



**DÜŞÜK KARBONLU ST37 YAPI ÇELİĞİNİN ISIL
İŞLEM SONRASI YAPISI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mahir AKDUMAN

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MUHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Khangardash ASGAROV**

**DÜŞÜK KARBONLU ST37 YAPI ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM SONRASI
YAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Mahir AKDUMAN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Khangardash ASGAROV**

**KARABÜK
Temmuz 2021**

Mahir AKDUMAN tarafından hazırlanan “DÜŞÜK KARBONLU ST37 YAPI ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM SONRASI YAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Khangardash ASGAROV

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 02/07/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Khangardash ASGAROV (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Harun ÇUĞ (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ (KÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Mahir AKDUMAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DÜŞÜK KARBONLU ST37 YAPI ÇELİĞİNİN ISIL İŞLEM SONRASI YAPISI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Mahir AKDUMAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Khangardash ASGAROV

Temmuz 2021, 65 sayfa

Bu çalışmada, düşük karbonlu St37 yapı çeliğinin ısıtılma işlem öncesi ve sonrası yapısı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi yapılmıştır. St 37 yapı çeliği düşük karbonlu bir çelik olmasından dolayı kolay kaynaklanabilir. Bu yüzden kullanımı oldukça yaygındır. Deneyler için 4 adet St37 yapı çeliği 8x8 kare demir 30 cm uzunluğunda numune kullanılmıştır. Isıtılma işlem uygulanmamış ve ısıtılma işlem yapılmış tüm malzemelerin mikroyapıları karşılaştırma yapılabilmesi için incelenmiştir. Çalışma sırasında kullanılan 4 numuneyede rekristalizasyon tavı uygulanmıştır. Diğerleri 1 adet numune fırında soğutulmuş, 1 adet numune suyun içerisinde tam soğuyana kadar su verme, 1 adet numune suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutma, 1 adet numune ise suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarda soğutma şeklindedir. Aşınma, sertlik ve çekme deneyleri yapılmıştır. Aşınma ölçümleri ve metalografik incelemeler taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri analiz edilmiştir.

Anahtar Sözcükler : Düşük karbonlu çelik, Fe 37 çeliği, ısıı işlem, mikroyapı, mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 91421

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF LOW CARBON ST37 STRUCTURAL STEEL AFTER HEAT TREATMENT

Mahir AKDUMAN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Khangardash ASGAROV

July 2021, 65 pages

In this study, the structure and mechanical properties of low carbon St37 structural steel before and after heat treatment were investigated. St 37 structural steel can be easily welded because it is a low carbon steel. Therefore, its use is quite common. For the experiments, 4 St37 structural steel 8x8 square iron 30 cm long samples were used. The microstructures of all non-heat-treated and heat-treated materials were examined for comparison. Recrystallization annealing was applied to 4 samples used during the study. Others 1sample is cooled in the oven, 1 sample was quenched in water until completely cooled, 1 sample was kept in water for 10 seconds. immersed and cooled outside, 1 sample in water for 1 second. It is in the form of immersion and cooling outside. Wear, hardness and tensile tests were carried out. Wear measurements and metallographic examinations were analyzed by scanning electron microscope (SEM).

Key Word : Low carbon steel, St37 steel, heat treatment, microstructure,
mechanical properties.

Science Code : 91421

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren sayın hocam Prof. Dr. Khangardash ASGAROV'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneylerin yapılmasında yardımlarını esirgemeyen, Karabük Üniversitesi Dr. Öğr. Üyesi Harun UĞ hocama ve Karabük Üniversitesi MARGEM'e teşekkür ederim. KBÜBAP-21-YL-023 adlı bilimsel araőtırma projesi tarafından desteklendiği için Karabük Üniversitesi Bilimsel Araőtırma Proje Koordinatörlüğüne teőekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme manevi hiçbir yardımını esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
LİTERATÜR TARAMASI.....	3
BÖLÜM 3	7
KURAMSAL TEMELLER	7
3.1. ÇELİĞİN TANIMI VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ.....	7
3.1.1. Çeliğin Tanımı.....	7
3.1.2. Çeliğin Üretim Yöntemleri.....	8
3.2. ÇELİĞİN SINIFLANDIRILMASI	9
3.2.1. Karbon Oranına Göre Çeliğin Sınıflandırılması.....	10
3.2.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler	10
3.2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler	11
3.2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler	11
3.2.1.4. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri.....	12
3.2.2. Çeliklerin Standartlara Göre Gösterimleri.....	12
3.2.2.1. Çeliklerin Türk Standartlarına Göre Gösterimi	13

3.2.3. Mekanik Özellikleri Esas Alınan Metaller	13
3.2.4. Kimyasal Bileşimi Esas Alınan Metaller.....	13
3.2.4.1. Alaşım-sız Çelikler.....	14
3.2.4.2. Alaşım-lı Çelikler.....	14
3.2.5. Çeliğ-in Katılaş-ması.....	16
3.2.5.1. Kaynar Dökülmüş Çelik	16
3.2.5.2. Sakin Dökülmüş Çelik	17
3.2.6. Kimyasal Bileşim-in Çelik Üzerine Etkisi.....	19
3.2.6.1. Karbonun Etkisi	19
3.2.6.2. Kükürdün Etkisi	20
3.2.6.3. Manganın Etkisi	21
3.2.6.4. Fosforun Etkisi.....	22
3.2.6.5. Silisyumun Etkisi	22
3.2.6.6. Azotun Etkisi	22
3.3. ÇELİĞ-İN YAPILARI	23
3.3.1. Demir-Karbon Alaşım Sistemi	23
3.3.2. Demir-Sementit (Fe-Fe ₃ C) Faz Diyagramı.....	25
3.3.2.1. Demir-Sementit Faz Diyagramındaki Fazlar	27
3.4. ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMİ.....	29
3.4.1. Isıl İşlem	29
3.4.2. Çeliğ-e Uygulanan Isıl İşlem Yöntemleri	32
3.4.2.1. Tavlama.....	32
3.4.2.2. Yumuşatma Tavlaması (Tam Tavlama).....	33
3.4.2.3. Normalizasyon Tavı.....	34
3.4.2.4. Küreselleştirme Tavı.....	36
3.4.2.5. Gerilme Giderme Tavı Ve Ara Tavı	37
3.4.2.6. Su Verme Sertleştirme	38
3.4.2.7. Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri	38
3.4.2.8. Kritik Soğuma Hızı.....	41
3.4.2.9. İzotermal Dönüşüm İle Perlit Oluşumu	42

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 4	43
MATERYAL VE YÖNTEM	43
4.1. DENEY MALZEMELERİ TANITILMASI	43
4.1.1. St 37 Yapı Çeliği	43
4.1.1.1. St 37 Yapı Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu	44
4.2. NUMUNE HAZIRLAMA	44
4.2.2. Zımparalama, Parlatma ve Dağlama İşlemleri	44
4.3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	45
4.3.1. Sertlik Testi	45
4.3.2. Aşınma Testi	46
4.3.3. Rekristalizasyon İşlemi	46
4.3.4. Çekme Testi	47
4.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi	48
BÖLÜM 5	49
BULGULAR VE TARTIŞMA	49
5.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	49
5.2. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI	50
5.2. SERTLIK TESTİ SONUÇLARI	53
5.4. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI	53
5.5. TARAMALI ELEKTRON MIKROSKOBU (SEM) ANALİZİ SONUÇLARI	57
BÖLÜM 6	60
SONUÇLAR	60
KAYNAKLAR	62
ÖZGEÇMİŞ	65

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1.	Kaynar dökümün şematik gösterimi a) Kaynama olayının oluşumu b) kaynar dökülmüş çelik külçenin görünümü	17
Şekil 3.2.	Karbonun çeliğin mekanik özelliklerine etkisi.....	20
Şekil 3.3.	Saf demirin soğuma eğrisi grafiği	23
Şekil 3.4.	Demir (Fe)-sementit (Fe_3C) faz diyagramı	25
Şekil 3.5.	a) Ostenit, b) Ferrit, c) Perlitin ısı mikroskobu görüntüleri	29
Şekil 3.6.	Alaşımız çeliklere uygulanmış yumuşatma, normalizasyon, küreselleştirme ve sertleştirme işlemlerinin tavlama sıcaklık aralık değerleri.....	31
Şekil 3.7.	Tavlama işleminin şematik gösterimi	32
Şekil 3.8.	Normalizasyon tavlama işlem adımları	34
Şekil 3.9.	Yumuşatma tava ve normalizasyon işlemi yapıldıktan sonra ötektoid bileşime sahip çelikte oluşan perlitik yapılar arasındaki farkların şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.10.	Küreselleştirme tavına tabi tutulmuş %1.1 C içeren ötektoid üstü bir çeliğin yapısında bulunan küreselleşmiş sementitlerin görünümü.....	37
Şekil 3.11.	Martenzit yüzde oranının sıcaklığa göre değişimini gösteren eğri.....	39
Şekil 3.12.	Su verilen karbon çeliklerinde elde edilen en yüksek sertlik değerinin karbon oranına göre değişimini gösteren eğri	40
Şekil 3.13.	Çelik malzemelerde kritik soğuma hızının karbon oranına göre değişimini gösteren eğri.	41
Şekil 4.1.	Deney numunelerinin hazırlanması.....	44
Şekil 4.2.	Zımparalama ve parlatma cihazı Tegramin-30 cihazı.....	45
Şekil 4.3.	Rekristalizasyon ısı işlem cihazı.....	46
Şekil 5.1.	St37 yapı çeliğinin mikroyapı görüntüsü.	49
Şekil 5.2.	Soğutma işlemleri mikroyapı görüntüleri a) 700 °C'de 3 saat bekletilerek fırında bekletilme, b)suyun içerisinde tam soğuyana kadar su verme, c) suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutma, d) suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarıda soğutma işlemleri.	50

Şekil 5.3. Aşınma testi sonucunda a) St37 çeliğine 20 N, b) St37 çeliğine 40 N, c) rekristalizasyon sonrası suda bekletilen numuneye 20 N, d) rekristalizasyon sonrası suda bekletilen numuneye 40 N, e) tam suda bekletilen numuneye 20 N, f) tam suda bekletilen numuneye 40 N, g) 1 sn. suda bekletilen numuneye 20 N, h) 1 sn. suda bekletilen numuneye 40 N, i) 10 sn. suda bekletilen numuneye 20 N, j) 10 sn. suda bekletilen numuneye 40 N yük altındaki SEM görüntüleri	52
Şekil 5.4. Çekme test sonucu.....	53
Şekil 5.5. Isıl işlem uygulanmamış St37 çelik numunenin çekme diyagramı.....	54
Şekil 5.6. Suyun içerisine 1 sn. daldırılıp dışarda soğutulan numunenin çekme diyagramı.....	54
Şekil 5.7. Suyun içerisinde 10 sn. suya daldırılıp dışarda soğutulan numunenin çekme diyagramı.	55
Şekil 5.8. Suyun içerisinde soğuncaya kadar tam su verilen numunenin çekme diyagramı.....	55
Şekil 5.9. Fırında soğutulan numunenin çekme diyagramı.	56
Şekil 5.10. Isıl işlem uygulanmamış St37 yapı çeliğinin SEM görüntüsü.....	57
Şekil 5.11. Rekristalizasyon işlemi sonrası fırında soğutulan numunenin SEM görüntüsü.....	58
Şekil 5.12. Suyun içerisinde tam soğuyana kadar su verme işlemi yapılan numunenin SEM görüntüsü.....	58
Şekil 5.13. Suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutulan numunenin SEM görüntüsü.....	59
Şekil 5.14. Suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarda soğutma yapılan numunenin SEM görüntüsü.....	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları	10
Çizelge 3.2. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları	11
Çizelge 3.3. Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları	12
Çizelge 3.4. Çeliklerin türk standartlarına göre gösterimi	13
Çizelge 3.5. Az alaşımlı çeliklerin türk standartlarına göre gösteriminde kullanılan katsayılar	15
Çizelge 3.6. Alaşım elementlerinin alt sınırı.....	19
Çizelge 4.1. St 37 çeliğinin kimyasal kompozisyonu	44
Çizelge 5.1. Aşınma test sonuçları.....	51
Çizelge 5.2. Sertlik test sonuçları.....	53
Çizelge 5.3. Çekme diyagramlarından alınan çekme dayanımı ve akma dayanım verilerinin analizi	56

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

C	: karbon
Mn	: mangan
Al	: alüminyum
P	: fosfor
Si	: silisyum
H ₂	: altın
S	: kükürt
Ni	: nikel
CO	: karbon monoksit
MnS	: mangan sülfür
Mn ₃ C	: mangan kükürt
SiO ₂	: silisyum oksit
mm	: milimetre
cm	: santimetre
N	: newton

KISALTMALAR

AISI	: American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)
ISO	: International Organization for Standardization (Uluslararası Standartlar Organizasyonu)
SAE	: Society of Automobile Engineers (Otomotiv Mühendisleri Topluluğu Standartları)
DIN	: Deutscher Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)
JIS	: Japanese Industrial Standard (Japon Standartları Enstitüsü)

- EN : European Norm (Avrupa Normu)
IIW : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)
ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TS : Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Mühendislik malzemelerinin seçiminde ki en büyük etken kullanılacak yerdir. Malzemelerin kullanılacak yere göre farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip olması beklenir. Malzemelerin bulunduğu kimyasal ortamın da malzemenin mekanik özelliklerine etkisi vardır. Çelik malzemelerin çeşidinin fazla olması, mühendisler için bir avantaj sağlamaktadır. Genellikle kullanılan çeliklerin maliyetinin ucuz ve dayanıklı olması tercih edilir.

Metal ve alaşımlarının bazı özellikleri üretildiği halleriyle tam olarak kullanım ihtiyaçlarını karşılamayabilir. Bu malzemeler üzerinde ilave işlemler yapılarak özelliklerinin geliştirilmesi mümkün olabilir. Kısacası malzemelere çeşitli yollarla alaşım elementi ekleyip kullanılacak yere uygun hale getirilebilir.

Mühendislik malzemesi olarak kullanılan metal ve alaşımlar genellikle bir veya daha fazla ısıtım işlemi uygulandıktan sonra kullanım için hazır hale gelmektedirler. Kullanılacak malzeme kazandırılmak istenilen özellik veya özellikler alaşımda bulunup yetersiz olabilmekte veya alaşıma tamamen yeni bir özellik kazandırılmak istenebilir. Bu süreç içerisinde dikkat edilecek en önemli hususlardan biri ise malzeme bir özellik geliştirirken, diğer bir özelliğin gerileyebileceğidir.

Uygulamalarda yaygın olarak kullanılan çelik türleri şu şekilde sıralanabilir;

- Genel yapı çelikleri
- Paslanmaz çelikler
- Takım çelikleri
- Makine yapım çelikleri
- Beton çelikleri

Tüm bu çelik çeşitleri sahip oldukları özellikleri ve kullanım yerlerine göre ayrılmaktadırlar. Çelik malzeme arasında en yaygın olarak kullanılan çelik türü yapı çelikleridir. Yapı çelikleri başta çelik konstrüksiyon yapılarda, makine ve gıda endüstrisinde olmak üzere binalarda, ticari yapılarda, köprülerde, demir yollarında, zemin altyapı projelerinde kullanılmaktadır.

Endüstride yaygın olarak St 37 yapı çeliği kullanılmaktadır. Düşük karbonlu, kaynak edilebilirliğinin ve sünekliği iyi olması ST 37 yapı çeliğinin en büyük avantajlarından. Düşük karbonlu bir çelik olmasından dolayı düşük üretim maliyeti nedeniyle yapısal ve kaynaklı uygulamalarda, yüksek şekil ve kalınlık alternatifleri sayesinde otomotiv başta olmak üzere pek çok sektörde kullanılan bir çelik türüdür. Düşük karbonlu çeliğin kaynak edilebilmesinden dolayı birleştirilmesi kolaydır. Düşük karbonlu çeliklerin bir diğer avantajı ise yapısında bulunan karbon miktarının düşük olması sebebiyle soğuk işlemlerle iyileştirilebilirler, yani ısıtma işlemi uygun bir çelik türüdür.

Bu çalışmanın amacı düşük karbonlu St 37 yapı çeliğinin ısıtma işlemi uygulaması öncesi ve sonrasında malzemenin yapısındaki değişimlerin ve mekanik özelliklerin incelenmesidir.

Çalışmanın ikinci bölümünde konu hakkında yapılan literatür araştırılması ve yapılan bu araştırmalardan çıkarılan sonuçlar paylaşılmıştır. Üçüncü bölümde çeliğin özellikleri, çeliğin sınıflandırılması, çeliğin yapısı ve çeliklerde uygulanan ısıtma işlemleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde deney malzemeleri, deneylerin tanıtılması ve deneyde uygulanan adımlar anlatılmıştır. Beşinci bölümde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar ve literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılması verilmiştir. Son bölümde ise sonuçlar ve öneriler verilmiştir.

BÖLÜM 2

LİTERATÜR TARAMASI

D. A. Fadare ve arkadaşlarının 2011 yılında yapmış oldukları “Isıl işlemin ST 37-2 çeliğine mekanik özellikleri ve mikroyapısına etkisi” çalışmasında çelik numunelere farklı sıcaklıklarda ve farklı bekleme sürelerinde bir elektrikli fırında ısıl işlem uygulanmıştır. Daha sonra soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan deney sonunda numunelerin mikroyapıları incelenerek ST37-2 çeliğinin özellikleri, çeşitli ısıl işlemlerle kullanılacak yere göre yapısı ve mekanik özelliklerinin değiştirilebilir ve iyileştirilebilir olduğu sonucuna varılmıştır. Esas olarak ferrit yapıya sahip tavllanmış numunelerin de düşük çekme dayanımı ve sertlik değerini verdiği, yüksek süneklik ve tokluk değerini verdiği, martenzit içeren sertleştirilmiş numune yüksek çekme dayanımı ve sertliği, düşük süneklik ve tokluk değerinde olduğu belirlenmiştir [1].

Cihan EKİNCİ, 2011 yılında yapmış olduğu çalışmada 3 x 3 x 2 mm³ ebatlarında kesilen düşük karbonlu mikro alaşımlı çelik numuneler 3 farklı ısıl işlem ve 4 farklı soğutma ortamında numunelerde meydana gelen sertlik ve mikro yapıya soğuma hızının etkisi incelenmiştir. Numuneler sırayla 400 °C’de 4 saat bekletilmiş, 800 °C’de 4 saat bekletilmiş ve 1000 °C’de hemen bekletilme yapılacak şekilde 3 farklı ısıl işlem uygulanmış ve ardından fırında, havada, suda ve sıvı azotta soğutma işlemleriyle soğuma hızı uygulanmıştır. 400 °C’de numune 4 saat bekletilerek yapılan ısıl işlemin sonucunda malzemenin mikro yapısında bir değişim olmadığı görülmüştür. 800 °C sıcaklığında fırında 4 saat bekletilerek yapılan ısıl işleminde ise östenitleşme gerçekleşmediği ve yapıda bulunan ferritin dönüşüme uğramadan yapıda kalmasıyla mikro sertlikte azalma olduğu görülmüştür. 1000 °C’de fırında bekletilmeden hemen soğutulan çeliklerde artan soğuma hızının mikro sertlik değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Çalışma sonucunda düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerin ısıl işlem sonucunda hızlı soğutulmalarıyla yapıda martenzit oluşumu sonucu sertlik değerinde artış olmuştur. Soğuma hızının düşük olduğu durumlarda çeliklerin mikro

sertliklerinde bir azalma belirlenmiştir. Isıl işlemin bu durum için mikro yapıda yapıyı iyileştirme etkisi olduğu yönünde yorumlanmıştır [2].

