

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**MANYETİK İNDÜKSİYON İLE ISITMA OLGUSUNUN SONLU ELEMAN
METODUYLA İNCELENMESİ**

Önder SÖNMEZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



MANYETİK İNDÜKSİYON İLE ISITMA OLGUSUNUN SONLU ELEMAN
METODUYLA İNCELENMESİ

Önder SÖNMEZ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK

ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

TEMMUZ 2022

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MANYETİK İNDÜKSİYON İLE ISITMA OLGUSUNUN SONLU ELEMAN
METODUYLA İNCELENMESİ

Önder SÖNMEZ
FİZİK
ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bu tez 23/06/2022 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Deniz KAYA (Danışman)
Prof. Dr. Orhan BAYRAK
Dr. Öğr. Üyesi Turgut TUT

ÖZET

MANYETİK İNDÜKSİYON İLE ISITMA OLGUSUNUN SONLU ELEMEN METODUYLA İNCELENMESİ

Önder SÖNMEZ

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Deniz KAYA

Temmuz 2022; 39 sayfa

Dişli çarkların indüksiyon yüzey ısıtma teknolojisi, 1926-1939 yılları arasında ABD ve Rusya menşeli patent çalışmaları ile ortaya çıkmıştır. Manyetik indüksiyon ısıtma teknolojisi, endüstride kullanılan kritik elemanların ısıtma işleminde -özellikle yüzey sertleştirme amacıyla- yaygınlaştıran bir uygulamadır. Yüzey sertleştirme için kullanılan mevcut yöntemlere göre en büyük üstünlüğü, çevre dostu olmasıdır. Aynı zamanda, tekrarlanabilir, otomasyona uygun, hızlı ve etkili bir yöntemdir.

Günümüzde, sayısal metotlar referans olabilecek niteliği kazanarak daha önemli hale gelmiştir; artık sayısal metotlar sayesinde farklı fiziksel olguları benzetim sürecine dâhil ederek sistem için önemli olan parametreleri eniyileme imkânı elde edilmiştir.

Deneysel metotlar pahalı ve zaman alıcıdır. Buna karşın, sayısal modelleme kullanarak bir dişli iş parçasının sonlu elemanlar yazılımı yardımıyla indüksiyon ile ısıtma benzetimi yapılarak sertlik profili görece daha ucuz ve daha kısa zamanda elde edilebilir. Bu sayede bilgisayar ortamında indüksiyon ile ısıtma süreci artarda eniyileme sürecinden geçirilip nihai model elde edilebilir. Deneysel olarak doğrulanmış bir sayısal modelden sonra bu model üzerinden eniyileme yapılır. Bu tez çalışmasında, ELTA yazılımı kullanılarak AISI 4340 çelik dişli iş parçasının indüksiyon ısıtma süreci incelenmiş ve literatürden bulunan bir çalışma ile iş parçası üzerindeki sertlik profili ve sıcaklık dağılımının karşılaştırılması yapılmıştır. İndüksiyon ile ısıtma sürecinde, bobin frekansının ve dişli iş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki mesafenin değişiminin AISI 4340 çelik dişli iş parçasının sıcaklık dağılımındaki etkisi incelenmiştir. Çelik dişli iş parçasının üzerinde oluşan sıcaklıklarda martensit fazı oluşumuna sebep olan östenitlenme sıcaklığının (Ac3) dişlide hangi bölgelerde olduğu gözlenmiştir. Çelik dişli iş parçasının yorulma direnci ve aşınma direnci açısından martensit fazının dişlinin kök bölgesinde oluşabilmesi ve ne kadar derinlikte oluştuğu kritiktir. İndüksiyon ile ısıtma sürecinde kullanılan bobin frekansı ve iş parçası ile bobin arasındaki mesafenin, çalışmada kullanılan dişli iş parçasındaki sertleşebilme derinliğini etkilediği görülmüştür.

Bu çalışmada 4340 çelik dişli iş parçasının indüksiyon ile ısıtma işleminin analizinde ELTA 7.0[©] yazılımı kullanılmış ve sonuçlarının güvenilirliği diğer çalışmalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELELER: AISI 4340 çeliği, Benzetim, Dişli, Doğrulama, İndüksiyon ısıtma, Sayısal Modelleme, Sertlik profili.

JÜRİ: Dr. Öğr. Üyesi Deniz KAYA
Prof. Dr. Orhan BAYRAK
Dr. Öğr. Üyesi Turgut TUT

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MAGNETIC INDUCTION HEATING USING FINITE ELEMENT METHOD

Önder SÖNMEZ

MSc Thesis in Department of Physics

Supervisor: Asst. Prof. Deniz KAYA

July 2022; 39 pages

The technology of induction heating of gears emerged with the patent publications from the USA and the Soviet Union between the years 1926-1939. This technology is commonly used for surface hardening of critical pieces used in industry. This method of surface hardening has superiority over alternatives comes from its repeatability, eco-friendliness and being a practically rapid method. At the present time, numerical methods have gained as much importance as to become as a reference for the induction heating industry; now thanks to finite element methods, multiphysics simulation has been developed which enables us to optimize the parameters of the most important ones. Experimental methods are costly and time demanding. However, making use of finite element method software, induction heating simulations of a steel gear can be performed relatively cost effective and in a short time. In this way, the model can be optimized by sequential simulations and can be included into the manufacturing process. Experimentally validated and thus ensured models then be involved into the optimization process. In this study, using ELTA software, induction heating process of AISI 4340 steel gear workpiece is investigated and comparison of hardness profile and temperature profile is made with an academic publication found from literature. The effect of altering inductor frequency and gear workpiece-inductor coil distance on the temperature distribution of AISI 4340 steel gear workpiece during induction heating process is investigated. From the temperature distribution occurring on the steel gear workpiece, the regions of the gear at which the austenitizing temperature (A_{c3}) -responsible for martensite phase formation- has been observed.

In terms of fatigue resistance and wear resistance of the steel gear workpiece, it is critical that the martensite phase can form at the root zone of the gear and how deep it is. The coil frequency used in the induction heating process and the distance between the workpiece and the coil were found to affect the hardening depth in the gear that is used in the study.

In this study, ELTA 7.0 © software is used in the analysis of the induction heating process of the 4340-steel gear workpiece and the reliability of the results is shown in comparison with other studies in the literature.

KEYWORDS: AISI 4340 Steel, Gear, Hardness Profile, Induction Heating, Numerical Modelling, Simulation.

COMMITTEE: Asst. Prof. Dr. Deniz KAYA

Prof. Dr. Orhan BAYRAK

Asst. Prof. Dr. Turgut TUT

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca değerli yardım, katkı ve tanıdığı fırsatla beni yönlendiren hocam Deniz KAYA'ya, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Onur KARAMAN'a ve destekleriyle her zaman yanımda olan başta eşim Eda BÜLBÜL SÖNMEZ olmak üzere aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim. Son olarak, teknik danışmanlık ve akademik yazılım lisansı sağladıkları için değerli katkılarından dolayı NSGSOFT firmasından A.V. IVANOV ve V. BUKANIN'e çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK TARAMASI.....	6
3. MATERYAL VE METOT.....	11
3.1. Malzeme Seçimi.....	14
3.2. AISI 4340 Çelik Malzeme Dişli ve Malzeme Özellikleri	15
3.3. İndüksiyon Isıtmanın Sayısal Modellenmesi	19
3.4. İndüksiyon Isıtmanın ELTA Yazılımıyla Sayısal Modellenmesi	24
4. BULGULAR	28
4.1. Bobin frekansının çelik dişli iş parçasında östenitlenme sıcaklığına olan etkisinin incelenmesi.....	28
4.2. İş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki mesafenin çelik dişli iş parçasında östenitlenme sıcaklığına olan etkisinin incelenmesi	30
5. TARTIŞMA.....	33
6. SONUÇLAR	34
7. KAYNAKLAR.....	36
ÖZGEÇMİŞ	

AKADEMİK BEYAN

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Manyetik İndüksiyon ile Isıtma Olgusunun Sonlu Eleman Metoduyla İncelenmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

23/07/2022

Önder SÖNMEZ



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_p : Sabit basınçta özgül ısı

A : Manyetik vektör potansiyeli

A_{c1} : Östenitlenme alt sıcaklığı

A_{c3} : Östenitlenme üst sıcaklığı

f : Frekans

h : Taşınım katsayısı

j : Akım yoğunluğu

k : Isı iletim katsayısı

L : Kapalı alan uzunluğu

n : Yüzey normal vektörü

q : Isı akısı

R : Yarıçap

t : Zaman

T : Sıcaklık

α : Sıcaklık direnç sabiti

μ_0 : Vakumda manyetik geçirgenlik

μ_r : Maddede manyetik geçirgenlik

ρ : Yoğunluk

ρ_0 : Başlangıç öz direnç

σ : Elektriksel iletkenlik katsayısı

ω : Açısal frekans

Tezde ondalık yazım kullanılan yerlerde ondalık ayırıcı için nokta (.) kullanılmıştır.

Kısaltmalar

FEM : Sonlu Elemanlar Metodu

AISI : Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü (American Iron and Steel Institute)

4340 : 43 (1.8% Nikel, 0.8% Krom, 0.25% Molibden) , 40 (0.4% Karbon) oran kodu

ELTA : Elektrotermal Analiz (Electrothermal Analysis)

CAD : Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)

MF : Orta Frekans (Medium Frequency)

HF : Yüksek Frekans (High Frequency)

HV : Vickers Sertliği (Vickers Hardnes)

HRC : Rockwell Sertliği-C Ölçeği (Rockwell Hardness on the C scale)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Geleneksel çok turlu bir solenoid indüktörün temsili (Vullo 2020).....	1
Şekil 1.2. Tipik bir dişli çarkın terminolojik şeması (Davis 2005).....	4
Şekil 2.1. (a) Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Örgü Ağı; (b) Sıcaklık Ölçüm Noktaları (Chebak vd. 2011).....	9
Şekil 2.2. (a) - (b) Uç düzlemdeki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılım ve sertlik profili – orta frekans (MF ~ 10 kHz); (c) - (d) orta düzlem düzlemdeki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılım ve sertlik profili – orta frekans (MF ~ 10 kHz) (Chebak vd. 2011).....	9
Şekil 2.3. (a) - (b) Uç düzlemdeki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılım ve sertlik profili – yüksek frekans (MF ~ 200 kHz); (c) - (d) orta düzlem düzlemdeki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılım ve sertlik profili – yüksek frekans (MF ~ 200 kHz) (Chebak vd. 2011)	10
Şekil 3.1. Yakınlık etkisi ile ısınma (Shia-Chung Chen vd. 2012).....	13
Şekil 3.2. Dikdörtgen ve halka iletkenlerde saçaklanma etkisi (Rudnev vd. 2017)	14
Şekil 3.3. Sıcaklık ve manyetik alan kuvveti fonksiyonunda AISI 4340 bağlı manyetik geçirgenlik davranışı (Spezzapria 2016)	16
Şekil 3.4. AISI 4340 Çeliğinin Özgül Isısının Ana Fazlar için Sıcaklığa Bağlı Fonksiyonu (Spezzapria, 2016).....	17
Şekil 3.5. AISI 4340 malzemenin sıcaklıkla değişen direnç davranışı (Spezzapria, 2016)	18
Şekil 3.6. AISI 4340 çeliğinin ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağımlılığı (Spezzapria, 2016)	18
Şekil 3.7. Barka'nın çalışmasındaki (Barka 2017) geometriden grafiksel ölçüm metodu kullanılarak alınan ölçümler.....	20
Şekil 3.8. Solidworks©'te oluşturulan CAD modeli	21
Şekil 3.9. Dişli iş parçasının geometrisi üzerinde oluşturulan hesaplama ağı	22
Şekil 3.10. Barka'nın 2 boyutlu dişli iş parçasının şematik gösterimi (Barka 2017)	22
Şekil 3.11. Barkanın çalışmasındaki benzetimde kullanılan hesaplama ağı (Barka 2017)	23
Şekil 3.12. İndüklenen akım dağılımı (A/m ²) (Barka 2017)	23
Şekil 3.13. Benzetim sonucunda elde edilen sertlik profili (Barka 2017)	24

Şekil 3.14. Dişli iş parçası için parametrelerin girileceği arayüz ekranı	24
Şekil 3.15. İndüksiyon parametrelerinin (Bobin frekansı (Hz), güç (W) ve ısıtma süresi (s)) girildiği ekran	25
Şekil 3.16. Bobin parametrelerinin girildiği arayüz ekranı.....	25
Şekil 3.17. İndüksiyon bobininin soğutulması için soğutma suyu seçenekleri.....	25
Şekil 3.18. ELTA yazılımı ve COMSOL yazılımı kullanılarak 4340 çelik dişli iş parçasında elde edilen sıcaklık dağılımları (bobin gücü 220 kW, dişli uç bölgesi bobin arası mesafe 4.54 mm, bobin frekansı 10 kHz ve indüksiyon ısıtma süresi 0.5 saniye) (a) ELTA 7.0 [©] (b) COMSOL (Barka 2017).....	26
Şekil 3.19. ELTA yazılımı ve COMSOL yazılımı ve kullanılarak 4340 çelik dişli iş parçasında elde edilen sıcaklık dağılımlarından çıkarılan sertlik profili (bobin gücü 220 kW, dişli uç bölgesi bobin arası mesafe 4.54 mm, bobin frekansı 10 kHz ve indüksiyon ısıtma süresi 0.5 saniye) (a) ELTA 7.0 [©] (turkuaz sınır içinde kalan bölge) (b) COMSOL(gri bölge) (Barka 2017).....	27
Şekil 4.1. 4340 çelik dişli iş parçasında sabit boşluk mesafesi (4.54 mm), ısıtma süresi (0.5 saniye) ve bobin gücü (220 kW) altında bobin frekansının dişli iş parçası üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi (a) 8 kHz (b) 10 kHz (c) 12 kHz.....	29
Şekil 4.2. Östenitlenme sıcaklığının oluşum derinliğinin bobin frekansına bağlı değişimi	30
Şekil 4.3. Bobin frekansı (10 kHz), bobin gücü (220 kW), ısıtma süresi (0.5 saniye) kullanılarak çelik dişli iş parçası ile indüksiyon bobini arası mesafesinin üç farklı değerinin sıcaklık dağılımına etkisi (a) 4.54 mm (b) 16 mm (c) 26 mm	31
Şekil 4.4. Sabit süre, güç ve frekansta, östenitlenme sıcaklığının (800 °C) oluşum derinliğinin indüksiyon bobini ile dişli iş parçası arasındaki mesafeye göre değişimi.	32

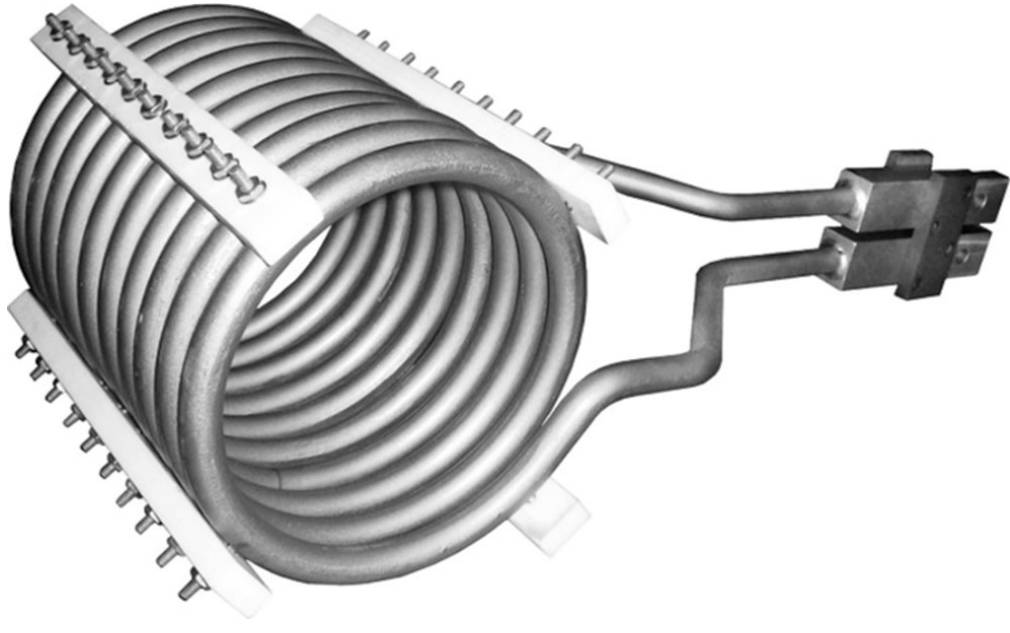
ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. AISI 4340 Çelik malzemesinin dönüşüm sıcaklıkları (Mingardi 2012)..... 15

Çizelge 3.2. AISI 4340 Çelik malzemesinin kimyasal bileşimi (Mingardi 2012)..... 15

1.GİRİŞ

Manyetik indüksiyon ısıtma, ısıl işlem ve özellikle yüzey sertleştirme amacıyla, otomotivden yenilenebilir enerji sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaktadır. İndüksiyon ısıtma uygulanan iş parçası üzerinde eşzamanlı olarak meydana gelen fiziksel olayların benzetimi sonlu elemanlar yazılımlarından faydalanılarak yapılabilmektedir. Sonlu elemanlar yazılımları, deneysel sistemlerin sayısal olarak geliştirilmesine yardımcı olur ve gerçek deneysel verilerle karşılaştırıldığında tatmin edici sonuçlar verebilme kabiliyetindedirler. Sonlu eleman modeli, elektromanyetik alanı ve sıcaklık dağılımını aynı anda çözerek kesin olarak çözüm verebilirler ve indüksiyon ısıtma simülasyon süreçlerinde de kullanılmaktadırlar (Prasad vd. 2022). İndüksiyon ısıtma teknolojisinin faydaları arasında; temiz, tekrarlanabilir, maliyet-etkin olması bulunmaktadır. Ayrıca, ısıtmanın, değişikliğin yapılması istenen yerlerde (dişli iş parçasının ucu, kökü, yanak yüzeyi vb. gibi) yerel olarak kontrolünün sağlanması mümkündür (Mingardi 2012). Endüstriyel uygulamalarda mekanik gücü iletmenin çeşitli yolları arasında dişliler yer almaktadır. Dişliler güç aktarımları çoğu mekanik uygulamada ve özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde kullanılan bileşenlerdir (Vullo, V. 2020). Geleneksel çok turlu bir indüksiyon bobininin temsili görüntüsü Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1. Geleneksel çok turlu bir solenoid indüktörün temsili (Vullo, V. 2020)

