

**T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**



**İNDÜKSİYON FIRINLARINDA SERTLEŞTİRME
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE İNDÜKSİYON
PROSES KONTROLÜ İÇİN METOT GELİŞTİRİLMESİ**

Yüksek Lisans Tezi

Yusuf ALAYBEYOĞLU

Danışman
Dr. Öğretim Üyesi Sinem ÇEVİK

SAMSUN
2022

TEZ KABUL VE ONAYI

Yusuf ALAYBEYOĞLU tarafından, Dr. Öğretim Üyesi Sinem ÇEVİK danışmanlığında hazırlanan “İNDÜKSİYON FIRINLARINDA SERTLEŞTİRME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE İNDÜKSİYON PROSES KONTROLÜ İÇİN METOT GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı Adı Soyadı		İmza	Sonuç
Üniversitesi			
Ana Bilim/Ana Sanat Dalı		İmza	Sonuç
Başkan	Prof. Dr. XXXX XXXX		☐
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi		Kabul
	 Anabilim Dalı		☐
			Ret
Üye (Danışman)	Dr. Öğr. Üyesi XXXX XXXX		☐
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi		Kabul
	 Anabilim Dalı		☐
			Ret
Üye	Doç. Dr. XXXX XXXX		☐
	Ondokuz Mayıs Üniversitesi		Kabul
	 Anabilim Dalı		☐
			Ret

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından uygun görülmüştür.

ONAY

... / ... / ...

Prof. Dr. Ali BOLAT

Enstitü Müdürü

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Hazırladığım Yüksek Lisans tezinin bütün aşamalarında bilimsel etiğe ve akademik kurallara riayet ettiğimi, çalışmada doğrudan veya dolaylı olarak kullandığım her alıntıya kaynak gösterdiğimi ve yararlandığım eserlerin Kaynaklar'da gösterilenlerden oluştuğunu, her unsurun enstitü yazım kılavuzuna uygun yazıldığını ve TÜBİTAK Araştırma ve Yayın Etiği Kurulu Yönetmeliği'nin 3. bölüm 9. maddesinde belirtilen durumlara aykırı davranılmadığını taahhüt ve beyan ederim.

Etik Kurul Gerekli mi?

Evet ☐

Hayır ☒

İmza

14 / 01 / 2022

Yusuf ALAYBEYOĞLU

TEZ ÇALIŞMASI ÖZGÜNLÜK RAPORU BEYANI

Tez Başlığı : İNDÜKSİYON FIRINLARINDA SERTLEŞTİRME
PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE İNDÜKSİYON PROSES
KONTROLÜ İÇİN METOT GELİŞTİRİLMESİ

Yukarıda başlığı belirtilen tez çalışması için şahsım tarafından 14.01.2022 tarihinde intihal tespit programından alınmış olan özgünlük raporu sonucunda;

Benzerlik oranı : % 29

Tek kaynak oranı : % 5 çıkmıştır.

İmza

14 / 01 / 2022

Dr. Öğretim Üyesi Sinem ÇEVİK

ÖZET

İNDÜKSİYON FIRINLARINDA SERTLEŞTİRME PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ VE İNDÜKSİYON PROSES KONTROLÜ İÇİN METOT GELİŞTİRİLMESİ

Yusuf ALAYBEYOĞLU

Ondokuz Mayıs Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

Yüksek Lisans, Şubat/2021

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi Sinem ÇEVİK

Yüzey sertleştirme metotlarından indüksiyon prosesi otomotiv sektöründe en çok tercih edilen ısıtma işlem uygulamasıdır. Otomotiv aksamaları genel olarak birbirleri ile temaslı çalıştıkları için parçaların aşınma dayanımları oldukça önemlidir. İndüksiyon prosesi ürünlerin aşınma dayanımını arttıran bir yöntemdir. Otomotiv sektöründe genel olarak ısıtma çelikleri kullanılmaktadır. İndüksiyon prosesi ise genel olarak ısıtma çeliklerine uygulanan yüzey sertleştirme metotlarından biridir. Otomotiv sektöründe de yaygın olarak kullanılmasının sebebi; düşük maliyetli ve hızlı bir operasyon olmasıdır.

İndüksiyon yüzey sertleştirme prosesinde; yüzey sertleştirme sıcaklığı, proses süresi, hem sertliği hem de sertlik derinliğini kontrol eden önemli faktörlerden biridir. İndüksiyon sertleştirmesinde koşullar aynı kaldığı sürece, sertleşme derinliği indüktif akımın frekansı ile kontrol edilir. İndüksiyon prosesinde güçte önemlidir. Bu prosesdeki diğer etkenler sıvı sıcaklığı, sıvının PH değeri ve derinliği ve iletkenliğidir. Aynı zamanda oluşan bakteri gibi organizmalarda yüzey sertliğini değiştiren etmenlerdendir.

Bu çalışmada; malzemelere güç, frekans uygulamaları yapılarak uygunluk kontrol edildi. Soğutma sıvısının proseste nelere etki ettiği gözlemlendi. Ph ve iletkenlik verilerine göre uygun parametreler belirlendi. Ayrıca, kalitede devamlılığı bakımından sistem devamlı kontrol edildi.

Sonuç olarak; çalışmada kullanılan yuvarlak çelik malzemelerin yüksek verimde çalışması hedeflenmiştir. Belirlemiş olduğumuz frekansta ve güçte, soğutma sıvısının parametreleri ölçülerek geliştirmeler yapıldı ve yüzey sertlik değerleri kayıt altına alınmıştır. İndüksiyon prosesinde fırın parametre ayarlarının daha kısa sürede yapılması elektrik tasarrufu da sağlayarak maliyetlerde ve çevre kirliliğinde de iyileştirme sağlayacaktır.

Anahtar Sözcükler: İndüksiyon, yüzey sertleştirme, ısıtma işlemi, verimlilik, güç, frekans, soğutma sıvısı

ABSTRACT

DETERMINATION OF HARDENING PARAMETERS IN INDUCTION OVENS AND DEVELOPMENT OF METHOD FOR INDUCTION PROCESS CONTROL

Yusuf ALAYBEYOĞLU

Ondokuz Mayıs University

Institute of Graduate Studies

Department of Materials and Metallurgical Engineering

Master, February/2021

Supervisor: Asisst. Prof. Dr. Sinem ÇEVİK

Induction process, one of the surface hardening methods, is the most preferred heat treatment application in the automotive industry. Since automotive components generally work in contact with each other, the wear resistance of the parts is very important. The induction process is a method that increases the abrasion resistance of products. In the automotive industry, generally tempered steels are used. The induction process is one of the surface hardening methods generally applied to tempered steels. The reason why it is widely used in the automotive industry; It is a low cost and fast operation.

In the induction surface hardening process, Surface hardening temperature, process time is one of the important factors controlling both hardness and depth of hardness. As long as the conditions remain the same in induction hardening, the depth of hardening is controlled by the frequency of the inductive current. Power is important in the induction process. Other factors in this process are the liquid temperature, the PH value of the liquid and its concentration and conductivity. At the same time, it is one of the factors that change the surface hardness in organisms such as bacteria.

In this study, Compliance was checked by applying power and frequency applications to the materials. It was observed what effect the cooling liquid had on the process. Appropriate parameters were determined according to the pH and conductivity data. In addition, the system was constantly checked for continuity in quality.

As a result, it is aimed to operate the round steel materials used in the study with high efficiency. Improvements were made by measuring the parameters of the coolant at the frequency and power we determined, and the surface hardness values were recorded. In the induction process, making furnace parameter settings in a shorter time will also save electricity and improve costs and environmental pollution.

Keywords: Induction, surface hardening, thermal equipment, hardware, power, frequency, coolant

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında faydalı bilgilerinden yararlandığım, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen Sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi SİNEM ÇEVİK' e, çalışmalarımda her türlü desteği benden esirgemeyen ve mesleki gelişimime katkıda bulunan işyerim Sampa Otomotiv San. ve Tic. A.Ş.' ye, ayrıca her türlü konuda bana yardım eden ve destek veren sevgili arkadaşım Tuğba KAYALARLI' ya, son olarak hiçbir zaman desteğini esirgemeyen ve hiçbir zaman yalnız bırakmayan sevgili eşim Ilgım ALAYBEYOĞLU' na teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Yusuf ALAYBEYOĞLU

İÇİNDEKİLER

TEZ KABUL VE ONAYI	i
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	v
SİMGELER VE KISALTMALAR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
TABLolar DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR.....	2
2.1. Çeliklerin Sınıflandırılması	5
2.1.1. Alaşımsız Çelikler.....	5
2.1.2. Alaşımlı Çelikler:	6
2.2. Isıl İşlemin Temelleri.....	9
2.2.1. Demir-Sementit Denge Diyagramındaki Temel Fazlar	11
2.2.2. Demir-Sementit Denge Diyagramının Yorumlanması.....	12
2.2.3. Grafit Oluşumu	13
2.3. Çeliğe Uygulanan Isıl İşlemler.....	13
2.3.1. Yumuşatma Tavlı (Tam tavlama)	13
2.3.2. Normalizasyon Tavlı.....	14
2.3.3. Gerilme Giderme Tavlı	15
2.3.4. Yeniden Kristalleştirme Tavlaması.....	15
2.3.5. Su Verme Sertleştirilmesi.....	16
2.3.6. Menevişleme (Temperleme)	27
3. İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ	28
3.1. İndüksiyonla Isıtma Mekanizması.....	29
3.2. Nüfuz Derinliği	30
3.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme	31
3.4. İndüksiyonla Sertleştirme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları	32
4. ÇALIŞMANIN AMACI	34
5. ÇALIŞMANIN BAŞLATILMA GEREKÇELERİ.....	35
6. TARTIŞMA	36
6.1. İndüksiyon Soğutma Sıvısı Sıcaklık Ölçümü ve Sertlik Ölçümü	43
6.2. Bobin Mesafeleri Ölçüm Sonuçları	47
6.3. İndüksiyon Soğutma Sıvısı Derişim Ölçüm Sonuçları	49
6.4. İndüksiyon Soğutma Sıvısı pH Ölçüm sonuçları	51
6.5. Deneysel Çalışma Görselleri	52
7. BAŞARI KRİTERİ VE SOMUT HEDEFLER	58
8. ÇALIŞMA ÇIKTILARI	60
KAYNAKLAR.....	61
ÖZ GEÇMİŞ.....	63

SİMGELER VE KISALTMALAR

YMK	: Yüzey merkezli kübik
HMK	: Hacim merkezli kübik
HMT	: Hacim merkezli tetragonal
Hv	: Vickers sertlik testi
HRC	: Rockwell sertlik testi
α	: Ferrit
γ	: Östenit
Fe ₃ C	: Sementit
α +Fe ₃ C	: Perlit
γ +Fe ₃ C	: Ledeburit
ZSD	: Zaman, sıcaklık – dönüşüm diyagramı
Ac ₃	: Üst kritik sıcaklık ölçüsü
Ac ₁	: Alt kritik sıcaklık çizgisi
Ms	: Martenzitik dönüşümün başladığı çizgi
Mf	: Martenzitik dönüşümün bittiği çizgi
QX	: İletim ile geçen ısı
Qtaş	: Taşınım ile geçen ısı
h	: Isı taşınım katsayısı
q	: Isı akış yoğunluğu
R _{tot}	: Termal direnç
U	: Isı transfer katsayısı
A	: Isının geçtiği alan
δ	: Nüfuz derinliği
ρ	: Özgül direnç
f	: Frekans
μ_r	: Bağlı manyetik geçirgenlik

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Demir sementit (Fe-Fe ₃ C) denge diyagramı	10
Şekil 2.2 Çeliğin mikro yapısında gözlenen fazlar	11
Şekil 2.3 Çeliğe uygulanan ısı işlemler	14
Şekil 2.4 Normalizasyon, tam tavlama ve küreselleştirme için önerilen tavlama sıcaklığı ..	15
Şekil 2.5 Martenzit sertliği	17
Şekil 2.6 Karbon oranına göre çeliğin soğuma hızı	18
Şekil 2.7 Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı	19
Şekil 2.8 Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı	20
Şekil 2.9: Isı transferi sonucu oluşan soğutma hızının farklı ortamlarda oluşumu	23
Şekil 2.10:Yüzeyden merkeze doğru meydana gelen sertleşebilirliğin gösterimi	24
Şekil 2.11:Yüzeyden Merkeze Doğru Meydana Gelen Sertleşebilirliğin Gösterimi	24
Şekil 2.12: Alaşım elementlerinin östenit dönüşümüne etkisi	26
Şekil 2.13: Menevileşme Sonucu Mekanik Özelliklerde Değişim	27
Şekil 2.14: Menevileşme sıcaklığı ve süresinin sertliğe olan etkisi	27
Şekil 3.1 İş parçası çevresinde akım taşıyan bobinin oluşturduğu manyetik alan oluşumu .	29
Şekil 3.2: Dalma derinliğinin üstel olarak azalması.....	30
Şekil 3.3: İndüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin şematik olarak gösterimi	31
Şekil 4.1: İndüksiyon bobini	34
Şekil 6.1 100 mm Çapında Boin Tasarımı	37
Şekil 6.2 Bobin ve Quench Bağlantı Gösterimi	38
Şekil 6.3 Bobinin İndüksiyon Fırınına Bağlantısı.....	39
Şekil 6.4 İndüksiyon Bobini ile Malzemenin Şematik Gösterimi.....	39
Şekil 6.5 Kullanılan İndüksiyon Fırının Önden Teknik Resim Gösterimi.....	40
Şekil 6.6 Kullanılan İndüksiyon Üç Boyutlu Teknik Resim Gösterimi.....	41
Şekil 6.7 HİTACHI PM-MASTER Pro2 Spektrometre Cihazı	42
Şekil 6.8 Spektrometre Tabanca Görüntüsü	43
Şekil 6.9 İlk Ölçümlere Göre Sıcaklık ve Sertlik Ölçümü.....	44
Şekil 6.10 İkinci Ölçümlere Göre Sıcaklık ve Sertlik.....	45
Şekil 6.11 Son Ölçümlere Göre Sıcaklık ve Sertlik.....	47
Şekil 6.12 İndüksiyon Olmuş Ürünlerin Sertliği	53
Şekil 6.13 İndüksiyon Olmuş Ürünlerin Sertlik Kontrolü	53
Şekil 6.14 Verilen Ekranda Kontrolü.....	54
Şekil 6.15 Ürünlerin Sıcaklık Ölçümü.....	54
Şekil 6.16 Ürünlerin ve Soğutma Sıvısı Sıcaklık Ölçümü	55

Şekil 6.17 Soğutma Sıvısı Kontrolü.....	55
Şekil 6.18 İndüksiyon Projesi	56
Şekil 6.19 Soğutma Sıvısı Ph Kontrolü	56
Şekil 6.20 İletkenlik ve Ph Değerlerinin Kontrolü.....	57
Şekil 6.21 Kamyonlarda Ön süspansiyonda Direksiyon Bağlantısı.....	57
Şekil 6.22 Üretimi Yapılan Dingil Pimi.....	58



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 2.1 Alaşım ve Katı Elementleri.....	8
Tablo 6.1 42CrMo4 Malzemenin Analiz Denemeleri.....	43
Tablo 6.2 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı ve Buna Bağlı Sertlik Ölçümü	44
Tablo 6.3 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı ve Buna Bağlı 2. Sertlik Ölçümü	45
Tablo 6.4 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı ve Buna Bağlı 3. Sertlik Ölçümü	46
Tablo 6.5 Bobin Mesafeleri ve Buna Bağlı Sertlik Ölçümü Sonucu	48
Tablo 6.6 Soğutma Sıvısı Değişim Ölçüleri	50
Tablo 6.7 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı Denemelerine Göre Ph Değerleri	51

1. GİRİŞ

Çalışma; otomotiv sektöründe de oldukça tercih edilen yüzey sertleştirme metotlarından “indüksiyon ile yüzey sertleştirme” prosesini kapsamaktadır.

Otomotiv, indüksiyon ile yüzey sertleştirme işleminin, en çok kullanıldığı ve her bir parça için kalitesine ömrü açısından etkilendiği sektörlerin başındadır. İndüksiyon ile yüzey sertleştirme, otomotivde parçanın her yerinde sertlik istenmeyen, aşınan bölgeler için bölgesel sertleşmenin yapılması gereken durumlarda yaygın olarak kullanılır. İndüksiyon ile yüzey sertleştirme de en büyük avantaj yüksek hassasiyette parçanın istediğimiz bölgelerinin ısıl işleminden geçirilerek, aşınma direncinde ve yorulma dayanımındaki artıştır.

İndüksiyon prosesinin çalışma prensibi; bu durum güç ve frekans ile ilgilidir. Sürekli tekrarlanabilen bir proses yaratmanın kolaylığı, indüksiyon ile yüzey sertleştirme prosesinin, yüksek hacimli ve seri üretim için uygun olmasını sağlamaktadır.

Yapılan çalışmalar ve tasarımları, kullanılacak malzeme tasarımları ile özgün indüktörler oluşturmuştur.

İndüksiyonla yüzey sertleştirmede proseste güç ve frekans ayarlarını kullanarak belli sertlik derinliği elde edilmektedir. Belirli bir çalışmada malzemeler için de sertleştirme sıcaklığı, güç, frekans gibi parametreleri belirlenerek ve set-up süresi kısaltılarak zaman kayıplarının minimuma indirilmesi konusunda çalışılmıştır.

Proseste sıcaklığın kontrol altına alınması, malzemenin mekanik özelliklerini optimize ederek, proses set-up süresini azaltarak zaman kayıpları ve işçilik maliyetlerinde azalmaya gidilmiştir. Amaç verimliliği artırmak olup yeni indüktör tasarımı ile manyetik alan yönlendirilmiş, enerji sarfıyatı azalmış ve verimlilik artmıştır.