Ashish Thakur ve Gebre-egziabher Aregawi 2019 yılında yaptığı çalışmada ısı işleminin ST 37-2 araç arka kolun mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkisi (MIE'de vaka çalışması) çalışmasında ısı işleminin mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Arka aks taşıyıcı kolu ısı işlemin için farklı sıcaklık seviyelerinde fırına atılmış, bekletilmiş ve daha sonrada soğutulmuştur. Yapılan deney sonucunda ST 37-2 malzemesinin yapısında ferrit yapıya sahip tavllanmış numunelerin düşük gerilme mukavemetinde, martenzit içeren sertleştirilmiş numune ise yüksek çekme dayanımında olduğu bulunmuştur [3].

Mohsen Balavar ve Hamed Mirzadeh'nin 2018 yılında yapmış oldukları “düşük karbonlu çeliğin ısı işlemin ve termo-mekanik işleme yollarına dayalı mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi” çalışmasında st 37 düşük karbonlu yapı çeliğine gerilme özelliklerinin iyileştirilmesi ve sertleşme davranışının incelenmesi için ısı işlemin uygulanmıştır. Isıl işlemin sonucunda tam tavlama, yüksek süneklik, düşük mukavemet ve plastik davranışın başlangıcında akma noktası uzaması görülmüştür. Bunların yanında farklı bantlar halinde yapıda iri ferrit taneleri ve perlit kolonileri olan bir tabaka oluştuğu gözlenmiştir. Çalışmada soğuk haddelenmiş sac, süneklik özelliğinin düşük olduğu ve mukavemet seviyesinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada kullanılan ince taneli levhada elde edilen verilen ve uygulanan ısı işlemler sonucunda ısı işlemin yöntemleriyle çeliklerin özelliklerinin istenilen şekilde değiştirilebileceği gösterilmiştir [4].

M. Najafi ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları geliştirilen çift modlu tane boyutu dağılımı ve ısı işlemin yoluyla yapısal çeliğin geliştirilmiş mekanik özellikleri çalışmasında St37 yapı çeliğinin gerilme özelliklerinin ve gerilme-sertleşme oranının iyileştirilmesi için soğuk haddeme ve ısı işlemin uygulanmıştır. Kaba çift fazlı mikroyapı, ferritik-perlitik levhanın kritikler arası ısı işlemin yoluyla işlenmiş ve bunun sonucunda gerilme mukavemetinin arttığı ve akma noktasının değiştiği belirlenmiştir. Deneyde çalışma dayanıklılığı artırılmadığı için mukavemet ve süneklik değerlerinde bir değişim olmadığı belirlenmiştir. Çalışmada elde edilen sonuç, ısı işlemin yöntemi

olan soğuk haddeleme yardımıyla yapı çeliklerinin çekme özellikleri ve sertleştirme yani mekanik özelliklerinin davranışlarını kontrol etme olasılığını göstermiştir [5].

Hamit Aydın 2016 yılında yapmış olduğu “Çeliklerin çalışma ortamlarının mekanik özelliklerine etkisi” makale çalışmasında St37, St60 ve civa çeliği olmak üzere 3 çeşit çelik malzemenin farklı kimyasal ortamların mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. ASTM E-8 standartlarına göre hazırlanan çekme numuneleri H₂SO₄, KOH, NaOH, makine yağı ve saf su içerisinde bekletilmiştir. İkinci aydan başlayarak her ay üç numune için çekme testleri yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde mekanik özellikleri en çok etkileyen ortamın H₂SO₄ olduğu ve bu ortamda bekletilen St37 çeliğinin en fazla etkilenen malzeme olduğu görülmüştür. Ortamdan en az etkilenen çelik türü ise civa çeliği olduğu sonucuna varılmıştır [6].

Nagihan Havuş, 2019 yılında yapmış olduğu çalışmada ise düşük karbonlu St37 çeliğinin sınırlandırılmış yivli presleme ile mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi incelenmiştir. Deney sonucunda sertlik ölçümü yapılan St37 çelik malzemelerinde sertlik ve mukavemet değerlerinde artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu metallerin SEM görüntülerine bakıldığında ise de yüzeyde ve yüzeyin hemen altındaki bölgelerde aşırı plastik deformasyonun olduğu ve buna bağlı olarak da ince taneli yapıların varlığı gözlemlenmiştir [7].

Adnan Çalik 2009 yılında AISI 1020, AISI 1040 ve AISI 1060 çeliklerinin mikro yapıları ve sertliklerini incelemiş olduğu çalışmada numuneler ısıtılardan sonra havada, fırında ve suda 3 ortamda soğutulma işlemi uygulanmıştır. Çalışma sonucunda soğuma hızının artmasıyla birlikte mikro sertliklerin arttığı görülmüştür. Bu çalışmadan çıkarılan diğer bir sonuç ise hızlı soğutma gerçekleştirildiğinde numunelerin karbon oranlarına bağlı olarak karbon oranının artması neticesinde martenzit oranının arttığına, yavaş soğuma hızı uygulandığında ise martenzit yapının oluşmadığı görülmüş olup çeliklerin mikro sertliklerinin soğuma hızının karbon oranına bağlı olduğu sonucu çıkarılmıştır [8].

İsmail Serkan GÜLGEN, 2008 yılında yazmış olduğu yüksek lisans tezinde döküm yoluyla elde edilmiş AISI 4340 çeliğinin farklı ısıtıl işlem uygulanarak mekanik

özelliklerinde ki değişimleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yüksek mukavemet ve tokluk kazandıran ısıtım işlem sıcaklığının 550 °C’de yapılan temperleme işlemiyle elde edilebileceği sonucu çıkartılmıştır [9].

Mehmet UZKUT ve arkadaşları 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada farklı karbon oranlarına sahip çelik numunelere su verme işlemi uygulandıktan sonra sırasıyla 100, 200, 400 ve 600 °C sıcaklık değerlerinde temperleme işlemi uygulanmış ve bu sayede malzemelerin mekanik özelliklerindeki değişim incelenmiştir. Yapılan çekme deneyi ve ısıtım işlemler sonucu karbon oranındaki artışın akma ve çekme dayanımı değerlerini artırdığı sonucu ortaya çıkmıştır [10].

Ayhan AYTAÇ ve arkadaşları 2018 yılında yapmış oldukları AISI 1008, 1040 ve 4140 çeliklerinde ısıtım işlem karbon oranı ve alaşım elementlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Hazırlanan deney numunelerine çekme testi, mikroVickers sertlik testi ve mikroyapı görüntüleme işlemleri uygulanmıştır. Yapılan deney sonuçlarında akma ve çekme dayanımında artış olduğu, yüzde uzama ve yüzde kesit daralması değerlerinde düşüş olduğu görülmüştür. Karbon oranı çekme dayanımında ve yüzde kesit daralmasında daha etkili olurken, alaşım elementleri akma dayanımı ve yüzde uzama değerleri üzerinde daha çok etkili olduğu görülmüştür [11].

BÖLÜM 3

KURAMSAL TEMELLER

3.1. ÇELİĞİN TANIMI VE ÜRETİM YÖNTEMLERİ

3.1.1. Çeliğin Tanımı

Çelik, yapısında maksimum %2.06 oranında karbon elementi içeren demir-sementit alaşımından oluşur. Çelik malzemeler herhangi bir işlem yapılmadan şekil verilebilirler. Kullanım alanları, sahip oldukları farklı özellikler gibi nedenlerden dolayı paslanmaz çelikler, genel yapı çelikleri, takım çelikleri, beton çelikleri gibi farklı çeşitlerde çelik malzemeleri günümüzde hemen hemen her alanda kullanılmaktadırlar.

Çelik içerisinde karbon (C) elementi hariç farklı alaşım elementleride vardır. Alaşım elementleri çelik içerisinde farklı oranlarda bulunarak çelikte farklı özellikler elde edilebilmesine veya sahip oldukları özellikleri geliştirmesi için imkan sağlanır. Alaşım elementi içerisinde kükürt ve fosfor elementleri zararlı elementler oldukları için yapı içerisinde fazla olursa malzemenin yapısına zarar verir. Yüksek fırından çıkan ham demirin içerisinde %0.7 - 3.5 oranında silisyum element, ve maksimum %0.8 veya daha az oranda mangan, fosfor ve kükürt gibi alaşım elementleri vardır [12].

Ham demirde karbon da dahil olmak üzere tüm katıların oksijene olan ilgilerinin fazla olmasından dolayı sıvı halde bulunan ham demir çeşitli yollarla verilen hava ve oksijen sayesinde katkılar yakılır. Bu olay “üfleme” olarak adlandırılır. Başlangıçta oksijen ve demir elementleri $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{FeO}$ şeklinde reaksiyona girip demir (II) oksit (FeO) oluşturur. Sıvı halde oluşan FeO ham demirde çözünerek alaşım elementleriyle reaksiyona girer. Aşağıda bazı alaşım elementleriyle FeO'nin arasında meydana gelen reaksiyonlar verilmiştir [12].

- $2\text{Fe} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$
- $\text{Fe} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$
- $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$
- $2\text{FeO} + \text{S} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SO}_2$
- $5\text{FeO} + 2\text{P} \rightarrow 5\text{Fe} + \text{P}_2\text{O}_5$ [12].

Bu reaksiyonlarda olduğu gibi oksijen elementi demir oksitten demir alaşım elementlerine geçer ve böylelikle demir indirgenir ve refakat elementleri oksitlenmiş olur. Üfleme işlemi sırasında, üflenene hava sıvı metali karıştırma görevi yaptığı için reaksiyonlar hızlı gerçekleşir. Yukarda verilmiş olan reaksiyonlar sonucunda sadece fosfor elik içerisinde kalır diğer oksitlenen alaşım elementlerinin büyük kısmı cürufa geçer. Metal olmayan bir element olan fosfor bazik bir madde ile bağlanabilir. Bu sebeple, sıvı metale sönmemiş kireç (CaO) katılarak fosforu kalsiyum trifosfat halinde bağlayan bazik bir cüruf oluşturur [12].

Bu açıklama neticesinde çıkarılacak sonuçlar şu şekildedir:

- elik üretiminde en önemli nokta karbon oranını istenilen düzeye indirmek,
- Mangan ve Sülfür oranlarını sırasıyla %0.8 ve %0.5'in altında istenilen değere düşürmek,
- Kükürdü alaşımdan uzaklaştırmak,
- Fosforu cürufa bağlamak,
- eliğe istenilen oranlarda alaşım elementlerinin katılmasını sağlamak olarak sıralanabilir [12].

3.1.2. Çeliğin Üretim Yöntemleri

Tarih boyunca elik üretimi için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Dünya genelinde elik üretim yöntemi yaygın olarak şu iki çeşit yöntem kullanılmaktadır:

- Yüksek Fırın Metodu: Bu metod da hammadde olarak demir cevheri kullanılmaktadır.

- Elektrik Ark Ocağı Metodu: Bu metod da ise hammadde kaynağı demir içeren hurda malzemelerdir. Bu metod geri kazandırma yöntemi olarak da ifade edilebilir.

Çelik üretim yöntemleri şu şekilde sıralanabilir:

- Bessemer yöntemi
- Thomas yöntemi
- Siemens-martin yöntemi
- Döner konverter yöntemi
- LD yöntemi
- LDAC yöntemi
- Kadlo Yöntemi
- Elektrikli fırın yöntemi

3.2. ÇELİĞİN SINIFLANDIRILMASI

Çeliklerin tanımı ve kullanım amacı açısından farklı sınıflandırma yapmak mümkündür. Bu sınıflandırmalardan en yaygın kullanımları şu şekildedir:

- Yapısında bulunan karbon miktarına göre,
- Alaşım elementi oranına göre,
- Üretim metotlarına göre,
- Şekillendirme tiplerine göre,
- Döküm yöntemine göre,
- Uygulanan ısı işlem yöntemlerine göre,
- Mikro yapılarına göre,
- Kullanım alanına göre sınıflandırma olmak üzere sınıflandırılabilir.

Bu sınıflandırmanın yanında çelikler alaşımlı çelikler ve alaşımsız çelikler olmak üzere 2 ana gruba ayrılırlar.

3.2.1. Karbon Oranına Göre Çeliğin Sınıflandırılması

Çelik malzemelerin kullanım kolaylığı olması açısından en çok karbon oranına göre sınıflandırılma yapılır. Karbon oranına göre çelikler; %0.25'e kadar karbon içeriğine sahip çelikler düşük karbonlu, %0.25-0.55 arasında karbon içeriğine sahip çelikler orta karbonlu, %0.55-0.9 arasında karbon içeriğine sahip çelikler yüksek karbonlu çelikler, %0.9-1.6 arasında karbon içeriğine sahip çelikler ise yüksek karbonlu takım çelikleri olmak üzere 4 grupta toplanmıştır. Bu çelik türlerinin özellikleri ve çeşitleri aşağıda açıklanmıştır.

3.2.1.1. Düşük Karbonlu Çelikler

Düşük karbonlu çelikler %0.25 oranında karbon içeren çeliklerdir ve çok yumuşak ve yumuşak çelikler olarak 2'ye ayrılırlar.

- Çok yumuşak çelikler: %0.7-0.15 arasındaki oranlarda karbon içerirler. Bu çelikler soğuk şekillendirmeye uygundur.
- Yumuşak çelikler: %0.15-0.25 arasındaki oranlarda karbon içerirler. Çok yumuşak çeliklere nazaran daha yaygın olarak kullanılırlar. İyi kaynak edilebilme özelliğine sahip bu çelikler su verme yöntemi ile iyi sertleştirilemezler [12].

Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Düşük karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları [13].

Element	% Aralığı
Karbon	0.00-0.20
Mangan	0.30-0.60
Silisyum	0.10-0.20
Fosfor	Max. 0.04
Kükürt	Max. 0.05

3.2.1.2. Orta Karbonlu Çelikler

Yapılarında %0.25 ile %0.55 arasında bir oranda karbon bulunan çelikler orta karbonlu çelikler olarak adlandırılır. Yapı ve özellik bakımından bu çelikler ısıl işleme uygundur. Sahip oldukları karbon miktarlarına göre şu 3 gruba ayrılırlar:

- Genel dövme çelikleri: %0.25-0.35 arasındaki oranlarda karbon içerirler.
- Mil çelikleri: %0.35–0.45 arasındaki oranlarda karbona sahiptirler. Bu tür çelikler tel, mil ve dingil gibi yapılarda kullanılırlar.
- Aşınmaya dayanıklı çelikler: %0.45–0.55 arasındaki oranlarda karbon içerirler. Genellikle bu çelikler ray, ray tekerleri, silindir ve pres kalıplarının yapımında kullanılırlar [12].

Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Orta karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları [14].

Element	% Aralığı
Karbon	0.20-0.50
Mangan	0.60-0.90
Silisyum	0.15-0.23
Fosfor	Max. 0.04
Kükürt	Max. 0.05

3.2.1.3. Yüksek Karbonlu Çelikler

Yüksek mukavemet ve yüksek aşınma direncine ihtiyaç duyulan alanlarda kullanılan yüksek karbonlu çeliklerde %0.55-0.9 arasında karbon oranı bulunur. Pres kalıp blokları bu çeliklere örnek olarak verilebilir. Bu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Yüksek karbonlu çeliklerin kimyasal bileşim aralıkları [13].

Element	% Aralığı
Karbon	0.55-0.90
Mangan	0.70-1.00
Silisyum	0.15-0.30
Fosfor	Max. 0.04
Kükürt	Max. 0.05

3.2.1.4. Yüksek Karbonlu Takım Çelikleri

Yüksek karbonlu takım çeliklerde ise %0.9 ile %1.6 oranında karbon içeriğine sahiptirler. Bu çelikler yüksek aşınma direnci ve yüksek mukavemet gerektiren yerlerde kullanılır. Örneğin torna kaleminde ve matkap uçlarında kullanımı yaygındır.

3.2.2. Çeliklerin Standartlara Göre Gösterimleri

Çelik üreticilerinin belli bir standarta göre ihtiyaç olan çeliği üretmeleri ve bu çeliklerin satın alınması işlemlerinde kolaylık sağlaması için Dünya genelinde farklı standartlar oluşturulmuştur. En önemli çelik standartları şu şekildedir:

- TS: Türkiye Standartlar Enstitüsü
- EN: Avrupa Standartlar Enstitüsü
- DIN: Alman Standartlar Enstitüsü
- AISI: Ameraikan Standartlar Enstitüsü
- SAE: Otomotiv Mühendisleri Topluluğu Standartları
- ASTM: Amerikan Malzeme Deneme Topluluğu Standartları
- JIS: Japon Standartları Enstitüsü
- ISO: Uluslararası Standartlar Organizasyonu

Belirtilen bu enstitülerin büyük kısmı çeliği kendi normlarına göre sınıflandırmıştır. Bu kuruluşlardan yalnızca AISI ve SAE aynı çelik için aynı kodu kullanmaktadır.

3.2.2.1. Çeliklerin Türk Standartlarına Göre Gösterimi

Çelik ve dökme demirlerin bileşimi ve özelliklerine göre kısa gösterişleri TS 1111 ve bu standartların güncelleştirilmiş formlarında ayrıntılı olarak çizelge 3.4'de açıklanmaktadır.

Çizelge 3.4. Çeliklerin türk standartlarına göre gösterimi [12].

Üretim Yöntemi	Gösterimi	Anlamı
Ergitme Yöntemi	T	Thomas konverteri
	O	Oksijen konverteri
	M	Siemens-Martin Ocağı
	E	Elektrik Ark Ocağı
	I	İndüksüyon Ocağı
Döküm Şekline Göre	S	Sakinleştirilmiş
	Sy	Yarı Sakinleştirilmiş
	K	Kaynar Dökülmüş

3.2.3. Mekanik Özellikleri Esas Alınan Metaller

Mekanik özellikleri dikkate alınan metal malzemelerin ısıtım işlem yöntemi için öngörülemez çelikler olup Fe işaretiyle birlikte çekme dayanımlarının en düşük değerleri ile tanımlanır. Örneğin, Fe 37 şeklinde ifade edilen yapı çeliğinin çekme dayanımının en düşük değeri 37 kgf/mm²'dir. MBS Fe 37 biçiminde gösterilen yapı çeliği ise Siemens-Martin ocağında ergitilmiş ve sakın dökülmüş genel yapı çeliğidir [12].

3.2.4. Kimyasal Bileşimi Esas Alınan Metaller

Kimyasal bileşimi esas alınan çelikler alaşımlı ve alaşımsız olmak üzere 2 gruba ayrılırlar. Bu çelikler ısıtım işleme de uygundur.

