



T.C.

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ÖSTENİTLEME SICAKLIĞI VE ALAŞIM ORANLARININ

YÜKSEK MANGANLI ÇELİKLERİN

MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Doktora Tezi

Hakan YILDIRIM

Çorum - 2024

**ÖSTENİTLEME SICAKLIĞI VE ALAŞIM ORANLARININ YÜKSEK
MANGANLI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Hakan YILDIRIM

**Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Doktora Tezi

TEZ DANIŞMANI

Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN

Çorum 2024

Hakan YILDIRIM tarafından hazırlanan “Östenitleme Sıcaklığı ve Alaşım Oranlarının Yüksek Manganlı Çeliklerin Mekanik Özelliklerine Etkisi” adlı tez çalışması .../.../..... tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU

.....

Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Emin ERDİN

.....

Doç. Dr. Melika ÖZER

.....

Doç. Dr. Kürşat GÜLTEKİN

.....

Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ

.....

Hitit Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulunun .../.../..... tarih ve sayılı kararı ile Hakan YILDIRIM'ın Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora derecesi alması onanmıştır.

Prof. Dr. Osman ÇUBUK

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan ederim.

Hakan YILDIRIM



**ÖSTENİTLEME SICAKLIĞI VE ALAŞIM ORANLARININ
YÜKSEK MANGANLI ÇELİKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Hakan YILDIRIM

ORCID: 0000-0003-3845-7973

HİTİT ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Doktora Tezi

Mayıs 2024

ÖZET

Yüksek manganlı çelikler aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzemeler olarak başta madencilik ve çimento sektörlerindeki birincil/ikincil kırıcı makineleri olmak üzere benzer sektörlerde yaygın şekilde ve verimli olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte alaşım ve ısıl işlem şartlarına bağlı olarak malzemede ortaya çıkan olumsuz etkilerden dolayı kırılmalar yaşanmaktadır. Bu kırılmalar işletme faaliyetlerinde büyük hasarlara ve zamansız duruşlara bağlı olarak önemli ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Bu deneysel çalışma ile yüksek manganlı çeliklerde alaşımlandırma ve ısıl işlem şartlarına bağlı olarak döküm parçanın çalışma koşullarında herhangi bir hasara uğramadan çalışma ömrünü tamamlamasını sağlayacak bilgilere katkı sağlamak amaçlanmıştır. Böylece işletmelerde makine ve kırıcı hasarlarından kaynaklanan bakım ve onarım maliyetlerinin yanı sıra zamansız makine kapanmalarından kaynaklanan ekonomik kayıpların önüne geçilmesi hedeflenmektedir. Deneysel çalışmalar kapsamında, öncelikle %12-14, %16-18 ve %19-21 aralığında mangan içeren çelik numunelerin Y-blok şeklinde dökümü yapılmıştır. Daha sonra döküm numunelerine 1030, 1050 ve 1080 °C östenitleme sıcaklıklarında ısıl işlem uygulanmış ve her numuneye çekme, darbe ve aşınma testleri yapılarak en iyi ısıl işlem sıcaklığı ve en iyi alaşım belirlenmiştir. Ayrıca numunelere SEM-EDS analizleri ve metalografik incelemeler yapılarak karakterize edilmiş ve mekanik test sonuçlarıyla uyumlu değerler elde edilmiştir. Tüm bu çalışmalar, östenitleme sıcaklığının 1080 °C seçildiği ısıl işlem şartlarında %12-14 aralığında mangan içeren numunenin mekanik özellikler bakımından daha üstün olduğunu ortaya koymuştur.

Anahtar Kavramlar: Yüksek manganlı çelik, Isıl işlem, Darbe dayanımı, Aşınma

Bilim Kodu: 91421



**EFFECT OF AUSTENIZATION TEMPERATURE AND ALLOY RATIOS ON
MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH MANGANESE STEELS**

Hakan YILDIRIM

ORCID: 0000-0003-3845-7973

HITIT UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL

Doctor of Philosophy Thesis

May 2024

ABSTRACT

High manganese steels are used widely and efficiently as abrasion and impact-resistant materials, especially in primary and secondary crusher machines in the mining and cement sectors and similar sectors. However, fractures may occur due to the negative effects that occur on the material depending on the alloy and heat treatment conditions. These fractures cause major damage to business activities, untimely stoppages, and significant economic losses.

This study aims to contribute to the information that will enable these steels to complete their working life without any damage under working conditions by conducting the necessary experimental studies depending on the experimental alloying and heat treatment conditions on high manganese steels. Thus, it is aimed at preventing economic losses arising from untimely machine shutdowns as well as maintenance and repair costs arising from machine and crusher damage in enterprises. Within the scope of experimental studies, first, steel specimens containing manganese in the range of 12-14%, 16-18%, and 19-21% were cast in the form of Y-blocks. Afterwards, the cast specimens were heat treated at 1030, 1050, and 1080 °C austenitizing temperatures, and tensile, impact, and wear tests were performed for each specimen to determine the best heat treatment temperature and the best alloy. In addition, the specimens were characterized by SEM-EDS analyses, and metallographic examinations and results consistent with the mechanical test results were obtained. All these studies have revealed that the specimen containing 12-14% manganese is superior in terms of mechanical properties under heat treatment conditions where the austenitizing temperature is selected as 1080 °C.

Key Terms: High manganese steel, Heat treatment, Impact resistance, Wear

Science Code: 91421



TEŞEKKÜR

Doktora tezimin tüm süreçlerinde yol gösteren ve desteklerini esirgemeyen başta danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi M. Emin ERDİN olmak üzere Doç. Dr. Öncü AKYILDIZ ve Doç. Dr. Mert Şafak TUNALIOĞLU hocalarıma teşekkür ederim. Doktora savunma sürecinde değerli görüş ve önerileri ile katkıda bulunan Doç. Dr. Melika ÖZER ve Doç. Dr. Kürşat GÜLTEKİN hocalarıma teşekkür ederim. Bu süreçte her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hakan YILDIRIM



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar DİZİNİ.....	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
RESİMLER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xvi
GİRİŞ.....	1

1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

1.1. Hadfield Çelikleri ile İlgili Çalışmalar	3
1.2. Yüksek Manganlı Çelikler ile İlgili Çalışmalar	6
1.3. Literatür Özeti ve Özgün Değer	10

2. BÖLÜM

YÜKSEK MANGANLI ÇELİKLER

2.1. Yüksek Manganlı Çeliklerin Kullanım Alanları ve Isıl İşlemi.....	11
2.1.1. Isıl işlem uygulamaları	12
2.1.2. Yüksek manganlı çeliklerde ısıl işlem	14
2.1.3. Yüksek manganlı çeliklerin ağır yük altında davranışı.....	18
2.2. Yüksek Manganlı Çeliklerde Alaşım Etkisi.....	19
2.2.1. Karbon (C) ve mangan (Mn) etkisi	20
2.2.2. Silisyum (Si) etkisi.....	21
2.2.3. Krom (Cr) etkisi.....	22

2.2.4. Molibden (Mo) etkisi.....	23
2.2.5. Nikel (Ni) etkisi	24
2.2.6. Fosfor (P) etkisi.....	24
2.2.7. Kükürt (S) etkisi.....	25

3. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

3.1. Deney Numunelerinin Üretimi	28
3.2. Numunelerin Isıl İşlemi	29
3.3. Çekme Deneyi Prosedürü.....	30
3.4. Darbe Deneyi Prosedürü.....	31
3.5. Aşınma Deneyi Prosedürü.....	32
3.6. Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri ve SEM-EDS Analizleri	33
3.7. Sertlik Deneyleri.....	33

4. BÖLÜM

DENEY VE ANALİZ ÇALIŞMALAR

4.1. Çekme Deneyleri.....	37
4.1.1. Çekme deneyi tasarımı.....	37
4.1.2. Çekme deneyi bulguları	38
4.2. Darbe Deneyleri.....	47
4.2.1. Darbe deneyi tasarımı	47
4.2.2. Darbe deneyi bulguları.....	48
4.3. Aşınma Deneyleri	52
4.3.1. Aşınma deneyi tasarımı	53
4.3.2. Aşınma deneyi bulguları.....	54
4.4. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması	59
4.5. Mikroyapı İncelemeleri ve SEM-EDS Analizleri.....	60

	Sayfa
4.5.1. 1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn1 kodlu numune	60
4.5.2. 1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn2 kodlu numune	63
4.5.3. 1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn3 kodlu numune	66
4.6. Sertlik Ölçüm Deneyleri.....	69
4.7. 1080 °C'de Isıl İşlemleri Yapılmış Numunelerin Sertlik ve Mekanik Değerlerinin Karşılaştırılması.....	70
4.8. YMÇ'den Beklenen Özellikler Bağlamında Yapılan Test ve Analizlerin Önemi ve Değerlendirilmesi.....	72
SONUÇLAR VE TARTIŞMA	73
KAYNAKÇA	77

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
Tablo 2.1. Östenitik manganlı çelik dökümlerin sınıflandırılması.....	14
Tablo 2.2. Soğutma kapasitesini belirleyen Grossman H değerleri.....	17
Tablo 3.1. Dökümü yapılan numune sayıları	29
Tablo 4.1. Yüksek manganlı çelik numunelerin kimyasal bileşimi.....	35
Tablo 4.2. Yüksek manganlı çelik numunelerin ısı işlemleri.....	35
Tablo 4.3. Çekme deney parametre ve değerleri	38
Tablo 4.4. Çekme deney tasarımı.....	38
Tablo 4.5. Çekme deney sonuçları.....	39
Tablo 4.6. Çekme deneyi için bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı.....	44
Tablo 4.7. Çekme deneyi için değişken analizi sonuçları.....	46
Tablo 4.8. Darbe deneyi parametre ve değerleri	47
Tablo 4.9. Darbe deneyi tasarımı.....	47
Tablo 4.10. Darbe deneyi sonuçları.....	48
Tablo 4.11. Darbe deneyi için bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı	50
Tablo 4.12. Darbe deneyi için değişken analizi sonuçları	52
Tablo 4.13. Aşınma deney parametre ve değerleri	53
Tablo 4.14. Aşınma deney tasarımı	53
Tablo 4.15. Aşınma deneyi sonuçları.....	54
Tablo 4.16. Aşınma deneyi için bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı	56
Tablo 4.17. Aşınma deneyi için değişken analizi sonuçları	58
Tablo 4.18. Tüm deney parametrelerinin değişken analizi sonuçları.....	60
Tablo 4.19. Sertlik ölçüm deneyi sonuçları.....	70

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Demir-karbon (Fe-C) denge diyagramı	13
Şekil 2.2. Isıl işlem çevrimi	13
Şekil 2.3. Demir-mangan (Fe-Mn) faz dönüşüm diyagramı	15
Şekil 2.4. Hadfield çeliğinin farklı büyütme değerlerindeki mikroyapısı	16
Şekil 2.5. Yapı içindeki C ve Mn oranlarının mekanik özelliklere etkileri	21
Şekil 2.6. Yapı içindeki Cr oranının mekanik özelliklere etkileri.....	22
Şekil 2.7. Yapı içindeki Mo oranının mekanik özelliklere etkileri.....	23
Şekil 2.8. Yapı içindeki Ni oranının mekanik özelliklere etkileri.....	24
Şekil 3.1. Test ve analiz çalışmalarının akış şeması	28
Şekil 3.2. Çekme deney düzeneği şeması.....	30
Şekil 3.3. TS EN ISO 148-1 darbe deneyi numunesi.....	31
Şekil 3.4. TS EN ISO 148-1 darbe deney düzeneği.....	31
Şekil 4.1.Taguchi optimizasyon akış şeması	36
Şekil 4.2. Gerilme-uzama diyagramı (IS: 1050 °C; KE: %3,31).....	40
Şekil 4.3. (a) Çekme dayanımı - karbon eşdeğeri, (b) Çekme dayanımı - ısı işlem sıcaklığı grafikleri	41
Şekil 4.4. (a) Akma dayanımı - karbon eşdeğeri, (b) Akma dayanımı - ısı işlem sıcaklığı grafikleri	42
Şekil 4.5. (a) Yüzde uzama - karbon eşdeğeri, (b) Yüzde uzama - ısı işlem sıcaklığı grafikleri	43
Şekil 4.6. Çekme deney parametre değerlerinin SG oranı ortalama değerleri	44
Şekil 4.7. IS, KE parametrelerine bağlı olarak çekme deneyi kontur eğrileri.....	45
Şekil 4.8. Çekme mukavemetinin ısı işlem sıcaklığı ve karbon eşdeğerine bağlı değişimi.....	46
Şekil 4.9. (a) Darbe dayanımı - karbon eşdeğeri, (b) Darbe dayanımı - ısı işlem sıcaklığı grafikleri	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.10. Darbe deney parametre değerlerinin SG oranı ortalama değerleri.....	50
Şekil 4.11. IS, KE parametrelerine bağlı olarak darbe deneyi kontur eğrileri	51
Şekil 4.12. Darbe mukavemetinin karbon eşdeğeri ve ısıtım sıcaklığına bağlı değişimi	52
Şekil 4.13. KE=%3,31 ve AH=90 d/d için (a) aşınma miktarı - aşınma yükü, (b) Aşınma miktarı - ısıtım sıcaklığı grafikleri	55
Şekil 4.14. Aşınma deney parametre değerlerinin SG oranı ortalama değerleri	56
Şekil 4.15. IS, KE, AY ve AH parametrelerine bağlı olarak aşınma deneyi kontur eğrileri: aşınmanın (a) ısıtım sıcaklığı ve aşındırma hızına, (b) aşındırma hızı ve aşındırma yüküne, (c) ısıtım sıcaklığı ve aşındırma yüküne, (d) ısıtım sıcaklığı ve karbon eşdeğerine, (e) karbon eşdeğeri ve aşındırma hızına, (f) karbon eşdeğeri ve aşındırma yüküne bağlı olarak değişimi	57
Şekil 4.16. Aşınma miktarının aşındırma yükü ve ısıtım sıcaklığına bağlı değişimi.....	59
Şekil 4.17. 1080 °C sıcaklıkta ısıtım tabi tutulmuş Mn1 kodlu numunenin matris bölgesinin SEM-EDS analizi ve görüntüsü.....	62
Şekil 4.18. 1080 °C sıcaklıkta ısıtım tabi tutulmuş Mn1 kodlu numunenin noktasal SEM-EDS analiz ve görüntüleri	63
Şekil 4.19. 1080 °C sıcaklıkta ısıtım tabi tutulmuş Mn2 kodlu numunenin matris bölgesinin SEM-EDS analizi ve görüntüsü.....	65
Şekil 4.20. 1080 °C sıcaklıkta ısıtım tabi tutulmuş Mn2 kodlu numunenin noktasal SEM-EDS analiz ve görüntüleri	66
Şekil 4.21. 1080 °C sıcaklıkta ısıtım tabi tutulmuş Mn3 kodlu numunenin matris bölgesinin SEM-EDS analizi ve görüntüsü.....	68
Şekil 4.22. 1080 °C sıcaklıkta ısıtım tabi tutulmuş Mn3 kodlu numunenin noktasal SEM-EDS analiz ve görüntüleri	69
Şekil 4.23. 1080 °C'de ısıtım görmüş numunelerin dayanım ve sertlik değerleri	71
Şekil 4.24. 1080 °C'de ısıtım görmüş numunelerin darbe enerjisi ve sertlik değerleri.....	71

RESİMLER DİZİNİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Servis koşullarında hasara uğramış kırıcı palet örnekleri.....	19
Resim 3.1. Y-Blok test numunesi	29
Resim 3.2. Y-Bloktan çıkarılmış deney numunesi ve işlenmiş çekme numunesi	30
Resim 3.3. Tel erozyon yöntemiyle kesilen darbe numuneleri.....	32
Resim 3.4. Aşınma test numuneleri ve test cihazı	32
Resim 3.5. Numune hazırlama seti (otomatik kesme, parlatma ve bakalite alma cihazı) ve optik mikroskop	33
Resim 3.6. Üniversal sabit sertlik cihazı	34
Resim 4.1. Çekme deney numunelerinin kırılma şekilleri: (a) kılavuz çekilmiş çekme numuneleri, (b) çekme testi sonunda kopmuş numunelerin görünümü	41
Resim 4.2. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn1 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	61
Resim 4.3. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn2 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	64
Resim 4.4. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn3 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri.....	67

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Al	Alüminyum
C	Karbon
°C	Santigrat derece
Cr	Krom
gr	Gram
KE	Karbon Eşdeğeri
kg	Kilogram
Mn	Manganez
Mo	Molibden
N	Azot
Nb	Niyobyum
P	Fosfor
p	Olasılık Değeri
R ²	Güvenilirlik Faktörü
Si	Silisyum
Ti	Titanyum
V	Vanadyum

Kısaltmalar

AH	Aşındırma Hızı
AY	Aşındırma Yüğü
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
EBSĐ	Elektron Saçılım Kırınımı
EDS	Enerji Dağıtım Spektrumu

EN	Avrupa Standardı
HB	Brinell Sertlik
HV	Vickers Sertlik
ISO	Uluslararası Standardizasyon Örgütü
IS	Isıl İşlem Sıcaklığı
OM	Optik Mikroskop
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
TEM	Geçirimli Elektron Mikroskobu
TSE	Türk Standartları Endüstrisi
TWIP	İkizlenme Yoluyla Plastisite Kazanan Çelikler
YMÇ	Yüksek Manganlı Çelikler

GİRİŞ

İkizlenme ile plastikliği arttırılmış (TWIP: TWinning Induced Plasticity) yüksek manganlı çelikler (YMÇ), düşük karbon ve yüksek mangan içeriği ile otomotiv sektöründe yaygın şekilde kullanılmaktadır. TWIP çelikleri genel olarak %0,5 ile %0,7 arasında karbon, %17 ile %24 arasında mangan, %1,8 ile %4 arasında silisyum ve %1,8 ile %4,5 arasında alüminyum içerirler. Üstün mikroyapı özellikleri ve alaşım içeriği sayesinde yüksek tokluk ve mukavemet özelliklerini bir arada bulundurlar. %100 östenit yapılı olup içeriklerindeki yüksek mangan oranı östenitik yapıyı oda sıcaklığında bile kararlı halde tutarlar. Bu çelikler, alaşım içeriğinden dolayı yüksek manganlı çelikler ismi ile adlandırılırlar (Brodyanski vd. 2020; Cornette vd. 2005; Chen vd. 2013; Curtze vd. 2010; Hamada vd. 2007; Essaoussi vd. 2018; Hongning, 2011). YMÇ grubuna dahil özel bir tür olan Hadfield çeliklerinin alaşım içeriğinde ise %1,2 karbon ve %12 mangan bulunur. Yüksek karbon ve mangan ihtiva eden bu çelikler, yüksek süneklik ve soğuk çalışma sertleşmesi (pekleşme) özelliği ile aşınmaya ve darbeye dayanıklı çelikler olarak yaygın şekilde kullanılan eşsiz malzemelerdir (Jacob vd., 2020; Mahlami vd., 2014; Mohammadnezhad vd., 2013; Sabsi vd., 2019; Pribulova vd., 2011; Raghavan vd., 1969; Zhang vd., 2006; Cheng vd., 2024). Bu çelikler üzerinde, özellikle aşınma davranışlarının geliştirilmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalar ağırlıklı olarak krom, molibden, titanyum, nikel ve bizmut elementlerini içeren yüksek manganlı çelik alaşımları üzerine olup çok azı önemli iyileştirmeler ortaya koyabilmiştir (Petrov vd., 2006; Abbasi vd., 2010; Li vd., 2012; Dalai vd., 2019; Anonim, 2023). Daha yüksek (%19~21) mangan içeren çelik türleri, genellikle manyetik geçirgenliği düşürmenin yanı sıra düşük sıcaklıktaki tokluk ve mukavemet değerlerini yükseltmek amacıyla üretilmektedirler. Buna karşın akma mukavemetlerindeki kayıpları önlemek amacıyla krom, molibden, titanyum, vanadyum ve azot gibi elementlerle alaşımlandırılırlar (Zheng vd., 2022; Brodyanski vd., 2020; Nam vd., 2016). Bu malzemeler madencilik, taş kırma ve çimento gibi sektörlerde kırıcı ve öğütücü olarak yaygın ve verimli şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu malzemelerin bileşimlerine ve çalışma sırasında maruz kaldıkları yüklere bağlı olarak plastik şekil değişimiyle birlikte pekleşme davranışını yüksek seviyede gösteriyor olmaları, aşınma ömrü bakımından önemli bir avantaj sağlamaktadır (When vd., 2014; Elmahallevi vd., 2001; Bouaziz vd., 2011; Allain vd., 2004). Fakat alaşım ve ısıl işlem şartlarına bağlı olarak YMÇ'in arzu edilen genel mikroyapıdan uzaklaşması ile malzemelerde gevrekleşmeye bağlı olarak kırılmalar meydana gelebilmekte ve çok yüksek devirlerde eş olarak çalıştıkları kırıcılarda büyük makine hasarlarına neden olabilmektedirler. Yaşanan kırılmalar aynı zamanda plansız işletme duruşları nedeniyle de ekonomik kayıpları daha da artırmaktadır. Bu nedenle söz konusu çeliklerin alaşım oranları ve ısıl işlem parametrelerinin çalışma şartlarına bağlı olarak performans üzerindeki etkilerinin bilinmesi ve tasarımlarının hassas şekilde gerçekleştirilmesi son derece önemlidir. Bu motivasyonla tez çalışmasında, aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzemeler olarak kırıcı ve öğütücü imalatında kullanılan YMÇ üzerinde alaşımlandırma ve ısıl işlem şartlarının etkilerini

deneysel olarak incelemek ve bu çeliklerin işletme koşullarında herhangi bir hasara uğramadan en verimli şekilde çalışma ömrünü tamamlamasını sağlayacak bilgilere katkı sunmak amaçlanmıştır. Böylece, işletmelerdeki makine ve kırıcı hasarlarından kaynaklanan bakım onarım masraflarının ve zamansız duruşlardan kaynaklanan ekonomik kayıpların azaltılması hedeflenmektedir.

Tezin ilerleyen bölümlerinde konuyla ilgili ayrıntılı bir literatür araştırmasından bahsedildikten sonra YM hakkında bilgilendirme yapılmış, tez çalışmasında kullanılan malzeme ve metot hakkında bilgiler verilerek deney ve analiz çalışmalarının prosedürleri detaylı olarak açıklanmıştır. Ardından deney ve analiz çalışmalarının sonuçları paylaşılarak elde edilen bulgular tartışılmış ve öneriler sunulmuştur.



1. BÖLÜM

LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde, YMÇ ile ilgili birçok araştırma çalışması bulunmaktadır. Mevcut çalışmalar ağırlıklı olarak Hadfield çelikleri, YMÇ ve TWIP çelikleri başlığı altında yapılmış araştırmaları kapsamakta olup bu araştırmalar düşük ve yüksek darbe yükleri altında çalışma sertleşmesi mekanizmasının incelenmesi ile ısıtma işlemde östenitleme sıcaklığı ve mikro alaşım katkılarının mikroyapı özelliklerinin yanı sıra darbe, aşınma ve sertlik başta olmak üzere mekanik özellikler üzerindeki etkilerini kapsamaktadır.

1.1. Hadfield Çelikleri ile İlgili Çalışmalar

Hadfield çelikleri konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde, düşük darbe yüklerinin yanı sıra agresif çalışma koşulları altındaki çalışma sertleşmesi mekanizmalarının, genel ısıtma işlem şartlarının ve ısıtma işlemdeki östenitleme sıcaklığının mikroyapıya ve aşınma davranışları başta olmak üzere mekanik özelliklere etkilerinin incelendiği görülmektedir.

Chen ve arkadaşları azot ve krom alaşımlı Hadfield çeliği (Mn12CrN) ile geleneksel Hadfield çeliğinin (Mn12) aşınma özelliklerini karşılaştırdıkları çalışmalarında alaşımlama işleminin, Hadfield çeliklerinin mekanik performansını iyileştirmede her zaman etkili bir yol olduğunu belirtmişlerdir. Söz konusu çalışmada Mn12CrN çeliğinin farklı aşınma yükleri altındaki aşınma davranışlarının ve sertleşme özelliklerinin Mn12 çeliğinden farklı olduğu tespit edilmiş olup Mn12CrN çeliğinde aşınma bölgesindeki yüzey sertliğinin düşük aşınma yükleri altında yavaşça arttığı ancak yüksek yüklerde yüzey sertliğinin çok daha hızlı bir şekilde artış gösterdiği belirtilmiştir. Chen ve arkadaşlarının çalışması, Mn12CrN çeliğinin Mn12 çeliğine göre yüksek aşınma yükleri altında daha iyi bir aşınma direnci gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, ilave alaşım elementlerinin mekanik özellikleri iyileştirmedeki etkisini kanıtlar niteliktedir (Chen vd., 2018).

Manganlı çeliklerin iyi aşınma direnci, yüksek tokluk ve önemli düzeyde plastik şekil değişim sertleşmesi kabiliyeti sayesinde endüstride yaygın olarak kullanıldığını belirttikleri çalışmalarında Limooei ve arkadaşları söz konusu çeliklerde karbon miktarındaki artışın, uzun süreli ısıtma işlemlerle bile ortadan kaldırılamayan tane sınırı karbürlerinin oluşmasına yol açtığını ve bu nedenle mekanik özelliklerin olumsuz şekilde etkilendiğini belirtmişlerdir. Limooei ve arkadaşları, çalışmalarında su verme çözeltisini değiştirerek tane sınırlarındaki karbür varlığını en aza indirmek için optimum ısıtma işlem döngüsünü tespit etmeye çalışmışlardır (Limooei vd., 2011).

Hosseini ve arkadaşları, sahip olduğu özellikler sayesinde Hadfield çeliklerinin endüstriyel uygulamalarda kullanılan önemli alaşımlardan birisi olduğuna dikkat çektikleri çalışmalarında istenilen mekanik özelliklerin kazandırılması için uygulanacak temel işlemin ısı işlem olduğuna vurgu yapmışlardır. Uygun tokluk ve süneklik ile yüksek pekleşme kabiliyeti sayesinde bu alaşımların aşınmaya dayanıklı parçalarda ve yüksek mukavemet gerektiren çalışma şartlarında kullanıma uygun olduğunun belirtildiği çalışmada, ısı işlemde östenitleme sıcaklığı, östenitleme süresi ve farklı su verme ortamlarının etkileri araştırılmıştır (Hosseini vd., 2013).

Machado ve arkadaşları daha önce bir çeneli kırıcı makinesinde kullanılan Hadfield çeliği numunesinin aşınma analizini gerçekleştirdikleri çalışmalarında, yaptıkları mikro çizik testleri ile işletme koşullarında dinamik yüklere maruz kalan numunenin aşındırıcı temas sırasında sertleşen bölgelerindeki çizilme direncini incelemişlerdir. Araştırmacılar elde ettikleri sonuçları, çalışma koşullarında deforme olmamış veya plastik şekil değişim sertleşmesine uğramamış Hadfield çeliği ile karşılaştırmışlardır. Çizilme testleri, konik elmas uç kullanılarak farklı yükler altında gerçekleştirilmiş olup sertliğin plastik şekil değişim sertleşmesine uğrayan numunenin ikizlenme bölgelerinde 700 HV0.3 değerine kadar ulaştığı tespit edilmiştir (Machado vd., 2017).

Mousavi ve arkadaşları, ısı işlem sonrası soğuma hızının östenitik Hadfield çeliklerinin yorulma ömrü ile çökme süreci ve kırılma modları üzerindeki etkilerini araştırdıkları çalışmalarında Hadfield çeliğinden mamul döküm numunelerini 2 saat boyunca 1100 °C sıcaklıkta ısı işleme tabi tutmuşlardır. Numuneler ısı işlem sonrasında saf suda ve ağırlıkça %3 sodyum klorür (NaCl) içeren tuz banyosunda oda sıcaklığına kadar soğutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre tuz banyosunda söndürülen numunelerde karbür çökeltilerinin daha az oluştuğu görülmüştür. Bu nedenle sertlik değerlerinin yanı sıra akma ve çekme dayanımlarının da daha düşük olduğu, bu durumun malzemenin daha sünek bir yapıya sahip olmasının yanında yüksek şekillendirilebilirlik özelliği sergilemesini de desteklediği belirtilmiştir. Mousavi ve arkadaşları, tuz banyosunda soğutulan numunelerin yorulma ömrünün, saf suda soğutulan numunelere göre daha uzun olduğunu tespit etmişlerdir. Bu tespit, ısı işlem sıcaklığının yanı sıra soğutma süresi ve ortamı gibi şartların etkisinin önemini göstermektedir (Mousavi vd., 2018).

Atabaki ve arkadaşları çimento sanayi hammaddelerinin öğütülmesi için kullanılan Hadfield çeliği ve yüksek kromlu beyaz dökme demirden üretilmiş iki farklı kırıcının aşınma özelliklerini disk üzeri aşındırma tipi aşınma testi ile karşılaştırmışlardır. Aşınma testlerinin farklı yükler altında gerçekleştirildiği çalışmada kütle kaybı, aşınma direnci, mikrosertlik ve sürtünme katsayısı değerleri karşılaştırılarak iki alaşımın aşınma davranışı değerlendirilmiş olup yüksek kromlu dökme demirin aşınma miktarının Hadfield çeliğinden daha düşük olduğu görülmüştür (Atabaki vd., 2012).