2. LİTERATÜR

Farklı yöntemlerle üretilen iş parçası uygulanan işlemler sırasında çeşitli etkilerle karşılaşmaktadır. Bu etkiler; mekanik, kimyasal, ısıl veya fiziksel olabilir. Uygulanan etkilerden dolayı iş parçasının yüzey özellikleri genellikle iş parçasının iç bölgesinin özelliklerinden oldukça farklılıklar gösterir. İş parçasının mukavemet değerleri genellikle iş parçasının çekirdek bölgesinin belirlmesine rağmen; üretilen iş parçasının yüzey özellikleri de oldukça önemlidir. İş parçasının yüzey özelliği; iş parçasının üretim sonrasındaki proseslerle takım ve kalıplarla direkt temas sağlandığında ya da çalışacağı yerlerde aşınma ve sürtünme özelliklerini de oldukça etki eder (Zakharov, 1962) Üretim sırasında ve çalışacağı yerde kullanılacak yağlayıcının etkisi, iş parçasının görüntüsü ve geometrisi; iş parçasına uygulanacak kaplama prosesi, kaynak prosesi gibi işlemleri etkilememektedir. Ayrıca korozyon dayanımı, yorulma dayanımı, kırılma değerleri gibi değerlerin uygunsuzluğu iş parçasının dayanımının düşmesine sebebiyet verir. Bu mekanik değerlerin düşük olması iş parçasının zamanından önce kırılmasına sebebiyet verir. Bir diğer önemli konuda iş parçasının yüzeyindeki hatalardır. Yüzey hataları; kaynak prosesinden kaynaklı ısıdan dolayı etkilenen bölgeler, iş parçası yüzeyindeki çatlak başlangıç bölgeleri olabilir. İş parçasının yüzeyindeki hatalar; temas eden karşıt iş parçasında elektrik iletkenliğini ve ısıl dayanımını oldukça etkiler (Kalpakjian, 1991).

Tüm üretim yöntemleri göz önünde bulundurulduğunda; ölçüsel toleranslarla birlikte iş parçasının yüzey görünümü ve kalitesi de oldukça önemlidir. Farklı üretim metotları ile üretimi yapılmış bir iş parçasının işlevinin yerine getirebilmesi için; iş parçasının yüzey kalitesi oldukça önemlidir (Özses, 2002).

İslenmiş parçaların yüzey pürüzlülükleri aşınma direnci ve yorulma direnci gibi özellikler üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüzey kalitesi, aynı zamanda talaşlı imalat işlemlerinin verimliliğini değerlendirmede önemli bir faktördür. Bitirme işlemlerindeki en önemli ölçütlerden birisi yüzey pürüzlülük değeridir (Tutar, 2011)

Üretilmiş parçalarda istenilen kaliteyi elde etmek için yapım resimlerinde belirtilmiş olan yüzey pürüzlülük değerlerinin işlem sonrası sağlanması gerekir. Aksi takdirde, islenmiş parçalar işlevlerini etkin bir şekilde yerine getiremez veya istenilen

yüzey pürüzlülük değerini sağlamak için ilave işlemler gerekebilir. İş parçası malzemesi, kullanılan kesici takımın geometrisi ve malzemesi, işlem parametreleri (kesme hızı, ilerleme hızı ve talaş derinliği), takım tezgâhının rijitliği ve soğutma sıvısı yüzey pürüzlülük değerini belirleyen faktörlerdir.

İş parçası malzemesinin özelliklerinden sertlik ve süneklik metallere ısıtılma işlemi, ısınma ve soğumanın kontrol edilmesi suretiyle özelliklerin değiştirilmesi amacıyla yapılır. Isıtılma işlem sıcaklıkları metal içerisinde oluşan değişikliklere ve ısıtılma işleminden önce yapılan mekanik işleme bağlıdır. Çeşitli ısıtılma işlemlerinden hangi ısıtılma işleminin uygulanacağı malzeme tipine ve elde edilmek istenen özelliklere bağlı olarak belirlenir (Çakır, 1999).

İş parçası malzemesinin özelliklerinden sertlik değeri ve süneklik değerleri metallere ısıtılma işlemi, ısınma değerlerinin ve soğuma değerlerinin takip edilmesiyle özelliklerin değiştirilmesi amacıyla yapılır. Isıtılma işlem sıcaklıkları metal içerisinde oluşan değişikliklere ve ısıtılma işleminden önce yapılan mekanik işleme bağlıdır. Çeşitli ısıtılma işlemlerinden hangi ısıtılma işleminin uygulanacağı malzeme sınıfına ve elde edilmek istenen değerlere bağlı olarak belirlenmektedir (Çakır, 1999).

Islah sınıfı çelikler, kimyasal bileşimleri öncelikle karbon miktarı bakımından, sertleştirilmeye uygun olan, ıslah işlemi sonunda istenen bir çekme dayanımında oldukça yüksek tokluk özelliği gösteren, alaşımsız veya alaşımlı üretim imalat çelikleridir.

Islah çelikleri 4 ana grupta toplanabilirler;

- Alaşımsız
- Mangan alaşımlı
- Krom alaşımlı
- Krom-molibden alaşımlı

Çelik sınıflarından Islah çelikleri, ıslah prosesi sonunda; prosesin kazandırdığı yüksek mekanik değerlerinden dolayı, çeşitli makine parçalarında ve motor parçalarında, dövme parçalarında, çeşitli somun, cıvata gibi bağlantı elemanlarında, krank millerinde, akslarda, tahrik parçalarında ve piston kollarında, çeşitli millerde, dişliler gibi parçaların imalinde kullanılmak olmak üzere geniş bir alana sahiptirler.

Dolayısıyla; ıslah sınıf çelikleri inşaat ve düşük karbonlu alaşımsız çeliklerden sonra, en çok üretilen ve her alanda kullanılan çelik sınıfıdır (Bargel, 1987).

Demir cevherinin impuritelerinden arındırılması sonucunda üretilen çelik bir demir-karbon alaşımıdır. Çelik bir yapı malzemesidir ve mekanik özelliklerinde elde edilen değerler çeliğin kullanım yerine göre bilhassa önem taşır. Maliyetinin düşük olması, mekanik özelliklerinin iyi olması, işlenebilir, kaynak edilebilir olması, demir cevherinin doğada bolca bulunabilmesi, değişik alaşım elementleri takviyesi ve değişik ısı işlemleri sayesinde pek çok değişik özellikler elde edilmesi çeliğin yaygın olarak kullanılmasını sağlamıştır (Topbaş, 1998). Ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösteren önemli göstergelerden birisi de yıllık kişi başına tüketilen çelik miktarıdır.

Çelik alaşım elementlerine de bağlı olarak 1538°C de erir. Maksimum %2,06 karbon çözünürlüğüne sahiptir (Eker, 2008). Doğada bulunan demir cevherinin oksit tabakalarından arındırılması, impuritelerinin giderilmesi (safsızlaştırılması) ile üretilir. Bu üretim sırasında uygulanan işlemler neticesinde içerisinde belli oranlarda karbon, kükürt, fosfor, mangan ve silisyum elementleri içerir. Bu elementlerin üretim esnasında oranları azaltılabilir, artırılabilir, bunun yanı sıra krom, nikel, molibden, vanadyum gibi çeşitli alaşım elementleri de ilave edilebilir. Neticede karbon ve diğer alaşım elementlerinin ilavesiyle çeliğe pek çok değişik özellikler kazandırılabilir.

Karbonun çözünme miktarı aynı zamanda çeliğin kristal kafes yapısını belirler. Yani çelik allotropik bir metaldir. Allotropi, bazı metallerin farklı sıcaklıklarda farklı kristal kafes yapılarına sahip olmaları anlamına gelir.

Çelikte demir ve karbon oranına, sıcaklık değerine ve soğuma hızına bağlı olarak farklı fazlar elde edebilme özelliği de mevcuttur. Ayrıca çelikteki farklı sıcaklıklarda elde edilen fazların mekanik özellikleri de birbirlerine göre farklıdır. Buradan hareketle çeliğin mekanik özelliklerin tespitinde en önemli unsurlar alaşım elementlerinin ve karbonun ne oranlarda olduğu, kuşkusuz ısı işlem ve soğuma hızıdır (Demirci, 2004).

Çelik vd. (2006), çalışmalarında çeliğin içerisinde bulunan alaşım elementlerinin sertleşebilirliğe ve sertleşme derinliğine etkisi çalışmalarında, Ç1040 ve Ç1050 karbon çelikleri ile 8620 ve 4140 alaşım çelikleri seçerek östenitleme sıcaklıkları belirlenmiş ve su verilerek sertleştirme işlemi (jominy deneyi)

yapmışlardır. Deneylerden sonra numunelerin HRC sertlik ölçümleri yapmış ve bu veriler ışığı altında sertleştirilmiş alın yüzeyden itibaren sertleşme derinliklerini tespit etmişlerdir. Elde edilen bu sonuç ve çizilen grafiklere göre sertleşebilirlik ve sertleşme derinlikleri irdelenerek alaşım elementlerinin etkisini incelemişlerdir. Yapılan deneysel işlemler sonucunda, Karbon çelikleri (1040-1050) içinde ihtiva eden karbon miktarının artmasıyla sertleşebilirliği artan ve sertleşme derinliği düşük olan çelikler olduğu, alaşım ihtiva eden çelikleri (8620 – 4140) ise içindeki alaşım elementlerinin katkısıyla ısı iletkenlikleri yüksek olduğundan, sertleşebilirliklerinin yüksek ve sertleşme derinliği fazla olan çelikler olduğu ifade etmişlerdir. Malzeme içerisindeki alaşım elementi miktarı arttıkça, sertleşebilirlikleri ve sertlik derinliklerinin arttığı sonucuna varmışlardır.

2.1. Çeliklerin Sınıflandırılması

Çelikler, temel olarak karbonlu-alaşimsız çelikler ve karbonlu alaşımlı çelikler olarak ikiye ayrılabilir. Alaşimsız karbonlu çeliklerde temel olarak, düşük karbon ihtiva eden çelikler, orta karbon ihtiva eden çelikler ve yüksek karbon ihtiva eden çelikler olarak 3'e ayrılabilir. Alaşımlı çelikler de genel olarak az alaşımlı çelikler, otomat çelikleri ve yüksek alaşımlı çelikler olmak üzere 3'e ayrılabilir. (Serfiçeli, 2000)

2.1.1. Alaşimsız Çelikler

2.1.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

Düşük karbon ihtiva eden çelikler maksimum %0,30 oranında karbon içeren ve içeriğinde az miktarda da Si, Mn, P ve S bulunduran çeliklerdir. Dayanımın yüksek olması gerekmediği iş parçalarında kullanılır. Kaynak prosesine, plastik şekil vermeye elverişlidir. Fakat karbon oranının az olması sebebiyle ısı ışıleme çok uygun değildir.

2.1.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Orta karbon ihtiva eden çeliklerin karbon oranı %0,30 ile %0,60 arasındadır. Karbon miktarı düşük karbonlu çeliklere göre daha yüksek olmasına rağmen; soğuk şekillendirme ve kaynak prosesi yeteneğinde düşme görülmesine karşılık su verilip sertleştirme yeteneği büyük oranda artmıştır. Bu sebeple orta karbonlu çeliklerin yapı

ve özellikleri ısıtıl işlemle büyük oranda değiştirilebilir. Bu çeliklerden genel dövme çelikleri %0,3-0,4 arasında, mil çelikleri %0,4-0,5 arasında ve aşınmaya dayanımı yüksek olan çelikler ise %0,5-0,6 arasında karbon içermektedir. Orta karbonlu makinalarda, otomotiv parçalarında (mil, aks, dişli) ve demiryollarında ray ve ray tekerleği olarak yaygın oranda kullanılır.

2.1.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler:

Yüksek karbon ihtiva eden çeliklerin karbon oranı %0,6 ile %0,9 karbon içeren çeliklerdir. Yüksek mukavemet değeri ve aşınma dayanımı istenen iş parçalarında kullanılır. Yüksek karbonlu çelikler genel olarak imalat aşamasından sonra ısıtıl işleme tabi tutulurlar.

2.1.2. Alaşımli Çelikler:

Yüksek dayanım, yüksek mukavemet, yüksek aşınma dayanımı ve yüksek korozyon dayanımına ihtiyaç olan iş parçalarında genel olarak alaşımli çelikler kullanılır. Krom, Vanadyum, Molibden ve mangan gibi elementler alaşımli çeliklerde oldukça popülerdir. Alaşımli çeliklerin korozyon direnci yetersizdir (Serfiçeli, 1999)

Bununla birlikte alaşımli çeliklerin sertleşme yeteneği yeterli olmadığından; alaşımli çeliklerden üretilen iş parçalarının mukavemet değerini istenen seviyeye çıkarmak mümkün değildir. Alaşımli çeliklerin sertleşme derinlik alma kabiliyeti iyi değildir. Ayrıca ısıtıl işlem ile sertleştirilen çelikler, kafes yapısının çarpılmış (bozulmuş) olması ve yüksek gerilimden dolayı gevrek davranış göstermektedir. Gevrek davranışın azaltılması başka bir deyim ile tokluğunun artırılması amacıyla çeliğe menevişleme prosesi uygulanmaktadır (Eker 2008).

2.1.2.1. Alaşım Elementlerinin Çeliğe Etkileri

Başta belirtildiği üzere çelik bir demir-karbon alaşımıdır ve de üretimi esnasındaki kimyasal etkilerden ötürü de belirli oranda kükürt, fosfor, silisyum ve mangan ihtiva eder. Çeşitli alaşım elementleri de ilave edilerek çeliğe bazı ilave özellikler kazandırılabilir. Ayrıca bazı alaşım elementleri bazı mekanik özelliklerde önemli iyileştirmeler sağlamaktadır.

Alaşım elementlerinin temel amaçları; sertleşme kabiliyeti ve sertleşme derinliğini arttırmak, sertlik, mukavemet ve tokluğu arttırmak, yüksek sıcaklıklarda sertliği muhafaza etmeyi sağlamak, düşük ve yüksek sıcaklıklarda mekanik özellikleri iyileştirmek, korozyon direncini arttırmak ve manyetik özellikleri iyileştirmek olarak görülebilir (Eker, 2008; Erişir, 2013).

Tabloda eliğin alaşımlamasında kullanılan bütün alaşım elementleri ve bunların yanında da elik içerisinde bulunabilecek katkı elementlerin çeliğin mekanik özellikleri, kaynaklanabilirlik, talaşlı işlenebilirlik üzerine meydana getirebileceği olumlu veya olumsuz etkiler izelge halinde gösterilmiştir.



Tablo 2.1 Alaşım ve Katı Elementleri (Steel, 2021)

	Si	Ma	Cr	Ni	Al	W	V	Co	Mo	S	P
Sertlik	Artar	Azalır	Artar	Azalır	-	Artar	Artar	Artar	Artar	-	Artar
Mukavemet	Artar	Artar	Artar	Artar	-	Artar	Artar	Artar	Artar	-	Artar
Akma Noktası	Artar	Azalır	Artar	Azalır	-	Artar	Artar	Artar	Artar	-	Artar
Uzaman	Azalır	Azalır	Azalır	Artar	-	Azalır	-	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır
Kesit Büzülmesi	-	-	Azalır	Artar	-	Azalır	-	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır
Darbe Direnci	Azalır	-	Azalır	Artar	Azalır	-	Artar	Azalır	Artar	Azalır	Azalır
Elastisite	Artar	-	Artar	-	Azalır	-	Artar	-	-	-	-
Sıcaklığa Dayanım	Artar	-	Artar	Artar	-	Artar	Artar	Artar	Artar	-	-

Tablo 2.1. (Devamı)

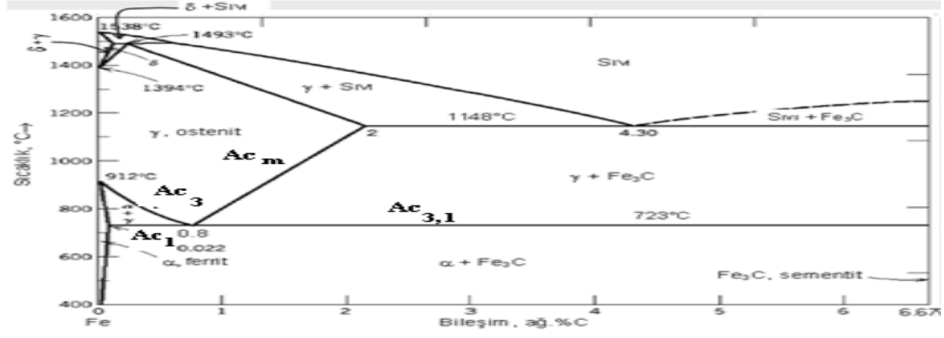
Soğutma Hızı	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	-	Azalır	Azalır	Artar	Azalır	-	-
Karbür Oluşumu	Azalır	-	Artar	-	-	Artar	Artar	-	Artar	-	-
Aşınma Direnci	Azalır	-	Artar	-	-	Artar	Artar	Artar	Artar	-	-
Dövünelirlik	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Artar	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır
İşlenebilirlik	Azalır	Azalır	-	Azalır	-	Azalır	-	Değişmez	Azalır	Artar	Azalır
Oksitlenme Eğilimi	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Azalır	Artar	-	Azalır
Korozyon Direnci	-	-	Azalır	Artar	-	-	Artar	-	-	Azalır	Artar

2.2. Isıl İşlemin Temelleri

Isıl işlem, genelde metal ve alaşımlarında istenen özellikleri elde etmek için proses edilen; kontrollü ısıtma ve kontrollü soğutma olarak tanımlanır. Çelik malzemelere uygulanan ısıl işlemin temel amaçları aşağıdaki verilmiştir.

- Plastik şekil verme sonrası kalıntı gerilimleri gidermek,
- Talaşlı işlenebilirliği iyileştirmek,
- Mekanik ve fiziksel özellikleri iyileştirmek,
- Sertlik değerini ve darbe dayanımını iyileştirmek,
- Elektriksel ve manyetik özellikleri geliştirmek,
- Tanecik yapısını değiştirmek

Şekil 1.2’de gösterilen Fe-Fe₃C (demir-karbon) diyagramı ısıl işlemin türünü ve neticelerini gösteren temel diyagramdır. Çünkü çeliğin sertleşme miktarını belirleyen temel element karbondur. Fe-Fe₃C (demir-karbon) diyagramı esas alınarak teknik ısıl işlem yöntemleri, dönüşümün etkili olmadığı ısıl işlemler ve dönüşüme bağımlı ısıl işlemler halinde iki ana gruba ayrılmaktadır (Harman, 2003).