3.2.4.1. Alaşimsız Çelikler

Bu çelikler C harfiyle ve ortalama olarak alınan karbon miktarının 100 katıyla ifade edilirler. Bir alaşimsız çeliğin yapısında %0.35 oranında karbon bulunan alaşimsız ve safinleştirilmiş oksijen konverter çeliği OS C 35 biçiminde gösterilir. Alaşimsız çeliğin türünü karbon işaretinden sonra yazılan küçük harfler gösterir. Örneğin Ck 45 ortalama karbon oranı %0.45 olan alaşimsız asal çelik, Cf 53 ise % 0,53 oranında karbona sahip ve yüzeyi sertleştirilebilme özelliğine sahip alaşimsız çelik olarak ifade edilir. Asal çelik ifadesi, kimyasal bileşimi esas alınan, kükürt ve fosfor oranlarının toplamı % 0.035'den az olan ve ısıtma işlemi uygulanabilir çelik anlamına gelmektedir [12].

Ucuz ve kolay şekillendirmeye elverişli olan alaşimsız çeliklerin mekanik özellikleri sahip oldukları karbon oranına göre değişmektedir. Demir çelik endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Sertleşme kabiliyeti yetersiz olan alaşimsız çeliklerden üretilen parçaların mukavemeti istenilen düzeye çıkarılamaz. Bu çeliklere sertleşme işlemi yapıldığında malzemede çatlama ve çarpılmalar meydana gelir [15].

3.2.4.2. Alaşımli Çelikler

Alaşımli çelikler az alaşımli, otomat çelikler ve yüksek alaşımli çelikler olmak üzere 3 gruba ayrılırlar. Alaşım elementi oranları toplamı %0.5'den az ise az alaşımli, fazla ise yüksek alaşımli çelikler adı verilir.

Çelik malzemelere alaşım eklenmesinde ki amaçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Sertleşme kabiliyetini iyileştirmek,
- Mekanik özellikleri iyileştirmek,
- Korozyon direncini artırmak,
- Manyetik özellikleri iyileştirmek olarak sıralanabilir.

Az Alaşımli Çelikler

Alaşımli çeliklerin gösteriminde alaşımli çeliklerin aksine C harfi yazılmaz. Yüzde karbon miktarının ortalamasını 100 katı yazılır ve ardından oran sayısına göre alaşım elementleri ve bu elementlerin çizelge 3.5'deki katsayılarla çarpılarak tam sayıya yuvarlatılmış ortalama yüzde oranları gösterilmiştir [12].

Çizelge 3.5. Az alaşımli çeliklerin türk standartlarına göre gösteriminde kullanılan katsayılar [12].

Alaşım Elementi	Katsayı
Cr, Co, Mn, Ni, Si, W	4
Al, Be, Cu, Pb, Mo, Nb, Ta, Ti, V, Zr	10
P, S, N, Ce, C	100
B	1000

Otomat Çelikler

Otomat çeliklerde karbon oranları az alaşımli çeliklerdeki gibi yazılır. Sırasıyla S, Mn, Pb ve P elementlerinden çelik malzemede bulunan elementler gösterilir. Bu gösterimde sadece kükürt elementinin ortalama yüzde oranı 100 ile çarpılarak yazılır. Örneğin içeriğinde % 0.45 C, % 0.20 S, %0.15 – %0.30 Pb bulunan bir otomat çeliği 45SPb20; içeriğinde % 0.09 C, % 0.15 – 0.30 S, % 0.90 – 1.30 Mn ve % 0.15 – 0.30 Pb bulunan otomat çeliği ise 9SMnPb23 şeklinde gösterilir [12].

Yüksek Alaşımli Çelikler

Bu tür çeliklerin gösteriminde ilk olarak "X" harfi kullanılır. Karbon oranı ise az alaşımli çeliklerdeki gibi yazılır. Alaşım elementlerinin gerçek yüzde oranı kendi simgesinden sonra sırasıyla yazılır. İkinci derecede önemli olan alaşım elementlerinin oranları gösterilmeyebilir. Örneğin çeliğin içeriğinde % 0.08, % 18 Cr ve % 8 Ni bulunan yüksek alaşımli çelik X8Cr18Ni8 şeklinde; içeriğinde % 0.10 C, % 18 Cr, %9 Ni ve %2 Ti bulunan yüksek alaşımli çelik X10Cr18Ni9Ti2 şeklinde ve içeriğinde

% 0.10 C, % 22 Cr, %5 Ni, % 0.6 Mo, % 0.6 Cu elementlerine sahip yüksek alaşımlı çelik X10Cr22Ni5MoCu biçiminde ifade edilir [12].

3.2.5. Çeliğin Katılaşması

Çeliğin kaynak dökülmüş çelikler ve sakin dökülmüş çelikler olmak üzere 2 şekilde katılaşması vardır. Bu çeliklerin üretimi ve özellikleri aşağıda açıklanmaktadır.

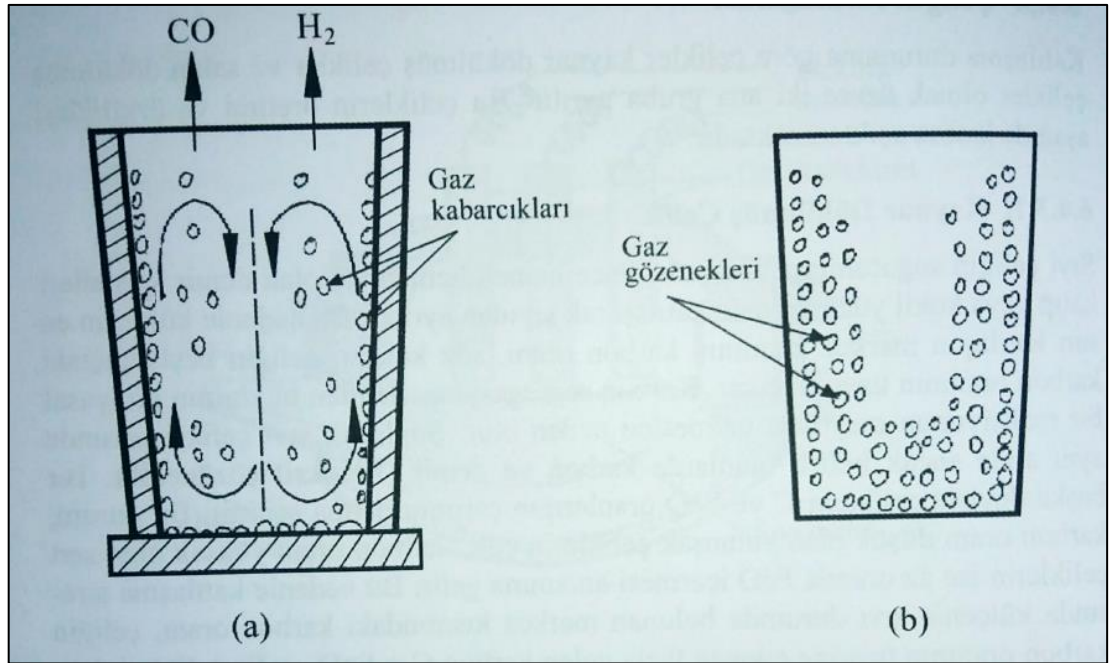
3.2.5.1. Kaynar Dökülmüş Çelik

Sıvı halde bulunan çeliğin soğutulması sırasında ilk olarak saf haldeki demir kristalleri kalıp veya kokil yüzeylerinde katılaşarak sıvıdan ayrılır. Bu sebeple külçenin en son katılaşan merkez kısmının karbon oranı, çeliğin başlangıçtaki karbon oranının üstünde bir değere çıkar. Bu durum karbon segregasyonu olarak tanımlanır. Karbon segregasyonu kimyasal bir reaksiyon oluşmasına neden olur. Sıvı çelikte aynı anda ve belli oranlarda karbon ve demir (II) oksit çözünebilir. Yani karbon oranı düşük olan yumuşak çeliklerin çok, karbon oranı yüksek olan sert çeliklerin ise az oranda FeO içerdiği anlamına gelmektedir. Bu durum ise katılaşma sırasında külçenin sıvı halde bulunan merkez kısmındaki karbon oranı, çeliğin karbon oranının üzerine çıkınca fazla gelen karbon $C + FeO \rightarrow Fe + CO$ reaksiyonu neticesinde yapıdan ayrılır. Oluşan bu reaksiyon sonucunda karbon monoksit (CO) gazı sıvı metal içerisinde kabarcıklar oluşturur. Oluşan bu kabarcıklar aynı zamanda aşağıdan yukarıya doğru yükselirken sıvı çeliğe kaynıyor görünümü verir. Kaynama şeklindeki görünümü neticesinde kaynar dökülmüş çelik ismini alırlar. Oluşan kabarcıklar, düşük sıcaklıklarda ergiyen safsızlık elementlerini külçenin ortasına doğru çeken bir akım oluşturur. Katılaşmanın başlamasıyla kabarcıkların bir kısmı külçenin kenar kısımlarında bulunur. Kaynar dökümün gösterimi ve kaynar dökülmüş haldeki bir çelik külçe şekil 3.1'da verilmiştir [12].

Kaynar dökülmüş çeliklerin özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Karbon oranı düşük olan çelik külçelerde gaz boşlukları oluşabilir. Bu boşluklar yüzey altında ve belli derinliklerde dir. Oluşan bu boşlukların büyük bir kısmı sıcak dövme veya haddeleme sırasında kaynarak ortadan kaldırılabilirler.
- Bu yöntem ile üretilen külçenin merkezinde segregasyon bölgesi oluşur. Oluşan bu bölgede kükürt ve fosfor bulunur.

Gaz kabarcıkları katılaşma işlemi sırasında yaşanan çekmeyi büyük oranda karşıladığından bu yöntem ile üretilen külçelerde az miktarda boşluk bulunur. Bu durum külçenin kesilip atılan kısmının azalmasını ve üretim veriminin artmasını sağlar. Bu şekilde üretilen külçelerin %90'ı ara ürün olarak kullanılır [12].



Şekil 3.1. Kaynar dökümün şematik gösterimi a) Kaynama olayının oluşumu b) kaynar dökülmüş çelik külçenin görünümü [12].

3.2.5.2. Sakin Dökülmüş Çelik

Sert ve alaşımlı çelikler gaz oluşturmada dökülmeleri ve kokil içerisinde sakın olarak katılaşması gerekir. Çünkü bu çeliklerde yırtılmanın oluşmaması istenir. Sert ve

alaşımli çelikler yumuşak çeliklerden farklı olarak daha düşük yük ve basınçta haddeleme işlemi gerçekleştirildiğinden bu çeliklerdeki gaz boşlukları ezilerek yok edilir [12].

Karbonmonoksit (CO) gaz oluşmaması için sıvı çelikte çözünmüş halde bulunan demir (II) oksit (FeO) bileşiği, sıvı veya katı ürünlerden oluşan Al, Ti, Ca, Si, Mn ve Mg gibi deoksidasyon elementleri sayesinde indirgenir. Bu elementler ise sıvı haldeki metalin akıtılması sırasında birer birer veya bir arada döküm potalarına atılmaktadır. Meydana gelen reaksiyonların bazıları şu şekildedir:

- $3\text{FeO} + 2\text{Al} \rightarrow 3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$
- $2\text{FeO} + \text{Si} \rightarrow 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$
- $\text{FeO} + \text{Mn} \rightarrow \text{Fe} + \text{MnO}$ [12].

Bu reaksiyonlarda görüldüğü üzere deoksidasyon elementlerinin oksijene olan ilgileri fazla olduğundan dolayı demir (II) oksidin oksijenini alarak kendileri oksitlenir ve bu oksitler ise sıvı cüruf meydana getirir. Böylelikle sakın dökülmüş çelik elde edilmiş olur [12].

Sakin dökülmüş çelikler veya diğer bir ifadeyle gazı alınmış çeliklerin bazı özellikleri aşağıda verilmiştir.

- Çelik külçe içerisinde gaz boşlukları veya gözenekler yoktur. Fakat nadir de olsa metal olmayan cüruf parçacıklar bulunabilir.
- Çelik külçede segregasyon alanı bulunmaz.
- Derin çekme boşlukları oluşabilir. Bunun sebebi katılaşma oluşumunda metal kendini çekmesi gaz boşlukları ile dengelenmediğinden oluşur. Bu durumun neticesinde %80-85 oranları arasında elde edilen verim değeri kaynar döküm yöntemiyle karşılaştırıldığında düşük kalmaktadır [12].

3.2.6. Kimyasal Bileşimin Çelik Üzerine Etkisi

Çelik sadece karbon elementinden oluşmaz. Kullanılacak çeliğin kullanım yerine göre farklı özelliklere sahip olması istenir. Malzemeye yeni özellikler kazandırmak veya sahip olduğu özellikleri artırmak veya azalmak için malzemeye alaşım elementleri eklenir. Bu elementler ve alt sınırları çizelge 3.6'da verilmiştir.

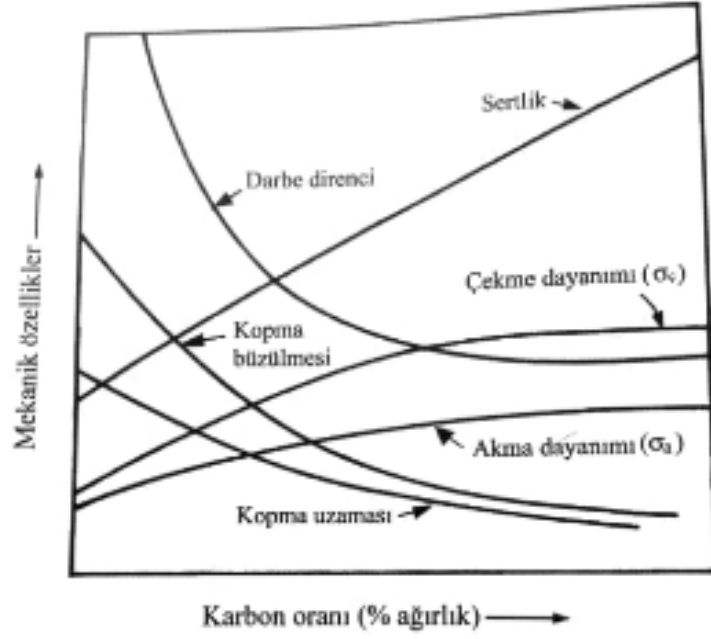
Çizelge 3.6. Alaşım elementlerinin alt sınırı [16].

Element	Alt Sınır (% Ağırlık)
Alüminyum	0.10
Bakır	0.40
Bor	0.0008
Bizmut	0.10
Kobalt	0.10
Krom	0.30
Kurşun	0.40
Mangan	1.60
Molibden	0.08
Nikel	0.30
Silisyum	0.50
Titanyum	0.05
Vanadyum	0.10

Alaşım elementleri diğer metallere farklı olarak çeliğin yapısında daha fazla değişikliğe sebep olmaktadır [16].

3.2.6.1. Karbonun Etkisi

Bir çelik malzemenin yapısal ve mekanik özelliklerini en çok etkileyen alaşım elementi karbondur. Karbonun çeliğin mekanik özelliklerine etkisi Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Karbonun çeliğin mekanik özelliklerine etkisi.

Şekil 3.2’de görüldüğü üzere karbon oranının artması çeliğin sertlik ve mukavemetini artırmakta ve sünekliğini azaltmaktadır. Bu durum çelikte karbon oranının artmasıyla sementit oranının da artmasından kaynaklanmaktadır.

- Karbonun çeliğin genel özelliklerine etkileri aşağıdaki şekildeki gibi sıralanabilir:
- Çeliğin ergime sıcaklık değerini düşürür.
- Ostenitin dönüşüm sıcaklığını düşürür.
- Çeliğin sertliğini, akma ve çekme dayanımlarını artırır.
- Çelik malzemenin darbe direnci, kopma uzaması ve kopma büzülmesi gibi değerleri düşürür.
- Çeliğe sertleşme özelliğini artırır.
- Çelik malzemenin ısıl geçirgenliği, özgül ağırlığı gibi değerleri düşürür.
- Çelik malzemenin kaynak edilmesini güçleştirir [12].

3.2.6.2. Kükürdün Etkisi

Kükürt malzemelerde istenmeyen veya azaltılmaya çalışılan bir element olsada otomat çeliklerinde talaşlı şekillendirme kabiliyetini artırmak için yüksek oranda kükürt

kullanılır [16]. Kükürt elementi çeliklerde genellikle kükürt oranı %0.05'in altındadır. Kükürt ve demir birleşerek demir sülfür (FeS) bileşimini meydana getirir. Demir sülfür bileşiği ise demirle ergime noktası düşük bir ötektik alaşım oluşturur. Ötektik alaşım çeliğin tane sınırlarında toplanır. Kükürt elementine sahip çelikle sıcak dövme veya haddeleme işlemi uygulandığında tane sınırlarında bulunan ötektik alaşım ergir. Ergiyen bu alaşım neticesinde taneler arasındaki bağlar kopar ve çelikte çatlama oluşur. Bu durum "sıcak yırtılma veya sıcak gevreklik" olarak adlandırılır [12].

Mangan (Mn) çelik içerisinde bulunuyorsa kükürt mangan ile Mangan sülfür (MnS) oluşturur. MnS'ün çoğu cürufta birleşirken diğer kısmı MnS kalıntıları olarak bileşik içerisinde dağılır. Mangan oranı, kükürt oranından 2-8 kat arasında olması istenir. Çeliklerde bazen işleme kabiliyetini arttırmak için kükürt oranı %0.08-0.35 arasında bir oranda artırılabilir. Kükürt oranının artırılması talaşlı işlemeyi kolaylaştırır bu sayede takımın aşınmasını önlemektedir. Fakat kükürt elementi çeliğin darbe dayanımını etkiler bu yüzden malzemenin kaynak edilme kabiliyetini zorlaştırır [12].

Kükürt elementi malzemenin yüzde uzamasını ve tokluğunu çok fazla etkilemesine rağmen akma ve çekme mukavemetine etkisi çok azdır. Kükürt elementinin en büyük dezavantajı ise kaynaklanabilirliği olumsuz yönde etkilemesidir [17].

3.2.6.3. Manganın Etkisi

Alaşımız çeliklerde %0.03-1.0 arasında bir oranda mangan bulunmaktadır. Manganın en büyük avantajı kükürdün olumsuz etkisini azaltmaktır [12]. Çeliğin sertleşme derinliğini, tokluğunu ve çekme mukavemetini iyileştirir. Fakat mangan şekillendirilebilirlik ve kaynaklanabilirlik özelliklerini kötü etkiler [18].

Çelikte MnS oluşumundan daha fazla mangan bulunması durumunda fazla mangan karbon ile reaksiyona girip mangan kükür (Mn₃C) oluşturur. İyi bir oksijen alıcı (deoksidasyon) olan mangan elementi çelik dökümlerin kalitesini iyileştirici özelliğe sahiptir [12].

