



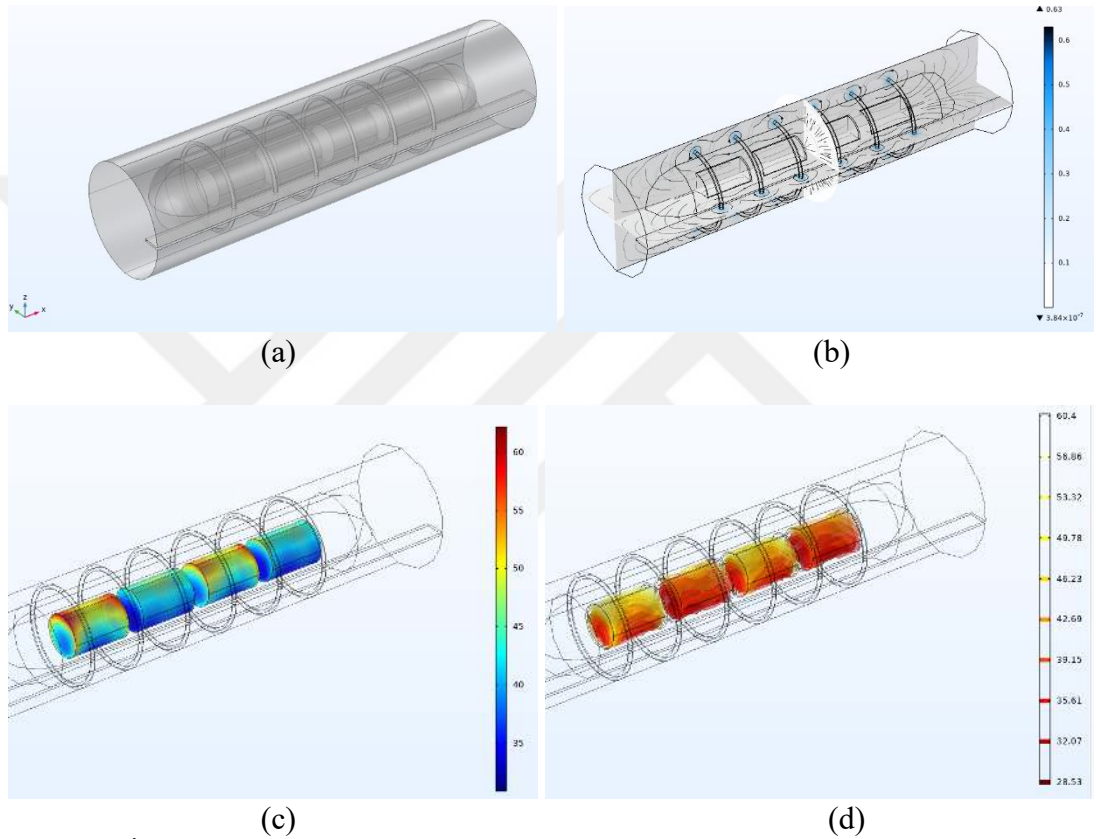
Şekil 24. Alüminyum malzeme ön analiz sonuçları



Şekil 25. Çelik malzeme ön analiz sonuçları

Ön analiz sonuçlarına bağlı olarak detaylandırılacak analizlerde konserve kutularının yanal yüzeyinde ince bir tabakada girdap akımlarının oluşturduğu ısı miktarı, termal analizden elde edilen sonuçlar doğrultusunda akım, frekans ve sarım sayısı faktörleri farklı değerlerde incelenerek optimum değerler elde edilmiştir. Ön analizlerde elde edilen ısı akısı alüminyum ve çelik malzeme için ortalama 3.4 kW/m^2 ve 162 kW/m^2 olarak bulunmuştur. Analiz parametrelerine bağlı olan ısı akısı, kayıplar hariç olmak üzere konserve içerisindeki gıdanın ısınması için harcanacak ve konserve içerisindeki gıda ürününde sıcaklığa bağlı olarak letalite- sterilizasyon değerleri hesaplanacaktır.

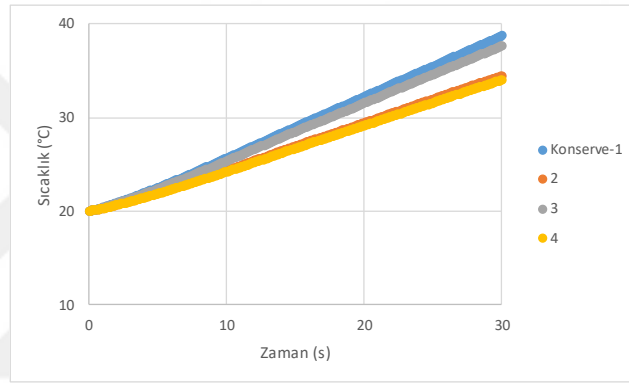
Analiz çalışmasının bir diğer ön basamağında Comsol programı ile örnek bir sistemde su dolu konservelerin sıcaklık dağılımı ve sistem içerisindeki manyetik akı yoğunluğu değişimi Şekil 26’da verilmiştir. Analiz çalışmasında çoklu sarmallı bobin sistemi kullanılmıştır. 4 adet konservenin bulunduğu silindirik bir kaviteye yerleştirilmiş sistemde çoklu sarmallı bobin gövde etrafına düzenli aralıklarla yerleştirilmiştir. Sistem en dış yüzeyinin de elektromanyetik alanı geçirmediği kabul edilmiştir.



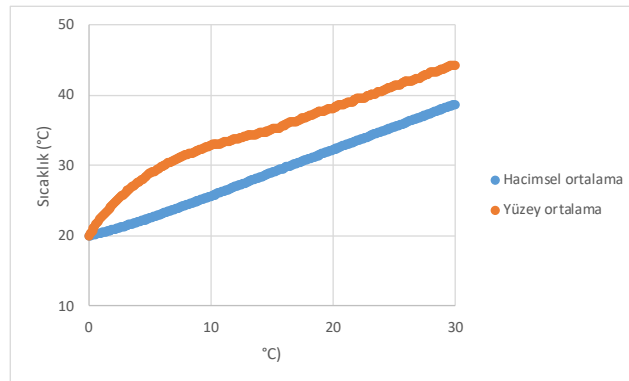
Şekil 26. İndüksiyon işleminin uygulandığı silindirik kavitede sistem içerisinde oluşan (a) manyetik akı yoğunluğu değişimi (b) ısıtılan su dolu konserveler içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı (c) eş-sıcaklık eğrileri (d)

Sistemde yer alan 4 adet su dolu konserveler soldan sağa doğru 1, 2, 3, 4 olarak sıralanmış ve hacimsel sıcaklık ortalama değişimleri Şekil 27’de verilmiştir. Gövde etrafına eşit uzaklıklarla yerleştirilmiş bobinler sistem yüzeyinde yerleştirildikleri uzaklıklara bağlı olarak 1 numaralı ürün en hızlı ısınan konserve olmuştur. Sistem içerisinde konserveler belirli bir aralıkta, düzen içerisinde yerleştirilmiştir. En hızlı ısınan 1 numaralı ürünün yüzey sıcaklığı ile hacimsel ortalama sıcaklık farkı Şekil

28’de verilmiştir. Görüldüğü üzere konserve ürün yüzey sıcaklığı ile hacimsel ortalama sıcaklık değişimi arasındaki fark, kullanılan yüksek ısıl iletim katsayısına sahip konserve materyaline bağlı olarak çok yüksek olmamıştır. Isıl işlem için 30 saniye boyunca meydana gelen sıcaklık artışı da ön çalışmalar kapsamında sistem için hedeflenen sistem verimliliğini göstermektedir. Sonuçlar incelendiğinde konvansiyonel uygulamada elde edilebilmesi için ortam ısı transfer katsayısının $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve üzeri yani sonsuz bölgede olması gerektiği de belirlenmiştir. İlgili değerin daha fazla konserve içeren bir sistemde tüm konserve yüzeylerinde homojen bir biçimde elde edilmesi zor bir durumdur ancak sonuçların konvansiyonel sistemlere proses aşamasında avantaj sağlayacağı da öngörülmektedir.



Şekil 27. Konservelerin hacimsel sıcaklık ortalama değişimleri



Şekil 28. 1 numaralı ürünün yüzey sıcaklığı ile hacimsel ortalama sıcaklık farkı

Comsol ön çalışmasında kesikli bobin örgüsü kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ön analiz çalışmalarından sonra konserveler içerisinde meydana gelen sıcaklık farklılıkları bobinlerin doğru bir şekilde yerleştirilmesiyle düzeltilmiştir. Ön çalışmalara bağlı olarak sistemin soğutma sistem tasarımı ve imalatı için soğutma

yükü ve bu soğutma yükünü karşılayacak soğutma sistemi ekipman kapasiteleri öngörülmüştür. Ticari olarak genellikle konserve 120 ° C'den 30-40 ° C'ye soğutulması için 30 dakika içerisinde 20 ° C soğutma suyu ile gıdanın 120 ° C'den 30-40 ° C'ye soğutulması sağlanmalıdır. Belirtilen koşullarda soğutma yükünün belirlenmesinde konserve içerisindeki gıdanın termofiziksel özellikleri dikkate alınarak konserve zamanla ilgili ısı iletimi hesaplanmış ve gıdanın ısı işlem için soğutma yükü tespit edilmiştir. Gıda içerisindeki ısı iletimi ve yüzeyindeki taşınım koşullarına göre analitik çözüm uygulaması kullanılarak Fourier sayısı 0.2'den büyük olacağı yaklaşımla soğutma yükü teorik olarak hesaplanmıştır. Başlangıç ön analizlerinde teorik hesaplamalarda konserve boyu 21.94 mm ve gıda ürünü için ısı yayılım katsayısı değeri yaklaşık 1.1 E-7 m²/s kullanılmıştır. Bunlara bağlı olarak Fourier sayısının 0.2 olması için gerekli zaman yaklaşık olarak 15 dakika belirlenmiştir. Isıl işlem uygulaması ardından uygulanan soğutma prosesinde soğutma süresi bu değerden daha uzun olacağı için analitik çözümde yalnızca birinci terimin dikkate alınmasını sağlayan Fo>0.2 koşulu geçerli kabul edilmiştir. Ön hesaplamalarda her bir konserve için soğutma yükü 96.97 W olarak belirlenmiş ve 4 konserve için %10 emniyet unsuruyla toplam soğutma yükü 426.7 W olarak hesaplanmıştır.

Sistemin tek bir üniteden kontrol edildiği bir PLC ünitesi hem indüksiyon sistemi hem de motorun bağlı olacağı sıcaklık zaman kombinasyonunda ürüne bağlı olarak değişikliklerin veri girişinin gerçekleştirileceği ve sıcaklık, indüksiyon gücü kullanımı ve basınç gibi tüm parametrelerin yer alacağı bir ünite sistemde yer almıştır. PLC sistem ile kontrollü ısıtma, soğutma ve basınçlandırma parametreleri PLC sistem ile yürütülecektir. Konserve 120 ° C'den 30-40 ° C'ye soğutulması için sıcaklık verileri konserve yüzeyinden alınacaktır. PLC sistemine verilen hedef çevrim şartlarına göre verileri analiz ederek gıdanın görmesi gereken ısıtma ve soğutma çevrimlerini otomatik olarak kontrol altında tutacaktır. Sisteme konumlandırılacak basınç sensörleri ile iç ortam basıncı ölçülecek ve veriler PLC sistemine aktarılacaktır. Sistem ambalajı içerisindeki basıncı dengelemek için ortalama 2 bar basınç oluşturulması sırasında kontrollü basınç artışı sağlanırken hedef basıncın aşılması halinde çek valfleri devreye alınarak stabil bir basınç kontrolü gerçekleştirilecektir. Hedef parametreler PLC kontrolcüsüne verilerek otonom bir şekilde gerçekleştirilecektir.

Ön çalışmalara bağlı olarak sistem değerlendirilmiş ve analizler parametrelere bağlı olarak detaylandırılarak gerçekleştirilmiştir.

7.Modelin Geliştirilmesi ve Parametrelerin Tanımlanması

Sistem çalışmalarında eş zamanlı olarak iki yazılım kullanılarak matematiksel model tasarım çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Matematiksel model çalışmaları ile konserve boyutları ve ürünün sistem içerisine tanımlanması, retort sisteminde bakır bobin sarımı, akım frekansı ve genliği gibi gerekli parametreler belirlenmiştir. Ürün sıcaklık değişimi için gereken proses parametrelerini belirlemek amacıyla indüksiyon gücü, sargı akım genliği ve frekansı, sarım sayısı ve sıklığı parametreleri belirlenmiştir.

Comsol çoklu fizik programı ile yapılan çalışmalarda Heat Transfer In Solids and Fluids, Laminar Flow ve Magnetic Field fizikleri sistem içi manyetik alan ve ürün içi ısı transfer dağılımını belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Tanımlanan fiziksel sınır koşullarında matematiksel model geliştirme çalışmalarının ön analizlerinde yer alan Denklem 9-12 kullanılmıştır. Matematiksel modelleme çalışmaları ile sistem için gerekli bağımsız değişken parametreler optimum ısıtma parametrelerini oluşturacak şekilde belirlenmiştir.

Matematiksel model çalışmaları kapsamında sistem içerisinde konserve malzemesi olarak 1010 çeliği, konserve içi ürün su, yalıtım materyali FR4 ve bobin malzemesi bakır olarak belirlenmiştir. Kullanılan materyallerin özellikleri ve çözüm ayarları ekte yer almaktadır (EK1-5).

Modelleme çalışmalarında keten gibi doğal liflere benzerliği olan yalıtım malzemesi olarak dielektrik ve fiziksel özelliği bilinen FR4 kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında hem keten hem de FR4 materyalinin ısı transferi ve manyetik anlamda bir fark oluşturmadığı gözlemlenmiştir. Tasarım çalışmalarında sistem, bobin boyutları ve konserve ürün sabit tutulmuş bobin sarım sayısı, sistem geometrisi, uygulanan akım genliği ve frekansı ve FR4 kalınlığı değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Değişken parametreler optimum sürede istenilen sıcaklığa ulaşılması için farklı kombinasyonlar ile detaylandırılarak incelenmiştir. Sistem içerisinde yer alan parametrelerin ölçüleri Tablo 4'te verilmiştir.

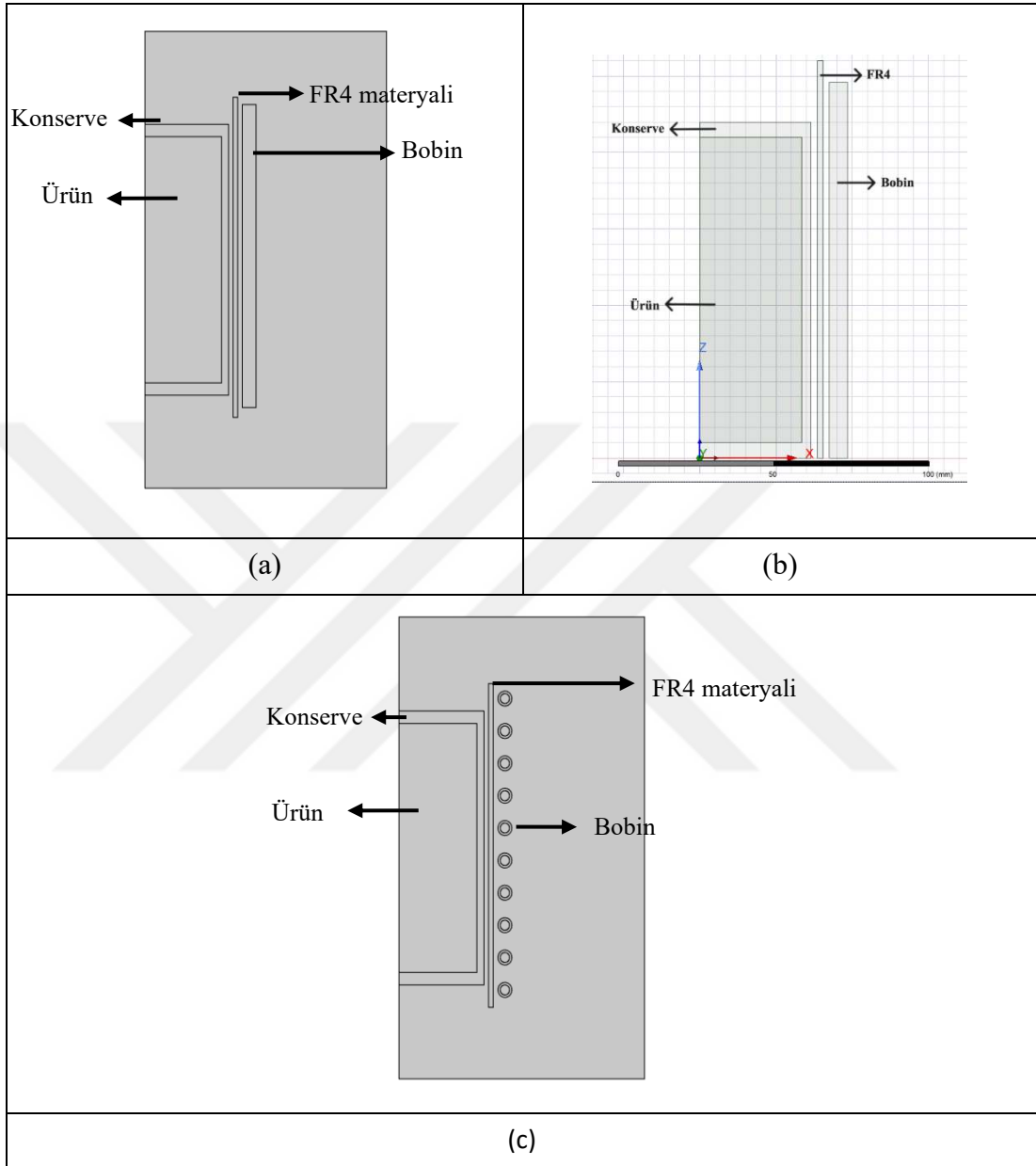
Tablo 4. Model geometrisine ait boyut bilgileri

Bileşen Adı	Boyutsal Özellikler (mm)	Adet
Konserve	36.5 x 110	1 ve 4
Ürün	33.5 x 100	1 ve 4
FR4 Bloğu	2 x 130 ve 2 x 515	1 ve 4
Bobin (Dikdörtgen)	6 x 123 ve 6 x 513	1
Bobin (Dairesel)	İç yarıçap 2, dış yarıçap 3	10 ve 40
Sistem	109.5 x 742	1