Şekil 2.1 Demir sementit (fe-fe₃c) denge diyagramı (Baylan, 2015)

Birinci grupta, demir olmayan diğer metallerde de kullanılabilen, bileşim farklılıklarının dengelenmesi için difüzyon tavlama, soğuk şekillendirmeyle yükselmiş olan dayanımın ve sertlik değerinin giderilmesi için yeniden kristallenme tavlama, iç gerilmelerin azaltılması için gerilme giderme tavlama işlemleri sayılabilir. Bu gruptaki ısı işlemlerin hiçbirinde malzeme östenitleme sıcaklığına kadar çıkartılıp kristal kafes yapısı değiştirilmez, sadece tane irileşmesi sağlanabilir veya tanelerin yeniden düzene girmesi sağlanabilir, çeliğin sertliğinde bir artış meydana getirmez. Bu grupta olan ısı işlemlerde östenit fazına geçilmediği görülmektedir (Sert, 2008)

Çelikler için daha önemli olan ikinci grupta ise, normalizasyon tavlama, sertleştirme (martenzit fazı elde etme) ve menevişleme işlemleri söylenebilir. Bu tip ısı işlemlerin hepsinde ısı işlem östenitleştirme işlemi ile başlar. Bu da östenitleme için gereken dönüşüm sıcaklığının üzerindeki sıcaklığa çıkartmak ile mümkündür. Östenit yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip bir fazdır, dönüşümü değişik soğutma hızları sayesinde farklı kristal kafes yapıları elde edilebilecek şekildedir, bu da farklı sertlik ve tokluk değerleri elde etmemizi sağlar, meneviş işlemi ile toklukta ilave artışlar da sağlanabilir.

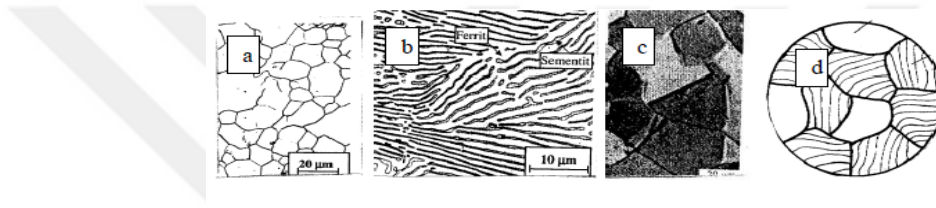
Buradan anlaşılacağı üzere yalnızca östenitleştirmeyle çeliğin kristal kafes ve tane yapısı değişmektedir. Ancak östenitleme sıcaklığının çok fazla üzeri bir sıcaklığa çıkmak durumunda çarpılma, tane büyümesi, oksidasyon gibi problemler oluşabilir. Bu nedenle olabildiğince düşük sıcaklıkta östenitleme istenir (Harman, 2003).

2.2.1. Demir-Sementit Denge Diyagramındaki Temel Fazlar

Faz: Bileşimleri ve kristal kafes yapıları birbirinden farklı olan yapılardır. Fe-Fe₃C denge diyagramındaki temel fazlar şunlardır:

α –Ferrit: Yapı içerisinde C arayer elementi olarak bulunur. Fe-C alaşım sistemindeki en yumuşak fazdır. Çünkü en az C çözünürlüğe sahiptir. En yüksek C çözünürlüğü 723°C’de %0,025 oranında iken 0°C’de %0,005’e kadar düşer. Hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahip olup, şekil alabilen, sünek, manyetik bir fazdır.

Yaklaşık 60 Hv sertlik değerindedir. Çekme dayanımı 270 MPa, kopma uzaması değeri ise %40 civarındadır.



Şekil 2.2 Çeliğin mikro yapısında gözlenen fazlar (Beylan, 2015)

Çeliğin mikroyapısında gözlemlenen fazlar; Ferrit, Perlit, Östenit ve 1060 çeliğinin oda sıcaklığındaki mikroyapısı olarak sıralanmaktadır (Savaşkan, 2009).

γ -Östenit: YMK yapı olan ve kolayca şekillendirilebilen, manyetik olmayan yapıdır. Östenit miktarını arttıran elementler eklenmediği sürece 911°C-1392°C arasında görülebilir. Maksimum karbon çözünürlüğü 1148°C’dedir ve %2’dir. Ferrite fazına göre daha yüksek karbon çözünürlüğindedir. Yüksek tokluk değerine sahip bir fazdır ve dayanımı da diğer fazlara göre daha yüksektir.

δ - Ferrit: HMK yapıya sahiptir, ısıtım işlem uygulamalarında önemli değildir. 1392°C -1538°C aralığında görülür.

Sementit: Bir ara yer bileşiği olup Fe₃C formülüyle gösterilir. Sert bir faz olup, yaklaşık 800 HV sertliğindedir. Çekme dayanımı oldukça düşük olup 35 MPa, basma dayanımı oldukça yüksektir. Döküm malzemelerin işlenmesindeki büyük problem sementit fazının yer yer içermesidir.

Perlit(α +Fe₃C): %0,8 C içeren çeliğin östenit bölgesinden yavaş soğutulması sırasında 723°C’nin altında ötektoid dönüşüm sonucunda meydana gelen yapıdır.

Perlit; birbiri üzerine dizilmiş ferrit ve sementit katmanlarından oluşan lamelli bir yapıya sahiptir. Mikroskopta ferrit beyaz, sementit siyah görünür. C miktarı %0,8'in altına düşükçe östenitleme sıcaklığının altına inildikçe ferrit+perlit beraber oluşur. Karbon miktarı %0,8'in üzerine çıkıldığında ise sementit+perlit beraber oluşur. Dönüşüm sonucunda C oranı %0,8'in altında ise ne kadar perlit ve ferrit, C oranı %0,8'in üzerinde ise ne kadar perlit ve sementit olduğu kaldıraç kuralıyla hesaplanır. Neticede, %C oranı düşükçe ferrit artarken yine % C oranı arttıkça sementit oranı artar.

Ledeburit ($\gamma + \text{Fe}_3\text{C}$): Demir karbon diyagramında %4,3 karbon içeren 1148°C sıcaklıkta ötektik dönüşümle katılaşması sonucunda oluşan bir yapıdır. Sementit ve östenit fazlarını içerir. Sıvı fazın olduğu en düşük sıcaklık 1148°C'dir (Kalpakjian, 2001; Savaşkan, 2009).

2.2.2. Demir-Sementit Denge Diyagramının Yorumlanması

Fe-Fe₃C denge diyagramının yorumlanması hangi C oranında bulunan çeliğin eriyik halden oda sıcaklığına kadar soğuması esnasında hangi dönüşümleri göstereceğini açıklar. Yalnız soğuma hızı da önemlidir. Soğuma hızının etkisi de ZSD diyagramında anlatılmıştır.

Teorik olarak hiç C içermeyen demir 911°C'de dönüşüm gösterirken karbon oranı arttıkça bu dönüşüm sıcaklığı azalır ve %0,8 C' ye ulaşıldığında 723°C'ye kadar düşer. Örneğin %0,3 C oranına sahip olan çelik 1000°C'de γ östenit fazındadır. 820°C'nin altına inildiğinde (Ac₃ çizgisi) karbon atomları yayınarak γ kafesini terk etmeye başlar ve östenit fazının tane sınırlarında karbon çözünabilirliği düşük olan α ferrit fazı oluşmaya başlar. Ferritin karbon çözünabilirliği az olduğu için çözünemeyen karbon da perlit olarak çöker. Böylece demir de HMK yapıya geçmiştir.

Tam %0,8 C oranında ise östenit taneleri tamamen perlite dönüşmüştür. Tamamen perlit içeren dönüşüm 723°C'de %0,8 C oranında meydana gelir. Bu dönüşümde karbon atomları tane sınırından başlayıp, içeri doğru büyüyen sementit lamellerini oluşturacak şekilde bir araya gelir ve lameller arasında karbonca fakir ferrit bölgeleri de oluşur. (Cora, 1999)

2.2.3. Grafit Oluşumu

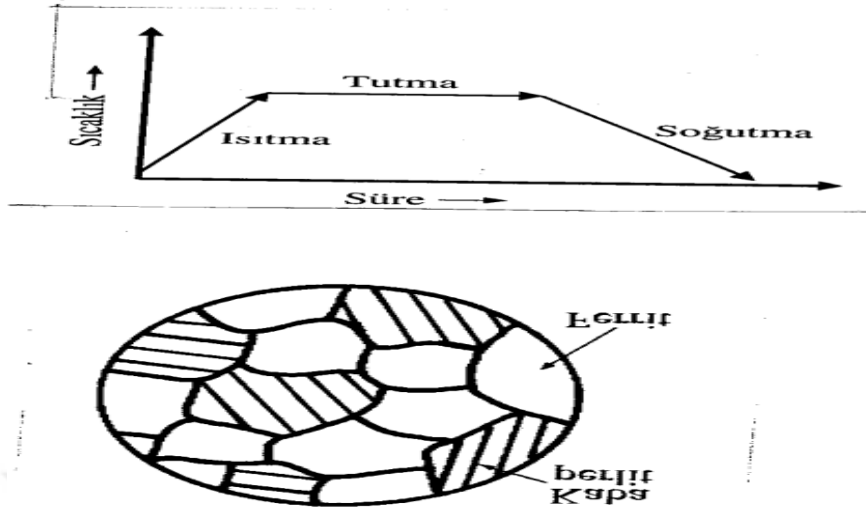
Demir karbon ikili sisteminde karbon yapıdaki silisyum oranına ve soğuma hızına bağlı olarak farklı oluşumlar gösterebilir. Şayet soğuma hızı yavaş ve silisyum miktarı fazlaysa bu karbonun bağımsız grafit şeklinde bulunmasına yol açar. Grafit sadece karbon içeren, hekzagonal kristal kafes yapısına sahip olan siyah renkli, yumuşak bir fazdır. Yağlayıcı amaçlı kullanılır. Silisyum artışı, karbon artışı ve yavaş soğuma grafit oluşumunu tetikler, Fe_3C yerine grafit oluşur. Grafit oldukça yumuşak ve gevrek, lamelli yapıdadır. Çelikte üretimi esnasında C ve Si miktarını sınırladığımız için grafitleşme gözlenmez, dökme demirlerde görülür.

2.3. Çeliğe Uygulanan Isıl İşlemler

2.3.1. Yumuşatma Tavı (Tam tavlama)

Talaşlı imalatı ve soğuk şekillendirme prosesini kolaylaştırmak için çeliğin uygun sıcaklığa kadar ısıtılıp istenen amaç sağlanıncaya kadar bu sıcaklıkta tutulması, sonradan yavaş soğutulması prosesine yumuşatma tavı denmektedir. Yumuşatma tavı iç gerilmeleri azaltmak amacıyla ötektoid altı çeliklerin Ac_3 , ötektoid üstü çelikleri de Ac_1 çizgisinin üzerindeki belirli sıcaklığa kadar ısıtıp, iç yapılarını tamamen östenite dönüştürdükten sonra fırında bekleterek çok daha yavaş bir şekilde soğutma işlemidir. Tam tavlama olarak da isimlendirilen bu işlem sonunda sertlik düşer, süneklik artar. Bu işlemin değişik aşamalarında çelik parçalarda oluşan iç yapılar şöyle özetlenebilir.

- İlk orijinal faz iri ferrit taneleri ve perlit tanelerinden oluşur.
- Ac_1 çizgisinin üzerindeki sıcaklıkta perlit ince taneli östenite dönüşür ve ferrit fazı aynen kalmaktadır.
- Ac_3 çizginin üzerinde bir sıcaklıkta ise yapı artık ince taneli östenite dönüşmektedir.
- İş parçası oda sıcaklığına soğutulduğunda ise (çok yavaş) ince taneli ferrit ve kaba lamelli perlit fazlarını içeren bir içyapı oluşur. (Savaşkan, 2009; Harman, 2003).



Şekil 2.3 Çeliğe uygulanan ısıt işlemler (Callister, 2010)

- Tam tavlama (yumuşatma) ısıt işlemi
- Tam tavlama sonucu oluşan mikroyapı (Savaşkan 2009)

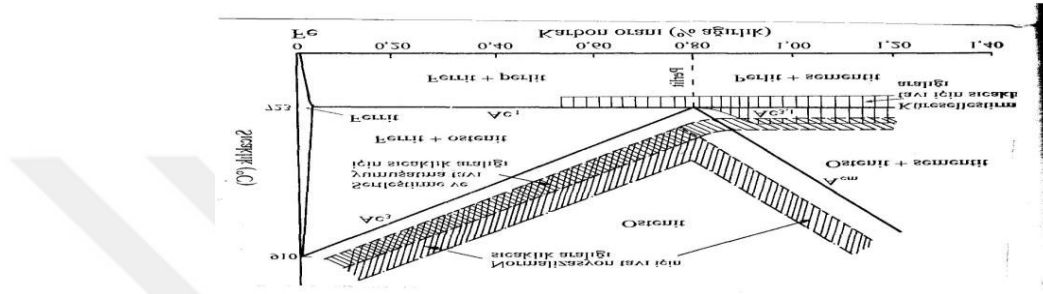
2.3.2. Normalizasyon Tavı

Normalizasyon tavı genel olarak tane boyutlarını inceltmek, homojen bir iç yapı yapmak ve genel olarak mekanik özelliklerin yükseltilmesi amacı ile ötektoid altı çeliklerin A_{c3} ve ötektoid üstü çeliklerin de A_{cm} sıcaklığının 40°C - 50°C üzerindeki sıcaklığa kadar ısıtılıp, tavlama yapıldıktan sonra fırın dışında soğutma işlemi olarak tanımlanabilir.

Normalizasyon tavlamaının amaçları aşağıda özetlenmiştir;

- İnce taneli yapı elde etmek,
- Homojen bir mikro yapı
- Ötektoid üstü çeliklerin tane sınırlarında bulunan karbür ağını dağıtmak,
- Hem talaşlı imalatı kolaylaştırıp hem de mekanik özellikleri iyileştirmek.

Normalizasyon işleminde soğutma fırın dışında yapıldığından soğuma nispeten hızlı olur ve bu da hem östenitin dönüşümünü hem de elde edilen içyapıyı birkaç yönden etkiler. Havada soğuma esnasında ötektoid dışı yapıların oluşumunda yeterli zaman olmadığından normalize tavı uygulanan çelikler yumuşatma tavlmasına kıyasla daha düşük miktarda ötektoid dışı ferrit, ötektoid üstü çeliklerse daha düşük oranda ötektoid dışı sementit içerir. Yumuşatma tavına nazaran sertlik daha fazla süneklik daha azdır, maliyet daha düşüktür (Savaşkan, 2009; Harman, 2003).



Şekil 2.4 Normalizasyon, tam tavlama ve küreselleştirme için önerilen tavlama sıcaklığı (Callister, 2010)

2.3.3. Gerilme Giderme Tavlama

Parçalarda mevcut olan iç gerilmeleri azaltmak için yapılır. Döküm, kaynak, sertleştirme ısıl işlemi, plastik şekillendirme gibi işlemler iç gerilmelere neden olur. Dönüşüm sıcaklığının altında uygun bir sıcaklığa kadar ısıtma sonra da yavaş bir şekilde soğutma olayıdır.

Genellikle düşük ve orta karbonlu çelikler için 550°C-650°C arası alaşımlı çelikler için bunun biraz üzeri 600°C-700°C arası sıcaklıkta tavlama gerilme giderme için önerilir. Genellikle kalın parçalarda 300°C'ye kadar fırında sonra havada, ince parçalarda ise 500°C'ye kadar fırında sonra havada soğutulması önerilir, çünkü kalın parçalarda yüzey merkez arası iç gerilmeler biraz daha fazla olduğundan süneklik artırılmaya çalışılmalıdır.

Sıcaklık tayininde de amaç dönüşüm sıcaklığının altında tutmak, fakat mümkün olabildiğince iç gerilmeleri azaltabilecek kadar yüksek sıcaklıkta yeterince sürede tavlama (Egan, 1991).

2.3.4. Yeniden Kristalleştirme Tavlama

Yeniden kristalleştirme tavlama ile soğuk deformasyonla meydana gelen pekleşme giderilmekte ve malzeme orijinal özelliklerini geri kazanabilmektedir. Yeniden kristallenme belli bir sıcaklık aralığında meydana gelir. Bu sıcaklık artan şekil değiştirme oranı ile azalır. Çeliklerde bu sıcaklık 600°C-700°C aralığındadır.

Yeniden kristallenmenin olabilmesi belli bir kuluçka dönemi olması gerekmektedir. Bu zaman zarfında yeniden kristallenmenin olması için gerekli enerji depo edilir. Yeterli enerji sağlanınca yeniden kristallenme başlar. Yeniden kristallenme sonucunda, malzeme önceki özelliklerini tekrar kazanır ve ayrıca daha ince taneli bir yapı elde edilir. Yeniden kristallenmede ihtiyaçtan daha düşük sıcaklıklarda tavlama yapılırsa, bu daha önce bahsedilen gerilme giderme tavlama halini alır, bu da malzemenin tane yapısını değiştirmez sadece kalıntı gerilmeleri azaltır. Yeniden kristalleştirme tavlamasında tavlama sıcaklığı ve süresi arttıkça süneklik artarken mukavemet ve sertlik azalır (Savaşkan, 2009).