3.2.6.4. Fosforun Etkisi

Çeliklerde %0.04 oranının altında tutulan fosfor elementi bazı çeliklerin kesme özelliklerinin iyileşmesi amacıyla %0.07-0.12 arasında bir değerde tutulur. Dikkat edilmesi gerek nokta yüksek oranlardaki fosforun yapı içerisinde sert ve gevrek Fe_3P bileşiğinin oluşturmasıdır. Oluşan bu bileşik çeliğin sünekliğini azaltır ve soğuk şekillendirme işleminde çatlama veya kırılmaya yol açabilir. Bu olay “soğuk yırtılma veya soğuk gevreklik” olarak adlandırılır [12].

Ferritin dayanımını en fazla artırma özelliğine sahip olan fosfor elementi az miktarda bile olsa çeliğin dayanımı ve sertliğini arttıran ama buna rağmen sünekliği ve darbe dayanımını azaltan bir elementtir. Çelik kalitesini belirlemede etkin rol oynar. Fosfor elementi, kükürtle birlikte çelikte az bulunması istenir [17].

3.2.6.5. Silisyumun Etkisi

Ticari çeliklerin içeriğinde %0.05-0.5 oranları arasında bir değerde bulunan silisyum oksijen giderici bir elementtir. Silisyum elementi, ferritte çözünür ve çelik malzemenin süneklik değerini düşürmeden mukavemet değerini yükseltir. Bir başka avantajı ise silisyum oksit (SiO_2) oluşturarak sıvı çelik içerisindeki oksijeninin büyük bir kısmını alır ve bu sayede çelik malzemeyi daha kaliteli hale getirir. Dökme demirlerde silisyum kullanılmasındaki amaç grafit yapıcı özelliğinden dolayıdır [12].

3.2.6.6. Azotun Etkisi

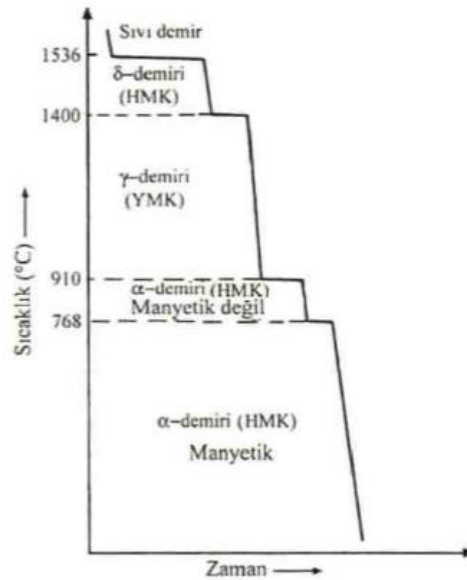
Azot elementinin miktarı az olsa bile çelik malzemelerde gevrekleşmeye neden olur. Hava üfleme yöntemleriyle üretilen Tomas çeliklerinde %0.03 oranında, oksijen üfleme yöntemiyle üretilen Simens-Martin çelikleri %0.01'den düşük oranlarda azot içermektedirler [12].

3.3. ÇELİĞİN YAPILARI

3.3.1. Demir-Karbon Alaşım Sistemi

Dünya metal üretiminin yüzde doksanını oluşturan demir esaslı alaşımlar yani çelikler iyi dayanım, tokluk, süneklik, düşük maliyet gibi birçok avantajlar sunmaktadır [19]. Demir esaslı metallerde esas eleman demirdir. Demire ek olarak karbon her zaman alaşım elemanı olarak bulunmaktadır [20].

Külçe demir içerisinde %0.012 C, %0.017 Mn, %0.005 P, %0.025 S ve belirli oranda Si bulunur. Saf halde bulunan demirin çekme dayanım değeri 270 MPa, kopma uzama değeri %40 ve sertliği 30 RSD-B değerindedir. Demir allotropiktir yani kafes yapısı sıcaklığa göre değişen bir metaldir. Saf demir 3 allotropik yapıdan oluşur. Bunlar: alfa (α), gama (γ) ve delta (δ)'dır. Şekil 3.3.'de bu durum görülmektedir. 3 durum allotropik değişim özelliğe sahip demir metali, belirli miktardaki sıcaklık değerleri aralıklarında kararlı bir durum göstermektedir [12].



Şekil 3.3. Saf demirin soğuma eğrisi grafiği [12].

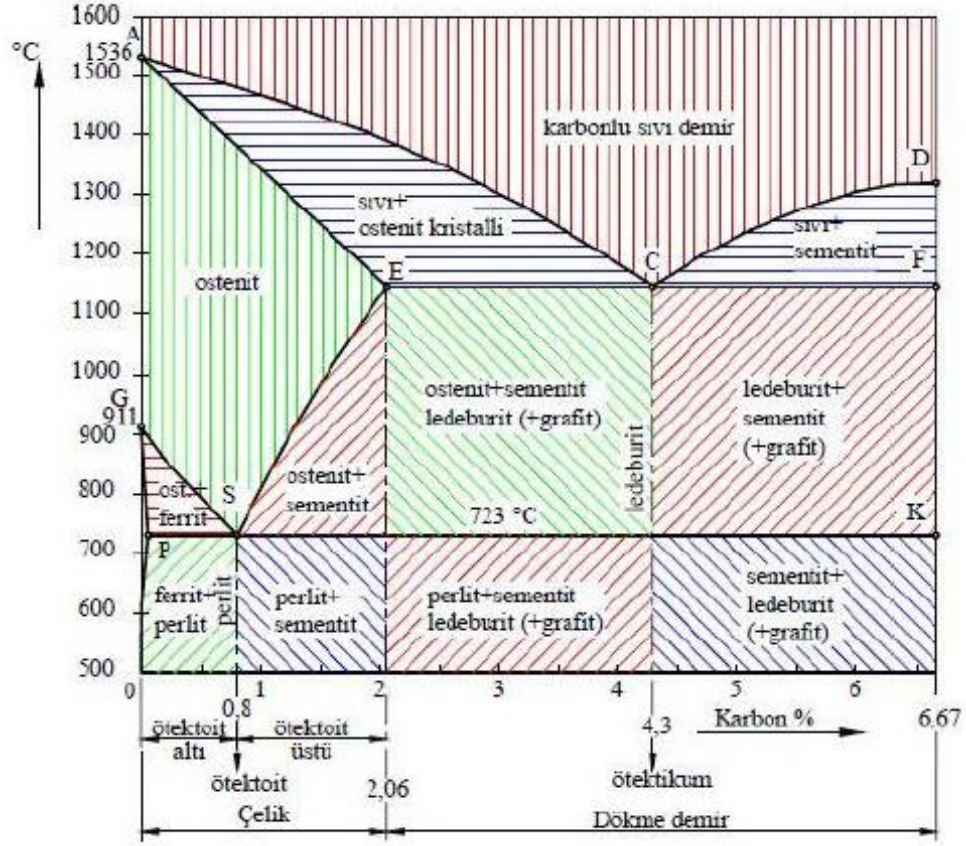
Şekil 3.3'de saf demirin soğuma eğrisinde oda sıcaklığında HMK yapıya sahip α demirine 910 °C'de YMK yapıya γ demirine, γ demirinin 1400 °C'de HMK yapıya dönüştüğünü göstermektedir [21].

Şekil 3.3'ü incelendiğinde demirin allotropisi hakkında şu sonuçlara varmak mümkündür:

- 1536 °C'nin üzerinde sıvı haldeki demir metali 1536-1400 °C arasında HMK yapıya sahiptir.
- 1400-910 °C arasında YMK kristal kafes yapısına sahiptir. Burada γ - demiri östenit olarak isimlendirilir.
- 910-768 °C arasında kristal yapı eski hali olan HMK yapıya tekrar dönüşür ve demir α - demiridir ve ferrit olarak isimlendirilir.
- 768 °C'nin altında kristal yapı dönüşümü meydana gelmez. Oda sıcaklığında saf demir HMK yapıdadır [22].

Karbon allotropik değişime uğrayan demir içinde çözünerek farklı ara yer katı çözeltileri oluşturmaktadır ve bu katı çözeltili dışındaki karbon ya demirler bir ara yer bileşiği (Fe_3C) oluşturur ya da grafit (C) halinde bulunur. Bu olay sonucunda demir (Fe)-sementit (Fe_3C) veya demir (Fe)-grafit (C) faz diyagramı olmak üzere 2 çeşit diyagram oluşur. Oluşan bu diyagramlar çelik ve dökme demirlerin incelenmesinde yararlanır [12].

3.3.2. Demir-Sementit (Fe-Fe₃C) Faz Diyagramı



Şekil 3.4. Demir (Fe)-sementit (Fe₃C) faz diyagramı [12].

Şekil 3.4'de görüldüğü üzere demir-sementit faz diyagramında oluşan durumlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Malzemede bulunan karbon içeriği %2.06 oranına kadar çelik, %2.06-6.67 oranı arasında ise dökme demir olarak adlandırılır.
- Sementit (Fe₃C) %6.67 oranında karbon içerir.
- % 0-2 kadar karbon içeren demirkarbon alaşımına çelik, % 2 den daha fazla karbon bulunan demir karbon alaşımı ise dökme demir olarak ifade edilir [22].
- Karbon oranı miktarı %0.8'den az olan çelikler ötektoid altı çelikler, %0.8 olan çeliklere ötektoid çelikler, %0.8'den fazla olan çeliklere ise ötektoid üstü çelikler denir [12].

- Peritektik, ötektik ve ötektoid reaksiyonları sabit sıcaklıklarda meydana gelir [21]. 1495 °C sıcaklığında, peritektik tepkimede %0.53 karbona sahip sıvı, %0.09 karbona sahip δ ferrit ile birleşerek, %0.17 karbon bulunan γ östeniti meydana getirir. 1148 °C sıcaklık değerinde, ötektik tepkime sırasında %4.3 karbona sahip sıvı, %2.08 karbon elementi bulunan γ östenitini ve %6.67 karbon bulunan sementit (Fe_3C) meydana getirir. 723 °C sıcaklığında ise ötektoid tepkime değerinde %0.8 karbona sahip katı östenit, %0.02 karbon bulunan α ferrit ve %6.67 karbona sahip sementiti (Fe_3C) meydana getirir. Katı olarak oluşan bu tepkime bazı çeliklerin ısıl işleminde çok önemlidir [23].

Demir-sementit faz diyagramında ferrit (α), östenit (γ), ferrit (δ) ve sementit olmak üzere farklı katı fazlar bulunur. Martenzit fazı ise hızlı soğutma yapılarak oluşturulabilir [24].

Çeliğin iç yapısı soğuma hızı ile değişir. Yapılan çalışmalarda %0.8 oranında karbon bulunan çelik numunesi 750 °C'ye kadar ısıtılıp yeterli süre bekletilirse çeliğin yapısı homojen östenit olduğu görülmüştür. Bu çelik numunenin ötektoid sıcaklığın üzerine kadar yavaşça soğutulursa östenitli yapı aynı şekilde kalacaktır. Ötektoid sıcaklığına ya da altına kadar soğutulursa yapının tümü östenitten, sementit ve ferritin üst üste binmiş levhalardan meydana gelen lamelli yapıya dönüşecektir. Ötektoid sıcaklığın altında ise lamelli bir yapı görünüşünde olacaktır. Bu yapı perlittir [23].

%0.8'den daha az karbon bulunan çeliklerde ise 900 °C'ye kadar ısıtılırsa mikro yapısı homojen östenit olur. Bu çelik 775 °C sıcaklığına soğutulursa ötektoid öncesi ferrit yapısı meydana gelecek ve östenit tane sınırında çekirdeklenmeye başlayacaktır [23].

Demir-karbon denge diyagramındaki dönüşüm sıcaklıkları ve meydana gelen iç yapılar yalnızca düşük soğuma hızları sonucunda belirlenir. Soğuma hızının değişmesi aynı çelik malzemedeki oluşacak iç yapılar ve buna bağlı olarak elde edilecek özellikler farklıdır [25].

3.3.2.1. Demir-Sementit Faz Diyagramındaki Fazlar

Demir-sementit faz diyagramında bulunan fazlar şunlardır:

- Ferrit
- Östenit
- Perlit
- Sementit
- δ -Demiri
- Ledaburit
- Dönüşmüş ledaburit

3.3.2.1.1. Ostenit (γ)

Yumuşak ve sünek bir faz olan ostenit fazı YMK kristal yapısında bulunan γ – demirinde çözünmüş karbonun katı çözeltisidir ve 1148 °C’de %2’ye kadar karbon çözüdürebilir [26].

Ostenitin tokluğu yüksek, çekme mukavemeti değeri 1030 Mpa, kopma uzaması değeri %10 ve sertlik değeri ise 40 RSD-C’dir. Oda sıcaklığında kararsız faz özelliğine sahip olmasına rağmen bazı durumlarda oda sıcaklığında bile ostenit oluşabilir [12].

3.3.2.1.2. α –Ferrit

HMK yapıda bulunan α ferriti oda sıcaklığında %0.006 oranında karbon içerir. Soğuk şekillendirme işlemine uygun olan ferrit yumuşak, sünek ve kolay şekillenebilen bir yapıdır [26].

Sertlik değeri 90 RSD-B, çekme dayanım değeri 270 MPa, kopma uzaması ise %40’dır [12].

3.3.2.1.3. δ Ferrit

Karbon elementinin δ demiri içerisinde çözünmesi ile meydana gelen ara yer katı çözümlüdür. HMK yapıya sahiptir. Karbonun faz içerisinde çözünmesi 1492 °C'de en yüksek değere ulaşır. Yüksek sıcaklık fazıdır bu yüzden düşük sıcaklıklarda alaşımsız çeliklerde görülmez [12].

3.3.2.1.4. Sementit

%6.67 oranında karbon içeriğine sahip bir ara yer bileşiği olan sementit ortorombik kristal yapıya sahiptir. En sert faz olma özelliğine sahip sementit çekme dayanımı düşük, basma dayanımı yüksektir [12]. Sert bir faz olmasından dolayı demir esaslı olan malzemelerde oluşumunun kontrol altında tutulması gerekir. Çeliğin hızlı soğutulması esnasında grafit oluşturamayan karbonların demir ile bileşik oluşturmasının sonucu olarak oluşur [25].

3.3.2.1.5. Perlit

Perlit, ferrit ve sementit fazlarını bir arada bulundurur. $\alpha + Fe_3C$ şeklinde gösterilir. Yapısında %0.8 karbon bulunur. Çeliğin ostenit sıcaklığından yavaş soğutulması esnasında 723 °C sıcaklığında ötektoid dönüşümün gerçekleşmesiyle meydana gelir. Perlit çelik içerisinde yuvarlak taneli veya lamelli görülebilir. Yavaş soğutulma ile taneli yapı, havada soğutulma ile de lamelli yapı meydana gelir [27].

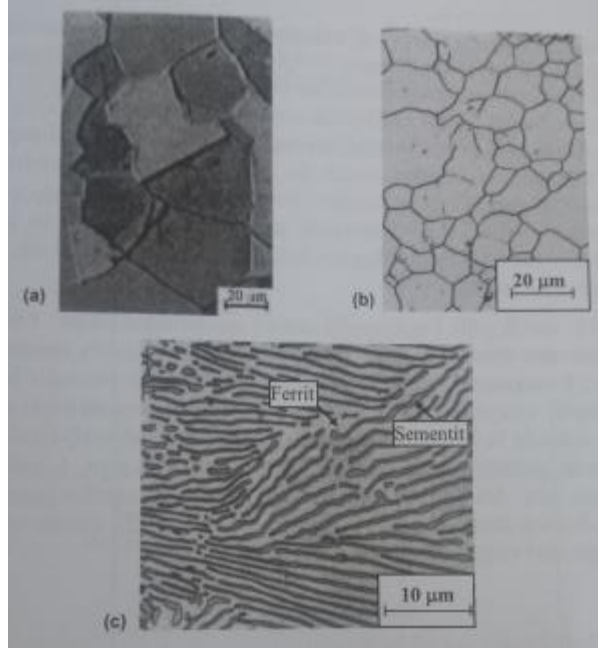
Perliti oluşturan fazlardan ferrit ışık mikroskopunda beyaz görünürken, sementit siyah görünmektedir [12].

3.3.2.1.6. Ledeburit

Karbon oranı % 4.3 olan ledeburit fazı 1147 °C sıcaklıkta ötektik dönüşümle katılaşması sonucu oluşur. Yapısında ostenit ve sementit fazlarını içermektedir [12].

3.3.2.1.7. Dönüştürmüş Ledeburit

Demir-sementit denge diyagramında ötektoid dönüşüm sıcaklık değerinin altında bulunan ledeburit olan dönüştürmüş ledeburit fazı 723 °C'nin altında ostenit tanelerinin perlitte dönüşmesi neticesinde perlit ve sementitden meydana gelmektedir [12].



Şekil 3.5. a) Ostenit, b) Ferrit, c) Perlitin ışık mikroskobu görüntüleri [12].

Şekil 3.5’de sırasıyla ostenit, ferrit ve perlitin ışık mikroskobu görüntüleri verilmiştir.

3.4. ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMİ

3.4.1. Isıl İşlem

Isıl işlem, metal ve alaşımlarda istenilen özellikler oluşması amacıyla bir veya daha fazla kontrollü olarak ısıtma ve soğutma işlemleridir. Çelik malzemeye uygulanan ısıl işlemler demir-sementit denge diyagramında bulunan ostenit fazının yani içyapısının dönüşümüyle ilgilidir. Bu dönüşüm sırasında çelik malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri dönüşüm ürünlerinin türü, bileşimi ve metalografik yapısı açısından etkilemekte ve değişim göstermektedir. Isıl işlemde en önemli faktörler sıcaklık, zaman ve ortamdır [12].

Isıl işlemde dikkat edilecek hususlar;

- Isıtma hızı: Malzemede çarpılmanın önlenmesi amacıyla fazla miktarda gerilme içeren malzemenin, gerilme içermeyen malzemeye kıyasla yavaş ısıtılması gerekir.
- Kesit değişikliği: Malzemede sıcaklığın etkisiyle çarpılma durumu yaşanmaması için parçanın ince kısımları kalın kısımlara göre daha yavaş ısıtılması gerekir.
- Ostenitleşme sıcaklığı: Çeliklerin ısıtılmasında ostenitleşme sıcaklığı olabildiğince düşük seçilir. Çünkü ostenitleşme sıcaklığı artarsa çelikte çarpılma, çatlama, oksidasyon, dekarburizasyon ve tane büyümesi gibi istenmeyen olaylar meydana gelebilir [12].

Isıl işlem temel olarak;

- Malzemelerin mekanik özelliklerini istenilen hale getirmek,
- Aşınma dayanımını yükseltmek,
- İşlenmeyi kolay hale getirmek,
- Eğer bir önceki işlemde meydana gelen kalıntı gerilmeleri varsa bu gerilmeleri yok etmek,
- Tane yapılarını küçültmek,
- Sertlik dayanımını arttırmak gibi amaçlarla yapılmaktadır [28].