Wang ve arkadaşları çok fazlı bir çelik ile geleneksel bir Hadfield çeliğini ($Mn_{13}Cr_2$) yüksek frekanslı bir indüksiyon fırınında döküldükten sonra aşınma davranışları ve faz dönüşümleri bakımından karşılaştırdıkları çalışmalarında beyrit, martenzit ve kalıntı östenit fazlarından oluşan üç katlı mikroyapıya sahip çok fazlı çeliğin, Hadfield çeliğinden daha yüksek çekme mukavemeti, mikrosertlik ve aşınma direncine sahip olduğunu ortaya koymuşlardır (Wang vd., 2016).

Moghaddam ve arkadaşları yüksek vanadyum içeren östenitik mangan çeliği (HV-AMS) alaşımlarını ve standart Hadfield çeliğini karşılaştırmalı bir şekilde inceledikleri çalışmalarında döküm ve ısıtma işlem koşullarının HV-AMS alaşımları ile Hadfield çeliğinin sertlik ve darbe dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Mikroyapısal sonuçlar, HV-AMS alaşımlarındaki karbon içeriğinin değiştirilmesinin vanadyum karbür morfolojisini ve bunun östenit matris içerisindeki dağılımını etkilediğini, bu durumun da mekanik özelliklerde önemli değişikliklere yol açtığını göstermiştir. Her iki çelik numunenin aşınma davranışını değerlendirmek için 55 N normal yük altında 10 m/dk doğrusal hızda disk üzeri aşındırma tipi aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma testi sonuçlarına göre HV-AMS alaşımlarının standart Hadfield çeliğinin yaklaşık 5 katı aşınma direncine sahip olduğu ortaya konulmuştur (Moghaddam vd., 2012).

Varela ve arkadaşları demir cevheri madenciliği endüstrisinde kullanılan yeni bir silindirik kırıcı bileşeni üzerinde sistematik aşınma ve hasar analizlerine yer verdikleri çalışmalarında işleme tesislerinde mineral cevherinin boyutsal olarak küçültülmesi sırasında kırıcıların performansının düşmesine veya darbe etkisiyle kırılmalarına neden olabilecek ciddi hasar ve kusurlara yol açan karmaşık aşındırıcı darbe yüklerinden önemli ölçüde etkilendiklerini ortaya koymuşlardır. Söz konusu çalışmada mikro sertlik ölçümlerinin yanı sıra optik mikroskop (OM: Optic Microscopy), taramalı elektron mikroskobu (SEM: Scanning Electron Microscopy), geçirimli elektron mikroskobu (TEM: Transmission Electron Microscopy) ve elektron geri saçılma kırınımı (EBSD: Electron BackScatter Diffraction) analizleri ile aşınma mekanizmaları ve deformasyonun boyutu incelenmiştir. Aşındırıcı darbe teması sonucunda ana malzemenin ilk durumundan yaklaşık üç kat daha yüksek bir sertlik olan 700HV değerinin üzerine çıkılarak önemli bir artış sağlandığı ve plastik şekil değişim sertleşmesinin aşınmış yüzeyden 18 mm kadar derinliğe uzanan bölgelerde dahi yüksek sertlik değerlerine ulaştığının gösterildiği çalışmada aşınmış yüzeylerin darbe ve aşınma hasarları SEM sonuçları ile incelenmiştir. Mikroyapı kesit analizleri, deforme olmuş mikroyapının bantlar ve deformasyon çizgilerinden oluştuğunu göstermiş olup bunun yanında tane sınırlarında büyük karbür çökeltileriyle birlikte yayılan çatlak varlığı gözlenmiştir. Çatlaklı ve çatlaksız alanların incelenmesi sonucunda çatlakların yakınındaki bölgelerdeki dislokasyon yoğunluğunun diğer deforme olmuş bölgelere kıyasla önemli bir artış gösterdiği ve bu durumun söz konusu bölgelerin plastik deformasyon kabiliyetinin azalmasına neden olan yüksek düzeydeki depolanmış enerjiden kaynaklandığı ortaya konmuştur. TEM sonuçları, deforme olmuş yüzey tabakası üzerinde nano ölçekli tanelerin oluşumunu doğrulamıştır (Varela vd., 2021).

Lencina ve arkadaşları, Hadfield çeliklerinden imal edilen kırıcı ve öğütücü döküm parçaların yüksek birim maliyetleri nedeniyle bu çeliklerin özelliklerindeki iyileştirmelerin, bu parçaların değiştirme sıklığını düşürerek maden işletmecileri için büyük bir ekonomik fayda sağlayabileceğine vurgu yaptıkları çalışmalarında geleneksel laboratuvar testlerinin, çalışma koşullarını tam olarak simüle etmeyeceğini ve saha testlerinin tamamlayıcı bir etkisi olacağını belirtmişlerdir. Söz konusu çalışmada yaklaşık %1,4 karbon ve yüksek mangan (%12 ve %16) içeren iki farklı çeliğin aşınma performansı, çakıl kırma ve agrega tesislerinde incelenmiş ve mangan oranı daha yüksek olan çeliğin aşınma performansının daha iyi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte çalışma şartlarındaki değişikliklerin aşınma özelliklerini önemli ölçüde etkileyebileceği vurgulanmıştır (Lencina vd., 2015).

Jafarian ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen ve östenit fazının 1000 °C ile 1225 °C aralığındaki tüm östenitleme sıcaklıklarında baskın faz olduğunun ifade edildiği çalışmalarındaki mikroskobik gözlemler, Hadfield çeliğinin ısı işlemi sırasında östenitleme sıcaklığının yükseltilmesinin daha büyük östenit tane boyutuna ve daha düşük miktarda karbüre yol açtığını göstermiştir. Hadfield çeliğinin östenitleme sıcaklığının 1000 °C'den 1225 °C'ye yükseltilmesiyle akma ve çekme mukavemetlerinde artış gözlenirken tokluk ve süneklik özelliklerinde ise azalma meydana gelmiştir. Bu durumun, sıcaklık artışıyla birlikte östenit içindeki karbon çözünürlüğünün artması ve östenit tanelerin büyümesi nedeniyle meydana geldiği ifade edilmiştir. Charpy çentik darbe ve sertlik deneylerinin sonuçları, Hadfield çeliğinin östenitleme sıcaklığının yükseltilmesinin darbe enerjisini azalttığını ve sertlik değerlerini yükselttiğini göstermiş olup bu durum daha yüksek östenitleme sıcaklığında Hadfield çeliğinin artan östenit tane boyutu ve daha yüksek akma dayanımı ile ilişkilendirilmiştir. Hadfield çeliğinin aşınma dayanımındaki artış, esas olarak çeliğin daha yüksek östenitleme sıcaklıklarında daha yüksek akma dayanımına sahip olmasına dayandırılmıştır. Östenitleme sıcaklığı yükseldikçe sünek kırılma eğiliminin arttığına değinilen çalışmada aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri, abrazyon aşınma mekanizmasının baskın aşınma mekanizması olduğunu göstermiştir. Elde edilen bulgulara göre ısı işlemi sırasında östenitleme sıcaklığının yükselmesiyle yüzey hasarının azaldığı görülmüş olup ayrıca aşınmış yüzeyler üzerinde yapılan enerji dağılımlı spektroskopisi (EDS) analizleri, aşınma testi sırasında tribokimyasal mekanizmaların oluşmadığını göstermiştir (Jafarian vd., 2021).

1.2. Yüksek Manganlı Çelikler ile İlgili Çalışmalar

Literatürde YMÇ başlığı altında da birçok yayın ve makale bulunmakta olup mevcut çalışmalarda çeşitli mikro alaşım katkılarının ve ısı işlem şartlarının akma, çekme, kırılma, aşınma ve darbe dayanımı gibi mekanik özelliklere ve yüzey deformasyon davranışına etkileri incelenmiştir.

Jimenez ve Frommayer, yüksek manganlı östenitik çeliğin mikroyapısını oda sıcaklığında incelemişlerdir. İncelenen deney numunelerinin tamamen yeniden kristalleşmiş östenitik tanelerden oluştuğunun gözlemlendiği çalışmada deformasyon sırasında mekanik ikizlenme ve dislokasyon hareketleri sonucunda oluşan kayma mekanizmalarının birarada görüldüğü ifade edilmiştir. Ayrıca düşük çekme gerilmesinde tane yönelimi ve ikizlenme aktivitesi arasındaki güçlü etkileşimin bir sonucu olarak hem deformasyonlu hem de deformasyonsuz ikiz yapılarının gözlemlenebileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte yüksek yükleme şartları altında tüm tanelerin ikiz bantlar sergilediği ve çekme deneyi numunelerinin çekme doğrultusuna paralel yönlenmiş malzeme dokusunun varlığı ile karakterize edildiği belirtilmiştir (Jimenez, Frommayer, 2010).

Behjati ve arkadaşları gerçekleştirdikleri çalışmada ön soğutmanın, Fe-16Mn-4Cr-0,1C östenitik çeliğinin deformasyon kaynaklı martenzitik dönüşümü ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sıvı nitrojen içinde ön soğutmanın martenzit fazının hacim oranını yükselttiğinin gösterildiği çalışmada ayrıca çeliğin çekme dayanımı ve kopma uzamasının deformasyon sıcaklığına güçlü bir şekilde bağlı olduğu ifade edilmiştir (Behjati vd., 2014).

Bayraktar ve arkadaşları, yüksek manganlı östenitik Hadfield çeliğinden üretilen sac numunelerin tek eksenli çekme testi koşulları altında deformasyon davranışlarını inceledikleri çalışmalarında kurşun geçirmez kaskların imalatında kullanılan sac numunelerin soğuk şekil değiştirme ile sertleşme kabiliyeti ve şekillendirilebilirliği üzerinde birim şekil değiştirme hızının ve mikrosertliğin etkilerini gözlemlemek için çeşitli birim şekil değiştirme hızlarında ve sıcaklıklarda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Söz konusu çalışmada sıcaklığın çekme davranışı ve kırılma yüzeylerinin görünümü üzerindeki etkileri SEM ve TEM analizleri ile incelenmiş olup çeliğin pekleşme davranışı üzerinde deformasyon ikizlenme mekanizması ile dinamik birim şekil değişim yaşanması olayının birlikte etki ettiği sonucu elde edilmiştir. Sonuçlar ayrıca çelik sac numunelerin negatif birim şekil değişim hızı duyarlılığı sergilediğini ve sertleşme kapasitelerinin 300 °C ile 400 °C sıcaklık aralığında deformasyon kaynaklı dönüşüm fazları oluşmaksızın azaldığını göstermiştir (Bayraktar vd., 2004).

Balogun ve arkadaşları uygulamada çoğunlukla ergitme fırınlarında imal edilen manganlı çeliklerin akışkanlığını artırarak döküm işlemini kolaylaştırmak ve cürufun ayrılmasını sağlamak için ergitme ocaklarındaki sıcaklığın 1500 °C ve üzeri sıcaklıklara çıkartıldığına dikkat çektikleri çalışmalarında bu durumun, alaşımın mikro ve makro karbür ayrılmasını destekleyerek malzemenin gevrekleşmesine neden olduğunu ifade etmişlerdir. Araştırmacılar, artan ergitme sıcaklığı ile malzemedeki gevrekleşmenin tane sınırlarında biriken karbür varlığının yanı sıra karbür ayrışmasına bağlı olarak dislokasyon hareketlerinin engellenmesi olduğunu belirtmişlerdir (Balogun vd., 2008).

Peng ve arkadaşları, düşük yükleme koşulları altındaki Hadfield çeliklerinin çalışma sertleşmesi kapasitesini artırmak için Fe-17Mn-Si-C yüksek manganlı çeliğinin pekleşme

davranışı ve mikroyapısı üzerinde hata birikim enerjisinin etkilerini inceledikleri çalışmalarında karbon ve silisyum içeriklerini değiştirerek pekleşme davranışlarını gözlemlemişlerdir. Fe-17Mn-Si-C çeliğinin daha düşük birikimli hata enerjisinin çalışma sertleşmesi oranının düşük yüklerde Hadfield çeliğinkinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Araştırmacılar bu durumu, Fe-17Mn-Si-C çeliklerinde deformasyona bağlı martenzit veya mekanik ikizlerin daha erken oluşmalarından dolayı Hadfield çeliklerinden daha yüksek olmasına bağlamışlardır (Peng vd., 2015).

Sevsek ve arkadaşları, hemen hemen aynı hata birikim enerjisi değerine sahip olan iki yüksek manganlı çeliğin (X60Mn17 ve X30MnAl17-1) işlenerek sertleşme hızı üzerinde hata birikim enerjisinin etkisini makro ve mikroyapı analizlerinin yanı sıra yarı statik çekme testleri ve faz analizleri ile incelemişler ve bu iki alaşımın martenzitik faz ile ikizlenme bölgelerinin hacim oranı bakımından farklılıklar gösterdiğini tespit etmişlerdir. Araştırmacılar, ikizlenme hacim dağılımının tane boyutu ile arttığını, alüminyum içeren ve daha düşük karbon içeriğine sahip olan X30MnAl17-1 alaşımının, alüminyum içermeyen X60Mn17 alaşımından daha düşük bir toplam ikizlenme hacmine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir (Sevsek vd., 2019).

Falodun ve arkadaşları ağırlıkça %13 ile %17 arasında mangan ve değişen miktarlarda krom içeren üç manganlı çelik döküm numunenin mikroyapılarını incelemişler ve çalışmalarında tane sınırlarında ikincil karbür çökeltileri tespit edilmesine rağmen değişen oranlarda mangan ve krom ilavesinin çeliklerin mikroyapısını iyileştirmede önemli etkileri olduğunu göstermişlerdir. Araştırmacılar mikrosertlik değerlerindeki iyileşmenin alaşım elementlerinin hem ikincil faz hem de tane inceltme özelliklerinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Söz konusu çalışmada farklı oranlarda krom elementi ilavesinin manganlı çeliklerin sürtünme katsayısını azalttığı gözlemlenmiştir. Numunelerin %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilmesiyle elde edilen korozyon davranışı sonuçları, mangan ve krom ilavelerinin malzemelerin korozyon direncini olumlu yönde etkilediğini göstermiştir (Falodun vd., 2020).

Machado ve arkadaşları, %12 ve %20 mangan içeren östenitik manganlı çeliklerin aşınma davranışlarını çeneli kırıcı testleri ile değerlendirdikleri çalışmalarında aşındırıcı kütle olarak boyutu 14,3 mm olan 100 kg çakıl kullanmışlardır. Araştırmacılar, aşınma davranışının karakteristiğini belirlemek için kütle kaybını, sertlik profilini, aşınmış yüzey pürüzlülüğünü ve aşınma mikro mekanizmalarını analiz etmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre sabit çeneli kırıcılar hareketli olanlardan daha fazla aşınmakta olup hareketli çenelerde yüzey altı tabakasında ultra ince tanelerin ve deformasyon ikizlerinin oluşumunun aşınma direncini desteklediği ifade edilmiştir (Machado vd., 2021).

Ayadi ve arkadaşları, krom, molibden ve niyobyum alaşımlı manganlı çeliklerin mikroyapısını ve aşınma davranışını inceledikleri çalışmalarında 1050 °C ve 1100 °C sıcaklıklarda ısıl işlemler uygulamış ve ardından su verme işlemi yapmışlardır. İncelenen manganlı çeliklerin döküm mikroyapısının östenitik bir matris ve ikincil karbürlerden oluştuğunun gözlemlendiği çalışmada yüksek sıcaklıklardaki ısıl işlemlerin mikroyapıyı değiştirdiğine, martenzit ve kalıntı

östenit oluşumunu desteklediğine vurgu yapılmıştır. Araştırmacılar Cr, Mo ve Nb ilavesi ile birlikte ısı işlem sıcaklığının yükseltilmesinin oluşan martenzit oranını artırdığını ve buna bağlı olarak sertliğin, aşınma dayanımının ve tribolojik özelliklerin iyileştiğini belirtmişlerdir (Ayadi vd., 2020).

YMÇ'in servis koşullarında düşük, orta ve yüksek yük veya darbe etkisi altında çalışmasından ötürü malzemede yüzey deformasyonları ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen yüzey deformasyonları ile birlikte malzemenin deformasyon bölgelerindeki pekleşme, aşınma davranışlarında olumlu yönde önemli değişiklikler meydana getirmektedir. Bu konu ile ilgili bir çalışmada Bozkurt ve arkadaşları, 4140 çeliğinin bilyeli dövme sonrası tribokorozyon davranışı ve mekanizmasını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre ısı işlem görmemiş ve bilyeli dövme işlemine maruz kalmış çeliklerde toplam malzeme kaybının aynı olduğunu, korozyon hasarının çatlak korozyonu ile ilerlediğini ve doğal oksit oluşumunun aşınma hasarını artırdığını tespit etmişlerdir (Bozkurt vd., 2022).

Wang ve arkadaşları, %0,98 karbon ve %8,5 mangan içeren malzemeden imal edilen numunelere bilyeli dövme işlemi uyguladıkları çalışmalarında dövme etkisi ile martenzit tanelerinin oluştuğunu, yüzeyden derinlere inildikçe martenzit oluşumunun azalarak tane boyutunun büyüdüğünü ve işletme öncesinde gerçekleştirilen dövme işlemiyle malzeme özelliklerinin iyileştirilebileceğini tespit etmiştir (Wang vd., 2007).

Literatürde, çalışma sertleşmesi mekanizmasının deneysel ortamda simüle edilerek incelenmesi üzerine çelik bilyelerin kullanıldığı çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarda, numune üzerine belirli hızlarda yönlendirilen bilyelerin meydana getirdiği deformasyona bağlı olarak korozyon mekanizmaları ve direnci, sürtünme ve aşınma davranışları, yüksek sıcaklıkta aşınma dayanımı, yüzey pürüzlülüğü ve bütünlüğü, nanokristalizasyon ve martenzit oluşum mekanizmaları ve artık gerilmeler gibi birçok olay incelenmiştir (Matsui ve Kakishima, 2006; Han vd., 2022; Mitrovic vd., 2014; Yang vd., 2016; Menezes vd., 2017; Zhan vd., 2021; Bozkurt vd., 2022; Hashemi vd., 2011; Wang vd., 2007; Mohamed vd., 2020; Chen vd., 2018; Yan vd., 2022).

Yuan ve arkadaşları ağırlıkça %25 Mn, %3 Cr, %3 Al, %0,3 C ve %0,01 N içeren malzemeden imal edilerek farklı östenitleme sıcaklıklarında tavllanmış ve soğuk haddelenmiş saclar üzerinde incelemeler gerçekleştirdikleri çalışmalarında oda sıcaklığındaki çekme testleri sonrasında numuneler üzerinde EBSD, SEM ve TEM analizleri yapmışlardır. İkizlenme mekanizması kaynaklı plastik şekil değişiminin mekanik özellikler ile mikroyapısal değişimler üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışma, östenitleme sıcaklığının soğuk haddelemeye bağlı olarak ikizlenme ile plastikliği arttırılmış (TWIP) yüksek manganlı çeliğin tane boyutu ve mekanik özellikleri üzerinde son derece büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Araştırmacılar, deformasyon ikizlerinin oluşma sıklığı ile östenitleme sıcaklığı arasında yakın bir ilişki olduğunu tespit etmişlerdir. Söz konusu çalışmada ayrıca tavllanmış ve çekme ile

deforme olmuş yüksek manganlı östenitik çelik için farklı birim şekil değişim seviyelerindeki mikroyapı gelişimi tanımlanmıştır (Yuan vd., 2015; Xiong vd., 2023).

1.3. Literatür Özeti ve Özgün Değer

Literatürde ortaya konan bulgulardan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, YMÇ üretiminde alaşım elementlerinin, döküm şartlarının, ısıtma işlem döngüsü içerisinde östenitleme sıcaklığı ile uygulama prosedürünün ve soğutma ortamlarının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki önemi ortaya çıkmaktadır (Nurjaman vd., 2017). Bu bilgilerden hareketle, aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzeme olarak yaygın şekilde kullanılan YMÇ'in uygun alaşımlama ve ısıtma şartlarında imal edilmediklerinde özellikle yüksek darbe yüklerine maruz kalan parçalarda zamanla çatlama, kırılma ve aşırı plastik deformasyona bağlı hasara uğrama durumlarının ortaya çıkmasının kaçınılmaz olduğu görülmektedir. Bu durum hem üretici konumunda olan dökümhanelerin hem de kullanıcı konumunda olan çimento ve madencilik endüstrisindeki büyük işletmelerin önemli ekonomik zararlarla karşı karşıya kalmasına neden olmaktadır. Günümüzde standart Hadfield çeliklerinin yanı sıra çok daha yüksek mangan içeriğine sahip olan ve mikro alaşımlandırma ile üretilmiş farklı standartlardaki YMÇ, işletmelerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemelerle ilgili çok sayıda akademik araştırma yapılmış olup mevcut çalışmalarla ilgili bir literatür özeti yukarıda sunulmuştur. Literatürdeki çalışmalardan farklı olarak bu tez çalışmasında YMÇ'in aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzemeler olarak kullanıldığı ilgili sektörlerde en çok tercih edilen alaşımlar seçilerek test numuneleri gerçek dökümhane şartlarında dökülmüş ve bu alaşımların imalat şartlarında uygulanabilecek geniş bir spektrum gözetilerek tasarlanan ısıtma işlem prosedürleri üzerinden test ve analizler gerçekleştirilmiştir. YMÇ grubu içerisinde yer alan Hadfield çeliklerinin yanı sıra mangan elementi oranı yükseltilmiş diğer alaşım gruplarıyla beraber çalışmalar yürütülerek geniş kapsamlı bir kıyaslama imkânı sağlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deney ve analiz çalışmalarından elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde ortaya konan bulgular, mikroyapısal ve mekanik özellikler bakımından en iyi ısıtma işlem sıcaklığının 1080 °C ve en iyi alaşımın ise %12~14 aralığında mangan içeren numune (Mn1) olduğunu göstermiştir.

2. BÖLÜM

YÜKSEK MANGANLI ÇELİKLER

YMÇ, 1882 yılında Sör Robert Hadfield tarafından geliştirilmiş olup tamamen östenitik olan mikroyapısı gereği manyetik olmayan ve yüksek tokluk özelliklerine sahip malzemelerdir (Eşlisoy, 1998). Yüksek mukavemet ve sünekliği bir arada sunan bu malzemeler, aynı zamanda yüksek aşınma dayanımına sahiptirler (Agunsoye vd., 2015; Lychagin vd., 2022; Lindroos vd., 2018; Bembenek vd., 2022; Yan vd., 2009; Maouche vd., 2016; Niu vd., 2010 Gorlenko vd., 2016; Bal, 2018; Gao vd., 2005). Bu özellikleriyle, aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzemeler olarak başta madencilik, taş ocağı ve çimento sektörlerindeki kırıcı ve öğütücü makinelerde olmak üzere, aşınma ve darbe dayanımı gerektiren birçok sektörde yaygın ve verimli bir şekilde kullanılan bu çelikler çok önemli bir mühendislik malzemesi olarak öne çıkmaktadırlar (Okechukwu vd., 2017; Venturelli vd., 2018). YMÇ'in üretiminde alaşımlama, döküm ve ısıtma işlem şartlarının çalışma koşullarına bağlı olarak hassas bir şekilde belirlenmesi büyük önem arz etmektedir (Hosseini vd., 2013). Alaşımlama işlemi sırasında, krom ve karbon gibi elementlerin kimyasal bileşimdeki oranları, mekanik ve mikroyapısal özellikleri önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Yapılan çalışmalar, belirli sınırlar içindeki krom elementinin aşınma davranışları üzerinde olumlu etkilerini ortaya koyarken (Chen vd., 2018), karbon miktarındaki artışın tane sınırı karbürlerini artırarak mekanik özellikleri kötüleştirdiğini göstermektedir (Hosseini vd., 2011). İstenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için ısıtma işlem uygulamaları da oldukça önemlidir. Isıtma işleminin mekanik özelliklerin iyileştirilmesi açısından etkin bir parametre olduğu (Mousavi vd., 2018), yüksek ısıtma sıcaklığının karbür çözünürlüğünü artırdığı yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Jafarian vd., 2021). Ayrıca, YMÇ'de yüksek döküm sıcaklığının karbür ayrışmasına neden olarak mekanik özellikleri kötüleştirdiği ve bu nedenle yüksek döküm sıcaklığından özellikle kaçınılması gerektiği ortaya konmuştur (Balogun vd., 2008). Bu malzemeler için yüksek aşınma dayanımı, her ne kadar yüksek tokluk kadar birincil öncelik olarak görülmesede, ekonomik kullanım açısından vazgeçilmez bir özelliktir. Her ne kadar aşınma davranışını alaşımlama, döküm ve ısıtma işlem gibi üretim parametreleri belirlesede, malzemenin aşınma performansı, çalışma koşullarına göre de önemli ölçüde değişiklik gösterebilmektedir (Lencina vd., 2015).

2.1. Yüksek Manganlı Çeliklerin Kullanım Alanları ve Isıtma İşlemi

Madencilik, taş ocağı ve çimento sektörü gibi birçok alanda kırıcı, öğütücü ve duvar astarı olarak kullanılan döküm parçaları, ağırlıklı olarak aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzemeler olan YMÇ'den üretilirler. Döküm sonrasında arzu edilen mikroyapıyı sağlamak üzere bu malzemelere ısıtma işlemi uygulanır. Isıtma işlemi ile yüksek darbe dayanımının yanı sıra çalışma koşullarındaki deformasyon sertleşmesi mekanizmasının da etkisiyle, malzemenin aşınma

dayanımında artış beklenmektedir. Bu artışın sağlanabilmesi için yapılan ısıl işlem ile yapının tamamen östenit faza dönüşmesi ve bu yapının oda sıcaklığında da korunması amaçlanmaktadır (Mishra vd., 2021; Sutton, 2013; Jafarin vd., 2021; Ayadi vd., 2020).

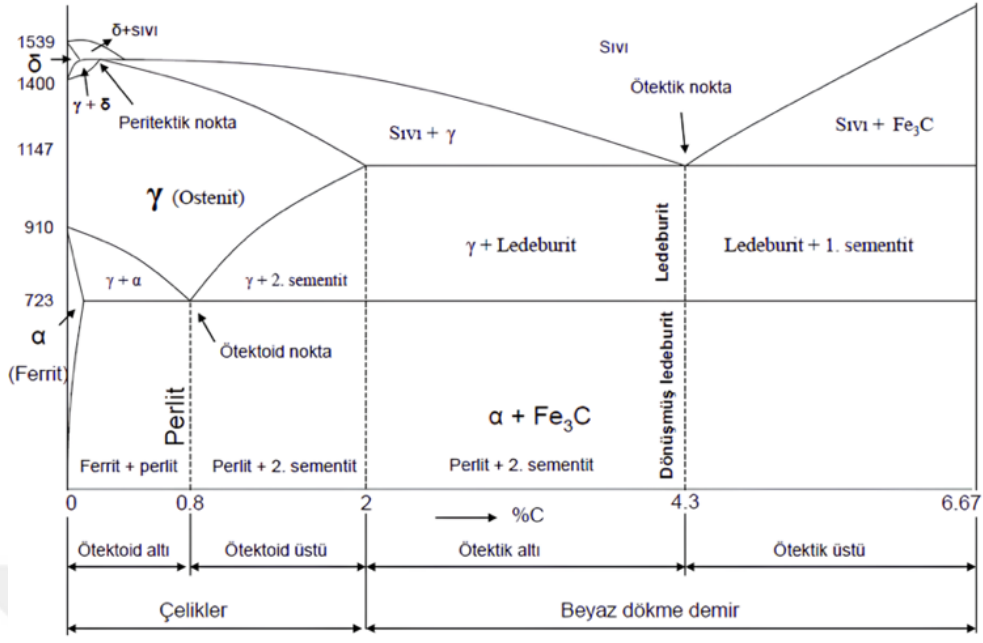
2.1.1. Isıl işlem uygulamaları

Malzemelere uygulanan ısıl işlemler, katı haldeki metal ve alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya ardışık olarak uygulanan birden fazla sayıdaki ısıtma ve soğutma işlemleridir (Gültepe, 2002).

Isıl işlem esnasında sementasyon, nitrürasyon, oksidasyon ve dekarbürizasyon işlemlerinde olduğu gibi ortamın etkisiyle, kimyasal bileşim değişebilir. Malzemeleri ortam etkisinden korumak için, ısıl işlem tuz banyoları, koruyucu gaz veya vakum ortamları gibi özel ortamlarda gerçekleştirilebilir. Isıl işlem uygulamaları genel olarak aşağıda belirtilen amaçlar doğrultusunda gerçekleştirilir:

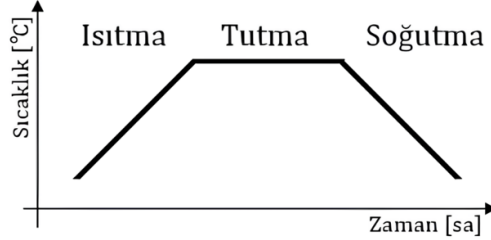
- Talaşlı işlenebilme özelliğini iyileştirmek için yumuşatma ve tane irileştirme,
- Dayanımı artırıp azaltmak için sertleştirme, normalleştirme ve yumuşatma,
- Soğuk şekil vermenin etkisini yok etmek için yeniden kristalleştirme ve normalleştirme,
- Mikro segregasyonları ortadan kaldırmak için homojenleştirme,
- Tane büyüklüğünü değiştirmek için yeniden kristalleştirme, tane irileştirme ve normalleştirme,
- İç gerilmeleri azaltmak için gerilme giderme,
- Belirli içyapılar elde etmek için normalleştirme, yumuşatma ve sertleştirme.