Dişlilerin indüksiyonla ısıtılması teknolojisi, 1926'da ABD ve 1939'da Sovyetler Birliği menşeli patent yayınıyla ortaya çıkmıştır (Bukanin vd. 2018; Dawson 1990). Bununla birlikte, ısıl işlem çok daha eskiye dayanmaktadır ve çeliğin mekanik özelliklerini geliştirmek için uzun zamandır bilinmekte ve uygulanmaktadır. Yüksek karbonlu çelik sertleştirme uygulaması binlerce yıldır kullanılmaktadır ve bu yöntem oldukça basit bir prosedürdür. Çelik yeterince ısıtıldığında ve hemen ardından soğuk suya maruz bırakılırsa, çelik iş parçası kırmızımsı bir renge dönüşür. Bu kısımda çelik, çok renkli bir görünüme sahip olur ve daha da önemlisi sertlik gibi mekanik özellikleri iyileştirilir. Isıl işlem, temel olarak bir malzemenin fiziksel özelliklerini (mikroyapısını) değiştirmek için çeşitli ve aşamalı seviyelerde ısının kullanımıyla malzemenin mekanik

özelliklerinin iyileştirilmesi işlemidir; genellikle alüminyum ya da çelik metaller için kullanılmaktadır. Isıl işlem, demir çağından beri kullanılıyor olsa da matematiksel metodolojisinin tam olarak anlaşıldığı dönem 19. yüzyılın ikinci çeyreği olmuştur. O dönemlerde, ardışık fiziksel olaylar üzerinde süreci elektriksel olarak kontrol edebilmek ve fiziksel süreç üzerine tam hakimiyet henüz gerçekleşmemiştir. Ancak, yine de bu ısıl işlem yöntemi yüz yıldan fazla bir süredir biliniyordu (Magnabosco 2006). Bu teknoloji, endüstride kullanılan kritik iş parçalarının tavlama, temperleme, kalıntı gerilim giderme ve yüzey sertleştirme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Tavlama kavramı, çeliği veya alüminyumu belirli bir kritik sıcaklığa kadar ısıtmayı ve ardından çok yavaş ve kontrollü bir hızda soğutmayı kapsamaktayken tavlama, çeliğin veya alüminyumun bir ayırt edici özelliği olan kritik sıcaklığının altında belirli bir sıcaklığa kadar ısıtılmasını kapsamaktadır ve genellikle hava, vakum veya yalıtılmış atmosferlerde yapılmaktadır. İndüksiyonla ısıtma metodu, bahsedilen bu süreçlerin temassız ve kontrollü bir şekilde gerçekleşmesine yardımcı olmakla birlikte malzemede yüzey sertleştirme sürecine olanak tanımaktadır. Yüzey sertleştirme işlemi, metal bir iş parçasının tamamının sertleştirilmesi gerekmediğinde yalnızca yüzeyinin sertleştirilmesi istendiğinde, daha derindeki metalin yumuşak kalmasına izin vererek yüzeyde ince ve derin bölgelere nispeten sert bir metal tabakası oluşturma işlemidir. Yüzey sertleştirme için indüksiyon ısıtma yöntemi, tekrarlanabilirliği, çevre dostu olması ve pratik olarak hızlı bir yöntem olması nedeniyle alternatiflerine göre üstünlüklere sahiptir (Jomaa vd. 2013; Lucía vd. 2013).

Burada sayısal yöntemler, indüksiyonla ısıtma endüstrisi için referans olacak kadar önem kazanmıştır. Artık sayısal yöntemler (sonlu elemanlar yöntemi, sonlu farklar yöntemi) sayesinde çoklu fizik simülasyonu geliştirilmiştir. Bu sayede indüksiyonlu ısıtma proseslerinin en önemli parametrelerini optimize etmemiz mümkün hale gelmiştir.

İndüksiyon ısıtma multifizik prosedürü, Faraday'ın indüksiyon yasasını içerir ve sonuçta ortaya çıkan indüksiyon, Joule etkisi fenomenine yol açan girdap akımına neden olur (Jankowski vd. 2016). Bu süreç esnasında iş parçası ısınır. Özellikle yüksek frekanslı indüksiyon ısıtma işleminde, indüklenmeyle malzeme üzerinde girdap akımları oluşur ve bu fiziksel olgu Joule ısınması olarak bilinir. Girdap akımı nedeniyle telde üretilen birim hacim başına Joule ısınmasını alternatif akım nedeniyle oluşur. Maxwell denklemleriyle hesaplanan manyetik alan, teldeki Joule ısınmasını tahmin etmek için kullanılmaktadır (Prasad vd. 2022). Bu ardışık fiziksel fenomenler basit görünmesine rağmen aslında manyetik indüksiyonla ısıtma olgusu oldukça karmaşıktır. Bu nedenle, bir manyetik indüksiyonlu ısıtma sistemini pratik olarak tasarlamak oldukça zahmetli bir işlemdir ve genellikle çok fazla deneme yanılma süreci gerektirmektedir (Tavakoli vd. 2009). Ayrıca, manyetik indüksiyon sisteminin deneysel kurulumu, iş parçası boyunca çeşitli noktalara yerleştirmek için sıcaklık sensörleri gibi çeşitli ekipmanları gerektirir. Bahsedilen bu prosedürler ve deney ekipmanları maliyet ve zaman anlamına gelmektedir. Ek olarak, sensörlerden elde edilen veriler, sürecin deneysel dinamikleri ile ilgili olarak her zaman güvenilir ve kesin olamamaktadır ve aynı teknikle her bir deney için tekrar gerekli olmaktadır.

Deneysel yöntemler yukarıda belirtilen nedenlerden dolayı maliyetli ve zaman alıcı olması sonlu elemanlar yöntemi gibi alternatifler gerektirmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi yazılımı kullanılarak, bir çelik dişlinin indüksiyonla ısıtma simülasyonları, nispeten uygun maliyetle ve kısa sürelerde gerçekleştirilebilir. Simülasyon ortamları sırasındaki hatalar hem maliyetsizdir hem de sıralı simülasyonlarla en iyilime yapılarak

istenen ürün üretim sürecine dahil edilebilir (Chaboudez vd. 1994). Bu nedenle, sayısal yöntemlere talep artarak yükselmektedir. Bu çoklu fiziksel yöntemde, elektromanyetik ve termal denklemlerin birleştirilmesi karmaşıktır ve malzemenin mekanik, elektriksel ve manyetik özellikleri doğrusal değildir. Bu nedenle birçok araştırmacı, indüksiyonla ısıtma işlemi için güvenilir bir sayısal çözüm elde etmek için çok değerli çabalar sarf etmektedir (Fu vd. 2017). Akademik çalışmalarda kolaylıkla kullanılan indüksiyonlu ısıtma sistemi ya da bileşen tasarımı için simülasyon araçları bulunmaktadır (Jankowski vd. 2016; Baldan vd. 2019; Bukanin vd. 2019). Bu çalışmada AISI 4340 çelik dişli iş parçasının simülasyon aracı kullanılarak ısıl işlemin bir parçası olan indüksiyonla ısıtılma üzerine bir inceleme yapılmıştır. İndüksiyonlu ısıtma sisteminde esas olarak sertleşme derinliği (mm) ve güç kaynağı frekansı (Hz) gibi parametrelere odaklanılmıştır. Ardışık simülasyonlar gerçekleştirildikten sonra sayısal sonuçlar ve bu sonuçların grafiklere aktarılması gerçekleştirilmiştir. Bu grafikler yardımıyla malzemede beklenen sertleşme derinliğinin ve sıcaklığın bobin uyartım frekansı arasındaki ilişki, bobin-malzeme arası uzaklığın ve sertleşme derinliğinin arasındaki ilişkinin tayini amaçlanmıştır. Çalışmada kullanılan ELTA yazılımında bulunan ek bir sayısal teknik sayesinde oldukça hızlı sayısal sonuçlar elde edilmektedir (Bukanin vd. 2017). AISI 4340 çelik bir dişli iş parçasının indüksiyon ısıtma sürecinin sayısal modellenmesi ve bir benzetim yazılımı kullanarak dişlinin yüzeyinde düzgün bir sertlik profili elde edilmesi için gereken bobin geometrisi ve makine parametrelerinin değerlerini (bobin uyartım frekansı ve akımı/gücü, bobin geometrisi ve uzaklığı) eniyilemesi de çalışmanın bir diğer hedefidir. İş parçasının mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla yapılan bu indüksiyon ısıtma çoklu fizik benzetiminin ardından bu benzetimin doğrulanması literatür ile karşılaştırılarak yapılmıştır. Sayısal model ile literatürden referans alınan çalışma arasında yüksek bir uyum gözlemlenmiş ve bu karşılaştırmaya BULGULAR bölümünde yer verilmiştir.

Dişli çarklar, çevrelerindeki ardışık bağlantılı dişler vasıtasıyla dönel hareketi ve gücü ileten makine elemanlarından biridir. Dişli çarklar 3 bin yıldan fazla bir süredir kullanılan birçok açıdan önemli olup çok sayıda uygulamada günümüzde kullanılmaktadır. Otomotiv, havacılık, gaz ve yağ endüstrisinden sualtı teknolojileri, takım tezgâhları ve büyük şaftlara kadar uygulama alanları bulunmaktadır (Davis 2005).

Literatürde dişli iş parçalarının indüksiyon ısıtma süreci ile ilgili oldukça kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, hesaplama yükü ve süresi açısından çoğunlukla 2 boyutlu modeller tercih edilmiştir. Son yıllarda yapılan çalışmalarda 3 boyutlu modeller kullanılmaya başlanmıştır. Üç boyutlu model ile daha kesin sonuçlar elde edilmesine rağmen modelin birtakım dezavantajları bulunmaktadır. Bunlar genellikle, sayısal çözümde kararlılığın sağlanmasının güç olması, ağ yapısı ve hesaplama için gerektirdiği yüksek hafıza ve işlem kapasitesidir.

Bu çalışmada ELTA 7.0 (Url-1 2022, <https://www.nsgsoft.com/products/elta>) benzetim yazılımı kullanılarak AISI 4340 çelik malzeme bir dişli çarkın 2 boyutlu indüksiyon ısıtma benzetimi yapılmış ve ardından iş parçası yüzeyindeki sertlik profili incelenmiştir. Aynı zamanda, yapılan literatür taramasında bu alandaki tezlerde Türkçe kaynaklara rastlanmamış ve bu alanda Türkçe literatüre katkı sağlanmak amaçlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan dişli çark terimleri Şekil 1.2’de verilmiştir.

sayısal modellere aktarıldığında ve bu ardışık karmaşık bilimsel süreçler doğru yönetildiğinde sonuçların ne kadar etkili olduğuna dikkat çekmeyi amaçlamaktadır.

Tezin konusu ile ilgili olarak literatür taraması yapılmış ve geçmiş yıllara ait yayınlara KAYNAK TARAMASI bölümde yer verilmiştir.

2. KAYNAK TARAMASI

Barka ve çalışma arkadaşları yaptığı bir araştırmada (Barka vd. 2011) termal-elektromanyetik kuplaj problemini 105.2 mm dış çapa ve 6.5 mm kalınlığa ve 48 adet dişe sahip bir iş parçasının 2 boyutlu modeli üzerinden sonlu elemanlar yöntemiyle incelemiştir. 7.5°'lik bir açıyla temsil edilen bir dişli içeren bu çalışmada malzemeyi homojen ve izotropik kabul etmiştir. Başlangıç ortam sıcaklığını 20 °C olarak ayarlamıştır ve bobin geometrisini 30 mm kalınlığında bakırın katı bir bölümü ile temsil etmiştir. Oluşturduğu sayısal modelde manyetik geçirgenliği ($\mu_r = 1$) ve elektrik alan geçirgenliği ($\epsilon_r = 1$) olan bir ortam kabul etmiştir. Konveksiyonla kaybedilen ısı enerjinin, hava yoluyla iletimle kaybedilen enerjiye eşdeğer olduğunu varsaymıştır. Isıl işlem sürecinin uygulama süresinin kısa olması nedeniyle radyasyonla kaybedilen enerjiyi ise ihmal etmiştir. 10 kHz bobin uyartım frekansı, 0.5 saniye indüksiyon ısıtma uygulama süresi ve 220kW bobin gücü parametrelerini kullanarak dişlinin kök bölgesinde düzenli bir sıcaklık dağılımı elde etmiştir.

AISI 4340 yüksek mukavemetli çelikten yapılmış düz dişlilerin indüksiyonlu ısıl işlem prosesini Barka, 3-boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılarak göstermiştir (Barka vd. 2014). Oluşturduğu bu modelinde, elektromanyetik alan ve ısı transferi denklemlerinin aynı anda sayısal çözümünü gerçekleştirerek simülasyon gerçekleştirmiştir. Model, yeterli bir formülasyona dayalı olarak ve malzeme özellikleri ve proses parametrelerini dikkate alarak, dişlideki sıcaklık dağılımının hesaplanmasına imkân vermiştir. Barka bu çalışmasında dişli iş parçasında elektromanyetik kenar etkisini azaltmak için indüksiyon ısıl işlemden sonra optimum sertlik profilinin elde edilmesini sağlayan yeni bir yaklaşım önermiştir. Önerilen yöntemde, ana dişli, akı yoğunlaştırıcılar olarak hareket eden aynı geometriye sahip diğer iki dişli arasında konumlandırılmıştır. Dişli ve akı yoğunlaştırıcılar arasındaki boşluk, dişli dişlerin uç ve kök bölgeleri arasındaki sıcaklık değişimi incelenerek optimize edilmiştir. Önerilen model kullanılarak, düz dişlilerin indüksiyonla sertleştirilmesi sırasında orta ve yüksek frekans koşullarında oldukça düzgün bir sıcaklık profiline izin veren işleme koşullarının belirlenmesi mümkün olmuştur. Kurulan bu model, 102.5 mm dış çapa, 80 mm iç çapa, 6.5 mm kalınlığa ve 48 dişe sahip bir düz dişliyi ele almıştır. Bobin, bakırdan yapılmış bir kare halka bölümü ile temsil edilmiştir ve dişli ile bobin arasındaki boşluk 2 mm'ye sabitlenmiştir. Ayrıca, ağ kalitesini iyileştirmek, hassasiyeti artırmak ve hesaplama süresini azaltmak için simülasyonda dişli ve bobinin çeyrek kesiti dikkate alınmıştır. Malzeme 4340 çelik olmak üzere homojen ve izotropik olarak kabul edilmiştir.

2017 yılında yayınlanan bir makalede (Hammi vd. 2017), 3-boyutlu simülasyon ve deneysel doğrulamaya dayalı olarak AISI 4340 çelik malzemelere uygulanan sabit olmayan indüksiyonlu ısıtma işleminin bir araştırmasını sunmaktadır. Çalışma, çeşitli indüksiyonlu ısıtma parametreleri ile sabit indüksiyonlu ısıtma durumunda geliştirilen nihai sertlik profili arasındaki korelasyonların biçimine ilişkin bulgular sunmaktadır. Çalışmada önerilen yaklaşım, kapsamlı bir 3-boyutlu modelleme aracılığıyla frekans, güç ve özellikle tarama hızı değişiminin etkilerini analiz etmeye odaklanmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile kurulan simülasyonda, birleştirilmiş elektromanyetik ve termal alan analizine dayalı olarak sıcaklık dağılımını ve sertlik profilini öngörülmesi amaçlanmıştır. AISI 4340 çelik dişliler için ticari bir indüksiyon makinesinde yürütülen deneyleri içeren bu çalışmada uygulanabilirlik de doğrulanmıştır. Çalışmada önerilen modelleme prosedürünün geçerliliği deneysel olarak karşılaştırılmış ve ölçülen sonuçlar

arasında büyük bir uyum olduğunu gözlenmiştir.

2011 yılında yapılan bir çalışmada Candeo ve çalışma arkadaşları (Candeo vd. 2011) yaptıkları simülasyonlar sırasında, referans iş parçası olarak dişli kullanmışlardır. Orijinal dairesel geometriyi ilk önce diş periyodikliği ve simetrisinden yararlanarak modellemişlerdir. Bu basitleştirme, dişlinin uçlarındaki kenar etkileri olarak adlandırılan gerçek alan davranışını hesaba katmaya izin vermez, ancak yine de uzakta bulunan bir orta düzlem kesiti üzerindeki gerçek güç dağılımının iyi bir tahminini sağlamıştır. Tüm hesaplamalar modern bir iş istasyonunda gerçekleştirilmiş ve ısıtma aşaması sırasında birleştirilmiş elektromanyetik problemini çözmek yaklaşık 35 dakika sürmüştür; soğutma fazının çözümünü değerlendirmek 5 dakika sürmüştür. Çalışma sonucunda Candeo ve çalışma arkadaşları dişli iş parçası üzerinde indüksiyon ısıtma neticesinde sıcaklık dağılımının sayısal çözümünü elde edilmişlerdir. 950 °C'nin üzerinde ısıtılan bölgenin diş profilini düzenli şekilde takip ettiği, böylece indüksiyonlu yüzey sertleştirme gereksinimlerini karşıladığı, yani kanatlarda yeterli bir sertleştirme derinliğinin olduğu sonucuna varmışlardır. 950 °C Ac3 geçiş sıcaklığı ardından yapılan soğutma martensitik dönüşümü sağlayacak koşula karşılık gelmekte ve beynit ve perlit gibi daha yumuşak ürünlerin oluşmasını engellemektedir. Son olarak, yapılan bu çalışmada sertleşebilirlik diyagramı kullanılarak, ısıl işlem den sonra elde edilen sertlik profilinin bir tahmini önerilmiştir.