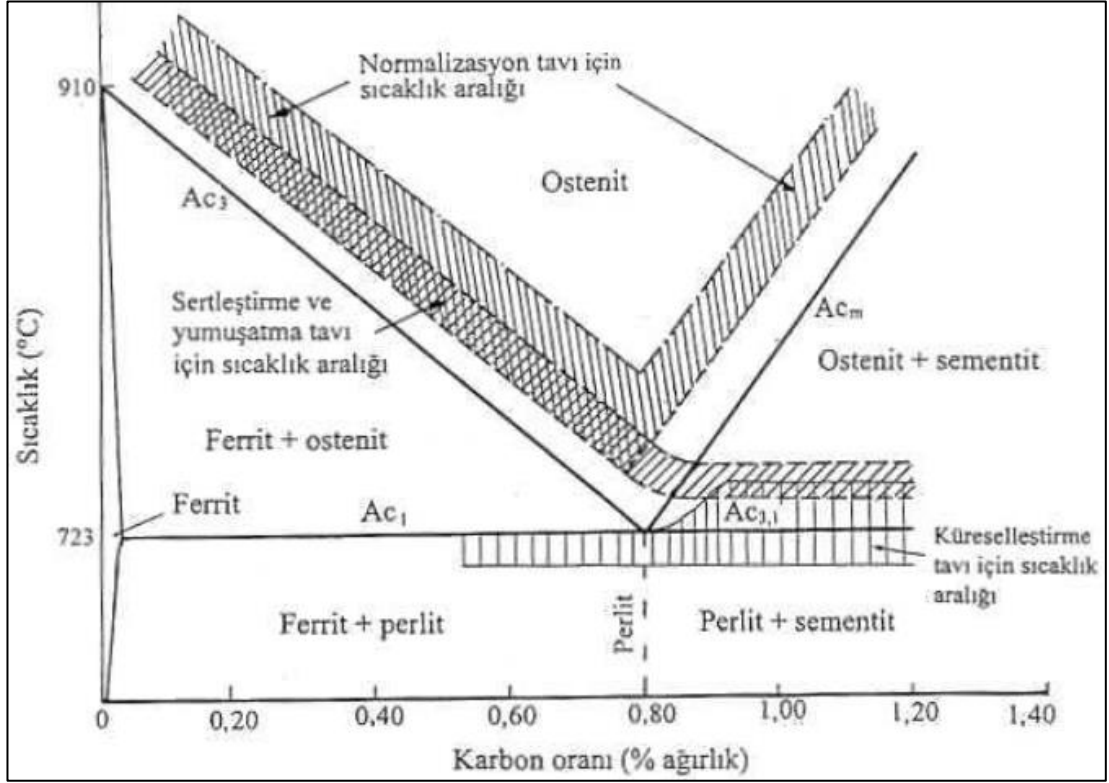
Yukarıda sayılan sonuçları elde etmek için uygulanması gereken her işlem farklıdır. Bununla birlikte bu işlemlerin gerektirdiği yöntem, malzeme, sıcaklık değeri, süre gibi etmenler de değişebilmektedir [28].

Isıl işlem türleri içerisinde yumuşatma, küreselleştirme ve normalizasyon işlemleri çeliklerin işlenmeye hazır hale getirmek için yapılmaktadır. Fakat işlem seçiminin en uygun yolu çelikte bulunan karbon oranına göre seçimidir [12].

Isıl işlem uygulanacak çelikler yapısında bulunan karbon miktarına göre 2 şekilde sınıflandırılabilir;

- Ötektoid altı çelikler (%C < 0.8)
- Ötektoid üstü çelikler (%C > 0.8)

Çelik malzemenin ısı işlemleri ostenit fazının dönüşümü ile başlar. Ostenitleştirme, şekil 3.6'da görülen çeliğin A_{C1} sıcaklık değerinin yukarısında bir sıcaklık değerine kadar yavaş yavaş ısıtılıp, yapı tümüyle ostenite dönüşüncüye kadar tavlama işlemidir. Ötektoid altı çelikler ise üst kritik sıcaklık değerinin (A_{C3}) 40-60 °C üzerindeki sıcaklıklarda ostenitleştirme işlemi uygulanır. A_{C3} değerinin altındaki sıcaklıklarda ise çelik yapısında ötektoid dışı ferrit bulunmaktadır. Bu fazın oranı çeliğin karbon oranına bağlıdır. Ötektoid dışı ferrit, su verme işleminden sonra da yapıda aynen kaldığından çeliğin sertleşmesini engeller [12].



Şekil 3.6. Alaşımsız çeliklere uygulanmış yumuşatma, normalizasyon, küreselleştirme ve sertleştirme işlemlerinin tavlama sıcaklık aralık değerleri [12].

Ötektoid üstü çelikler ise, şekil 3.6'da görülen A_{C1} değerinde bu çeliklere ait üst kritik sıcaklık değerinin (A_{Cm}) arasındaki sıcaklıklarda ostenitleştirilirler. A_{Cm} çizgisinin ani yükseliş göstermesi nedeniyle bütün yapıyı ostenitleştirmek için çok yüksek sıcaklıklara çıkmak gerekir. Ancak ostenitleştirme işleminin çok yüksek sıcaklıklarda

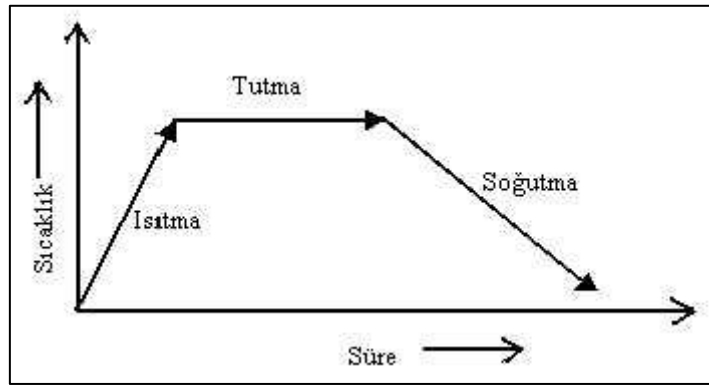
yapılması durumunda çelikte çarpılma, çatlama, oksidasyon, dekarbürizasyon ve tane büyümesi gibi istenmeyen olaylar oluşabilir. Bu sebeple çelik parçalar mümkün olduğu kadar düşük sıcaklıklarda osteniştirilirler [12].

3.4.2. Çeliğe Uygulanan Isıl İşlem Yöntemleri

Çelik malzemelerin iç yapısında gerçekleşen dönüşümler çeliklerin fiziksel ve mekanik özelliklerini etkiler. Çeliğe uygulanan ısıl işlemler tavlama ve sertleştirme olmak üzere 2 ana gruba ayırmam mümkündür [15]. Her malzemede farklı ısıl işlemler uygulanmaktadır. Aşağıda çeliğe uygulanan ısıl işlem yöntemleri açıklanmıştır.

3.4.2.1. Tavlama

Tavlama, metallere uygulanan bir tür ısıl işlem olarak ifade edilir. Tavlama işleminde amaç malzemeden beklenen yapısal, fiziksel ve mekanik özellikleri elde etmek, talaş kaldırmayı ve soğuk şekillendirmeyi kolaylaştırmaktır. Bunlara ek olarak tavlama işlemi artık gerilimlerin giderilmesinde, sünekliği ve tokluğu artırıp dayanımı düşürmede ve özel iç yapıların oluşturulması işlemleri için yararlanır [12]. Tavlama işleminin şematik gösterimi Şekil 3.7’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Tavlama işleminin şematik gösterimi [12].

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere tavlama işlemi sırasında metal malzeme uygun sıcaklığa kadar ısıtılır ve istenilen değişiklikler sağlanıncaya kadar bu sıcaklıkta tutulur. Tutma işleminden sonra yavaş bir şekilde soğutulur.

Çeliklere uygulanan tavlama çeşitleri şunlardır:

- Normalizasyon tavlı
- Yumuşatma tavlı
- Gerilim giderme tavlı
- Yeniden kristalleştirme tavlı

3.4.2.2. Yumuşatma Tavlama (Tam Tavlama)

Yumuşatma tavlının amacı çelik malzemeyi en düşük sertlik değerine ulaştırmaktır. Böylelikle metal malzemelerin mukavemetinde azalma, sünekliği ve tokluğunda artış görülür. Bu işlem sonrasında malzeme de ki iç gerilmeler giderilir [28].

Yumuşatma tavlının bilimsel ve teknolojik anlamdaki tanımı sertlik değerini düşürmek, talaş kaldırmayı kolaylaştırmak ve döküm ve dövme malzemelerindeki artık gerilmeleri gidermek için ötektoid altı çelikleri A_{C3} , ötektoid altı çelikleri ise A_{C1} çizgilerinin yukarısında belirli sıcaklıklara kadar ısıtıp iç yapılarını ostenite dönüştürüp daha sonra da fırın içerisinde tutarak çok yavaş soğutma işlemi olarak tanımlanmaktadır [12]. Bu yöntem çeliklerin elektrik ve manyetik özelliklerini iyileştirmek amacıyla da yapılabilir.

Ötektoid üstü çeliklere A_{C31} çizgisinin 50 üstündeki sıcaklık değerinde ostenitleşme işlemi uygulanır. Uygulanan bu sıcaklıklarda tavlanan çelik malzemelere su verme işlemi de uygulanırsa sementit parçacıkları malzemenin yapısında kalır. Bu sementit fazı çeliğin sertliği azaltmaz. Çeliğin aşınma direncini artırır. Bu sebeple ötektoid üstü çeliklerde yapının tamamen ostenitleşmesi gerekmez [12].

Mn ve Ni gibi bazı alaşım elementleri demir-sementit denge diyagramının A_{C1} sıcaklığını düşürür. Bu elementlerin diğer dezavantajları ise ötektoid noktasını düşük

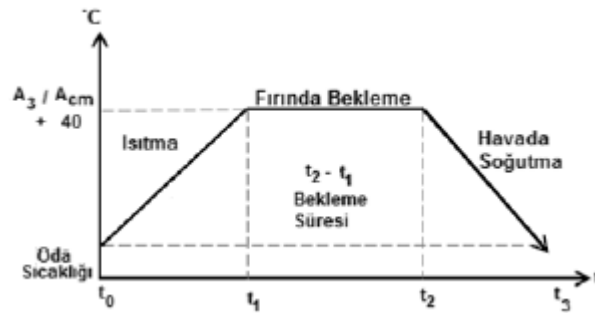
karbon oranına doğru kaydırmaları ve ötektoid altı çeliklerin ostenitleştirme sıcaklığını da düşürmeleridir. Alaşım elementlerinin ostenitin oluşumunu azaltıcı etkileri vardır [12].

Otektoid altı çeliklerin düzgün ısıl işlem uygulayabilmek için yapının homojen bir östenit olması gerekir. Bu yapının oluşabilmesi için ostenitleştirme sıcaklığına kadar ısıtılan çelik malzeme 25 mm'lik kalınlık veya çapı için bir saat o sıcaklıkta tavlamları gerekir. Uygulanması gereken sıcaklık aralığı şekil 3.6'da verilmiştir.

3.4.2.3. Normalizasyon Tavı

Normalizasyon tavı ekonomik olmasından dolayı endüstride yaygın kullanılmaktadır. Yapılan bazı işlemlerden hemen sonra çeliğin içyapısının yeniden normal içyapı durumuna dönmesini sağlamak için normalizasyon tavı uygulanır. Otektoid altı çeliklerde içyapının yuvarlak, ince taneli ve homojen dağılımlı bir yapıya dönüşmesi için yapılırken otektoid üstü çeliklerde kendinden sonraki küreselleştirme işlemini kolaylaştırmak ve sertleşme sürecinin kısılmasını sağlamak için yapılır [29].

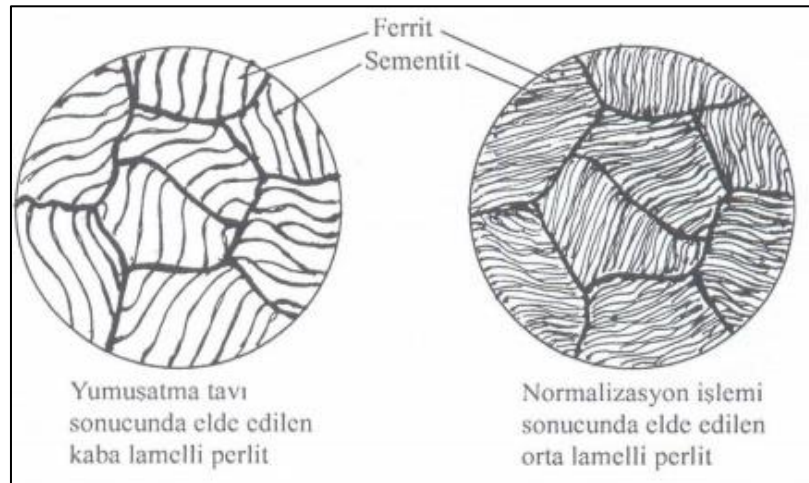
Otektoid altı çelikleri A_{c3} ve otektoid üstü çelikleri A_{cm} dönüşüm sıcaklıklarının yaklaşık 40-50 °C üstündeki sıcaklıklara kadar ısıtıp, bu sıcaklık değerlerinde malzemenin ostenit dönüşümü tamamlanana kadar fırın içerisinde bekletilir ve dönüşüm tamamlandığında fırın dışında sakin havada soğutma işlemi uygulanır. Bu işlemler şekil 3.8'de gösterilmiştir [12].



Şekil 3.8. Normalizasyon tavlama işlem adımları [28].

Normalizasyon, ferrit, sementit ve lamelli perlitin dönüşümünü sağlar. Böylelikle normalleştirme tavı esnasında ostenitin dönüşümü düşük sıcaklıklarda hızlı gerçekleşir. Dönüşüm ürünü olan perlit ince yapıdadır [26].

Havada soğutma işlemi dengesiz soğutma olduğundan dolayı normalize edilmiş çeliğin içeriğindeki ötektoid dışı sementit ve perlit oranlarını hesaplamak amacıyla demir-sementit denge diyagramı kullanılmaz. Havada soğutma esnasında ötektoid dışı fazların oluşması için yeterli zaman olmadığından normalize edilen ötektoid altı çelikler yumuşama tavına tutulan çeliklere göre daha düşük oranda ötektoid dışı ferrit, ötektoid üstü çelikler ise daha düşük oranda ötektoid dışı sementit içerirler [12]. Havada soğutulma işleminden kaynaklı yüksek soğutulma hızı elde edilmektedir. Genellikle, soğutma hızı arttığında ostenitin dönüşüm sıcaklığı azalır ve daha ince bir perlit oluşur. Bu yüzden normalize edilmiş çelik malzeme yumuşatma tavı yapılan çelikle kıyaslandığında ince ve yüksek miktarda perlit oluşur. Yumuşatma tavı ve normalizasyon işlemleri neticesinde ötektoid çelikte oluşan perlitik yapılar arasındaki farklar şekil 3.9'da gösterilmiştir [12].



Şekil 3.9. Yumuşatma tavı ve normalizasyon işlemi yapıldıktan sonra ötektoid bileşime sahip çelikte oluşan perlitik yapılar arasındaki farkların şematik gösterimi [12].

Şekil 3.9'da da görüldüğü üzere normalizasyon tavı uygulanması sonucunda çelik malzemesinin iç yapısındaki taneler incelik ve perlit miktarında artış meydana gelir. Bu sayede de malzemenin mukavemeti ve sertlik değerleri iyileşmiş olur.

Normalizasyon tavrının amaçları;

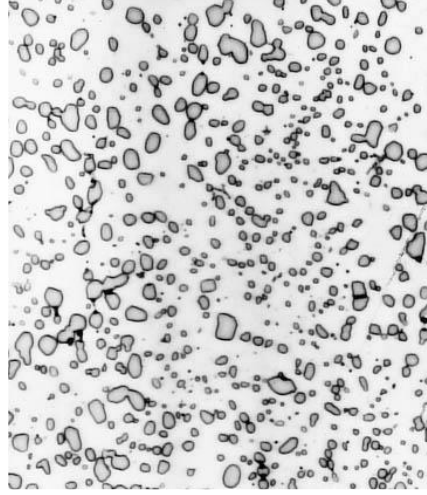
- Tane boyutunu küçültmek,
- Homojen içyapı elde etmek,
- Çeliklerin işlenmesini kolaylaştırmak,
- Çeliklerin mekanik özelliklerini iyileştirmek,
- Ötektoid üstü çeliklerde tane sınırlarında oluşan karbür ağını dağıtmak,
- Yumuşatma tavrı uygulanan çelik malzemelerin sertlik ve mukavemetini artırmak şeklinde amaçlar sıralanabilir [12].

3.4.2.4. Küreselleştirme Tavrı

Küreselleştirme tavrı, genellikle yüksek karbonlu çelikler için uygulanan bir ısıl işlem türüdür. Çünkü düşük karbonlu çeliklerde küreselleştirme tavrına tutulduklarında fazla yumuşar ve bu durumda talaşlı işleme sırasında zorluklara sebebiyet verir. Orta karbonlu çeliklerde ise yeterli miktarda süneklik kazanmaları amacıyla plastik şekil verme işleminden önce küreselleştirme tavrı uygulanır. Küreselleştirme tavrı esnasında tavlama süresine dikkat edilmelidir. Çünkü çelik gereğinden fazla tavlандığı zaman sementit parçaları birleşerek uzama gösterirler. Bu olay çelik malzemenin işleme kabiliyetini kötü etkiler [12].

Çeliklere uygulanan küreselleştirme tavrı aşağıdaki yöntemlerden biri ile gerçekleşir.

- Çelik malzeme A_{c1} çizgisi değerinin altındaki bir sıcaklıkta (örneğin 700 °C) uzun bir süre (15-25 saat) tavllanır.
- Küreselleştirme tavrı uygulanan malzeme, düşük kritik sıcaklık değerinin (A_{c1}) hemen altında ve üstündeki sıcaklık değerleri arasında ısıtılıp soğutulur.
- Malzeme, A_{c1} kritik sıcaklık çizgisinin üzerindeki bir sıcaklık değerinde tavllanır. Daha sonra ise malzeme ya fırında çok yavaş soğutulur ya da A_{c1} çizgisinin hemen altındaki sıcaklık değerinde uzun bir süre tutulur [12].



Şekil 3.10. Küreselleştirme tavnına tabi tutulmuş %1.1 C içeren ötektoid üstü bir çeliğin yapısında bulunan küreselleşmiş sementitlerin görünümü [12].

Tavlama işlemi yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilirse çeliğin içerisinde bulunan perlitik yapı ile sementit ağının parçalanmasına sebep olur. Küreselleştirme tavlama sonucunda şekil 3.10'da görüldüğü gibi ferritik bir matris ile bunun içerisinde dağılmış halde bulunan küre şeklindeki sementitden oluşan bir yapı meydana gelir [12].

Bu tavlama sonucunda sertliği az ve sünekliği fazla olan bir çelik elde edilir. Küreselleştirme, yumuşatma, normalizasyon tavlama çelik malzemelerin işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla yapılmaktadır. Özellikle ötektoid üstü çelikler küreselleştirme tavlama sonucunda işlenmeye elverişli hale gelirler [12].