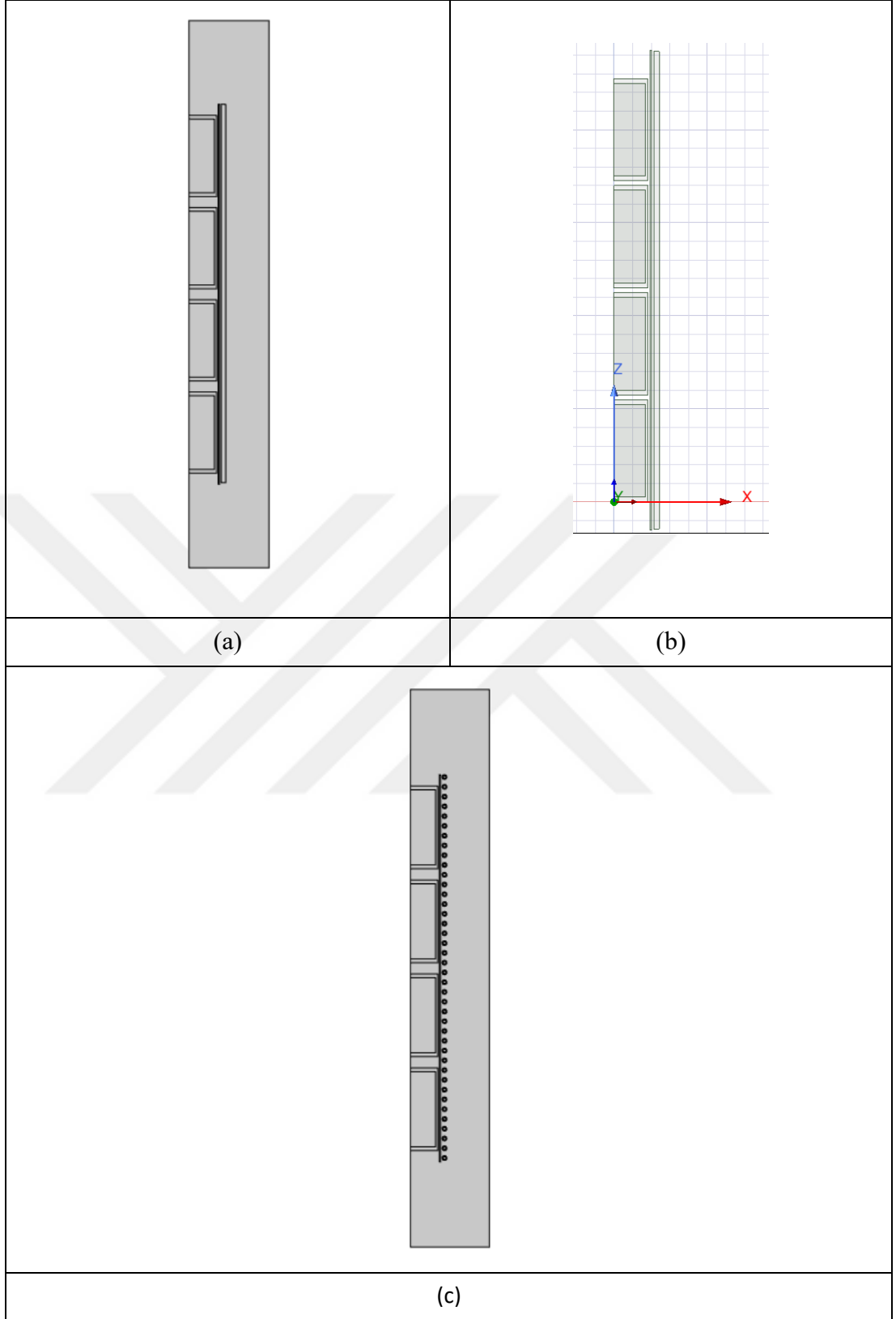
Comsol ve ANSYS/Maxwell programında eş zamanlı yürütülen sistemin modellemesi Şekil 29’da tek konserveli sistem için hem dikdörtgen hem de dairese bobin için verilmiştir. Şekil 30’da dört konserveli sistem için dairese ve dikdörtgen bobinler için sistem görselleri gösterilmektedir. Tablo 4’e göre bir konserve için detaylı örneklendirme Şekil 31’de yer almaktadır. 2D- Eksenel simetri kullanılarak iki farklı bobin geometrilerinin ölçüleri Ek 6’da verilmiştir. Buradaki ana amaç kaç dairese sarım yapıldığında, bu sarımların birer dikdörtgensel bobine karşılık geleceğini göstermektir. Hedef doğrultusunda 115 mm uzunluğa sahip dikdörtgensel bobin yerine farklı sayılarda dairese bobinler matematiksel modele eklenmiştir. Matematiksel modellemede uzunluk boyu değiştirilmeden sadece dairese bobin sayısı 3,5,10 ve 18 daire olarak hazırlanmıştır bu modeller Ek 7’de yer almaktadır. Sonuçlar incelendiğinde indüksiyon sisteminde bobin sarımlarının artmasıyla bu sarımların dikdörtgensel olarak gözükebileceği varsayımı yapılmıştır.

Dikdörtgensel ve dairese bobin denkliklerinin gerçekleştirildiği çalışmalarda matematiksel modeller 1500 amper gücünde ve 25 kHz frekansında toplam 300 saniye boyunca zamana bağlı olarak çalıştırılmıştır. Matematiksel modelde, bobinlerin materyali bakır olarak tanımlanmış ve konservenin materyali 1010 çelik, konserve içerisinde bulunan sıvı saf su olarak tanımlanmıştır. Sistemin başlangıç sıcaklığı 20 °C olarak tanımlanmıştır. Matematiksel modellerin çalıştırılması sonrasında 300. saniyede konserve ve konserve içerisinde oluşan sıcaklık profilleri Ek 8’de verilmiştir. Yapılan analiz çalışmasına bağlı olarak dikdörtgensel ve dairese bobin geometrilerine ait matematiksel modellemelerden, konserve içerisinde bulunan saf suyun hacimsel ortalama sıcaklık- zaman değerleri karşılaştırması Ek 9’da yer almaktadır. Bu yaklaşım ile indüksiyon sistemindeki sarım sayısının artmasıyla birlikte silindirik

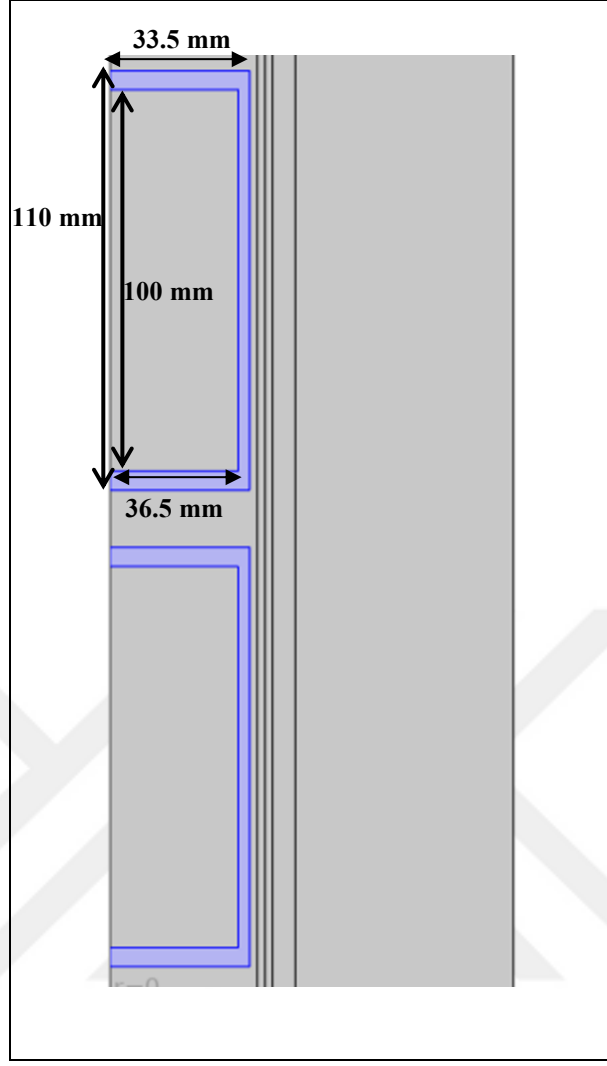
dairesel sarımların silindirik dikdörtgensel sarımlara yaklaşması görülmektedir. Bu durum beklenen bir yaklaşımdır. Sistemde bobin sarımları çok sık olacak şekilde planlanmıştır.



Şekil 29. Tek konserveli sistemde Comsol yazılımında dikdörtgen bobinli(a); ANSYS/Maxwell yazılımında dikdörtgen bobinli(b); Comsol yazılımında dairesel bobinli(c)

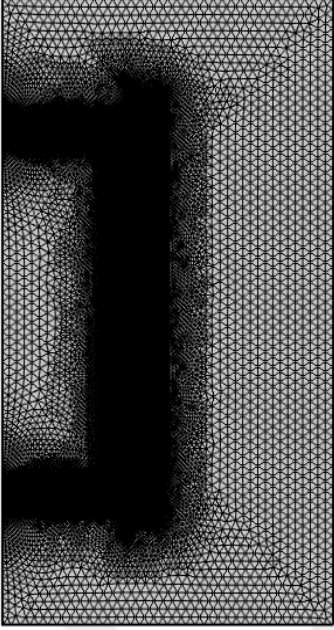
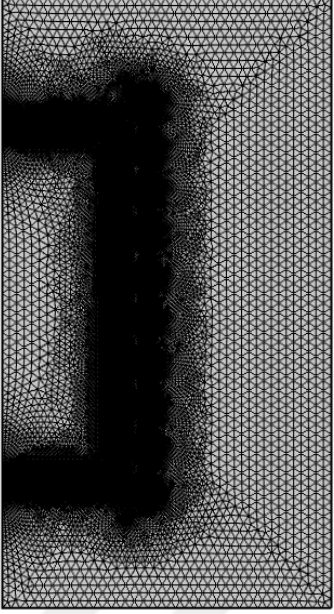
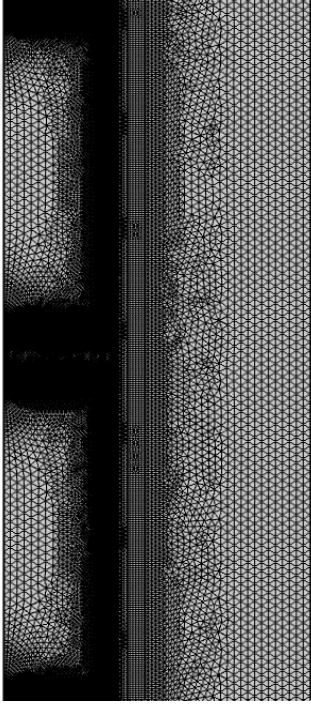
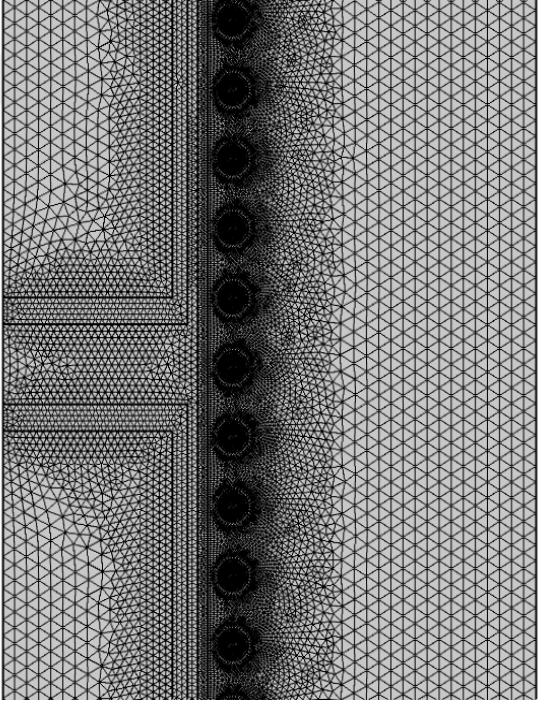


Şekil 30. Dört konserveli sistemde Comsol yazılımında dikdörtgen bobinli(a); ANSYS/Maxwell yazılımında dikdörtgen bobinli(b); Comsol yazılımında dairesel bobinli(c)



Şekil 31. Konserve Boyutları

İki yazılım sonuçlarının karşılaştırılmasıyla elde edilen ürün ve konserve yüzeyinde oluşan sıcaklık değerleri için hedef sıcaklık 120°C'den oluştuğu kararlaştırılmış ve bu değerin aşılmamasına dikkat edilmiştir. Geleneksel bir sterilizasyon prosesinde 2 bar toplam basınç altında gerçekleştirildiği için bu koşullarda suyun kaynama noktası 121°C olduğundan ürün yüzey sıcaklık değerinin bu sınırdan kalması bir proses tasarım parametresi olarak kullanılmıştır. Sistemlere gerçekleştirilen ağ yapıları Şekil 32'de verilmiştir.

	
(a)	(b)
Eleman Sayısı: 43653	Eleman Sayısı: 43653
	
(c)	(d)
Eleman Sayısı: 116008	Eleman Sayısı: 120253

Şekil 32. Tek konserveli sistemlerde dikdörtgen bobinli (a), dairesel bobinli (b), dört konserveli sistemlerde dikdörtgen bobinli(c), ve dairesel bobinli (d) sistemlerin ağ yapıları

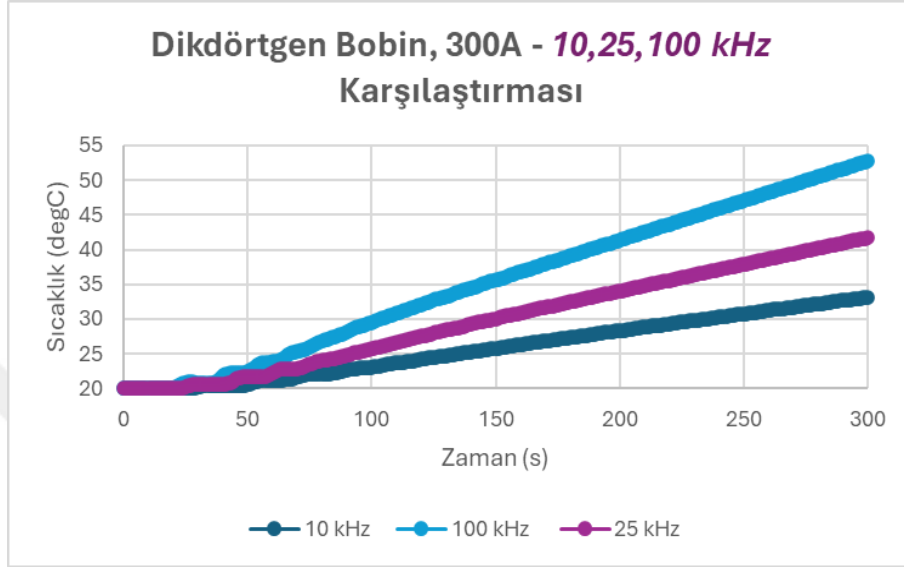
7.1 Frekans Etkisi

İndüksiyon ile ısıtma girdap akımları ile ısınma işleminin gerçekleştiği ve bu sebeple girdap akımlarını etkileyen faktörlerin ısıtma işleminde önemli parametreler olduğu bilinmektedir. Sistemde yer alan materyalin elektriksel ve fiziksel özellikleri, sistemin frekans değerleri ve akım yoğunluğu ısıtma işlemini etkileyen faktörlerdir(Baranoglu vd., 2020). Çalışmada analiz aşamasında sisteme farklı akım frekanslarının uygulanmasıyla ürünün sıcaklık değişimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. İndüksiyon ısıtma sistemlerinde oluşan ısı enerjisi, uygulanan akımın genliği ve frekansına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle frekansın artması, elektromanyetik alanın malzeme içerisinde indüklediği girdap akımların dağılımını ve yoğunluğunu değiştirerek Joule kayıpları sıcaklık profilini etkilemektedir. Meydana gelen bu durum elektromanyetik alanın nüfuz derinliğini azaltarak ısının daha çok yüzeysel bölgelerde yoğunlaşmasına neden olur. Dolayısıyla, akım frekansı ve genliğindeki değişimler ürün sıcaklık profilinin belirlenmesinde önemli temel parametrelerdir. Ancak yarı iletken anahtarlama elemanları düşük güçlerde yüksek frekanslara çıkabilirken, yüksek güçlerde akım frekansını artırmayı kısıtlayan anahtarlama elemanlarının termal sınırları, anahtarlama kayıpları ve elektromanyetik girişim vb. etkenler bulunmaktadır.

Yüksek frekanslar ile çalışan sistemlerde, özellikle IGBT ve MOSFET yarı iletkenleri kullanıldığında, anahtarlama kayıpları değişiklik göstereceği için bu durum sistem verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Ek olarak yüksek frekansta çalışmanın getirdiği devre parazitleri ve izolasyon zorlukları da sistem tasarımında önemli kısıtlar oluşturmaktadır. İlgili faktörler dikkate alındığında, model sonuçları kapsamında gerçekleştirilen analizlerde farklı frekanslarda (10, 25 ,100 kHz) sistem performansı incelenmiş ve en uygun çalışma parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Şekil 33'te üç farklı frekansa bağlı olarak konserve yüzeylerinden elde edilen sıcaklık değerleri verilmiştir. Frekans arttıkça sıcaklık artış hızı belirgin bir biçimde yükselmektedir. Bu durum, yüksek frekanslarda elektromanyetik alanın daha yüzeysel bölgelerde yoğunlaşması ve malzeme içerisinde daha yüksek yoğunlukta girdap akımı oluşturmasıyla ilişkilidir. Dolayısıyla Joule ısınması artmakta ve sistem hızlı bir şekilde yüksek sıcaklık değerlerine ulaşmaktadır. Düşük frekansta ise enerji aktarımı

daha hacimsel gerçekleştiği için sıcaklık artışı daha yavaş ve homojen olmaktadır bu sebepler nedeniyle ideal sistem frekansı 25 kHz olarak belirlenmiştir. 100 kHz frekansta ürün sıcaklığının hızlı artışı yüzey sıcaklık kontrolünü engelleyebileceği için ve 10 kHz frekans değerinde ise ürün sıcaklık artışının sınırlı olması nedeniyle proses süresini olumsuz etkileyebileceği dşnlmştir.