Barka 2017'de yayınladığı bir makalede (Barka 2017), etkin parametrelerinin sertlik profili üzerindeki etkisini araştırarak indüksiyon ısıtma işlemiyle ısıtılan düz dişliye uygulanan hassasiyet çalışmasını sunmuştur. Barka, çalışmada, güç (kW), ısıtma süresi ve bobin frekansı (kHz) dahil olmak üzere ana proses parametreleri, sertliği ve nihayetinde mekanik performansları büyük ölçüde etkileyen temel parametreleri araştırmıştır. Bu araştırma, elektromanyetik alan ve ısı transferinin birleştirilmesiyle elde edilen simülasyon sonuçları ile mümkün olmuştur. Çalışmada analiz üç aşamadan oluşmaktadır; ilk olarak, malzeme özellikleri ve indüksiyon parametreleri dikkate alınarak bir 2-boyutlu model oluşturulmuştur. İkinci olarak, yüzey sıcaklıkları ve sertlik derinlikleri, makine parametrelerinin değişimi ile derinlemesine analiz edilmiştir. Son olarak, çeşitli istatistiksel araçlar kullanılarak sertlik profilinin indüksiyon parametrelerinin değişimi ile sistemin duyarlılığı araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; 10 kHz bobin frekansı, 220 kW bobin gücü, 0.5 saniye çalışma süresi kullanılarak 105.2 mm çapa ve 6.5 mm kalınlığa sahip 48 dişli bir dişli iş parçasının indüksiyon ısıtma süreci diş dibinde düzgün bir sıcaklık dağılımı sağlamıştır.

Bukanin ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada dişli iş parçası için indüksiyon ısıtma sürecine dair yaklaşık 17 farklı parametre tespit etmiştir. Dişlinin belirli bölgelerindeki sıcaklık dağılımı ve indüksiyon bobininin elektriksel özellikleri, hesaplanması ve dikkate alınması gereken temel parametrelerden birkaçıdır. Nemkov ve arkadaşlarının önerdiği 2-boyutlu bir dişli yazılımında, dişlinin kesitini ve diş profilini üç çizgi ve alt kısmını dahil ederek toplamda 5 nokta ile temsil etmiştir. Bu sayede elde edilen sayısal modeli oldukça hızlı bir şekilde analiz edilebilme kabiliyetine erişmek mümkün olabilmektedir. Bu yazılımın 2-boyutlu hesaplama algoritması, Nemkov tarafından önerilen ELTA yazılım platformudur. ELTA 7.0 programının algoritması, Nemkov ve Demidovich tarafından önerilen elektromanyetik ve termal problemlerin dahili kuplajlı sonlu farklar metoduna ve harici elektromanyetik problem için toplam akı metoduna dayanmaktadır. Elektro-termal problemin iç kısmı geometrik simetri dikkate alınarak çözülmüştür, yani bir dişli

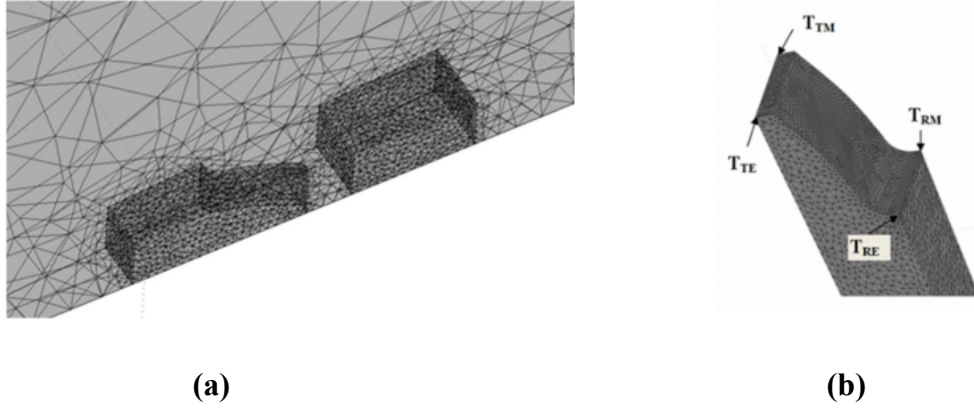
dişinin sadece 1/2 kısmı simüle edilmiştir. ELTA yazılımı dişli iş parçasının indüksiyon ısıtma sonucu dişli üzerinde oluşan sıcaklığın iki boyutlu dağılımını hesaplamaktadır.

Son senelerde yapılan bir çalışma sonucunda ortaya çıkan bir yazılım, indüksiyon ısıtma uygulamaları için çok hızlı çalışabilen bir ara yüzle sahiptir. Bu çalışma (Ivanov vd. 2019) sonucu ortaya çıkan yazılım sadece iletken metallerde değil aynı zamanda iletken olmayan malzemeleri de indüksiyonla ısıtılabilceğini simülasyon üzerinden incelemiştir. Çok amaçlı bilgisayar destekli fizik simülasyonları için kullanılan yazılımların sistemleri çok basit değildir ve deneyimli kullanıcılara ve araştırmacılara ihtiyaç duyar. Ivanov yaptığı bu çalışmada ortaya koyduğu yazılımla alternatif yazılımlara göre hızlı sonuçları sunmuştur. Çalışmada belirtilen teknolojik sınırlamalar; jeneratörün çıkış gücünün en fazla 250 kW güçte olabilmesi ve indüksiyon bobininin uyarım frekansı en fazla 10 kHz olabilmesidir. En uygun frekansın seçiminin çok önemli olduğunu vurgulanmıştır. Çalışmanın sonuç bölümünde seçtiği malzeme için indüksiyon bobininin uyarım frekansında rasyonel bir frekans değeri önerisinde bulunmuştur.

2021 yılında (Parvinzadeh vd. 2021) yapılan bir çalışmada, AISI 4340 dişlilerin manyetik akısını ve dolayısıyla sertlik profilini kontrol etmek için indüksiyon ısıtma metodunu incelemiştir. Çalışmada, ısıtma işlemi görmüş dişlilerin uç ve kökündeki sertlik profilleri mikro girinti sertlik testleri ile ölçülmüş ve elde edilen deneysel veriler ile proses parametrelerinin ana etkisini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) ve tepki yüzeyi metodolojisi (RSM) kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca sertlik derinliğini en üst düzeye çıkaran ve istenmeyen kenar etkisinin en aza indiren en iyi proses parametrelerin kombinasyonu belirlenmiştir. Son olarak, doğrusal regresyon yöntemine dayalı olarak, süreç parametrelerine karşı tahmin edilen sertlik derinliği modelleri geliştirilmiştir. Bu amaçla, düz dişlilerin kenar düzleminde ve orta düzleminde uçta ve kökte sertlik derinliğinin dört öngörücü modeli incelenmiştir. Çalışma, çeşitli işlem parametreleri altında sertlik derinliğinin iyi bir şekilde araştırılmasını yapmıştır ve indüksiyonla sertleştirme işlemi sırasında kenar etkisine yönelik güvenilir bir kılavuz sunmaktadır.

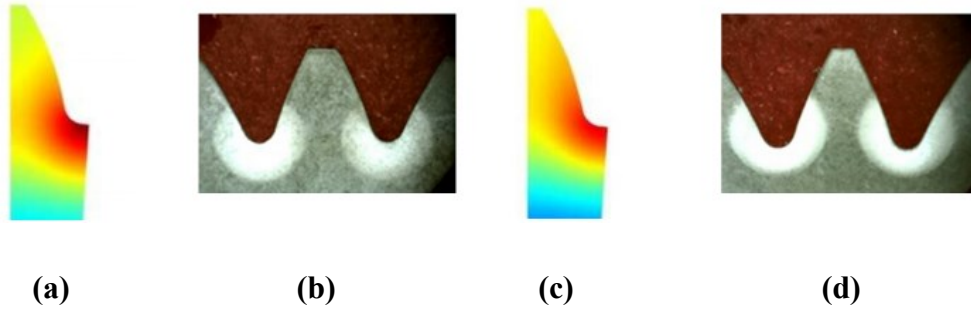
Chebak ve çalışma arkadaşlarının yayınladığı çalışmada (Chebak vd. 2011) çelik dişli bir iş parçasının (100 mm dış çap, 6.5 mm kalınlık, 48 dişe sahip AISI 4340 malzeme) 3-boyutlu olarak modellenmiş ve bakır kesitli dikdörtgen bir bobin ile akım uyarımlı bir indüksiyon ısıtma benzetimi yapmıştır. Chebak ve çalışma arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada, AISI 4340 çelik malzeme özellikleri literatürden elde edilen değerlerle modellenmiştir. COMSOL MULTIPHYSICS® yazılımı ortamında kullanılan parametreler; bobini sürmek için akım yoğunluğu (A/m^2) ya da gücü (kW), ısınma süresi (s) ve frekans (kHz)'dir. Çalışmada, Ac_3 (östenitlenme sıcaklığı) için 850 °C değerinin üstünde kalan bölgeleri su verme işlemi sonrası martensit dönüşümüne uğrayacağı bölgeler olarak dikkate alınmıştır. Bu şekilde gerçekliğe çok yakın bir yaklaşım amaçlanmıştır.

Şekil 2.1'de sonlu elemanlar modelinde kullanılan çözüm ağı ve geometrik model üzerinde sıcaklığın belirlenmesi için oluşturulan sıcaklık ölçüm noktaları görülmektedir.

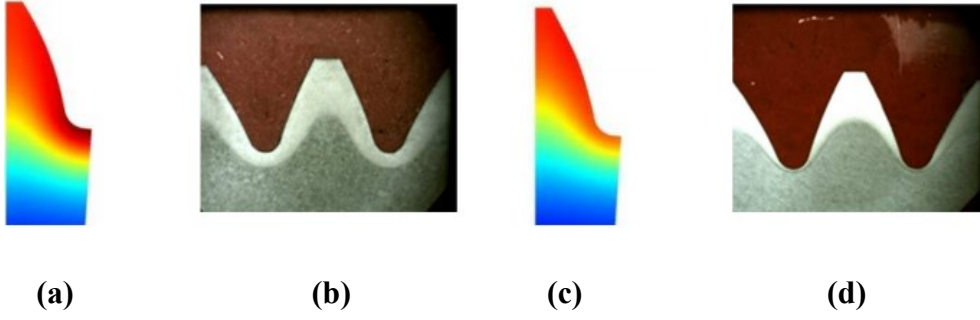


Şekil 2.1. (a) Sonlu Elemanlar Modelinde Kullanılan Örgü Ağı; (b) Sıcaklık Ölçüm Noktaları (Chebak vd. 2011)

Sonuçlar incelendiğinde özet olarak, Şekil 2.2’de görüldüğü üzere orta frekans (MF) uygulandığında indüklenen akım dağılımının en fazla yoğunlaştığı bölge dişlinin kök bölgesi olup en fazla sıcaklık kök bölgesinde gözlemlenmiş ve dişlinin uç bölgesinde düşük sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Buna karşın, yüksek frekans (HF) uygulandığında indüklenen akım dağılımının en fazla yoğunlaştığı bölge dişlinin uç kısmında olup en fazla sıcaklık bu bölgede gözlemlenmiş ve dişlinin kök bölgesinde düşük sıcaklıklar gözlemlenmiştir. Ayrıca, sonuçlardan kenarlarda ısınma etkisi görülmüş ve kökte ısınmanın en çok olduğu düzlemin dişlinin uç düzleminde olduğu fark edilmiştir. Sonuç olarak, orta frekans (MF~10kHz) uygulandığında benzetim sonuçlarından anlaşıldığı üzere, uç düzleminde ve orta düzleminde sert martensit dönüşümünün en çok olduğu bölge dişlinin kök bölgesidir. Buna karşın, yüksek frekans (HF~200kHz) uygulandığında, Ac_3 üzerinde olmak kaydıyla en yüksek sıcaklık dağılımı uç düzlemindeki kök bölgede ve orta düzlemindeki uç bölgede ve az bir kısmı bölüm dairesi yakınlarında gözlemlenmiştir (Şekil 2.2 – Şekil 2.3).



Şekil 2.2. (a) - (b) Uç düzlemindeki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılımı ve sertlik profili – orta frekans (MF ~ 10 kHz); (c) - (d) orta düzlemindeki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılımı ve sertlik profili – orta frekans (MF ~ 10 kHz) (Chebak vd. 2011)



Şekil 2.3. (a) - (b) Uç düzlemdaki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılım ve sertlik profili – yüksek frekans (MF ~ 200 kHz); (c) - (d) orta düzlem düzlemdaki indüksiyon ısıtma sürecinin sonunda sıcaklık dağılım ve sertlik profili – yüksek frekans (MF ~ 200 kHz) (Chebak vd. 2011)

3. MATERYAL VE METOT

İndüksiyon ısıtma işlemi, elektromanyetik indüklenme ile iletken maddede oluşan elektrik akımının iletimle malzeme üzerinde ısınma oluşması sürecidir. Burada indüklenme sonucu oluşan akımlara Eddy akımları ya da Foucault akımları denir ve Maxwell'in 3'üncü denklemine uyar. Sonuç olarak ohm ısınması oluşur buna aynı zamanda Jule ısınması da denmektedir. Jul ısınması ile malzemede ısı transferi sağlanmaktadır. Burada geçerli olan elektromanyetizma ve ısı transferi fiziksel olgularını aynı anda çözebilmek için matematiksel bir model oluşturulmuştur; gerekli parametreler, başlangıç ve sınır koşullar tanımlanıp uygun sayısal metot ile çözümlenmiştir. Modele geçici ısı iletimi, Faraday indüksiyon kanunu ve joule ısıtma için Ohm kanunu dahil edilmiştir. Isı transferi modellemesinde, daha gerçekçi bir yaklaşım elde edebilmek için ısı transferinin konveksiyon modu da dahil edilmiştir. Konveksiyon, gazlar ve sıvılar gibi sıvılar içindeki moleküllerin toplu hareketi ile ısı transferi işlemidir. Nesne ile sıvı arasındaki ilk ısı transferi iletim yoluyla gerçekleşir, ancak toplu ısı transferi sıvının hareketinden dolayı olmaktadır.

2-D zamana bağlı ısı transferi denklemi (Denklem 1), Faraday indüksiyon kanunu (Denklem 2) ve Ohm kanunu (Denklem 3) aşağıdaki gibi gösterilmiştir (Fisk 2011; Chen vd. 2008).

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (3.1)$$

$$j \omega \sigma A - \mu^{-1} (\nabla^2 A) = J_0 \quad (3.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{|\rho_0 (1 + \alpha (T - T_0))|} \quad (3.3)$$

ρ kütle yoğunluğu, c özgül ısı kapasitesi, T sıcaklık, k termal iletkenlik katsayısı, Q dışarıdan uygulanan ısı akısı, j akım yoğunluğu, ω açısal frekans, σ elektriksel iletkenlik katsayısı, T_0 ortam sıcaklığı, A manyetik vektör potansiyeli, μ ortamın manyetik geçirgenlik sabiti, ρ_0 ilk öz direnç, J_0 bobin için uygulanan kaynak akım yoğunluğu ve α direncin sıcaklık katsayısıdır. 2-D ısı transferi denkleminde ısı transferinin konveksiyon ve radyasyon modları dahil edildiğinde denklem (3.1) denklem (3.4)'e dönüşür (Candeo vd. 2011).

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + \alpha (T^4 - T_0^4) + \beta (T - T_0) = 0 \quad (3.4)$$

Burada, α Boltzmann katsayısı, β konveksiyon katsayısı ve n ise yüzey normalidir.

İndüksiyon ısıtmada olgusunda elektromanyetik indüksiyon sürecine, bobinde ve iş parçasında akım dağılımını düzensiz bir formda etkileyen birkaç elektromanyetik etki de dahil olmaktadır. Bunlar, kabuk etkisi (skin effect), yakınlık etkisi (proximity effect) ve saçaklanma etkisidir (ring effect). Bunlardan "kabuk etkisi" denen olgu; iş parçasının yüzeyinde oluşan girdap akımlarının metal yüzeyinde oluşması ve ısı transferinin iş parçasının iç bölgelerine difüzyon yoluyla nüfuz etmesi şeklinde gerçekleşmektedir (Spezzapria 2016).

Deri etkisi, akım alternatif olduğunda aktif bir olgudur ve bu olguda alternatif akımın frekansı arttıkça alternatif akım iletkenin dış yüzeyine daha yakın akma eğilimidir. Deri (penetrasyon) derinliği (δ) Denklem 3.5'teki gibi ifade edilir (Jankowski vd. 2016).

$$\delta = \sqrt{2/(\omega\mu\sigma)} \quad (3.5)$$

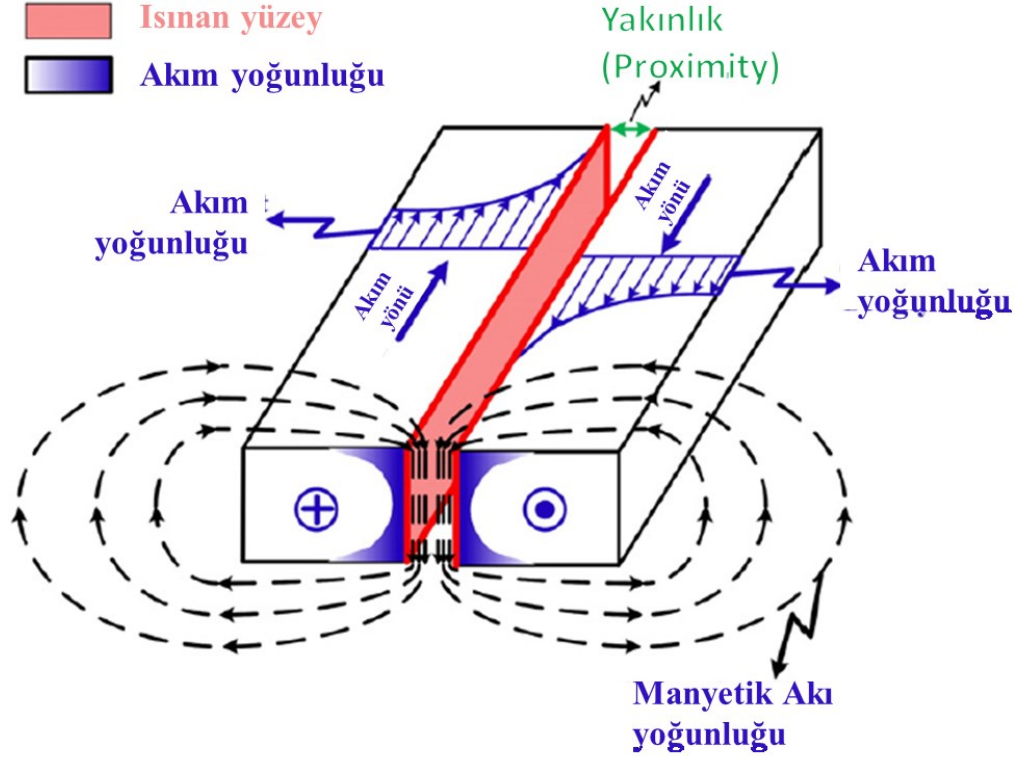
δ ile gösterilen yüzey derinliği, iletken yüzeyindeki değerinin 1/e'sini ifade eder. Burada ω indüksiyon bobininin uyartım frekansını, μ iş parçasının malzemesinin manyetik alan geçirgenliğini, σ ise iş parçasının elektriksel iletkenlik katsayısını temsil etmektedir. İletkendeki akım yoğunluğu Denklem 3.6'daki gibi ifade edilir (Frogner vd. 2011).

$$j = j_0 * \exp(-x/\delta) \quad (3.6)$$

Burada j_0 iletkendeki akım yoğunluğunu, x derinliği ifade etmektedir.