Isıl işlemler genel olarak iki grupta toplanır. Bunlar tavlama ve sertleştirmedir. Tavlama işleminde soğutma yavaş yapılarak içyapının kararlı denge durumuna yaklaşması sağlanır. Sertleştirmede ise, östenite hızlı soğutma yapılarak yarı kararlı martenzitik içyapı oluşturulur. Isıl işlem prosedürlerinin uygulanmasında demir-karbon (Fe-C) denge diyagramındaki (Şekil 2.1) dönüşüm sıcaklıkları, malzemelerin ısıl işlem sıcaklığının belirlenmesi ve istenilen özelliklerin kazandırılması açısından son derece önemlidir.



Şekil 2.1. Demir-karbon (Fe-C) denge diyagramı

Her ısıl işlem prosedürü, en az belirli bir sıcaklığa ısıtma, bu sıcaklıkta tutma (bekletme) ve bu sıcaklıktan oda sıcaklığına soğutma aşamalarından oluşur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Isıl işlem çevrimi

Tavlama işlemi, malzemeyi belirli bir süre tavlama sıcaklığına ısıttıktan sonra yavaş olarak soğutarak kararlı bir içyapı elde etmek için yapılır. Normalleştirme ise tane yapısı bozulmuş iri taneli çeliği, ince taneli hale getirmek için östenit bölgesine ısıttıktan sonra bu sıcaklıktan durgun havaya çekerek soğutmaktır. Yapılan işlem bir hızlı soğutmadır ve tanelerin büyümesine izin verilmediği için daha küçük tane boyutu elde edilerek mekanik özelliklerde beklenen iyileştirmeler sağlanır. Isıl işlemler, yukarıda maddeler halinde verilen malzeme özelliklerinin kazandırılması için tasarlanır ve istenilen özelliklerin elde edilmesine yönelik ısıl işlem prosedürleriyle gerçekleştirilir. Dolayısıyla her malzemenin kendine özgü kimyasal

bileşimine bağlı olarak kazanabileceği mikroyapısal ve mekanik özellikleri bulunmaktadır. Nihai üründen beklenen aşınma dayanımı, darbe dayanımı, korozyon dayanımı gibi özellikler, seçilen malzemenin kimyasal bileşimi ile birlikte uygulanacak olan ısıtma işlem prosedürleriyle elde edilebilirler.

2.1.2. Yüksek manganlı çeliklerde ısıtma işlemi

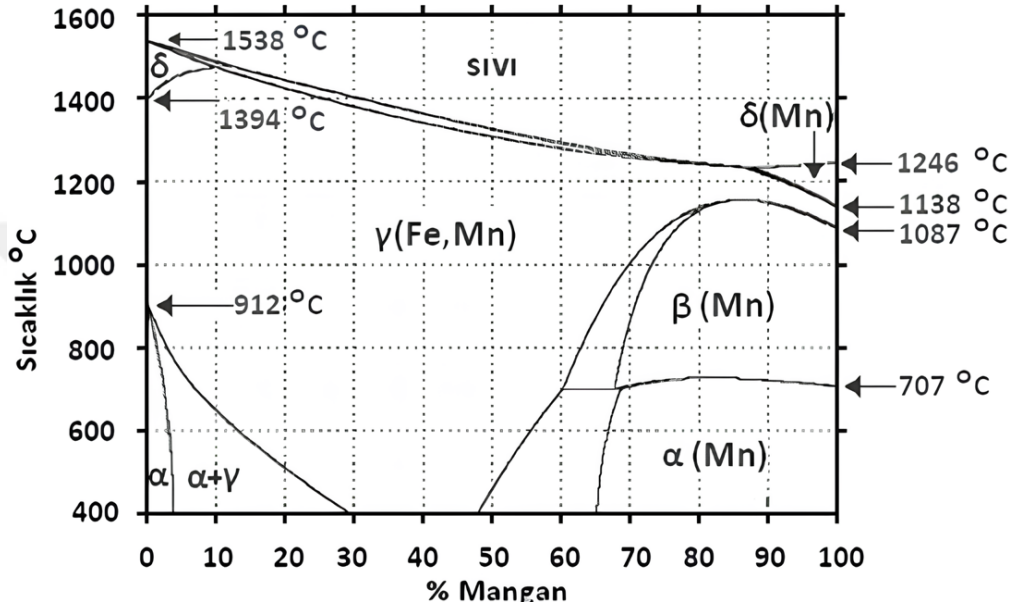
Tablo 2.1’de ASTM A 128 standardına göre sınıflandırılmış östenitik manganlı çelik dökümlerin kimyasal bileşim oranları verilmiştir. Bu çelikler, karbon ve mangan elementi yanında krom, molibden ve nikel gibi elementlerle alaşımlandırılarak kullanılabilirler gibi mangan oranı yükselttilerek de kullanılabilirlerdir.

Tablo 2.1. Östenitik manganlı çelik dökümlerin sınıflandırılması (ASTM A 128)

Sınıf	Bileşim [%]						
	Karbon	Mangan	Krom	Molibden	Nikel	Silisyum	Fosfor
A	1,0~1,35	11,5~14				<1	<0,07
B-1	0,9~1,05					<1	<0,07
B-2	1,05~1,20	11,5~14				<1	<0,07
B-4	1,12~1,28	11,5~14				<1	<0,07
B-4	1,20~1,35	11,5~14				<1	<0,07
C	1,05~1,35	11,5~14	1,5~2,5			<1	<0,07
D	0,70~1,30	11,5~14			3~4	<1	<0,07
E-1	0,70~1,30	11,5~14		0,9~1,2		<1	<0,07
E-2	1,05~1,45	11,5~14		1,8~2,1		<1	<0,07
F	1,05~1,35	6~8		0,9~1,2		<1	<0,07

Yüksek manganlı çeliklerde ısıtma işlemin amacı oda sıcaklığında mikroyapının tamamen östenit kalmasını ve karbonun tamamının östenit yapı içinde çözünmesini sağlamaktır (Azadi vd., 2018; Mahlami vd., 2014; Tecza vd., 2016). Normal yapıdaki çelikleri sertleştirmek için kullanılan soğutma yöntemi, östenitik manganlı çeliklerin yumuşamasına ve çekme dayanımının artmasına neden olur. Yüksek manganlı östenitik çelikler döküm sonrasında, dökülen parçanın soğuma hızına bağlı olarak tamamen östenitik veya soğuma hızı daha yavaş olan bölgelerde veya parçalarda ise demir ve mangan karbürler (FeC, MnC) ihtiva edebilirler. Yapıda çökelen karbür fazları östenit tane sınırlarında birikirler ve malzemenin tokluğunu düşürerek kırılma bir yapı oluştururlar (Sabzi vd., 2018; Nelson, 1968). Bu nedenle YMC, döküm sonrasında yapının östenite dönüşmesine imkân sağlayacak şekilde bir ısıtma işlemi tabii tutulmalıdır. Mangan çeliklerinin ısıtma işlem uygulaması, döküm parçaların tamamen östenit bir yapı kazanacak şekilde ısıtılması ve bu östenit yapıyı oda sıcaklığında da koruyacak şekilde hızlıca soğutulması prensibine dayanmaktadır (Alyaz, 2003; Tüfenk, 2012; Mishra vd., 2021; Farr, 1963; Kuyucak vd., 2004).

YMC'in ısıtma işleminde ısıtma, östenit dönüşüm sıcaklığının (A_{cm}) üzerine çıkılacak şekilde yapılmalı, karbon mikro segregasyonunu önlemek için A_{cm} eğrisinin 10~37 °C üzerine çıkılmalıdır. Bu sıcaklıkta tüm yapının östenite dönüşümüne imkân verecek kadar uzun bir süre mutlaka beklenmelidir. Bu süre, parça kesitinde inç başına 1 saat olacak şekilde belirlenebilir (Kuyucak vd., 2004; MKE, 1982). Şekil 2.3, demir-mangan (Fe-Mn) bileşiğindeki mangan oranına bağlı olarak faz dönüşüm sıcaklıkları ile oluşan fazları göstermektedir.

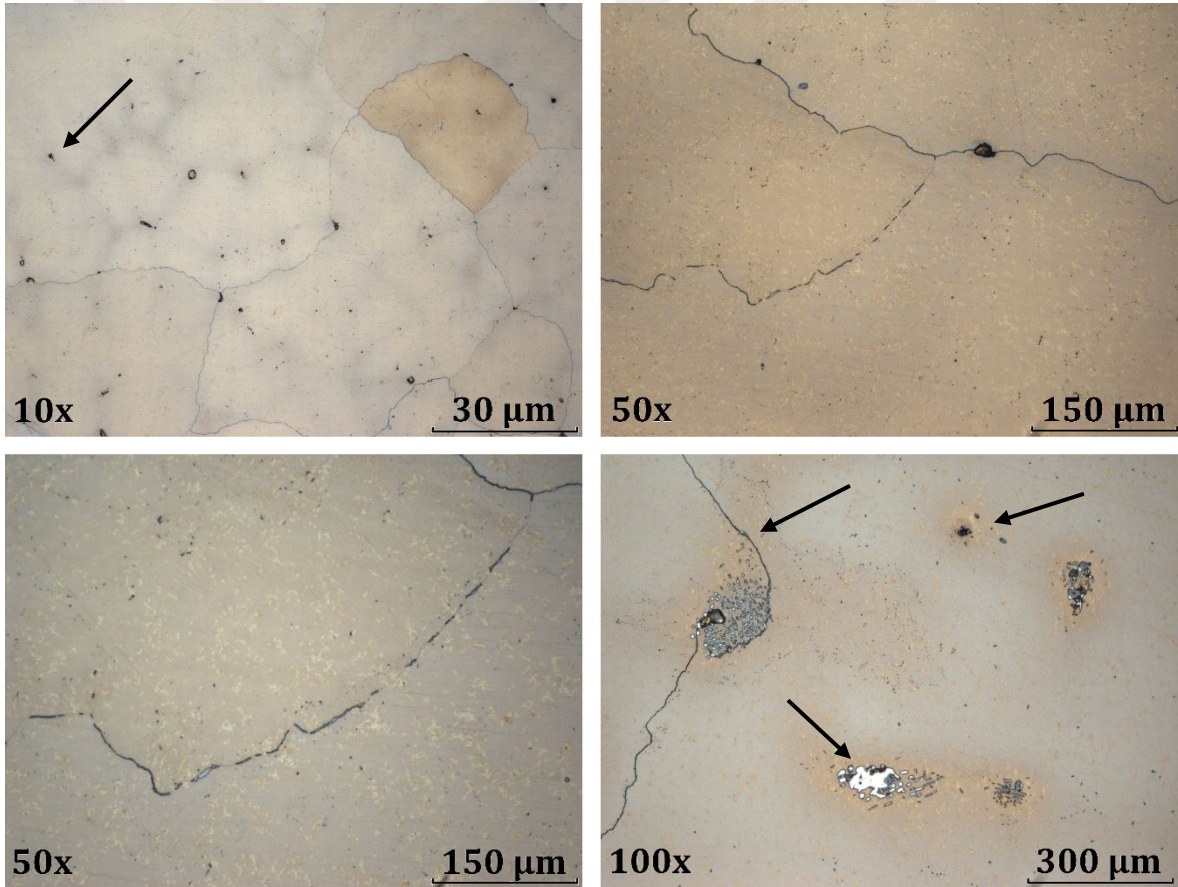


Şekil 2.3. Demir-mangan (Fe-Mn) faz dönüşüm diyagramı (Farr, 1963)

Isıl işlem sonrasında oluşacak mikroyapı üzerinde su verme hızının önemi oldukça büyüktür. Bu nedenle dökümhaneler soğutma tanklarını büyük şiddetli karıştırma sağlayan pervanelerle donatmakta, su sıcaklığını düşük tutmak için soğutma kuleleri inşa etmekte ve ısıtılan parçanın soğutma tankına hızlı transferi amacıyla büyük yatırımlar yapmaktadırlar. Hatta su verme tankının üzerine taban düşürmeli fırınlar bile yapılmaktadır. Tüm önlemlere rağmen sahada karşılaşılan erken malzeme kayıplarının en önemli nedenlerinden biri hâlâ istenilen mikroyapının elde edilememesidir (Lindroos vd., 2018; Kuyucak vd., 2004; Srivastava ve Das, 2008; Pham vd., 2018; Cao vd., 2014; Mahlami ve Pan, 2017). Özellikle kalın kesitlerde yavaş soğuma hızları, tane sınırlarında karbür çökmesi nedeniyle tokluğu olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum yapıdaki difüzyon hızı ve süresi ile bağlantılı olarak parça ömrünü önemli ölçüde düşürebilmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde mangan çeliği üretiminde uzmanlaşmış dökümhaneler üretim tanıtımlarını, fırın kapaklarının açılmasından itibaren son parça havuza tamamen girinceye kadar geçen sürelerin kısalığı ile yapmaktadır. Parçaların en çok 30 ya da 40 saniyede havuza alınmasının garanti edilmesi gibi bir yaklaşım bu tanıma bir örnek olarak verilebilir. Buna mukabil, A_{cm} ile 871 °C arasındaki sıcaklıklarda karbür oluşum

hızının çok düşük olmasından dolayı, 871 °C ile 315 °C arasındaki soğuma hızı oldukça kritik kabul edilmektedir. Özellikle, belirtilen bu sıcaklık aralığının hızlı geçilmesinin hedeflenen nihâi mikroyapının elde edilmesi açısından daha önemli olduğu kabul edilmektedir (Mishra vd., 2021; Kuyucak vd., 2004; Farr, 1963)

Şekil 2.4'te çalışma kapsamında döküm yoluyla elde edilen Hadfield çeliğinin farklı büyütme değerlerindeki mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Migrograflar incelendiğinde, oksit kalıntıları, tane sınırlarında ve taneler arasındaki karbür varlıkları ile östenit tane sınırları görülmektedir. 10x büyütmede görülen migrografta oksit kalıntıları siyah renkli ve noktasal olarak net bir şekilde görülmektedir. 100x büyütmede görülen migrografta ise yine oksit kalıntıları, tane sınırları ve tane sınırlarında çökelen karbür varlığı ile beyaz renkli karbür çökeltisi açıkça görülebilmektedir.



Şekil 2.4. Hadfield çeliğinin farklı büyütme değerlerindeki mikroyapısı

Karbonun östenit yapı içinde kalmasının sağlanamadığı durumda su verme hızının hiçbir önemi kalmaz. Diğer bir deyişle uygun olmayan su vermeden daha önemli olan şey fırındaki sıcaklık kontrolünün etkin şekilde yapılmamasıdır. Bu noktada su tankının sıcaklığı da büyük

önem arz eder. 1 tonluk döküm parça için su tankında bulunması gereken su miktarı 8~10 ton arasında olmalıdır. Suyun çok iyi karıştırılmasının yanı sıra giriş ve çıkış sıcaklıklarının sürekli kontrol altında bulundurulması da son derece önemlidir. Suyun ısıl iletkenliği 40~45 °C arasında 20 °C'deki değerin yarısından daha aşağı düştüğünden çıkış sıcaklıklarının 41~43 °C'yi geçmemesi için gerekli önlemler alınmalıdır. Şayet su tankı gözle kontrol edilmek istenirse su vermeden sonra suyun buharlaşmaya devam etmediğinin tespit edilmesi gerekir (Ham vd., 2010). Çeşitli su verme ortamlarında değişik su verme yöntemleriyle elde edilen soğutma kapasiteleri, Grossman H değerleri ile Tablo 2.2'de belirtilmiştir.

Tablo 2.2. Soğutma kapasitesini belirleyen Grossman H değerleri (MKE, 1982)

Su Verme Yöntemi	Su Verme Ortamı		
	Yağ	Su	Tuzlu su
Durgun ortam/Hareketsiz parça	0,25~0,30	0,9~1,0	2,0
Hafif sirkülasyonlu ortam/Az hareketli parça	0,30~0,35	1,0~1,1	
Orta sirkülasyonlu ortam	0,35~0,40	1,2~1,3	2,0~2,2
İyi sirkülasyonlu ortam	0,40~0,50	1,4~1,5	
Hızlı sirkülasyonlu ortam	0,50~0,80	1,6~2,0	
Çok hızlı sirkülasyonlu ortam	0,80~1,10	4,0	5,0

Tablo 2.2'de verilen Grossman H değerlerinin artması su verme ortamının soğutma kapasitesinin artması anlamına gelmektedir. Su verme ortamları değerlendirildiğinde soğutma kapasitesi en düşük ortamın yağ ortamı olduğu görülmektedir ve bu ortam çatlama riski yüksek malzemeler için tercih edilmektedir. Su ve tuzlu su ise soğutma kapasiteleri en yüksek ortamlar olarak görülmektedir (Mousavi vd., 2018; Limooei vd., 2011; Hosseini vd., 2013). Bu ortamlar çatlama riski olmayan ve yüksek sertlik istenen malzemeler için tercih edilmektedirler. Tablo 2.2 incelendiğinde, aynı zamanda ortam hareketliliğinin de soğutma kapasitesine önemli oranda etki ettiği görülmektedir. Örneğin; su ortamı değerlendirildiğinde, çok hızlı sirkülasyon ortamıyla soğutma kapasitesinin dört kata kadar artırılacağı görülmektedir (MKE, 1982). Bu noktada, etkin su verme mekanizmasını olumsuz yönde etkileyen önemli bir durumdan da bahsetmek gerekir. Bu da su verme tankında döküm parçaların yüzeyinde oluşan su buharının parça ve soğutma suyu arasında bir izolasyon etkisi yaparak parçanın soğuma hızını düşürmesidir. Bu olumsuz etkiden kurtulmanın yolu ise soğutma suyunu su verme esnasında hareketlendirmektir.

Döküm parçalarının fırın içerisinde birbirlerine çok yakın bir düzende yüklenmesi, döküm yığınının homojen bir şekilde ve yeterli soğuma hızında soğumasını engellemektedir. Bu durumu önlemek için fırına yüklemede, döküm parçalarının aralarında en az kendi kalınlıkları kadar boşluk bırakılarak yüklenmesine dikkat edilmelidir. Yukarıda bahsedilen çok yakın şekilde yükleme durumu, fırın içerisindeki sıcaklık dağılımını olumsuz etkileyerek ısıtma esnasında da tüm parçaların eşit sıcaklığa ulaşmasını engeller. Söz konusu hatalı yükleme

durumlarında parçalar arasındaki sıcaklık farkı 200 °C'leri bulabilmektedir. Oysa fırın içindeki sıcaklık farkının ± 15 °C'den fazla olmaması gerekmektedir. Fırın içinde sürekli bir pozitif basınç olması da fırının ısı kontrolünü kolaylaştırır. Pratik uygulamalarda sıcaklık, tasarruf amacıyla hızlı yükseltilir. Ancak bu durum gerçek şartlarda 700~800 °C'ye kadar sağlanabilse de bu sıcaklıklardan sonra ısıtma hızının fırın şartlarına bağlı olarak çok yavaş olması halinde döküm parçalarda oluşan çatlaklar nedeniyle parça kayıplarına neden olabilir.

Kaliteli bir mangan çeliğinde ısıl işlemle elde edilmek istenenin tüm karbonun östenit içinde tamamen çözünmesi olup hedeflenen yapı olan %100 östenit fazın kontrolü, farklı yollarla test edilebilir. Bunlar eğme testi, manyetik test ve metalografik incelemelerdir. Ancak en net ve güvenilir bilgi metalografik analizler ile elde edilmektedir. Yapılan metalografik incelemelerde toplam tane sınırları boyunca çökelen karbür oranının toplam tane sınırları uzunluğunun %20'sini geçmemesi, toplam karbür oranının (alan veya hacim olarak) %3~4'ü geçmemesi bazı gelişmiş ülkelerde kalite kriteri olarak kabul edilmektedir (Lindroos vd., 2018; Qian vd., 2011; Kuyucak vd., 2004; Das, 2008; Bhero vd., 2014). Sonuç olarak YMÇ, darbeye ve aşınmaya dayanıklı malzemeler olarak yaygın şekilde kullanılmaktadırlar. Esasen özellikle yüksek darbe dayanımı, parçanın ısıl işlem sonrası kazandığı mikroyapı gereği bu çeliklerde öne çıkmaktadır. Yüksek darbe sönmeme yeteneği, bu malzemelerin agresif çalışma koşullarında emniyetli bir şekilde kullanılmasını garanti ederken, deformasyon sertleşmesi mekanizmasıyla da kayda değer bir servis ömrü sağlanmaktadır (Zuidema vd., 1987; Hai vd., 2022; Bal vd., 2018; Zheng vd., 2022; Raghavan vd., 1969). Hem mükemmel darbe dayanımı hem de iyi bir aşınma ömrünü garanti edebilmek ve yüksek kalitede mangan çeliği üretebilmek için öncelikle fırın şartları, şarj yükleme pratiği, ısıl işlem prosedürü, su verme zamanı ve süresi, su verme tanklarının sıcaklık ve hareketlendirme performansı gibi konuların çok iyi bilinmesi ve kontrol edilmesi şarttır. Aksi halde çalışma şartlarında malzeme kayıplarına uğramak işten bile değildir.

2.1.3. Yüksek manganlı çeliklerin ağır yük altında davranışı

Resim 2.1'de ağır çalışma koşulları nedeniyle hasara uğramış ve YMÇ'den imal edilmiş olan kırıcı palet örnekleri görülmektedir. Resim 2.1.(a), yüksek manganlı çelik malzemedan imal edilmiş kırıcı paletin çalışma koşullarındaki aşırı yükler karşısında malzeme davranışını göstermektedir. Parça, aşırı plastik deformasyona uğramasına rağmen malzemedan bir süreksizlik meydana gelmezken, bu durum aynı zamanda YMÇ için, aşırı yükler karşısında beklenen bir malzeme davranışdır. Resim 2.1.(b)'deki YMÇ malzemedan imal edilen kırıcı palet kırılarak hasara uğramıştır.



Resim 2.1. Servis koşullarında hasara uğramış kırıcı palet örnekleri

Bu iki farklı örnek, kimyasal bileşimin yanı sıra ısıl işlem şartlarının da çok iyi şekilde belirlenerek kontrol edilmesi gerektiğini göstermektedir. Kontrol edilmesi gereken bu kritik konulardan ötürü iyi kalitede yüksek manganlı çelik üreten firmaların süreçler hakkında yeterli düzeyde bilgi birikimine ve uzmanlığa sahip olmaları gerekmektedir. Özellikle madencilik ve çimento sektörü gibi zamansız veya plansız duruşların çok yüksek maliyetlere neden olduğu büyük işletmelerde kullanılan yüksek manganlı döküm parçaları, sadece konusunda uzmanlaşmış dökümhanelerden talep edilmektedir. Bu dökümhaneler, ürettikleri ürünler için müşterilerine belirli bir çalışma ömrü boyunca hasarsızlık garantisi de verebilmektedirler.

Günümüzde çok iyi kontrol edilebilen servis koşullarında daha uzun çalışma ömrü için alternatif malzeme arayışları devam etmektedir. Bu bağlamda farklı alaşımlı çelikler ve bimetalik malzemeler geliştirilmekte olsa da bu yeni malzemelerin hiçbiri henüz mevcut olan agresif çalışma koşulları karşısında YMÇ'in yerini alamamıştır ve çoğu kez düşük darbe dayanımları nedeniyle çalışma koşullarında hasara uğrayarak plansız üretim duruşlarına sebep olmaktadır.

2.2. Yüksek Manganlı Çeliklerde Alaşım Etkisi

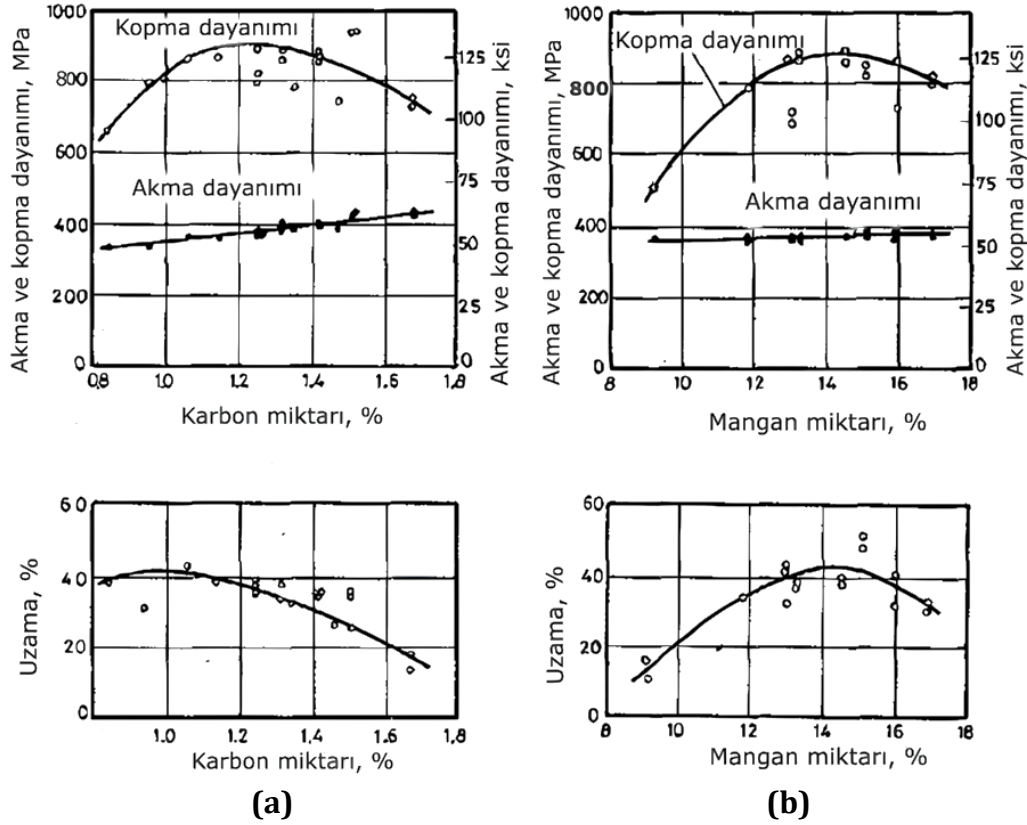
Kırıcı ve öğütücü olarak kullanılan YMÇ'in alaşım içeriğinde %1,1~1,3 karbon ve %12~21 aralığında mangan bulunur. Yüksek karbon ve yüksek mangan ihtiva eden bu çelikler, yüksek süneklik ve yüksek çalışma sertleşmesi özelliği ile aşınmaya ve darbeye dayanıklı çelikler olarak kullanılmaktadırlar. Aşınma davranışlarının geliştirilmesine yönelik çok sayıda çalışma yapılan bu çeliklere krom (Cr), molibden (Mo), titanyum (Ti), nikel (Ni) ve bizmut (Bi) gibi elementler ilave edilerek aşınma davranışlarında gelişim sağlanması hedeflenmiş fakat bu çalışmaların çok azında önemli sayılabilecek iyileştirmeler ortaya konabilmiştir (Ayadi vd., 2020). Manyetik geçirgenliği düşürerek düşük sıcaklıktaki tokluk ve mukavemet değerlerini

yükseltmek amacıyla yüksek mangan (%19~21) içeren çelik türleri de geliştirilmiştir. Yapılan iyileştirme çalışmalarında akma mukavemetindeki kayıpları önlemek amacıyla Cr, Mo, Ti gibi elementlerin yanı sıra vanadyum (V) ve azot (N) gibi elementlerle alaşımlandırma işlemleri yapılmıştır (Mahlami ve Pan, 2017; Tecza vd., 2016; Kim vd., 2018; Maoushe vd., 2016; Pham vd., 2018). Saha çalışmaları göstermiştir ki özellikle karbür yapıcı element katkıları, dökümhanelerin sınırlı ısıl işlem olanakları nedeniyle çalışma koşullarında büyük malzeme ve makine hasarlarına neden olmaktadır. Bu nedenle YMÇ'in üretim şartları da dikkate alınarak alaşım tasarımlarının yapılması büyük önem arz etmektedir (Jacob vd., 2020; Sabzi ve Farzam, 2019; David, 2017; Kim, 2018; Kumar, 2015).