3.4.2.5. Gerilme Giderme Tavnı ve Ara Tavnı

Döküm, kaynak, haddeleme, tel çekme ve soğuk şekil verme işlemleri sonucunda meydana gelen artık gerilmeleri azaltmak için gerilme giderme tavnı uygulanmaktadır. Bu tavlama sırasında yapı değişimi gözlenmez. Tavlama ki asıl amaç malzemede bulunan iç gerilmeleri yok etmektir. Bu yüzden malzemenin mekanik özellikleri bu tavlama etkilenmez [12].

Metal malzemelere ısı işlem uygulaması sonrası hızlı soğutma yapılması durumunda kalıntı gerilmeleri oluşabilmektedir. Çoğunlukla kalıntı gerilmeler büyük kesitli iş

parçalarda oluşmaktadır. Bu durumda farklı sıcaklık geçişlerinin olmasından dolayı kesitin bazı bölgelerinde yapısal dönüşümlerde meydana gelir [30].

Çelik malzemesi için gerilme giderme tavlama 540-630 °C arasındaki sıcaklıklarda uygulanması uygundur. Tavlama, metalik malzemeler dönüşüm sıcaklıklarının altındaki uygun bir sıcaklığa kadar ısıtılıp yeterli bir süre tavlansak yavaş soğutma işlemi olarak gerçekleşir. Yavaş soğutulma sayesinde malzemenin iç yapısında yeniden iç gerilme oluşmaz [12].

Ara tavı gerilim giderme tavına çok benzemektedir. Ara tavı sac veya tel üretiminde soğuk şekillendirmeye devam edebilmek amacıyla ötektoid altı çeliklerin Ac_1 dönüşüm sıcaklık değerinin hemen altında 550-680 °C sıcaklık aralığında bir değere kadar ısıtılıp yeniden kristalleştirme sağlandıktan hemen sonra yavaş soğutma işlemi olarak tanımlanabilir [12].

3.4.2.6. Su Verme Sertleştirme

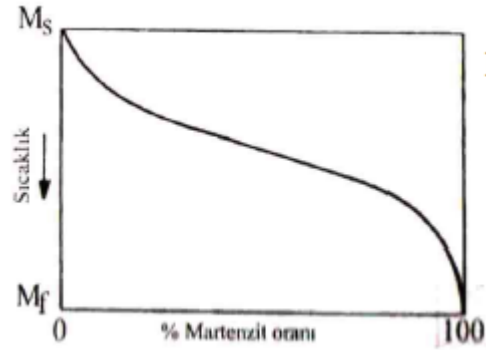
Soğuma hızı ısı işlem uygulanan çelik malzemenin iç yapısını etkiler. Tavlama işlemi uygulanmış çelik malzemelere yavaş veya orta seviyede hızlı soğutulma yapıldığında ostenit yapıda çözülmüş haldeki karbon atomları difüzyon mekanizmasıyla ostenitten ayrılır [12].

Sertleştirme, çeliğin yapısında bulunan alaşım elementlerinin miktarına göre ostentleşme sıcaklığına kadar ısıtılıp, daha sonra ani olarak soğutulması ve böylelikle iç yapıda martenzit fazın oluşumunun sağlanması işlemi olarak adlandırılır. Sertleştirme işlemi ani soğutmanın sağlandığı ortama göre ve çelik malzemelerde farklı soğuma hızları olması gerektiği için suda sertleştirme, havada sertleştirme, yağda sertleştirme gibi türlere ayrılır [28].

3.4.2.7. Martenzitik Dönüşümün Önemli Özellikleri

İkizleme ve kayma mekanizmalarıyla oluşturulan martenzit fazı doygun bir fazdır. Bu fazın oluşumu ostenit fazdan hızlı soğutma sonucu oluşur [31]. Mikroskop altında iğne

şeklinde görünen martenzitik yapının en önemli özelliklerinden biri çok sert bir faz olmasıdır ve çelik malzemelerde sementitten sonra en sert faz olma özelliğine sahiptir. Martenzit yapı oldukça sert olmakla birlikte malzemelere yüksek mukavemet kazandırır. Martenzitik dönüşüm, ısıtma veya soğutma hızının yüksek olması durumunda pek çok metalik ve metalik olmayan malzemeler, mineraller ve bileşiklerde meydana gelmektedir. Bu dönüşüm yalnızca soğuma sırasında gerçekleşir.



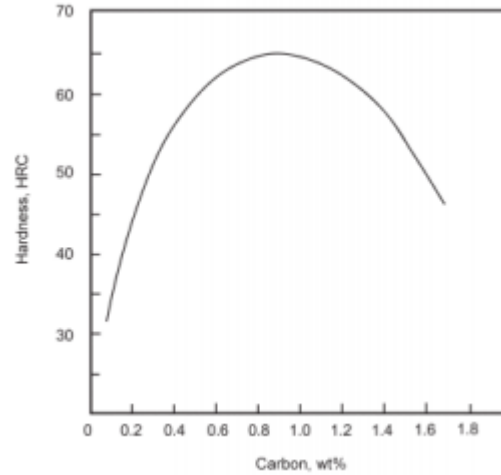
Şekil 3.11. Martenzit yüzde oranının sıcaklığa göre değişimini gösteren eğri [12].

Şekil 3.11'de Ms martenzitik dönüşümün başlangıç sıcaklığını, Mf martenzitik dönüşümün bitiş sıcaklığını göstermektedir. Bu grafiğe göre bir çelik malzeme Ms'nin altındaki bir sıcaklıkta tutulduğunda martenzitik dönüşüm durmaktadır ve sıcaklık düşmediği takdirde dönüşüm devam etmez.

Martenzitik dönüşümün önemli özellikleri aşağıdaki şekilde açıklanabilir.

- Martenzitik dönüşüm difüzyonsuzdur yani dönüşüm olurken malzemenin kimyasal bileşiminde değişim meydana gelmez. Dönüşüm meydana gelirken ostenit fazı ikili kayma mekanizması sayesinde kafes yapısını değiştirir.
- Martenzitik dönüşüm sadece soğuma işleminde oluşur. Yalnızca soğuma engellenirse dönüşüm sona erer. Dönüşüm zamandan bağımsızdır ve sadece soğumaya bağlıdır. Bu tür dönüşüm "atermal dönüşüm" olarak ifade edilir.

- Soğuma hızının değişimi ile birlikte alaşımın ne Ms sıcaklığı değişir ne de martenzitik dönüşümü engellenebilir. Ms sıcaklığı sadece alaşımın kimyasal bileşimine bağlıdır [12].
- Karbon miktarı martenzit dönüşüm sıcaklığını etkilemektedir. Karbon miktarı arttığında Ms ve Mf sıcaklıklarında düşüş olur. Eğer yapıda %0.6 oranında fazla karbon varsa Mf sıcaklığı 0 °C sıcaklığın altına düşer ve hızlı soğutulma sırasında martenzit fazına ek olarak yapıda ostenit fazda oluşur [31].
- Martenzit yapıda yüksek sertlik belirli oranda karbona sahip çeliklerde görülür. Su verme işlemi uygulandıktan sonra sertlik değeri çelikte bulunan karbon oranına bağlı olarak değişmektedir. Su verilen karbon çeliklerinde elde edilen en yüksek sertliğin karbon oranına göre değişimini gösteren eğri şekil 3.12’de verilmiştir.



Şekil 3.12. Su verilen karbon çeliklerinde elde edilen en yüksek sertlik değerinin karbon oranına göre değişimini gösteren eğri [12].

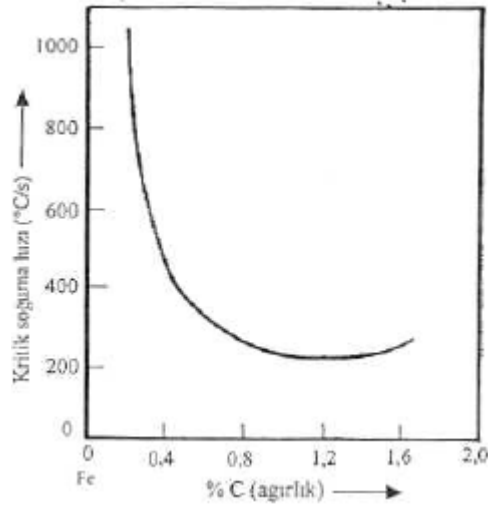
Şekil 3.12’de görüldüğü üzere karbon oranının artmasıyla martenzit yapının sertliği artmaktadır.

- Martenzit fazı oda sıcaklığında uzun süre dönüşüme uğramadan kalabilir. Martenzit fazı kararsız ostenit ile ferrit ve sementitden oluşan kararlı bir yapı arasında geçiş fazıdır [12].

- Martenzit dönüşüm sadece çeliklere özgü bir dönüşüm değildir. Fe-Ni, Cu-Zn, Cu-Al ve Ni-Ti gibi alaşımlarda da martenzitik dönüşüm meydana gelebilir [12].

3.4.2.8. Kritik Soğuma Hızı

Sertleştirme işlemi malzemenin içyapısında tamamen martenzitik bir yapı meydana gelmesi amacıyla yapılır. Bu yüzden malzemenin tavlama işlemi uygulandıktan hemen sonra kritik soğuma hızından daha da yüksek bir hızda soğutulması gerekir. Kritik soğuma hızı martenzitik bir yapı oluşturmak için ihtiyaç duyulan en düşük soğuma hızıdır. Çelik malzemeler için önemli olan kritik soğuma hızı karbon oranı, alaşım elementi oranı ve ostenitin tane büyüklüğüne bağlıdır [12]. Çeliklerde kritik soğuma hızının karbon oranına göre değişimini gösteren eğri şekil 3.13’de verilmiştir.



Şekil 3.13. Çelik malzemelerde kritik soğuma hızının karbon oranına göre değişimini gösteren eğri [12].

Şekil 3.13’de düşük karbonlu çeliklerin kritik soğuma hızının yüksek olduğunu göstermektedir. Fakat karbon oranının artmasıyla kritik soğuma hızı hızlı bir şekilde azalarak, %1,2 C oranında en düşük değerine ulaşmakta, %1,4 C ve üzerinde bir oranında ise az miktarda bir artış göstermektedir [12].

3.4.2.9. İzotermal Dönüşüm ile Perlit Oluşumu

Izotermal dönüşüm, sabit sıcaklıklarda oluşan faz dönüşümü demektir. Demir-karbon denge diyagramı sadece denge koşullarında meydana gelen faz değişiklikleri için kullanılır. Bu nedenle hızlı soğutma işlemi uygulanan çeliklerin incelenmesinde demir-karbon denge diyagramı kullanılamaz. Ostenitin dönüşüm sıcaklığının veya dönüşüm süresinin, dönüşüm ürünlerini ve çeliğin özelliklerini etkilemektedir [12].

Ostenit A_{c1} kritik sıcaklık çizgisinin altındaki sıcaklıklarda kararlı halde değildir. Fakat ostenitin A_{c1} sıcaklık çizgisinin altındaki bir sıcaklık değerinde ne zaman dönüşmeye başlayacağı ve ne kadar süreceği, dönüşüm sonucunda hangi ürünlerin oluşacağını bilmesi gerekmektedir. İzotermal dönüşüm diyagramlarından bu bilgiler elde edilebilir [12].

Perlit, ferit ve sementit katmanlarından oluşan lamelli bir yapıdır. Perlit yapı izotermal dönüşüm sonucunda oluşmaktadır. Bu yapı perlitin lameller arası uzaklığı ve sertliği dönüşüm sıcaklığına bağlıdır [12].

A_{c1} sıcaklığının altında oluşan yapı kaba perlittir. Bu yapının sertliği yaklaşık 15 RSD-C değerindedir. İzotermal dönüşüm sıcaklığının azalmasıyla perlit yapı incelik ve yapının sertliği artar. Perlitte meydana gelen incelik sonucunda ferrit ve sementit tabakalarının ışık mikroskobu ile ayırt edilemeyecek bir görünümde olurlar [12].

Dönüşüm sıcaklığının azalması sonucunda perlitin sertliği artmakta ve sertlik değeri ise izotermal dönüşüm diyagramında en yüksek değere ulaşmaktadır. Sertlik değerinin artması yumuşak ferrit matrisi içerisinde sert sementit tabakaları arasındaki uzaklığın azalmasından kaynaklanır [12].

BÖLÜM 4

MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. DENEY MALZEMELERİ TANITILMASI

4.1.1. St 37 Yapı Çeliği

St 37 çelikleri, DIN 17100 standardına göre yapılan çalışmalar sonucunda çekme dayanım değeri 37 kg/mm^2 olarak belirlenmiştir. “St” ifadesi yapıda bulunan karbonun %0.2 oranında olduğunu, “37” ifadesi ise malzemenin en az 37 kg/mm^2 çekme dayanımına sahip olduğu anlamına gelmektedir [32].

St 37 yapı çeliğinde minimum Mn %1.65 ve Si %0.60 değerlerini aşmaz. Düşük karbonlu çelikler sınıfına giren bu çelik türü inşaat ve sanayi sektöründe, kutu profil, çubuk yapımı ve sıcak haddelenmiş sanayi profili yapımında kullanılır [33].

Dünya ve Türkiye’de yer alan çok sayıdaki üretim alanlarında en çok tercih edilen malzemelerden birisi St 37’dir. En çok tercih edilen malzeme olmasının nedenleri kolay işlenebilir, kaynaklanabilir olması ve kesiminin sorunsuz olmasıdır.

St 37 yapı çeliğinin kullanım alanları şu şekilde sıralanabilir:

- Otomotiv
- Beyaz eşya
- Kablo sektörü
- Tekstil dokuma tarakları
- Pencere kilit aksamı
- Giyim sektörü (kemer tokaları, çanta ve valiz aksesuarları)

4.1.1.1. St 37 Yapı Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu

St 37 çeliğinin kimyasal kompozisyonu çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4. 1. St 37 çeliğinin kimyasal kompozisyonu [34].

Elementler	C	Mn	P	S	N	Cu	CEV
Miktarları	Maksimum	Maksimum	Maksimum	Maksimum	Maksimum	Maksimum	Maksimum
	0.2	1.4	0.04	0.04	0.012	0.55	0.38

4.2. NUMUNE HAZIRLAMA

Deney çalışmasında 4 adet St 37 yapı çeliği 8X8 kare demir 30 cm uzunluğunda kesilmiş numuneler kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler şekil 4.1’de gösterilmiştir.

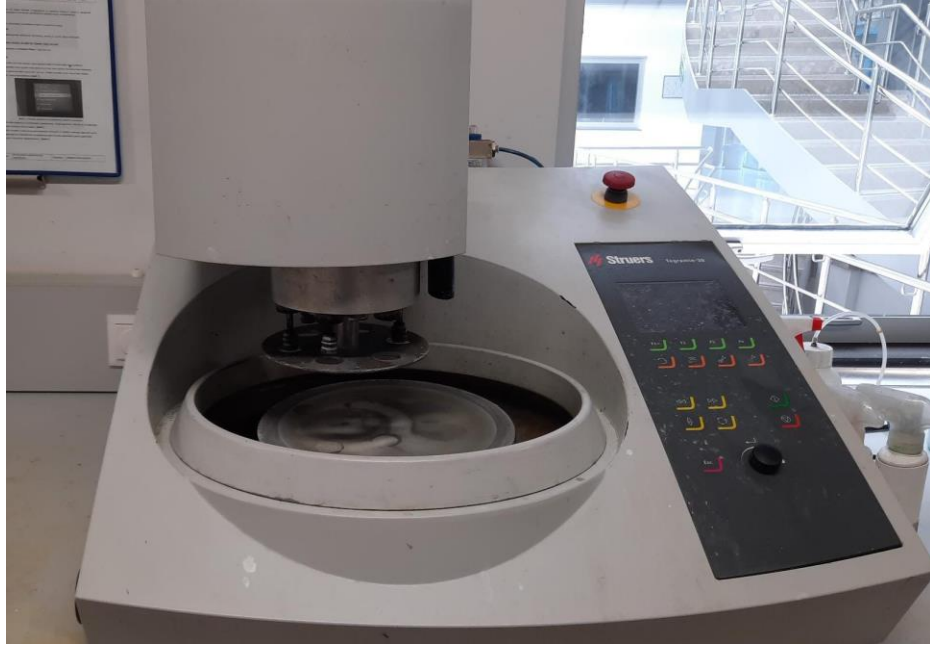


Şekil 4.1. Deney numunelerinin hazırlanması.

4.2.2. Zımparalama, Parlatma ve Dağlama İşlemleri

Mikroskobik inceleme işlemi yapılabilmesi amacıyla numunelerin öncesinde hazırlanması gerekmektedir. Bu hazırlık aşaması için numuneler zımparalama, patlatma işlemleri uygulanır. Numuneler kesildikten sonra zımparalama ile birlikte yüzeyde kesim işleminde meydana gelen zararlar (çapak vs.) giderilir.

Numuneye uygulanan zımparalama işlemi sırasında bir yüzeyde bir hasar oluşmaması için parlatma işlemi uygulanır. Bu sayede hem yüzeydeki yüzey pürüzlülüğü azalmış hem de ışığı iyi yansıtabilen yüzey oluşur. Parlatma işleminin en büyük amacı numuneye uygulanan işlemlerden dolayı numune yüzeyindeki deformasyon bölgelerinin azaltılmasıdır. Zımparalama ve parlatma işlemleri el ile veya otomatik cihaz kullanarak yapılabilir [35]. Zımparalama ve parlatma işlemleri için kullanılan Tegramin-30 cihazı şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2. Zımparalama ve parlatma cihazı Tegramin-30 cihazı.

4.3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.3.1. Sertlik Testi

Sertlik, malzemenin çizilmeye, sürtünmeye, kesilmeye veya dislokasyon hareketine karşı gösterdiği direnç olarak ifade edilmektedir [12]. Sertlik testi Brinell sertlik testi, Vickers sertlik testi, Rockwell sertlik testi, Knopp sertlik testi olmak üzere 4 farklı sertlik testi vardır. Çalışma Vickers sertlik testi yapılmıştır. Vickers sertlik testi piramit şeklinde bir batıcı uç kullanılır ve bu piramit tepe açısı 136 derecedir. Bu test

yapılırken belirlenen yük malzemeye belli bir süre boyunca batırılır ve batırılma sonucunda malzeme üzerinde oluşan izin köşegen uzunluklarının ölçülmesi sonucu sertlik değeri belirlenir [12].

4.3.2. Aşınma Testi

Aşınma olayı mühendislik malzemelerinin birbirine sürtmesi sonucuyla malzemelerin yüzeylerinden kopma veya kırılma şeklinde oluşmaktadır. Bu test ile aşınma meydana geldiğinde parça kopmalarının miktarı belirlenmektedir. Malzemelerin bulunduğu nem veya korozif ortamda bulunması aşınmayı hızlandırmaktadır. Aşınma testinde 20 N ve 40 N yük uygulanmıştır. Strok mesafesi ise 10 mm'dir.

4.3.3. Rekristalizasyon İşlemi

Rekristalizasyon tavlaması yapılmasındaki amaç soğuk şekillendirme işleminin sırasında malzemede meydana gelen olumsuz etkileri gidermektir. Rekristalizasyon tavlaması yapılması sonrasında malzemenin içyapısındaki taneler ince taneye dönüşür. Bu ısı işlem neticesinde pekleşmiş olan malzeme yumuşar ve sünekliği artar.