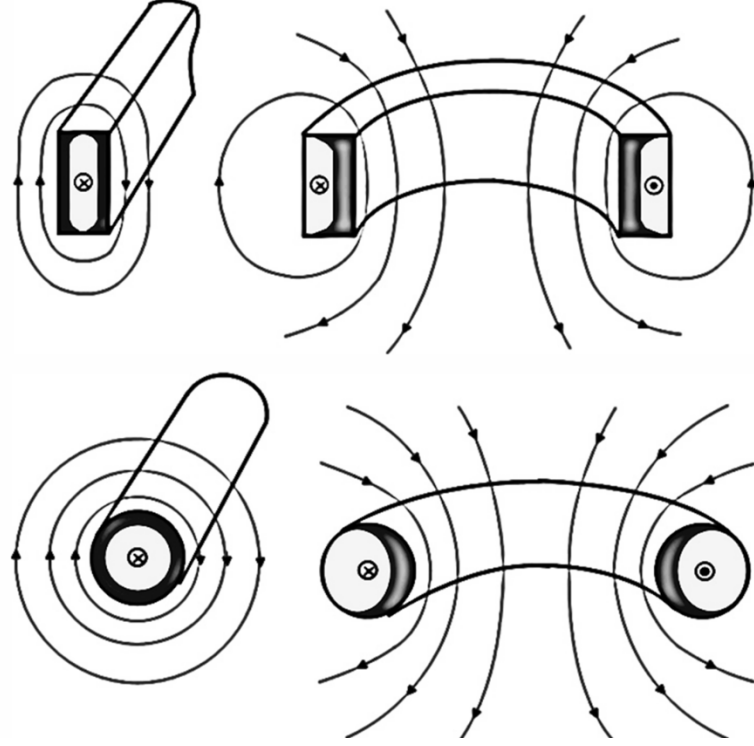
Deri etkisi, iki denklemin birbiriyle doğrudan ilişkide olduğu bir olgudur ve matematiksel olarak iki denklem Denklem 3.5 ve 3.6 ile ifade edilebilir. Merkezden yüzeye doğru gitikçe malzemedeki akım yoğunluğu azalır. Deri derinliği, Denklem 3.5'te görüldüğü gibi, frekans ve malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur. Frekans arttıkça akım yoğunluğunun derinliği azalır. Denklem (3.6), malzemenin yüzeyine yakın akım yoğunluğunun radyal mesafenin bir fonksiyonu olarak nasıl davrandığına dair fikir vermektedir. Bu iki denklem, AC akımının doğrudan sonuçlarıdır.

Yakınlık etkisi (proximity effect) indüksiyon ısıtma olgusunda rastlanan bir diğer olgudur. Değişen manyetik alan sonucu malzemedeki oluşan indüksiyon, iletken içinde bir elektrik akımı doğuracak ve bu da sistemde bir yanıtı tetikleyecektir. Birbirlerine yakın bulunan ve akımın ters yönde ilerlediği iletkenlerde, birbirlerinde indükledikleri girdap akımları (eddy akımları) yoğunlaşır, bu etki birbirlerine bakan yakın tarafta olacaktır. Aynı şekilde, birbirlerine yakın bulunan ve akımın aynı yönde ilerlediği iletkenlerde, birbirlerinde indükledikleri girdap akımları (eddy akımları) yoğunlaşır ve bu etki birbirlerine uzak tarafta olacaktır. Bu etkiye yakınlık etkisi (proximity effect) denmektedir (Mingardi 2012). Bu etki Şekil 3.1'de görselleştirilmiştir.



Şekil 3.1. Yakınlık etkisi ile ısınma (Shia-Chung Chen vd. 2012)

İndüksiyon ısıtma olgusunda baskın gelen diğer bir olgu ise elektromanyetik saçaklanma etkisidir. Bu etki sonucu, dikdörtgen bir iletken metal ve akım dağılımı Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Eğer belirli bir akım taşıyan çubuk onu bir halka haline getirmek için bükülürse, akımı yeniden dağıtılabilecektir. Manyetik akı çizgileri halkanın içinde yoğunlaşacak ve buradaki manyetik akı yoğunluğunu artıracaktır. Halkanın dışında, manyetik akı çizgileri dağıtılacaktır. Sonuç olarak akımın çoğu, en kısa mesafenin ve en düşük empedans yolunun olacağı halkanın ince iç yüzey tabakası içinde akacaktır (Rudnev vd. 2014; Slukhotskii vd. 1974). Şekil 3.2'den de görüldüğü gibi, bu saçaklanma etkisi de yakınlık etkisine biraz benzer çünkü halkanın çevresinin karşıt taraflarındaki iç yüzeylerden akan akımlar zıt yönlerde yönlendirilir (böylece birbirini çeker). Şekil 3.2'de indüksiyon bobininin iç yüzeyinde bir akım konsantrasyonuna yol açan iletken silindirin elektromanyetik saçaklanma etkisi gözlenmektedir. Saçaklanma etkisi sadece tek sargılı indüktörlerde değil aynı zamanda çok sargılı bobinlerde de gerçekleşir. Saçaklanma etkisinin varlığı, ısıtma ve proses verimliliği üzerinde olumlu veya olumsuz bir etkiye sahip olabilir. Örneğin, geleneksel indüksiyon ısıtıcılarda katı silindir iş parçası bobinin içine yerleştirildiğinde, bu etki pozitif bir rol oynar çünkü deri ve yakınlık etkileriyle birlikte bobin akımının yoğunlaşmasına yol açacaktır. Sonuç olarak, elektromanyetik kuplaj iyileşmiş olacak ve bu sayede bobin verimliliğinde artış gözlenecektir. Saçaklanma etkisinin indüksiyon sürecini olumsuz etkilediği durum ise, indüktörün içi boş iş parçasının içinde bulunduğu durumdur. Bu durumda bobinin iç çapa yakın yüzeylerinde saçaklanma etkisi olumsuz bir rol oynar. Saçaklanma etkisi, bu durumda bobinin iç çapında bir bobin akımı konsantrasyonuna yol açar ve bobinden iş parçasına oluşan elektromanyetik kuplaj kötüleşir. Sonuç olarak indüksiyon ısıtma sistemindeki bobin verimliliği azalmış olur (Rudnev vd. 2017).



Şekil 3.2. Dikdörtgen ve halka iletkenlerde saçaklanma etkisi (Rudnev vd. 2017)

3.1. Malzeme Seçimi

Çelik dişli çarkın seçiminde parçanın çalışacağı ortam şartları, gerekli sertlik değeri ve maliyeti göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. AISI 4340 çeliği düşük alaşım ve orta-karbon çeliğidir ve %0,4 oranında karbon içermektedir. İndüksiyon ısıtma uygulamalarında yaygın olarak dişlilerin malzemelerinde AISI 4340 çelik alaşımı kullanılmaktadır. Bir malzemenin indüksiyon sertleştirme sürecine uygun olması demek o malzemenin en başta sertliğinin tekrarlanabilmesi ve kararlı olması demektir. Kararlı olması ve kimyasal bileşiminden dolayı, bu tür malzemeler “doğayla dost” olarak anılırlar (Rudnev vd. 2004). Başlangıçtaki mikro yapısı, kimyasal bileşimi, su verme ve temperleme işlemlerinin ardından düzgün dağılımı ince taneli martensit yapısı ve 30 ila 34 arası HRC sertliğinden dolayı bu tip çeliklerin ısıl işlem yapılabilirliği yüksektir. Ayrıca, çelik yüzeyinin pürüzsüz olması, boşluklardan ve çatlaklardan arınmış olması, ısıl işlemin performansını doğrudan etkilemektedir. Bu kusurlardan arınmış bir iş parçasına uygulanan ısıl işlem; mukavemet, ömür, dayanım gibi mekanik özellikler anlamında iyi sonuç vermeye daha uygundur. Orta (MF~10kHz) ve yüksek frekansta (HF~200kHz) yapılan indüksiyon ısıtma işlemi malzemenin köşeli kenarlarında aşırı ısınmaya sebep olacağından iyi sonuçlar için keskin kenarlarına pah verilmelidir. Dişliler, dönel olarak yüksek güçlü hareketi iletmelerinden ve üzerlerine binen büyük yüklerden dolayı geometrik olarak çok yüksek hassasiyet ve genellikle tolerans olarak mikron seviyesinde hassasiyet gerektirmektedirler. Bu durum, kavrama performans karakteristiklerini ciddi ölçüde etkilemektedir (Spezzapria 2016).

3.2. AISI 4340 Çelik Malzeme Dişli ve Malzeme Özellikleri

AISI 4340 malzemesi, ısıtma işlemine uygun, nikel krom ve molibden elementlerini içeren düşük alaşımlı bir çeliktir. AISI 4340 çeliği karbon içeriği ve sertleştirmeye katkı sağlayan alaşım elementleri ve mekanik özellikleri düşünüldüğünde indüksiyon ısıtma işlemine oldukça elverişlidir. Ayrıca; tokluk, ısıtma işlemi sonrası yüksek sertlik elde edilebilirliği yanı sıra yorulma dayanımı özellikleri açısından AISI 4340 çeliği yaygın olarak bilinen bir malzemedir. Tipik kullanım alanları genelde yapısal amaçlı olmak üzere; uçakların iniş takımları, güç iletimi için dişli çarklar, şaftlar ve diğer yapısal elemanlardır (Mingardi 2012). Malzeme özelliklerinin düzgün bir şekilde tanımlanması iyi bir nümerik modelleme için çok önemlidir. Bu sebeple, dönüşüm sıcaklıkları ve kritik sıcaklıkların AISI 4340 çelik malzemesi için biliniyor olması gerekmektedir. Çizelge 3.1’de AISI 4340 çelik malzemesinin dönüşüm sıcaklıkları gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. AISI 4340 Çelik malzemesinin dönüşüm sıcaklıkları (Mingardi 2012)

Isıtma Hızı	Ac1 [°C]	Ac3 [°C]	Acm [°C]
2739 °C/s	726	983	1058
814 °C/s	787	982	1048
427 °C/s	778	949	1038
99 °C/s	768	856	910

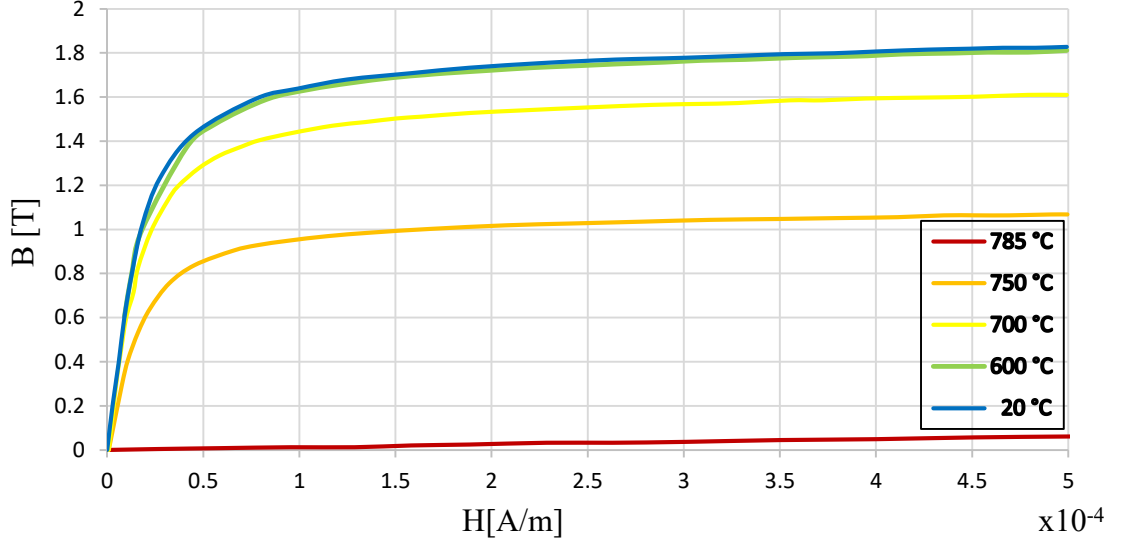
AISI 4340 Çelik malzemesinin kimyasal bileşimi element ve ağırlık yüzdesine göre Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2. AISI 4340 Çelik malzemesinin kimyasal bileşimi (Mingardi 2012)

Karbon	0.38-0.43
Manganez	0.60-0.80
Fosfor	0.035 (en fazla)
Sülfür	0.04 (en fazla)
Silikon	0.15-0.30
Krom	0.70-0.90
Nikel	1.75-1.90
Molibden	0.20-0.30

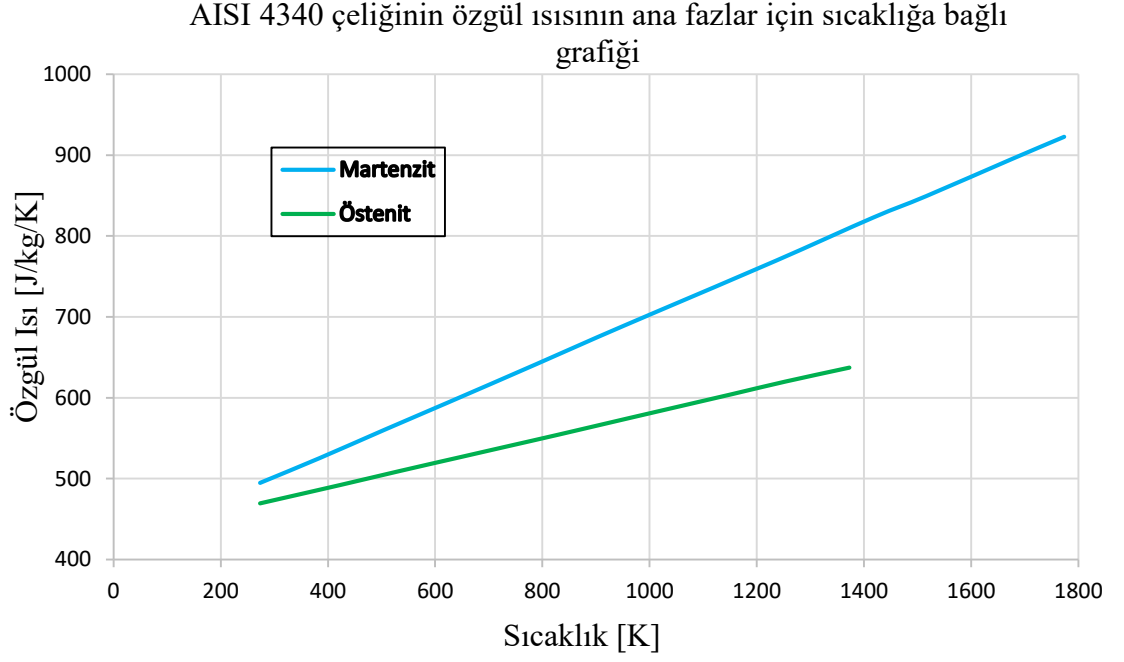
Malzeme özelliklerinin gerçeğe yakın olacak şekilde tanımlanması iyi bir nümerik modelleme için önemlidir. Bu sebeple AISI 4340 çeliğinin manyetik alan geçirgenliği bir sabit olarak almaktan ziyade sıcaklığa bağlı fonksiyonu şeklinde tanımlanmalıdır. Şekil 3.3'te AISI 4340 çeliğinin manyetik alanın göreceli geçirgenliğinin sıcaklığa bağlı fonksiyonu gösterilmiştir (Spezzapria 2016).