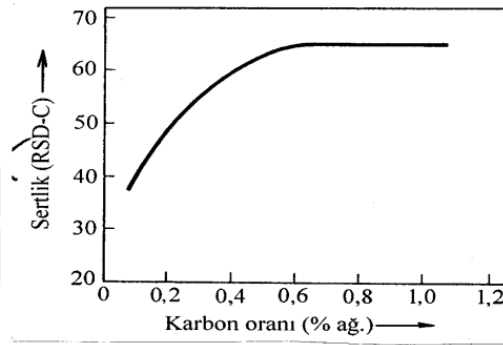
2.3.5. Su Verme Sertleştirme

2.3.5.1. Martenzitik Dönüşüm

Östenitleme sıcaklığına kadar yapılan tavlama sonucunda çelik yavaş veya orta hızla soğutulursa, östenit yapıda çözünmüş olan karbon atomları difüzyon ile östenit yapıdan ayrılırlar. Bunun sonucunda da HMK yapıya sahip olan α fazı oluşur. Soğuma hızı arttırılıp, belli değerin üzerine çıkartıldığında ise, karbon atomlarının difüzyonla katı çözümlerden ayrılacak yeterli vakit bulamazlar. Karbon atomları çözelti içerisinde hapsedildiklerinden HMK yapıya dönüşmezler ve farklı bir yapı oluşur. Bu yapı hacim merkezli tetragonaldir (HMT) ve martenzit adı verilir. Martenzit çok yüksek sertliğe sahiptir. Kafes yapısı distorsiyona uğramıştır. Süneklik yani şekil verme kabiliyeti oldukça düşüktür Kafes yapısının bozulması dislokasyon hareketini zorlaştırarak veya engelleyerek sertlik ve mukavemeti büyük ölçüde arttırır. Martenzit fazı mikroskop altında iğne biçiminde gözükür (Krauss, 1999).

Martenzit dönüşümle ilgili değinilecek diğer hususlar, martenzitik dönüşüm yalnız soğuma ile meydana gelir ve soğuma engellenirse dönüşüm sona erer. Soğuma hızı azalırsa kalıntı östenit miktarı artar, sertlik düşer. Martenzitin sertliği C oranına bağlıdır. Şekil 1.4' de görüleceği üzere C oranı arttıkça sertlik artar. C oranı belli bir değeri aştıktan sonra lineer artıştan sapmasının nedeni yüksek karbon ihtiva eden

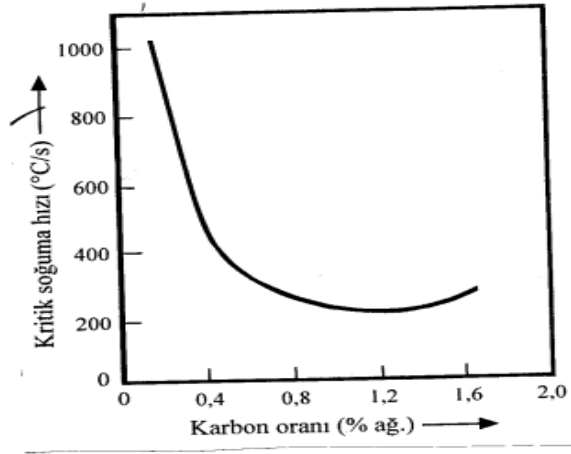
eliklerde kalıntı östenit fazı oluşma ihtimalinin artmasından kaynaklanmaktadır. (Savaşkan, 2009).



şekil 2.5 Martenzit sertliği (Savaşkan, 2009)

2.3.5.2. Kritik Soğuma Hızı

Çelikte ne kadar sertlik elde edilebileceği ne kadar martenzit fazı elde edilebileceğine bağlıdır. Tamamen martenzit elde edebilmek için malzemelerin tavlama işleminden sonra, kritik soğuma hızı değerinden daha yüksek hızla soğutulması gerekir. Kritik soğuma hızı; sadece martenzitik bir faz elde etmek için gerekli en düşük soğuma hızıdır. Kritik soğuma hızı; karbon, diğer alaşım elementleri ve östenitin tane büyüklüğüne bağlıdır. Düşük karbonlu çeliklerin kritik soğuma hızı çok yüksektir. şekil 1.5 kritik soğuma hızı ve C oranı arasındaki ilişki görülmektedir (Savaşkan, 2009).



Şekil 2.6 Karbon oranına göre çeliğin soğuma hızı (Callister, 2010)

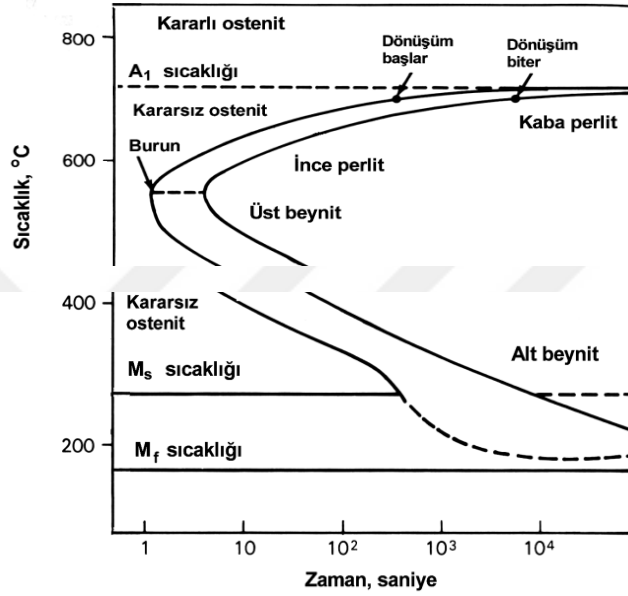
2.3.5.3. Zaman Sıcaklık Dönüşüm Diyagramı

Fe-Fe₃C denge diyagramı adı üstünde denge koşullarını inceleyebilen bir diyagramdır. Östenitin dönüşüm süresi oluşan dönüşüm ürünlerinde ve neticede oluşan çeliğin mekanik özelliklerinde önemli etkisi vardır. Bu da ancak östenitin Ac₁ çizgisinin altındaki herhangi bir sıcaklıkta ne zaman dönüşmeye başlayacağı, dönüşümün ne kadar sürede tamamlanacağı ve sonuçta hangi ürünlerin oluşacağını bilinmesiyle mümkündür. Bunun için de zaman sıcaklık dönüşüm diyagramından faydalanılır (Özsaraç, 2012).

Şekil 1.6'da %0,8 C içeren çeliğin ZSD (Zaman Sıcaklık Dönüşüm) diyagramı görülmektedir. Çeliğin karbon oranının değişmesi diyagramı da değiştirecektir. Burada ilk eğri dönüşümün başladığı, ikinci eğri de dönüşümün bittiği egridir. Martenzitik dönüşümünün başladığı ve bittiği çizgi Ms ve Mf olarak yatay çizgilerle belirtilmiştir. Grafik yorumlanırsa, iki eğri arasındaki bölgede dönüşüm kısmen oluşmuş kısmen tamamlanmamıştır. Buradan da görüleceği üzere bu eğri belirli bir sıcaklıkta sıcaklık eksenine yaklaşmaktadır. En yakın olduğu bu bölgeye perlit burnu denir, bu burun su verilirken soğutulması gereken en yavaş hızı belirler. Diyagramın burun kısmının üstündeki bölgede oluşan ürünün perlit olduğu anlaşılmaktadır. İzotermal dönüşüm sonucunda oluşan perlitin inceliği (lameller arası uzaklık) ve malzemenin sertliği dönüşüm sıcaklığına bağlıdır. Örneğin Ac₁ dönüşüm sıcaklığının hemen altındaki meydana gelebilecek bir dönüşümde perlit lamelleri arası mesafe fazla (kaba perlit) ve malzeme yumuşak ve sünekken, dönüşüm

sıcaklığı düştükçe perlit lamelleri arası mesafe az ve malzeme daha serttir (Savaşkan, 2009).

Perlit burnunun altındaki ve martenzitik dönüşümün üstündeki sıcaklıkta dönüşüm meydana gelirse, ferrit matrisleri içerisine dağılmış olan sementitlerden oluşan bir yapı meydana gelir. Bu yapıya Beynit adı verilmiştir. Beynit perlitten daha sert martenzitten ise daha yumuşaktır (Savaşkan, 2009).



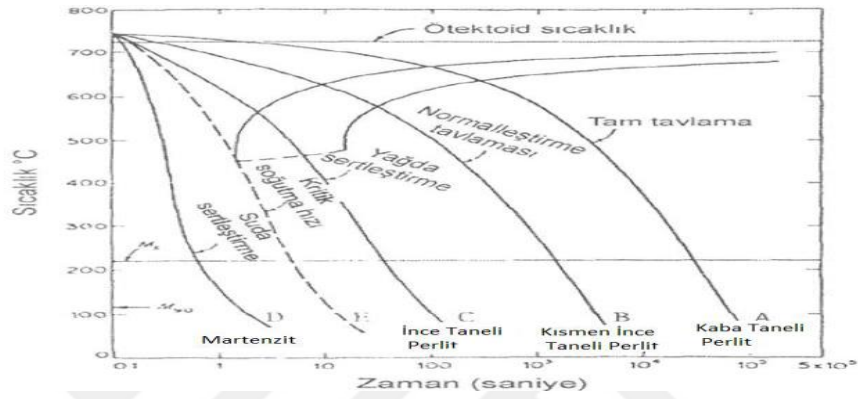
Şekil 2.7 Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı (Callister, 2010)

2.3.5.4. Soğuma Eğrileri

Soğuma eğrileri malzeme sıcaklık değerinin soğuma süresine göre değişimini göstermektedir. Dolayısıyla bu eğriler değişik soğuma sürelerinde malzemelerin dönüşüm sıcaklığı ölçülerek çizilirler. Şekil 1.7’de kaba perlite giden 1 numaralı eğri tipik bir yumuşatma tavına ait bir soğuma eğrisini göstermektedir. Görüleceği üzere çeliğin yapısı uzun süre östenit olarak kalmaktadır. Dönüşüm tamamlandıktan sonra da yapı kaba taneli perlitik yapıdır.

Orta perlite (kısmen ince taneli) giden 2 numaralı eğri ise tipik bir normalizasyon tavlama sürecini göstermektedir. Dönüşümün başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki sıcaklık farkı yumuşatma tavına nazaran daha fazla olduğundan çok daha az oranda kaba perlitik kısmen ince taneli yapı içermektedir. İnce perlite giden 3 numaralı eğri ise tipik yağda soğumayı gösteren eğridir. Sonucunda da ince taneli

perlitik yapı oluşur. Bir altındaki 4 numaralı eğri ise kritik soğuma eğrisini temsil eder, bu eğrinin eğimi kritik soğuma hızıdır. Bu hızdan daha düşük soğuma hızlarını gösteren 3 numaralı gibi eğrilerde burun bölgesi eğriyi kestiği için yapı tam olarak martenzite dönüştürülemez. Fakat 4 numaralı eğrinin altında gösterildiği üzere daha hızlı soğuma hızı elde edilirse örneğin suda soğutmayla erişilen 5 numaralı eğri gibi olduğu durumlarda ancak yapı tamamen martenzit haline getirilebilir (Savaşkan, 2009).



Şekil 2.8 Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı (Callister, 2010)

2.3.5.5. ZSD Eğrilerinin Durumunu Etkileyen Faktörler

ZSD diyagramına ait eğrileri sadece 2 faktör etkiler. Birincisi kimyasal bileşim diğeri ise östenitin tane büyüklüğüdür. Karbon oranı, alaşım elementi miktarı ve östenitin tane büyüklüğü arttıkça ZSD diyagramına ait eğriler sağa doğru kayar. Diyagramdaki eğrilerin sağa doğru kayması demek kritik soğuma hızının azalması yani martenzit yapı oluşumunun kolaylaşması demektir.

Lakin alaşım elementlerinin her birisinin yaptıkları etki farklıdır yani sağa kaydırma miktarı farklıdır. Başlıca V, Mo, Cr, Mn sağa kaydıran elementlerdir. Demir gibi HMK yapıya sahip olan Co ise sağa kaydırmada etki oluşturmaz. Alaşım elementlerinin bu yaptıkları etki sertleşme derinliğinin de artmasına sebep olur (Savaşkan 2009).

2.3.5.6. Su Vermede Isı Transferi

Östenitlenen çeliğin soğuması sırasında meydana gelen ısı transferi termodinamiğin birinci yasasıyla açıklanabilir. Burada soğutma ortamında yüzeyde

ısı transferi meydana gelir. Yüzey alanıyla doğru orantılıdır. Malzemenin su verilerek soğutulması esnasında iletim ve taşınım mekanizmaları geçerlidir.

İletim; Fourier yasasıdır, birim zaman içinde tabaka boyunca mevcut olan ısı akısının, sıcaklık farklarının gradyanına olan oranıdır. Fourier kanunla kapalı şekilde bulunan orantı sabiti ısı iletim katsayısı (k) adını alır. İletimle geçen ısı denklemi aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$QX = -k.A.(dT/dx)$$

Katı bir yüzeyde ve katı yüzeye komşu olan hareketli gaz veya sıvı halde olan akışkan arasında gerçekleşen ısı transferi şekline taşınım ile olan ısı transferi denir. Taşınım, içinde hem iletimden hem de akışkan hareketinden meydana gelen bileşik etkileri içerir. Taşınım ile meydana gelen ısı transfer hızı “Newton Soğuma Yasası” olarak bilinir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q_{taş} = h.A.(T_s - T_{\infty})$$

Yüzey ve akışkan sıcaklıkları arasındaki fark ($T_s - T_{\infty}$) şeklinde ifade edilir. Bu ifade Newton’ un Soğuma Yasası olarak bilinir ve h ($W/m^2.K$), ısı taşınım katsayısı olarak adlandırılır. Isı transferi sırasında tıpkı elektrik devresinde olduğu gibi bir termal direnç oluşur. Denklem;

$$R_{tot} = \sum R_t = \Delta T/q = 1/(U.A) \quad (2.1)$$

$$U = 1/(R_{tot}.A) = 1/((1/h_1) + (l/k_1)) \quad (2.2)$$

Olarak ifade edilir.

Termal direnç olayı malzemenin soğuması esnasında meydana gelir. Bunun yüzünden malzemenin merkezinde olan soğutma hızı parçanın yüzeyine nazaran düşüktür. Çünkü malzemenin merkezinde bir iletim direnci meydana gelir. Bu da malzemenin merkezinin sertliğinin malzemenin yüzeyine nazaran daha düşük olmasına neden olur. Kalın kesitli parçalarda iletim direncinde yer alan l değeri arttığından merkez ile yüzey arasındaki soğuma hızı farkı artar bu da merkezdeki sertliğin daha fazla düşmesine neden olur (Çakır, 2008).

Ayrıca su verme işlemi sırasında ısı transferi mekanizması incelenirse; Öncelikle malzemenin sıcaklığının çok yüksek olması sebebiyle su verme ortamı buharlaşarak malzemelerin üzerinde ince bir buhar filmi tabakası oluşturur. Bu da

ilave bir taşınım direncinin oluşmasını sağlar. Bu yüzden yüksek sıcaklıklarda soğuma hızı nispeten düşüktür, fakat sıcaklık azaldıkça buhar filmi tabakası kırılır ve parça yüzeyi direkt olarak soğutucu ortamın taşınım şeklinde ısı transferine maruz kalır ve bu yüzden malzemenin sıcaklığı hızla düşer, fakat daha sonra malzemenin sıcaklığı hızla azaldığından sıcaklık gradyanı azalmıştır ve bu yüzden soğuma hızı azalır (Savaşkan, 2009).

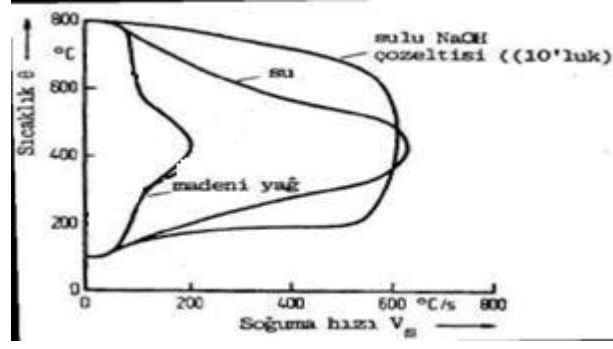
2.3.5.7. Su Verme Ortamları

Hızlı soğuma ortamında hem ısıl daralma hem de martenzitin fazı özelliğinden dolayı hacim artışı meydana getirir ki bu da çeliğin çarpılmasına (kafes yapısının bozulması) neden olur. Çarpılma riski alaşımlı çeliklerde daha fazladır, bu yüzden alaşımlı çelikler yavaş soğutma ortamlarında soğutulur.

Belli başlı soğutma ortamları;

- Musluk suyu
- %10 NaCl içeren tuzlu su
- Yağ-su karışımı
- Yağ
- Hava (Ancak yüksek alaşımlı çeliklerin sertleştirilmesinde)

Suya %10 oranında NaCl ilavesiyle buhar filmini azaltarak 600°C civarında en hızlı soğumanın oluşmasını sağlar bu da hızlı soğuma (ısıl daralma) ve martenzitik dönüşüm (hacim artışı) zamanını biraz ayırıştırarak çatlama ve çarpılma riskini biraz azaltır. Geleneksel olarak yağ ortamının kullanılması durumunda soğutma ortamının 40°C -70°C arasında olması önerilir. Çünkü yağın viskozitesinin sürekli kontrol altında tutulması gerekmektedir. Banyo sıcaklığı arttıkça yağın viskozitesi azalır, bu da ısı taşınım katsayısının ve soğuma hızının artmasına neden olur. Şekil 2.9'da ısı transferi sonucunda meydana gelen soğuma hızının farklı soğutma ortamlarında oluşumu görülmektedir (Savaşkan, 2009; Tutar, 2011).