2.2.1. Karbon (C) ve mangan (Mn) etkisi

YMÇ için karbon ve mangan elementlerinin malzeme içerisinde birbirlerine göre oranları, mekanik özelliklerin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir ve bu nedenle bu iki elementin birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir. Yaygın olarak kabul edilen ideal C/Mn oranı 1:10 olmakla birlikte oran belirlenirken kesit kalınlığı da dikkate alınmalıdır. Alaşımdaki karbon oranı ve kesit kalınlığı arttıkça %13 Mn içeren çeliğin yüzde kopma uzaması değeri ani olarak düşer. Bu nedenle kesit kalınlığının artışına bağlı olarak alaşımdaki karbon miktarı düşürülmelidir. Mangan elementi, en güçlü östenit yapıcı elementlerden biridir. Su verme işleminden sonra östenitin ferrite dönüşümünü engelleyerek yapının östenit kalmasına önemli oranda katkı sağlar. %10 ile %14 arasındaki Mn oranının akma mukavemeti üzerinde belirgin bir etkisi olmayıp kopma mukavemetini ve sünekliği artırır. %10 ve altındaki mangan oranlarında mekanik özellikler hızla düşme eğilimine girerler. Örneğin %8 mangan oranında mekanik özellikler önemli ölçüde zayıflar. Genelde yüksek aşınma ve darbe dayanımı gerektiren uygulamalarda mangan oranı en düşük %11 olarak uygulanır. %20 mangan oranlarına kadar kabul edilebilir C/Mn değerleri sağlanabilir. Düşük manyetik geçirgenliğin, düşük sıcaklıklarda yüksek mukavemetin ve tokluğun istenildiği şartlarda mangan oranı %16'nın üzerinde tutulur. Düşük manyetik geçirgenlik için alaşımdaki karbon oranı düşürülür ve yüksek mangan içeren çeliklerde akma dayanımındaki kayıplar, malzeme Cr, V, Ti ve Mo elementleri ile alaşımlandırılmak suretiyle dengelenir. Şekil 2.5, yapı içerisindeki karbon ve mangan miktarının mekanik özelliklere etkisini göstermektedir. Şekil 2.5.(a)'da artan karbon miktarıyla kopma dayanımının önce arttığı ve belirli bir değerden sonra düştüğü ve bu değer %1,2~1,4 C aralığı olduğu görülmektedir. Akma dayanımı doğrusal bir artış ile yaklaşık %1,5 C içeriğiyle birlikte 400 MPa değerinin üzerine çıkarken, %uzama değerinin ise yaklaşık olarak %1 C değerinden sonra düştüğü görülmektedir. Bu durumun nedeni yapıdaki karbon çözünürlüğündeki düşüş ile birlikte tane sınırları ve taneler arasında çökelen karbon bağlı karbür yapılarının artması nedeniyle mekanik özelliklerin olumsuz yönde etkilenmesidir. Şekil 2.5.(b)'de ise kopma dayanımının artan mangan oranı ile önce arttığı, yaklaşık olarak %14 Mn oranından itibaren düşüşe geçtiği görülmektedir. Bu durum östenit yapının mekanik

özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Mn oranındaki değişimin akma dayanımında ise önemli bir fark oluşturmadığı görülmektedir. %uzama değerinin mangan miktarındaki artışa bağlı olarak önce arttığı, kopma dayanımında olduğu gibi yaklaşık %14 Mn değerinden itibaren düştüğü görülmektedir.



Şekil 2.5. Yapı içindeki C ve Mn oranlarının mekanik özelliklere etkileri (Anonim, 2020)

2.2.2. Silisyum (Si) etkisi

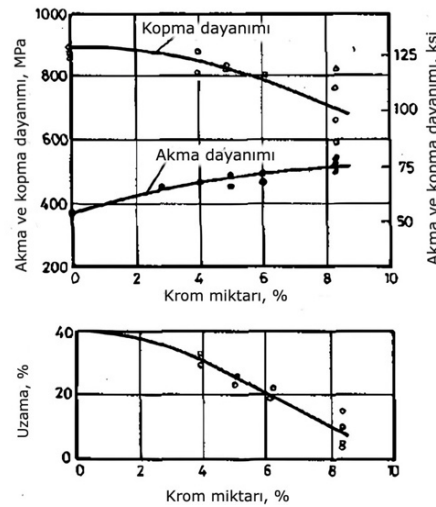
Manganlı çeliklerde silisyumun yanlış kullanımı fosfordan daha zararlı sonuçlara yol açabilmektedir. Özellikle kesit kalınlığı arttıkça silisyumun kırılabilirliği artırıcı etkileri şiddetlenmektedir. 25 mm çaplı görece ince çubuklar ile yapılan deneysel çalışmalarda, Si akma dayanımını artırmak için %2'ye kadar kullanılabilir. Birlikte kalın kesitlerde tokluk üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Kalın kesitli parçalarda artan karbon yüzdesi ile birlikte silisyum oranı %0,6~1,0 aralığında bile tokluk değerini önemli ölçüde düşürmektedir.

2.2.3. Krom (Cr) etkisi

Krom elementinin yanlış kullanımı hem üretici, hem de kullanıcılar için büyük kayıplara neden olmaktadır. Bu nedenle krom içeriğinin mangan çelikleri için bir safsızlık olarak değerlendirilmesi yaygın bir kabuldür. Krom elementi, malzemenin akma dayanımını ve şekil değiştirmeye karşı direncini artırır ve bazı uygulamalarda faydalı olabilir. Bununla birlikte krom elementinin tokluk özelliklerini önemli oranda düşürdüğü ve kesit kalınlığındaki değişmelere karşı çok hassas olduğu bilindiğinden kullanımında çok dikkatli olunmalıdır.

Genellikle kesit kalınlığı ve karbon yüzdesi ile ilişkisi ihmal edildiğinden, kromun etkileri konusunda yayınlanmış veriler son derece yanıltıcı olabilmektedir. 25 mm kalınlıktaki çubuklarla gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda %2'ye kadar Cr içeriğinin toklukta önemli hiçbir kayba neden olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte gerçek döküm koşullarında tokluk kaybı oldukça büyük olmaktadır. %1,20 C ve %2 Cr içeren bir mangan çeliğinde karbonu tümüyle östenit yapı içerisinde çözündürülebilmesi için, ısıl işlemde östenitleme sıcaklığının 1125~1150 °C'ye çıkılması gerekir. Bu durum, işletmeler için hem enerji maliyetlerinde önemli ölçüde bir artışı beraberinde getirirken hem de kullanılan ısıl işlem fırınlarının teknik ve donanımsal kapasitelerinin yetersizliği gibi kısıtlamaların yanı sıra yüksek C oranlarında %2 Cr elementi içeriğinin potansiyel tehlikelerinin de göz önünde bulundurulmasını gerektirmektedir.

Şekil 2.6, Cr oranının mekanik özelliklere etkisini göstermektedir. Cr oranının artışı ile birlikte akma dayanımının arttığı, kopma dayanımı ve %uzama değerinin ise düştüğü görülmektedir. Cr elementinin östenit yapıda çok zor çözündüğü, çözünmesi için uzun ve çok yüksek östenitleme sıcaklıklarına gereksinim duyulduğu bilinmekte olup östenit yapıda çözünmeden kalan Cr elementinin karbür yapıcı özelliği nedeniyle içyapıda çentik etkisi oluşturmasından dolayı mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir.

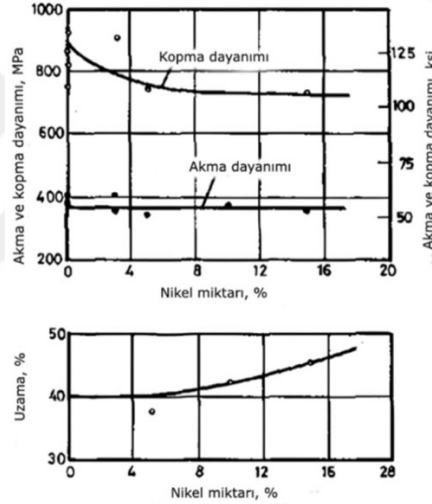


Şekil 2.6. Yapı içindeki Cr oranının mekanik özelliklere etkileri (Anonim, 2020)

2.2.5. Nikel (Ni) etkisi

Klasik mangan çeliğine Ni ilavesinin, kopma dayanımını düşürerek sünekliliği biraz artırdığı ancak akma dayanımı üzerinde kayda değer bir etkisinin olmadığı bilinmektedir. Bununla birlikte Ni, ısıtma ve soğutma sırasında tane sınırlarında karbür çökmesini önleyerek tokluğu artırır. Ni içeren çeliklerde sıcak yırtılma daha az ve kaynak daha kolay olur.

%0,7 C içeren bir mangan çeliğine %3,5 Ni ilave edilmesi durumunda tavlama sırasında karbür çökmesinin önlenerek tekrar su vermeye gerek kalmadan östenitik tok yapının korunabildiği ifade edilmektedir (Anonim, 2020). Ni ilavesinin olumlu bir başka etkisi de düşük sıcaklıktaki darbe dayanımını yükseltmesidir. Şekil 2.8, yapı içerisindeki Ni oranının mekanik özelliklere etkisini göstermektedir. Ni oranındaki artışa bağlı olarak akma dayanımının arttığı, kopma dayanımı ve %uzama değerinin ise düştüğü görülmektedir.



Şekil 2.8. Yapı içindeki Ni oranının mekanik özelliklere etkileri (Anonim, 2020)

2.2.6. Fosfor (P) etkisi

Standartlarda %0,08'e kadar fosfora izin verilmesine rağmen deneyimli dökümcüler bu oranı çok daha düşük seviyelerde tutmaya çalışırlar. Fosfor oranı ile ilgili karşılaşılan en ciddi problemler mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisinden çok 'işletme içi çatlama' riskini önemli ölçüde artırmasıdır. 25 mm çaplı deney çubukları ile gerçekleştirilen çekme deneyleri, %0,1'e kadar P içeriğinin döküm parçaların mekanik özelliklerine çok az etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak, kırıcı performans verileri üzerinde yapılan istatistiksel çalışmalar P yüzdesi ile tokluk arasında önemli bir ilişki olduğunu göstermektedir. P içeriğinin manganlı çeliğin kırılma derecesi üzerindeki etkisi, kesit kalınlığı ile C ve Si yüzdesinin yanı sıra diğer

alaşım ilaveleri ile de değişmekle birlikte P oranının mümkün olduğunca düşük tutulması gerektiği bilinmektedir.

%0,02 ve üzerindeki P içeriği, paslanmaz çeliklerde olduğu gibi mangan çeliklerinde de taneler arası çatlamayı teşvik eder. %0,06 üzerindeki P içeriği ise mangan çeliğinin yüksek sıcaklıktaki plastikliğini fazlaca düşürerek çeliğin sıcak yırtılmaya maruz kalmasına neden olur. Bu kadar yüksek P düzeylerinde mikroyapıda tane sınırlarında P ötekiği tabakaları görülebilir. %0,06 altındaki P içeriğinin mikroyapıda hiçbir etkisi görülmemekle birlikte sıcak yırtılma derecesinde yine de etkilidir. Dökümde izin verilebilecek en yüksek P yüzdesi, parçada oluşacak i gerilmelerin büyüklüğüne ve dolaylı olarak da döküm tasarımı, besleyici büyüklüğü ve yerine bağlı olarak değişir. Ağır ve karmaşık şekilli dökümlerde P oranının %0,04 altında tutulması tavsiye edilir. P elementi, büyük besleyicilerin kesilmesi ve kaynak işlemleri sırasında karşılaşılan çatlama eğilimini de artırır. Aynı sakıncalar sıcak yırtılmada da görülür (Anonim, 2020).

2.2.7. Kükürt (S) etkisi

Kükürt, manganiz ile birleştiğinde MnS bileşiği yaparak küresel kalıntılar oluşturur ve kırılganlığa neden olan FeS fazının oluşumunu engeller. Akma ve çekme mukavemetine etkisi son derece az olmakla birlikte sünekliği ve tokluğu belirgin şekilde düşürmektedir. Bu nedenle, alaşım içindeki kükürt miktarının mümkün olduğunca düşük tutulması gerekmektedir (Anonim, 2022).

3. BÖLÜM

MATERYAL VE METOT

Yüksek manganlı çelikler (YMÇ) madencilik, taş kırma ve çimento gibi sektörlerde kırıcı ve öğütücü olarak yaygın ve verimli şekilde kullanılmaktadır. Aynı zamanda bu malzemelerin bileşimlerine ve çalışma sırasında maruz kaldıkları yüklere bağlı olarak plastik şekil değişimiyle birlikte pekleşme davranışını yüksek seviyede gösteriyor olmaları önemli bir avantaj sağlamaktadır. Fakat alaşım ve ısıl işlem şartlarına bağlı olarak YMÇ'in arzu edilen genel metalografik yapıdan uzaklaşması ile malzemelerde gevrekleşmeye bağlı olarak kırılmalar meydana gelebilmekte ve çok yüksek devirle takım olarak çalıştıkları kırıcı ve öğütücülerde büyük malzeme ve makine hasarlarına neden olabilmektedir. Yaşanan kırılmalar aynı zamanda plansız işletme duruşları nedeniyle de ekonomik kayıpları daha da artırmaktadır.

Bu tez çalışmasıyla aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzeme olarak yaygın şekilde kullanılan YMÇ üzerinde alaşımlandırma ve ısıl işlem şartlarının etkilerini deneysel olarak incelemek ve bu çeliklerin çalışma koşullarında herhangi bir hasara uğramadan en verimli şekilde çalışma ömrünü tamamlamasını sağlayacak bilgilere katkı sağlamak hedeflenmiştir. Böylece, işletmelerdeki makine ve kırıcı hasarlarından kaynaklanan bakım onarım masraflarının ve zamansız duruşlardan kaynaklanan ekonomik kayıpların azaltılması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada çekme, darbe ve aşınma deneyleri için değerleri sırasıyla Tablo 4.3, Tablo 4.8 ve Tablo 4.13'te verilen deneysel tasarım parametrelerinin değerlendirilmesi için Taguchi tabanlı deney tasarımı yöntemi kullanılmıştır. Öncelikle Taguchi deney tasarımına göre numune dökümleri gerçekleştirilmiş ve ardından planlanan deney tasarımına göre belirlenmiş olan ısıl işlem prosedürleri uygulanmıştır. Taguchi yöntemi, mühendislik tasarımlarının kalite özelliklerini analiz ve optimize etmek amacıyla deney tasarlamak için çok kullanışlı ve güvenilir bir yöntem olarak kullanılmakta olup ortogonal dizi kullanımı (L) ve en az sayıda deney ile değerli bilgiler sağlayabilmektedir (Çetin vd., 2023). Taguchi, tercih edilen kalite karakteristiği olarak sinyal/gürültü (SG) oranını kullanmaktadır. SG oranı standart sapma yerine ölçülebilir bir değer olarak kullanılmaktadır. En basit hali ile SG oranı, ortalamanın (S), standart sapmaya (G) oranı olarak bilinmektedir. Bu çalışmada parametrik alanı tamamen kapsamakla birlikte sınırlı sayıda deney içeren tasarım matrisini elde etmek için Taguchi'nin ortogonal dizisi olarak L9 kullanılmıştır. Taguchi'nin L9 ortogonal dizilimini temel alan deney tasarımları oluşturulmuştur. Bu deneysel tasarımlar çekme deneyi için Tablo 4.4, darbe deneyi için Tablo 4.9 ve aşınma deneyi için Tablo 4.14'te gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar ise, çekme deneyi için Tablo 4.5, darbe deneyi için Tablo 4.10 ve aşınma deneyi için Tablo 4.15'te verilmiştir. Yanıt değerleri Taguchi yönteminde SG (sinyal/gürültü) oranlarına

dönüştürülmüştür. Taguchi SG oranını, istenmeyen rastgele gürültü değeri için istenen sinyal oranı olarak tanımlamaktadır ve deneysel verilerin kalite özelliklerini ortaya koymaktadır.

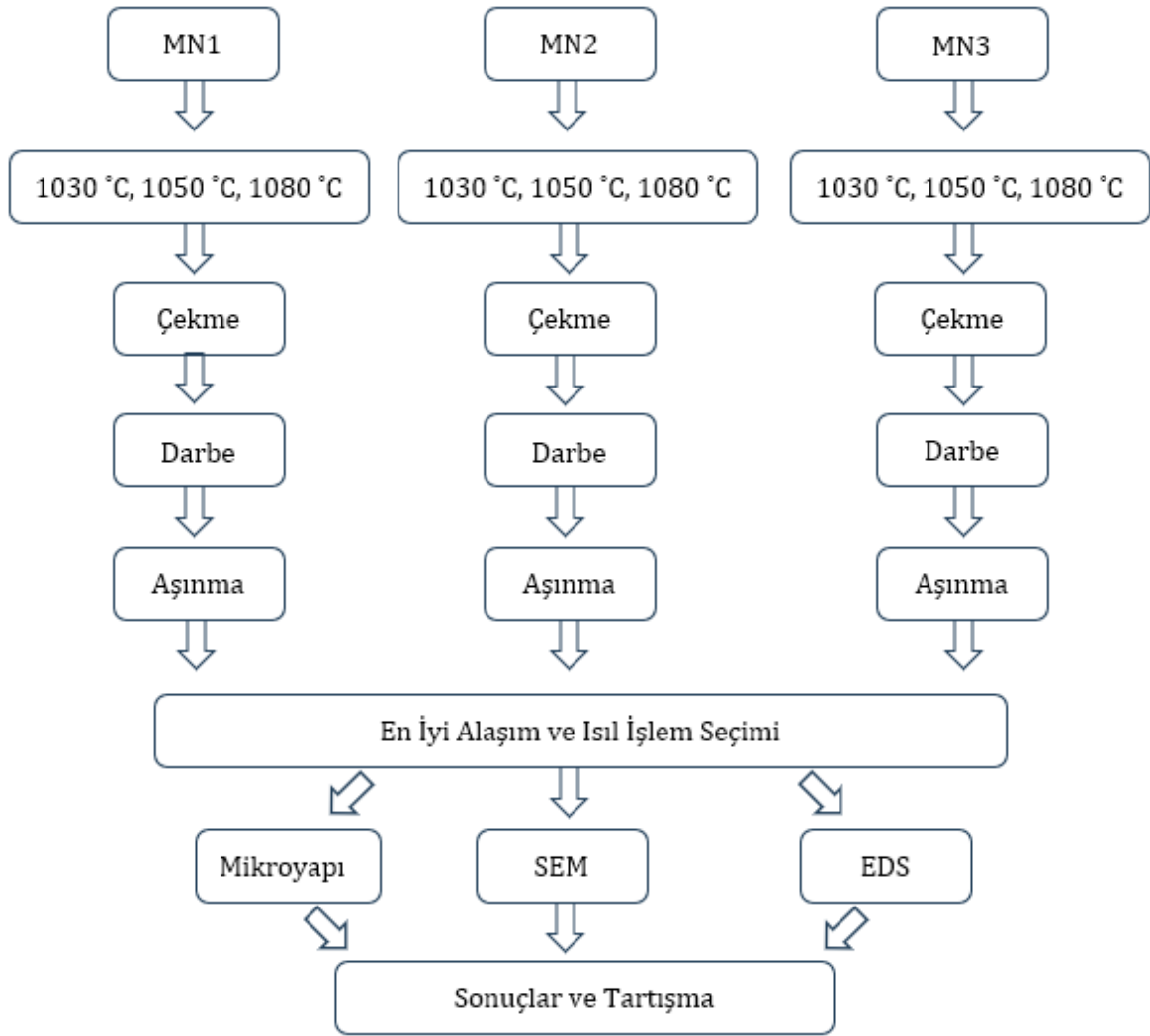
$$S/N_{LTB} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{m} \right) * \sum_{i=1}^m \frac{1}{y_{ij}^2} \quad (3.1)$$

$$S/N_{STB} = -10 * \log_{10} \left(\frac{1}{m} \right) * \sum_{i=1}^m y_{ij}^2 \quad (3.2)$$

$$S/N_{NTB} = 10 * \log_{10} \left(\frac{\bar{y}^2}{s^2} \right) \quad (3.3)$$

SG oranlarını karakterize etmek için denklemlerde gösterildiği gibi üç farklı fonksiyon tanımlanmıştır. Bunlar, daha büyük olan daha iyi, LTB (the-larger-the better), daha küçük olan daha iyi, STB (the-smaller-the-better) ve ortalama için, NTB (the-nominal-the-best) olarak Eş. 3.1, Eş. 3.2 ve Eş. 3.3'te verilmiştir. Deneyin amacına uygun olarak bu denklemlerden biri seçilebilmektedir (Çetin vd., 2023).

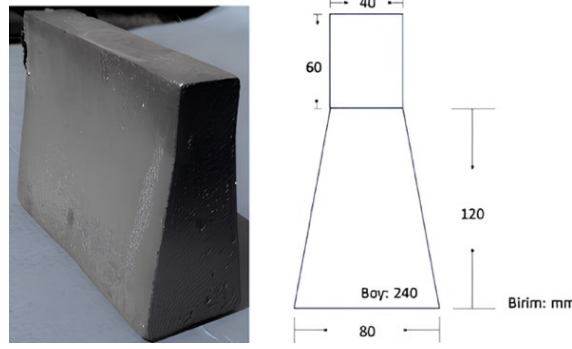
Numunelere Taguchi deney tasarımına göre çekme, darbe ve aşınma testleri uygulanarak mekanik özellikleri tespit edilmiş ve numunelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırması sağlanmıştır. Minitab programı kullanılarak çekme, darbe ve aşınma deneyi sonuçlarına göre bağımlı değişkenlerin (çekme, darbe ve aşınma), bağımsız değişkenlerdeki (IS, KE, AH, AY) değişikliklere göre nasıl değiştiğini tespit etmek amacıyla regresyon analizleri yapılmış, deney parametrelerine bağlı olarak regresyon denklemleri oluşturulmuştur. Bununla birlikte bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri açıklama oranı olarak tanımlanan (R^2) güvenilirlik değerleri bulunmuştur. R^2 değeri regresyon denkleminin başarısını ölçmede kullanılan bir istatistik parametre olup bu değer aynı zamanda denklemin tahmin gücünü de yansıtmaktadır. R^2 değerinin %72 üzerinde olması durumunda oluşturulan regresyon denkleminin istatistik olarak geçerli bir denklem ve iyi bir modelin göstergesi olduğu ileri sürülebilmektedir (Günel, 2003). Ayrıca bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek için değişken analizi (ANOVA) yapılmıştır. Bu verilerden yola çıkılarak en iyi mekanik özelliklere sahip alaşım ve ısıl işlem prosedürü tespit edilmiştir. Ardından en iyi mekanik değerleri veren ısıl işlem şartlarında üretilen Mn1, Mn2 ve Mn3 numunelerin mikroyapı, SEM-EDS analizleri yapılarak karakterize edilmiş ve elde edilen mekanik test sonuçları ile birlikte değerlendirilmiştir. Yapılan test ve analiz çalışmalarının sematik görünümü Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Test ve analiz çalışmalarının akış şeması

3.1. Deney Numunelerinin Üretimi

Numuneler reçineli kalıplama sistemiyle kalıplanarak, 200 kg kapasiteli açık atmosferli indüksiyon ocağında 1450 °C döküm sıcaklığında döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Sırasıyla Mn1, Mn2 ve Mn3 alaşımları 40x40x240 mm³ boyutlarında test kesiti bulunan Y-blok şeklinde numuneler dökülmüştür. Resim 3.1, numune dökümü için kullanılan ve çekinti boşluğu, gaz boşluğu, cüruf gibi döküm hatalarını ortadan kaldıran bir tasarıma sahip olan Y-bloğun resim ve ölçülerini göstermektedir.



Resim 3.1. Y-Blok test numunesi

Tablo 3.1, dökümü yapılan numunelerin alaşımlarını, yapılan mekanik testleri, ısıl işlem sıcaklıklarını ve bu testler için yapılan numunelerin döküm sayılarını göstermektedir. Taguchi deney tasarımına göre planlanan tüm testler için toplamda 36 adet numune dökümü gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3.1. Dökümü yapılan numune sayıları

Deney No.	Malzeme	Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Çekme Deneyi	Darbe ve Aşınma Deneyleri	Metalografik İnceleme
L1	1,1C 12Mn (Mn1)	1030	3 adet		1 adet
L2	1,1C 12Mn (Mn1)	1050	3 adet		1 adet
L3	1,1C 12Mn (Mn1)	1080	3 adet		1 adet
L4	1,2C 16Mn (Mn2)	1030	3 adet		1 adet
L5	1,2C 16Mn (Mn2)	1050	3 adet		1 adet
L6	1,2C 16Mn (Mn2)	1080	3 adet		1 adet
L7	1,3C 19Mn (Mn3)	1030	3 adet		1 adet
L8	1,3C 19Mn (Mn3)	1050	3 adet		1 adet
L9	1,3C 19Mn (Mn3)	1080	3 adet		1 adet
Toplam			27		9

3.2. Numunelerin Isıl İşlemi

Dökülen numunelere 4 ton kapasiteli, rezistanslı ve otomatik adım kontrollü elektrikli ısıl işlem fırınında planlanan ısıl işlem prosedürleri uygulanmıştır (Tablo 4.2). Isıl işlem uygulamalarında östenitleme sıcaklıkları 1030 °C, 1050 °C ve 1080 °C olarak seçilmiştir. Ardından su verme işlemi, 1900x2500x6000 mm³ ölçülerindeki ve 8 °C'deki hareketlendirilmiş su tankında gerçekleştirilmiştir.

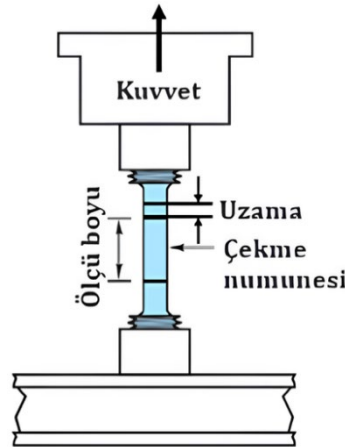
3.3. Çekme Deneyi Prosedürü

Çekme testi numuneleri, planlanan deney tasarımına göre ısıl işlemleri gerçekleştirilmiş olan test bloklarından TSE 138 EN 10002-1 standardına göre işlenerek hazırlanmıştır. İlgili standart, metalik malzemelerin çekme deneyi metodları ve bu metodlar ile belirli sıcaklıklardaki mekanik özelliklerin tayinini kapsamaktadır. Y-blok numuneler önce otomatik kesme cihazında 40x40x240 mm³ boyutlarındaki bloklar şeklinde kesilerek universal torna makinesinde çekme numunesi ölçülerine işlenmiştir.



Resim 3.2. Y-Bloktan çıkarılmış deney numunesi ve işlenmiş çekme numunesi

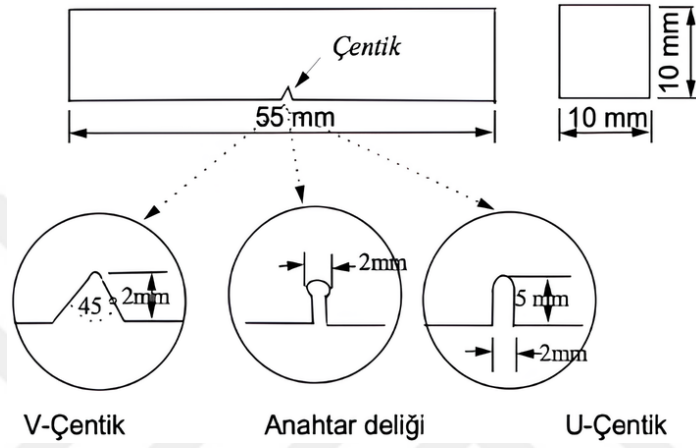
Resim 3.2'de numune bloğunun ve bu numune bloğundan işlenerek elde edilmiş olan çekme test numunesinin görseli verilmiştir. Şekil 3.2'de ise çekme deney düzeneğinin şematik görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.2. Çekme deney düzeneği şeması

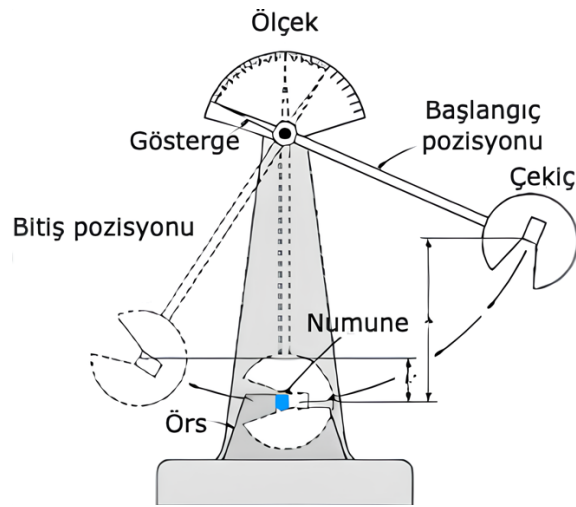
3.4. Darbe Deneyi Prosedürü

Darbe testleri, metalik malzemeler için Charpy darbe deneyi metotlarını kapsayan TS EN ISO 148-1 standardına göre WPM Zwick marka darbe test cihazında yapılmıştır. Darbe testi numuneleri, standarda uygun şekilde 10x10x55 mm³ boyutlarında ve çentik açılarak, planlanan ısıl işlem prosedürlerine uygun olarak ısıl işlemleri gerçekleştirilmiş olan test bloklarından tel erozyon yöntemiyle kesilmek suretiyle elde edilmiştir.



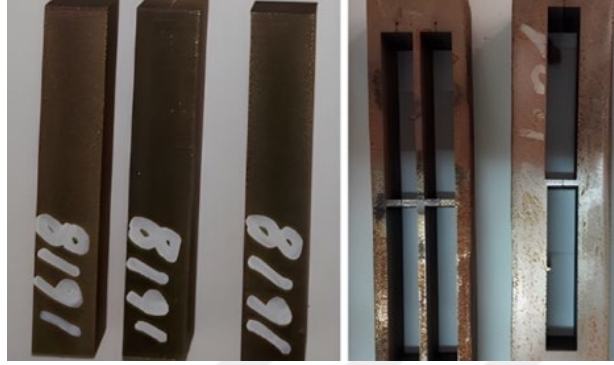
Şekil 3.3. TS EN ISO 148-1 darbe deneyi numunesi

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4, sırasıyla çentikli darbe numunesinin ölçülerini ve şematik olarak deney düzeneğini göstermektedir.