AISI 4340 malzemesinin sıcaklık ve manyetik alana bağlı bağlı manyetik geçirgenlik grafiği



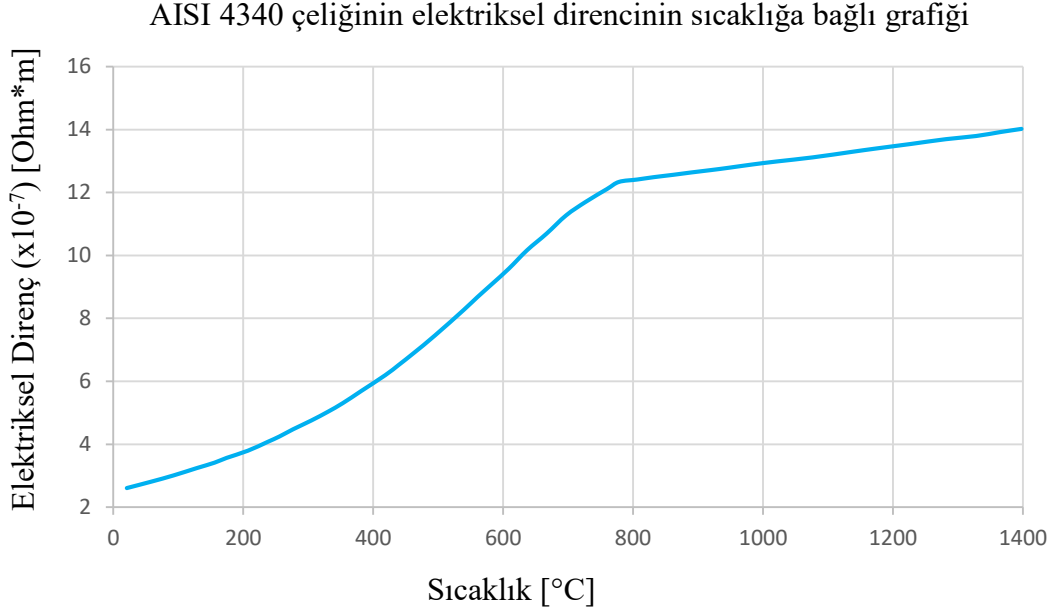
Şekil 3.3. Sıcaklık ve manyetik alan kuvveti fonksiyonunda AISI 4340 bağlı manyetik geçirgenlik davranışı (Spezzapria 2016)

AISI 4340 çeliğinin özgül ısısının ana fazlar için sıcaklığa bağlı fonksiyonu Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



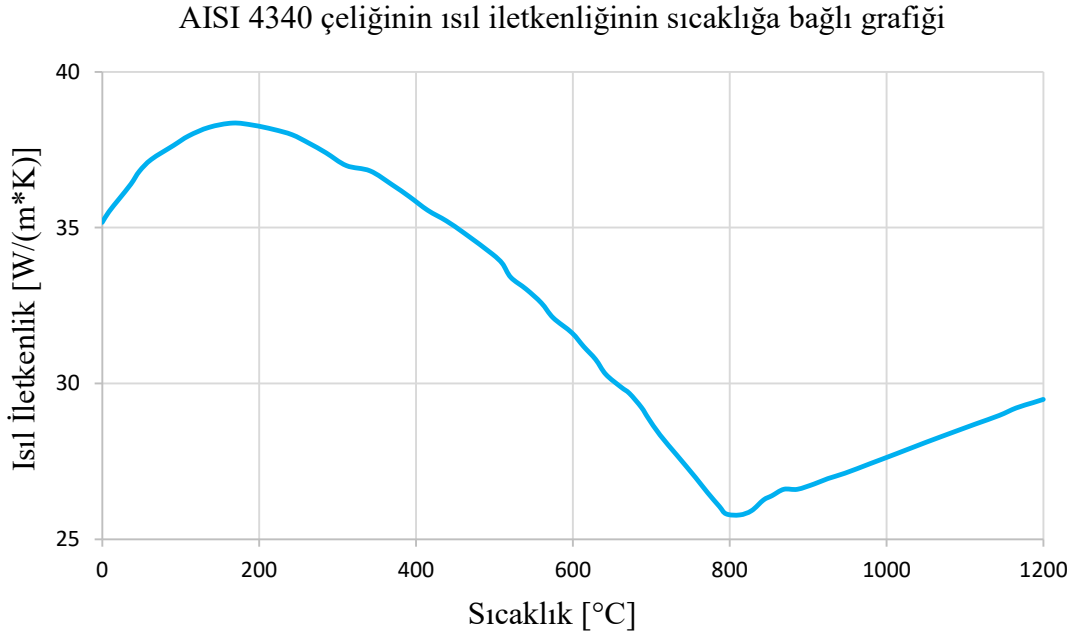
Şekil 3.4. AISI 4340 çeliğinin özgül ısısının ana fazlar için sıcaklığa bağlı fonksiyonu (Spezzapria 2016)

AISI 4340 çelik malzemenin elektrik iletkenliğine bağlı olarak ısınma hızı değişmektedir. Elektrik direnci, belirli bir malzemenin elektrik akımı akışına ne kadar güçlü bir şekilde karşı çıktığını ölçen içsel bir özelliktir. Düşük bir özdirenç, elektrik akımının akışına kolayca izin veren bir malzemeye işaret eder. Çelik malzemenin elektriksel özellikleri Şekil 3.5'te verilmiştir. Direnç, genellikle Denklem 3.3'e göre sıcaklığın doğrusal bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Şekil 3.5'te görülebileceği gibi, özdirençin sıcaklıkla davranışı tam olarak doğrusal değildir, ancak düşük sıcaklıklardaki bu doğrusal olmayan davranış östenitlenme (A_c3) sıcaklıkları etrafında güçlü bir bağlılık ve doğrusallık gösterir. Bunun durum bu sıcaklıkta meydana gelen faz dönüşümlerinin etkisi ile açıklanabilir.



Şekil 3.5. AISI 4340 malzemenin sıcaklıkla değişen direnç davranışı (Spezzapria 2016)

Termal iletkenlik, ısı transferi bir sıcaklık gradyanı tarafından oluşturulduğunda, birim zamanda bir birim yüzey alanından aktarılan ısı miktarını karakterize eden termo-fiziksel bir malzeme özelliğidir. Başka bir deyişle, bir malzemenin ısıyı transfer etme yeteneğini temsil eder. Şekil 3.6'te, ilgili ana fazlar için sıcaklığın fonksiyonu olarak termal iletkenlik değerleri verilmiştir. Termal iletkenlik Şekil 3.6'da görüldüğü üzere minimuma östenitlenme sıcaklığında ulaştığı gözlenmektedir.



Şekil 3.6. AISI 4340 çeliğinin ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağımlılığı (Spezzapria, 2016)

3.3. İndüksiyon Isıtmanın Sayısal Modellenmesi

Malzeme özellikleri elektromanyetik indüklenme sonucu malzemede oluşan sıcaklığın penetrasyon derinliğini belirler. Malzemenin manyetik geçirgenliği, elektriksel iletkenliği, ısıl iletkenliği ve özgül ısı gibi özellikler malzemenin sıcaklığına bağlıdır. Bu özelliği kullanarak penetrasyon derinliğini kontrol etmek pratik olarak mümkün hale gelir. AISI 4340 çeliği, daha küçük bir deri etkisi sağlayan daha yüksek göreceli manyetik geçirgenliğe sahip bir ferromanyetik malzeme türüdür. Ferromanyetik malzemenin kimyasal bileşimi, manyetik geçirgenlik özelliğini büyük ölçüde etkiler. Manyetik geçirgenliği belirleyen diğer bir faktör, malzemenin manyetizasyonunu kaybettiği Curie sıcaklığıdır (Candeo vd. 2011). Bu durumda malzemede mıknatıslanma özelliği kaybolmasından dolayı penetrasyon derinliği aniden artar (760-800 °C). Curie sıcaklığı, bu nedenle indüksiyonlu ısıtma işlemi boyunca kritik bir öneme sahiptir ve operasyonel süreç içerisinde hesaplamalarda göz önünde bulundurulmalıdır.

İndüksiyon yüzey sertleştirme işleminde tasarım, frekans, bobin akımı ve/veya gücü gibi önemli parametreler deneysel olarak sahada ve tecrübeyle yapılabilmektedir. Bu şekilde bir yaklaşımda genellikle oldukça masraf ve uygulanmasında zorluklar bulunmaktadır ve eğer karmaşık geometriler işin içine dâhil olursa zorluk daha da büyümektedir. Bu durumda sertlik değişimlerini gözlemlemek dahi zorlaşacaktır. Bu yüzden, benzetim teknolojisi kullanmak, ürünün geliştirme süresini önemli ölçüde kısaltmakta ve iş parçalarının süreçten hızla geçebilmesine imkân tanıyacaktır. İndüksiyon ısıtmanın sayısal benzetimi, bu alanlarda yeni ve etkili tasarım önerilerine imkân sağlamaktadır. Doğrulamalarla testler yapıldığı sürece, sayısal metotlara güvenerek yeni indüksiyon ısıl işlem metotları geliştirmeye olanak oluşmaktadır. Sonlu elemanlar metodu bu anlamda çok etkili ve yaklaşık çözümler bulmak anlamında oldukça kabiliyetlidir. Aynı anda birden fazla cebirsel denklemleri her bir düğüm noktasında çözerek bilinmeyen olan manyetik vektör potansiyelini elde etmektedir. Bu işlemler her bir düğüm noktasında gerçekleşmekte ve tüm düğüm noktalarının ortak genel çözümünden bilinmeyene -modeli temsil eden manyetik vektör potansiyeline ulaşılmaktadır.

$$\nabla \times ((\mu_0 \mu_r)^{-1} \nabla \times A) = -j\omega \sigma A + J_0 \quad (3.7)$$

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (3.8)$$

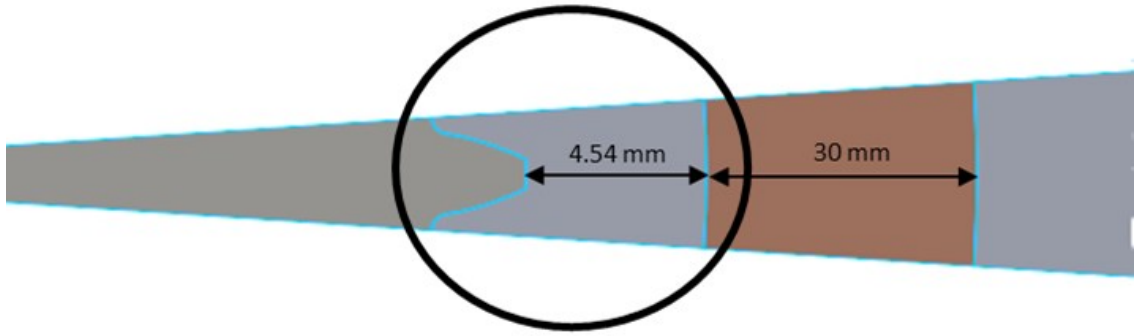
Burada ρ – elektriksel öz direnç, ω – açısal frekans, μ – manyetik geçirgenlik, μ_r – vakumdaki manyetik geçirgenliğe olan oran, C – özgül ısı, k – termal iletkenlik, T – sıcaklık, t – zaman, A - manyetik potansiyel, J_0 – kaynak akı yoğunluğu, Q – dışarıdan uygulanan ısı akısını temsil etmektedir.

Makul doğrulukta sayısal çözümler elde etmek için bilinmeyen -yani manyetik vektör potansiyeli ve sıcaklık gibi- değişim hızının görece yüksek olduğu bölgelerde çözüm ağının çok sık oluşturulması gerekmektedir (Mingardi, 2012). Benzetimin alacağı zaman, oluşturacağı hesap yükü ciddi seviyelere erişebildiği için genellikle sistem geometrisi aksenal simetrik olarak modellenmektedir. Bu projenin tamamlanması için, COMSOL MULTIPHYSICS® başta olmak üzere birçok benzetim yazılımı denenmiştir. Flux 2D/3D, Ansys Multiphysics, ThermNet, Magnet, Sysweld gibi yazılım programlarının etkin bir şekilde kullanılması; kullanıcı yetkinliği

gerekliliği, benzetim aşamalarının oldukça fazla olmasına bağlı olarak güçlü bilgisayarlara duyulan ihtiyacı ve yazılım maliyetleri gibi önemli sınırlamalar barındırmaktadır (Nemkov 2009). İndüksiyon sistemleri ve çelik malzemelerin ısıl işlemi için hesaplamalı metotları ve benzetim yazılımları için detaylı araştırmalar literatürde mevcuttur (Gur ve Pan 2008).

Bu tez çalışmasında, indüksiyon ısıtma benzetim çalışmaları yukarıda bahsedilen yazılımlara alternatif olarak ELTA 7.0 yazılımı kullanılmış ve sonuçlar bu yazılımın çıktıları olarak sunulmuştur. Bu yazılımın kullanıcı lisansına, ilgili firma (Url-1 2022, <https://www.nsgsoft.com/products/elta>) ile görüşmeler neticesinde 1 aylık süreli olarak akademik tipte lisans erişimi sağlanmış ve tez çalışmasının sonuçlanmasına bu firmanın yazılımı aracı olmuştur. ELTA 7.0 yazılımı özel bir bilgi gerektirmeden, kendi kendini açıklayabilecek nitelikte bir ara yüze sahip bir tasarım ve eniyileme çoklu-fizik yazılımıdır (Bukanin vd. 2018).

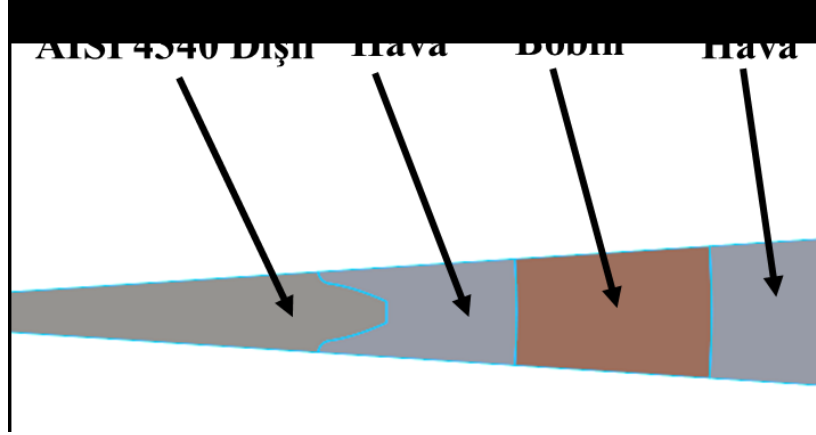
Çalışmada sonlu elemanlar metodu kullanılarak AISI-4340 dişli iş parçasının üzerindeki sıcaklık dağılımı termal ve elektromanyetik ortam çözümü yardımıyla elde edilmiştir. Literatürden seçilen bir çalışma örnek alınmış ve bu doğrultuda sayısal bir doğrulama modeli oluşturulmuştur (Barka vd. 2011; Barka 2017). Barka'nın çalışmasında kullanılan geometri 2-boyutlu bir dişlidir ve bu sebeple de sayısal modellemede Barka aksel simetri kullanamamıştır. Sayısal modelde, Barka 2-boyutlu COMSOL MULTIPHYSICS® modeli oluşturmuştur. Barka'nın çalışmasında (Barka vd. 2011; Barka 2017) geometrik bilgilerden bölüm dairesi çapı ve diş dibi çapı gibi bilgiler eksik olduğu için grafiksel bir ölçüm metodu kullanılmıştır ve alınan bu ölçümler Şekil 3.7'de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Barka'nın çalışmasındaki (Barka 2017) geometriden grafiksel ölçüm metodu kullanılarak alınan ölçümler

Grafiksel ölçüm sonucundan elde edilen sayısal değerlere göre; bobin iç çapı $105.2/2+4.54 = 57.1 \text{ mm} = 5.71 \text{ cm}$, diş dibi çapı $105.2-9.24*2 = 86.72 \text{ mm} = 8.672 \text{ cm}$ ve bölüm dairesi için çapı $(105.2+86.72)/2 = 95.95 \text{ mm} = 9.595 \text{ cm}$ bulunmuştur. Bu değerler referans alınmış ve bu tez çalışmasında doğrulama modeli oluşturulurken bu değerler kullanılmıştır. Dişlinin basınç açısı ise 14.5 alınmıştır. Temel alınan Barka'nın çalışmasındaki geometri bu tez çalışması kapsamında oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometrik model Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Bu CAD modelinde

oluşturulan geometri, bilgisayar destekli bir tasarım aracı olan Solidworks© yazılımı kullanılarak elde edilmiştir.



Şekil 3.8. Solidworks©’te oluşturulan CAD modeli

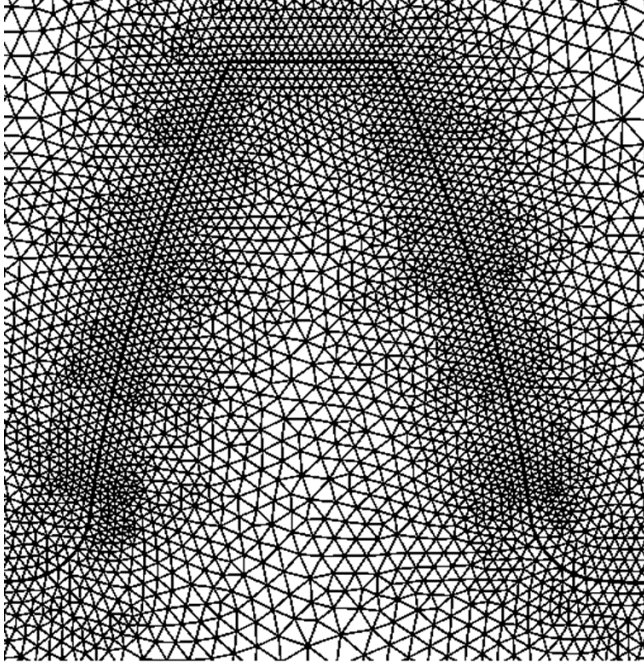
Barka’nın çalışmasındaki sayısal modelde geometri temel alındığı gibi aynı şekilde diğer tüm benzetim parametreleri de temel alınmıştır. Dişli iş parçasının malzemesi, bobin parametreleri ve oluşturulan hesaplama ağı aynı şekilde temel alınmıştır. Bu sayede doğrulama modelinin oluşturulması amaçlanmıştır.

Dişli iş parçasının malzemesi: AISI 4340 çeliği, 105.5 mm diş üstü çapta olup 48 dişli sahiptir. Dişli, 2-boyutlu geometri olarak 7.5 derecelik dilim olarak ve malzeme tanımı eş dağılımlı ve eş yönlü modellenmiştir. Çevre sıcaklığı 20°C ve taşınım kayıplarını iletim ile eşit kabul edip ışınlam (radyasyon) ihmal edilmiştir. İlk 0.5 saniye için çözüm yapılacağından ışınlam ile oluşan ısı transferinin ihmal makul görülmüştür.

Bobin parametreleri: bobin katı bir dilim olarak 30 mm kalınlığında bakır malzeme olarak temsil edilmiştir. Bobini süren elektriksel güç 220kW, uyartım frekansı ise 10 kHz’dir.

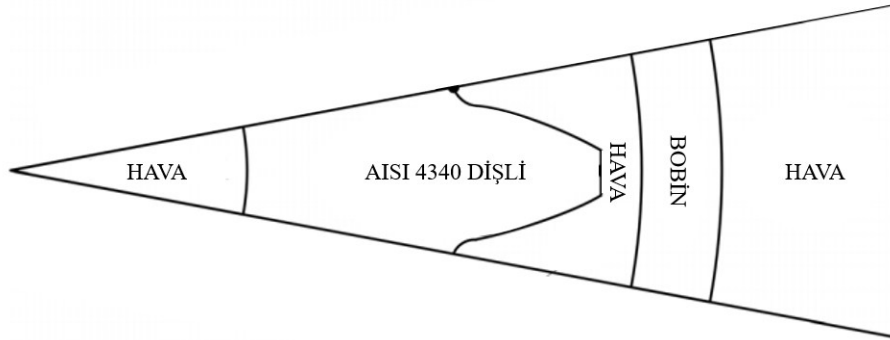
Dişli ile bobin arasında şekil 3.7’de görüldüğü üzere 4.54 mm boşluk mesafesi vardır.