Şekil 4.3. Rekristalizasyon ısı işlem cihazı.

Çalışmada tüm numunelere kristalleşme tavlama uygulanmıştır. Rekristalleşme işlemi 700 °C'de 3 saat bekletilerek fırında soğutulmuştur. Numunelerin 3 tanesine tek tek suyun

içerisinde tam soğuyana kadar su verme, suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutma, suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarıda soğutma işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 4.4. Rekristalizasyon ısıl işlemi için hazırlanan numuneler.

4.3.4. Çekme Testi

Tahribatlı muayene yöntemleri arasında en çok tercih edilen çekme testi, malzemenin dayanımı, şekil değiştirme ve mekanik özellikleri gibi çeşitli özelliklerinin belirlenmesi amacıyla yapılır. Bu sayede malzemenin yük altındaki davranışı incelenir ve hangi yük altında kopacağı belirlenir. Malzemenin kullanılacak yere uygun olup olmadığı çekme testi ile belirlenebilir. Yapılan test sonucunda elde edilen veriler mühendislik hesaplamalarında kullanılır [12].

Çekme testi sonucunda elde edilen değerler şunlardır;

- Orantı sınırı
- Elastik sınırı
- Akma dayanımı
- Çekme dayanımı
- Kopma uzaması
- Kopma büzülmesi

- Rezilyans
- Tokluk

Çekme testi Karabük Üniversitesi Margem Laboratuvarındaki çekme cihazında yapılmıştır.

4.3.5. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

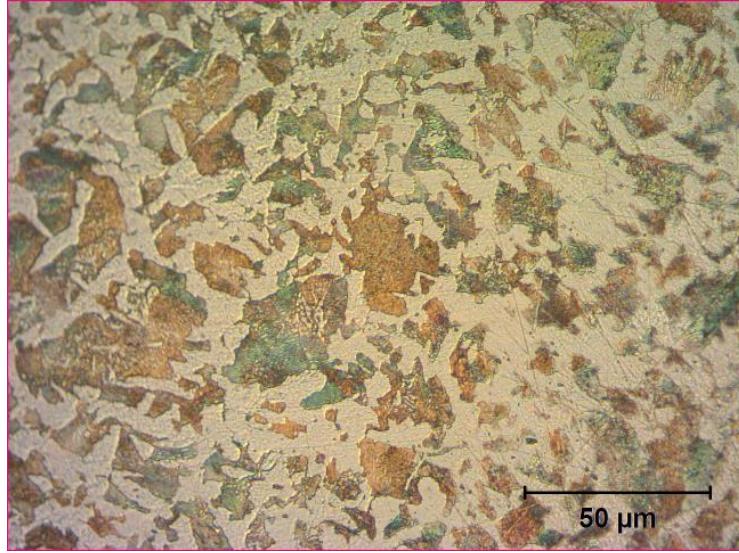
Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile numunelerin içyapıları veya yüzeylerinin incelenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu test numune hazırlanması kolay olduğundan dolayı en çok tercih edilen testlerdendir. Test Karabük Üniversitesi Margem Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 5

BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

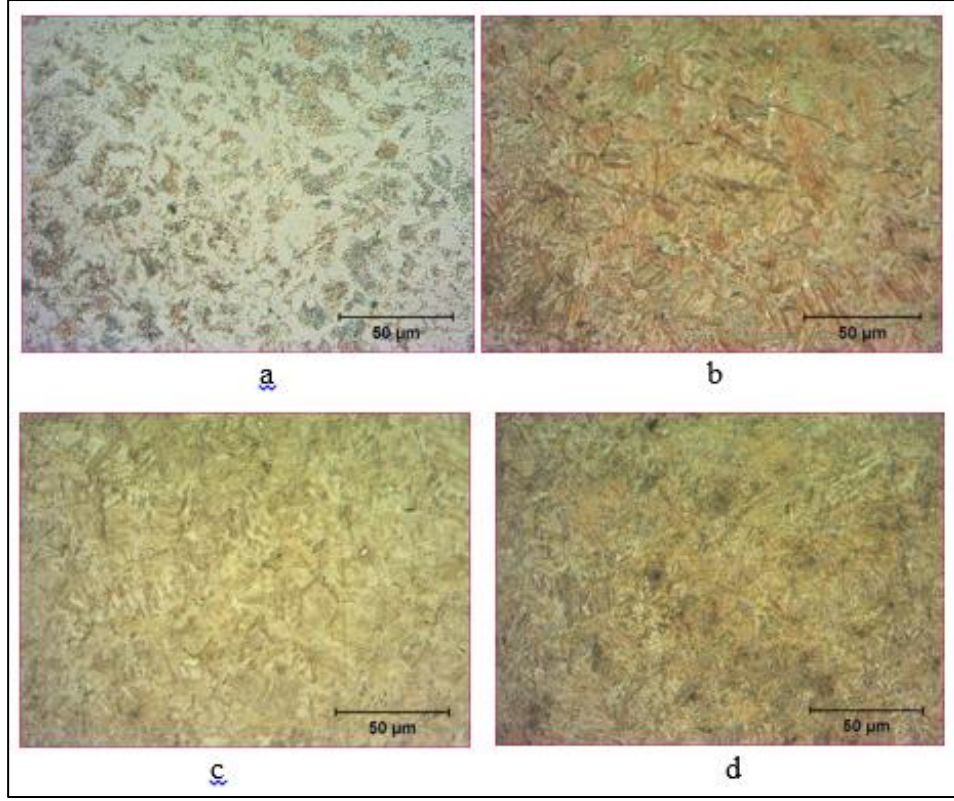
Deneysel çalışmalarda kullanılan düşük karbonlu St37 yapı çeliğinin SEM analizi sonucu mikroyapı görüntüleri şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. St37 yapı çeliğinin mikroyapı görüntüsü.

Şekil 5.1.’de görüldüğü üzere yapının çoğunu martenzit yapı oluşturmaktadır.

Çalışmada 4 numunenin hepsine yeniden kristalleşme tavı yapıldı. Daha sonra 4 numuneden 1 tanesi 700 °C’de 3 saat bekletilerek fırında soğutulmuştur. Geriye kalan numunelerin 3 tanesine ise tek tek suyun içerisinde tam soğuyana kadar su verme, suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutma, suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarıda soğutma işlemleri uygulanmıştır. Yapılan bu işlemlerden sonra elde edilen mikroyapı görüntüleri şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. Soğutma işlemleri mikroyapı görüntüleri a) 700 °C'de 3 saat bekletilerek fırında bekletilme, b) suyun içerisinde tam soğuyana kadar su verme, c) suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutma, d) suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarıda soğutma işlemleri.

Şekil 5.2'de görüldüğü üzere mikroyapı incelemesinin ardından St37 yapı çeliği yeniden kristalleşmeden önceki mikroyapısı ve sonrasında mikroyapıda büyük bir değişiklik olduğu gözlemlenmiştir

5.2. AŞINMA TESTİ SONUÇLARI

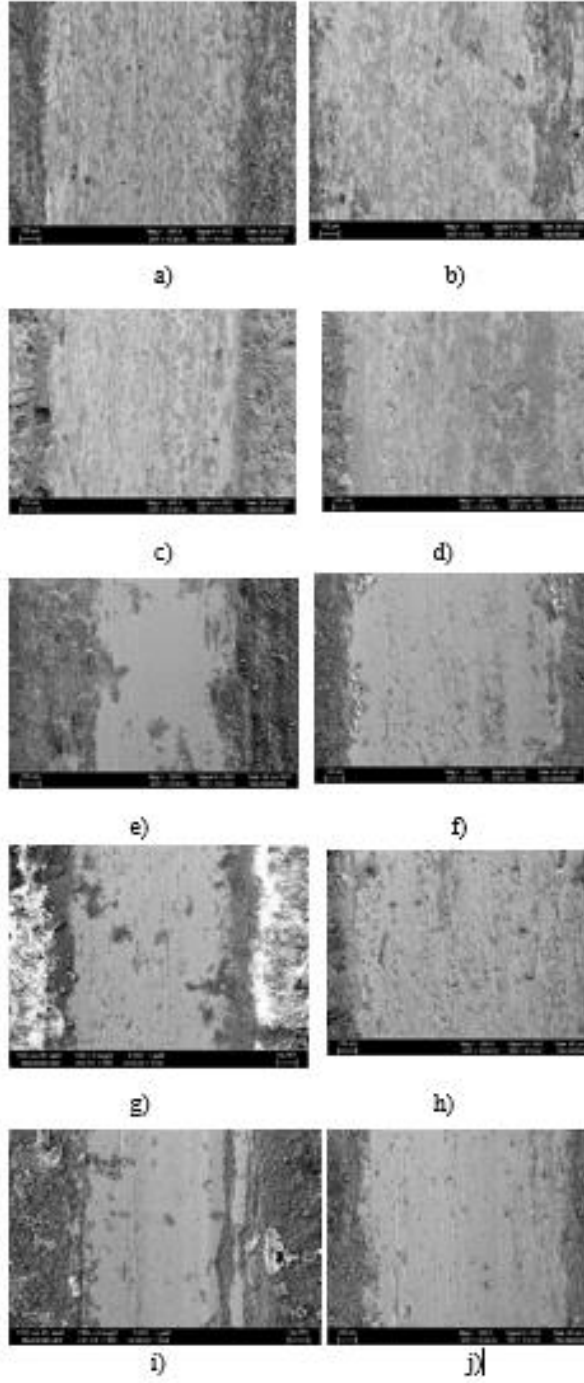
Aşınma testinde aşınma ile yük arasındaki ilişkinin belirlenmesi için 20 ve 40 N yük uygulanmıştır ve strok mesafesi 10 mm'dir. Aşınma testi sonuçları çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Aşınma test sonuçları.

	ST37	Fırında	Suda Tam Soğutma	Suda 10sn soğutma	Suda 1sn Soğutma
20N	0,019mm ²	0,013mm ²	0,013mm ²	0,015mm ²	0,033mm ²
	0,021mm ²	0,015mm ²	0,011mm ²	0,022mm ²	0,034mm ²
	0,018mm ²	0,012mm ²	0,012mm ²	0,029mm ²	0,050mm ²
40N	0,041mm ²	0,061mm ²	0,056mm ²	0,067mm ²	0,083mm ²
	0,044mm ²	0,083mm ²	0,045mm ²	0,063mm ²	0,072mm ²
	0,036mm ²	0,081mm ²	0,067mm ²	0,067mm ²	0,096mm ²

Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere yapılan deney sonucunun incelenmesiyle hem 20 N hem de 40 N yük altında en fazla aşınma suda 1 sn. soğutma şeklinde bekletilen numunede olduğu sonucuna varılmıştır.

Aşınma testi uygulanan numunelerin SEM görüntüleri şekil 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3. Aşınma testi sonucunda a) St37 çeliğine 20 N, b) St37 çeliğine 40 N, c) rekristalizasyon sonrası suda bekletilen numuneye 20 N, d) rekristalizasyon sonrası suda bekletilen numuneye 40 N, e) tam suda bekletilen numuneye 20 N, f) tam suda bekletilen numuneye 40 N, g) 1 sn. suda bekletilen numuneye 20 N, h) 1 sn. suda bekletilen numuneye 40 N, i) 10 sn. suda bekletilen numuneye 20 N, j) 10 sn. suda bekletilen numuneye 40 N yük altındaki SEM görüntüleri

5.2. SERTLIK TESTI SONUÇLARI

Çalışmada sertlik testi Vickers sertlik testi yapılmıştır. Numunelere 1 kg yük uygulanmıştır. Sertlik testi sonuçları çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Sertlik test sonuçları.

	St37	Rekristalizasyon	Suda Tam Soğuma	Suda 1sn soğuma	Suda 10Sn soğuma
Deney 1	260 HV	198	636	506	615
Deney 2	261 HV	200	641	518	615
Deney 3	250 HV	196	643	513	608

Çizelge 5.2’de görüldüğü üzere yapılan deney sonucunun incelenmesiyle Rekristalizasyon işleminde sertlik değerlerinde düşme olduğu, suda soğutma işlemlerinde ise sertlik değerlerinde arttığı gözlemlenmiştir. Sertlik değerinde en büyük artış ise suda tam soğuma işleminde olmuştur.

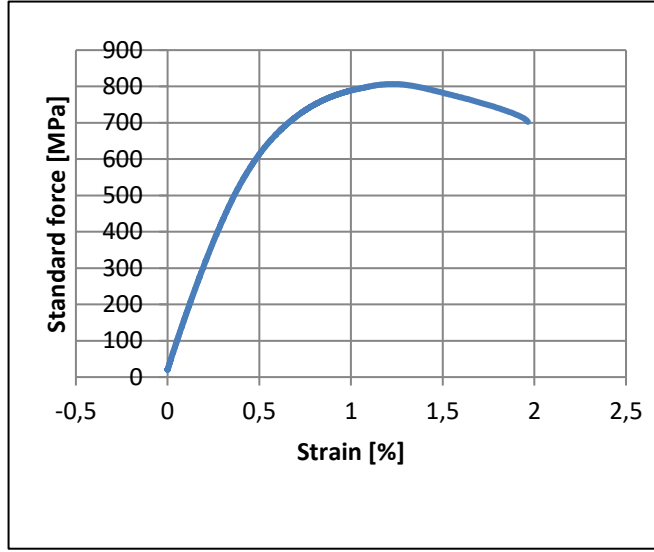
5.4. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI

Çekme deneyi uygulaması sonucunda hasara uğrayıp kopan numune bölge şekil 5.4’de gösterilmiştir.

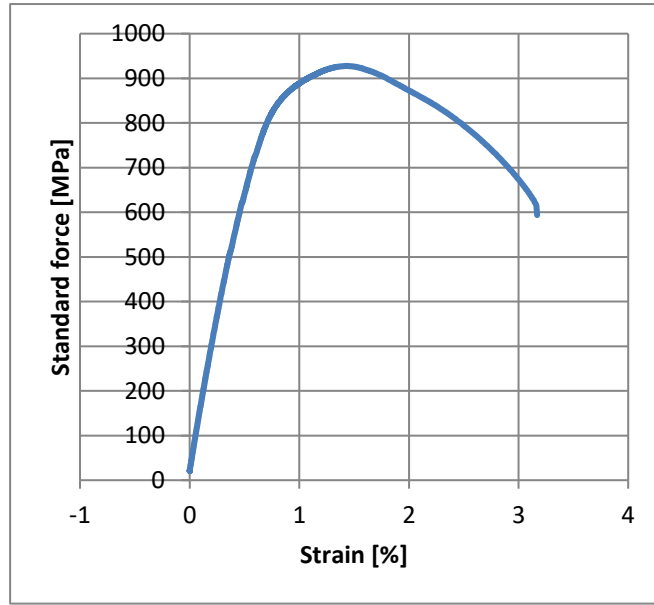


Şekil 5.4. Çekme test sonucu.

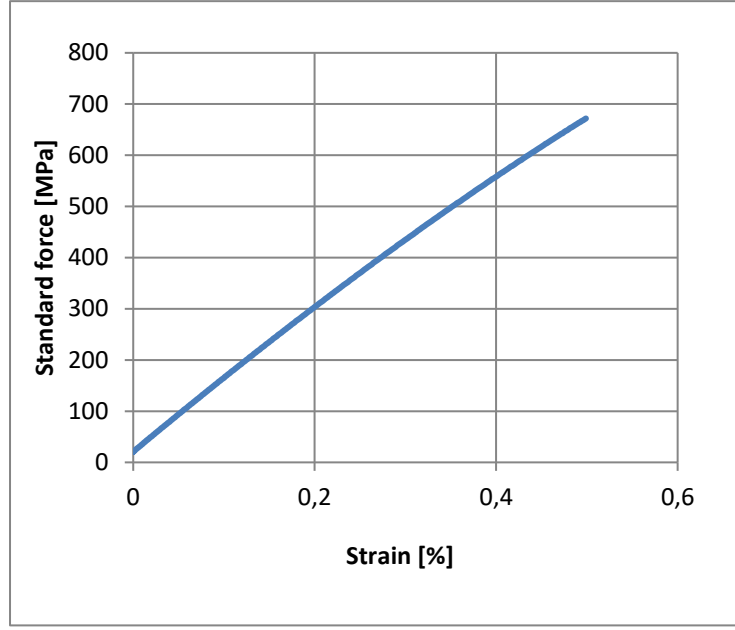
Şekil 5.4’de görüldüğü üzere malzeme kopma sırasında sünek kırılma yüzeyi oluşturmuştur. Çalışmada kullanılan çelik numunelerin çekme testi sonucu elde edilen çekme diyagramları aşağıda verilmiştir.



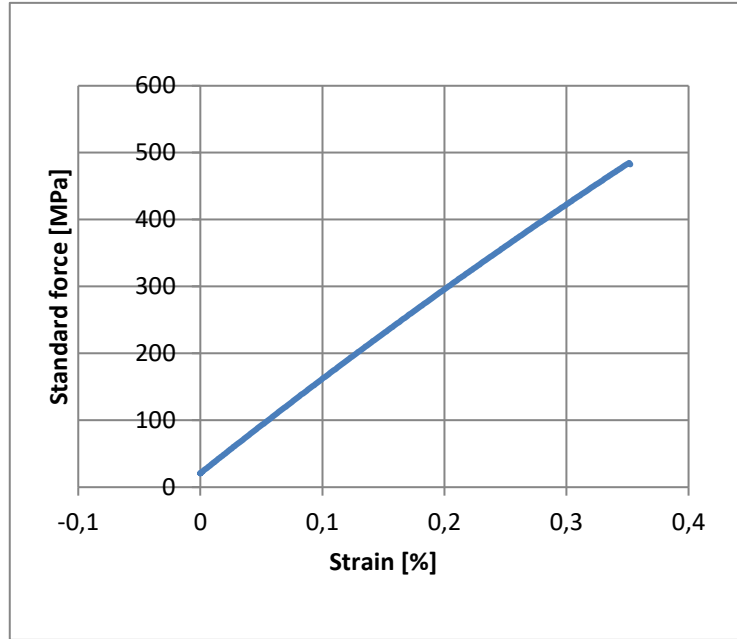
Şekil 5.5. Isıl işlem uygulanmamış St37 çelik numunenin çekme diyagramı.