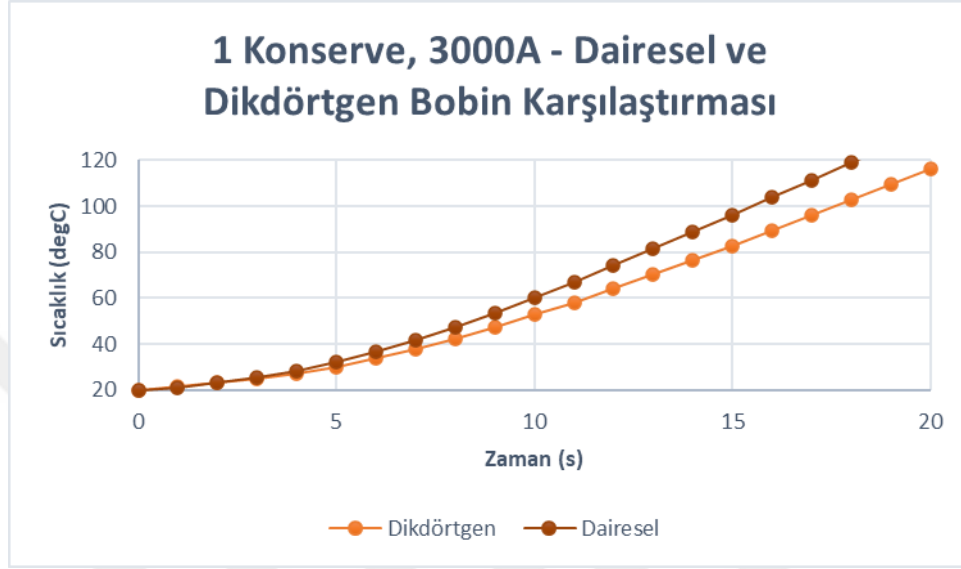


şekil 33. Tek konserveli, dikdörtgen bobinli sistemde 300 Amper indüksiyon gücünde 10, 25, 100 kHz sistem frekanslarında konserve yüzeylerinden elde edilen ortalama sıcaklık değerleri

7.2 Akım Etkisi

Modelleme çalışmalarında sargılardan geçen akım miktarı ile tur sayısının çarpımı 300, 1200, 3000 ve 12000 amper tur olmak üzere dört farklı değerde analizler gerçekleştirilmiştir. Belirlenmiş olan 25 kHz frekans değerı sabit alınmış ve modeller 30 saniyelik proses sürelerinde çalıştırılmıştır. Analizler ncelikli olarak tek konserveli sistemlerde gerçekleştirilmiş ve bobin geometrisinin dikdörtgen ve dairesel olması durumunda sistemde oluşan etkileri incelenmiştir. Tablo 4'te verilen dikdörtgen ve dairesel bobinlerin boyutsal özellikleri doğrultusunda analizler yapılmıştır. Sistem içerisinde yapılan analizlerde dikdörtgen bobin kullanımında mesh yapısının daha düşük seviyede olması nedeniyle modeller daha kısa sürede tamamlanmaktadır. Bu doğrultuda bobinleri gerçek sistemde olduğu gibi dairesel şekilde modelleyerek her bir sarıma ayrı akım uygulanması yerine, aynı elektriksel

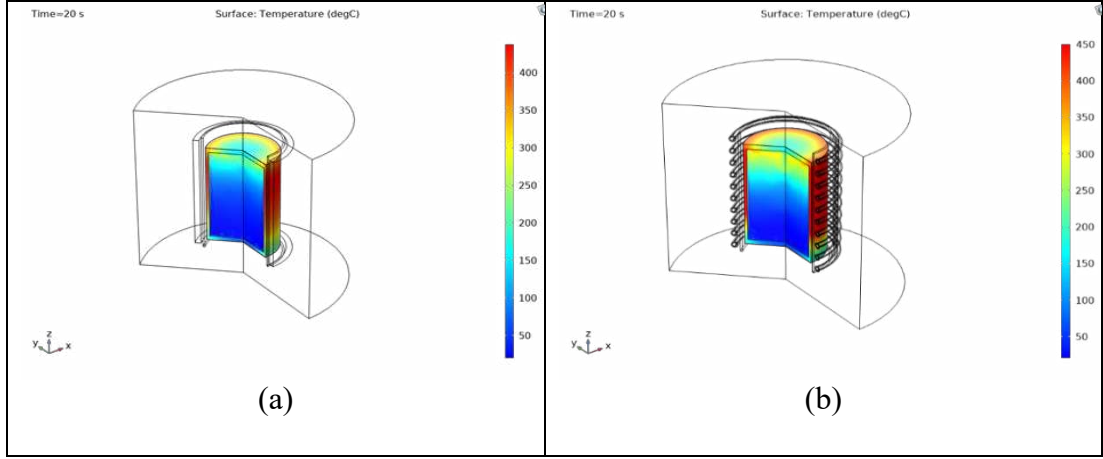
etkiyi oluşturan toplam amper- tur değerini tek bir dikdörtgen bobine verilmesi denk bir yaklaşım oluşturmaktadır. Böylelikle sistem elektromanyetik davranışını doğru bir şekilde yansıtır ve simülasyon süreleri önemli bir oranda azalmaktadır. Şekil 34’te tek konserveli bir sistem için iki farklı bobin geometrisinin sıcaklık değişimine etkisi görülmektedir.



Şekil 34. 25 kHz, 3000 Amper akım ile çalıştırılan tek konserveli sistemde dairesele ve dikdörtgen bobin kullanımının ürün yüzeyindeki ortalama sıcaklık değişimine etkisi

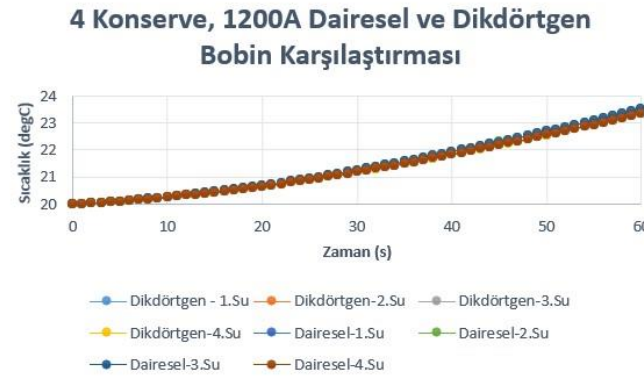
7.3 Bobin geometrisinin etkisi

Tek konserveli sistemde on dairesele bobin sistemi ile tek dikdörtgen bobin içeren sistemin modelleme çalışmalarında elde edilen sıcaklık dağılımları benzer sonuçlar göstermiştir. Dairesel ve dikdörtgen bobin geometrisiyle gerçekleştirilen analizlerde sıcaklık değişimlerinin benzer eğilim göstermesi, sistemin elektromanyetik bağlanma koşullarının ve güç aktarımının geometriden bağımsız olarak optimum seviyede sağlandığını göstermektedir. Sonuçların benzer aralıklarda ve yakın olması malzemenin elektromanyetik özelliklerinin sistem performansında belirleyici olduğunu göstermektedir. İki farklı sistemin ürün merkez noktasından alınan sıcaklık değerleri ve ortalama yüzey sıcaklıkları arasında önemli oranda bir fark meydana gelmemiştir. Şekil 35’te tek konserveli dairesele ve dikdörtgen bobin sisteminde aynı güç ve proses süresi sonucunda 3000 amper tur akım ve 20 saniye proses süresinde ürünün ortalama yüzey sıcaklığı dairesele ve dikdörtgen bobin sisteminde eşdeğer sıcaklıklara ulaşabildiği görülmektedir.

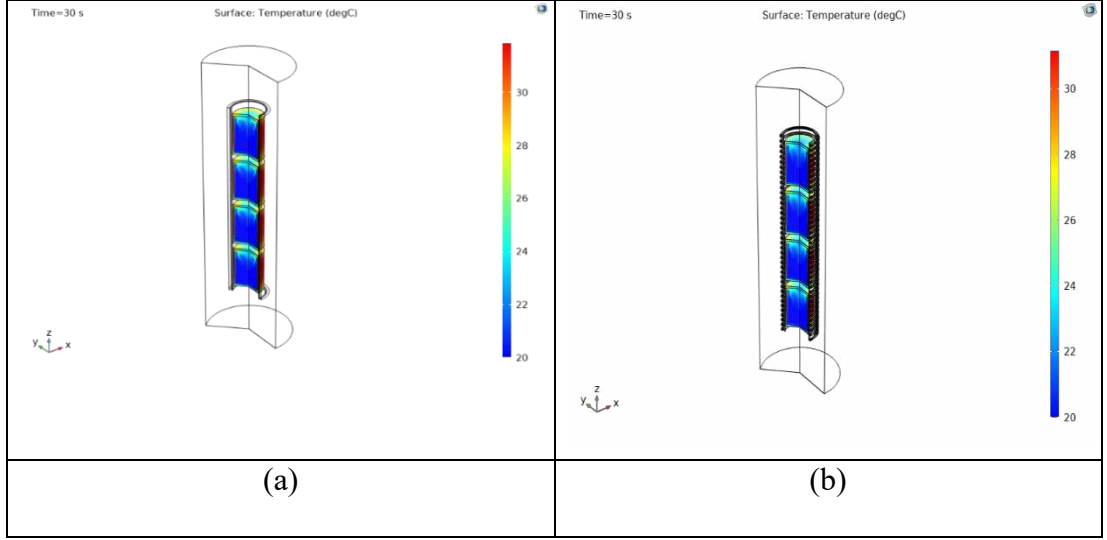


Şekil 35. 3000 Amper ve 25 kHz sistemde tek konserveli dikdörtgen (a), dairesel (b) bobinli sistemlerin 20. saniyede sıcaklık profilleri

Tek konserveli sistemde dairesel ve dikdörtgen bobin kullanımları arasında eşdeğer, yakın sonuçların elde edilmesiyle gerçek sistem geometrisi olan dört konserveli sistemin modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Dört konserveli sistem için Tablo 4'te yer alan boyutsal özellikler kullanılmıştır. Dairesel bobin tasarımında her bobin arasına 7 mm boşluk bırakılmıştır. Konserve yüzeyi ile FR4 materyali ve FR4 ve bobinler arasında 2 mm boşluk bulunmaktadır. Modelleme çalışmaları frekans değeri 25 kHz ve her bir dairesel bobine 30 Amper, dikdörtgen bobine 1200 Amper tur akım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda sistem eksenel simetri yaklaşımını kullanabilmek ve hesaplama sürelerinin kısaltılması amacıyla dikey bir sistem tasarlanarak modellenmiştir. Şekil 36 ve 37'de dört konserveli sistemlerde dairesel ve dikdörtgensel bobin kullanımının sıcaklığa olan etkisi verilmiştir.



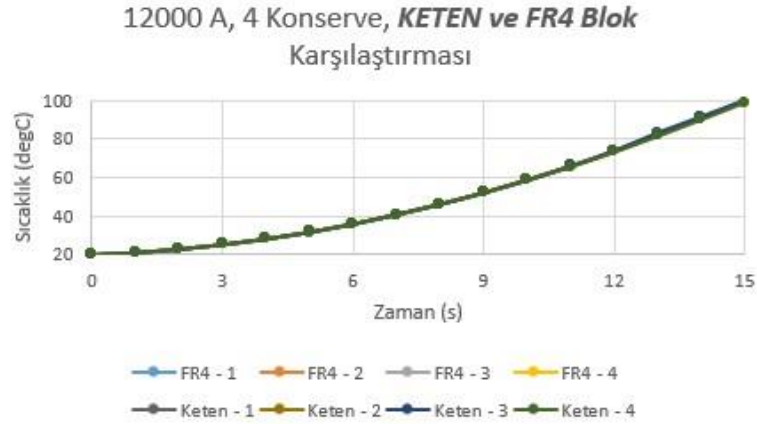
Şekil 36. 1200 Amper, 25 kHz frekans ile çalıştırılan dört konserveli sistemde dikdörtgen ve dairesel bobin kullanımının ürün yüzeyindeki ortalama sıcaklık değişimine etkisi



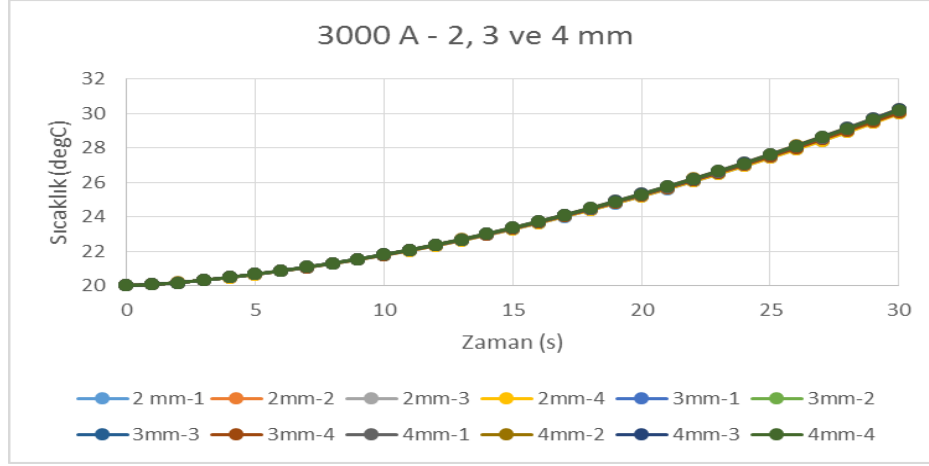
Şekil 37. 1200 Amper, 25 kHz frekans ile çalıştırılan dört konserveli dikdörtgen (a) ve dairesel (b) bobinli sistemlerin 30. Saniyede oluşan sıcaklık profilleri

7.4 FR4 Kalınlığının Etkisi

FR4 ve keten materyali sistemde yalıtım amacıyla kullanıldığında ürün yüzeyinde sıcaklık dağılımında Şekil 38’de görüldüğü üzere fark gözlemlenmemiştir. Comsol çoklu fizik ve ANSYS/Maxwell yazılımlarında keten yerine tüm özellikleriyle yer alan FR4 materyali kullanılmıştır. FR4 bloğu endüstriyel olarak üretilebilirliği ve uygulanabilirliği açısından farklı kalınlıklarda kullanılmasının ürünün ortalama sıcaklık değişimine etkisi incelenmiştir (Şekil 39). Sistem modelleme çalışmalarında 2 mm olarak belirlenen FR4 materyali 3 ve 4 mm kalınlıkla ile analiz edilerek kıyaslanmış ve sonuçlar oldukça yakın elde edilmiştir. Sistem üretilebilirliği kapsamında ve çok ince olmasının sistem üretiminde ve ilerisinde probleme neden olabileceği düşünülerek materyal kalınlığı 4 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 38. Keten ve FR4 materyalinin ürün sıcaklık dağılımına etkisi

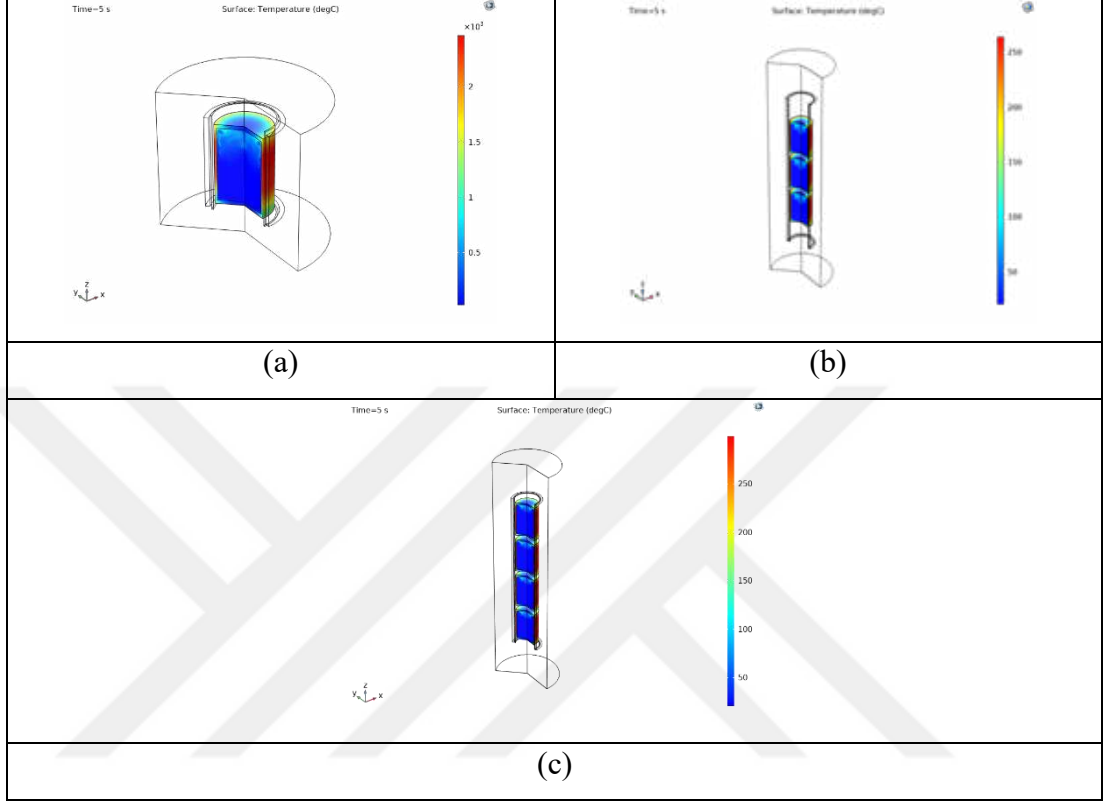


Şekil 39. 3000 Amper, 25 kHz frekans ile çalıştırılan 2,3,4 mm kalınlığındaki FR4 materyalinin ürün ortalama sıcaklık değişimine etkisi

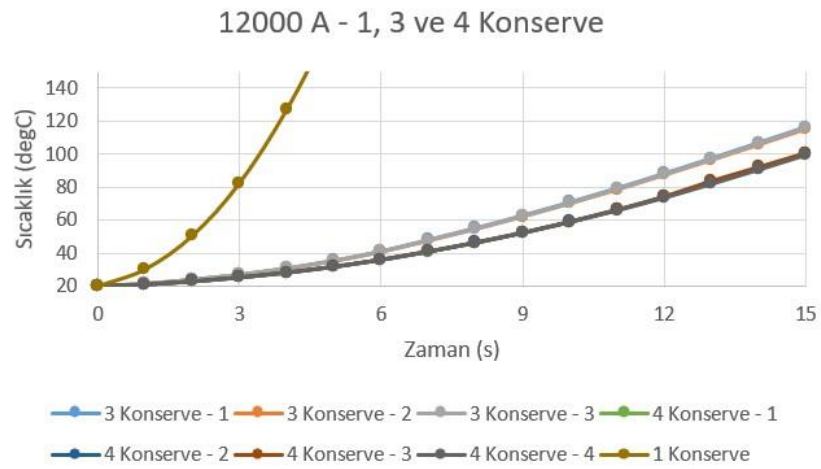
7.5 Konserve sayısının etkisi

İndüksiyon ile ısıtma işleminde metal yüzeylerde girdap akımları oluşturularak ısı üretilmekte ve bu akımların yoğunluğu sistem içerisindeki metallerin konumuna bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Sistemde frekans değeri, akım genliği ve gerekli boyutsal özellikler optimum aralıkta belirlendikten sonra konserve sayısındaki artışla sıcaklık dağılımında meydana gelen etki 1200 amper turda 3 konserve için incelenmiştir. Konserve sayısı 1, 3 ve 4 adet olarak denenmiş ve karşılaştırılmıştır. Şekil 40 ve 41’de konserve sayılarına bağlı olarak sıcaklık değişim profilleri ve yüzey sıcaklık ortalamaları verilmiştir. Konserve sayısındaki değişiklik malzeme termal iletimde farklılık oluşmasına neden olmaktadır. Konserve sayısı arttıkça ürün sıcaklık değişiminde kayda değer bir azalma meydana gelmiştir. Elde edilen manyetik alan konserve sayısı arttıkça daha yüksek bir yüzey alanına dağıldığı için buna bağlı olarak ısı akısı düşmesinden kaynaklanmaktadır. Konserve sayısı değişmesiyle elektromanyetik alanın dağılımı ve ısı transfer mekanizmaları etkilenmekte ve bu durumda sıcaklık etkisinin farklılaşmasına neden olmaktadır. Sistemde tek ve üç konserve olma durumunda ısı dağılımı değişmekte ve belirli bölgelerde sıcaklık artışı daha belirgin hale gelmektedir. Dört adet konserve olması durumunda ısı alışverişi komşu konserve arasında gerçekleşerek daha dengeli bir ısı dağılımı sağlanmaktadır. Dört konserve sistem incelendiğinde elektromanyetik alan homojen bir şekilde yayılmakta ve her bir konserve yaklaşık olarak eşit miktarda enerji emmektedir. Tek konserve sistemde mevcut manyetik akı daha küçük bir alana yoğunlaşmakta ve daha fazla enerji Emilimi gerçekleştirmektedir. Bu durumda sıcaklık artışı ısı akısı

değişimine bağlı olarak arttırılmaktadır. Sistem içerisinde tek bir konserve yerleştirildiğinde enerji yoğunluğu tek bir bölgeye aktarıldığından, sıcaklık artışı daha hızlı ve maksimum değere sahip olmaktadır.