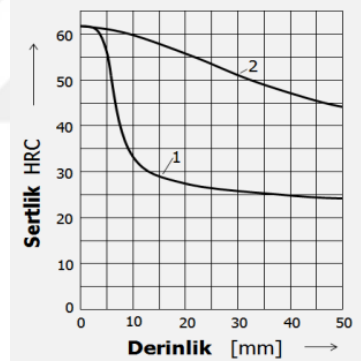


Şekil 2.9: Isı transferi sonucu meydana gelen soğutma hızının farklı soğutma ortamlarında oluşumu (Callister, 2010)

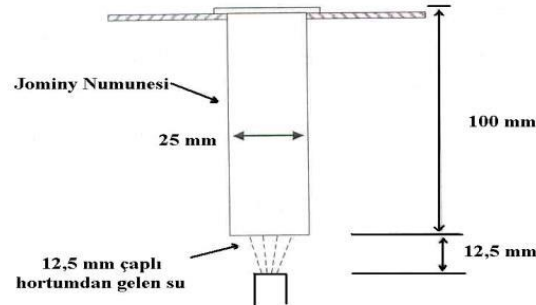
2.3.5.8. Sertleşebilirlik

Sertleşebilen tüm çeliklerde kesit sertleştirildiğinde, çeliğin yüzeyinde ulaşılabilir sertlik değerlerini ayrıca yüzeyden beri malzemenin merkezine doğru sertlik değerlerinin ne olacağını bilmek istenir. Yüzeyde ulaşılabilir sertlik değerlerinin ve sertliğin kesitteki değerlerine, “sertleşebilirlik” denmektedir. Çelik yüzeyinde ulaşılabilir sertlik değerinin, çeliğin ihtiva ettiği karbon miktarına, östenitleştirme sonrası soğutma miktarına bağlı olarak teşekkül eden martenzite bağlıdır. Çeliğin yüzeyinin soğutma hızı değeri, mevcut çeliğin üst kritik soğutma hızından daha büyük değerdeyse, çeliğin yüzeyinde ulaşılabilir sertlik değerinin sadece mevcut çeliğin içerdiği karbon miktarına bağlıdır

Yüzeyden merkeze gidildiğindeyse ani soğutma işleminde söz konusu yerlerde soğutma hızı kritik soğutma hızından düşük değerlere inildiğinde, mevcut noktalarda tam olarak martenzitik yapıya ulaşamaz. Çünkü ısı transferi sırasında iletim direncinden dolayı yeterli düzeyde değildir (Yıldırım, 1998).



Şekil 2.10:Yüzeyden merkeze doğru meydana gelen sertleşebilirliğin gösterimi (Callister, 2010)

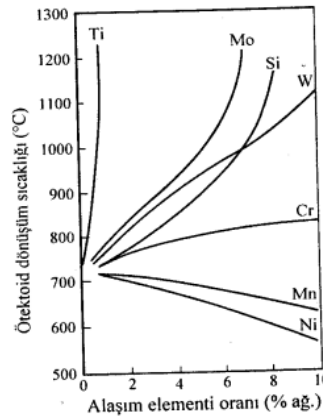


Şekil 2.11:Yüzeyden Merkeze Doğru Meydana Gelen Sertleşebilirliğin Gösterimi (Callister, 2010)

Jominy tarafından geliştirilmiş olan deney yardımıyla sertleşebilirlik ölçülür. Bu yöntemde, Şekil 1.9 b’de görüleceği üzere östenitik hale ısıtılmış silindirik numune, yalnızca alan yüzeyinden su ile ani soğutulur. Daha sonra alın yüzeyinden itibaren çeşitli aralıklı noktalarla sertlik ölçümleri yapılır, bu test de sertleşebilirliğin alaşımsız çeliklerde sertleşebilmenin yetersizliğini kanıtlar (Çelik vd, 2006).

Sertleşme derinliğinin artması alaşım elementlerinin oranı ile doğru orantılıdır. Soğutma yüzeylerinden daha büyük mesafelerde bile sertleşme sağlanmış olur ve aynı mesafelerdeki tam sertleşme için daha düşük soğutma hızları yeterli gelir. Malzeme içeriğindeki alaşım elementleri, malzemedeki difüzyon hızını ve kritik soğuma hızını düşürecektir. Kritik soğuma hızının düşürülmesi de çarpılmaları azaltır, daha düşük soğuma hızlarında bile aynı sertliği elde etmemizi sağlar. Eğer yapı içerisinde yeteri kadar alaşım elementi mevcutsa yağda soğutma yeterlidir. Hatta bazı süper alaşımlı çeliklerde havada soğutma bile yeterli olur. H13 çeliği bu duruma örnek verilebilir.

Bunun yanında Mn, Cr, W, Mo, V ve Ti karbür oluşturu elementlerdir. Ferrit içerisine karbür olarak çökelerek çeliğin sertlik ve mukavemetini hayli artırır. Ayrıca alaşım elementleri östenitleştirme sıcaklığının değişmesine de neden olur. Bu da gerekli tavlama sıcaklığının değişmesine neden olur. Şekil 2.12’de alaşım elementlerinin yüzdesel olarak arttıkça ötektoid sıcaklığının değişimi görülmektedir. Mn ve Ni dönüşüm sıcaklığını düşürecek şekilde bir davranış gösterir. Ni ve Mn sayesinde daha düşük sıcaklıklarda östenit yapı elde edebilir. Ti, Mo, Si, W, Cr ise östenit bölgesini daraltır (Savaşkan, 2009).



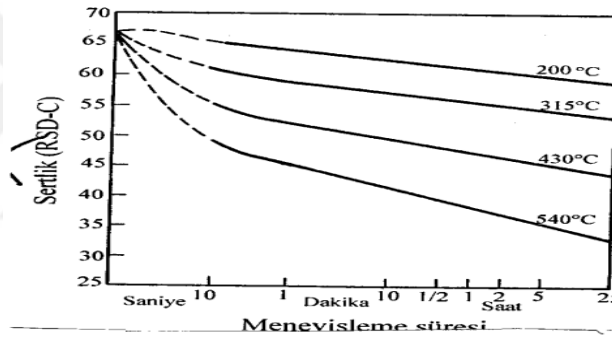
Şekil 2.12: Alaşım elementlerinin östenit dönüşümüne etkisi (TBMMOB, 2020)



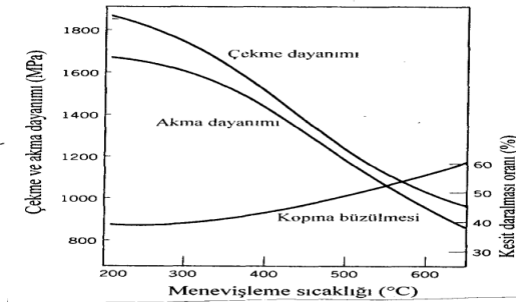
2.3.6. Menevişleme (Temperleme)

Çeliklere su verme ile elde edilen martenzitik yapı çok sert ve gevrektrir. Ayrıca martenzitik dönüşüm çelik içerisinde iç gerilmeler meydana getirir. Bu nedenle bu malzemeler pek çok mühendislik uygulaması için elverişli değildir. Sertleştirilmiş olan bu çelikler genellikle A_{c1} sıcaklığının altında tavlanylrlar. Amaç gevrekliği gidermek ve tokluğu arttırmaktır. Bu tavlama işlemine menevişleme denir.

Bu işlemde çelik belli bir sıcaklıkta menevişlendikten sonra havada soğutulur. Bunun sonunda sertlikte biraz düşme meydana gelse de süneklik ve tokluk artar. Menevişleme sıcaklığı ve süresi arttıkça çeliğin sertliği azalır. Şekil 1.12’de menevişleme yapılması sonucunda meydana gelen mekanik özelliklerde değişim ve menevişleme sıcaklığı ve süresinin sertliğe olan etkisi görülmektedir. (Savaşkan 2009).



Şekil 2.13: Menevişleme Sonucu Mekanik Özelliklerde Değişim (Callister, 2010)



Şekil 2.14: Menevişleme sıcaklığı ve süresinin sertliğe olan etkisi (Callister, 2010)

3. İNDÜKSİYONLA YÜZEY SERTLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ

İndüksiyonla ısıtmanın tanımı, manyetik alan (elektriksele kondüktörlerin meydana getirdiğı) içerisine konulmuş meta malzemelerde indüklenen akım ile ısının oluşmasıdır.

Malzeme ile kondüktör arasında fiziksel bir temas bulunmamaktadır. Faraday prensibine göre malzemede akım indüklenerek oluşmasıdır. Elektromanyetik indüksiyon prensibi 1800 lü yıllarda Michael Faraday tarafından keşfedilmiştir.

Daha sonra indüksiyon ocakları ile ilgili ilk patent 1897’de İngiltere’de Ferranti tarafından alındı, ilk uygulamalar ise 1900 yılında İsveç’te ve 1906 yılında çelik ergitme ocaklarının kurulumu ile başlamıştır. İndüksiyon fırınlarının önermesi ilk olarak 20.yy’da gerçekleşmiş ve bununla birlikte reaktif gücün oluşumu sırasında kompanzasyon problemini çözmek için kondansatörlerin kullanılması gerekliliğı ortaya çıkmıştır. Dr.Northrup 1916 yılında sanayi kullanımı için orta frekansta çalışan fırınların gelişimine katkı sağlamıştır fakat şebeke frekansından daha fazla bir frekansta çalışmada en büyük sorun uygun boyutta kompanzasyon kondansatörlerinin olmayışının yarattığı sorunlardır. Sorunun çözümünü ise kâğıt kondansatörün üretilmesi ile giderilmiş olup şebeke frekansının üstünde çalışma imkânı sağlanmıştır. İlk orta frekans ergitme ocağı 1927 yılında Sheffield’da Electric Furnace Company (EFCO) tarafından gerçekleşmiş ve bundan sonra bu fırınların sayısı artmaya başlamıştır. Daha sonra paslanmaz çelik üretimi, işlenmiş metaller ve özel alaşım hazırlanmasında yaygınlaşma başlamıştır

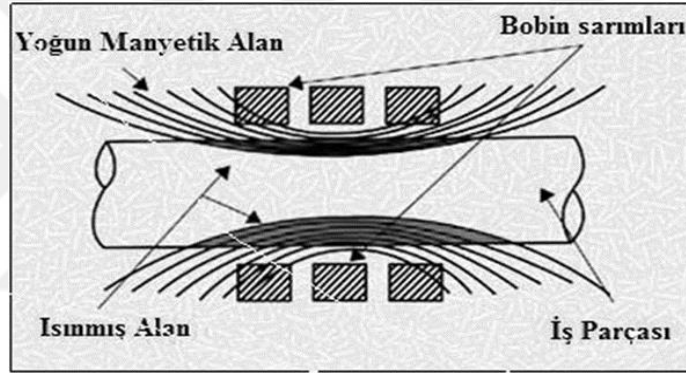
İkinci dünya savaşından sonra otomotiv endüstrisinin gelişimi elektromanyetik endüksiyon ile ısıtma işlemin önemini arttırmış, daha değişik uygulamaları için çalışmalar hızlandırılmış ve yüzey sertleştirme işlemleri için radyo frekansında ısıtıcılar geliştirilmiştir. Bu yöntemde nüfuziyet derinliğı kontrol edilebilirliğı, kayıpların diğer sistemlere göre az oluşu, seri üretim için uygulama kolaylıkları, yüzey sertleştirme işlemlerinde elektromanyetik indüksiyon ile ısıtma yönteminin kullanımını yaygınlaştırmıştır.

Bu ısıtıcılar ilk kullanılmaya başlandığı yıllarda ilk yatırım maliyetlerinin diğer sistemlere göre daha yüksektir. Özellikle orta frekanslı ısıtıcılar (motor-alternatör

grupları) ilk yatırım ve periyodik bakım masrafları yönünden pahalı bir sistemdir. Yıl 1966' dan bu yana yarıiletken güç sistemlerinin geliştirilmesi ile indüksiyon ısıtma yeni bir devir başlamış oldu. O yıllarda en önemli gelişmelerden biri ise değişen frekanslı indüksiyon ocaklarıdır. Yarıiletken güç sistemleri teknolojisini geliştirmesi ile bu sorun önemini kaybetmiş ve bu alandaki çalışmaları günümüzde oldukça yaygınlaşmasını sağlamıştır.

3.1. İndüksiyonla Isıtma Mekanizması

İndüksiyonla ısıtma, parçanın yüzeyinde oluşan alternatif manyetik alanın eddy akımlarını ve histerezis kayıplarını parçada indüklemesiyle ısı oluşturan bir yöntemdir. Malzemenin etrafını saran ve üzerinden alternatif akım geçen indüksiyon bobini ile alternatif manyetik alan oluşturulmuş olur (Çağlar, 2020).



Şekil 3.1 İş parçası çevresindeki akım taşıyan bir bobinin oluşturduğu manyetik alan ile ısı oluşumu (Callister, 2010)

Yüksek frekanslı bir alternatif akımı bobinlerden geçirilerek, yine yüksek frekanslı bir manyetik alan oluşturulur. Manyetik alan, iş parçası içinde eddy akımları ile histerezis akımları oluşturur. Bu yüksek frekanslı akımlar, parçanın dış yüzeyinde hareket etmektedirler. İş parçası bu akımlara karşı direnç göstermesi sebebiyle ısınma sağlanır ve böylece iş parçasının iç kısmı ısıtılmadan yüzeyi ısıtılır (Saeglitz, 1997).

Ayrıca, bir indüksiyon bobinin kalitesi indüksiyonla ısıtma işlemi görmüş bileşenlerin üretim maliyetinin önemli bir belirleyicisidir. Çoğunlukla tasarımı iyi yapılan ve üretilen bir bobin ile kötü yapılan bir bobin arasındaki fark ayırt edilemez. Bununla birlikte iyi tasarlanmış ve üretilmiş bir indüksiyon bobini üretim karlılığı ve maliyet açısından büyük öneme sahiptir. Kötü üretilen bir indüktör yani bobin

takımlama maliyetini, duruş ve döngü sürelerini, parça değişimi ve hurda miktarını arttırmaktadır. Dolayısıyla bobin tasarımı indüksiyon ile sertleştirme prosesinde oldukça dikkat edilmesi gereken bir parametredir. (Yakey, 2015)

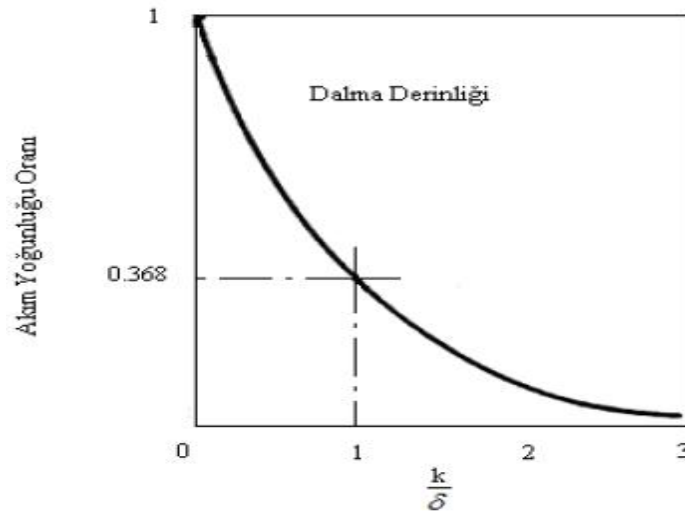
3.2. Nüfuz Derinliği

İş parçası üzerinde oluşturulan eddy akımlarının iş parçasının yüzeyinden itibaren ulaşabileceği derinliğe kadar olan kısma dalma etkisi denir. (ÇOĞUN, 2002) İş parçasının merkezine doğru gidildikçe eddy akımının etkisi azalmaktadır. İndüksiyonla ısıtmada nüfuz derinliği malzemenin cinsine, kalınlığına ve amacına göre uygun frekansın belirlenmesini sağlayan önemli bir etkidir, akım yoğunluğu değerine bağlı olarak değişen manyetik alanın büyüklüğüdür denklem;

$$\delta = 503. [(\rho / \mu_r f)]^{1/2} \quad (3.1)$$

olarak ifade edilir.

Eşitlikten görüleceği gibi frekansın artması nüfuz derinliği kalınlığını azaltmaktadır. Bu nedenle akım parçanın dış yüzeyinde dağınık [36]. Dalma derinliği ise malzemenin ρ katsayısına bağlı olduğu görünmektedir. Bu sabit katsayılar sıcaklığı değiştirir. Bu bağlamda iş parçasında istemiş olduğumuz derinliği elde etmek için formüldeki değerler en önemli etkenlerdendir.

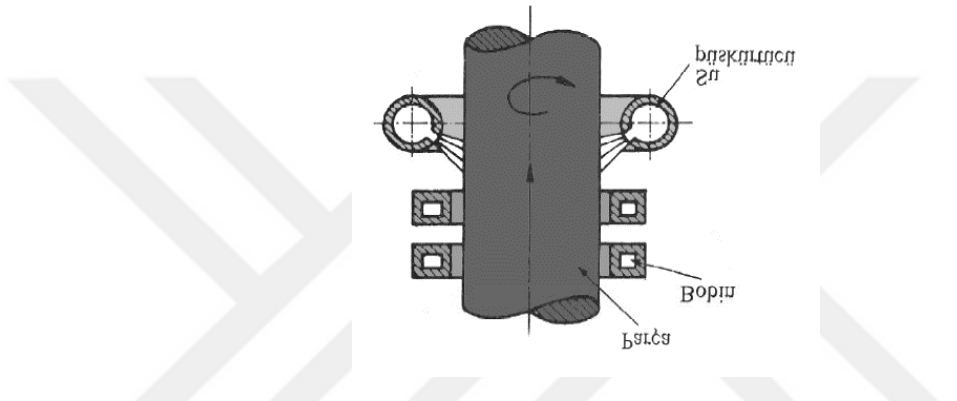


Şekil 3.2: Dalma derinliğinin üstel olarak azalması (Callister, 2010)

Şekil 2.2’ de görüleceği üzere k iş parçasının kalınlığıdır. Dolayısıyla iş parçasının dış yüzeyinde akımdaki yoğunluk pik seviyededir. Parçasının merkezine doğru gittikçe etkisi azalmaktadır.

3.3. İndüksiyonla Yüzey Sertleştirme

İndüksiyon yüzey sertleştirme parçanın belli bir kısmında sertlik istenen alternatif bir ısıtma işlemi türüdür. İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi, Şekil 16’da görüleceği gibi iş parçasının yüzeyini hızlı bir şekilde östenitik şartlara ısıtma ve sert martensitik katman dönüşmesi için ani soğutma yapılan bir işlemdir (Sazak, 1999).