Oluşturulan Hesaplama Ağı: hesaplama ağı oluşturulurken iş parçasının yüzeye yakın bölgelerinde sık miktarda ağ oluşturulmuş geri kalan bölgelerde ise kaba ağ ile hesaplama ağı kullanılmıştır. Yüzeye yakın bölgelerin sıkı ağ tercih edilmesinin nedeni kabuk etkisinin net olarak çözümde görülebilmesidir, bu bölgede daha önce de bahsedilen manyetik vektör potansiyelinin hızlı değişimi mevcuttur. Bu fiziksel olguların sayısal model çözümünde detaylı olarak görülebilmesi için ilgili bölgelerde Şekil 3.9’da görüldüğü gibi sıkı ağ yapısının kullanılması gerekmektedir.

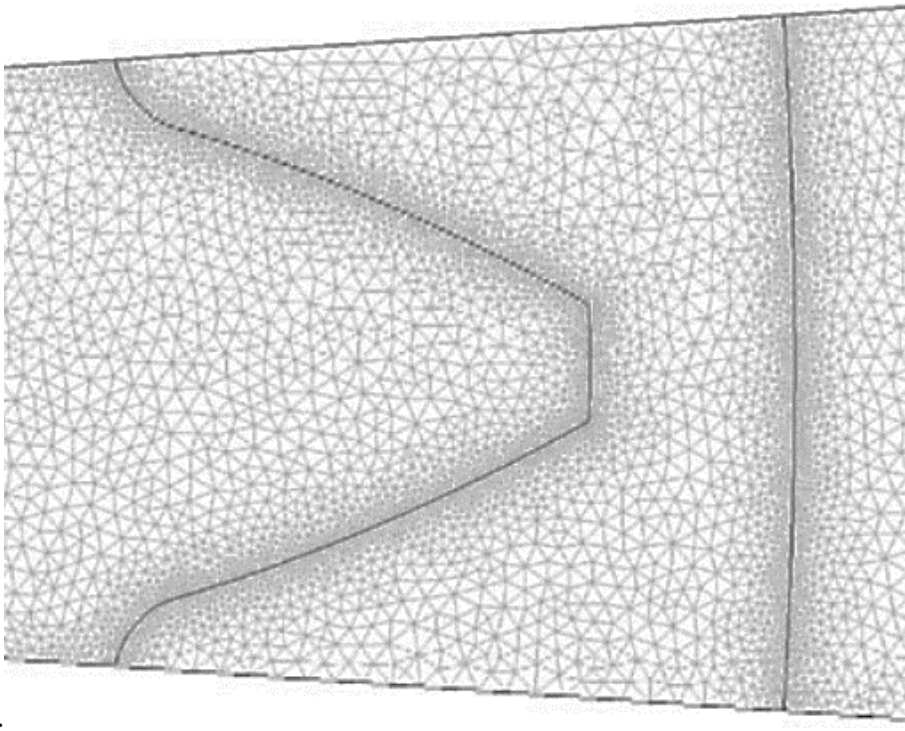


Şekil 3.9. Dişli iş parçasının geometrisi üzerinde oluşturulan hesaplama ağı

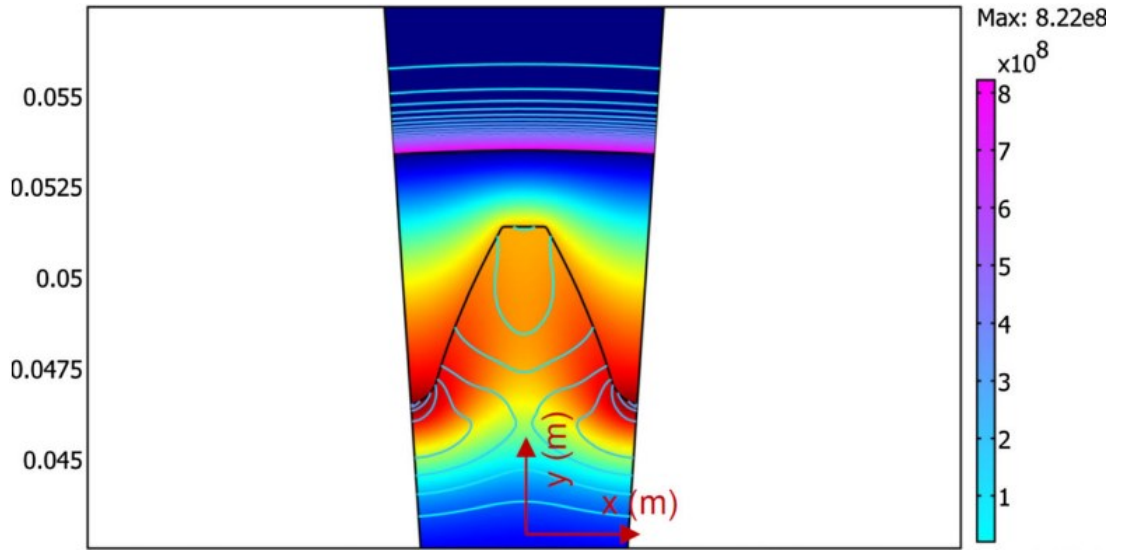
Tez çalışmasında örnek alınan Barka'nın 2017'deki çalışmasına ve sonuçlarına (Barka 2017) bu bölümde yer verilmiştir. Barka'nın çalışmasında sunduğu 2 boyutlu dişli modelinin şematik gösterimi Şekil 3.10'da gösterilmiştir. Proje için yapılmak istenen model ile aynıdır. Hesaplama ağı Şekil 3.11'de gösterilmiştir. Referans alınan çalışmada erişilen indüklenen akım dağılımı Şekil 3.12'de verilmiştir. Benzetim sonucunda dişli iş parçasının yüzeyindeki sertlik profili ise Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



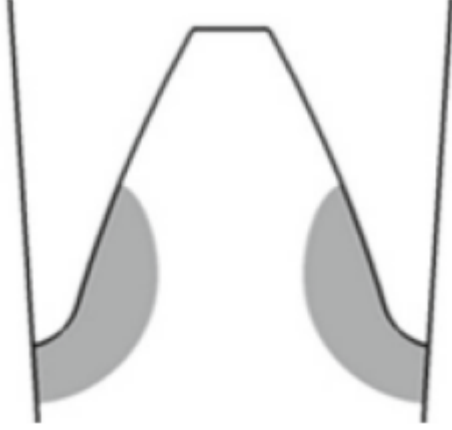
Şekil 3.10. Barka'nın 2 boyutlu dişli iş parçasının şematik gösterimi (Barka 2017)



Şekil 3.11. Barkan'ın çalışmasındaki benzetimde kullanılan hesaplama ağı (Barka 2017)



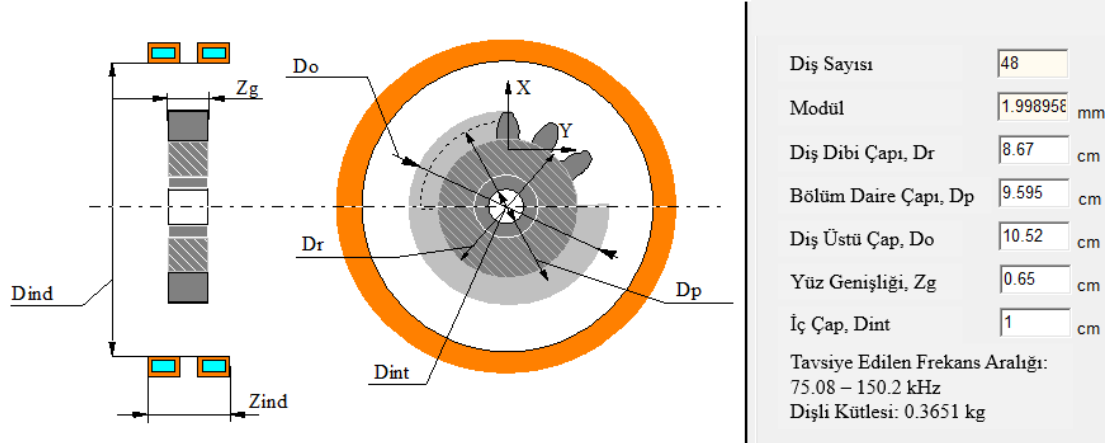
Şekil 3.12. İndüklenen akım dağılımı (A/m²) (Barka 2017)



Şekil 3.13. Benzetim sonucunda elde edilen sertlik profili (Barka 2017)

3.4. İndüksiyon Isıtmanın ELTA Yazılımıyla Sayısal Modellenmesi

Bu bölümde ELTA 7.0[®] yazılımının arayüzünün çalıştırılması için gerekli parametreler ve analiz sonuçları yer almaktadır. Bölüm 3.2’deki COMSOL modeli ile birebir karşılaştırma yapmak amacıyla ELTA modelinde de benzer parametreler esas alınmıştır. ELTA 7.0[®] yazılımının sade bir arayüzü bulunmakta ve kullanıcı kılavuzunda yönergeler açıkça belirtilmektedir (Url-2 2022, <http://www.nsgsoft.com>). Program arayüzünde, indüksiyon ısıtma yapılacak dişli iş parçası için parametrelerin girileceği ekran bulunmaktadır (Şekil 3.14).



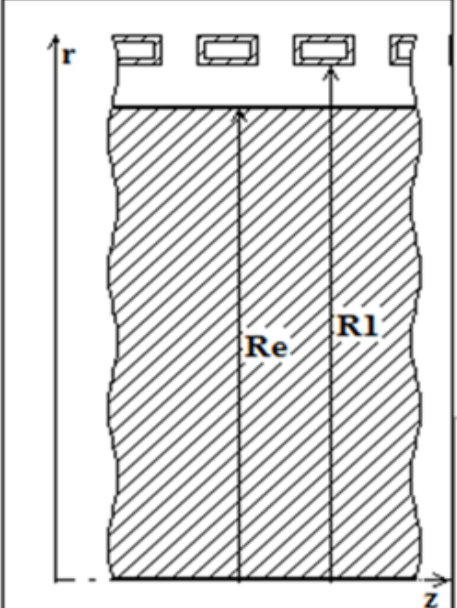
Şekil 3.14. Dişli iş parçası için parametrelerin girileceği arayüz ekranı

Ardından bobin frekansı (Hz), güç (W) ve ısıtma süresi (s) gibi indüksiyon parametreleri ile (Şekil 3.15) bobin parametrelerinin girişi yapılır (Şekil 3.16).

Frek:	<input type="text" value="10000"/>	Hz	Zaman	<input type="text" value="0.005"/>	s
Güç:	<input type="text" value="220000"/>	W	adımı:		
Süre:	<input type="text" value="0.5"/>	s	İndüksiyon Gücü		

Şekil 3.15. İndüksiyon parametrelerinin (Bobin frekansı (Hz), güç (W) ve ısıtma süresi (s)) girildiği ekran

Dişli



Bobin Parametreleri

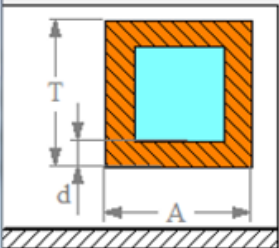
İç Çap: 5.71 cm
 Öz Direnç :2E-6
 Bobin Sarım Sayısı: 1
 Yayıcılık Katsayısı: 0.8
 Soğutma Kanalı Profili

Bobin Uzunluğu (Z) 0.65 cm

Şekil 3.16. Bobin parametrelerinin girildiği arayüz ekranı

ELTA yazılımı, indüksiyon bobininin soğutulması için gereken soğutma suyu seçeneklerine de imkân tanımaktadır (Şekil 3.17).

Boru Profili



T cm

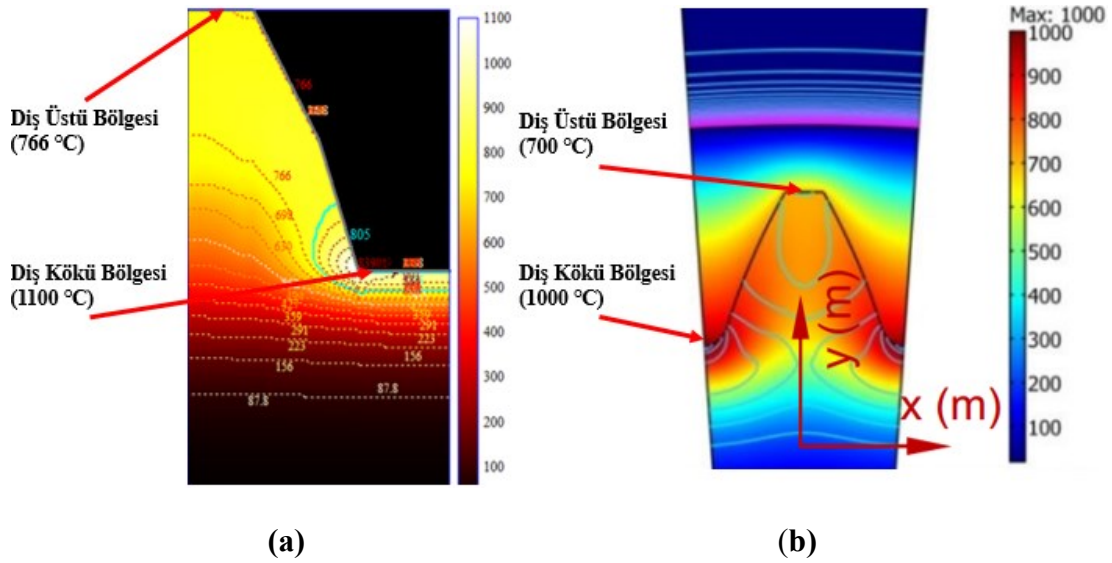
A cm

d cm

✗ Cancel
✓ OK

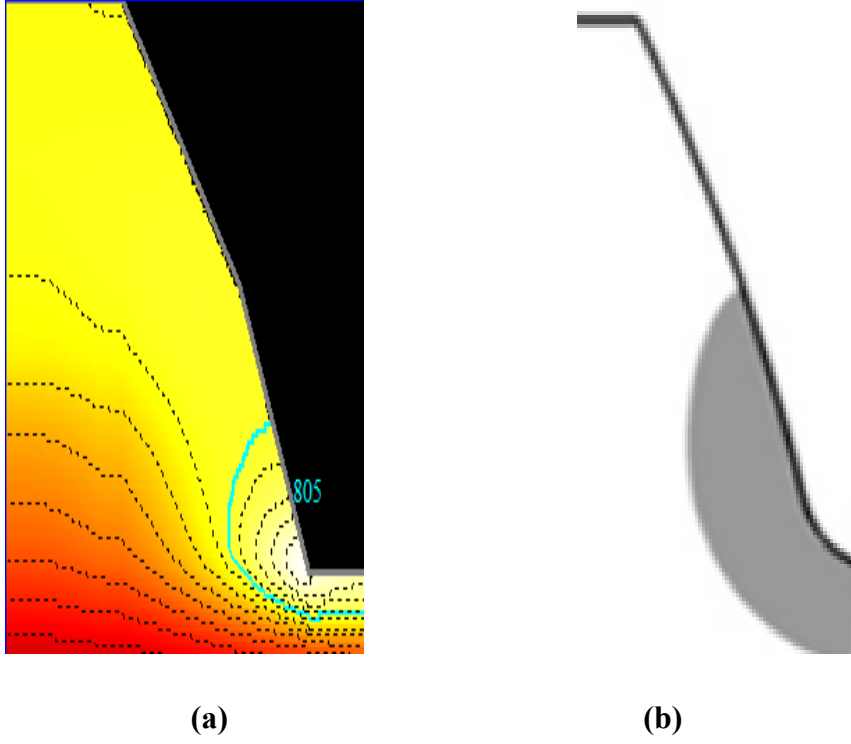
Şekil 3.17. İndüksiyon bobininin soğutulması için soğutma suyu seçenekleri

Parametrelerinin girişinden sonra, yazılım kullanıldığında orta frekans için (10kHz) AISI 4340 çelik dişli iş parçasının sıcaklık dağılımı elde edilmiştir (Şekil 3.18a). Analiz sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımı incelendiğinde, sıcaklığın diş üstü bölgesinde 766°C 'ye, diş kökü bölgesinde ise 1100°C 'ye ulaştığı gözlenmiştir. Şekil 3.18b'de COMSOL yazılımı kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımı verilmiştir. Diş üstü bölgesi ve diş kökü bölgelerindeki sıcaklıklar karşılaştırıldığında ELTA yazılımının COMSOL yazılımıyla çok yakın sıcaklık sonuçları verdiği gözlenmiştir (Şekil 3.18). Şekil 3.18b'de Barka'nın çalışmasında (Barka, 2017) kullanılan COMSOL yazılımından farklı olarak ELTA yazılımı ile östenitlenme sıcaklığı da (A_{c3} sıcaklığı) 1.48 mm derinlikte gösterilmektedir (turkuaz çizgi). Bunun anlamı, indüksiyonla ısıtma işlemi sonrasında yapılan soğutma işleminde, dişlinin kök bölgesinde, sertlik artışını ve yorulma direncini sağlayan martensit fazının 1.48 mm derinliğe kadar oluşturulabilmesidir.



Şekil 3.18. ELTA yazılımı ve COMSOL yazılımı kullanılarak 4340 çelik dişli iş parçasında elde edilen sıcaklık dağılımları (bobin gücü 220 kW, dişli uç bölgesi bobin arası mesafe 4.54 mm, bobin frekansı 10 kHz ve indüksiyon ısıtma süresi 0.5 saniye) (a) ELTA 7.0[©] (b) COMSOL (Barka 2017)

ELTA ve COMSOL yazılımlarının kullanımı ile 4340 çelik dişli iş parçası için elde edilen sıcaklık dağılımları, soğutma işlemi sonrasında martensit fazının hangi bölgelerde oluştuğunu anlamamıza ve dolayısı ile sertlik profilini belirlememize yardımcı olur. Sertlik profili elde etmek için AISI 4340 çelik malzemesinin östenitlenme sıcaklığı (A_{c3} , 800°C) esas alınmıştır. Şekil 18a'da ELTA yazılımı kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımında, turkuaz sınır içinde kalan bölge 800°C ve üzerinde sıcaklığın olduğu bölgeyi göstermektedir. Bu sıcaklık dağılımı elde edildikten sonra yapılan su verme işlemi ile 4340 çelik iş parçasında bu bölgede martensit fazı oluşumu gerçekleşecektir. Şekil 18b'de COMSOL yazılımı kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımında, gri bölge 800°C ve üzerinde sıcaklığın olduğu bölgeyi göstermektedir. Benzer şekilde, bu bölgeden yapılan soğutma işleminde gri bölgenin tamamı martensit fazına dönüşecektir. Dolayısı ile, uygun indüksiyon ve bobin parametreleri seçilerek, bir çelik dişli iş parçası için sıcaklık profilinin çıkartılması ve buna bağlı olarak martensit fazının oluştuğu bölgelerin belirlenmesi, aşınma ve yorulma direnci bakımından istenilen sonuçların elde edilmesine yardımcı olacaktır.