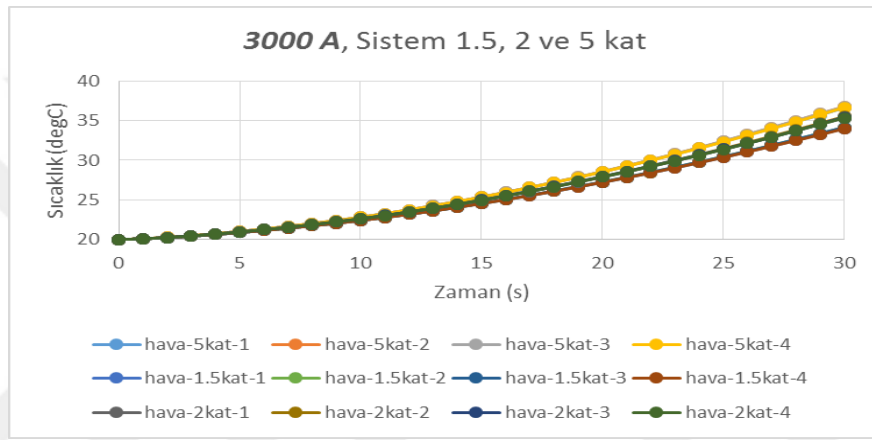
Şekil 40. Tek konserveli (a), üç konserveli (b), dört konserveli (c) sistemlerinin 5. Saniyedeki sıcaklık profilleri



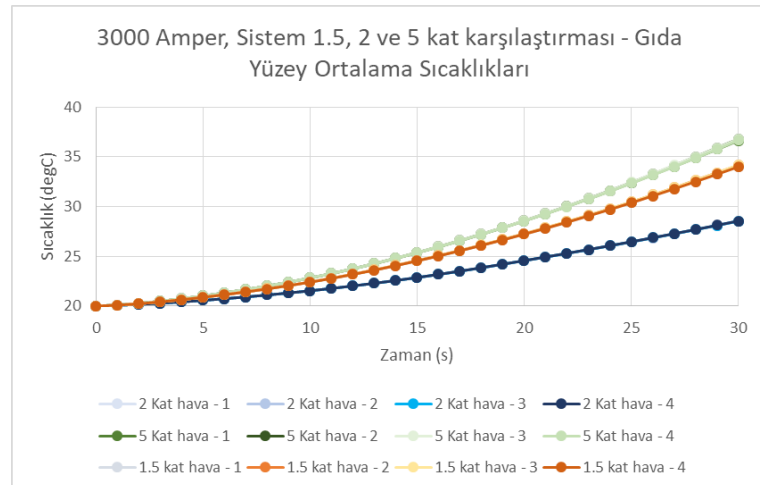
Şekil 41. Konserve sayısına bağlı olarak oluşan sıcaklık dağılımı

7.6 Sistem Geometrisinin Boyut Etkisi

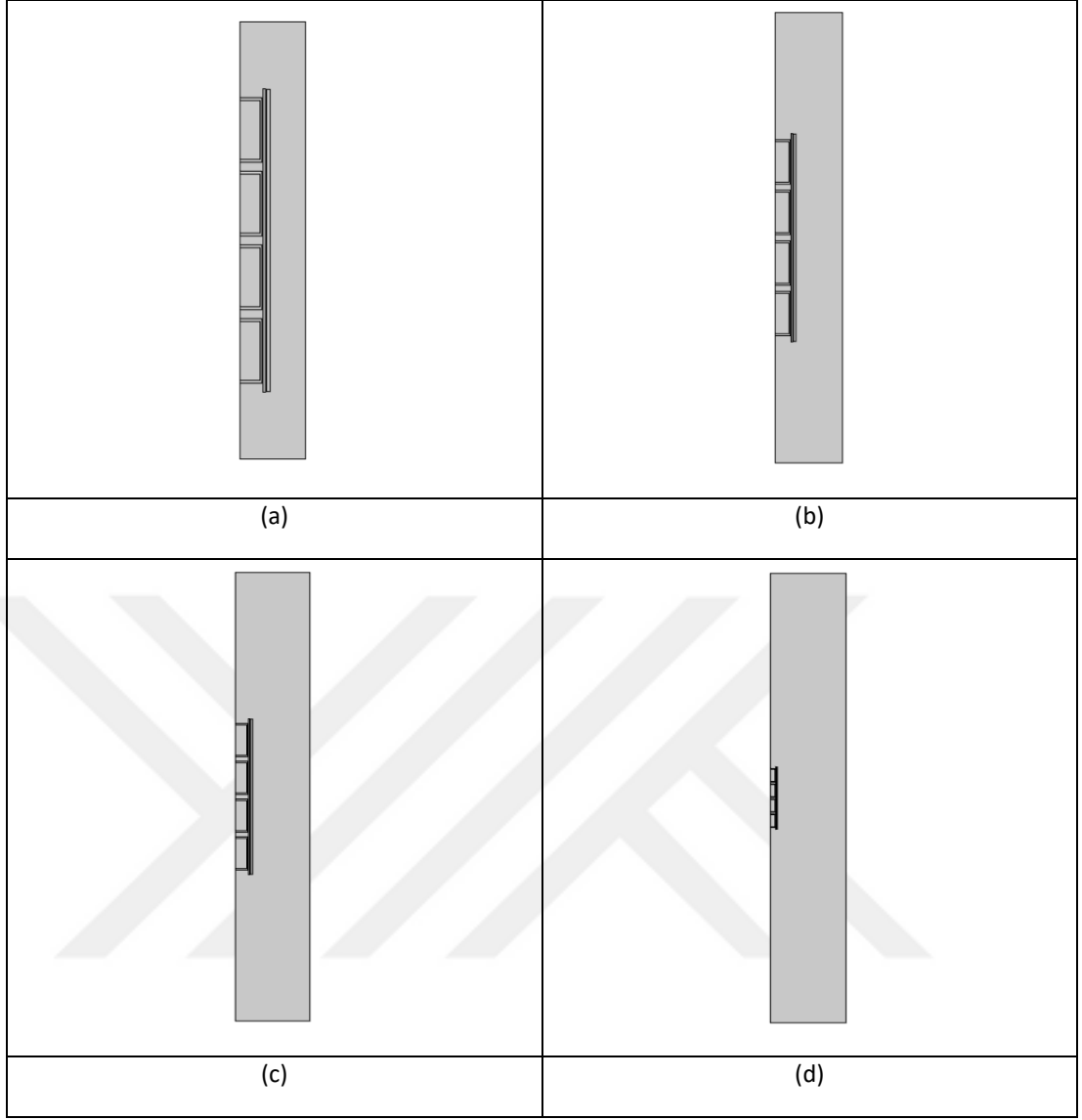
İndüksiyon sistemlerinde ortam geometrisinin genişlemesi, manyetik akı yoğunluğu ve elektromanyetik alan dağılımını değiştirmektedir. Malzeme içerisinde oluşan girdap akımları, elektriksel direnç nedeniyle Joule ısısına dönüşerek ısı akısı biçiminde açığa çıkmaktadır. Geometrik boyutların artmasıyla birlikte elektromanyetik alan dağılımı değişmekte ve bu durum sistemin çalışma frekansına olan duyarlılığı artırmaktadır. 3000 amper, dört konserve içeren sistem 1.5, 2 ve 5 katı kadar genişletilerek sistem genişlemesinin sıcaklık dağılımına olan etkisi Şekil 42 ve 43'te, sistem geometrisinin boyutları Şekil 44'te verilmiştir.



Şekil 42. 3000 Amper, 25 kHz sisteminde geometrilerin sıcaklık dağılımına etkisi



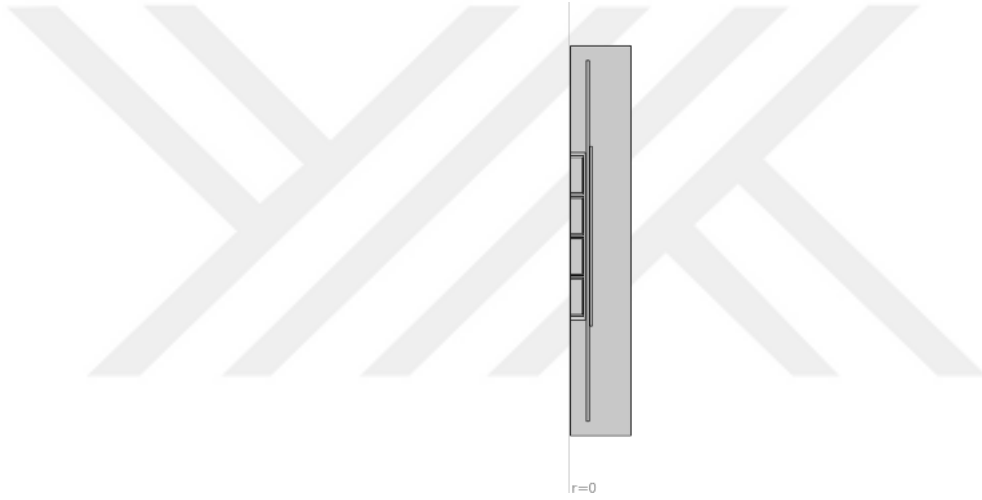
Şekil 43. 3000 Amper, 25 kHz sistemde 4 konserve sistem geometrisinin sıcaklık dağılımına etkisi



Şekil 44. Sistem geometrisin asıl boyutu (a) 1.5 kat (b) 2 kat (c) 5 kat (d)

Sistem geometrisinin ölçüleri arttırıldığında, sistemin sıcaklık profilinde Şekil 42’de yer aldığı üzere belirgin ölçüde bir fark gözlemlenmemiştir. Sonuçlar değerlendirildiğinde endüstriyel uygulamada enerji ve uygulanabilirlik açısından en uygun 1,5 kat büyüklükteki geometri seçilmiş ve modelleme çalışmalarına bu geometri ile devam edilmiştir. Sistem geometrisinin genişlemesiyle birlikte FR4 materyalinin kalınlığı tekrar optimize edilmiş ve öncesinde ideal kalınlık olarak alınan 4 mm yeniden test edilmiştir. 4mm ve 8 mm FR4 kalınlıkları değerlendirilmiş ve sonuçların birbirlerine yakın elde edilmesi sebebiyle FR4 materyalinin kalınlığı sistem geometrisinin 1,5 kat arttırılması ile 8 mm olarak kullanılmıştır. Sistem geometrisine bağlı olarak FR4 materyallerinin karşılaştırılması Ek 10’da verilmiştir. Konservelerin

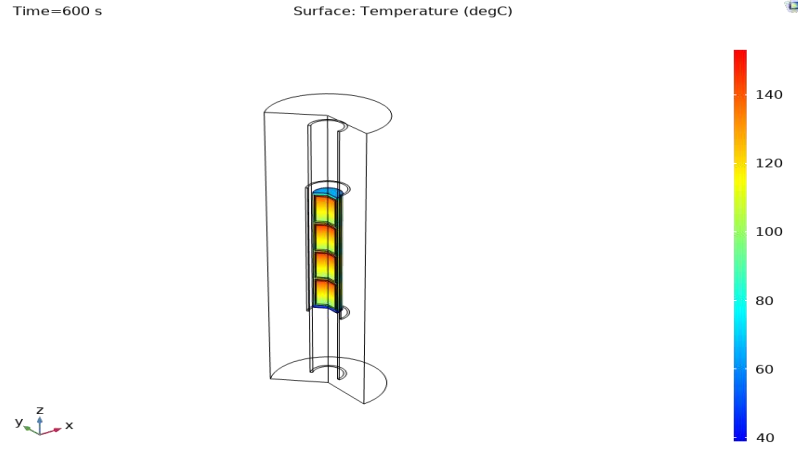
yerleştirilebilmesi için ABS polimerinden oluşan bir yatak sistemi hazırlanmıştır. Çalışmalarda konserve materyali etrafına 0.5 mm hava tanımlanmıştır. Modelleme çalışmalarında konserve ve ürün boyutları sabit tutularak sistem tasarımının son aşamada kullanılan geometrisi Şekil 45'te verilmiştir. Tablo 5'te sistem geometrisinin nihai ölçüleri yer almaktadır. Çalışmalar kapsamında sistem frekansı 25 kHz, amper gücü optimum 1500 amper olarak belirlenmiştir. Çalışmalarda konserve yüzey sıcaklığının 120° C'yi geçmemesi hedeflenmiştir. Belirlenen optimum değerler ile sistemin sıcaklık değişim profili Şekil 46'da verilmiştir. Sistemde akışkan gıdada meydana gelen sıcaklık değişimlerini gözlemlemek amacıyla gıdanın merkez noktası ve gıdanın ortalama yüzey sıcaklıkları verilmiştir (Şekil 47-48).



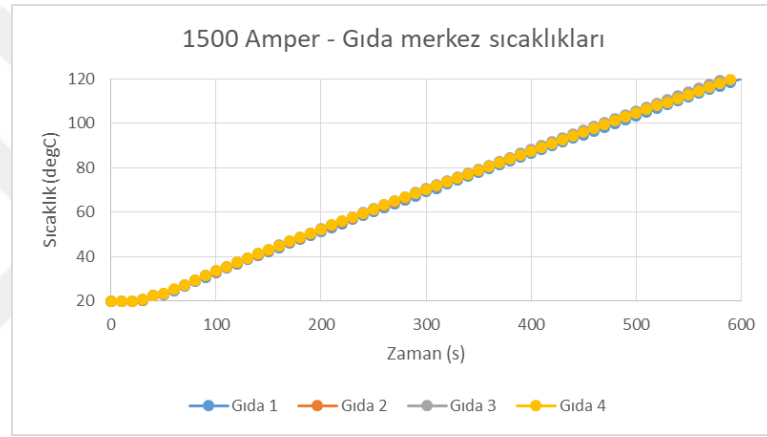
Şekil 45. Sistemin nihai geometrisi

Tablo 5. Nihai sistem geometri ölçüleri

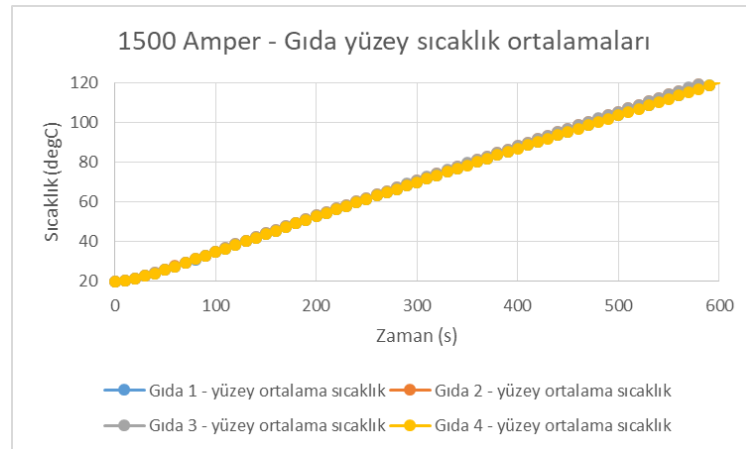
Bileşen Adı	Boyutsal Özellikler (mm)
FR4 Bloğu	8 x 1030
Bobin	6 x 513
Sistem	170.25 x 1113
ABS polimeri	41.5 x 479
Konserveler arası boşluk	5



Şekil 46. 1500 Amper tur, 25 kHz frekansta çalıştırılan sistemin sıcaklık profili



Şekil 47. 1500 amper tur, 25 kHz frekansta çalışılan sistemde akışkan gıdanın merkez noktasının zamana bağlı sıcaklık değişimi



Şekil 48. 1500 amper tur, 25 kHz frekansta çalışılan sistemde akışkan gıdanın zamana bağlı yüzey ortalama sıcaklık değişimi