Şekil 3.4. TS EN ISO 148-1 darbe deney düzeneği

Deneysel çalışmalar için kullanılacak olan darbe testi numuneleri, döküm yoluyla elde edilen bloklardan tel erozyon yöntemiyle elde edilmiş olup Resim 3.3, tel erozyon yöntemiyle elde edilen darbe numunelerinin kesildiği bölgeyi ve çıkan numuneleri göstermektedir.



Resim 3.3. Tel erozyon yöntemiyle kesilen darbe numuneleri

3.5. Aşınma Deneyi Prosedürü

Aşınma testi, disk üzeri aşınma tipi test cihazında kayma sırasındaki malzemelerin aşınma miktarlarının belirlenmesine yönelik laboratuvar prosedürlerini içeren ASTM G99-05(2010) standartlarına göre disk üzeri aşındırma tipi aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma numuneleri, aşınma cihazının numune haznesine uygun olarak $\varnothing 6 \times 35$ mm silindirik numuneler şeklinde ve planlanan ısıl işlem prosedürlerine uygun olarak ısıl işlemleri gerçekleştirilmiş olan test bloklarından tel erozyon yöntemiyle kesilmek suretiyle elde edilmiştir.



Resim 3.4. Aşınma test numuneleri ve test cihazı

Resim 3.4, tel erozyon yöntemiyle elde edilen $\varnothing 6 \times 35$ mm boyutundaki silindirik deney numunelerini ve aşınma testi yapılan disk üzeri aşındırma tipi test cihazını göstermektedir.

3.6. Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri ve SEM-EDS Analizleri

Numunelerin kesme, parlatma ve bakalite alma işlemi Struers marka tam otomatik metalografi setinde gerçekleştirilmiştir. Resim 3.5, metalografik inceleme için kullanılan numune hazırlama setini göstermektedir.



Resim 3.5. Numune hazırlama seti (otomatik kesme, parlatma ve bakalite alma cihazı) ve optik mikroskop

Numune setinde yer alan otomatik kesme cihazı sıvı soğutmalı olup devir ve ilerleme hızı kontrol edilebilmektedir. Otomatik bakalite alma cihazı ise ısı, basınç ve süre kontrolü sağlayabilmektedir. Otomatik parlatma cihazı ise altılı döner numune haznesine, süre ve devir kontrolüne sahip olup sıvı soğutmalı özelliktedir.

Hazırlanan metalografi numuneleri, %3'lük nital (3% HNO₃+97% etil alkol) ile dağlanarak, Nikon L150 tip optik mikroskopta incelenmiştir. Numuneler dağlanmış halde Nikon L150 Eclipse mikroskop ile incelenmiştir. Ayrıca numunelerden JEOL/JSM-6510LV-INCA/EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu ve Yarı Kantitatif Elemental Analiz Sistemi) kullanılarak SEM-EDS analizleri yapılmıştır.

3.7. Sertlik Deneyleri

Mn1, Mn2 ve Mn3 kodlu ve 1080 °C'de ısıl işlem uygulanmış numunelerin sertlik ölçümleri Wolpert Wilson Instruments üniversal sabit sertlik ölçme cihazında TS EN ISO 6506-1 standardına göre yapılmıştır. İlgili standart metalik malzemelerde Brinell sertliğinin tayini için kullanılacak olan metodu ve 650 HB sınırına kadar uygulanabilen şartları kapsamaktadır.



Resim 3.6. Üniversal sabit sertlik cihazı

Ölçümlerin yapıldığı sertlik cihazı Resim 3.6'da gösterilmiştir. Sertlik ölçümleri her bir numune için beşer tekrarlı olarak yapılmış ve ortalamaları alınmıştır.

4. BÖLÜM

DENEY VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

Deney ve analiz çalışmaları kapsamında ısıl işlem şartlarının ve kimyasal bileşimin YMÇ'in mekanik özelliklerine etkilerinin incelenmesi amacıyla öncelikle Y-blok şeklinde (Resim 3.1) numune dökümleri yapılmıştır. Dökümü gerçekleştirilen numunelere belirlenen ısıl işlem prosedürleri uygulanmış, standartlara uygun şekilde (çekme deneyi için TSE 138 EN 10002-1, darbe deneyi için TS EN ISO 148-1, aşınma deneyi için ASTM G99-05(2010)) numuneler hazırlanarak Taguchi deney tasarımına göre çekme, darbe ve aşınma testleri yapılmıştır. Tablo 4.1'de deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri verilmiştir.

Tablo 4.1. Yüksek manganlı çelik numunelerin kimyasal bileşimi

Alaşım	Kimyasal Bileşim [ağırlıkça %]							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	S, P	Fe	KE*
1,1C 12Mn (Mn1)	1,10	0,49	12,94	0,22	0,024	<0,04	Kalan	3,31
1,2C 16Mn (Mn2)	1,21	0,44	16,36	1,46	0,069	<0,04	Kalan	4,24
1,3C 19Mn (Mn3)	1,31	0,51	19,50	1,53	0,500	<0,04	Kalan	4,97

*Karbon eşdeğeri

Tablo 4.2, numunelerin ısıl işlem sıcaklıklarını, ısıtma ve tutma sürelerini ve su verme ortamlarını göstermektedir. Tüm numuneler için ısıtma ve tutma süreleri ile su verme şartları aynı tutulmuştur. Numunelerin tüm kesitinin homojen bir şekilde ısınması için ısıtma mümkün olduğunca yavaş yapılmış, tutma süresi tüm numuneler için 4 saat olarak belirlenmiştir. Su verme ortamı olarak su seçilmiş ve Tablo 2.2'de verilen Grossman H değerleri dikkate alınarak, soğutma kapasitesini en üst düzeye çıkarmak için kompresörler yardımıyla hareketli su ortamı sağlanmıştır.

Tablo 4.2. Yüksek manganlı çelik numunelerin ısıl işlemleri

Numune kodu	Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıtma Süresi [sa]	Tutma Süresi [sa]	Su Verme Şartları
(Mn1)	1030	8	4	Hareketli Su
(Mn2)	1050	8	4	Hareketli Su
(Mn3)	1080	8	4	Hareketli Su

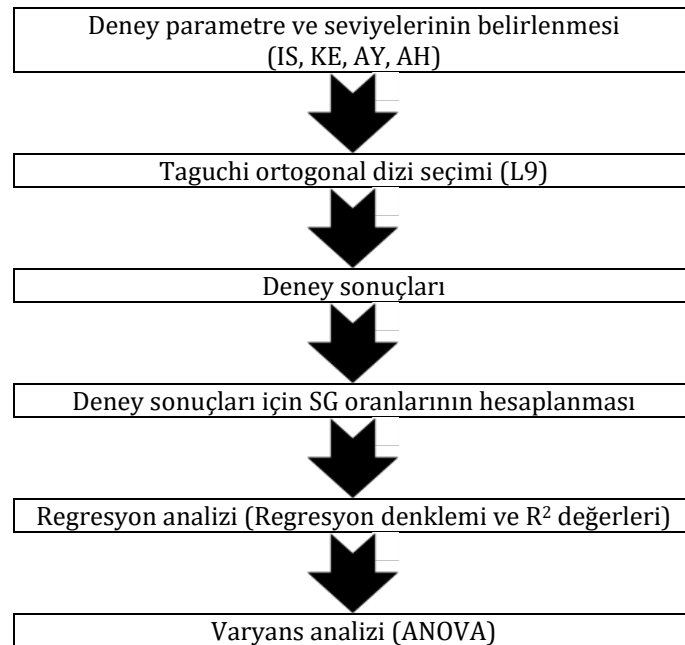
Taguchi deney tasarımına göre planlanmış test prosedürüne göre çekme ve darbe testleri yapılarak çekme ve darbe dayanımları ile ilgili deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Aşınma

testleri, Taguchi deney tasarımına göre planlanmış ve disk üzeri aşındırma (pin-on-disk) tipi deney düzeneğinde gerçekleştirilerek YMÇ'in farklı kimyasal bileşimler ve ısıl işlem sıcaklıklarındaki abrasiv aşınma davranışları incelenmiştir.

Minitab veri analiz, istatistik ve süreç geliştirme yazılımı yardımıyla bağımsız değişkenler olan girdi parametreleri (IS, KE, AY, AH) ile bağımlı değişkenler olan deney sonuçları (çekme dayanımı, darbe dayanımı, aşınma miktarı) arasındaki ilişkiyi tahmin etmek için veya bağımlı değişkenlerin bağımsız değişkenlerdeki değişikliklere göre nasıl değiştiğini belirlemek için çekme, darbe ve aşınma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak regresyon ve varyans analizleri yapılmış, regresyon analiz modelleri çıkarılmış ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenleri açıklama oranı olarak tanımlanan (R^2) güvenilirlik değerleri bulunmuştur.

Deney parametrelerine bağlı olarak çekme, darbe ve aşınma deney sonuçlarını veren regresyon denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler sayesinde belirlenen ısıl işlem sıcaklıkları ve alaşımın karbon eşdeğerleri arasında kalan tüm değerler için kabul edilebilir hata oranları ile hesaplama yapma imkânı sağlanmıştır.

Çekme ve darbe deney sonuçlarının hesaplanmasında bağımsız değişken olarak ısıl işlem sıcaklığı ve alaşımı ifade etmek için karbon eşdeğeri kullanılırken, aşınma deney sonuçlarının hesaplanmasında bunlara ek olarak deneysel parametreler olan aşındırma yükü ve hızı kullanılmıştır. Şekil 4.1, Taguchi tabanlı optimizasyon işleminin akış şemasını göstermektedir.



Şekil 4.1. Taguchi optimizasyon akış şeması

Çeliklerde alaşım elementlerinin sağladığı sertliğe eş sertlik sağlayabilecek karbon miktarı anlamına gelen ve alaşımı ifade etmek için kullanılan karbon eşdeğeri için birden fazla formül türetilmiş ve kullanılmakta iken dünyada en yaygın kullanılan formül Milletlerarası Kaynak Enstitüsüne (IIW) göre Eş. 4.1'de verilmiş olan formüldür. Döküm sonrasında elde edilen kimyasal bileşim, optik emisyon spektrometresi (OES) ile ölçülüp alaşımın karbon eşdeğerini (KE) belirlemek için Eş. 4.1 kullanılmıştır.

$$KE = \%C + \%Mn/6 + \%Cr/5 + \%Mo/5 + \%V/5 + \%Cu/15 + \%Ni/15 \quad (4.1)$$

Yapılan mekanik testler sonucunda en iyi mekanik özelliklerin elde edildiği alaşım ve ısıl işlem prosedürü belirlenmiştir. Belirlenmiş olan alaşım ve ısıl işlem şartlarında tüm numuneler mikroyapı incelemeleri ve SEM-EDS analizleriyle karakterize edilmiştir. İlave olarak standartlara (TS EN ISO 6506-1) uygun şekilde gerçekleştirilen sertlik ölçüm testleri yapılarak numunelerin sertlik değerleri ile mikroyapısal ve mekanik özellikleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

Aşağıda çekme, darbe ve aşınma deneyleri, mikroyapı ve SEM-EDS analizleri ile sertlik ölçüm deneyleri ile ilgili prosedürler, deney tasarımları ve deneysel bulgular ayrı başlıklar altında detaylı şekilde verilmiştir.

4.1. Çekme Deneyleri

Çekme testleri, TSE 138 EN 10002-1 standardına göre Y-blok numunelerden tel erozyon yöntemiyle kesilerek universal tornalama cihazında hazırlanmış olup, çekme deney düzeneğinde testleri gerçekleştirilerek karbon eşdeğeri %3,31; %4,24 ; %4,97 olan ve 1030, 1050 ve 1080 °C östenitleme sıcaklıklarında ısıl işlem uygulanmış numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı ve %uzama miktarları tespit edilmiştir.

4.1.1. Çekme deneyi tasarımı

Çekme deneyi için giriş parametreleri ısıl işlem sıcaklığı (IS) ve karbon eşdeğeri (KE) olup iki parametre için de üç farklı seviye kullanılmıştır (Tablo 4.3). Bu durumda gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı $3^2 (=9)$ olarak belirlenmiştir. Taguchi'nin L9 ortogonal dizilimini temel alan deney tasarımına göre deneyler yapılmış ve her bir şart için deneylerin üçer kez tekrarlanması ile 27 adet deney yapılmıştır. Tablo 4.3, ısıl işlem sıcaklığı ve karbon eşdeğeri parametre ve değerleriyle, üç seviye olarak belirlenen ısıl işlem sıcaklıklarını ve karbon eşdeğerlerini göstermektedir.

Tablo 4.3. Çekme deney parametre ve değerleri

IS [°C]	KE [%]
1030	3,31
1050	4,24
1080	4,97

Tablo 4.4, Taguchi yöntemiyle hazırlanmış çekme deney tasarımı ile toplamda yapılacak olan dokuz adet deneyi, üç farklı seviye olarak belirlenmiş olan ısıl işlem sıcaklıklarını ve karbon eşdeğerlerini göstermektedir. Isıl işlem sıcaklıkları 1030, 1050 ve 1080 °C olarak, karbon eşdeğerleri ise 3,31; 4,24 ve 4,97 olarak belirlenmiştir.

Tablo 4.4. Çekme deney tasarımı

Deney No.	IS [°C]	KE [%]
Ç-L1	1030	3,31
Ç-L2	1030	4,24
Ç-L3	1030	4,97
Ç-L4	1050	3,31
Ç-L5	1050	4,24
Ç-L6	1050	4,97
Ç-L7	1080	3,31
Ç-L8	1080	4,24
Ç-L9	1080	4,97

4.1.2. Çekme deneyi bulguları

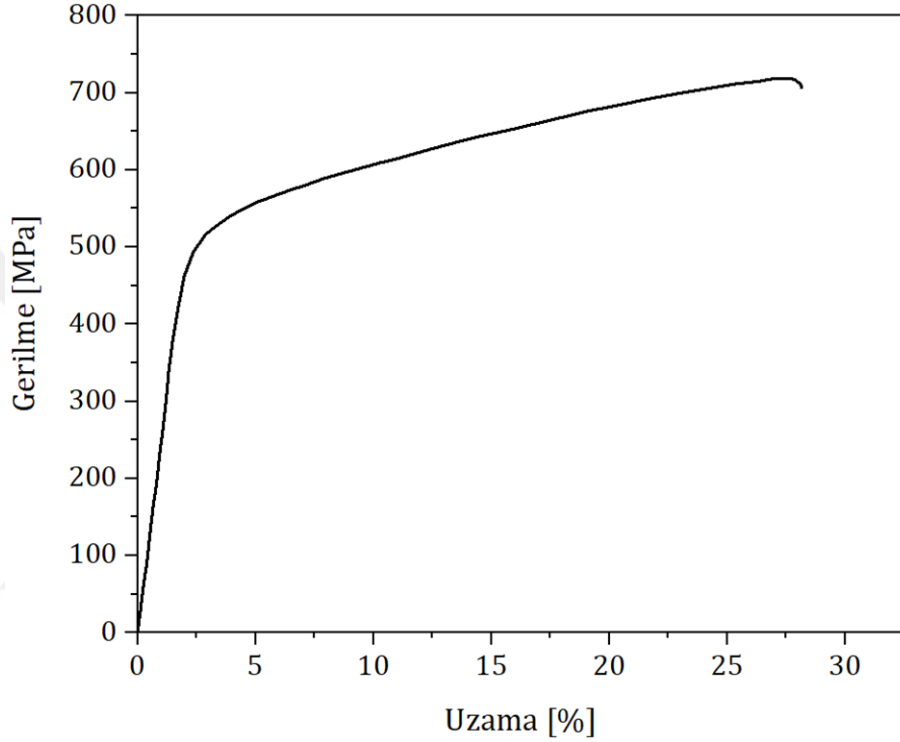
Tablo 4.5'te çekme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre numunelerin çekme ve akma dayanımları ile %uzama değerleri üçer tekrarlı olarak yapılan çekme testleri sonucunda bulunmuş olup ortalama değerleriyle birlikte verilmektedir.

Tablo 4.5. Çekme deney sonuçları

Deney No.	IS [°C]	KE [%]	Çekme Day. [MPa]	Ort. Değer [MPa]	Akma Day. [MPa]	Ort. Değer [MPa]	Uzama [%]	Ort. Değer [%]
Ç-L1	1030	3,31	624	606,3	432	429	33,4	33,6
			598		429		33,1	
			597		426		34,2	
Ç-L2	1030	4,24	647	645,0	447	446,7	19	19,4
			638		441		18,7	
			651		452		20,4	
Ç-L3	1030	4,97	657	656,3	457	462,7	15	14,9
			653		459		14	
			659		463		15,8	
Ç-L4	1050	3,31	698	709,7	408	421,3	27,5	26,9
			724		429		26,3	
			707		427		26,9	
Ç-L5	1050	4,24	655	660,0	455	456,3	21	20,9
			667		458		21,2	
			658		456		20,5	
Ç-L6	1050	4,97	661	661,6	465	465,7	16,7	17
			664		468		17,3	
			660		464		17	
Ç-L7	1080	3,31	741	749,3	389	396,3	27,8	29,5
			760		407		30,9	
			747		393		29,8	
Ç-L8	1080	4,24	674	672,3	459	458,7	21,2	22
			670		461		23,1	
			673		456		21,8	
Ç-L9	1080	4,97	665	666,0	469	470	17,6	18,1
			669		468		17,9	
			664		473		18,7	

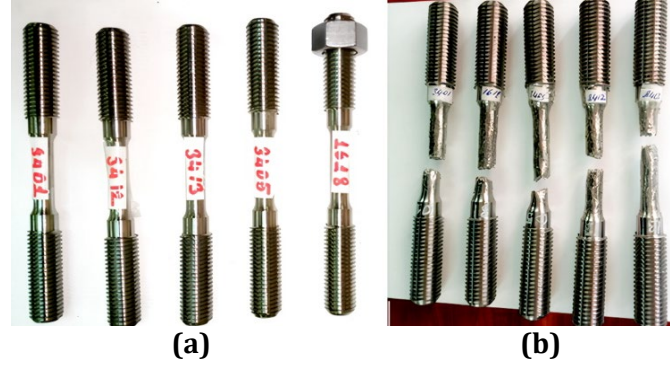
YMÇ'in temel mekanik davranışlarını incelemek amacıyla tek eksenli çekme deneylerinden elde edilen gerilme-gerinim (σ - ϵ) eğrisi kullanılabilir. Bu amaçla, ısıl işlem sıcaklığı olarak deney tasarımındaki üç seviye ısıl işlem sıcaklığını temsil edecek şekilde ortalama sıcaklık değeri olan 1050 °C ve alaşım olarak ilgili sektörlerde en çok tercih edilen Mn1 alaşımı seçilerek bu deney şartlarını sağlayan numuneye ait gerilme-uzama eğrisi Şekil 4.2'de sunulmuş olup 12,2 mm çapa sahip numune ile gerçekleştirilen deneyde uygulanan maksimum yük 82,67 kN olarak ölçülmüş ve malzemenin akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri sırasıyla 427,43 MPa; 707,18 MPa ve %26,92 olarak bulunmuştur. Gerilme-uzama eğrisinin altında kalan alan, ilgili malzemeye ait birim hacimdeki numunenin kırılması için gerekli olan enerji, diğer bir deyişle malzemenin tokluk değeri ile ilgili bilgileri vermektedir. Bu nedenle yüksek darbe dayanımı elde edilebilmesi için malzemenin akma ve çekme dayanım değerlerinin yanı sıra birim uzama değerinin de yüksek olması gerekmektedir. Buna göre malzemenin hem yüksek dayanımlı hem de sünek yapıda olması gerektiği

anlaşmaktadır. Bunun yanı sıra Resim 4.1’de görülen çekme numunelerinin kırılma şekilleri incelendiğinde sünek malzeme davranışını destekler nitelikte olduğu ve kırılma hasarının oldukça yüksek miktarda plastik şekil değişimi sonrasında ortaya çıktığı görülmektedir. Bu sünek malzeme özelliği, YMÇ’in kırıcı ve öğütücü makine parçaları olarak agresif çalışma koşullarında ve büyük çevrimsel yükler karşısında emniyetle kullanılmasını sağlayan en önemli özelliğini teşkil etmektedir.



Şekil 4.2. Gerilme-uzama diyagramı (IS: 1050 °C; KE: %3,31)

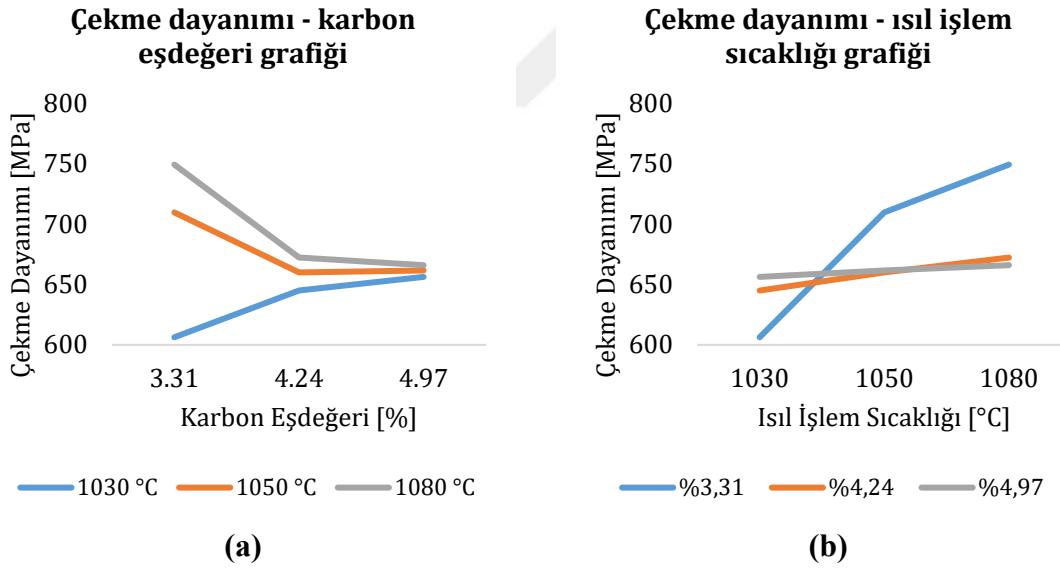
Resim 4.1’de çekme deneyi numunelerinin deney öncesi ve sonrasındaki görüntüleri verilmiş olup numunelerin kırılma şekilleri ve kopma gerçekleşinceye kadar gösterdikleri uzamalar görülmektedir.



Resim 4.1. Çekme deney numunelerinin kırılma şekilleri: (a) kılavuz çekilmiş çekme numuneleri, (b) çekme testi sonunda kopmuş numunelerin görünümü

Kırılma şekilleri ve kopma gerçekleşinceye kadar gösterdikleri uzamalar dikkate alındığında tüm numunelerin sünek malzeme davranışı gösterdiği söylenebilmektedir.

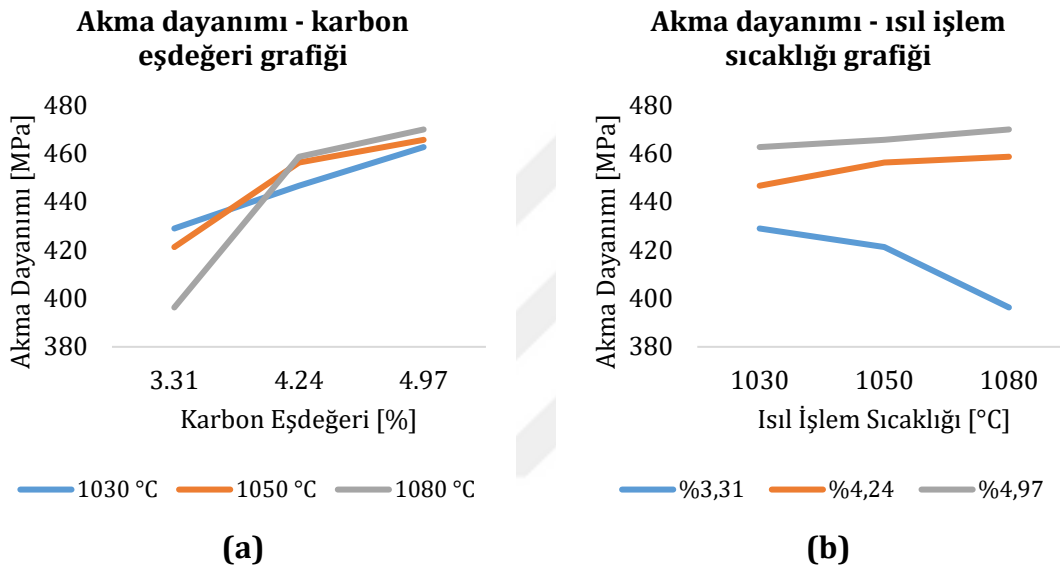
Aşağıda çekme deney sonuçları ile deney parametreleri arasındaki ilişkiler detaylı bir şekilde incelenmiş, grafiksel gösterim ile açıklanmıştır.



Şekil 4.3. (a) Çekme dayanımı - karbon eşdeğeri, (b) Çekme dayanımı - ısıtım sıcaklığı grafikleri

Şekil 4.3.(a) üç farklı seviye ısıtım sıcaklığı için karbon eşdeğerine bağlı olarak çekme dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. 1030 °C ısıtım sıcaklığında, karbon eşdeğerinin artmasıyla çekme dayanımı artarken, 1050 °C ve 1080 °C ısıtım sıcaklığında çekme dayanımlarının düştüğü görülmüştür. Kimyasal bileşim içerisinde yer alan mangan miktarının çekme dayanımını önce artırdığı sonrasında mangan miktarındaki artışın devam

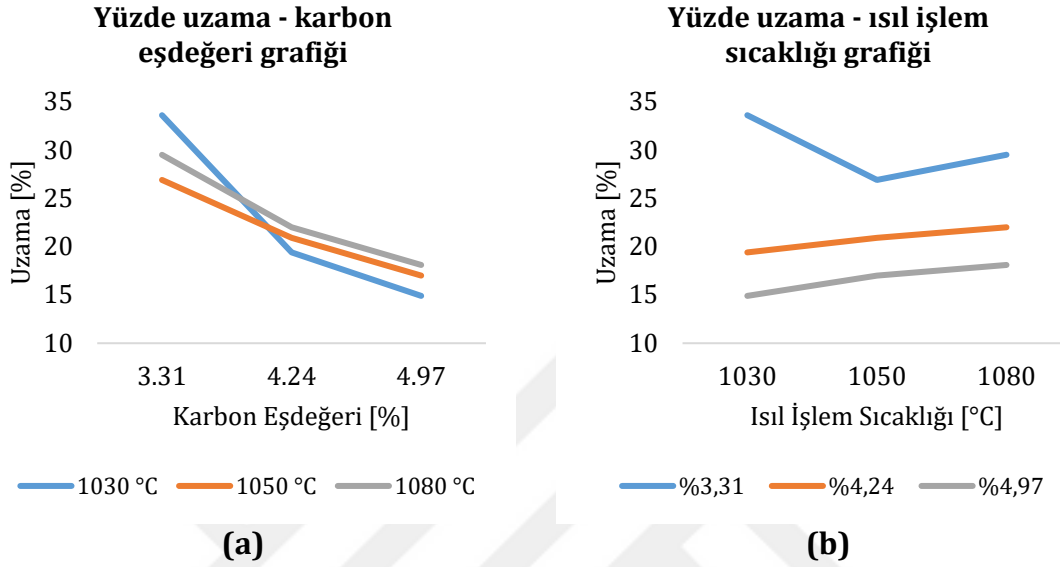
etmesiyle birlikte çekme dayanımının düştüğü literatür bilgileriyle de örtüşmektedir (Anonim, 1992). 1030 °C ısıtım sıcaklığı için karbon eşdeğerinin artışına bağlı olarak çekme dayanımında da bir artışın meydana gelmesinin ısıtım sıcaklığının sünek ve tok bir yapı olan östenit fazının oluşum morfolojisini olumlu yönde etkilemesinden ve/veya deney şartlarından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Şekil 4.3.(b) üç farklı seviye karbon eşdeğeri için ısıtım sıcaklığına bağlı olarak çekme dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. ısıtım sıcaklığının artmasıyla çekme dayanımlarının arttığı ve çekme dayanımı ile ısıtım sıcaklığı arasında belirgin bir korelasyon olduğu görülmektedir.



Şekil 4.4. (a) Akma dayanımı - karbon eşdeğeri, (b) Akma dayanımı - ısıtım sıcaklığı grafikleri

Şekil 4.4.(a), üç farklı seviye ısıtım sıcaklığı için karbon eşdeğerine bağlı olarak akma dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. Artan karbon eşdeğeri ile akma dayanımında da artış gözlenmiştir. Kimyasal bileşim içerisinde yer alan mangan miktarındaki artışın akma dayanımını artırdığına yönelik bulgular literatür bilgileriyle de örtüşmektedir (Anonim, 1992). Şekil 4.4.(b), üç farklı seviye karbon eşdeğeri için ısıtım sıcaklığına bağlı olarak akma dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. Karbon eşdeğeri %3,31 için ısıtım sıcaklığının artışı ile akma dayanımı düşerken, karbon eşdeğerinin %4,24 ve %4,97 değerleri için akma dayanımında bir yükseliş görülmektedir. Literatürden, artan karbon ve mangan miktarı ile çekme dayanımında belirgin bir değişim görülmeyle birlikte akma dayanımında çok sınırlı bir seviyede de olsa artış yönünde bir değişim olduğu bilinmektedir (Anonim, 1992). Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre %4,24 ve %4,97 karbon eşdeğeri için literatür ile uyumlu olarak akma dayanımında artış yönünde bir değişim gözlenirken karbon eşdeğeri %3,31 için akma dayanımında azalış yönünde küçük bir değişim gözlenmiştir. Bu durumun, ısıtım

işlem sıcaklığının artışı ile birlikte sünek ve tok bir faz olan östenitin kararlı hale gelerek malzemenin plastik deformasyon direncini bir miktar düşürmesine bağlı olduğu değerlendirilmiştir.