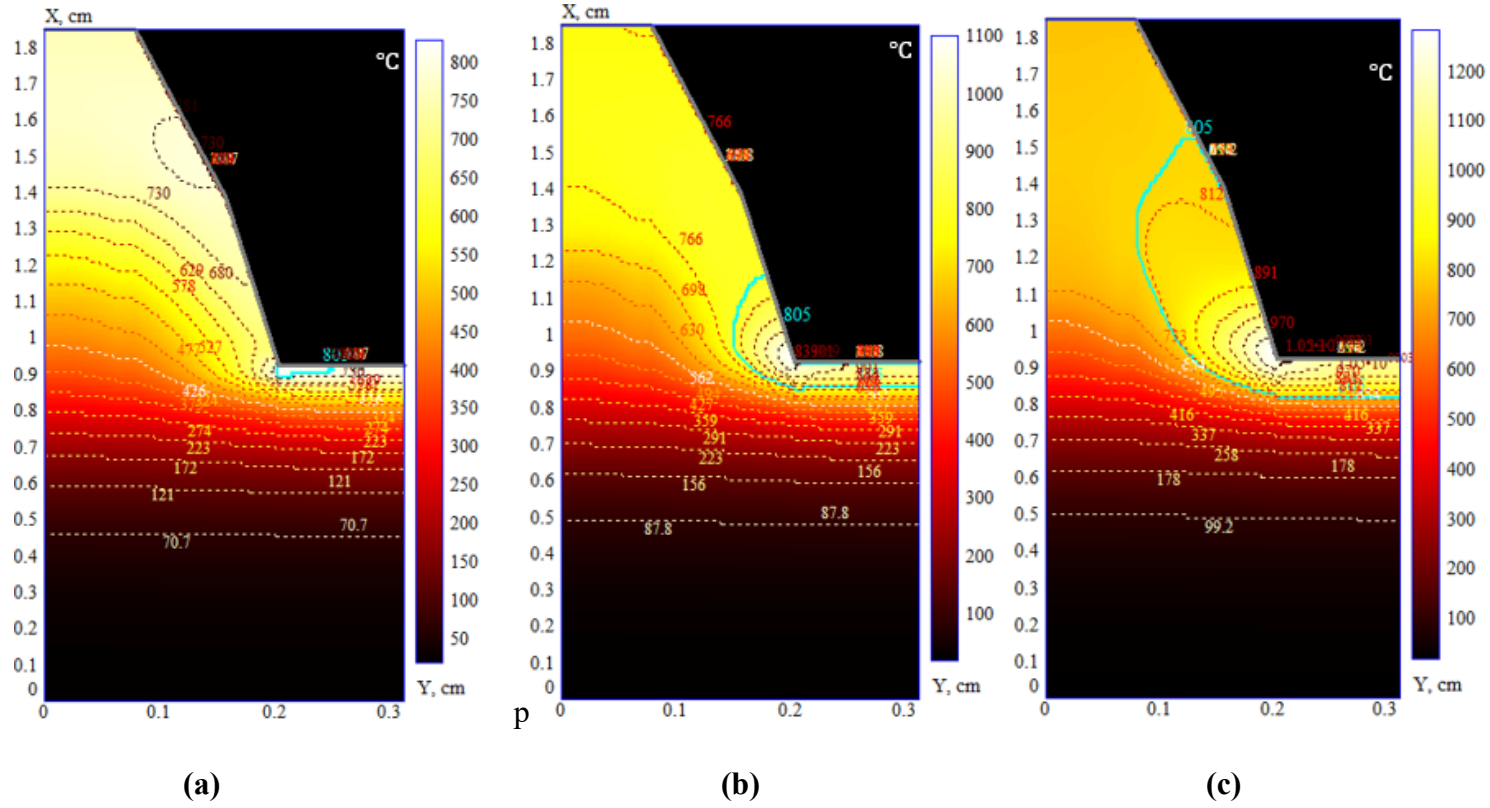
Şekil 3.19. ELTA yazılımı ve COMSOL yazılımı ve kullanılarak 4340 çelik dişli iş parçasında elde edilen sıcaklık dağılımlarından çıkarılan sertlik profili (bobin gücü 220 kW, dişli uç bölgesi bobin arası mesafe 4.54 mm, bobin frekansı 10 kHz ve indüksiyon ısıtma süresi 0.5 saniye) **(a)** ELTA 7.0[©] (turkuaz sınır içinde kalan bölge) **(b)** COMSOL(gri bölge) (Barka 2017)

4.BULGULAR

Çalışmada kullanılan dişli iş parçasında indüksiyon ile ısıtmanın sıcaklığa olan etkisi ELTA modeli kullanılarak incelenmesi için güvenilir sonuçlar alındığı anlaşılmıştır. Referans sayılsa model ile bu tezde kullanılan sayısal model büyük oranda benzer sonuçlar verdiği için dolayı tez çalışmasında kurulan sayısal model doğrulanmış bir modeldir sonucuna varılmıştır. Artık eldeki modelin üzerinden yapılacak olan parametrik değişiklerle ELTA yazılımı kullanılarak, sabit güç altında (220 kW), bobin frekansının ve diş üstü ile bobin arasındaki mesafenin dişli iş parçası üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisinin güvenli şekilde incelenip yorumlanması mümkün olmuştur. Bu bahsedilen iki etki incelenmiş ve sonuçlara 4.1 ve 4.2’de yer verilmiştir.

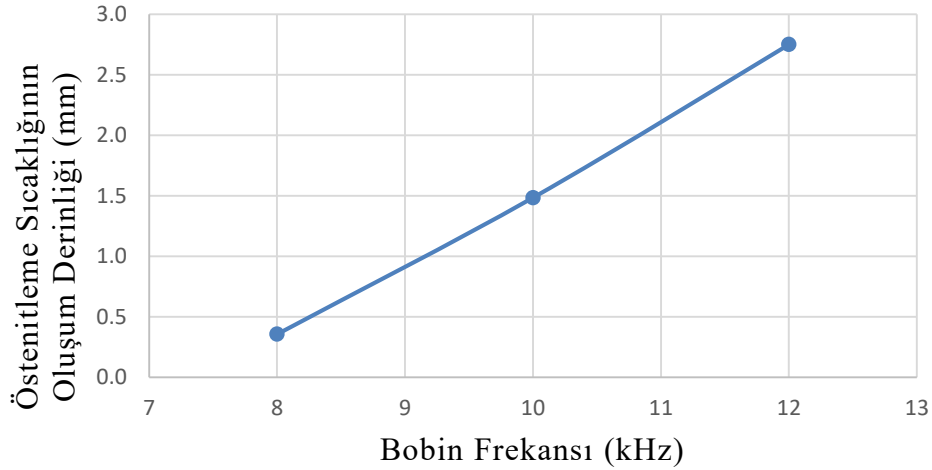
4.1. Bobin frekansının çelik dişli iş parçasında östenitlenme sıcaklığına olan etkisinin incelenmesi

Barka ve diğerleri tarafından yapılan bir çalışmada, AISI 4340 çeliği için dişli iş parçasındaki sıcaklık dağılımı 220 kW güç, 10 kHz bobin frekansı, 4.54 mm boşluk mesafesi ve 0.5 saniye süre sonundaki sıcaklık dağılımı COMSOL yazılımı kullanılarak incelenmiştir (Barka 2017). Aynı parametreler ve ELTA yazılımı kullanılarak 4340 çelik dişli iş parçasında üç farklı frekans için (8, 10 ve 12 kHz) elde edilen sıcaklık değişimi Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. 4340 çelik dişli iş parçasında sabit boşluk mesafesi (4.54 mm), ısıtma süresi (0.5 saniye) ve bobin gücü (220 kW) altında bobin frekansının dişli iş parçası üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi (a) 8 kHz (b) 10 kHz (c) 12 kHz

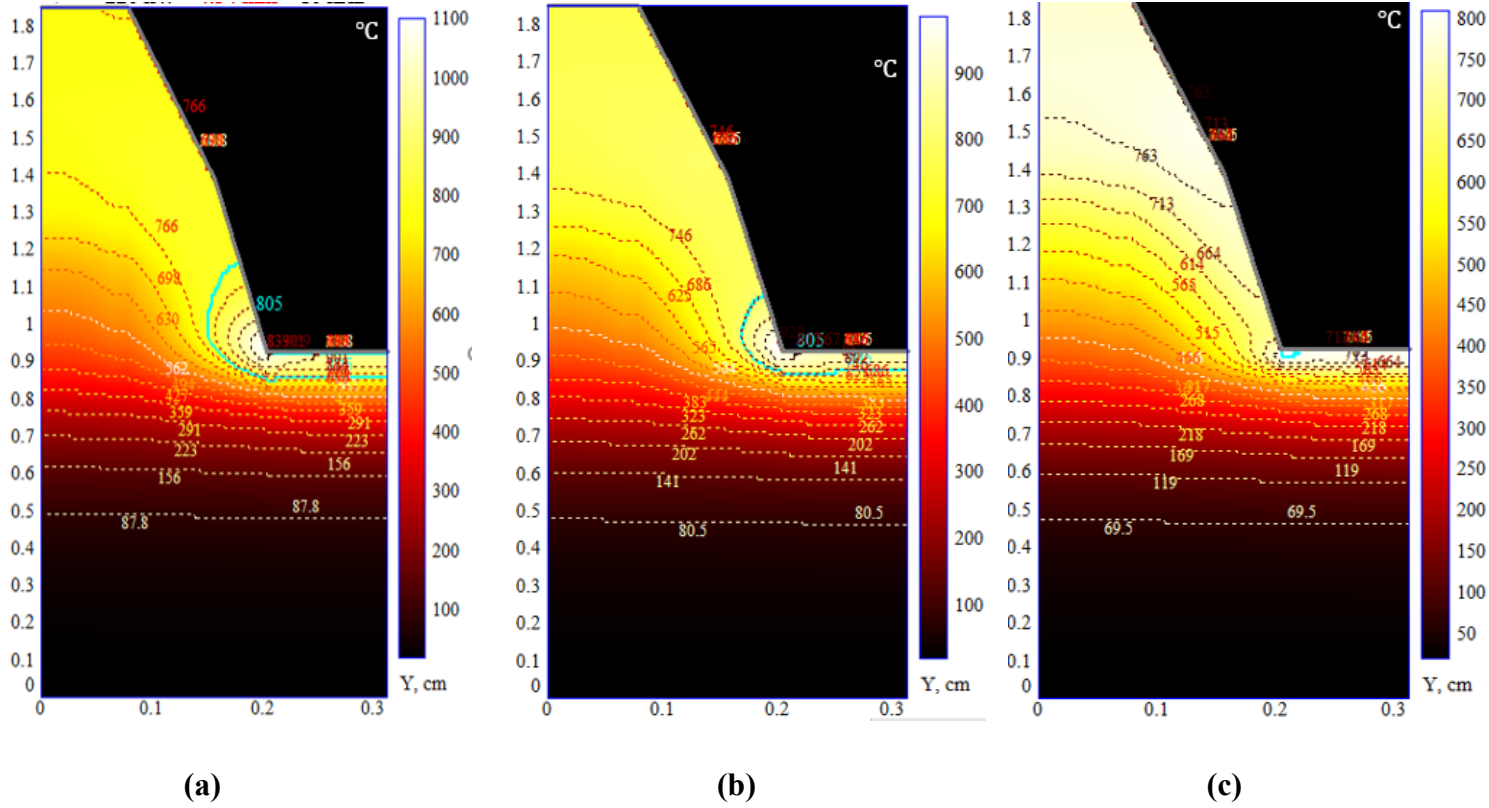
Bobin frekansının 8 kHz olduğu durumda 4340 çelik dişli iş parçasının kök bölgesindeki sıcaklığın 0.35 mm derinlikte 800 °C'ye ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.1a, turkuaz çizgi sınırı). Bobin frekansının 10 kHz olduğu durumda ise, martensit oluşumu için kritik olan östenitlenme sıcaklığının (800 °C) 1.48 mm derinlikte oluştuğu, frekansın 12 kHz'e çıkarıldığı durumda ise, bu sıcaklığın 2.75 mm derinlikte oluştuğu gözlenmiştir (Bkz Şekil 4.1b ve Şekil 4.1c, turkuaz çizgi sınırı). Dolayısıyla, üç farklı frekansta, frekansın 8 kHz'ten 12 kHz'e çıkartılması ile 4340 çelik dişli iş parçasında yorulma ve aşınma direnci açısından kritik olan martensit faz oluşumunun daha derin bölgelerde elde edilmesi gerçekleşmektedir. Sabit mesafede (4.54 mm) östenitlenme sıcaklığının oluştuğu derinliğin bobin frekansına bağlı olarak değişimi Şekil 4.2'de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Östenitlenme sıcaklığının oluşum derinliğinin bobin frekansına bağlı değişimi

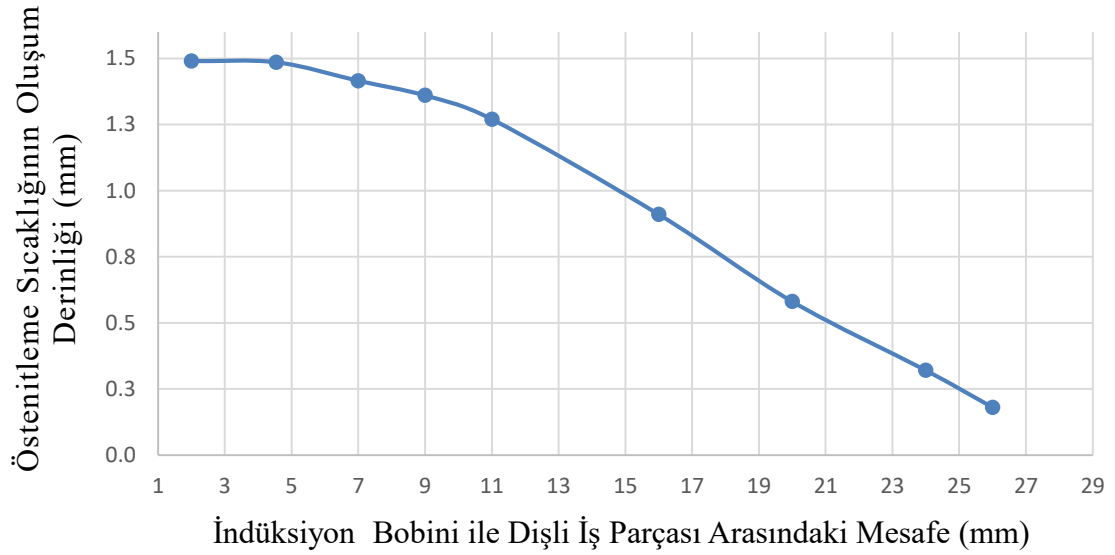
4.2. İş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki mesafenin çelik dişli iş parçasında östenitlenme sıcaklığına olan etkisinin incelenmesi

Bu bölümde dişli iş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki mesafenin sıcaklığa olan etkisi incelenmiştir. Bu nedenle, Barka ve diğerlerinin çalışmasındaki (Barka 2017) bobin gücü (220 kW), bobin frekansı (10 kHz), ısıtma süresi (0,5 saniye) sabit tutulmuş ve iş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki mesafenin üç farklı değeri için ELTA yazılımı kullanılarak 4340 çelik dişli iş parçasında oluşan sıcaklık profili elde edilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Bobin frekansı (10 kHz), bobin gücü (220 kW), ısıtma süresi (0.5 saniye) kullanılarak çelik dişli iş parçası ile indüksiyon bobini arası mesafesinin üç farklı değerinin sıcaklık dağılımına etkisi (a) 4.54 mm (b) 16 mm (c) 26 mm

4340 çelik dişli iş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki mesafenin 4.54 mm olduğu durumda, diş kökü bölgesinde 800°C sıcaklığa 1.48 mm derinlikte ulaşılmıştır (Şekil 4.3'a). İş parçası ile bobin arasındaki mesafenin artmasına bağlı olarak manyetik alan etkisi azaldığı için, iş parçası üzerindeki sıcaklık artışı sınırlı olmaktadır. Dolayısı ile, bobin ile dişli iş parçası arasındaki mesafenin 16 mm ve 26 mm olduğu durumlarda, martensit oluşumu için gerekli olan östenitlenme sıcaklığı (800°C) iş parçasının kök bölgesinde sınırlı bir derinlikte oluşmaktadır (Şekil 4.3b ve Şekil 4.3c). Şekil 4.4'te östenitlenme sıcaklığının oluşum derinliğinin indüksiyon bobini ile dişli iş parçası arasındaki mesafeye göre değişimi verilmiştir. Dolayısı ile, indüksiyon ısıtma işleminde, indüksiyon bobini ile iş parçası arasındaki mesafenin artmasına bağlı olarak, aşınma direnci ve yorulma direnci bakımından önemli olan martensit oluşum derinliği azalmaktadır.



Şekil 4.4. Sabit süre, güç ve frekansta, östenitlenme sıcaklığının (800 °C) oluşum derinliğinin indüksiyon bobini ile dişli iş parçası arasındaki mesafeye göre değişimi

5. TARTIŞMA

Bu çalışmada, AISI 4340 çelik dişli iş parçası için indüksiyon ısıtma süreci ELTA yazılımı kullanılarak incelenmiş ve Barka ve diğerlerinin (Barka, 2017) COMSOL yazılımı kullanarak yaptığı çalışmayla sıcaklık dağılımı ve sertlik oluşumu karşılaştırılmıştır. İndüksiyon ile ısıtma işlemi sırasında, sabit süre (0.5 saniye), ve sabit bobin gücü (220 kW) kullanılarak, frekans değişimine (orta frekans: 8 – 12 kHz) ve dişli iş parçası ile bobin arasındaki mesafe değişimine (4.54 mm – 26 mm) bağlı olarak, AISI 4340 çelik dişli üzerindeki sıcaklık dağılımı belirlenmiştir.

Sabit süre, sabit güç ve sabit mesafenin (4.54 mm) olduğu durumda, frekansın 8 kHz'den 12 kHz'e çıkartılması, çelik dişlinin kök bölgesindeki sıcaklığın artmasına ve buna bağlı olarak daha derin bölgelerde östenitlenme sıcaklığına (800°C) ulaşılmasına yol açmıştır.