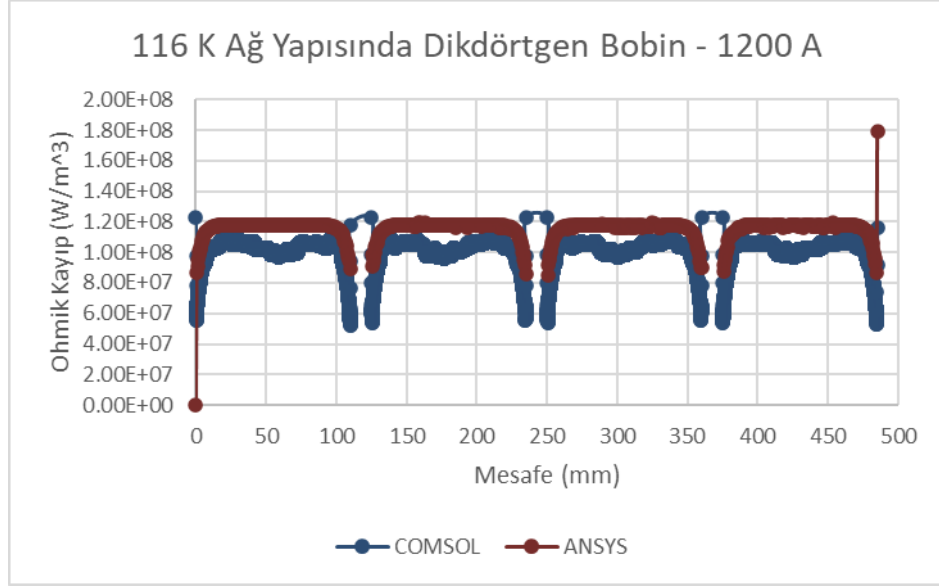
8.Comsol- Ansys/Maxwell Model Doğrulama Çalışmaları

ANSYS yazılımında Denklik 6-8 temellerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, tasarlanması planlanan sistem geometrisi içerisindeki manyetik alan oluşumuna bağlı olarak meydana gelen ısı akısı ve ohmik kayıplar belirlenmiş olup Comsol yazılım çıktılarıyla karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Çalışmaların doğrulanması için her iki programdan konserve yüzeyinde oluşan ohmik kayıp (W/m^3) değerleri karşılaştırılmıştır (Tablo 6). Bu kapsamda tasarlanması planlanan sistem parametreleri de belirlenmiştir. Şekil 49’da dört konserveli 1200 amper güç içeren sistemde Comsol ve ANSYS yazılımlarından elde edilen ohmik kayıp faktörleri değerlendirilmiştir ve kıyaslama sonucunda ohmik kayıp faktörü değerlerinin farkı %5’ten küçük olduğu gözlemlenmiştir. Modelleme programlarında meydana gelen fark uygun, kabul edilebilir seviyededir ve Comsol çoklu fizik programı ile elde edilen sonuçların güvenilirliği kabul edilerek sistem üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Tablo 6. 1200 ve 12000 Amper tur için Comsol ve ANSYS programları ile çözülen modellerde konserve yüzeyinde oluşan ortalama ohmik kayıp faktörü değerleri

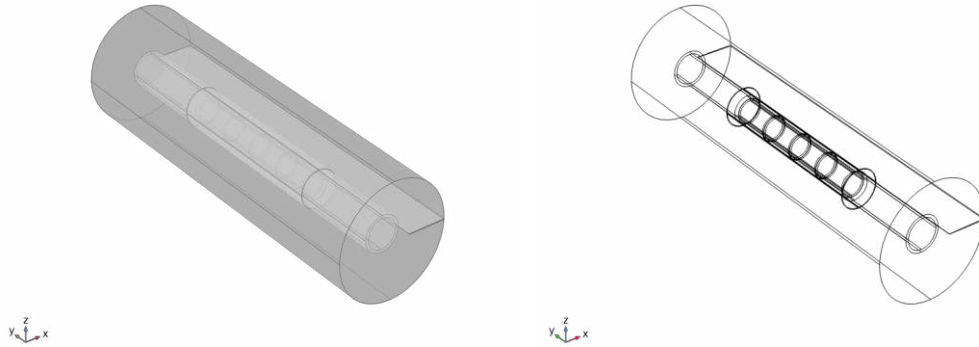
1200 A			
ANSYS		COMSOL	
	Ohmik Kayıp(W/m^3)		Ohmik Kayıp(W/m^3)
1. konserve(üst)	2.414E+06	1. konserve(üst)	2.292E+06
2. konserve	2.426E+06	2. konserve	2.304E+06
3. konserve	2.425E+06	3. konserve	2.304E+06
4. konserve(alt)	2.414E+06	4. konserve(alt)	2.293E+06

12000 A			
ANSYS		COMSOL	
	Ohmik Kayıp(W/m^3)		Ohmik Kayıp(W/m^3)
1. konserve(üst)	2.414E+08	1. konserve(üst)	2.292E+08
2. konserve	2.426E+08	2. konserve	2.304E+08
3. konserve	2.425E+08	3. konserve	2.304E+08
4. konserve(alt)	2.414E+08	4. konserve(alt)	2.293E+08



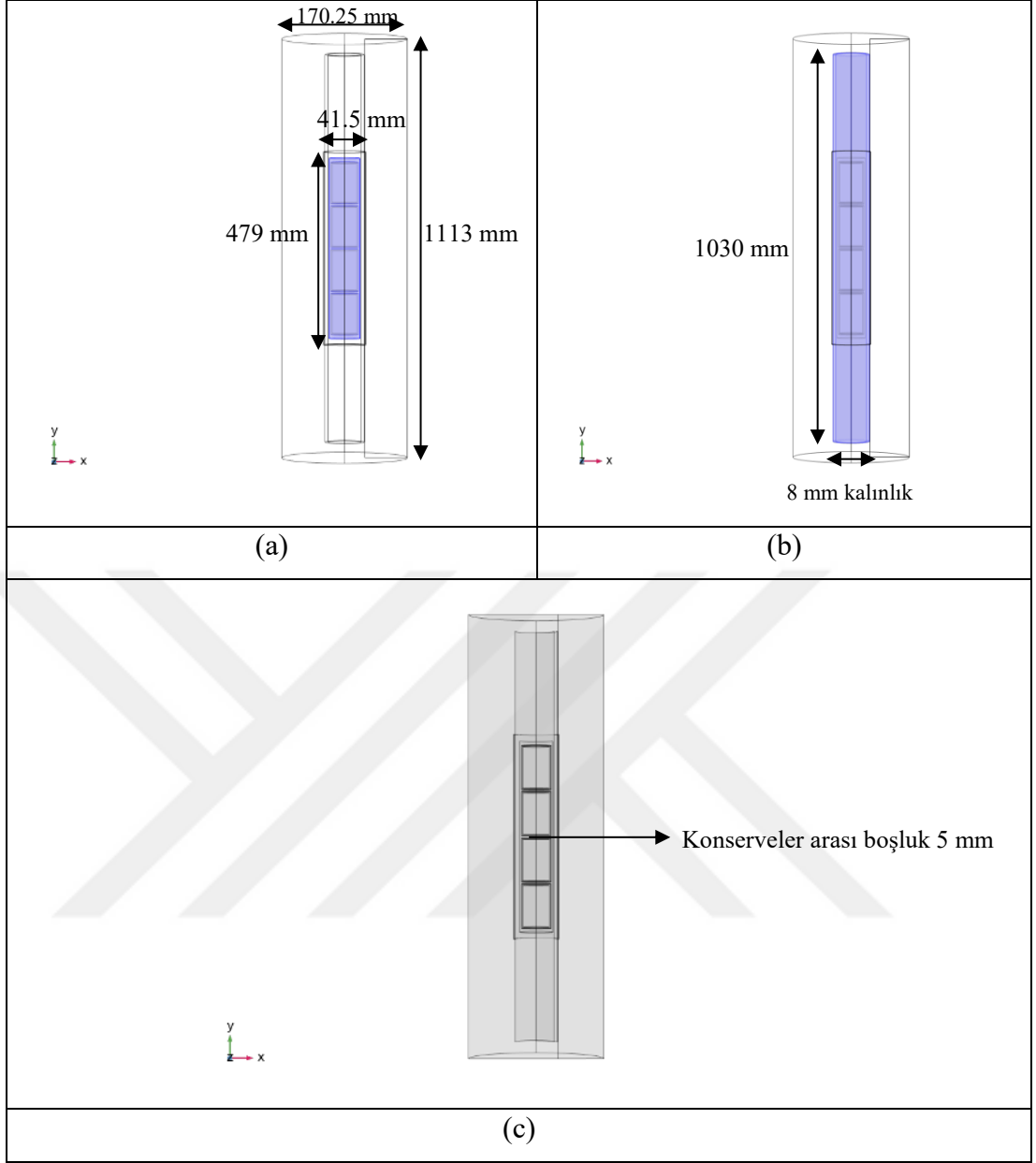
Şekil 49. Dört konserveli 1200 Amper güç içeren sistemde 116 bin element içeren ağ yapısı ile Comsol ve ANSYS programlarından elde edilen ohmik kayıp faktörü değerleri

Comsol Multifizik yazılımı ile gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları ANSYS/Maxwell yazılımlarının çıktıları karşılaştırılmış ve pilot ölçekli sisteme uygun tasarım çalışmaları ile 3D modellemesi yapılmıştır. Şekil 50’de sistemin üç boyutlu tasarımı gösterilmektedir.



Şekil 50. Comsol Multifizik yazılımı ile oluşturulan ürün tasarımı

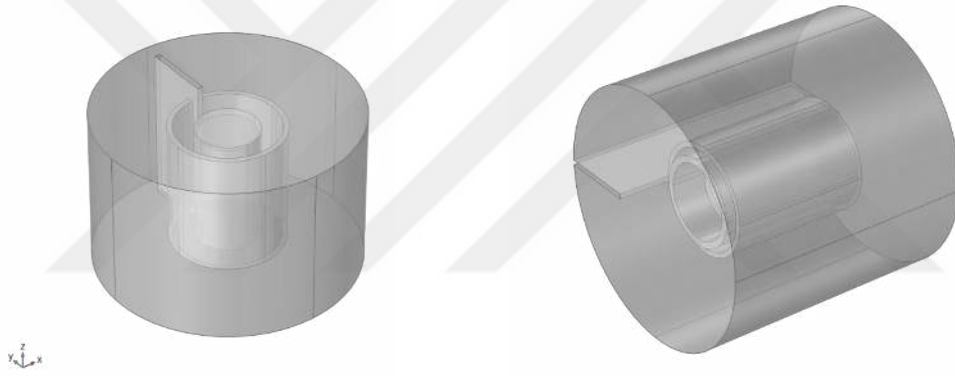
Sistem geometrisi Şekil 51 ve Tablo 5’te yer aldığı gibidir. Konservelerin sisteme yerleştirilebilmesi için ABS polimer yatağı tasarlanmış ve sisteme entegre edilmiştir. Tasarlanan model çalışmasında 25 kHz, 1500 Amper güç parametreleri kullanılmıştır.



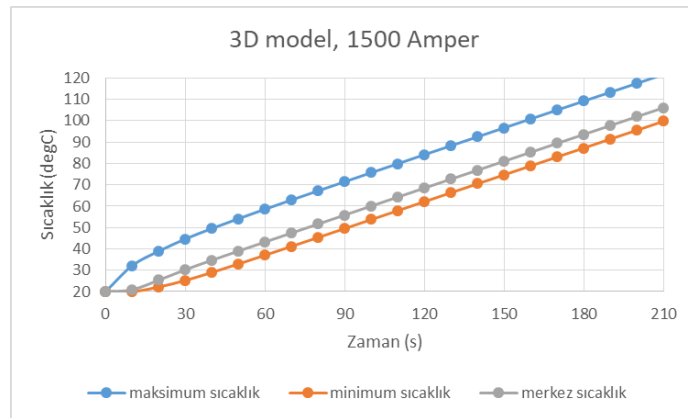
Şekil 51. Tasarım çalışmasında kullanılan ABS polimeri (a), FR4 materyal ölçüleri (b), sistem iç görüntüsü (c)

Comsol yazılımında 2D- Eksenel simetri modellerinde, konserve geometrisi konserve içi sıvı üründe meydana gelen konveksiyonel akımların doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için matematiksel model içerisine dik bir pozisyonda konumlandırılmıştır. Nihai sistemde konserve ürünler sistem içerisine yatay olarak yerleştirileceği için matematiksel model çalışmaları üç boyutlu olarak hazırlanmıştır. Kesitin 360° döndürülmesiyle üç boyutlu geometri elde edilmiştir. Yatay ve dikey olarak konumlandırılan bu iki sistem modeli çalıştırılmış, karşılaştırılmış ve konserve

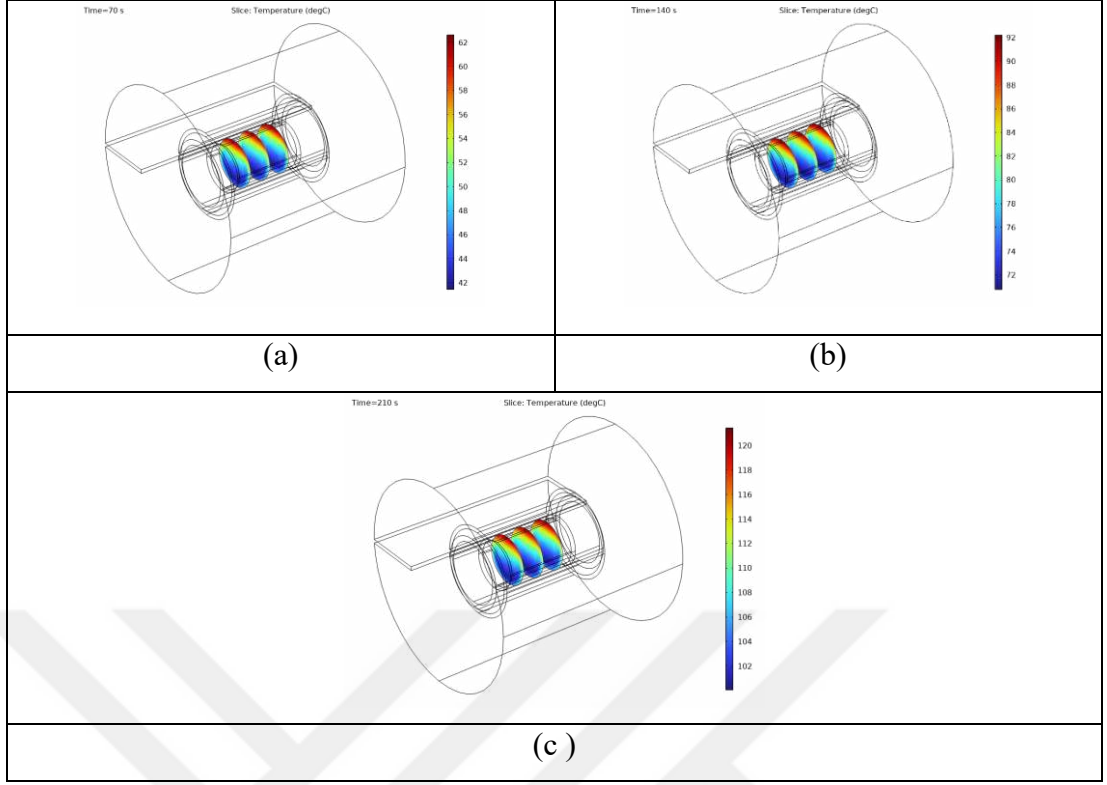
pozisyonunun etkisi incelenmiştir. Sistem matematiksel modellemesi 1500 amper gücünde, 25 kHz frekansta 300 saniye boyunca gerçekleştirilmiştir. Ek 11’de dikey ve yatay pozisyonda bulunan konserve ve konserve içerisindeki sıvıya ait sıcaklık profilleri yer almaktadır. Matematiksel modelde, konserve içerisinde yer alan saf suyun hacimsel sıcaklık değerleri zamana karşı değerlendirilmiştir (Ek 12). İki matematiksel modelde bulunan konserve materyalinin zamana karşı yüzey sıcaklık değerlerinin karşılaştırılması Ek 13’de yer almaktadır. 3D sistem tasarımında tek konserveli sistem geometrisi Şekil 52’de gösterilmiştir. Tek konserveli sistemlerde oluşan gıdanın maksimum, minimum ve merkez nokta sıcaklıklarının karşılaştırılması Şekil 53’te verilmiştir. Sıcaklık hedef değeri 120 ° C olarak belirlendiği için 210. saniyede tamamlanmıştır. Ürün içerisinde oluşan sıcaklık dağılımı gösterilmiştir (Şekil 54).



Şekil 52. 1500 amper, 25 kHz frekansta çalışan tek konserveli sistemin 3D model geometrisi



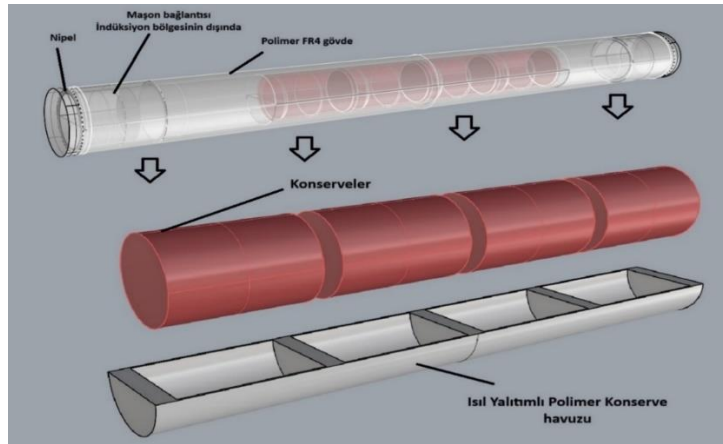
Şekil 53. 1500 amper, 25 kHz frekansta çalışan tek konserveli sistemin maksimum, minimum ve merkez nokta sıcaklıkları



Şekil 54. 1500 amper, 25 kHz frekansta çalışan 3D modelde 70 (a), 140 (b) ve 210. (c) saniyede konserve sıcaklık dağılım profili

9.Sistem Üretimi

Sistem üretimi için gerçekleştirilen tasarım ve analizler doğrultusunda polimer gövde boyutları, gövde içerisindeki konservelerin yerleşimi, gövde dışında sarımı yapılacak olan indüksiyon bobinleri ve gövde giriş çıkışı ile ilgili sistemin üç boyutlu tasarımı yapılmış ve üretime hazır hale gelmiştir. Şekil 55'te tasarımın açıklamalar ile anlatımı verilmiştir.



Şekil 55. Sistemin nihai tasarım çalışmasında kullanılan polimer gövdenin 3D tasarımı

Sistem üretiminde çelik bir kalıp kullanılarak üretim yöntemi yuvarlama sarma ile gerçekleştirilmiştir. Öncelikle belirlenen 80 mm dış çapında ve 1200 mm uzunluğuna sahip çelik bir boru kullanılmıştır. Konserve boyutları ve analiz sonuçları kapsamında tasarlanan ölçülere ulaşmak için boru çapı torna tezgahında 77,5 mm'ye kadar düşürülmüştür. Boru kalıp olarak kullanılacağı için yüzeyinin belirli bir pürüzlülük değerinin üzerine çıkmaması gerekmektedir. Bu nedenle çelik borunun her iki ucuna tornada punta ağızları açılmış ve ardından puntalı taşlama tezgahında yüzeyi parlatılarak 77 mm dış çap boyutlarına getirilmiştir.