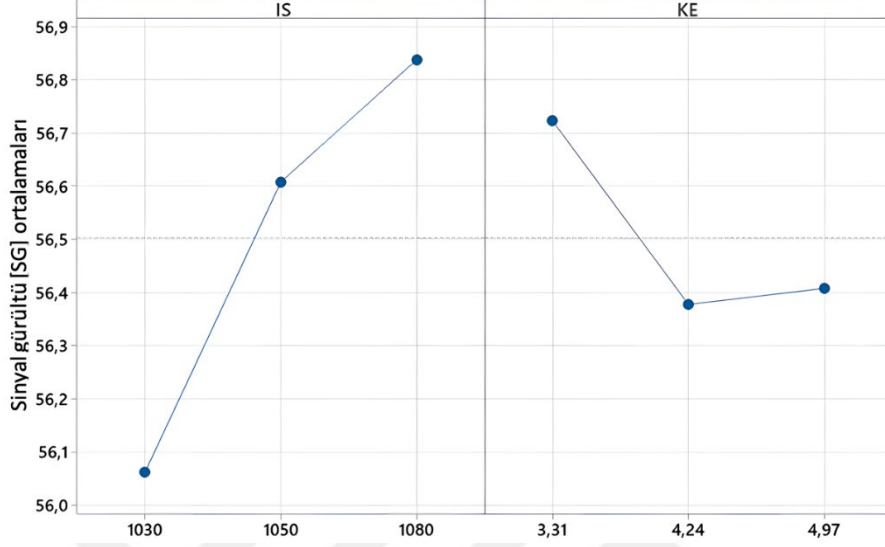
Şekil 4.5. (a) Yüzde uzama - karbon eşdeğeri, (b) Yüzde uzama - ısı işlem sıcaklığı grafikleri

Şekil 4.5.(a), üç farklı seviye ısı işlem sıcaklığı için karbon eşdeğerine bağlı olarak %uzama miktarlarındaki değişiklikleri göstermektedir. Artan karbon eşdeğeri ile %uzama değerlerinin azaldığı görülmektedir. Şekil 4.5.(b), üç farklı seviye karbon eşdeğeri için ısı işlem sıcaklığına bağlı olarak %uzama miktarındaki değişiklikleri göstermektedir. %3,31 karbon eşdeğeri için, %uzama miktarı önce %33,6'dan %26,9'a düşmüş ardından ise 1080 °C ısı işlem sıcaklığında %29,5'e yükselmiştir ve karbon eşdeğerinin %3,31 olduğu ısı işlem sıcaklıklarında en yüksek %uzama değerleri elde edilmiştir. Karbon eşdeğerinin %4,24 ve %4,97 olduğu durumlarda ise artan ısı işlem sıcaklığı ile birlikte %uzama miktarlarının arttığı görülebilmekle birlikte nispeten daha düşük %uzama değerleri elde edilmiştir. Bu sonuç, kimyasal bileşimde karbon eşdeğerinin artışı ile birlikte sünekliğin azaldığını ve buna bağlı olarak %uzama miktarlarının düştüğünü göstermektedir.

Taguchi sinyal gürültü (SG) oranları üç kategoride değerlendirilmektedir ve bunlar 'en düşük en iyi' olduğu durumda, 'en yüksek en iyi' olduğu durumda ve 'nominal' değer en iyi olduğu durumda şeklinde üç kıstasla tanımlanmaktadır.

Çekme deneyi için çekme mukavemeti değerinin en yüksek olduğu durum en iyi sonucu ifade ettiği için 'en yüksek en iyi' kıstasına göre SG oranlarını gösteren grafik Şekil 4.6'da verilmiş olup çekme deneyi işlem parametrelerinin optimal seviyesi, en yüksek SG oranlarına sahip

seviyeler olan 1080 °C östenitleme sıcaklığı, %3,31 karbon eşdeğeri olarak Şekil 4.6'da görülmektedir.



Şekil 4.6. Çekme deney parametre değerlerinin SG oranı ortalama değerleri

İki bağımsız değişkenin (IS, KE) çekme mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek ve çekme deneyi modeli geliştirmek için gerçekleştirilen çok değişkenli regresyon analizi ile Eş. 4.2'de verilen çekme (Ç) denklemi elde edilmiştir.

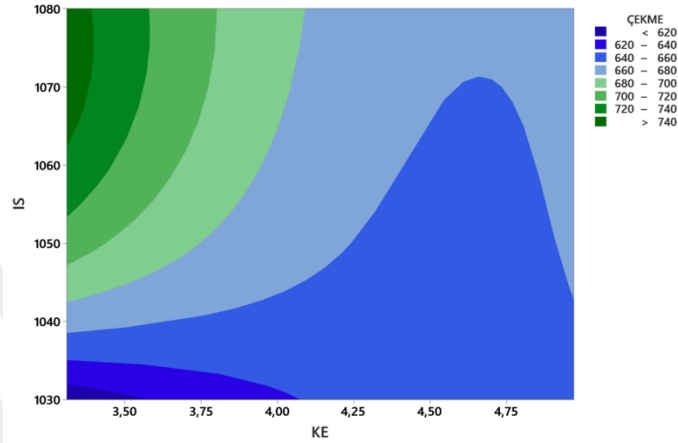
$$\text{Ç} = -39392 + (163900 * \text{KE} + 6840 * \text{IS} - 2,87 * \text{IS} * \text{IS} - 157,2 * \text{KE} * \text{IS})10^{-2} \quad (4.2)$$

Regresyon analizi ile ayrıca, değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı ve eğer ilişki var ise bunun gücü hakkında bilgi edinilebilmekte olup çekme mukavemeti için regresyon analiz modelinin özeti, Tablo 4.6'da görülmektedir ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranlarını ifade etmektedir.

Tablo 4.6. Çekme deneyi için bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı

R ²	R ² (düzeltilmiş)
%86,59	%73,18

Tablo 4.6'da güvenilirlik (R^2) değeri %86,59 olarak bulunmuş olup bu değer regresyon model uyumunun iyi olduğunu göstermektedir. Düzeltmiş R^2 değeri ise %73,18 olup bu değer düşük etkiye sahip veya gereksiz bağımsız değişkenlerden arındırılmış uyum endeksi olarak kullanılmaktadır. Bu iki değer arasındaki farkın düşük olması gereksiz veya fazla bağımsız değişken kullanılmadığını göstermektedir.



Şekil 4.7. IS, KE parametrelerine bağlı olarak çekme deneyi kontur eğrileri

Elde edilen sonuçlar Şekil 4.7'de kontur eğrileri şeklinde verilmiştir. Grafik çekme mukavemeti üzerinde etkili parametrelere bağlı olarak darbe değerlerinin değişimini göstermektedir. Karbon eşdeğerinin artışına bağlı olarak çekme dayanımının genel olarak azaldığı, ısıl işlem sıcaklığının artışı ile arttığı görülmektedir.

Karbon eşdeğeri yapı içerisindeki C, Mn, Cr ve Mo elementlerinin artışına bağlı olarak artmaktadır. Bu elementlerden C, Cr ve Mo elementleri, karbür yapıcı olarak yapıda bulunmaktadır. Bu karbür yapıcıların oluşturduğu karbür bileşiklerinin ergime sıcaklığı çok yüksek olduğu için, östenitleme sıcaklığına bağlı olarak matris yapıda çözünmeden kalabilmektedirler. Bu durumun deney sonuçlarındada çekme dayanımını olumsuz yönde etkilediği görülmektedir. Bununla birlikte östenitleme sıcaklığının artışına bağlı olarak çekme dayanımının da arttığı görülmektedir.

Kontur eğrileri incelendiğinde çekme mukavemetini artıran en önemli parametrenin ısıl işlem sıcaklığı olduğu görülmektedir. Ayrıca bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek için değişken analizi (ANOVA) yapılmış ve Tablo 4.7'de gösterilmiştir. Bu tablodan, karbon eşdeğeri ve ısıl işlem sıcaklığı parametrelerinin katkı yüzdeleri sırasıyla %9,31 ve %39,20 olarak verilmiştir.

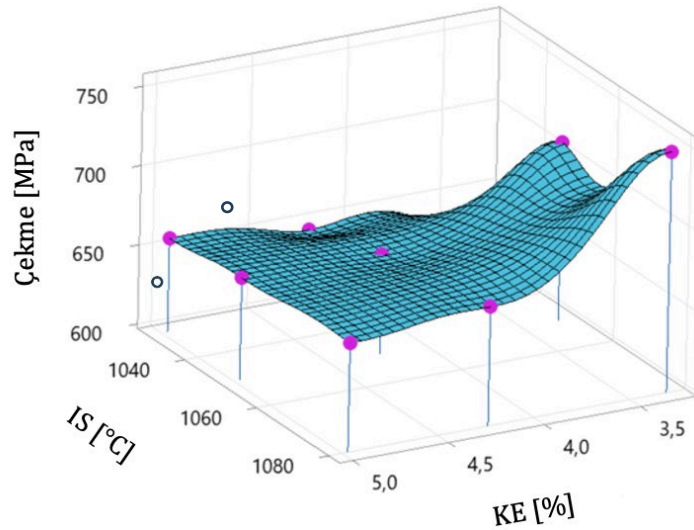
Çekme dayanımı üzerinde etkili olan parametrelerin etki düzeylerinin belirlenmesinde değişken analizi sonuçlarından elde edilen P değerleri dikkate alınmış ve değeri 0,05

mertebesinde olan ve daha düşük P değerlerine sahip parametreler için istatistiki olarak anlamlılığının daha yüksek olduğu kabul edilmiştir. Bu değerlendirme ayrıca, düşük P değerlerine sahip parametrelerin daha yüksek etki oranına sahip olduğu şeklinde de yorumlanmaktadır. P değerinin büyümesi ise ilgili parametreler için etki düzeyinin azaldığı anlamına gelmektedir (Başak ve Baday, 2016; Çetin vd., 2023). Katkı yüzdeleri göz önünde bulundurularak Tablo 4.7’de belirtilen parametreler regresyon modelinde kullanılmıştır.

Tablo 4.7. Çekme deneyi için değişken analizi sonuçları

Kaynak	Katkı [%]	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	86,59	6,46	0,049
KE	9,31	3,68	0,128
IS	39,20	13,54	0,021
IS*IS	4,53	1,35	0,309
KE*IS	33,54	10,01	0,034
Hata	13,41		
Toplam	100		

Deney sonuçlarına bağlı olarak oluşturulan üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir. Şekil 4.8’de verilen üç boyutlu yüzey grafiği ve kesişim noktaları incelendiğinde, ısıl işlem sıcaklığı ile çekme mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.8. Çekme mukavemetinin ısıl işlem sıcaklığı ve karbon eşdeğerine bağlı değişimi

Karbon eşdeğeri ile çekme mukavemeti arasındaki ilişkiye bakıldığında ise genel olarak karbon eşdeğerinin artması ile çekme mukavemeti değerinin azaldığı görülmektedir.

4.2. Darbe Deneyleri

Darbe testleri, TS EN ISO 148-1 standardına göre WPM Zwick marka darbe test cihazında yapılmıştır. Darbe testi numuneleri, standarda uygun şekilde 10x10x55 mm³ boyutlarında ve çentik açılarak hazırlanmıştır. Karbon eşdeğeri %3,31; %4,24 ; %4,97 olan ve 1030, 1050 ve 1080 °C östenitleme sıcaklıklarında ısıl işlem uygulanmış numunelerin darbe enerjileri tespit edilmiştir.

4.2.1. Darbe deneyi tasarımı

Darbe deneyi için giriş parametreleri ısıl işlem sıcaklığı (IS) ve karbon eşdeğeri (KE) olup iki parametre için de üç farklı seviye kullanılmıştır (Tablo 4.8). Bu durumda gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı 3² (=9) olarak belirlenmiştir. Taguchi'nin L9 ortogonal dizilimini temel alan deney tasarımına göre deneyler yapılmış ve her bir şart için deneylerin üçer kez tekrarlanması ile 27 adet deney yapılmıştır. Tablo 4.8, deney parametrelerini ve değerlerini göstermektedir.

Tablo 4.8. Darbe deney parametreleri ve değerleri

IS [°C]	KE [%]
1030	3,31
1050	4,24
1080	4,97

Tablo 4.9, Taguchi yöntemiyle hazırlanmış darbe deney tasarımını göstermektedir.

Tablo 4.9. Darbe deney tasarımı

Deney No.	IS [°C]	KE [%]
D-L1	1030	3,31
D-L2	1030	4,24
D-L3	1030	4,97
D-L4	1050	3,31
D-L5	1050	4,24
D-L6	1050	4,97
D-L7	1080	3,31
D-L8	1080	4,24
D-L9	1080	4,97

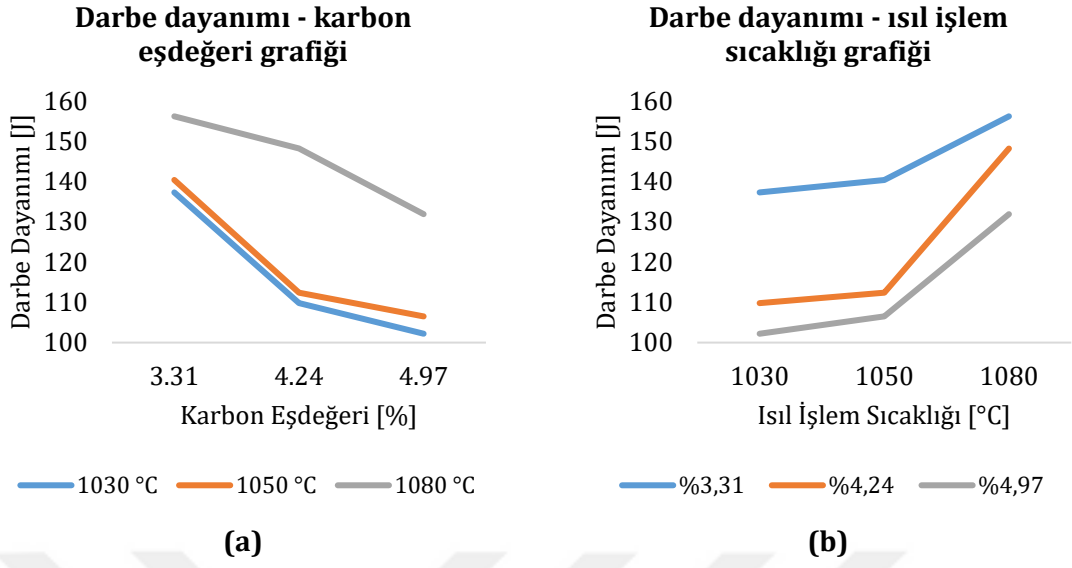
4.2.2. Darbe deneyi bulguları

Tablo 4.10'da Taguchi deney tasarımına göre yapılan darbe deneylerinde darbe numunelerinin ısıtım sıcaklıkları, karbon eşdeğerleri ve deney sonuçları ile bu sonuçların ortalama değerleri verilmiştir.

Tablo 4.10. Darbe deneyi sonuçları

Deney No.	IS [°C]	KE [%]	Darbe Enerjisi [J]	Ortalama Değer [J]
D-L1	1030	3,31	138,3	137,3
			136,3	
			137,2	
D-L2	1030	4,24	109,6	109,8
			111,8	
			108,0	
D-L3	1030	4,97	102,4	102,2
			103,0	
			101,2	
D-L4	1050	3,31	139,0	140,4
			142,1	
			140,2	
D-L5	1050	4,24	110,1	112,4
			111,3	
			115,7	
D-L6	1050	4,97	107,8	106,5
			106,9	
			104,7	
D-L7	1080	3,31	156,0	156,2
			157,4	
			155,4	
D-L8	1080	4,24	155,0	148,2
			143,2	
			146,5	
D-L9	1080	4,97	135,0	131,9
			132,7	
			128,0	

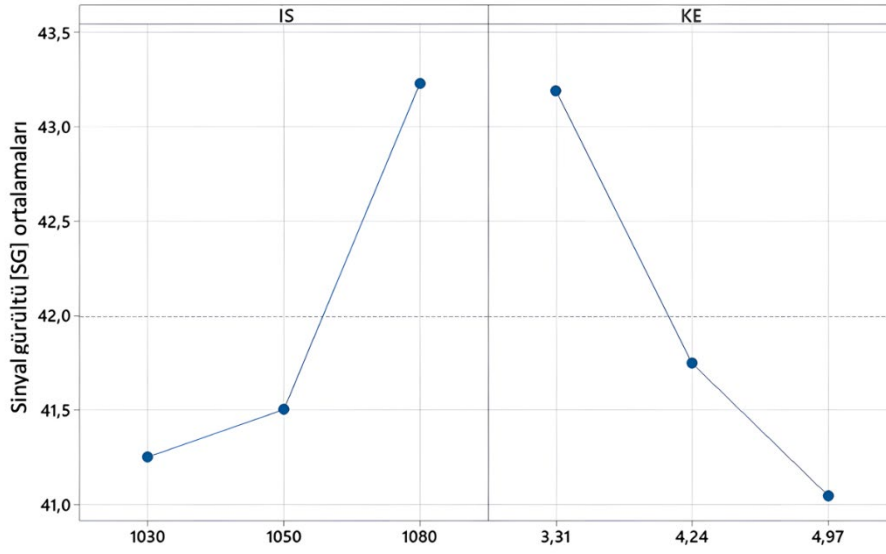
Şekil 4.9, deneysel çalışmalardan elde edilen darbe dayanımı değerlerinin, karbon eşdeğeri ve ısıtım sıcaklığına bağlı olarak değişimlerini göstermektedir.



Şekil 4.9. (a) Darbe dayanımı - karbon eşdeğeri, (b) Darbe dayanımı - ısıtım sıcaklığı grafikleri

Şekil 4.9.(a), üç farklı seviye ısıtım sıcaklığı için karbon eşdeğerine bağlı olarak darbe dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. Her bir ısıtım sıcaklığında artan karbon eşdeğeri ile birlikte darbe dayanımında azalma görülmüştür. Artan karbon eşdeğeri, aynı zamanda kimyasal bileşimde artan mangan miktarıyla birlikte artan krom ve molibden gibi karbür yapıcı elementlerin de artışı anlamına gelmektedir. Yüksek erime sıcaklığına sahip karbür yapıcı elementlerin östenit faz içerisinde yeterince çözünmemesi ile birlikte tane sınırlarında biriktiği veya taneler arasında çözünmeden kaldığı bilinmekte olup bu durum da darbe dayanımındaki düşüşü açıklamaktadır. Şekil 4.9.(b), üç farklı seviye karbon eşdeğeri için ısıtım sıcaklığına bağlı olarak darbe dayanımındaki değişiklikleri göstermektedir. Grafik incelendiğinde, artan ısıtım sıcaklığı ile birlikte darbe dayanımında üstel bir artışın olduğu görülmektedir. Bu durum, ısıtım sıcaklığının artışının çözünürlüğü artırdığını ve bunun da darbe dayanımını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.

Darbe deneyinin 'en büyük değer en iyi' durumu için sinyal gürültü (SG) oranları gösteren grafik ve proses parametrelerinin optimal seviyesi, en yüksek SG oranına sahip seviye olarak Şekil 4.10'da görülmekte olup darbe deneyi işlem parametrelerinin optimal seviyesi, en yüksek SG oranlarına sahip seviyeler olan 1080 °C östenitleme sıcaklığı, %3,31 karbon eşdeğeri olarak Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Darbe deney parametre değerlerinin SG oranı ortalama değerleri

İki bağımsız değişkenin (IS, KE) darbe mukavemeti üzerindeki etkisini belirlemek ve darbe modeli geliştirmek için gerçekleştirilen çok değişkenli regresyon analizi ile Eş. 4.3'te verilen darbe (D) denklemi elde edilmiştir.

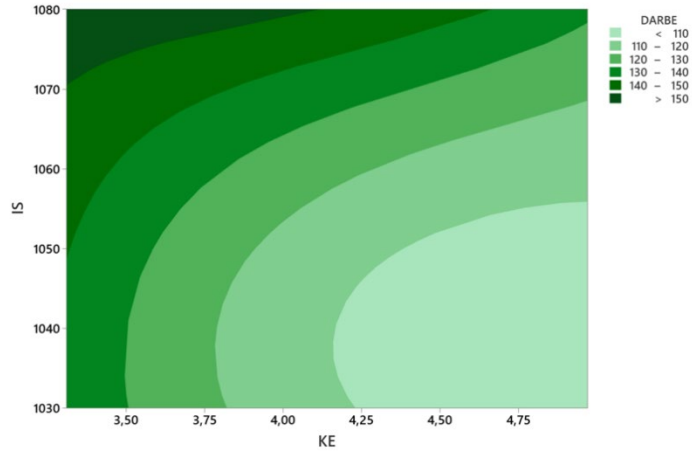
$$D = 22128 - (4210 * IS + 1703 * KE - 2,017 * IS * IS) * 10^{-2} \quad (4.3)$$

Regresyon analizi ile ayrıca, değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı ve eğer ilişki var ise bunun gücü hakkında bilgi edinilebilmekte olup darbe mukavemeti için regresyon analiz modelinin özeti, Tablo 4.11'de görülmektedir ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranlarını ifade etmektedir.

Tablo 4.11. Darbe deneyi için bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı

R²	R² (düzeltilmiş)
%97,60	%94,01

Tablo 4.11'de güvenilirlik (R²) değeri %97,60 olarak bulunmuş olup bu değer regresyon model uyumunun iyi olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R² değeri ise %94,01 olup bu değer düşük etkiye sahip veya gereksiz bağımsız değişkenlerden arındırılmış uyum endeksi olarak kullanılmaktadır. Bu iki değer arasındaki farkın düşük olması gereksiz veya fazla bağımsız değişken kullanılmadığını göstermektedir.



Şekil 4.11. IS, KE parametrelerine bağlı olarak darbe deneyi kontur eğrileri

Elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de kontur eğrileri şeklinde verilmiştir. Grafik darbe mukavemeti üzerinde etkili parametrelere bağlı olarak darbe değerlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 4.11, darbe dayanımının östenitleme sıcaklığının artmasına bağlı olarak artarken karbon eşdeğerindeki artışa bağlı olarak ise azaldığını göstermektedir.

Metalürjik açıdan incelendiğinde, yüksek östenitleme sıcaklığının tane sınırlarında ve taneler arasındaki çözünmeden kalan karbür yapılarını azalttığı ve östenit yapı içerisindeki karbür çözünürlüğünü artırdığı söylenebilir. Çözünmeden kalan karbür bileşiklerinin yapıda bir kirlilik gibi davrandığı ve dayanımı olumsuz yönde etkilediği yorumu yapılabilmektedir.

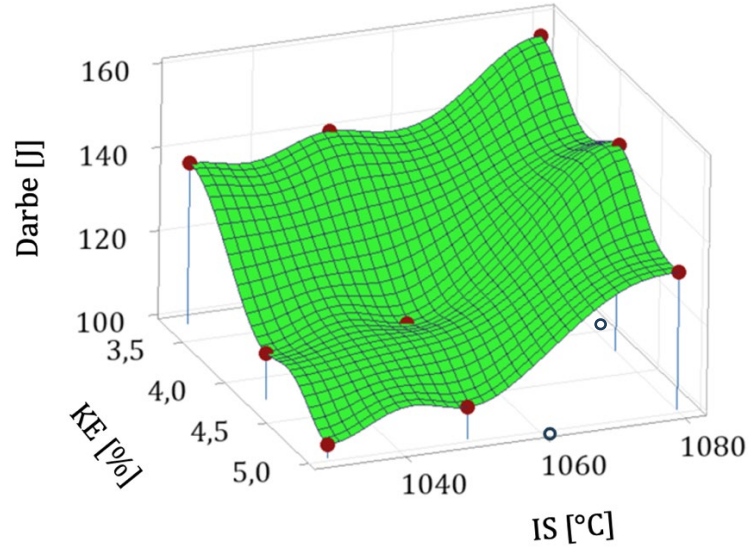
Kontur eğrileri incelendiğinde darbe mukavemetini artıran en önemli parametrenin karbon eşdeğeri olduğu görülmektedir. Ayrıca bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek için değişken analizi (ANOVA) yapılmış ve Tablo 4.12'de gösterilmiştir. Bu tablodan, karbon eşdeğeri ve ısı işlem sıcaklığı parametrelerinin katkı yüzdelerinin sırasıyla %56,01 ve %33,55 olduğu görülmektedir.

Darbe dayanımı üzerinde etkili olan parametrelerin etki düzeylerinin belirlenmesinde değişken analizi sonuçlarından elde edilen P değerleri dikkate alınmış ve değeri 0,05 mertebesinde olan ve daha düşük P değerlerine sahip parametreler için istatistiki olarak anlamlılığının daha yüksek olduğu kabul edilmiştir. Katkı yüzdeleri göz önünde bulundurularak Tablo 4.12'de belirtilen parametreler regresyon modelinde kullanılmıştır.

Tablo 4.12. Darbe deneyi için değişken analizi sonuçları

Kaynak	Katkı [%]	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	97,60	27,14	0,036
IS	33,55	22,48	0,042
KE	56,01	33,35	0,029
IS*IS	8,04	6,71	0,122
Hata	2,40		
Toplam	100		

Deney sonuçlarına bağlı olarak oluşturulan üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4.12’de verilmiştir. Grafik ve kesişim noktaları incelendiğinde, ısıl işlem sıcaklığı ile darbe mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki kurulabildiği açıkça görülebilmektedir, karbon eşdeğeri ile darbe mukavemeti arasında ise ters orantı olduğu söylenebilmektedir.



Şekil 4.12. Darbe mukavemetinin karbon eşdeğeri ve ısıl işlem sıcaklığına bağlı değişimi

4.3. Aşınma Deneyleri

Aşınma deneyleri ASTM G99-05(2010) standartlarına göre disk üzeri aşındırma tipi deney düzeneğinde 6 mm çapında ve 35 mm uzunluğundaki silindirik numuneler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu deneysel çalışma ile numunelerin abrasiv aşınma davranışları incelenmiştir.

4.3.1. Aşınma deneyi tasarımı

Aşınma deneyi için giriş parametreleri ısı işlem sıcaklığı (IS), karbon eşdeğeri (KE), aşındırma yükü (AY) ve aşındırma hızı (AH) olup her bir parametre için üç farklı seviye kullanılmıştır (Tablo 4.13). Bu durumda gerçekleştirilmesi gereken toplam deney sayısı $3^4 (=81)$ olurken, Taguchi'nin L9 ortogonal dizilimini temel alan deney tasarımına göre 9 adet deney tasarlanmış ve her bir deney şartının üçer kez tekrarlanması ile 27 adet deney yapılmıştır. Alınan yol 500 metre olarak sabit tutulmuştur.

Tablo 4.13, ısı işlem sıcaklığı, karbon eşdeğeri, aşındırma yükü ve aşındırma hızı olan deney parametreleri ve bunlara ait değerleri göstermektedir.

Tablo 4.13. Aşınma deney parametre ve değerleri

IS [°C]	KE [%]	AY [N]	AH [d/d]	Yol [m]
1030	3,31	10	90	500
1050	4,24	20	180	500
1080	4,97	30	270	500

Tablo 4.14 ise Taguchi yöntemiyle hazırlanmış deney tasarımını göstermektedir. Deney tasarımı ısı işlem sıcaklığı (IS), karbon eşdeğeri (KE), aşındırma yükü (AY) ve aşındırma hızı (AH) olmak üzere dört parametreden oluşmaktadır. Her bir parametre için üç seviye belirlenmiştir. Bu seviyeler, ısı işlem sıcaklığı olarak 1030, 1050 ve 1080 °C; karbon eşdeğeri olarak 3,31; 4,24 ve 4,97; aşındırma yükü olarak 10, 20 ve 30 N ve aşındırma hızı olarak ise 90, 180 ve 270 d/d olarak belirlenmiş ve bu seviyelere göre deney tasarımı Tablo 4.14'teki gibi oluşturulmuştur.