Şekil 3.3: İndüksiyonla yüzey sertleştirme işleminin şematik olarak gösterimi (TBMMOB, 2020)

İndüksiyonla yüzey sertleştirme, işlemin hızının yüksek olması sebebiyle üretim hattına entegre edilebilmesinin yanında temiz bir proses, hassas ve verimi yüksek bir işlem olarak bilinir. İndüksiyon ile yüzey sertleştirme aynı zamanda malzemenin yorulma ömrünü de iyileştirmektedir. (Ivanov, 2013)

Soğutma sıvısı olarak su veya yağ kullanılır. Bu sayede parçaların bazı bölgeleri sertleşirken bazı bölgeleri de isteğe göre yumuşak kalır. Suda sertleştirme ısıtılmış çelik parçanın soğutulmasında en yüksek soğuma hızı parça ve su arasındaki sıcaklık farkının en yüksek olduğu durumda değil, bu aradaki farkın 350 ila 400°C olduğunda görülür. Su için belirlenen bu olay yağ gibi diğer sıvılarda da 400°C geçerlidir. Su ile sertleştirme yağ ile sertleştirmeye göre üç kat daha fazla iyi sertleştirir. Suda sertleştirme yöntemi en yaygın yöntemdir, çünkü hem ekonomik hem de kolaydır. Suyun soğutma gücü 1 ise yağın soğutma gücü 1/3’tür diyebiliriz. Bu iki soğutma işleminin yanı sıra bazen de havada da soğutma yapılır (Uzun, 2008).

İndüksiyonla yüzey sertleştirme işlemi genellikle otomotiv sektöründe, dişli çark, krank mili, şaft gibi malzemelerin yüzeyinin sertleştirilmesinde kullanılır.

Ayrıca düşük karbonlu çeliklerin ve dökme demirlerin mekanik özelliklerini istenilen duruma getirdiği için bu yöntem terci edilmektedir.

3.4. İndüksiyonla Sertleştirme İşleminin Avantajları ve Dezavantajları

⇒ Avantajları:

- İndüksiyonla yüzey sertleştirmede, malzeme çok kısa sürede ısındığından çevrede bundan az şekilde etkilenir.
- Bu yöntem ile parça kısa sürede ısındığından gaz salınımı ve çevre kirliliği azdır.
- Küçük tesislerde dahi kullanılabilir.
- Devamlılığı olan bir üretim için kullanıma çok uygundur.
- Alevle sertleştirmeyele karşılaştırdığımızda daha yüksek ısıl girdisi sağlanır,
- Elektrikli ortamlarda otomatik kontrol sayesinde ısıtma daha iyi ayarlanabilir,
- Parçaların seri imalatında zaman ayarı, elektriksel olarak yüzeye tatbik edilen sıcaklığın ve nüfuz derinliğinin otomatik olarak ayarlanması oldukça kolaydır.

⇒ Dezavantajları:

- En önemli dezavantajı tesisin pahalı olmasıdır.
- Sargıların üretim aşaması ve geliştirilmesi oldukça masraflıdır.
- Kompleks yapılı sargılara ihtiyaç duyulduğunda ve bunun yanında parça sayı olarak az ise sertleştirme maliyetleri de buna bağlı artar.
- Malzeme seçiminin sınırlı olması da dezavantajlarından biridir.

- Düşük karbon miktarına sahip parçalarda diğer yöntemle sağlanabilen sertlik değerlerine çıkılamaz, yüksek karbonlu malzemelerde ise çatlak oluşumu görülebilmektedir.
- Keskin köşe, kenarlı parçalarda aşırı ısınma oluşacağından bu yerlerde zorluklar meydana gelecektir.

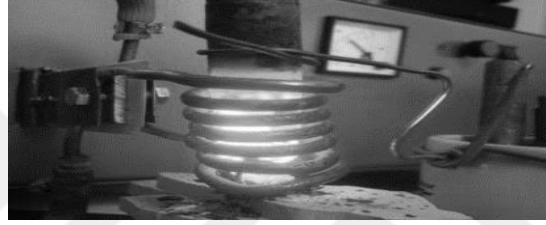


4. ÇALIŞMANIN AMACI

Çalışmanın amacı, Malzemelere; bobin çapları, güç, frekans, sıcaklık parametrelerinin ölçülmesi ile hedef prosesteki optimizasyonu sağlamaktır.

Termal kamera ile sıcaklıklar ölçülecek, sıcaklık-zaman optimizasyonu için denemeler ve çalışmalar yapılacaktır.

Bobin çapı, frekans, amper ve voltaj indüksiyon prosesi için önemli parametrelerdir. Bu parametrelere bağlı olarak sıcaklık-sertlik grafiği çizilecektir. Bunlara bağlı olarak da indüksiyon yüzey sertleştirme fırınlarında optimizasyon sağlanacaktır.



Şekil 4.1: İndüksiyon bobini

5. ÇALIŞMANIN BAŞLATILMA GEREKÇELERİ

Üretim bir ülkenin kalkınmasındaki en büyük etkidir. İndüksiyon prosesi firmalarda önemli bir yere sahiptir. Çalışmaların başarıya ulaşması, ilgililerin gelişmelerden haberdar olmaları ve çalışmaların tekrarlanarak zaman kaybedilmemesi için üreten tarafların bir araya gelmesi büyük önem arz etmektedir. Ar-ge çalışmaları bu sektörün gelişmesinde, teknolojisinin yenilenmesinde önemli bir rol oynar.

Çalışmanın başlamasının aslı nedenleri ise indüksiyon prosesinde normal şartlarda sıcaklık kontrolü olmadığından farklı parametrelerle proses çalışmaktadır. Bu parametreler frekans, güç ve bobin çapları olup istediğimiz sertlik derinliğini çoğu zaman elde edilememesi denemeler neticesinde set-up süresini uzatmaktadır. Set up süresinin uzun olması, işçilik maliyetlerinin artması ve zaman kayıplarına neden olması

İndüksiyon ile yüzey sertleştirme de mevcut proseste frekans ve güç ayarları değiştirilerek mevcut sertlik derinliği elde edilememesi, Set-up süresi zaman ve işçilik kayıplarına neden olmasıdır.

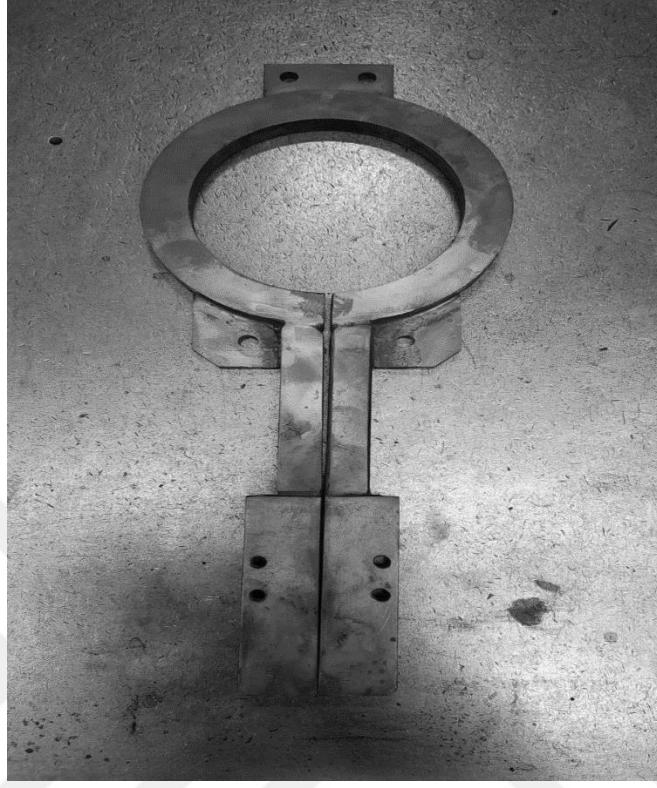
6. TARTIŞMA

İndüksiyon fırınında yüzey için sertleştirme işlemi yapılan farklı çaplarda ürünler olduğundan, bobinlerde aşağıdaki gibi farklı çaplarda üretilerek denemelerde kullanılması sağlanmıştır fakat öncesinde her zaman kullanılan bobin çapına yoğunlaşmış olup 100mm çapında bobin ile denemeler başlatılmıştır.

- Ø25, Ø30, Ø35, Ø40, Ø45
- Ø50, Ø55, Ø60, Ø70, Ø75
- Ø80, Ø85, Ø95, Ø100, Ø105
- Ø110, Ø115, Ø120, Ø125, Ø130
- Ø135, Ø140

Yukarıdaki ölçülerde farklı çaplarda üretimi yapılan bobinler ile deneme çalışmaları yapılmıştır. Sertleşme derinliğini arttırarak, proseste en yüksek verimi alabilmek için; maksimum/minimum bobin/ürün boşlukları tespit edilmiştir. Üretimi yapılan bazı bobin tasarımları aşağıdaki gibidir.

Denemelerde kullanılacak olan 100mm çapındaki bobin tasarımı ve üretimi yapılarak quenchlere (su verme işlemi) bağlandı.



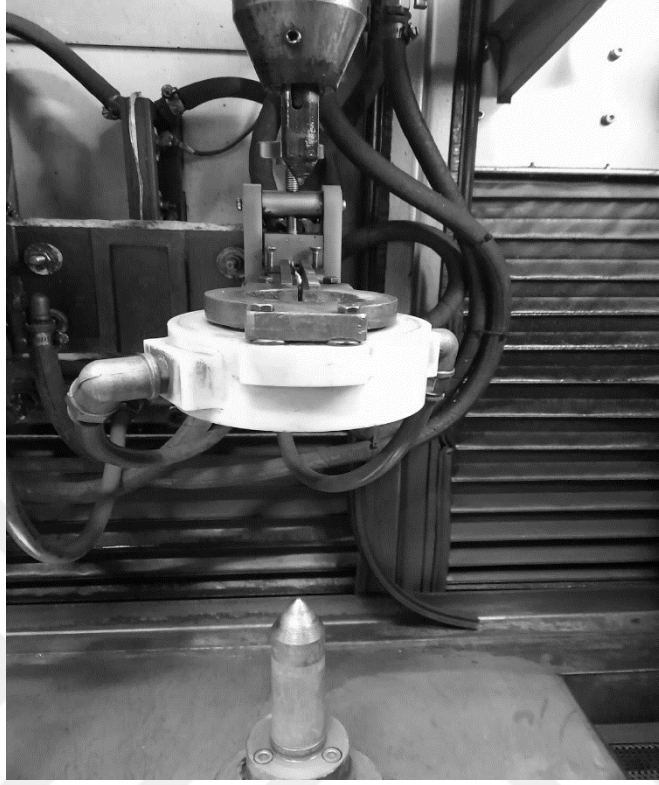
şekil 6.1 100 mm çapında Bobin Tasarımı

Quenchlere bağlanan bobin artık son kontroller yapılarak fırın bağlantısı için hazır hale getirildi.



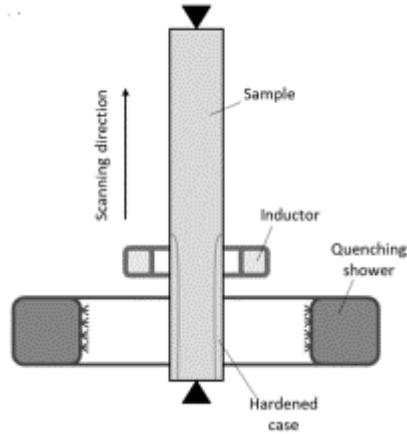
Şekil 6.2 Bobin ve Quench Bağlantı Gösterimi

Tasarımı yapıldıktan sonra quenchlere bağlanan bobin-quench ikilisinin indüksiyon fırınına bağlandı ve malzeme sertleştirme işlemin için hazır hale getirildi.

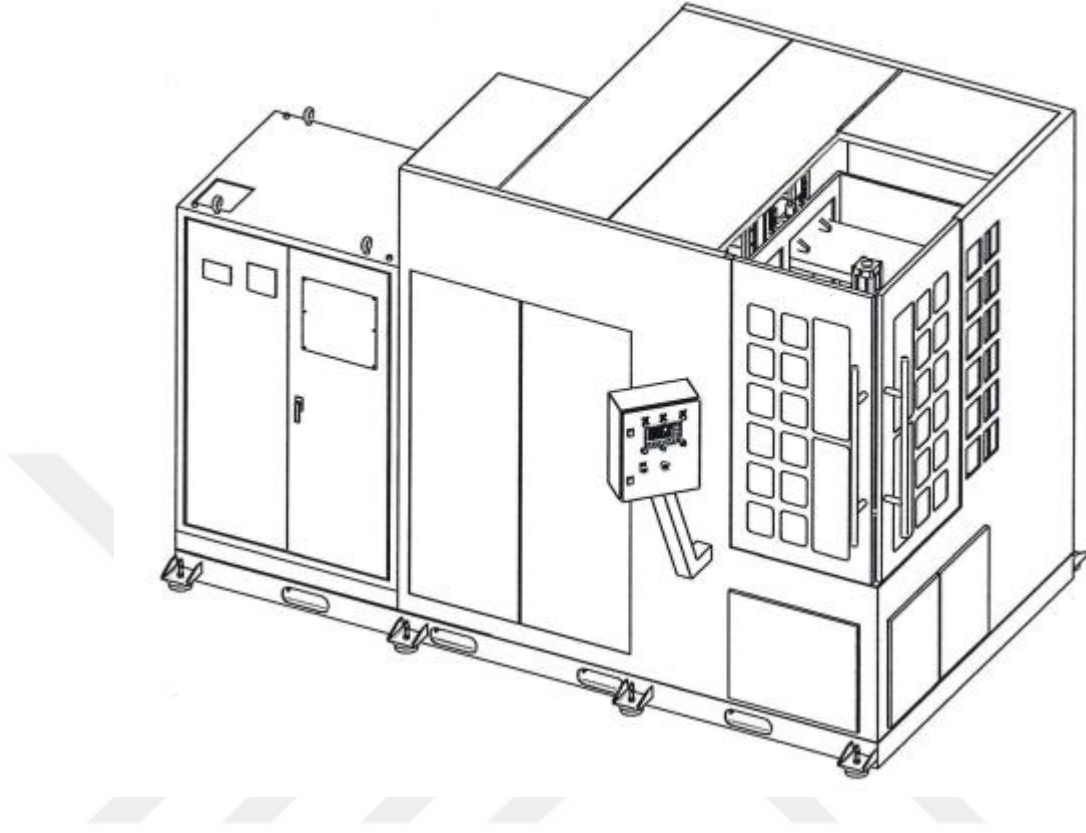


Şekil 6.3 Bobinin İndüksiyon Fırınına Bağlantısı

Malzemenin indüksiyon bobini içerisindeki yukarı doğru tarama yaparak yüzeyine sertlik kazandırma işleminin şematik gösterimi şekil 6.1’ de gösterilmiştir. Malzemenin aşağı doğru hareketinden dolayı manyetik akım ile ısıdıktan sonra aşağıda quenchler ile ani soğutma işlemi. (Areitioaurtena, 2022)



Şekil 6.4 İndüksiyon Bobini ile Malzemenin Şematik Gösterimi



Şekil 6.6 Kullanılan İndüksiyon Üç Boyutlu Teknik Resim Gösterimi

Malzeme seçiminde 4140 (42CrMo4) kalite ıslah çeliği kullanılmış olup seçmiş olduğumuz malzemeyi emin olmak için aşağıda görüntüleri ve teknik özellikler bulunan PMI-MASTER Pro2 markalı spektrometre cihazı ile malzemenin kimyasal analizi yapılmış, Tablo 6.1’de ise bu sonuçlar gösterilmiş olup spektrometre cihazı teknik özellikleri de aşağıda belirtilmiştir.

Yükseklik/genişlik/derinlik	360mm	575mm	370mm
Ağırlık/Batarya/Araba	25kg	13kg	80 kg
Güç/Çalışma/Hazırda Bekleme	24 V DC	500W	40W

Optik Sistem;

Çoklu CCD	: Paschen-Runge optik yerleştirme
Dalga Boyu Aralığı	: 165-420nm (UV touch pistol ile)
Odak Uzunluğu	: 350mm

Batarya;

Spark Sayısı : Min 750 analiz (batarya arabası ile)

Ark Sayısı : Min 500 analiz (batarya arabası ile)

Yazılım ve Kullanıcı Arayüzü,

Dahili bilgisayar, Microsoft, Windows, dokunmatik ekran

8 saat 750 analiz imkânı sağlayan PMI-MASTER Pro2 ile sahada ürünlerimizin, karbon, bor, arsenik, kalay dahil 20'den fazla elementin analizini yapılabilmektedir. Tabancanın ucuna okutturulan herhangi bir çelik malzemesinin analizini anından bilgisayar ortamında vermektedir. Kullandığımız çelik malzemesinde bu deneme 16 kere tekrarlandı ve sonuçlar aşağıdaki gibidir.

HİTACHI PMI-MASTER Pro2 spektrometre cihazı ile çelikte karbon, bor, arsenik, kalay dahil 20'den fazla elementin analizi; UVTOUCH pistol ile ilave olarak fosfor, kükürt ve dubleks çelikte ilave olarak azot analizi yapabilmektedir.



Şekil 6.7 HİTACHI PM-MASTER Pro2 Spektrometre Cihazı

Tabancanın ucuna çelik malzemesini getirip özel elektrot çevresi ve argon çıkışı ile verimli bir yakma sonucu çelik malzemesinin kimyasal analizini bilgisayar ortamında verebilen bir cihazdır.