Polimer gövde üretiminin bu kalıp üzerinde yapılabilmesi ve ürünün rahatlıkla yüzeyden ayrılabilmesi için ticari bir kalıp ayırıcı olan Frekote 770NC sıvı ayırıcı çelik boru yüzeyine uygulanmıştır. Kalıp ayırıcı uygulamasının ardından ise 800 gsm (g/m^2) yoğunluklu twill örgü yapısındaki cam fiber takviyesi matris malzeme olarak epoksi reçine kullanımı ile yuvarlama sarma yöntemi ile kalıba sarılmıştır.

Epoksi reçinelerden maksimum verimin alınabilmesi için çoğunlukla bir kür çevrimine göre kürlenmesi gerçekleştirilmelidir. Kür çevrimi genellikle belirli bir ısıtma hızı, hedef sıcaklık ve ilgili sıcaklıkta bekletme süresi ardından da soğuması şeklinde gerçekleşmektedir. Uygulanan epoksinin ürün içinde kalması ve laminasyonunun daha sağlam olması için fiber takviyesi üzerine daralan film sarılarak PLC (Programlanabilir lojik kontrolör) kontrollü bir fırında 3-5 °C/dk sıcaklık artış hızında 120 °C sıcaklığa ısıtılmıştır. Belirtilen sıcaklıkta iki saat kürlenme işlemi gerçekleştirildikten sonra ısı kaynağı kapatılmasıyla, numunenin oda sıcaklığı seviyesine ulaşması sağlanmıştır. Soğuyan gövde polimer kalıptan çıkarılmıştır. Ürünün kalıba sarılması aşaması Şekil 56'da verilmiştir. Ürünün PLC kontrollü ısıtma fırınında üretimine ait süreçler Şekil 57'de yer almaktadır. Kürlenme sonrası kalıptan çıkarılan ürün Şekil 58'de gösterilmektedir.



Şekil 56. Cam elyaf takviyesinin çelik kalıp üzerine epoksi matris ile uygulanması

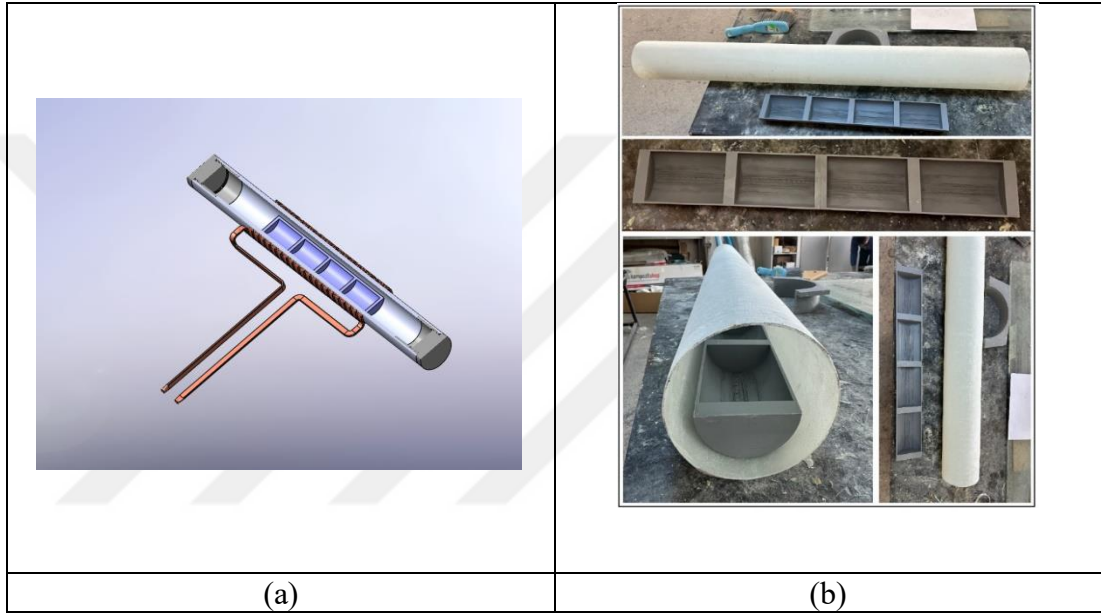


Şekil 57. PLC kontrollü ısıtma fırınında polimer gövdenin üretim süreci



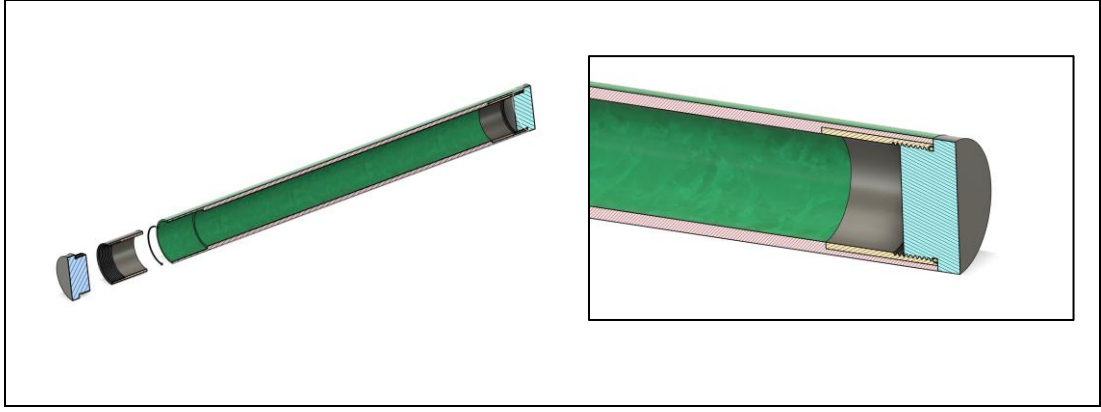
Şekil 58. Kürlenme sonrası nihai rn

Polimer gövdenin içerisinde indüksiyon ile ısıtma sırasında konservelerin birbirlerine eşit mesafede bir uzaklıkta yerleştirilebilmesi ve polimer gövdenin içerisinde merkezlenebilmesi için havuz sistemi tasarlanmıştır. Havuz sistemi 3D yazıcı ile üretilmiştir. Ardından bu model jelkot, kalıp polyesteri ve cam elyaf gibi kimyasallar kullanarak kalıplanmış ve bu kalıptan ürün elde edilmiştir. Belirlenen tasarıma göre 3D yazıcı ile modeller üretilmiş ve üretilen modeller Şekil 59'da gösterilmiştir. Ek olarak manyetik alan etkilenmesi düşük 304 östenitik paslanmaz çelik havuzu tasarımı da gerçekleştirilmiştir (Ek 14).



Şekil 59. Polimer gövde ve konserve havuzunun program(a) ve gerçek (b) gösterimi

Üretilen polimer gövdeye konserve giriş çıkışının rahat bir şekilde gerçekleşmesi, sızdırmazlığın sağlanması ve hava, su için gerekli giriş çıkışların yapılabilmesi için sistemin her iki tarafından metal komponentler modellenmiştir. Komponentlere dış açılarak montaj ve demontaj kolaylığı sağlanılmıştır. Hedefler doğrultusunda oluşturulan gövde tasarımının nihai görüntüsü Şekil 60'ta yer almaktadır.



Şekil 60. Polimer gövde tasarımının manşon ve nipel bölümleri

Çalışmanın üretim aşamasında indüksiyon ünitesinin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Elektromanyetik ünitenin tasarım görselinin modelleme ve gerçek sistem görünümü verilmiştir (Şekil 61).



Şekil 61. Elektromanyetik indüksiyon sisteminin modelleme ve üretilen nihai halı

Konserve kutularının ön deneme ısıtma işlemleri gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ünitesinin güç ayarı ile infrared sıcaklık okuyucu ile manuel sıcaklık okuyarak çalışmalar gerçekleştirilmektedir. 0-300° C hassas sıcaklık okuyan lazerli pirometre ile işlemler yapılacaktır. Polimer gövde konservelerin yüzeyini görecektir. Delinen bölgede kuartz cam ile sıcaklık ölçümü yapılacaktır. Bu sayede gövde sıcaklıkları okunarak sabit tutulmuş olacak ve analizler ile doğrulama çalışmaları gerçekleştirilecektir. Sistem içerisinde ısıtma işlemin gerçekleştirileceği konserve kutuları için kapatma makinesi kullanılacaktır. Şekil 62’de konserve kapatma makinesi gösterilmektedir.



Şekil 62. Konserve kapatma makinesi

Çalışma kapsamında üretilen sistem ile ön aşamada konserve ısıtma denemeleri gerçekleştirilmiştir. Denemelerde dört adet 380 gram ağırlığında boyu 73 mm ve çapı 103 mm uzunluğunda konserveler test edilmiştir. Sistem ön deneme sonuçları Tablo 7’de verilmiştir.

Ön deneme tablosunda da görüldüğü üzere sistem ısıtması başarıyla gerçekleşmektedir. Sistem için hedeflenen 120° C sıcaklık değerine kadar ısıtma işlemi gerçekleştirilebilmiştir.

Tablo 7. İndüksiyonla 120 ° C sıcaklıkta 4 dolu konservenin ısıtma ön deneme tablosu

Güç (kW)	Süre
0,8 kW	180 saniye
1 kW	150 saniye
2 kW	90 saniye
3 kW	60 saniye
4 kW	45 saniye
5 kW	40 saniye
6 kW	30 saniye
7 kW	25 saniye
8 kW	20 saniye
9 kW	15 saniye
10 kW	10 saniye

Bobinlerin soğutma sistemi olarak su soğutmalı bakır boru tasarımı yapılmış ve hem bobinleri hem de konserveleri soğutmak üzere tek bir soğutma ünitesi üretimi gerçekleştirilmiştir. Frekans jeneratörleri güç kaynağı olarak kullanılmıştır. Sistemin kontrollü bir şekilde başlayabilmesi için indüksiyon ünitesine bağlı ısı sensörlerinden ve zaman rölelerinden elde edilen çıktılara göre PLC destekli kontrol devresi imal edilmiştir. Makine üretiminde indüksiyon ve konservelerin kademeli olarak soğutulduğu ısı pompası yer almaktadır. Sistem kapasitesine uygun soğutma sistemi hesabı gerçekleştirilmiş 10000 kcal ve 20-25 ° aralığında soğutma yükü için sisteme özel soğutma ekipman tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmektedir. Sistemin borulama ve pompa kısmı montajı ve sistemin son hali Şekil 63'te verilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 63. Sistemin borulama ve pompa kısmı montajı (a) sistemin nihai hali (b)

10.SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen modelleme çalışmaları sonucunda elde edilen bulgular aşağıda detaylandırılmıştır;

- Sistem çalışmalarına öncelikli olarak matematiksel modelleme çalışmaları ile başlanılmıştır. Matematiksel doğrulama çalışmaları kapsamında sistem içerisinde oluşan manyetik alan dağılımı, sıcaklık dağılımı ve ürün içerisinde oluşan hız profilleri belirlenmiştir. Sistem modelleri ilk olarak iki boyutlu olarak hazırlanmış ardından üç boyutlu olarak analizlere devam edilmiştir.
- Sistem için optimum parametrelerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Parametrelerin değişime etkisini incelemek amacıyla matematiksel modellerde indüksiyon frekansı 10, 25 ve 100 kHz olarak sistem içerisinde yer alan konserve materyallerinin yüzey sıcaklıklarına olan etkisi incelenmiştir. Frekansın artmasıyla sıcaklığın yüzeye yakın bölgelerde yoğunlaştığı tespit edilmiş ve ideal frekans değeri 25 kHz olarak belirlenmiştir.
- Sistem içerisine 1,3 ve 4 adet konserve yerleştirilerek konserve sayılarının etkisi incelenmiştir. Konserve sayısı arttıkça ürün sıcaklık değişiminde azalma meydana gelmiştir. Tek bir konserve olması durumunda sistemden gelen manyetik akı daha küçük bir alana yoğunlaşmasından dolayı daha fazla enerji emilimi gerçekleşmektedir. Dört konserve bir sistemde elektromanyetik alan homojen bir şekilde yayılmakta ve konserve eşit miktarda enerji emmektedirler. Aynı zamanda dört konserve sistemde konserve arasında ısı alışverişi gerçekleşmektedir ve böylelikle daha dengeli bir ısı dağılımı sağlanmaktadır.
- Sistemde dairesel ve dikdörtgen bobin kullanılması durumunda sistemde ürün yüzeyine etki eden ortalama sıcaklık değişimleri incelenmiştir. Aynı zamanda indüksiyon sistemlerindeki bir dikdörtgensel bobinin toplamda kaç sarım sayısına denk kabul edilebileceği değerlendirilmiştir. Dairesel ve dikdörtgen bobin geometrileri içeren sistemin modelleme çalışmalarında elde edilen sıcaklık dağılımları benzer sonuçlar göstermiştir.

- Sistem geometrisinin genişletilmesiyle sıcaklık dağılımında meydana gelen değişiklik incelenmiş ve ideal geometrik büyüklük sistem için seçilmiştir. Sistem geometrisinde değişiklik gerçekleştirildikten sonra sistem içerisinde kullanılacak olan FR4 bloğunun kalınlığındaki artışın ürün ortalama sıcaklık dağılımına etkisi incelenmiştir. Karşılaştırmalar sonucunda değerler tutarlı bir şekilde elde edilmiş ve 8 mm kalınlığında FR4 bloğu kullanılmıştır.
- Matematiksel model doğrulama çalışmaları Comsol ve ANSYS/Maxwell yazılımları ile çapraz bir şekilde yürütülmüş ve sonuçları karşılaştırılmıştır. İki programdan konserve yüzeyinde oluşan ohmik kayıp değerleri karşılaştırılmış ve kayıp faktörü değeri %5'ten az olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen fark kabul edilebilir düzeyde olup sistem üretim çalışmaları gerçekleştirilmiştir.
- Sistem gövde üretimi sarma yöntemi ile yapılmıştır ve konservelerin merkezlenebileceği havuz sistemi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistem güç kaynağı, PLC destekli kontrol sistemi ve bobin sarımı üretilmiştir. Modelleme çalışmalarına bağlı olarak üretilen elektromanyetik indüksiyon sistemi ve nihai sistemde dört adet konservein ısıtma işlemi gerçekleştirilmiştir.
- Tez çalışmasında katı, fosil yakıt tüketimine alternatif olarak indüksiyon ısıtma sistemi ile çalışan hibrit retort sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. Matematiksel modelleme çalışmalarıyla sistemin elektromanyetik alan dağılımı, frekans değeri, bobin sarım geometrisi ve sistem genişliği optimize edilerek iki yazılım ile analiz edilmiştir. Çalışma sonucunda sistemde homojen bir ısıtma gerçekleştiği ve dört konserveli sistemde eşit miktarda enerji emilimi ve yüzey sıcaklıklarının %5'ten az sapma ile doğrulandığı tespit edilmiştir.
- Çalışma sonucunda indüksiyon sistemi ile ısıtma işlemi sonucunda temassız bir şekilde ısı üretimi sağlanan kontrollü, hızlı ve verimli bir sistem üretimi sağlanılmıştır. İndüksiyon sistemi ile işlem süresi kısalmış ve enerji tüketiminin azalması sağlanılmıştır. Sürdürülebilirlik açısından değerlendirildiğinde, indüksiyon sistemlerinin elektrik enerjisiyle çalışması ve üretim süreçlerinde karbon emisyonlarının azaltılması atık ısının geri kazanımı gibi çevresel kazanımlar elde edilmektedir. Tasarlanan ve üretimi

gerçekleştirilen sistem endüstrideki “Karbon 0” hedefi doğrultusunda fosil yakıt kullanımı yoğun olan geleneksel retort sistemlerinin yerine çevreci bir seçenek olmuştur.

- Günümüzde doğal gaz ve petrol türevi yakıtlar gelecekte önemli oranda kısıtlanacaktır. Tasarlanan ve üretimi gerçekleştirilen sistem günümüz şartlarında maliyet açısından her ne kadar yüksek bir değere sahip olsa da gelecekte önemli bir konuma sahip olacaktır.



KAYNAKÇA

- [1] M. Furkan, "Theoretical Investigation and Modeling of Various Shaped Planar Coils for Induction System Applications," 2019.
- [2] P. S. Jimenez, S. P. Bangar, M. Suffern, and W. S. Whiteside, "Understanding retort processing: A review," Mar. 01, 2024, John Wiley and Sons Inc. doi: 10.1002/fsn3.3912.
- [3] G. V. Alekseev, S. A. Eliseeva, and A. A. Smolentceva, "Effect of Heat Treatment on Quality Canned Food Products," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Institute of Physics Publishing, Mar. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/753/6/062032.
- [4] S. Senthilkannan Muthu Editor, "Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes Energy Footprints of the Food and Textile Sectors." [Online]. Available: <http://www.springer.com/series/13340>
- [5] Y. Üniversitesi, M. Yüksekokulu, and G. İşleme Bölümü, "Endüstriyel Pekmez Üretim Sürecinde Enerji Analizi Seda Genç." [Online]. Available: <http://www.academicfoodjournal.com>
- [6] I. Shabir et al., "Carbon footprints evaluation for sustainable food processing system development: A comprehensive review," Future Foods, vol. 7, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.fufo.2023.100215.
- [7] Hannah Ritchie, "Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions."
- [8] T. C. Liu, Y. C. Wu, and C. F. Chau, "An Overview of Carbon Emission Mitigation in the Food Industry: Efforts, Challenges, and Opportunities," Jul. 01, 2023, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/pr11071993.
- [9] D. Değirmen, I. Hasdemir, and G. Eker Şanlı, "Otomotiv ve Gıda Sektörlerinde Enerji Verimliliği ve Karbon Emisyonunun Azaltımı İle İlgili Bir Çalışma" Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering, vol. 28, no. 3, pp. 937–956, Dec. 2023, doi: 10.17482/uumfd.1340246.
- [10] A. Başaran, T. Yılmaz, and C. Çivi, "Application of inductive forced heating as a new approach to food industry heat exchangers: A case study—Tomato paste pasteurization," J Therm Anal Calorim, vol. 134, no. 3, pp. 2265–2274, Dec. 2018, doi: 10.1007/s10973-018-7250-7.
- [11] W. Soroka, Ambalaj Teknolojisinin Temel Prensipleri. 1995.
- [12] M. Üçüncü, Gıda Ambalajlama Teknolojisi. 2007.
- [13] S. D. Holdsworth and R. Simpson, "Thermal Processing of Packaged Foods Third Edition." [2016]. Available: <http://www.springer.com/series/5996>
- [14] A. Zhuk, A. Stolyanov, A. Kaychenov, L. Kuranova, and V. Grokhovsky, "Software for calculating the actual lethality of canned food heat treatment processes: Development and application," in E3S Web of Conferences, EDP Sciences, Jun. 2021. doi: 10.1051/e3sconf/202127313002.
- [15] N. K. Maurya, "Thermal Processing in Food Preservation: A Comprehensive Review of Pasteurization, Sterilization, and Blanching," Nutrition and Food Processing, vol. 8, no. 5, pp. 01–07, Apr. 2025, doi: 10.31579/2637-8914/307.
- [16] O. Kaya and F. İçier, "İndüksiyon ve Ohmik Isıtma İşlemlerinin Gıdalara Uygulanabilirliğinin Karşılaştırılması," 2019, Sidas Medya A.S. doi: 10.24323/akademik-gida.544844.
- [17] Orgun T.K. (2024). İndüksiyonla Isıtmada Dışarıdan Uygulanan Elektromanyetik Dalgaların 1040 Çeliği Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi.