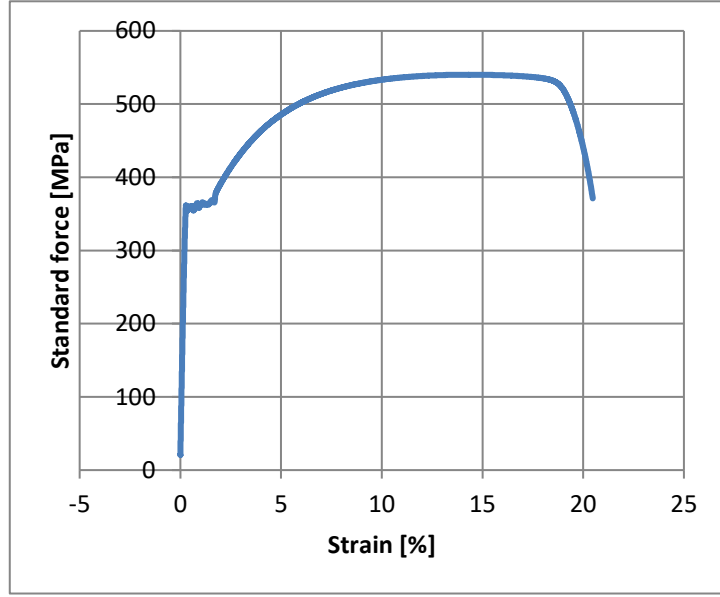
Şekil 5.6. Suyun içersine 1sn. daldırılıp dışarda soğutulan numunenin çekme diyagramı.



Şekil 5.7. Suyun içerisinde 10 sn. suya daldırılıp dışarda soğutulan numunenin çekme diyagramı.



Şekil 5.8. Suyun içerisinde soğuncaya kadar tam su verilen numunenin çekme diyagramı.



Şekil 5.9. Fırında soğutulan numunenin çekme diyagramı.

Şekil 5.9’da verilen rekristalizasyon işlemi sonucu 3 saat fırında bekletilen numunenin çekme diyagramında numune belirgin bir akma göstermiştir. Numunenin tokluğu yüksektir. Yapılan tüm çekme testi sonucu tokluğu en yüksek numune fırında soğutulan numunesidir.

Şekil 5.5-5.9 arasındaki çekme testi sonucunda elde edilen diyagramların çekme dayanımları ve akma dayanımları çizelge 5.3’de verilmiştir.

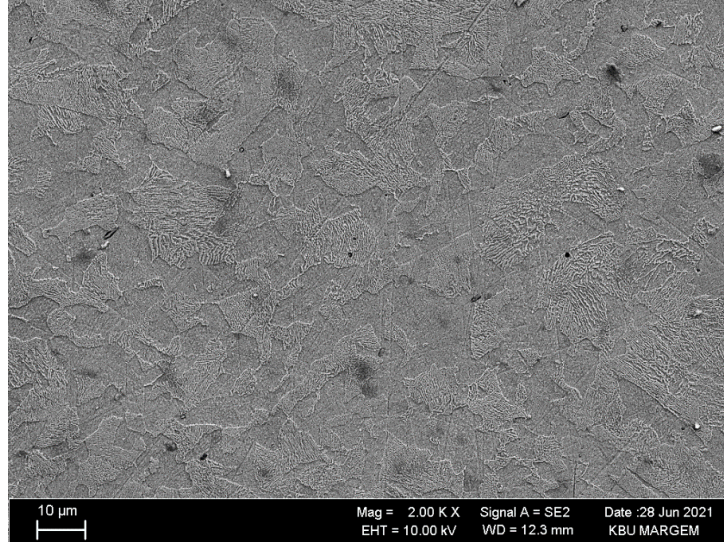
Çizelge 5.3. Çekme diyagramlarından alınan çekme dayanımı ve akma dayanım verilerinin analizi.

Numune	Çekme dayanımı (N/mm ²)	Akma dayanımı
Isıl işlem uygulanmayan St37	806 MPa	725 MPa
Rekristalizaton sonucu fırında soğutulan numune	540 MPa	357 MPa
10 sn. suda soğutulan	Çekme dayanımı oluşmamıştır	Belirgin akma göstermemiştir.
1 sn. suda soğutulan	927 MPa	827 MPa
Tam soğuyana kadar su verilen numune	Çekme dayanımı oluşmamıştır	Belirgin akma göstermemiştir.

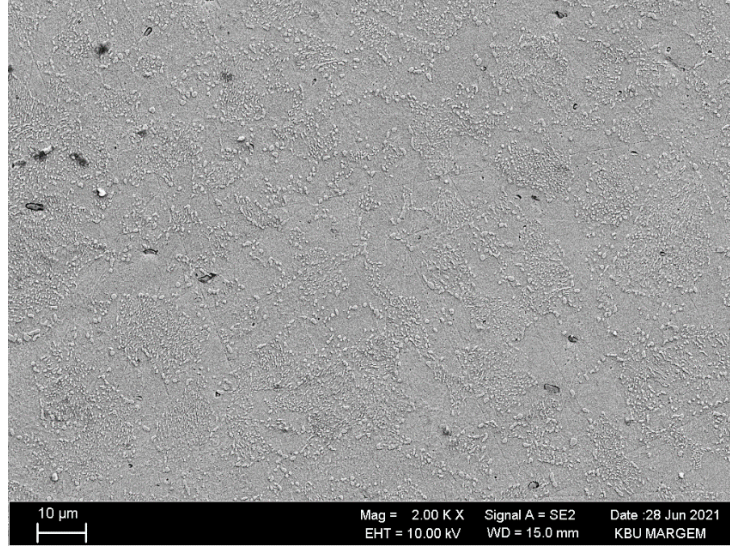
Çizelge 5.3’de görüldüğü üzere tam soğuyana kadar su verilen numune ve 10 sn. suda bekletilerek dışarda soğutulan numunede çekme dayanımı oluşmadığı ve maksimum kuvvet (sırasıyla 482 Mpa ve 671 Mpa) uygulandığında numunelerin koptuğu gözlemlenmiştir. Bu 2 numunede belirgin akma olmamıştır.

5.5. TARAMALI ELEKTRON MIKROSKOBU (SEM) ANALIZI SONUÇLARI

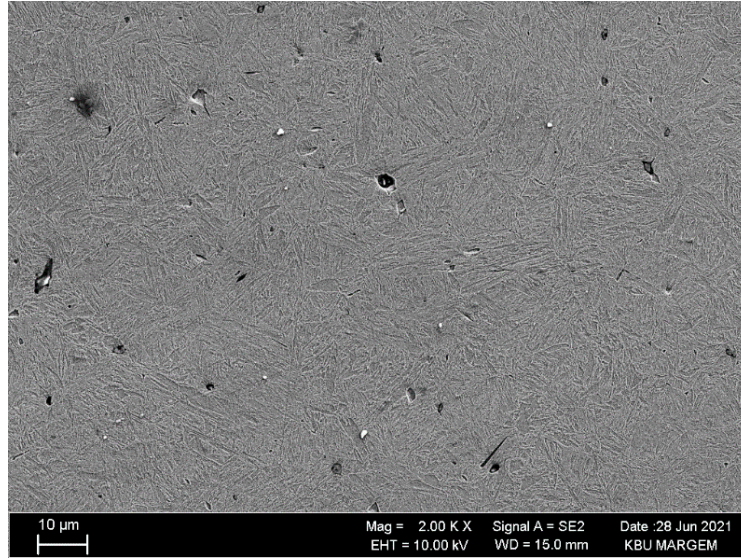
SEM incelemelerini yapmak için 5 adet numune hazırlanmıştır. Bunlarda biri ısıtıl işlem uygulanmamış St37 yapı çeliğidir. Diğerleri 1 adet numune fırında soğutulmuş, 1 adet numune suyun içerisinde tam soğuyana kadar su verme, 1 adet numune suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutma, 1 adet numune ise suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarda soğutma şeklindedir. Çalışmada mikroyapı incelenmesi için de SEM görüntüleri için de zımparalama ve parlatma işlemleri ve sonrasında dağlama işlemi yapılmıştır. Aşağıda verilen şekil 5.10 – 5.14 numunelerin SEM görüntüleri verilmektedir.



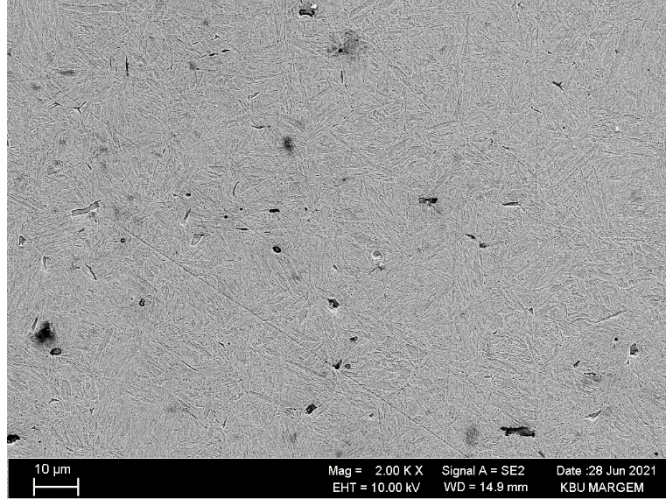
Şekil 5.10. Isıl işlem uygulanmamış St37 yapı çeliğinin SEM görüntüsü.



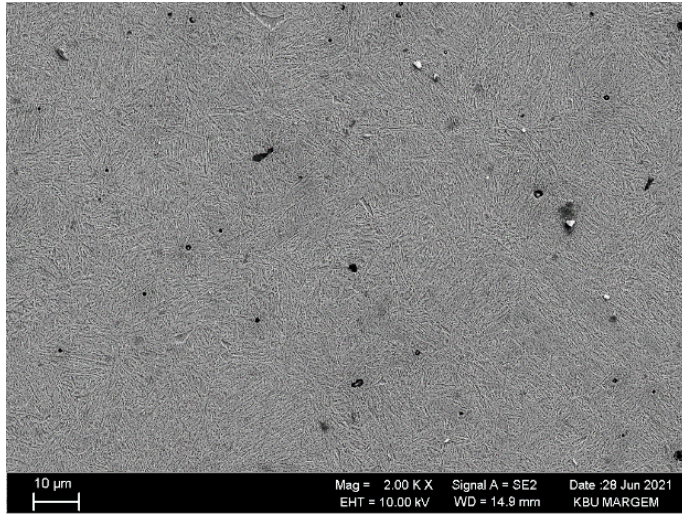
Şekil 5.11. Rekristalizasyon işlemi sonrası fırında soğutulan numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.12. Suyun içerisinde tam soğuyana kadar su verme işlemi yapılan numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.13. Suyun içerisinde 10 sn. daldırılıp dışarda soğutulan numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.14. Suyun içerisinde 1 sn. daldırılıp dışarda soğutma yapılan numunenin SEM görüntüsü.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Bu çalışmada, düşük karbonlu St 37 yapı çeliğinin ısıtma işlemi uygulanmadan önce ve sonrası için numunelerde meydana gelen farklılıklar kimyasal ve mekanik özellikleri açısından karşılaştırılmıştır. Çalışmada 8x8 mm boyutunda kare demir 30 cm uzunluğunda 4 adet numune hazırlanmıştır. Numunelerin 4 tanesine de rekristalizasyon tavlama uygulanmıştır. Isıtma işleminden sonra ise 4 numunede farklı ortam ve zamanda soğutulmuştur. Numunelere sertlik testi, aşınma testi, çekme testi yapılmıştır. Daha sonra numunelerin mikroyapıları SEM görüntüleri incelenmiştir.

Yapılan testler sonucunda:

- St 37 yapı çeliğinin ısıtma işlemi öncesi ve sonrası mikroyapısında büyük farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan martenzit yapı malzemeyi sert ve dayanıklı hale getirir.
- Numunelere uygulanan rekristalizasyon ısıtma işlemi sonrası soğutulduğunda tam soğutma, 10 sn. soğutma ve 1 sn. soğutma uygulanan malzemelerin mikroyapılarında bir fark gözükmemektedir.
- Aşınma deneyi sonucunda elde edilen verilerde bakıldığında 20 N ve 40 N yük altında en fazla aşınma suda 1 sn. soğutma şeklinde bekletilen numunede olduğu sonucuna varılmıştır.
- Yapılan sertlik deneyi sonucunda rekristalizasyon işleminde sertlik değerlerinde düşme olduğu, suda soğutma işlemlerinde ise sertlik değerlerinde arttığı gözlemlenmiştir. Sertlik değerinde en büyük artış ise suda tam soğutma işleminde olduğu sonucuna varılmıştır.
- Çekme testi sonuçlarına göre Yapılan tüm çekme testi sonucu tokluğu en yüksek numune rekristalizasyon işlemi sonucu 3 saat fırında bekletilen numunesidir.

- Çekme testinden elde edilen diyagramlar numunlerin farklı zamanda ve farklı ortamda soğutulmalarının malzemenin tokluğunu, çekme ve akma dayanımını, malzemenin uzamasını, sunekliliğini etkilediği ortaya çıkmıştır.

KAYNAKLAR

- 1) D. A. Fadare, T. G. Fadara and O. Y. Akanbi, "Effect of Heat Treatment on Mechanical Properties and Micro- structure of NST 37-2 Steel," *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, Vol. 10, No. 3, 299-308 (2011).
- 2) Ekinci, C., "Düşük karbonlu mikro alaşımlı çeliklerin sertlik ve mikro yapıları üzerine soğuma hızının etkisi", *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, (2011).
- 3) Thakur, A., & Aregawi, G. E., "Effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of ST 37-2 rear trailing arm", *International Journal of Current Engineering and Technology*, 9(1), 80-91 (2019).
- 4) Balavar, M., and Mirzadeh, H., "Enhancement of mechanical properties of low carbon steel based on heat treatment and thermo-mechanical processing routes", *Journal of Ultrafine Grained and Nanostructured Materials*, 51(2), 169-173 (2018).
- 5) Najafi, M., Mirzadeh, H., & Alibeyki, M. Improved mechanical properties of structural steel via developing bimodal grain size distribution and intercritical heat treatment. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(9), 5409-5414 (2019).
- 6) Aydın, H., "Çeliklerin Çalışma Ortamlarının Mekanik Özelliklerine Etkisi", *Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi*, c. 6, sayı. 2/2, 160-173, (2017).
- 7) Havuş, N., "Düşük Karbonlu St 37 Çeliğinin Sınırlandırılmış Yıvli Presleme İle Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi", *Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük, (2019).
- 8) Çalik, A., "Effect of cooling rate on hardness and microstructure of AISI 1020, AISI 1040 and AISI 1060 Steels", *International journal of Physical sciences*, 4(9), 514-518, (2009).
- 9) Gülgen, İ. S., İş makineleri tırnakları üretiminde kullanılan az alaşımlı çeliklerin ısıtma işlemi", *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, (2008).
- 10) N. Köksal , M. Uzkut ve B. Ünlü , "FARKLI KARBON İÇERİKLİ ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN ISIL İŞLEMLERLE DEĞİŞİMİ", *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 6, sayı. 2, ss. 95-100, (2004).

- 11) A. Aytaç , M. Işık , B. Çanakçı , T. Özdemir , K. Aztekin ve H. İpek , "AISI 1008 1040 ve 4140 Çeliklerinde Isıl İşlem, Karbon Oranı ve Alaşım Elementlerinin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisinin İncelenmesi", *Savunma Bilimleri Dergisi*, c. 17, sayı. 2, ss. 139-165, doi:10.17134/khosbd.477252, (2018).
- 12) Savaşkan, T., "Malzeme Bilimi ve Malzeme Muayenesi", Papatya Bilim Yayıncılık, (2019).
- 13) "Asil Çelik Teknik Yayınlar Serisi", Bölüm 5, s: 4-28 Bölüm 6, s: 4-48, Bölüm 7, s. 1-62, 1982.
- 14) Daldal, S., "Niobyum Karbür Kaplamaların Özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2002).
- 15) Keski, E., Ç-4140 Çeliğinin Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Konya, (2009).
- 16) Esener, P.A., "Farklı Oranlarda Bor İlave Edilmiş AISI 4140 (42CrMo4) İslah Çeliğinin Isıl İşlemi Ve Karakterizasyonu", *Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Nevşehir, (2017).
- 17) Aktaş, O., "Petrol Ve Doğalgaz Boru Hatlarında Kullanılan Boruların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik Ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Hatay, (2017).
- 18) Köksel Kara, M., "Sürekli Tavlama Yöntemi İle Yeni Kalite Bir Emaye Çeliği Üretimi", *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, (2014).
- 19) Kınıkoğlu, N.G., "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını*, Mart Matbaacılık, 65, 855s. İstanbul, (2001).
- 20) Onaran, K., "Malzeme Bilimi", Bilim Teknik Yayınevi, Ulus Matbaası, 383s. İstanbul, (2006).
- 21) Erdoğan, M., "Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri Cilt 1", Nobel Yayınları, Arı ofset, 105, 338s. Ankara, (2000).
- 22) Öztürk, S., "Faz Diyagramları Ders Notları", *Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, Trabzon.
- 23) Kınıkoğlu, N. G., "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği", Yıldız Teknik Üniversitesi Yayını, Mart Matbaacılık, 65, 855s. İstanbul, (2001).
- 24) Erdoğan, M., Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt 1. Nobel Yayınları, Alemdar Ofset, 62, 364s. Ankara, (1998).

- 25) Demirci, H., “Mühendislik Malzemeleri”, Aktüel Yayınları, Motif Matbaacılık, 252s. İstanbul, (2004).
- 26) Agrawal, B.K., “Introduction to Engineering Materials”, Tata McGraw-Hill, Yeni Delhi, 353 p. (2008).
- 27) Şahin, A., “Çelikler ve Isıl İşlem”, (2014).
- 28) Özkader, M. Ç., “Isıl İşlemlerle AISI 4140 Çeliğinin Abrasiv Aşınmasının Araştırılması”, *Hittit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Çorum, (2015).
- 29) Yüksekaya, U., “Çeliklerin Kaynağında Kaynak Kabiliyeti – Isıl İşlem İlişkisinin İncelenmesi”. Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (1996).
- 30) Yavuz, M., “Metalografik Deneyler Sonucu Oluşturulan Algoritmaya Göre Çalışan Tam Otomasyonlu Isıl İşlem Fırını Hesaplamaları, Prototip Tasarımı Ve İmalatı”, *Afyon Kocafep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon, (2020).
- 31) Güner, E., “4140 Çeliğinin Mekanik Aşınma Özelliklerine Lazerle Yüzey Sertleştirme İşleminin Etkisinin İncelenmesi”, *Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Yüksek Lisans Tezi, Bartın, (2019).
- 32) Çalığülü, U., Türkmen, M., Çanakçı, A. ve Gökdaş, M., “PTA kaynak yöntemi ile birleştirilen OPTİM 700 MC-St37 malzemelerinin X-Ray radyografisi”, *The 1st International Engineering and Technology Symposium*, Batman (2018).
- 33) Karab, B., and Tasar, M., “St 37 Karbonlu Çelik Malzeme Ara Bağlantı Aparatı Delme ve Bükmenin Teorik ve Deneysel İncelenmesi”, (2011).
- 34) İnternet: Uslularhadde, “St37-2 Çelik Özellikleri”, <https://www.uslularhadde.com/st-37-2-celik-ozellikleri>.
- 35) İnternet: “Metalografik numune hazırlama yöntemleri”, Umut Makine, www.bulutmak.com

ÖZGEÇMİŞ

Mahir AKDUMAN ilk ve orta öğrenimini Ankara'da tamamladı. İncirli Teknik ve Endüstri Meslek Lisesinden mezun oldu. 2015 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü'nde öğrenime başlayıp 2019 yılında iyi derece ile mezun oldu.