Şekil 6.8 Spektrometre Tabanca Görüntüsü

Tablo 6.1 42CrMo4 Malzemenin Analiz Denemeleri

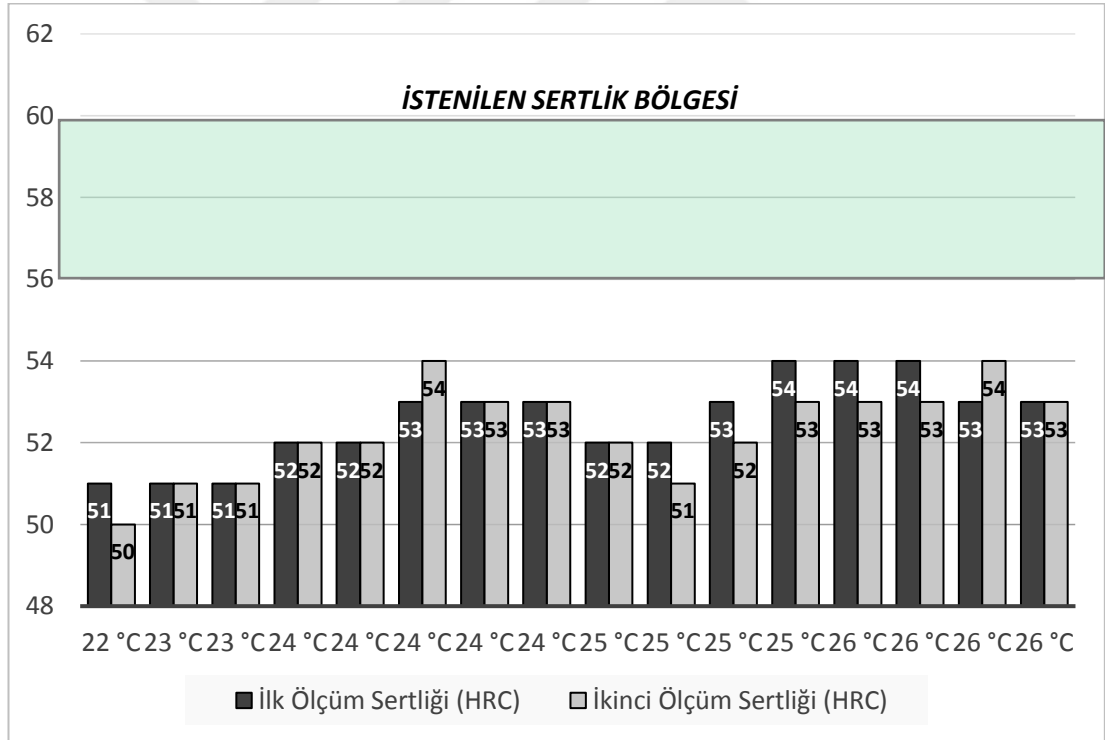
Deneme Malzemeler	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Mo %
Olması gereken değerler	0.38 – 0.45	Max 0.4	0.5 – 0.8	Max 0.035	Max 0.035	0.9 – 1.2	0.15– 0.3
1.Deneme	0.40	0.2	0.72	0.020	0.023	1.1	0.2
2.Deneme	0.39	0.3	0.76	0.015	0.018	1.0	0.25
3.Deneme	0.42	0.2	0.61	0.018	0.013	0.95	0.18
4.Deneme	0.42	0.2	0.60	0.013	0.017	0.98	0.22
5.Deneme	0.41	0.2	0.82	0.020	0.023	1.1	0.2
6.Deneme	0.39	0.3	0.76	0.015	0.018	1.0	0.25
7.Deneme	0.42	0.2	0.61	0.018	0.013	0.95	0.18
8.Deneme	0.42	0.2	0.60	0.013	0.017	0.98	0.22
9.Deneme	0.42	0.2	0.60	0.013	0.017	0.98	0.22
10.Deneme	0.43	0.2	0.71	0.016	0.011	0.99	0.28
11.Deneme	0.42	0.2	0.61	0.018	0.013	0.95	0.18
12.Deneme	0.41	0.2	0.82	0.020	0.023	1.1	0.2
13.Deneme	0.39	0.3	0.76	0.015	0.018	1.0	0.25
14.Deneme	0.42	0.2	0.61	0.018	0.013	0.95	0.18
15.Deneme	0.42	0.2	0.61	0.018	0.013	0.95	0.18
16.Deneme	0.42	0.2	0.60	0.013	0.017	0.98	0.22

6.1. İndüksiyon Soğutma Sıvısı Sıcaklık Ölçümü ve Sertlik Ölçümü

İndüksiyon sıvısı çalışma başında 22-26 °C tespit edildi. Seçilen malzeme 42CrMo4 (4140) kalite ıslah çeliği ve istenen sertlik değeri yüzeyde 58±2 HRC' dir. Soğutma sıvısı 22-26 °C tespit edildi ve ölçülen yüzey sertlik değerleri de düşük çıkmış olup süreklilik arz etmemektedir.

Tablo 6.2 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı ve Buna Bağlı Sertlik Ölçümü

Sıcaklık (°C)	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)
22	51	50
24	51	51
26	51	51
25	52	52
25	52	52
25	53	54
26	53	53
26	53	53
23	52	52
24	52	51
24	53	52
26	54	53
25	54	53
24	54	53
24	53	54
23	53	53

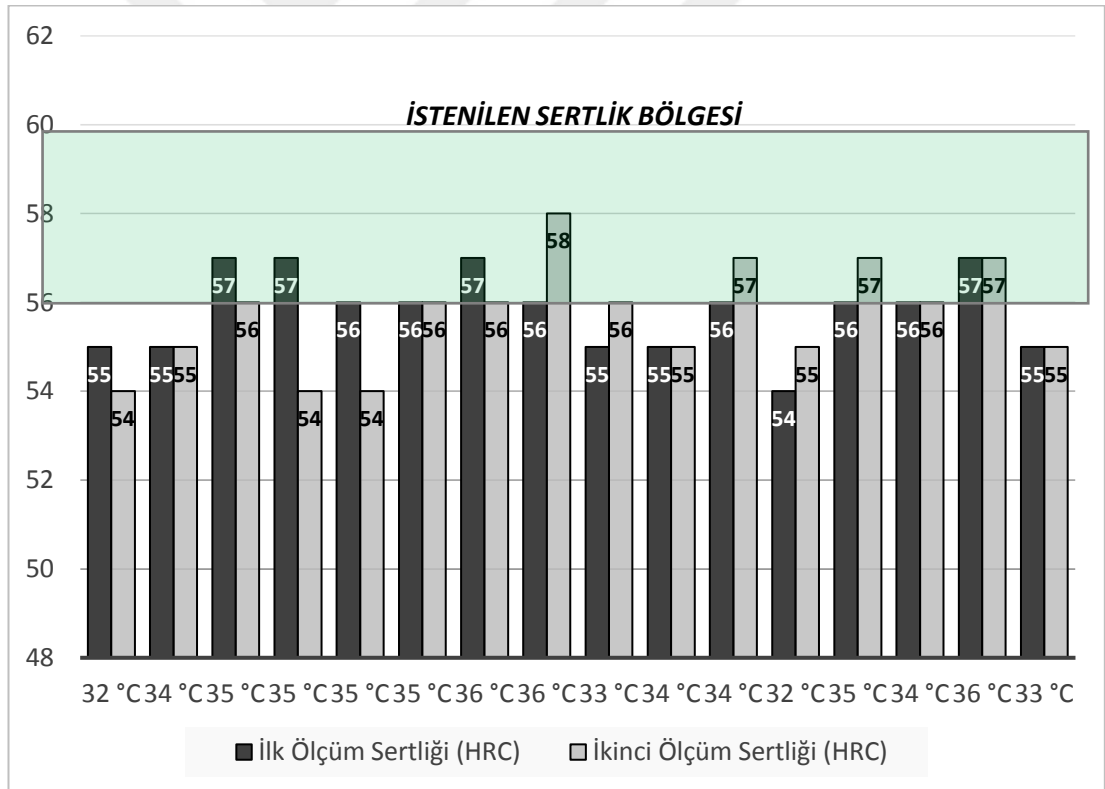


Şekil 6.9 İlk Ölçümlere Göre Sıcaklık ve Sertlik Ölçümü

İndüksiyon soğutma sıvısı için araştırmalara devam edildi ve indüksiyon soğutma sıvısının sıcaklığı kademeli olarak 30-35 °C bandına çekildi. Henüz istenilen sertliğe ulaşmamasına rağmen istenilen sertliğe yakınlığı gözlemlendi ve sıcaklık artırma işlemine devam edildi.

Tablo 6.3 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı ve Buna Bağlı 2. Sertlik Ölçümü

Sıcaklık (°C)	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)
32	55	54
34	55	55
35	57	56
35	57	54
35	56	54
35	56	56
36	57	56
36	56	58
33	55	56
34	55	55
34	56	57
32	54	55
35	56	57
34	56	56
36	57	57
33	55	55



Şekil 6.10 İkinci Ölçümlere Göre Sıcaklık ve Sertlik

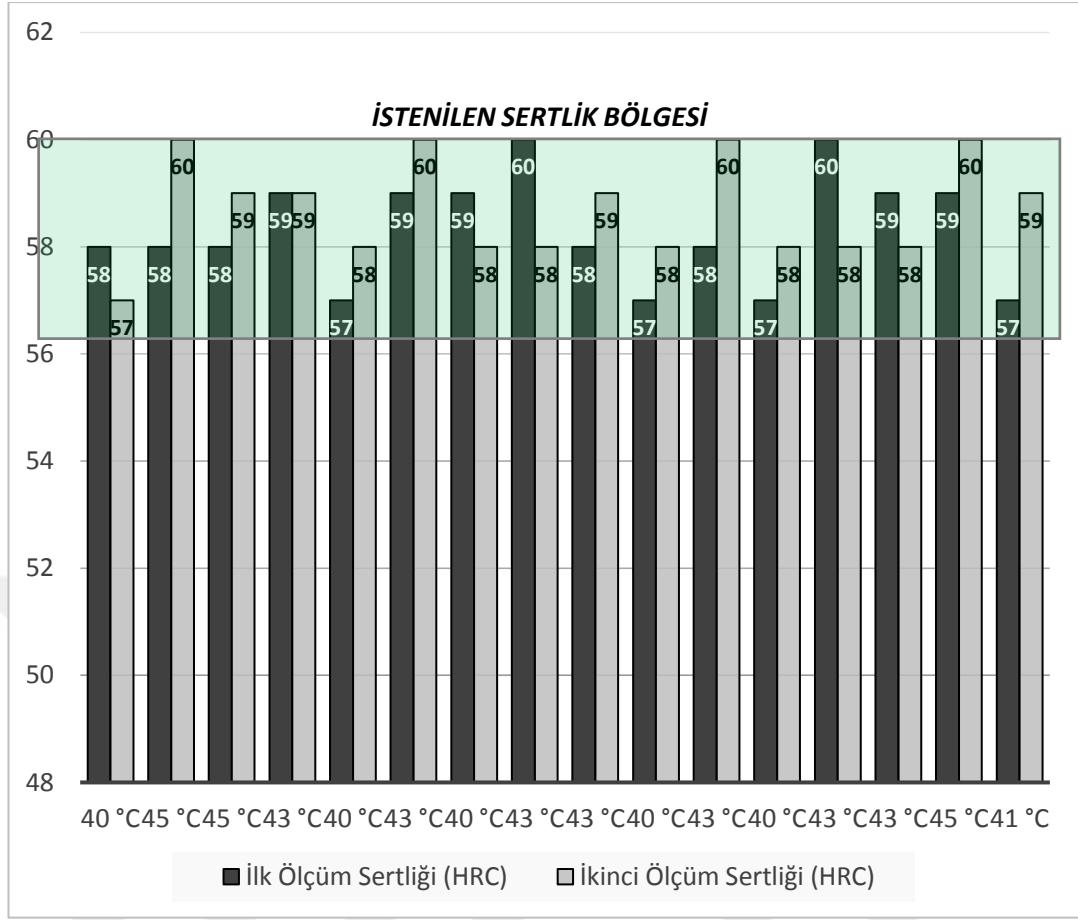
İndüksiyon soğutma sıvısı için sıcaklık arttırmaya devam edildi ve indüksiyon soğutma sıvısının sıcaklığı 40-45 °C bandına çıkarıldı. Böylelikle istenilen yüzey sertlik değerlerine ulaşıldı. Sertlik analizlerinde süreklilik sağlandı.

Soğutma sıvısının sıcaklığını ise ilk olarak rezistans ile sağlarken daha sonra buna bir sistem geliştirildi. Çalışmayı başlatma amaçlarımızdan biri de iş gücü kaybını azaltmaktı, bu şekilde manuel olarak soğutma sıvısını ısıtmak bize tekrar bir iş gücüne sebebiyet vermiş oldu ve fırına bütünleşmiş şekilde çalışan bir rezistans sistemi eklendi.

Bu rezistans sistemi soğutma sıvısı kazanının iç tarafına yerleştirildi ve sıcaklık 4-5 °C kadar düştüğünde otomatik olarak devreye girerek soğutma sıvısı sıcaklığını tekrardan istenilen sıcaklığa yani 40-45 °C arasına gelmesini sağlamış oldu.

Tablo 6.4 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı ve Buna Bağlı 3. Sertlik Ölçümü

Sıcaklık (°C)	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)
40	58	60
45	58	60
45	58	59
43	59	59
40	58	59
43	59	60
40	59	60
43	60	58
43	58	59
40	58	59
43	58	60
40	59	58
43	60	58
43	59	58
45	59	59
41	58	59



Şekil 6.11 Son Ölçümlere Göre Sıcaklık ve Sertlik

Ölçümlerden ve grafiklerden görüleceği üzere istenilen sertlik değerine yani 58 ± 2 HRC sertliğe, soğutma sıvısı sıcaklığının 40-45 °C olduğu yerde ulaşılmış olup düzenli bir hal aldığı da görülmektedir.

6.2. Bobin Mesafeleri Ölçüm Sonuçları

Önce soğutma sıvısının sıcaklık kontrolü sağlandı ardından bobin mesafesi çalışması yapıldı.

Bobin mesafelerinin kontrolüne 120mm mesafeden itibaren başlandı, 5mm mesafeye kadar kademeli olarak azaltıldı ve bu ölçümler 3'er kere tekrarlandı.

Aşağıdaki tablolardan da görüleceği üzere ürün ile bobin arası mesafe azaldıkça istenilen sertliğe daha fazla yaklaşmış olduk, her ne kadar 20mm mesafede de istenilen sertlik yakalanmış olsa da en iyi sonuç 10mm mesafede alındı.

Mesafe minimuma yani 5mm'e kadar indirildiğinde ise malzeme bobine çok yakın olduğundan ark yaptı ve indüksiyon fırını çalışmayı durdurdu. Böylelikle

optimum mesafenin 10mm olduğuna karar verildi. Tablo 6.5’ te görüleceği üzere her bobin mesafesi değiştiğinde 3’er kez ayrı ayrı malzeme sertlikleri ölçüldü ve bu ölçümler 3 kez tekrarlandı.

Tablo 6.5 Bobin Mesafeleri ve Buna Bağlı Sertlik Ölçümü Sonucu

Bobin Mesafesi	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)
Ürüne 120 mm mesafe	42	44	43
Ürüne 100 mm mesafe	47	47	46
Ürüne 80 mm mesafe	50	49	51
Ürüne 60 mm mesafe	52	50	49
Ürüne 40 mm mesafe	50	51	50
Ürüne 30 mm mesafe	55	55	56
Ürüne 20 mm mesafe	57	56	56
Ürüne 10 mm mesafe	58	59	58
Ürüne 5 mm mesafe	Bobin ürünle çok yakın olduğundan ark yaptı. İndüksiyon devreye alınamadı.		
Bobin Mesafesi	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)
Ürüne 120 mm mesafe	44	43	45
Ürüne 100 mm mesafe	48	46	47
Ürüne 80 mm mesafe	51	48	50
Ürüne 60 mm mesafe	53	50	50
Ürüne 40 mm mesafe	50	51	51
Ürüne 30 mm mesafe	54	56	55
Ürüne 20 mm mesafe	59	59	58
Ürüne 10 mm mesafe	59	57	58
Ürüne 5 mm mesafe	Bobin ürünle çok yakın olduğundan ark yaptı. İndüksiyon devreye alınamadı.		
Bobin Mesafesi	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)	Sertlik Ölçümü (HRC)
Ürüne 120 mm mesafe	43	42	44

Tablo 6.5 (Devamı)

Ürüne 100 mm mesafe	47	47	46
Ürüne 80 mm mesafe	50	48	51
Ürüne 60 mm mesafe	52	52	51
Ürüne 40 mm mesafe	52	52	51
Ürüne 30 mm mesafe	54	54	53
Ürüne 20 mm mesafe	58	58	59
Ürüne 10 mm mesafe	59	58	59
Ürüne 5 mm mesafe	Bobin ürünle çok yakın olduğundan ark yaptı. İndüksiyon devreye alınamadı.		

6.3. İndüksiyon Soğutma Sıvısı Derişim Ölçüm Sonuçları

İndüksiyon prosesindeki diğer önemli bir parametre olan soğutma sıvısı derişim değeri için yapmış olduğumuz çalışmalarda ve denemelerde ise soğutma sıvısının derişimin de çalışma sırasında herhangi bir değışiklik gözlemlenmemiştir. Soğutma sıvısının derişimi düzenli olarak kontrol edilmeli ve derişim değeri optimum değerin yani %2,5-%3,2 (bu değeri aquatensid üreticisinin TDS' sine ve 4140 çeliğe göre belirlenmiş bir değerdir) altına düştüğünde aquatensid denilen ve su ile kolaylıkla seyreltilebilen polimer bazlı sıvı ilavesi ile bu derişim arttırılabilmektedir. Çünkü derişikliğin düşmesi ürünlerin hızlı soğumasına neden olmaktadır. Hızlı soğuyan alaşımlı 4140 vb. alaşımlı çelikler için çatlama riski oluşturmaktadır. aquatensid derişimi arttıkça da hem sarfiyattan dolayı maliyet artıyor hem de malzeme çok yavaş soğumaktadır ve istenilen sertlik değeri de yakalanamamaktadır.