- [18] Rudnev V., Loveless D., Cook R. L. (2017). Handbook of Induction Heating Second Edition.
- [19] Özden H.E. (2020). Yüksek Frekanslı İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı ve Uygulaması [Yüksek Lisans Tezi]. Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [20] A. Mühlbauer. (2008). History Of Induction Heating and Melting.”
- [21] B. Akkurt. (2024). Kalıp Çeliklerinde İndüksiyon ile Sertleştirme Yöntemi Kullanılarak Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [22] Çivi, C., Yılmaz, T., & Başaran, A. (2019). Gıda İşleme Proseslerinde İndüksiyon ile Isıtma Kullanımının Değerlendirilmesi. Duzce University Journal of Science and Technology, 7(2), 158-168. <https://doi.org/10.29130/dubited.466369>
- [23] İnanç M. Z. (2025). İndüksiyon Isıtma Sistemlerinde Kesir Dereceli PID Yöntemi ile Sıcaklık Denetimi [Yüksek Lisans Tezi]. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [24] Helimergin, F. (2025). SAE 5140 Küresel Mafsalın İndüksiyon Sertleştirme Sonrası Meydana Gelen Sertlik Derinliğinin ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- [25] A. ALTINTAŞ, “İndüksiyon Bobin Tasarımında Kullanılan İletken Türlerinin İndüksiyon Sıvı Isıtıcı Performansına Etkilerinin Araştırılması,” Marmara Fen Bilimleri Dergisi, vol. 28, no. 1, Apr. 2016, doi: 10.7240/mufbed.02953.
- [26] Dereci S. (2010) İndüksiyonla Isıtma Sistemlerinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Devresinin Gerçekleştirilmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [27] Çelik.Ö. (2005) İndüksiyon Fırını Tasarım ve Yapımı [Yüksek Lisans Tezi]. Fırat Üniversitesi,
- [28] S. Kurniati, S. Soeparman, S. S. Yuwono, L. Hakim, and S. Syam, “A novel process for production of calophyllum inophyllum biodiesel with electromagnetic induction,” Energies (Basel), vol. 12, no. 3, Jan. 2019, doi: 10.3390/en12030383.
- [29] Çetin. S. (2005) Bir Fazlı Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi Analizi ve Dizaynı [Yüksek Lisans Tezi]. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [30] Kelesoglu A. (2019) İndüksiyonlu Gaz Isıtıcılarının Termodinamik Analizi [Yüksek Lisans Tezi]. Yalova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [31] Reisoğlu B.V. (2017) Isıtma Bujilerinde İndüksiyon Isıtmanın Uygulanabilirliği [Yüksek Lisans Tezi]. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [32] Aydın, E. (2022). Sonlu Elemanlar Analizi Kullanılarak Bir İndüksiyon Isıtma Sisteminin Elektromanyetik ve Termal Analizi. EMO Bilimsel Dergi, 12(2), 35-39.
- [33] Alınca A. (2012) İndüksiyon ile Kompozit Malzemelerin Isıtılmalarının İncelenmesi [Yüksek Lisans Tezi]. Maltepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [34] O. Okman (2005) Free Forming of Locally Induction Heated Specimens [Master’s thesis]. Middle East Technical University, Natural and Applied Science.
- [35] Tezcan Y. (2019) Sıvılar İçin Sıcaklık Kontrollü Bir İndüksiyon Isıtma Sistemi Tasarımı [Yüksek Lisans Tezi]. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- [36] A. Altıntaş ve M. Karahan, (2015). İndüksiyon Isıtma Yöntemiyle Çalışan Sıvı Isıtıcılar Aparatlarının Araştırılması *UTBD*, c. 7, sy. 3, ss. 16–26, 2015.
- [37] Yıldız Y. (2019) İndüksiyon Isıtma ve Doğalgazlı Isıtma Yöntemlerinin 51CRV4 Yay Çeliğinde Kıyaslanması [Yüksek Lisans Tezi]. İzmir Demokrasi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [38] F. Dughiero. (2012) Numerical Models for Induction Hardening of Gears [Master Thesis] Università di Padova.
- [39] X. 'Li, Y. 'Wang, P. 'Luan, D. 'Sun J. 'Haung M. 'Wang B. 'Zheng, Y. 'Yang, "Quality changes of duck meat during thermal sterilization processing caused by microwave, stepwise retort, and general retort heating," *Front Nutr*, vol. 9, 2022.
- [40] Ghani Al.-Baali A.G.A., Farid M. M.: *Sterilization of Food in Retort Pouches*. Springer Science+Business Media, 2006.
- [41] Rahman, S. (Ed.). (2007). *Handbook of food preservation* (2nd ed). CRC Press.
- [42] Z. Fabulya and G. Hampel *Designing The Control For Safe Heat Treatment Of Canned Food*, 2015.
- [43] S. V. Gokhale and S. S. Lele, "Retort process modelling for Indian traditional foods," *J Food Sci Technol*, vol. 51, no. 11, pp. 3134–3143, Nov. 2014, doi: 10.1007/s13197-012-0844-3.
- [44] Peter. Fellows, *Food processing technology: principles and practice*. Woodhead, 2009.
- [45] R. Paul Singh and D. R. Heldman, *Introduction to Food Engineering*, Fourth Edition, 2009.
- [46] R. Walden and J. Emanuel, "Developments in in-container retort technology: The Zinetec Shaka process," in *Case Studies in Novel Food Processing Technologies: Innovations in Processing, Packaging, and Predictive Modelling*, Elsevier Inc., 2010, pp. 389–406. doi: 10.1533/9780857090713.4.389.
- [47] S. Featherstone, "Sterilisation systems," in *A Complete Course in Canning and Related Processes*, Elsevier, 2015, pp. 239–267. doi: 10.1016/b978-0-85709-677-7.00012-8.
- [48] R. H. Peesel, M. Philipp, G. Schumm, J. Hesselbach, and T. G. Walmsley, "Energy efficiency measures for batch retort sterilization in the food processing industry," *Chem Eng Trans*, vol. 52, pp. 163–168, 2016, doi: 10.3303/CET1652028.
- [49] M.A. Kumar, M.N. Ramesh, S. Nagaraja Rao, Retrofitting of a vertical retort for on-line control of the sterilization process, *Journal of Food Engineering*, Volume 47, Issue 2, 2001, Pages 89-96, [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(00\)00103-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(00)00103-5).
- [50] D. J. Pursito, E. H. Purnomo, D. Fardiaz, and P. Hariyadi, "Optimizing Steam Consumption of Mushroom Canning Process by Selecting Higher Temperatures and Shorter Time of Retorting," *Int J Food Sci*, vol. 2020, 2020, doi: 10.1155/2020/6097343.
- [51] S. Featherstone, *A Complete Course in Canning and Related Processes*, 14th ed., vol. 2. 2014.
- [52] D. P. Hewett and I. J. Hewitt, "Homogenized boundary conditions and resonance effects in Faraday cages," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 472, no. 2189, May 2016, doi: 10.1098/rspa.2016.0062.
- [53] Amarulloh et al., "Effect of power and diameter on temperature and frequency in induction heating process of AISI 4140 steel," *Mechanical Engineering for*

- Society and Industry, vol. 2, no. 1, pp. 26–34, Jan. 2022, doi: 10.31603/mesi.6782.
- [54] M. H. Tavakoli, M. Honarmandnia, and H. Heydari, “Influence of cross section shape of the coil turns on the induction heating process,” *Scientific Research and Essays*, vol. 8, no. 2, pp. 48–61, 2013, doi: 10.5897/SRE11.1880.
 - [55] Waluyo, R. Susana, and M. R. Kurniadi, “Induction Heating Stove Prototype of 130 kHz using Arduino Uno,” *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*, vol. 70, no. 1, pp. 39–50, 2022, doi: 10.46904/eea.22.70.1.1108005.
 - [56] S. H. Yu, D. J. Park, and K. C. Kim, “Heat Source Analysis of an Induction Heater for an Electric Vehicle,” *IEEE Trans Magn*, vol. 53, no. 6, Jun. 2017, doi: 10.1109/TMAG.2017.2662946.
 - [57] J. Nerg and J. Partanen, “A Simplified FEM Based Calculation Model for 3-D Induction Heating Problems Using Surface Impedance Formulations,” 2001.
 - [58] W. C. Chew, (2020) *Lectures on Electromagnetic Field Theory*.
 - [59] Y. Ji, X. Meng, J. Shao, Y. Wu, and Q. Wu, “The generalized skin depth for polarized porous media based on the cole-cole model,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 10, no. 4, Feb. 2020, doi: 10.3390/app10041456.
 - [60] S. L. Butler and Z. Zhang, “Forward modeling of geophysical electromagnetic methods using Comsol,” *Comput Geosci*, vol. 87, pp. 1–10, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.cageo.2015.11.004.
 - [61] Comsol, *Understanding the Magnetic Insulation Boundary Condition*.
 - [62] “Heat Transfer Module User’s Guide,” 1998. [Online]. Available: www.comsol.com/blogs
 - [63] “Pipe Flow Module User’s Guide,” 1998. [Online]. Available: www.comsol.com/blogs
 - [64] Comsol, “The CFD Module User’s Guide,” 2023. [Online]. Available: www.comsol.com/blogs
 - [65] A. Sari Praharasti, A. Kusumaningrum, A. Nurhikmat, A. Susanto, M. Dwi Maulani, and W. Wiratama, “Estimation of Sterilization Value using General Method and Ball Formula for Beef Rendang in Retort Pouch,” vol. 10, no. 5, 2020.
 - [66] J. H. Lee, R. K. Singh, and J. W. Larkin, “Determination of Lethality a Continuous Sterilizatio Particulates*,” 1990.
 - [67] T. Deák, “Food Technologies: Pasteurization,” in *Encyclopedia of Food Safety*, vol. 3, Elsevier, 2014, pp. 219–224. doi: 10.1016/B978-0-12-378612-8.00257-2.
 - [68] E. Son et al., “Microwave decontamination process for hummus: A computational study with experimental validation,” *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, vol. 82, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.ifset.2022.103162.
 - [69] B. Baranoglu, M. E. Özbek, and E. Aydin, “Experimental analysis of an electromagnetic pulse forming systems pre-heated by Induction,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 35, no. 4, pp. 2101–2112, 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.605773.

EKLER

Ek 1. Suyun malzeme özellikleri

	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	81	
	Relative Permeability	Simple	0.999991	
	Bulk Conductivity	Simple	0.01	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
	Core Loss Model		None	w/m ³
	Mass Density	Simple	997.4	kg/m ³
	Composition		Solid	

Ek 2. 1010 çeliğinin malzeme özellikleri

	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	1	
	Relative Permeability	Nonlinear	B-H Curve...	
	Bulk Conductivity	Simple	2000000	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
	Core Loss Model		None	w/m ³
	Mass Density	Simple	7872	kg/m ³
	Composition		Solid	

Ek 3. Bakırın malzeme özellikleri

	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	1	
	Relative Permeability	Simple	1	
	Bulk Conductivity	Simple	59980000	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
	Core Loss Model		None	w/m ³
	Mass Density	Simple	8960	kg/m ³
	Composition		Solid	

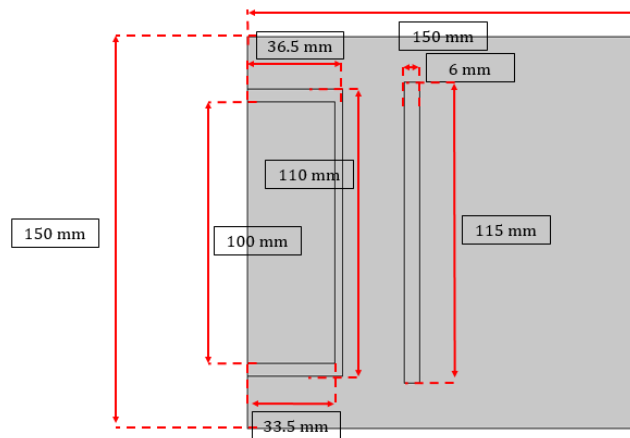
Ek 4. Hava özellikleri

	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	1.0006	
	Relative Permeability	Simple	1.0000004	
	Bulk Conductivity	Simple	0	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
	Core Loss Model		None	w/m ³
	Mass Density	Simple	1.1614	kg/m ³
	Composition		Solid	

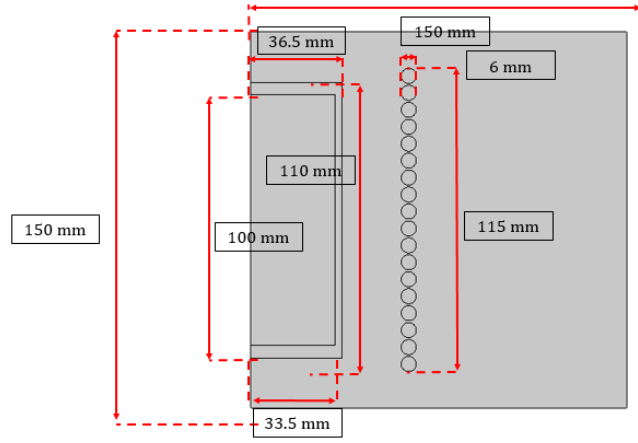
Ek 5. FR4 özellikleri

	Name	Type	Value	Units
	Relative Permittivity	Simple	4.4	
	Relative Permeability	Simple	1	
	Bulk Conductivity	Simple	0.004	siemens/m
	Dielectric Loss Tangent	Simple	0.02	
	Magnetic Loss Tangent	Simple	0	
	Core Loss Model		None	w/m ³
	Mass Density	Simple	1900	kg/m ³
	Composition		Solid	

Ek 6. Dikdörtgensel (a) ve dairesel (b) bobin geometrilerine sahip bobinlerin model ölçüleri