Tablo 4.14. Aşınma deney tasarımı

Deney No.	IS [°C]	KE [%]	AY [N]	AH [d/d]
A-L1	1030	3,31	10	90
A-L2	1030	4,24	20	180
A-L3	1030	4,97	30	270
A-L4	1050	3,31	20	270
A-L5	1050	4,24	30	90
A-L6	1050	4,97	10	180
A-L7	1080	3,31	30	180
A-L8	1080	4,24	10	270
A-L9	1080	4,97	20	90

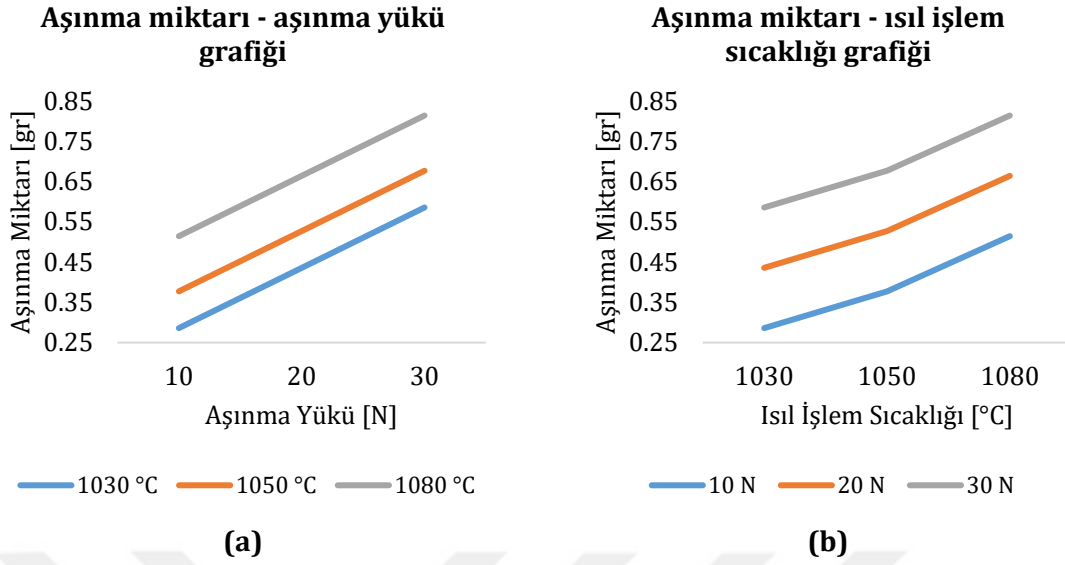
4.3.2. Aşınma deneyi bulguları

Dört bağımsız değişkenin aşınma miktarı üzerindeki etkilerinin incelendiği aşınma deney sonuçları Tablo 4.15'te verilmiştir. Aşınma deneyleri Taguchi deney tasarımına göre yapılmıştır. Her bir deney için üçer tekrarlı olmak üzere ilk tartım ve son tartım sonuçlarının da verildiği toplamda 27 adet deney sonucunu ve bunların ortalamasını gösteren Tablo 4.15 elde edilmiştir.

Tablo 4.15. Aşınma deneyi sonuçları

Deney No.	IS [°C]	KE [%]	AY [N]	AH [d/d]	İlk Tartım [gr]	Son Tartım [gr]	Fark [gr]	Ortalama [gr]
A-L1	1030	3,31	10	90	7,6784	7,3827	0,2957	0,2851
					7,3827	7,1364	0,2463	
					7,1364	6,8230	0,3134	
A-L2	1030	4,24	20	180	7,1064	6,6588	0,4476	0,4724
					6,6588	6,1388	0,5200	
					6,1375	5,6877	0,4498	
A-L3	1030	4,97	30	270	7,3285	6,8279	0,5006	0,5459
					6,8286	6,2838	0,5448	
					6,0136	5,4213	0,5923	
A-L4	1050	3,31	20	270	5,8840	5,2521	0,6319	0,6319
					5,2521	4,6970	0,5551	
					4,6220	4,9132	0,7088	
A-L5	1050	4,24	30	90	5,9032	5,2312	0,6720	0,6642
					4,4461	4,8145	0,6316	
					3,8105	4,1215	0,6890	
A-L6	1050	4,97	10	180	4,7063	4,3708	0,3355	0,3426
					4,3708	4,0218	0,3490	
					4,0218	4,6784	0,3434	
A-L7	1080	3,31	30	180	2,6164	1,7725	0,8439	0,8110
					1,7725	0,9562	0,8163	
					0,9562	0,1834	0,7728	
A-L8	1080	4,24	10	270	5,5400	5,2466	0,2934	0,3111
					5,1260	4,7917	0,3343	
					4,7917	4,4860	0,3057	
A-L9	1080	4,97	20	90	4,1524	2,5090	0,6434	0,6282
					2,1014	1,4839	0,6175	
					1,4839	0,8602	0,6237	

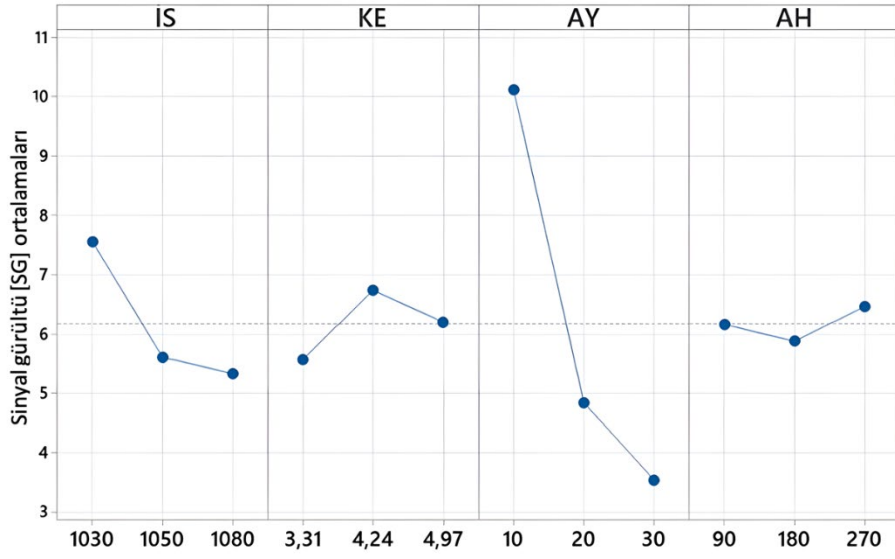
Şekil 4.13, deneysel çalışmalardan elde edilen aşınma miktarlarının, aşınma davranışı üzerindeki en etkin iki parametre olan aşındırma yükü ve ısı işlem sıcaklığına bağlı olarak değişimlerini göstermektedir.



Şekil 4.13. KE=%3,31 ve AH=90 d/d için (a) Aşınma miktarı - aşınma yükü, (b) Aşınma miktarı - ısıtım işlem sıcaklığı grafikleri

Şekil 4.13.(a), üç farklı seviye ısıtım işlem sıcaklığı için aşınma yüküne bağlı olarak aşınma miktarındaki değişiklikleri göstermektedir. Grafikten, aşınma yükünün artışının doğrudan aşınma miktarını artırdığı söylenebilmektedir ve aşınma yükü ile aşınma miktarı arasında pozitif yönde güçlü bir korelasyon olduğu görülmektedir. Şekil 4.13.(b), üç farklı seviye aşınma yükü için ısıtım işlem sıcaklığına bağlı olarak aşınma miktarındaki değişiklikleri göstermektedir. Artan ısıtım işlem sıcaklığı ile birlikte aşınma miktarında artış gözlenmektedir. Isıtım işlem sıcaklığı yükseldikçe, malzemenin darbe dayanımının artışı ile birlikte süneklik de artmaktadır ve bunun aşınma miktarını artırdığı anlaşılmaktadır.

Aşınma deneyi için aşınma miktarının en az olduğu durum en iyi sonucu ifade ettiği için 'en düşük en iyi' kıstasına göre SG oranlarını gösteren grafik Şekil 4.14'te verilmiş olup aşınma işlem parametrelerinin optimal seviyesi, en yüksek SG oranlarına sahip seviyeler olan 1030 °C östenitleme sıcaklığı, %4,24 karbon eşdeğeri, 10 N aşındırma yükü ve 270 d/d aşındırma hızı olarak Şekil 4.14'te görülmektedir.



Şekil 4.14. Aşınma deney parametre değerlerinin SG oranı ortalama değerleri

Dört bağımsız değişkenin (IS, KE, AY, AH) aşınma miktarı üzerindeki etkisini belirlemek ve aşınma modeli geliştirmek için gerçekleştirilen çok değişkenli regresyon analizi ile Eş. 4.4'te verilen aşınma (A) denklemi elde edilmiştir.

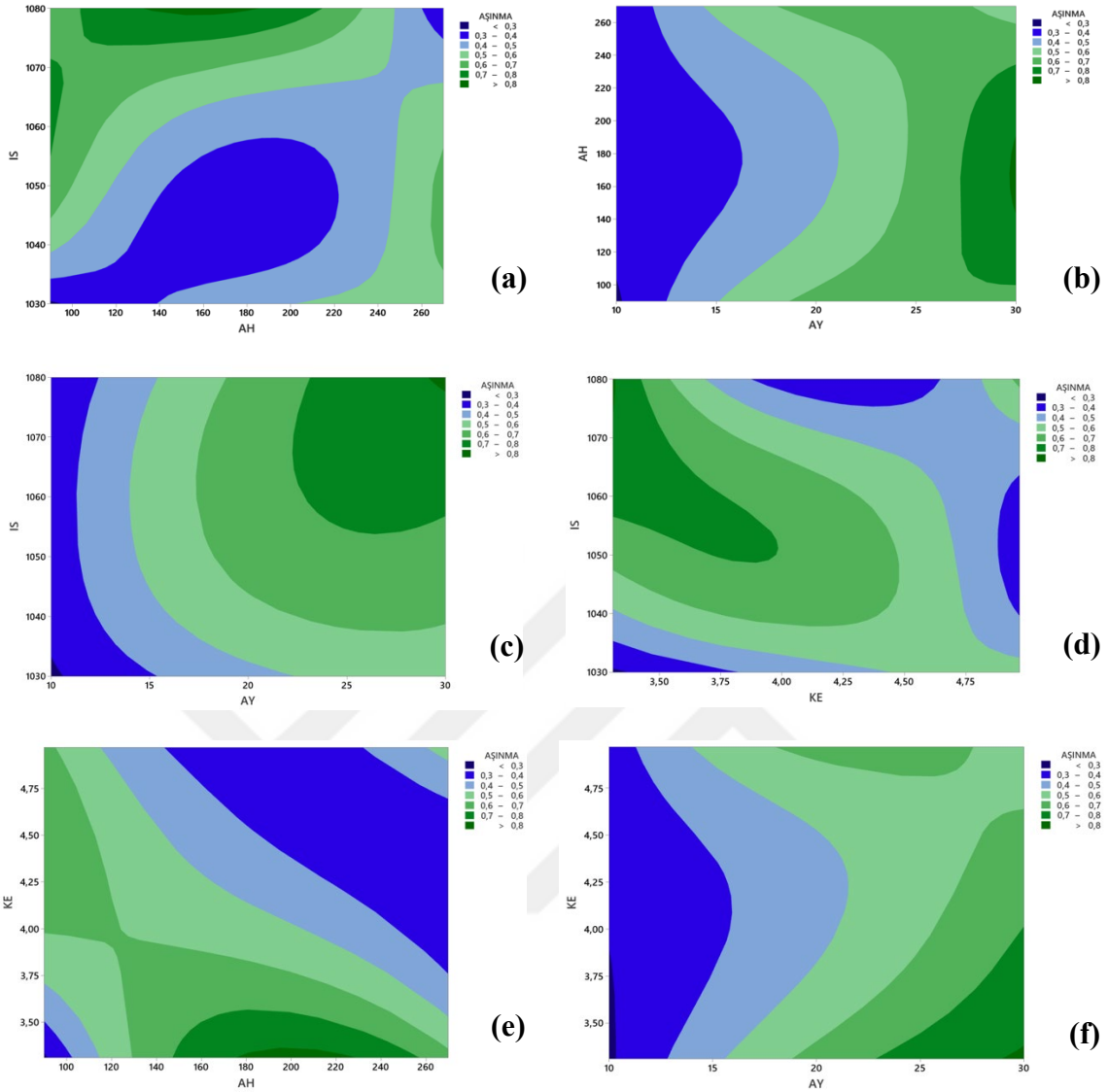
$$A = (-449,9 + 0,4568 * IS - 2,115 * KE + 1,4985 * AY) * 10^{-2} \quad (4.4)$$

Regresyon analizi ile ayrıca, değişkenler arasındaki ilişkinin varlığı ve eğer ilişki var ise bunun gücü hakkında bilgi edinilebilmekte olup aşınma miktarı için regresyon analiz modelinin özeti, Tablo 4.16'da görülmektedir ve bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranlarını ifade etmektedir.

Tablo 4.16. Aşınma deneyi için bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkeni açıklama oranı

R²	R² (düzeltilmiş)
%99,96	%99,90

Tablo 4.16'da güvenilirlik (R²) değeri %99,96 olarak bulunmuş olup bu değer regresyon model uyumunun iyi olduğunu göstermektedir. Düzeltilmiş R² değeri ise %99,90 olup bu değer düşük etkiye sahip veya gereksiz bağımsız değişkenlerden arındırılmış uyum endeksi olarak kullanılmaktadır. Bu iki değer arasındaki farkın düşük olması gereksiz veya fazla bağımsız değişken kullanılmadığını göstermektedir.



Şekil 4.15. IS, KE, AY ve AH parametrelerine bağlı olarak aşınma deneyi kontur eğrileri: aşınmanın (a) ısı işlem sıcaklığı ve aşındırma hızına, (b) aşındırma hızı ve aşındırma yüküne, (c) ısı işlem sıcaklığı ve aşındırma yüküne, (d) ısı işlem sıcaklığı ve karbon eşdeğerine, (e) karbon eşdeğeri ve aşındırma hızına, (f) karbon eşdeğeri ve aşındırma yüküne bağlı olarak değişimi

Elde edilen sonuçlar Şekil 4.15.(a)-(f)'de kontur eğrileri şeklinde verilmiştir. Grafikler aşınma üzerinde etkili parametrelere bağlı olarak aşınma değerlerinin değişimini göstermektedir. Bağımsız parametre 4 tane olduğundan ayrı ayrı grafikler şeklinde gösterim yapılmıştır. Şekil 4.15.(b), aşınmanın, aşındırma yükü ve aşındırma hızına bağlı olarak değişimini göstermekte olup bu eğride aşındırma hızına karşı aşındırma yükünün, aşınma miktarını artırmada etkin rolü olduğu görülmektedir. Şekil 4.15.(c) aşınmanın ısı işlem sıcaklığı ve aşındırma yüküne bağlı olarak değişimini, Şekil 4.15.(f) ise aşınmanın karbon eşdeğeri ve aşındırma yüküne bağlı olarak değişimini gösterirken, bu eğrilerden aşındırma yükünün karbon eşdeğeri ve ısı işlem sıcaklığı ile karşılaştırıldığında aşınma miktarını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Aşındırma yükünün artışına bağlı olarak, östenitleme sıcaklığının artmasıyla birlikte aşınma miktarındaki artış net bir şekilde görülmektedir.

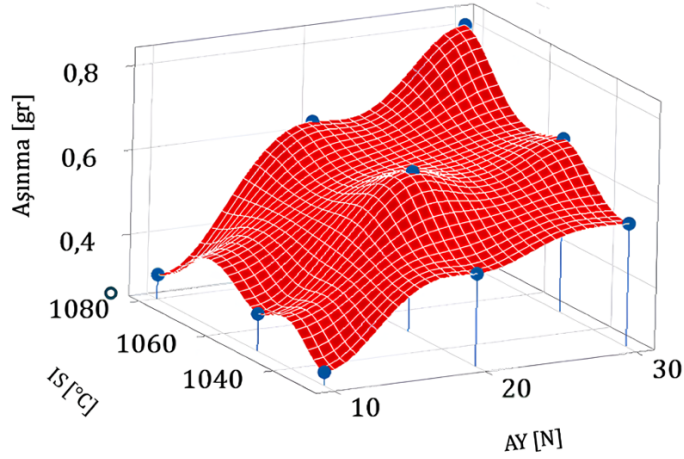
Kontur eğrileri incelendiğinde abrasiv aşınma miktarını artıran en önemli parametrelerin sırasıyla aşındırma yükü, ısı işlem sıcaklığı ve karbon eşdeğeri olduğu görülmektedir. Aşındırma hızının aşınma miktarına etkisinin ise belirlenen deney şartlarında oldukça küçük ve ihmal edilebilir olduğu görülmekte olup bu nedenle regresyon denkleminde bu parametreye yer verilmemiştir. Ayrıca bağımlı değişkenler ile bağımsız değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek için değişken analizi (ANOVA) yapılmış ve Tablo 4.17’de gösterilmiştir. Bu tablodan, %51,01 katkı yüzdesi ile aşındırma yükü ve %48,14 katkı yüzdesi ile ısı işlem sıcaklığı parametrelerinin en etkin parametreler olduğu anlaşılmakta olup karbon eşdeğerinin aşınma miktarı üzerindeki etkisinin son derece düşük (%0,81) olduğu görülmektedir. Aşındırma hızının etkisi ise ihmal edilmiş ve aşınma miktarının hesaplanmasında da kullanılmamıştır.

Aşınma dayanımı üzerinde etkili olan parametrelerin etki düzeylerinin belirlenmesinde değişken analizi sonuçlarından elde edilen P değerleri dikkate alınmış ve değeri 0,05 mertebesinde olan ve daha düşük P değerlerine sahip parametreler için istatistiki olarak anlamlılığının daha yüksek olduğu kabul edilmiştir. Katkı yüzdeleri göz önünde bulundurularak Tablo 4.17’de belirtilen parametreler regresyon modelinde kullanılmıştır.

Tablo 4.17. Aşınma deneyi için değişken analizi sonuçları

Kaynak	Katkı [%]	F-Değeri	P-Değeri
Regresyon	99,96	1695,1	0,001
IS	48,14	1262,55	0,001
KE	0,81	37,55	0,026
AY	51,01	2595,12	0,000
Hata	0,04		
Toplam	100		

ANOVA sonucunda belirlenen en etkin iki parametre olan aşındırma yükü ve ısı işlem sıcaklığı için, deney sonuçlarına bağlı olarak oluşturulan üç boyutlu yüzey grafiği Şekil 4.16’de verilmiştir.



Şekil 4.16. Aşınma miktarının aşındırma yükü ve ısıtma sıcaklığına bağlı değişimi

Şekil 4.16'de verilen üç boyutlu yüzey grafiği incelendiğinde, ısıtma sıcaklığının ve aşındırma yükünün artması ile aşınma miktarında arttığı görülmektedir. Aşınma miktarının, ısıtma sıcaklığı ve aşındırma yükü ile aralarında doğrusal bir ilişki olduğu görülmektedir. Karbon eşdeğerinin ise %0,81 katkı oranı ile çok küçük bir etkisinin olduğu anlaşılmakta olup aşındırma hızının ise son derece küçük ve ihmal edilebilir seviyede bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bununla birlikte farklı deney şartlarında aşındırma hızı parametresinin etkin parametreler arasında yer alabileceği değerlendirilmektedir. Deney parametrelerinden aşındırma yükü ve/veya aşındırma hızı için belirlenen seviye seçimleri artırıldığında aşındırma hızının da aşınma miktarına etkisinin belirgin şekilde artabileceği değerlendirilmektedir.

4.4. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Yapılan çekme, darbe ve aşınma testi sonuçları incelendiğinde tüm testlerde Mn1 kodlu alaşım diğer alaşımlara göre daha iyi netice vermiştir. 156,2 j darbe enerjisi ve 749,3 MPa çekme dayanımı ile en yüksek mekanik değerlerin elde edildiği ısıtma sıcaklığı 1080 °C olurken, aşınma testinde ise en iyi sonuç 10 N aşındırma yükünde ve 90 d/d aşındırma hızı şartlarında 0,2851gr ağırlık kaybıyla 1030 °C'de elde edilmiştir. En yüksek ağırlık kaybı ise 30 N aşındırma yükünde ve 180 d/d aşındırma hızı şartlarında 0,8110gr ağırlık kaybıyla 1080 °C'de elde edilmiştir ve bu sonucun 1080 °C'deki Mn1 numunesinin tokluk ve süneklik özellikleri bakımından diğer numunelerden pozitif anlamda ayrıştığını, çekme ve darbe testleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlara göre en iyi mekanik değerler 1080 °C ısıtma sıcaklığı şartlarında elde edilmiş olup mikroyapı incelemeleri, SEM ve EDS analizleri, sertlik ölçümleri Mn1, Mn2 ve Mn3 alaşımları için 1080 °C ısıtma sıcaklığı şartlarında gerçekleştirilmiş ve elde edilen mekanik değerlere göre karakterize edilmeye çalışılmıştır.

Tablo 4.18, tüm deneysel çalışmalardaki deney parametrelerinin çekme dayanımı, darbe dayanımı ve aşınma miktarı için hesaplanan regresyon denklemlerindeki etki yüzdelerini bir arada göstermektedir.

Tablo 4.18. Tüm deney parametrelerinin değişken analizi sonuçları

Deney	Parametrelerin Etki Değerleri [%]			
	IS	KE	AY	AH
Çekme	39,2	9,31	-	-
Darbe	33,55	56,01	-	-
Aşınma	48,14	0,81	51,01	-

Tablo 4.18 incelendiğinde, çekme dayanımı üzerinde ısı işlem sıcaklığının, darbe dayanımı üzerinde karbon eşdeğerini belirleyen kimyasal bileşimin, aşınma miktarı üzerinde ise aşındırma yükü ve ısı işlem sıcaklığının en etkin parametreler olduğu görülmektedir.

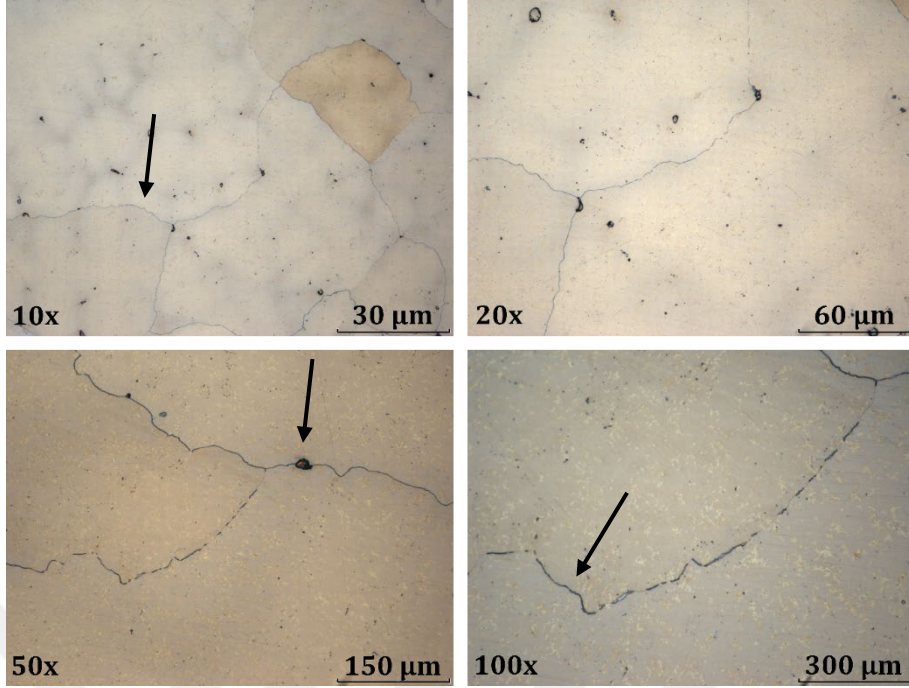
4.5. Mikroyapı İncelemeleri ve SEM-EDS Analizleri

Yapılan çekme, darbe ve aşınma testleri sonucunda Mn1 kodlu alaşımın 1080 °C ısı işlem sıcaklığı şartlarında en iyi deneysel sonuçları verdiği görülmüştür. Bu nedenle 1080 °C'de ısı işleme tabi tutulmuş olan Mn1, Mn2 ve Mn3 kodlu alaşımların mikroyapı incelemeleri, SEM-EDS analizleri yapılarak karakterize edilmiş ve mikro düzeyde bir karşılaştırma yapılarak tespit edilen en iyi ısı işlem sıcaklığında alaşımların mikroyapılarında meydana gelen değişiklikler ve birbiri aralarındaki karşılaştırmaları yapılmıştır. Optik mikroskop görüntüleriyle östenit taneleri, oksit bileşikleri, tane ve tane sınırlarında çökelen karbür varlıkları detaylı bir şekilde incelenirken, SEM-EDS analizleriyle genel yapı ve optik mikroskop görüntülerinden tespit edilemeyen noktasal oluşumlar tanımlanmaya çalışılmıştır.

4.5.1. 1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn1 kodlu numune

4.5.1.1. Mikroyapı İncelemesi

1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn1 kodlu alaşımın mikroyapı incelemeleri yapılmış ve Resim 4.2'de gösterilen mikroskop görüntüleri elde edilmiştir.

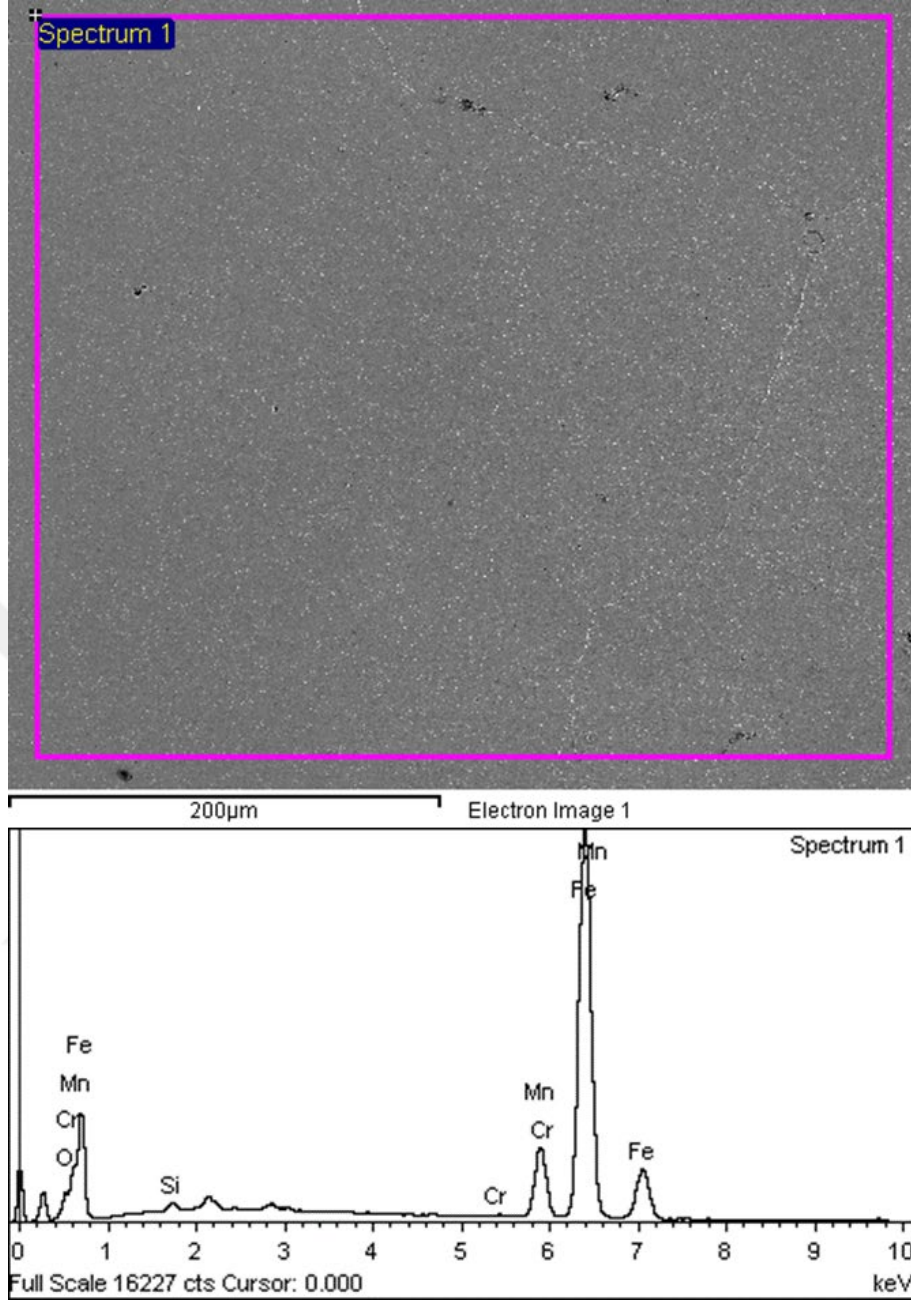


Resim 4.2. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn1 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri

Sırasıyla 10x, 20x, 50x ve 100x büyütmelerde mikroyapılar incelenmiştir. Genel olarak östenitik bir matriste östenit tane sınırları, oksit bileşikleri ve östenit tane sınırları boyunca uzanan çökelmiş karbür bileşiklerinin tane sınırlarını nispeten belirgin hale getirdiği görülmektedir.