Aquatensid, su ile çeşitli oranlarda karıştırılarak kullanılan polimer yapıda sentetik ısıtma işlem sıvılarıdır. Daldırma, indüksiyon ve alevle sertleştirme sistemlerinde kullanılmak için uygundur. Suyu karıştırılarak kullanıldıkları için yangın riski yoktur. Duman oluşumu yağa göre çok daha azdır.

Karbon ve düşük alaşımlı çeliklerin hızlı ve uniform soğutulmasında, vida, somun, civata sertleştirmede, Pense, anahtar ve diğer takımların sertleştirilmesinde, takımların kısmi sertleştirilmesinde, sement edilmiş, karbonitürülenmiş ufak boyutlu zincir ve benzeri parçaların kontinü fırınlarda sertleştirilmesinde, bağlantı elemanlarının sertleştirilmesinde, krank mili, hadde merdanesi ve kılavuz

kızaklarının indüksiyon ve alevle sertleştirilmesinde, alüminyum ve alüminyum alaşımlarından oluşan sac ve profillerin ısıtılmasında (örn; havacılık sektöründe) kullanılmaktadır.

Bu bağlamdaki ölçümlerimizde polimer bazlı aquatensid sıvısına ihtiyaç duymadan denemeler tamamlanmıştır.

Tablo 6.6 Soğutma Sıvısı Değişim Ölçüleri

Makine Kodu	Soğutma Sıvısı Değişimi
IN - 01	2,6
IN - 01	2,7
IN - 01	2,7
IN - 01	3,0
IN - 01	3,1
IN - 01	2,3
IN - 01	2,2
IN - 01	2,8
IN - 01	2,8
IN - 01	2,8
IN - 01	2,5
IN - 01	2,8
IN - 01	3,0
IN - 01	3,0
IN - 01	3,1
IN - 01	2,8
IN - 01	3,0
IN - 01	3,0
IN - 01	3,1
IN - 01	3,1
IN - 01	2,8
IN - 01	2,8
IN - 01	2,9
IN - 01	3,0
IN - 01	3,2

Tablo 6.6 (Devamı)

IN - 01	2,8
IN - 01	2,9
IN - 01	3,0
IN - 01	3,1
IN - 01	3,0
IN - 01	2,9
IN - 01	3,0

6.4. İndüksiyon Soğutma Sıvısı pH Ölçüm sonuçları

İndüksiyon prosesinde süreklilik için en önemli parametrelerden biri de pH değeridir. Soğutma sıvısının bakteri ve kirliliği açısından da bize fikir veren bir testtir. Ortalama olması gereken değer 8.5 – 9 pH tır.

pH değeri arttıkça elektrik iletkenliği artar. pH değeri azaldıkça elektrik iletkenliği azalır. Soğutma sıvımızın TDS’ sin de pH ve iletkenliğin optimum sağlandığı aralık 8.5 -9 pH verilmiştir. Çalışma esnasında bu değerlere sadık kalındı ve ölçüm sonuçları tabloda verilmiştir.

Tabloda da görüleceği üzere soğutma sıvısının sıcaklığındaki değişim ilk ölçüm, ikinci ölçüm ve üçüncü ölçüme göre pH değerleri kontrol edildiğinde herhangi bir düzensizlik ya da optimum değer dışına çıkan bir durum gözlemlenmemektedir. pH değerleri her ölçümde optimum değerlerin içinde kalmıştır.

Tablo 6.7 Soğutma Sıvısı Sıcaklığı Denemelerine Göre Ph Değerleri

Ölçüm Sırası	pH Değeri
Soğutma sıvısı sıcaklığının ilk ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının ilk ölçümündeki pH değeri	8,9
Soğutma sıvısı sıcaklığının ilk ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının ilk ölçümündeki pH değeri	9

Tablo 6.7 (Devamı)

Soğutma sıvısı sıcaklığının ilk ölçümündeki pH değeri	8,8
Soğutma sıvısı sıcaklığının ikinci ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının ikinci ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının ikinci ölçümündeki pH değeri	8,8
Soğutma sıvısı sıcaklığının ikinci ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının ikinci ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının üçüncü ölçümündeki pH değeri	8,9
Soğutma sıvısı sıcaklığının üçüncü ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının üçüncü ölçümündeki pH değeri	9
Soğutma sıvısı sıcaklığının üçüncü ölçümündeki pH değeri	8,8
Soğutma sıvısı sıcaklığının üçüncü ölçümündeki pH değeri	9

6.5. Deneysel Çalışma Görselleri

Sertleştirme işlemi bittikten sonra malzeme yüzeyindeki sertliği Equotip 550 isimli taşınabilir sertlik cihazı ile leeb ölçüm prensibine göre ölçülerek kayıt altına alınması, Sert metalden bir test ucuna sahip bir darbe uygulayıcı gövdeye, test parçasının yüzeyine doğru yay kuvveti ile tahrik verilir. Darbe uygulayıcı gövde, test yüzeyine çarptığında yüzey deformasyonu oluşur ve sonuçta kinetik enerji kaybı gerçekleşir ve enerji kaybı tespit edilir.



Şekil 6.12 İndüksiyon Olmuş Ürünlerin Sertliği

Hız ölçümleri, darbe uygulayıcı gövdenin içinde bulunan ve darbe cihazına hassas bir şekilde yerleştirilmiş bobinde bir endüksiyon gerilimi üreten bir kalıcı mıknatıs aracılığıyla gerçekleştirilir. Tespit edilen gerilim, darbe uygulayıcı gövdenin hızı ile orantılıdır. Daha sonra sinyal işleme ile sertlik okumasını sağlanmış olur.



Şekil 6.13 İndüksiyon Olmuş Ürünlerin Sertlik Kontrolü

İndüksiyon fırını çalışırken fırın ile ilgili parametrelerin aralıklı olarak kontrolünü sağlayarak prosesin düzgün bir şekilde çalışmasını gözlemlemek ve herhangi bir düzensizlik halinde anında müdahale edilmesini sağlamak



Şekil 6.14 Verilen Ekranda Kontrolü

Sertleştirme işlemi sonrası malzemenin dış yüzeyinin termal kamera ile ölçülmesi ve kontrolü



Şekil 6.15 Ürünlerin Sıcaklık Ölçümü

İndüksiyon ile sertleştirme prosesi bittiğinde indüksiyon fırınının kapağı dikkatlice açılarak hem ürün hem soğutma sıvısı sıcaklıklarının ölçülmesi ve bu ölçüm sonuçlarının kayda alınması



Şekil 6.16 Ürünlerin ve Soğutma Sıvısı Sıcaklık Ölçümü

İndüksiyon prosesi tamamlandıktan sonra soğutma sıvısının sıcaklığının düzenli olarak termal kamera ile ölçülmesi ve bu ölçümlerin kayda alınması



Şekil 6.17 Soğutma Sıvısı Kontrolü

İndüksiyon prosesinin başlangıç hali, malzemenin indüksiyon fırını içerisinde sertleştirme işleminin başlangıcı. Bobin yaklaşık 6-7 dk boyunca malzemenin yüzeyinde yukarı doğru hareket ederek sertleştirme işlemini tamamlamaktadır.



Şekil 6.18 İndüksiyon Projesi

Adwa pH Ölçer cihazı ile indüksiyon işlemi sonrası soğutma sıvısının pH değerinin ölçülmesi ve kayda alınması



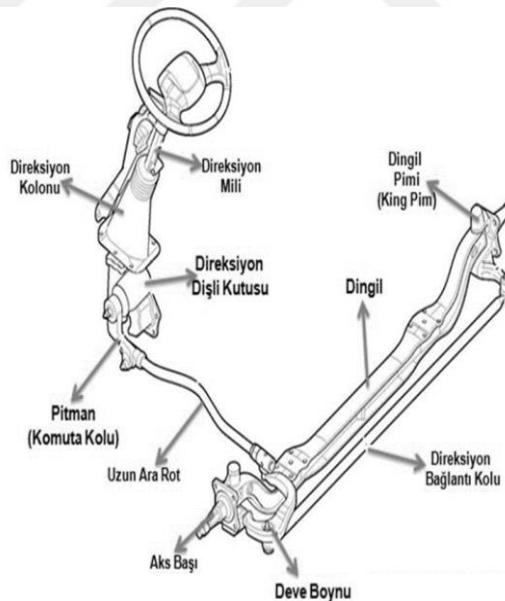
Şekil 6.19 Soğutma Sıvısı Ph Kontrolü

Adwa pH Ölçer pH Metre Ad11 isimli cihaz kullanılmış olup bu cihaz ile -5 ile 60°C arasında ideal ölçümler yapılmaktadır. pH ölçüm aralığı -2,0 ile 16.0pH olup pH çözünürlüğü 0,1 dir.



Şekil 6.20 İletkenlik ve Ph Değerlerinin Kontrolü

Aracın dönme hareketini sağlayan yapılara direksiyon mafsal sistemleri denir. Denemeleri yaptığımız malzeme ise dingil pimi olup bu malzemelerin kullanıldığı yerin önemi açısından emniyet katsayısı yüksek seviyededir. Sebebi araç dönme hareketini sağlarken, tamamen bu parça üzerinde yük dağılımı göstermektedir.



Şekil 6.21 Kamyonlarda Ön süspansiyonda Direksiyon Bağlantısı

Dingil pimleri titreşim ve radyal hareket ile çalışmaktadır ve aşınma direnci ürünün kalitesini ve servis ömrünü belirlemektedir. Çalışma koşulları göz önüne alındığında dingil pimlerinin malzeme ve ısıl işlem tasarımı son derece önem arz etmektedir. Bu nedenle malzeme sünek, darbe dayanımı oldukça iyi, akma

mukavemeti ve çekme mukavemeti mafsalları sistemlerinin isteklerini karşılayacak seviyede seçilmelidir.



Şekil 6.22 Üretimi Yapılan Dingil Pimi

7. BAŞARI KRİTERİ VE SOMUT HEDEFLER

- İndüksiyon ile yüzey sertleştirme prosesi birçok malzemenin kullanımına izin verdiğinden, proses kontrol altına alındı ve çoğu üründe iyileştirme sağlanmıştır.
- Denemeler sonucunda proseste mekanik özellikler optimize edilmiştir.
- Sıcaklık-sertlik tablolarından da görüldüğü üzere soğutma sıvısı sıcaklığının optimum değerine riayet edilerek süreklilik sağlanmıştır.
- Mikroyapı çalışması yapılarak malzemedeki tane büyüklüğünün sertlik derinliği ile ilişkisi incelenmiştir.
- İndüksiyon süresi minimuma indirilmiştir.
- Set up sürelerini azaltılmıştır.
- İşçilik maliyetleri azaltılmıştır.
- Zaman kayıplarını ortadan kaldırılmıştır.
- Proseste sıcaklık parametresi kontrol altına alınmıştır.
- Malzeme bobin mesafelerinin optimum çalışma mesafesi belirlenerek üretim verimi arttırılmıştır.
- Soğutma sıvısı derişimi ve pH değerlerinin stabilizasyonu sağlanmıştır.



8. ÇALIŞMA ÇIKTILARI

- Farklı çap aralıklarında bobinler imal edildi, imal edilen bobinlerin en önemli faktörlerinden biri de malzemenin bobine olan uzaklığı olup bobin- ürün mesafe optimum 10 mm olmalı sonucuna ulaşıldı.
- Firmada, istediğimiz sertliğe göre indüksiyon prosesi öncesi bazı ürünlere ıslah prosesi eklendi. İndüksiyon prosesinde verimlilik ve ürünlerin çekme mukavemeti artırıldı.
- Ayrıca bazı iç gerilmelerdeki risklere karşı soğutma suyundaki ısı değişimleri de incelendi. pH ve iletkenlik değerleri kayıt altına alındı. Soğutma sıvısının TDS değerleri ile kıyaslandı.
- İndüksiyon yüzey sertleştirme fırınlarında yapılması istenen optimizasyon ile, üretim personelinin inisiyatifi kaldırılmış oldu ve sıcaklık ölçümlerine uygun yüzey sertleştirme prosesi gerçekleştirildi.
- Malzemeler de sertleşme sıcaklığı, güç, frekans gibi parametreler belirlenerek, setup süreleri kısaltıldı ve proseste zaman kayıpları minimum seviyede seyretti.
- Set-up sürelerinin kısılması, elektrik enerji kayıplarını da minimum seviyeye getirmiş oldu.
- Ürünlerin çaplarına göre, düşük ve yüksek bobin çapları için çalışma yapıldı ve bu çalışma sonucunda optimum aralıklar belirlendi.
- İndüksiyon yüzey sertleştirme cihazına infrared sıcaklık kontrol ünitesi entegrasyonu sağlandı.

KAYNAKLAR

- Aran, A. (2008). *Mal 201-Malzeme Bilgisi*. İTÜ Makine Fakültesi, Ders Notları, İstanbul.
- Bargel, J., Schulze, G., ve Güleç, Ş. (1987). *Malzeme Bilgisi Ciltli Metal Malzeme Türleri*.
- Çağlar, M. (2020). *Al Alaşımlı Ve Alaşımsız Otomotiv Çeliklerine Östemperleme Isıl İşlemi Uygulanması Ve Mikroyapı-Mekanik Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi*. Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Çakır, C., ve Esasları, M. T. İ. (1999). *Modern Talaşlı İmalatın Esasları*. Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı Yayınları, 140.
- Çakır, M. (2008). *Su Verme Isıl İşleminde Çelik-Ortam Arasındaki Isı Transferinin İncelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Çoğun, C., ve Özses, B. (2002). *Bilgisayar sayısal denetimli takım tezgahlarında değişik işleme koşullarının yüzey pürüzlülüğüne etkisi*. Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17(1), 59-75.
- Demirci, A. H. (2004). *Mühendislik Malzemeleri*. Aktüel Yayınevi, İstanbul.
- Demirci, A. H. (2004). *Mühendislik malzemeleri: önemli endüstriyel malzemeler ve ısı işlemleri*. Aktüel Yayınları.
- Durukan, İ. (2007). *İndüksiyon ısıtma parametrelerinin dövme kütük sıcaklığına etkisi*. Yüksek Lisans tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Egan, L. R., ve Furlani, E. P. (1991). *A computer simulation of an induction heating system*. IEEE Transactions on Magnetics, 27(5), 4343-4354.
- Erişir, E. (2013). *Çeliklerde Malzeme Bilimi ve Son Gelişmeler*. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Ders Notları. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
- Harman, F. M. (2003). *Çeliğin ısı işleminin teorik ve pratik esasları*. Doctoral dissertation, Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 155-170.
- Kalpakkian, S. (2001) *Manufacturing Engineering and Technology*. 3.Edition Kitabı, New York.
- Kalpakkian, S., ve Schmid, S. R. (1991). *Manufacturing Processes for Engineering Materials*, Addison.
- M. Tutar. (2011) , 'Çeliğe Uygulanan Sertleştirme Yöntemleri. home .uludag. edu .tr/ users/ mumintutar /mm/7.pdf Ders Notları, Bursa.
- Mohan, N., Undeland, T. M., ve Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*.
- Özsaraç, U., Yılmaz, R., Eker, F. A., ve Uzun, H. (2012). *Sementasyon İşlemi Yapılan Çeliklerde Mikro Sertlik ve Mikroyapı Değişimlerinin İncelenmesi*. Metalurji Dergisi, 127(34), 1-7.
- Saeglitz, M. ve Krauss, G. (1997). *SAE 43xx Çeliklerinde Düşük Sıcaklıkta Temperlenmiş Martenzitin Deformasyonu, Kırılması Ve Mekanik Özellikleri*. Metalurji ve Malzeme İşlemleri A , 28 (2), 377-387.
- Savaşkan, T. (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Derya Kitabevi.
- Savaşkan, T. (2009). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*. Genişletilmiş 5. Baskı Trabzon.
- Sazak, B. S. (1999). *Design of a 500W Resonant Induction Heater*. Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 5(1), 871-878.

- Serfiçeli, Y. S. (1999). *Metal işleri meslek teknolojisi*
- Sert, Ş. (2008). *İndüksiyon Isıl Yükleme İle Bir Çatlak Etrafında Oluşan Gerilmelerin Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi.
- Topbaş, M. A. (1998). *Çelik ve Isıl İşlem El Kitabı*. Prestij Yayıncılık, İstanbul, 28-80..
- Uzun, G. (2008). *Farklı ısıt işlemlerin Ç 5140 çeliğin işlenebilirliğine etkisinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldırım, G., ve Gülgün, R. (1988). *Güç Elektroniğinin Endüksiyonla Isıtmada Kullanılması*, Bursa II. Elektromekanik Sempozyumu, 69-75.
- Areitiaurtena, M., Segurajauregi, U., Fisk, M., Cabello, M. J., & Ukar, E. (2022). *Numerical and experimental investigation on the residual stresses generated by scanning induction hardening*. Procedia CIRP, 108, 827-832.
- Ivanov, D., Markegård, L., Asperheim, J. I., & Kristoffersen, H. (2013). *Simulation of stress and strain for induction-hardening applications*. Journal of materials engineering and performance, 22(11), 3258-3268.
- Yakey, C., Nemkov, V., Goldstein, R., & Jackowski, J. (2015). *Best Practice for Design and Manufacturing of Heat Treating Inductors*.

ÖZ GEÇMİŞ

Yusuf ALAYBEYOĞLU Yeni Samsun Lisesi'ni bitirdikten sonra Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nden 2012 yılında mezun oldu. 2018 yılında OMÜ LEE Malzeme ve Metalürji Yüksek Lisans programını girdi. Mezuniyetinden bu yana teknik satın alma kıdemli uzmanı olarak görev yapan, orta derecede İngilizce bilmektedir. Temel ilgi alanları, tedarik zinciri yönetimi, çelik hammadde (24.1.2022)

İletişim Bilgileri

ORCID ID : 0000-0002-4662-5407

Yayınlar:

1. Yusuf, A. (2021). İndüksiyon Fırınlarında Sertleştirme Parametrelerinin Belirlenmesi ve İndüksiyon Proses Kontrolü İçin Metot Geliştirilmesi. *7 th International Academic Studies Conference, (UBCAK)*