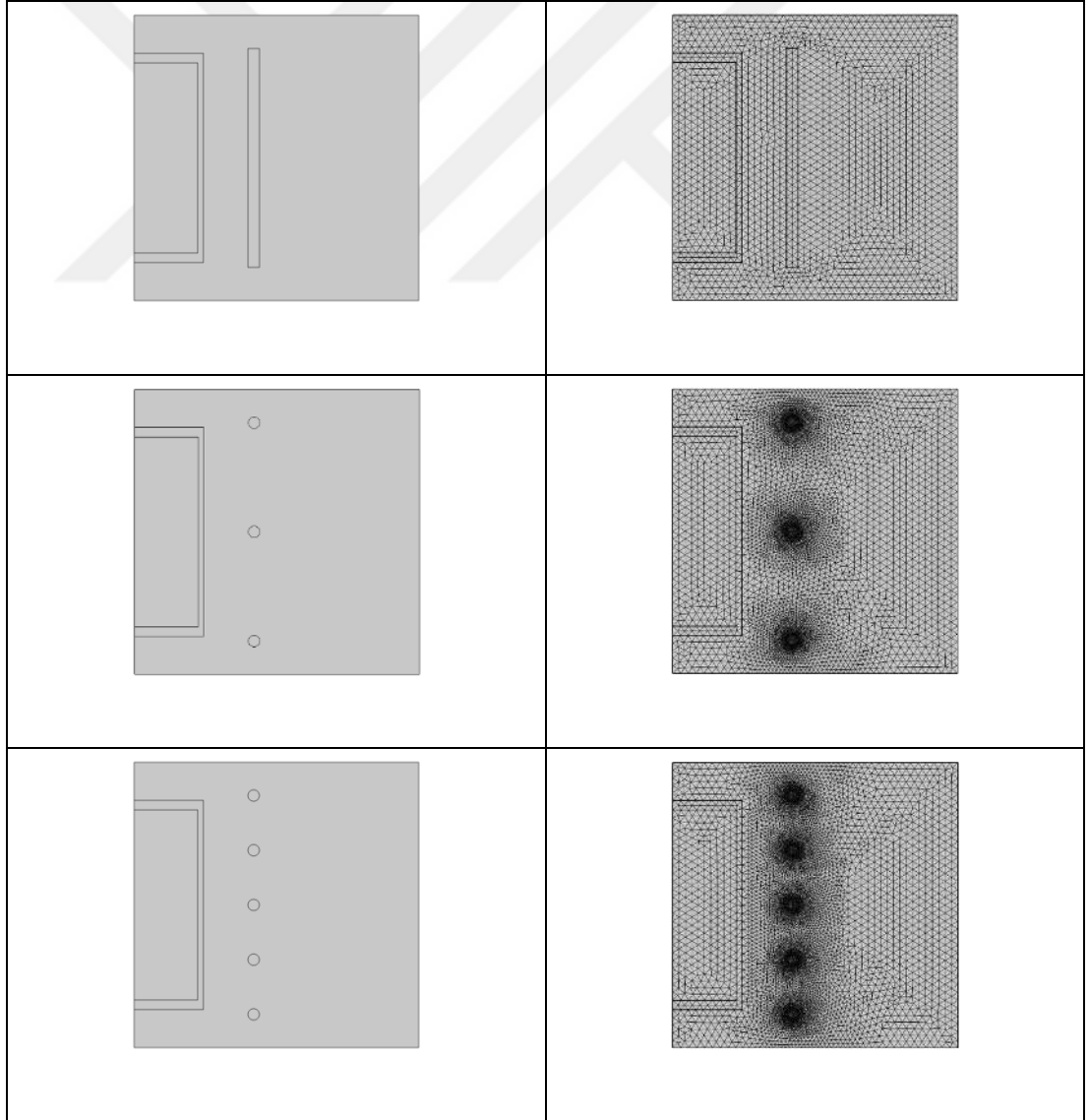


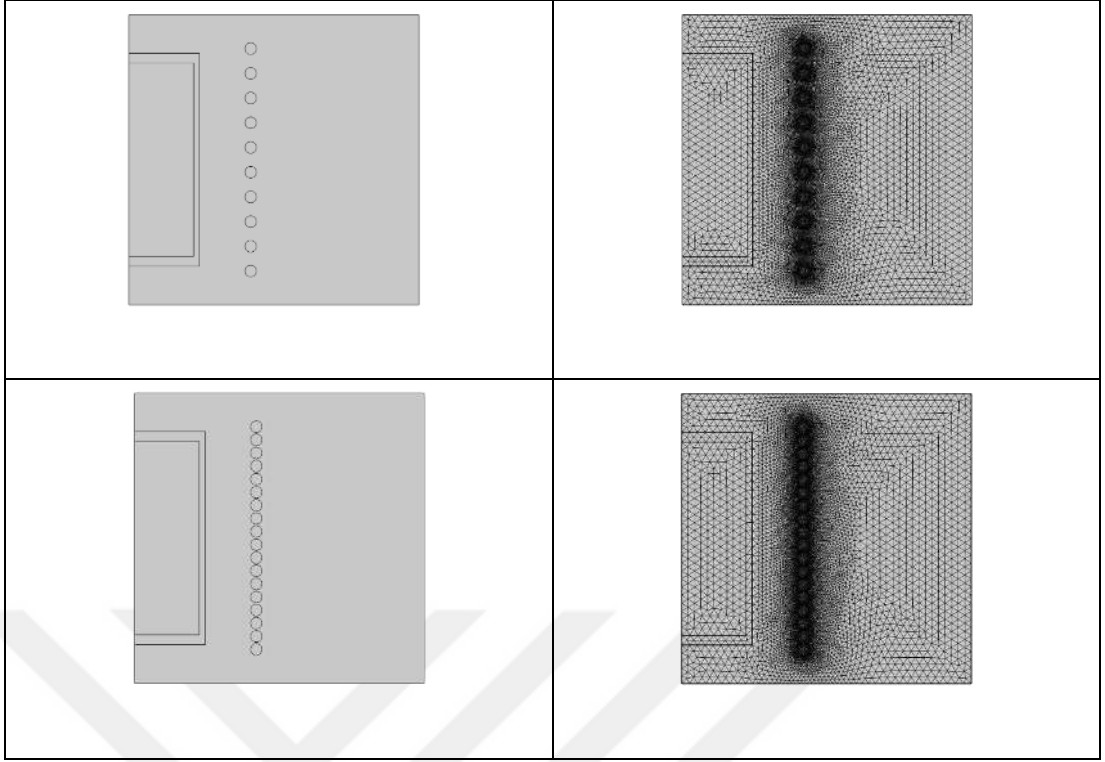
(a)



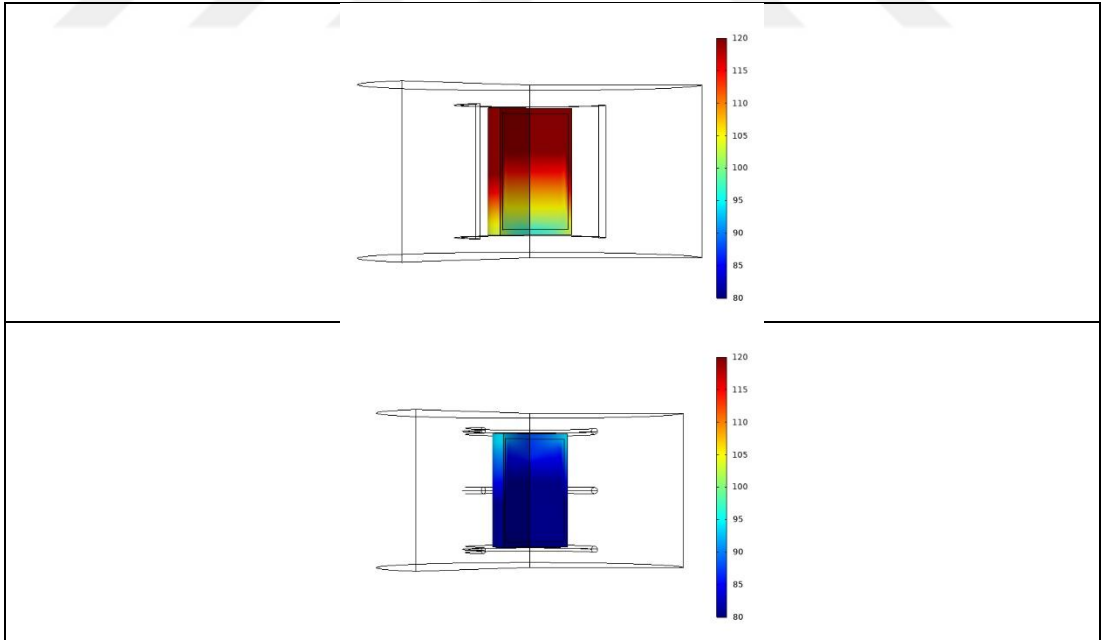
(b)

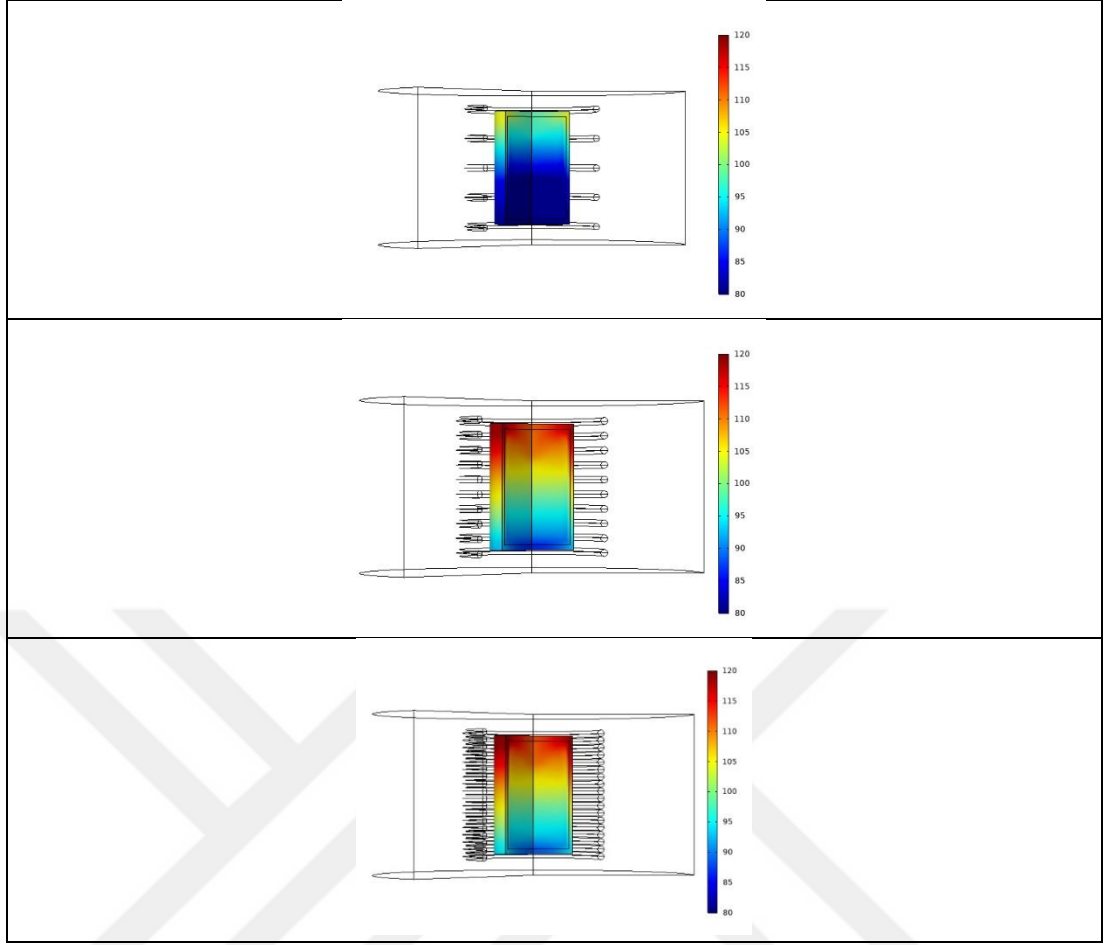
Ek 7. Dikdörtgensel ve dairesel bobin etkisinin 5 farklı matematiksel model ve ağ yapılarında araştırılması



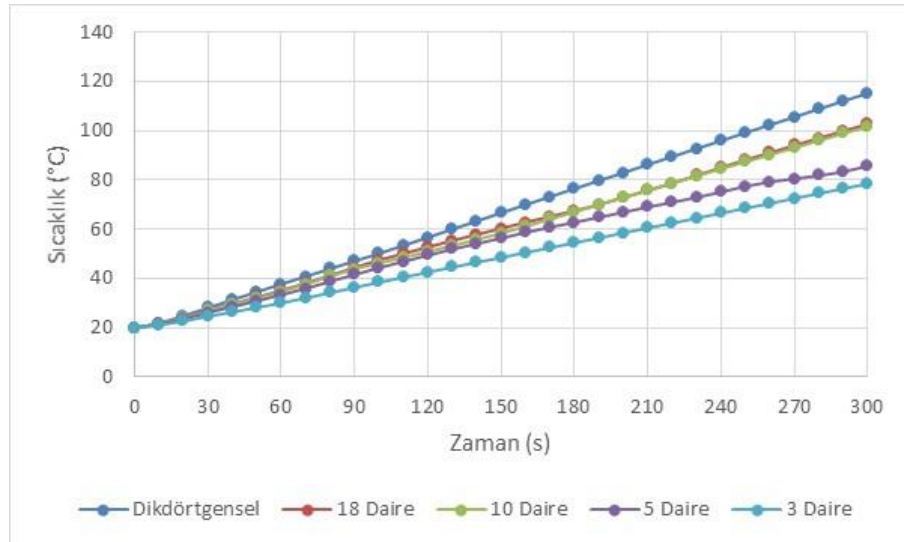


Ek 8. Dairesel ve dikdörtgensel bobinlerin konserve ve konserve içerisinde 300. Saniyede oluşan sıcaklık profilleri

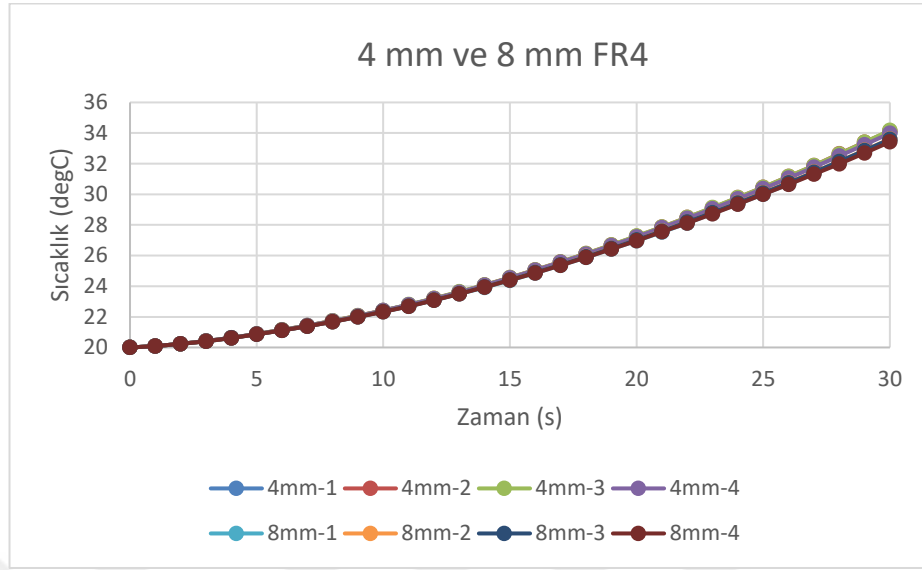




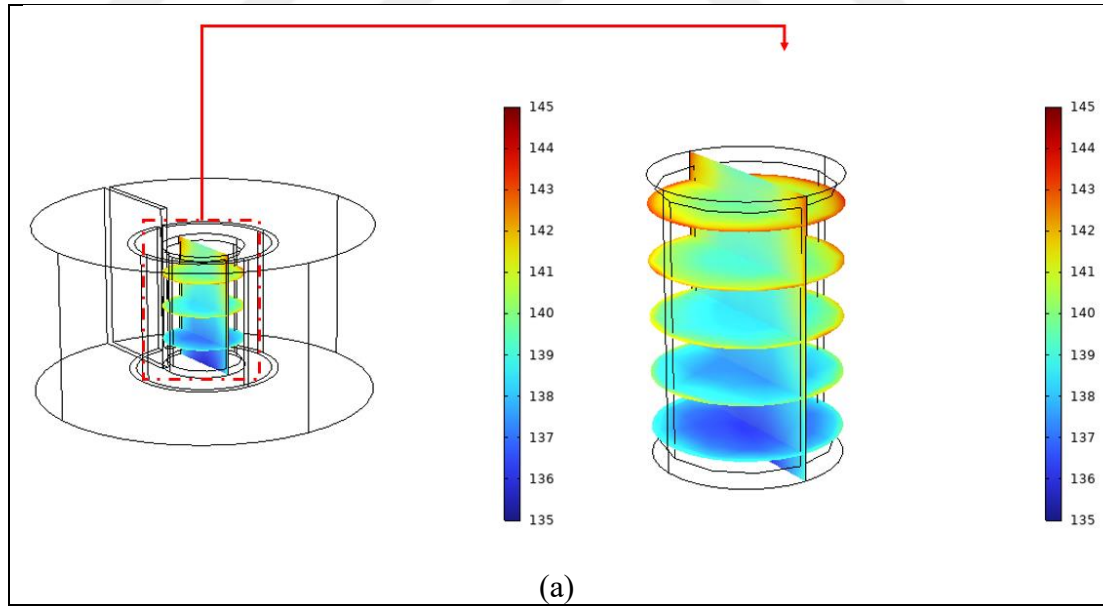
Ek 9. Konserve içerisinde bulunan saf suyun hacimsel ortalama sıcaklık değerleri

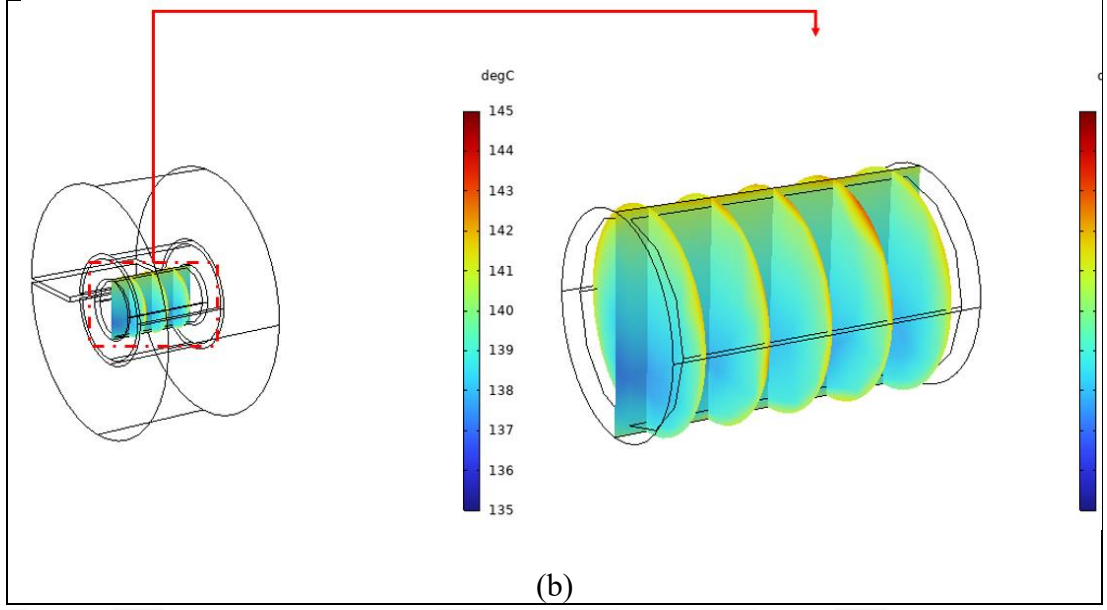


Ek 10. Sistem geometrisine bağı FR4 materyallerinin karşılaştırılması

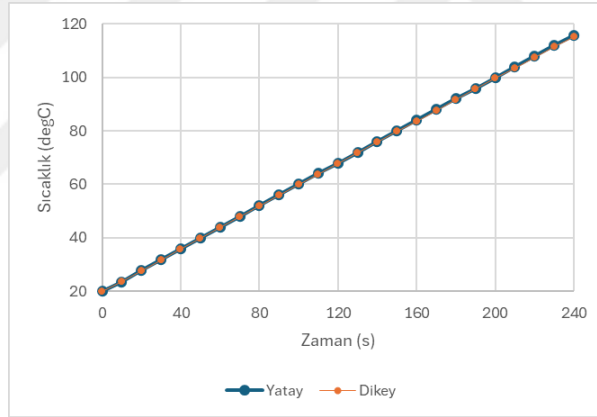


Ek 11. Dikey (a) yatay(b) pozisyonunda konumlandırılan indüksiyon sisteminde konserve ve konserve içerisinde meydana gelen sıcaklık profili

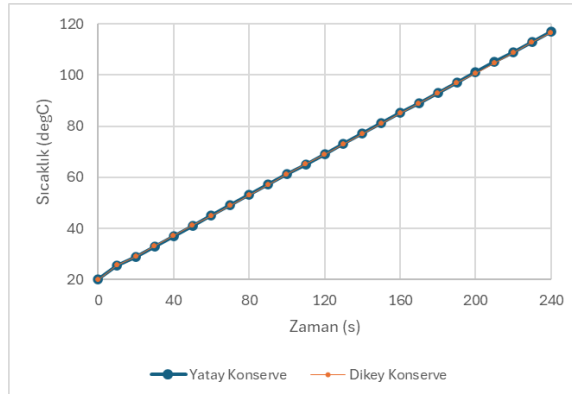




Ek 12. İki farklı pozisyonda duran indüksiyon sisteminde, konserve içerisindeki saf suyun hacimsel sıcaklık ortalama değerlerinin karşılaştırılması



Ek 13. Dikey ve yatay pozisyonda konumlandırılmış indüksiyon sisteminde konserve yüzeyinin ortalama sıcaklık değişimi



Ek 14. Paslanmaz elik konserve havuzu