Sabit süre, sabit güç ve sabit frekansta ise (10 kHz), manyetik alan etkisinin azalmasına bağlı olarak, çelik dişli ile bobin arasındaki mesafenin 4.54 mm'den 26 mm'ye çıkartılması kök bölgesindeki sıcaklığın azalmasına (< 800°C) yol açmıştır.

Çelik dişli iş parçasının aşınma direnci ve yorulma direnci bakımından indüksiyon ısıtma ile östenitlenme sıcaklığına belli bir derinlikte ulaşılması martensit fazı oluşumu bakımından kritiktir. Dolayısı ile, ELTA yazılımı kullanılarak belirli bir dişli geometrisi için indüksiyon ısıl işlem parametreleri belirlenebilir.

Çalışmada kullanılan dişli iş parçası için dairesel indüksiyon bobini geometrisi (kesit alanı 30x6.5 mm), orta bobin frekansı (~10 kHz), ve de iş parçası ile bobin arasındaki mesafenin 4-5 mm olması, 4340 çelik dişli iş parçasının kök bölgesinde 1.48 mm derinlikte martensit oluşumuna yol açmıştır. Frekansın 2 kHz azaltılması dişlinin kök bölgesindeki sertleşebilme derinliğinin 0.35 mm olmasına, 12 kHz'e çıkartılması ile dişlinin kök bölgesindeki sertleşebilme derinliğinin 2.75 mm'ye çıkmasına yol açmıştır.

Dişli iş parçası ile indüksiyon bobini arasındaki mesafede endüstriyel açıdan önemli diğer bir değişkendir. Çalışmada, bu mesafenin artırılmasına bağlı olarak dişli kök bölgesindeki sıcaklığın azalarak, istenilen sertlik değişimine yol açmadığı gösterilmiştir.

Bu çalışmada 4340 çelik dişli iş parçasının indüksiyon ile ısıtma işleminin analizinde ELTA 7.0[®] yazılımı kullanılmış ve sonuçlarının güvenilirliği diğer çalışmalarla karşılaştırılarak gösterilmiştir ve yazılımın güvenli sonuçlar verdiği anlaşılmıştır.

6.SONUÇLAR

İndüksiyonla ısıtma işlemi, malzemelerin fiziksel özellikleri manyetik alan yoğunluğuna, sıcaklığa ve mikro yapıya bağlı olduğundan, birbirleriyle sıkı bir şekilde ilişkili ve yüksek düzeyde doğrusal olmayan elektromanyetik, ısı transferi, metalürjik olgudur. Bunların yansısı, devre analizinin karmaşık bir etkileşimini içeren çoklu fiziksel bir süreçtir. İndüksiyonlu ısıtma işleminde malzemenin metalürjik/mikro yapısal özelliklerine kontrollü bir şekilde müdahale edilerek malzemenin mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Bu sayede, malzeme daha zorlu çevresel şartlar altında ve yükler altında bile daha uzun ömürlü ve daha dayanıklılığa sahip olmaktadır. Tez çalışmasında elektromanyetik ve ısı transferi fenomenleri, süreç simülasyonları ve diğer bazı ilgili yönere odaklanılmıştır.

İndüksiyonla ısıtma olgusundaki temel elektromanyetik süreçler, üniversite fiziği de dahil olmak üzere çeşitli ders kitaplarında tartışılmıştır. Bir indüksiyon bobinine -örneğin, çok turlu bobin - uygulanan alternatif bir voltaj, bobin devresinde bir alternatif akım akışına neden olacaktır. Alternatif bir bobin akımı, çevresinde, bobin akımıyla aynı frekansa sahip, zamanla değişen bir manyetik alan üretir. Bu manyetik alan, bobinin içinde bulunan iş parçasında girdap akımlarına neden olur. Girdap akımları, bobinin yakınında bulunan diğer elektriksel olarak iletken nesnelere de indüklenmektedir. Bu indüklenen akımlar, bobin akımıyla aynı frekansa sahiptir; ancak yönleri bobin akımının tersidir. Bu akımlar Joule etkisiyle ısı üretir ($I^2 \times R$). İndüksiyon ısıtmada kullanılan çeşitli indüktör bobin geometrileri mevcuttur. Tez çalışması için seçilen indüksiyon bobin geometrisi neredeyse sonsuz çeşitlilikte indüktör tipi arasından silindirik geleneksel bir solenoid tipi bobin geometrisi seçilmiştir.

Bu tez çalışmasında, Lenz yasası, Faraday yasası, Fourier yasasıyla ısı iletimi, Joule ısınması, Amper yasası ve manyetik alan gibi Maxwell denklemlerinin barındırdığı bu önemli fizik yasalarının ve kavramlarının hepsinin aynı anda geçerli olduğu indüksiyon ısıtma kavramı incelenmiştir. İndüksiyon ısıtma olgusu yazılım yardımıyla modellenmiş ve alınan sonuçlar doğrulanabilmiştir. Bu yönüyle bu çalışma, fizik yasalarını temel alarak oluşturulan matematiksel modellerin sayısal modellere aktarıldığında ve bu ardışık karmaşık bilimsel süreçler doğru yönetildiğinde sonuçların ne kadar etkili olabileceğine dikkat çekmeyi amaçlamaktadır.

Bu tez çalışmasında yapılan çalışmayla indüksiyon ısıtma sürecinin yazılım yardımıyla modellenebileceği ve parametrik çoklu-fizik benzetim süreçleri sonucunda sayısal çıktılar elde edilebileceği anlaşılmıştır. Bu çıktılar literatürdeki çıktılarla uyumlu olduğunun görülmüş ve bu tür benzetim süreçlerinin indüksiyon ısıtma süreçlerinde etkin bir şekilde endüstriyel uygulamalarda kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. İndüksiyon ısıtmada yazılım destekli tasarım yardımıyla hem tasarım süreçleri kısaltılabilmekte hem de maliyet etkin şekilde isabetli kestirimlerde bulunmak mümkün hale gelmektedir. Tez çalışması süresince, manyetik alan, ısı iletimi ve temas etmeden etkiyle indükleme gibi fizik kanunlarının çoklu fizik benzetimlerinde doğrudan sonuçlarına ve bu fizik yasalarının doğrudan endüstriyel uygulamalarda ve savunma sanayi gibi alanlarda fiziki uygulamalarda kullanıldığına şahit olunmuştur.

Konu ile ilgili gelecekte yapılabilecek çalışmalarda, yüksek frekans etkisi (100-200 kHz) ve farklı bobin geometrilerinin incelenebilir. Ayrıca, bobin uyartımı esnasında

yüksek frekansta çalışma sonucu ısınmalar meydana gelmektedir ve bu ısının etkin bir şekilde atımı önem arz etmektedir. Bu ısınma problemine çözüm olarak aktif soğutma önerilebilir. Soğutma suyunun etkisi debisi basıncı ve soğutma kanallarının geometrisi ayrı ayrı çalışılabilir. Yansıra, dişli üzerinde yalnızca istenen bölgelerde manyetik alanın erişimi sağlanıp diğer belgelerde manyetik alanın etkinliği pasifleştirilerek daha etkin indüksiyon ısıtma sonuçları elde edilebilir. Bu amaçla manyetik akı yoğunlaştırıcılar kullanılabilir. Son olarak, gelecek çalışmalarda iki-frekanslı olarak ardışık iki frekansın (orta-frekans ve yüksek-frekans) uygulanması incelenebilir. Bu sayede indüksiyon ısıtma süreci üzerinde istenen kontrol seviyesi artırılabilir.

7.KAYNAKLAR

- ASTM, E. 2003. 92 – 82. Standard test method for vickers hardness of metallic materials. West Conshohocken: ASTM Int.
- Baldan, M., Cetin, M., Nikanorov, A., Nacke, B. 2019. Optimal Design of Magnetic Flux Concentrators in Induction Heating. XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Russia: IEEE.
- Barglik, J. S. 2014. 3D modeling of induction hardening of gear wheels. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 270, 231-240.
- Barka, N. 2017. Study of the machine parameters effects on the case depths of 4340 spur gear heated by induction—2D model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(1), 1173-1181.
- Barka, N. 2007. Modeling and sensitivity study of the induction hardening process. 15-17: *Advanced Materials Research*, 15, 525-530.
- Barka, N., Bocher, P., Chebak, A., Brousseau, J., Ramdenee, D. S. 2011. Study of Currents and Temperature of Induced Spur Gear using 2d Simulation. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 5(11), 2483-2488.
- Barka, N., Chebak, A., Ouafi, A. E., Bocher, P., Brousseau, J. 2012. Sensitivity study of temperature profile of 4340 spur gear heated by induction process using 3D model. *In Applied Mechanics and Materials*, 232, 736-741.
- Barka N., Chebak, A., El Ouafi, A., Jahazi, M., Menou, A. 2014. A new approach in optimizing the induction heating process using flux concentrators: application to 4340 steel spur gear. *Journal of materials engineering and performance*, 23(9), 3092-3099.
- Bukanin, V. A., Zenkov, A. E., Ivanov, A. N. 2017. Simulation of single and dual-frequency induction hardening of steel gear using ELTA. IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) (pp. 791-795)). St. Petersburg: IEEE.
- Bukanin V. A., Ivanov, A. N., Zenkov, A. E., Vologdin, V. V. 2018. Induction Hardening of External Gear. MS&E. 327. IOP Publishing.
- Bukanin, V., Ivanov, A., Zenkov, A. 2019. Investigation of heating and melting in ELTA programs. *COMPEL-The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, 39(1), 117-124.
- Bukanin, V., Ivanov, A., Zenkov, A. 2018. ELTA 7.0 program for induction heat treatment of gears. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, 13, 85–98.
- Bukanin, V. Z. 2016. Simulation of induction heat treatment of steel articles with the help of ELTA 6.0 and 2DELTA software. *Met Sci Heat Treat*, 58(493). doi:<https://doi.org/10.1007/s11041-016-0042-4>.
- Ducassy, C. 2009. Prediction of over-tempering during rapid induction heating, doctoral dissertation. Address: <http://espace.etsmtl.ca/262/>.

- Callister, W. D. 2020. Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach. John Wiley & Sons.
- Candeo, A., Ducassy, C., Bocher, P., Dughiero, F. 2011. Multiphysics Modeling of Induction Hardening of Ring Gears for the Aerospace Industry. *IEEE Transactions On Magnetics*, 47(5), 918 - 921.
- Chaboudez, C., Clain, S., Glardon, R., Rappaz, J., Swierkosz, M., Touzani, R. 1994. Numerical modelling of induction heating of long workpieces. *IEEE transactions on magnetics*, 30(6), 5028-5037.
- Chebak, A., Barka, N., Menou, A., Brousseau, J., Ramdenee, D. S. 2011. Simulation and Validation of Spur Gear Heated by Induction using 3d Model. *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, 5(11), 2153-2157.
- Chen, H. C. ve Huang, K. H. 2008. Finite Element Analysis of Coupled Electromagnetic and Thermal Fields Within a Practical Induction Heating Cooker. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 28(4), 413-427.
- Davis, J. R. 2005. Gear Materials, properties, and manufacture. ASM International, pp. 1-18.
- Dawson, F. P. 1990. Systems for induction heating and melting applications: a comparison of load commutated inverter. 21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists (pp. 281-290). IEEE.
- Denis, F. D. 1992. Mathematical model coupling phasetransformations and temperature evolutions in steels. *ISIJ International*, 32(3), 325.
- Departement, U. D. 1998. U.S. Defense Departement . Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, Military Handbook - MIL-HDBK-5H.
- Di Barba, P. F. 2015. Multiobjective design optimization of an induction heating device: A benchmark problem. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 47(4), 1003-1013.
- Fisk, M. 2011. Simulation of induction heating in manufacturing. *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, 12, 161 - 167.
- Frogner, K., Andersson, M., Cedell, T., Siesing, L., Jeppsson, P., Ståhl, J. E. 2011. Industrial heating using energy efficient induction technology. Sweden: Lund University, *In Proceedings of the 44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems*, 01-03.
- Fu, X., Wang, B., Tang, X., Ji, H., Zhu, X. 2017. Study on induction heating of workpiece before gear rolling process with different coil structures. *Applied Thermal Engineering*, 114, 1-9.
- Golovin G. F. ve Zimin N. V. 1979. Process of heat treatment of metals involving induction heating, (p. 120). Mashinostroenie, Moscow – Leningrad .
- Gur, C. H. ve Pan, J. 2008. Handbook of thermal process modeling steels.
- Hammi, H., El Ouafi, A., Barka, N., Chebak, A. 2017. Scanning Based Induction Heating for AISI 4340 Steel Spline Shafts-3D Simulation and Experimental Validation. *Advances in Materials Physics and Chemistry*, 7(6), 263-276.

- Ivanov, A. N., Bukanin, V. A., ve Zenkov, A. E. 2019. Simulation of induction heating processes in ICF ELTA. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 981-984.
- Jankowski, T. A., Pawley, N. H., Gonzales, L. M., Ross, C. A., Journey, J. D. 2016. Approximate analytical solution for induction heating of solid cylinders. *Applied Mathematical Modelling*, 40(4), 2770-2782.
- Jomaa, W., Songmene, V., Bocher, P. 2013. On residual stress changes after orthogonal machining of induction hardened AISI 4340 steel. In Proceedings of Materials Science and Technology Conference and Exhibition, MS&T. 13, pp. 94-103. Proceedings of Materials Science and Technology Conference and Exhibition.
- Lucía, O., Acero, J., Carretero, C., Burdio, J. M. 2013. Induction Heating Appliances: Toward More Flexible Cooking Surfaces. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 7(3), 35-47.
- Magnabosco, I. F. 2006. Induction heat treatment of an ISO C45 steel bar: Experimental and numerical analysis. *Computational materials science*, 35(2), 98-106. doi: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.03.010>
- Mingardi, D. 2012. Numerical models for induction hardening of gears, M.Sc. thesis. Address: http://tesi.cab.unipd.it/42444/1/master_thesis_Damiano_Mingardi.pdf.
- Nemkov, V. 2009. Modeling of induction hardening processes. In Handbook of Thermal Process Modeling of Steels. (p. 498). London, New York: CRC Press.
- Nemkov, V., Bukanin, V., Zenkov, A., Ivanov, A. 2014. Simulation of induction heating of slabs using ELTA 6.0. *International Scientific Colloquium Modelling for Electromagnetic Processing*, 113–118.
- Nemkov, V. ve Demidovich, V. 1988. Theory of Induction Heating. St. Petersburg, Russia: Energoatomizdat.
- Nemkov, V., Goldstein, R., Bukanin, V. 2004. Optimal design of internal induction coils,. Proc. Int. Seminar on Heating by Electromagnetic Sources, 489 – 496. Padua.
- Parvinzadeh, M., Sattarpanah Karganroudi, S., Omidi, N., Barka, N., Khalifa, M. 2021. A novel investigation into the edge effect reduction of 4340 steel disc through induction hardening process using magnetic flux concentrators. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 115(9), 2959-2971.
- Prasad, A. K., Kapil, S., Bag, S. 2022. Critical conditions for melting of metallic wire in induction heating system through numerical simulation and experiments. *Journal of Manufacturing Processes*, (77), 678-693.
- Haimbaugh, R. E. 2015. Practical induction heat treating, Materials Park, OH.: ASM International.
- Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R., Black, M. 2004. Induction hardening of gears: a Review. *Heat Treatment of Metals*, 31(1), 11-15.
- Rudnev, V. ve Totten, G. E. 2014. ASM Handbook Volume 4C: Induction Heating and Heat Treating. ASM International, Materials Park.
- Rudnev, V., Loveless, D., Cook, R. L. 2017. Handbook of Induction Heating. CRC Press.

- Chen, S. C., Minh, P. S., Chang, J. A., Huang, S. W., Huang, C. H. 2012. Mold temperature control using high-frequency proximity effect induced heating. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(2), 216-223.
- Slukhotskii, A. E ve Ryskin, S. E. 1974. Inductors for Induction Heating. Energy Publications.
- Smalcerz, A. 2015. The use of multifrequency induction heating for temperature distribution control. Archives of metallurgy and materials.
- Spezzapria, M. 2016. Multiphysical Finite Element Simulation of Contour Induction Hardening of Gears. Padova: University of Padova.
- Tavakoli, M. H., Ojaghi, A., Mohammadi-Manesh, E., Mansour, M. 2009. Influence of coil geometry on the induction heating process in crystal growth systems. *Journal of crystal growth*, 311(06), 1594-1599.
- Tomita, Y. 1988. Effect of microstructure on plane-strain fracture toughness of AISI 4340 steel. *Metallurgical Transactions A*, 19(10), 2513-2521.
- Url-1 <https://www.nsgsoft.com/products/elta>. 2022. Retrieved from <https://www.nsgsoft.com/products/elta> [Son erişim tarihi: 11.06.2022].
- Url-2 <http://www.nsgsoft.com>. 2022. Retrieved from <http://www.nsgsoft.com> [Son erişim tarihi: 11.06.2022].
- V. A. Bukanin, A. E. 2009. ELTA 7.0 software for electrothermal analysis of induction processes, *I(7)*, pp. 210 – 215.
- Zamyatin, M. M. ve Zimin N. V. 1966. Investigation of cooling after induction heating, commercial application of HFC, (pp. 222 – 231 Issue 7). Moscow – Leningrad.
- Vullo, V. 2020. *Gears*. New York: Springer International Publishing.
- Yuan, J. K. 2003. FEM modeling of induction hardening processes in steel. *Journal of materials engineering and performance*, 12(5), 589-596.

ÖZGEÇMİŞ

ÖNDER SÖNMEZ

ro_onder@yahoo.com.tr



ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Yüksek Lisans	Akdeniz Üniversitesi
2020-2022	Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, Antalya
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniversitesi
2004-2010	Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Ankara

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Optik Sistemler Tasarım Mühendisi	ASELSAN Hassas Optik
(Gündüz/Termal Görüntüleme Sistemleri, Kızılötesi Sürekli Zum Kamera Sistemleri, Kızılötesi Lazer İşaretleyiciler)	Macunköy, Ankara
2021-Devam Ediyor	

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Numerical Analysis of an Electromagnetic Plunger (DOI: 10.31590/ejosat.803129)
- 2- Numerical Simulation of a Magnetic Induction Coil for Heat Treatment of an AISI 4340 Gear (<https://doi.org/10.26701/ems.1027181> European Mechanical Science-2022)