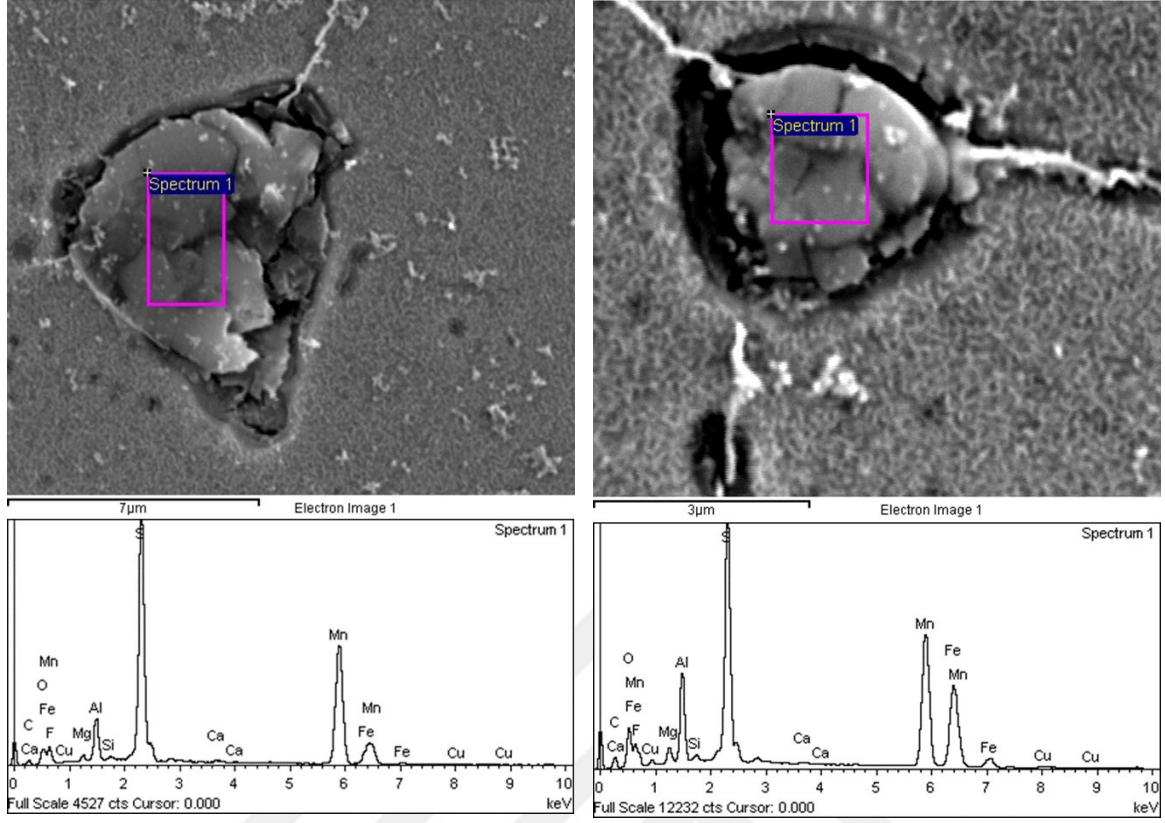
4.5.1.2. SEM-EDS Analizi

Matris yapıdan alınan SEM görüntüsü Şekil 4.17'de verilmiştir. Temel bileşimi belirlenen alaşımda kimyasal bileşimle uyumlu olarak Mn, Cr, Si, Cr ve Fe elementlerinin yanı sıra oksijen varlığı da tespit edilmiştir.



Şekil 4.17. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn1 kodlu numunenin matris bölgesinin SEM-EDS analizi ve görüntüsü

Matris bölgesinin yanı sıra optik mikroskopta belirlenemeyen yapılar üzerinden noktasal analizler gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.18’de bu fazlar detaylı bir şekilde ortaya konmuştur.



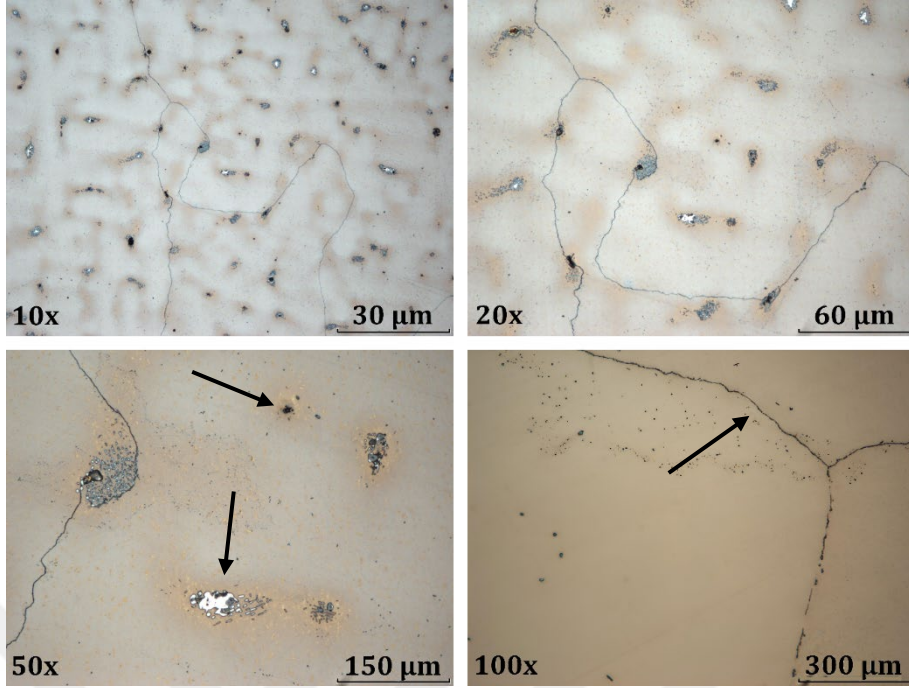
Şekil 4.18. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn1 kodlu numunenin noktasal SEM-EDS analiz ve görüntüleri

Matris üzerinden alınan noktasal fazlar SEM-EDS görüntü ve analizleri incelendiğinde, mangan elementinin kükürtle reaksiyona girme isteği ve bunun neticesinde MnS oluşumları ile diğer element katkılarıyla karmaşık oksit bileşikleri ve manganın karbon, krom ve demirle oluşturduğu karbür yapılarının bir arada bulunduğu söylenebilmektedir. Yine genel metalografik yapıdan, tane sınırları dışında östenit taneler içinde çözünmemiş karbür yapılarına rastlanmamıştır. Bu gözlemin, alaşımdan kaynaklandığını ve krom ve molibden gibi mikro alaşım katkılarının nispeten daha az miktarda olması ve östenitleme sıcaklığının bu elementlerin östenit içinde yeterince çözünebildiğini göstermektedir.

4.5.2. 1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn2 kodlu numune

4.5.2.1. Mikroyapı İncelemesi

1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn2 kodlu alaşımın mikroyapı incelemeleri yapılmış ve Resim 4.3'te verilen migrograflar elde edilmiştir.

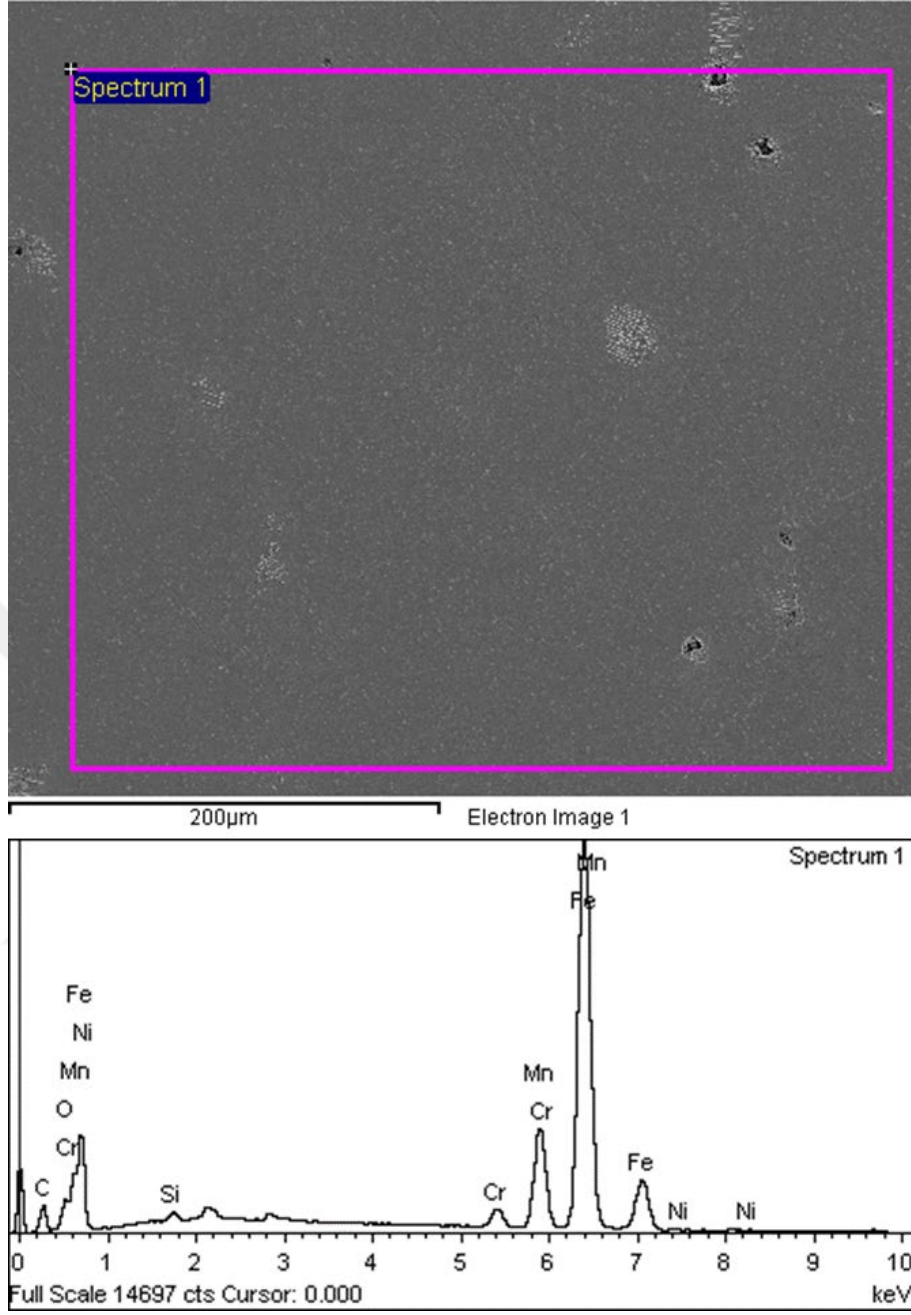


Resim 4.3. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn2 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri

Mikroyapı incelemeleri sırasıyla 10x, 20x, 50x ve 100x büyütmelerde yapılmıştır. Genel olarak östenitik matriste östenit tane sınırları, oksit bileşikleri ve östenit tane sınırları boyunca uzanan çökelmiş karbür bileşiklerinin oluşumu ve tane sınırlarını bir önceki numuneye göre biraz daha belirgin hale getirdiği görülmektedir. Ayrıca burada taneler arasında çökelmiş karbür yapıları da dikkat çekmektedir.

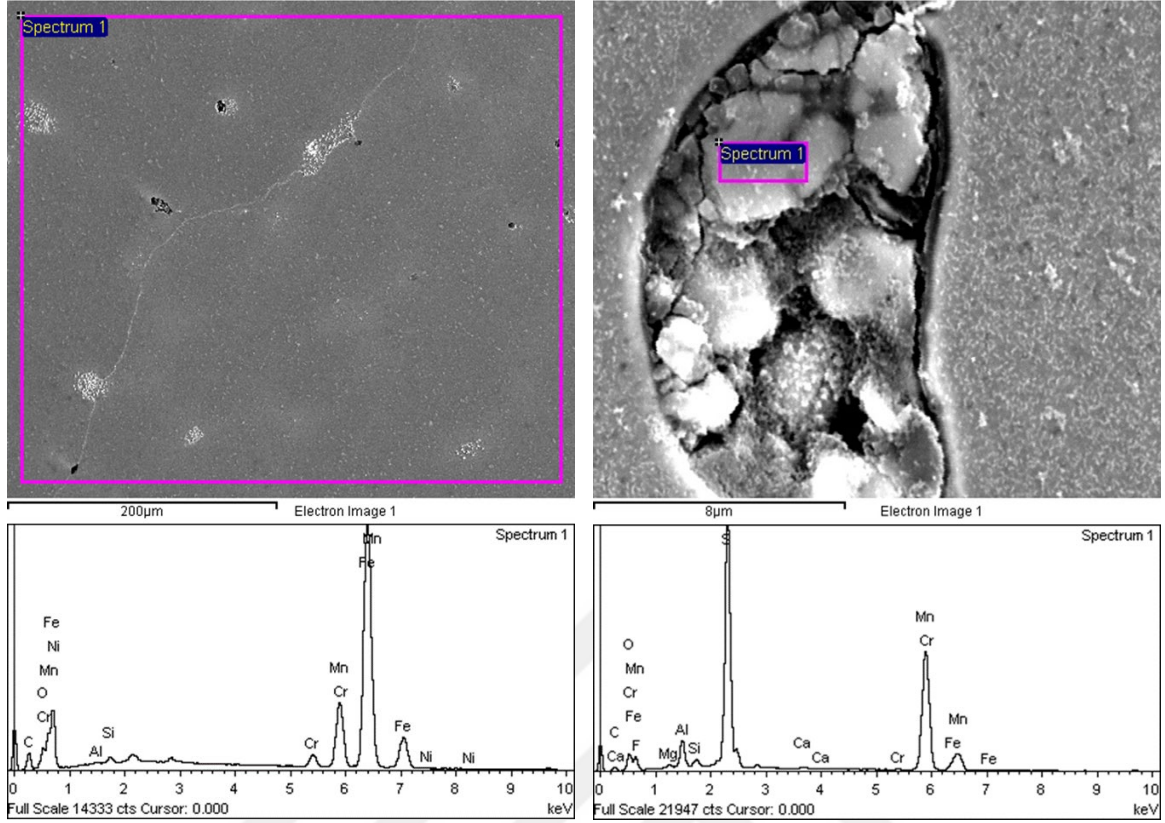
4.5.2.2. SEM-EDS Analizi

Matris yapıdan alınan SEM görüntüsü Şekil 4.19'da verilmiş ve temel bileşimi belirlenmiştir.



Şekil 4.19. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn2 kodlu numunenin matris bölgesinin SEM-EDS analizi ve görüntüsü

Matris bölgesinin yanı sıra optik mikroskopta belirlenemeyen yapılar üzerinden noktasal analizler gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.20’de detaylı bir şekilde incelenmiştir.



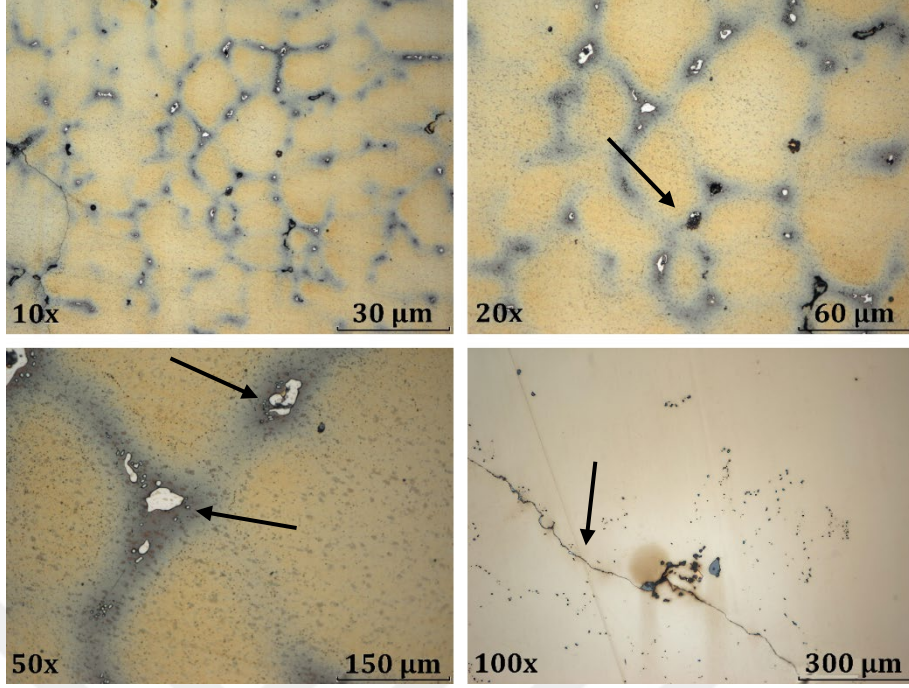
Şekil 4.20. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn2 kodlu numunenin noktasal SEM-EDS analiz ve görüntüleri

Matris üzerinden alınan noktasal fazlar SEM-EDS görüntü ve analizleri ile tanımlanmaya çalışılmıştır. Bu fazlar incelendiğinde, MnS oluşumları ile diğer element katkılarıyla beraber karmaşık oksit bileşiklerinin varlığı ve manganın karbon, krom ve demirle oluşturduğu karbür yapılarının bulunduğu söylenebilmektedir. Genel metalografik yapıdan, tane sınırları dışında östenit taneleri içinde de çözünmemiş karbür yapılarına rastlanmıştır. Bu gözlemin, alaşımdan kaynaklandığını ve krom ve molibden gibi mikro alaşım katkılarının nispeten artışına bağlı olarak oluştuğunu ve östenitleme sıcaklığının bu elementlerin östenit içinde çözünmesi için yeterli olmadığını göstermektedir.

4.5.3. 1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn3 kodlu numune

4.5.3.1. Mikroyapı İncelemesi

1080 °C östenitleme sıcaklığındaki Mn3 kodlu alaşımın mikroyapı incelemeleri yapılmış ve Resim 4.4'te verilen migrograflar elde edilmiştir.

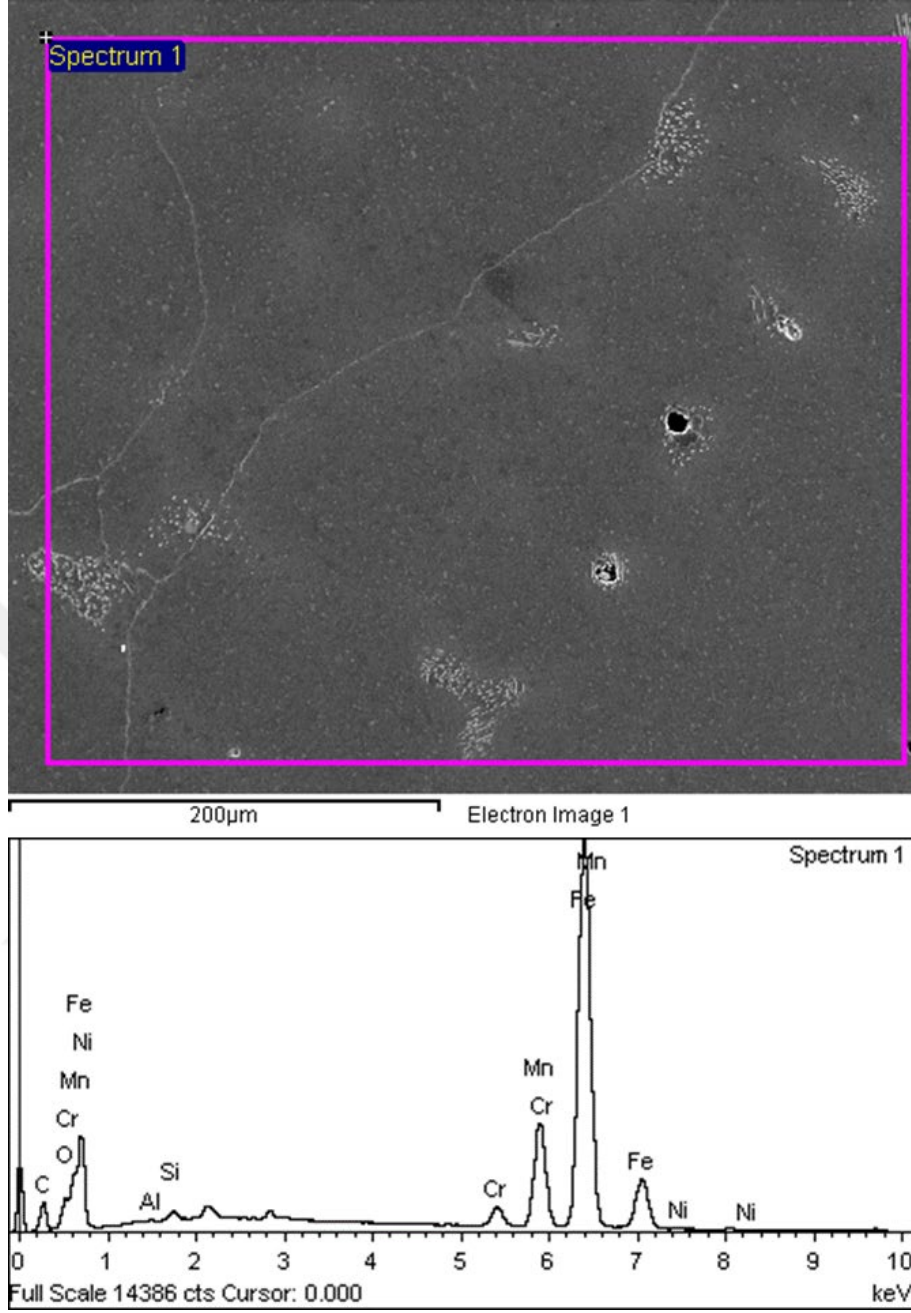


Resim 4.4. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn3 kodlu numunenin mikroyapı görüntüleri

Sırasıyla 10x, 20x, 50x ve 100x büyütmelerde detaylıca incelemeler yapılmıştır. Genel olarak östenitik matriste östenit tane sınırları, oksit bileşikleri ve östenit tane sınırları boyunca uzanan çökelmiş karbür bileşiklerinin oluşumu belirgin tane sınırlarıyla anlaşılmaktadır. Ayrıca burada taneler arasında çökelmiş karbür yapılarının bir önceki numuneye göre daha da arttığı dikkat çekmektedir.

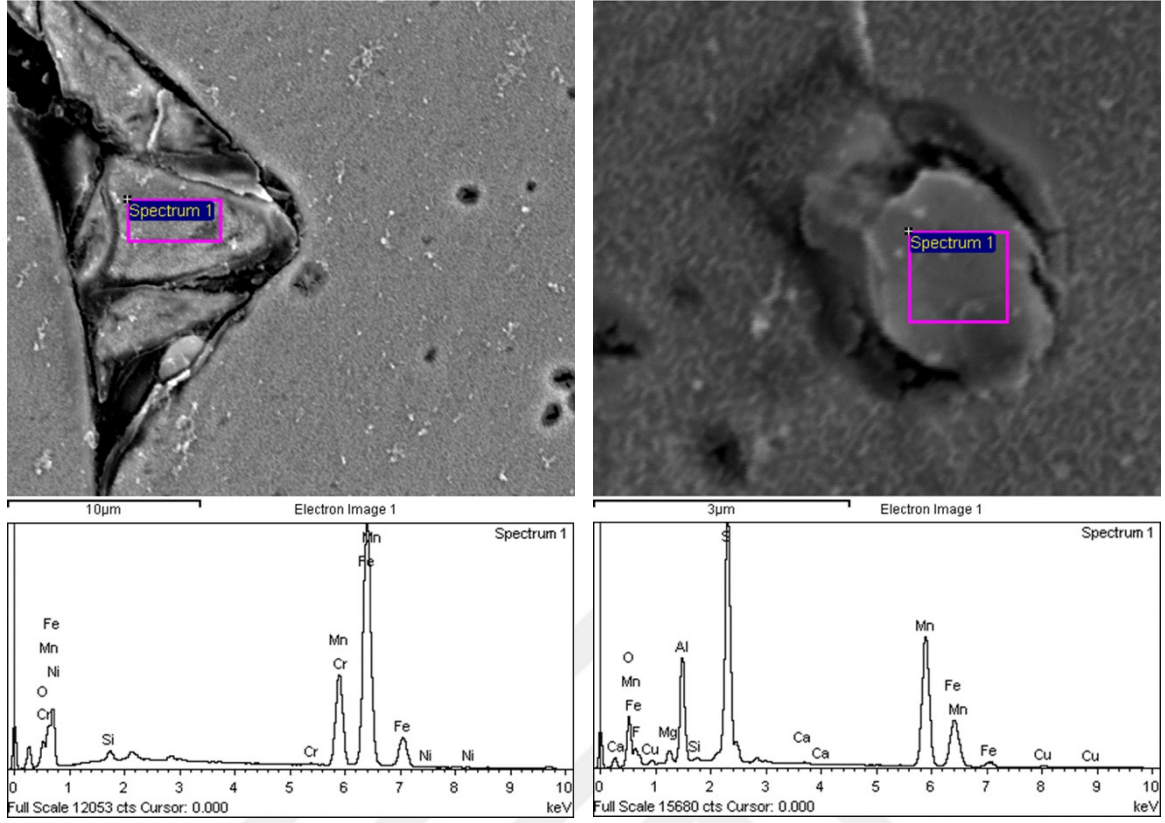
4.5.3.2. SEM-EDS Analizi

Matris yapıdan alınan SEM görüntüsü Şekil 4.21'de verilmiş ve temel bileşimi belirlenmiştir.



Şekil 4.21. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn3 kodlu numunenin matris bölgesinin SEM-EDS analizi ve görüntüsü

Matris bölgesinin yanı sıra optik mikroskopta belirlenemeyen yapılar üzerinden noktasal analizler gerçekleştirilmiş ve Şekil 4.22’de detaylı bir şekilde incelenmiştir.



Şekil 4.22. 1080 °C sıcaklıkta ısıl işleme tabi tutulmuş Mn3 kodlu numunenin noktasal SEM-EDS analiz ve görüntüleri

Mn3 alaşımında matris üzerinde bulunan noktasal fazlar SEM-EDS görüntü ve analizleri ile tanımlanmaya çalışılmış analiz ve sonuçları Şekil 4.22’de verilmiştir. Bu fazlar incelendiğinde, mangan elementinin kükürt ile reaksiyona girme isteği (afinitesi) ve hem MnS bileşiklerinin varlığını ve hem de karmaşık oksit bileşiklerinin varlığını göstermektedir. Genel metalografik yapıdan, tane sınırları dışında östenit taneleri içinde belirgin şekilde ve sayıda çözünmemiş karbür yapılarına rastlanmıştır. Bu gözlemin, alaşımdan kaynaklandığını ve krom ve molibden gibi mikro alaşım katkılarının kimyasal bileşimdeki oransal artışına bağlı olarak oluştuğunu ve 1080 °C’deki östenitleme sıcaklığı için bu elementlerin östenit yapı içinde çözünmeden kaldığını göstermektedir.

4.6. Sertlik Ölçüm Deneyleri

Her bir deney numunesi yüzeyinden beşer tekrarlı sertlik testleri yapılarak elde edilen ortalama sonuçlar Tablo 4.19’da gösterilmiştir. Sertlik ölçüm deneyi sonuçları mekanik değerler ve mikroyapı karakterizasyon çalışmalarıyla ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir.

Tablo 4.19. Sertlik ölçüm deneyi sonuçları

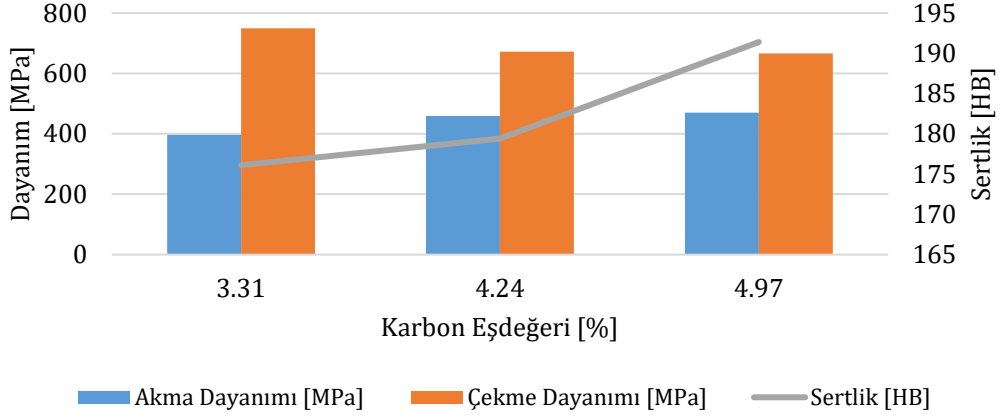
Numune Kodu	Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Sertlik Ölçüm Değerleri [HB]					Ortalama Sertlik Değerleri [HB]
		1	2	3	4	5	
Mn1	1080	178,5	176,4	173,3	178,0	174,5	176,1
Mn2		184,7	179,2	176,1	180,8	177,7	179,7
Mn3		196,3	191,2	187,4	192,8	189,7	191,4

Tablo 4.19'dan görüldüğü üzere Mn1 kodlu numunenin ortalama sertliği 176,1 HB ile en düşük değere sahip olup bu alaşımın karbon eşdeğeri ile birlikte alaşım elementi miktarı da diğer numunelerden daha düşüktür. Alaşım elementi miktarı arttıkça sertliğin de arttığının gözlemlendiği sertlik ölçüm sonuçlarına göre en yüksek ortalama sertlik değeri 191,4 HB ile Mn3 kodlu numuneden alınmıştır.

4.7. 1080 °C'de Isıl İşlemleri Yapılmış Numunelerin Sertlik ve Mekanik Değerlerinin Karşılaştırılması

1080 °C'de ısıl işlemleri yapılmış olan numunelerin akma, çekme ve darbe dayanımı değerlerini içeren mekanik test sonuçları sertlik değerleriyle birlikte Şekil 4.23 ve 4.24'te verilmiştir. Numunelerin sertlik değeriyle mekanik testlerin sonuçları karşılaştırıldığında, en yüksek çekme mukavemetine (749,4 MPa) sahip olan Mn1 numunesinin sertlik değeri 176,1 HB olarak ölçülmüştür. En düşük çekme mukavemetine (666 MPa) sahip olan Mn3 numunesinin sertlik değeri ise 191,4 HB olarak ölçülmüştür. Azalan çekme mukavemeti değerlerine karşılık sertlik değerlerinde bir artış görülmektedir. En yüksek sertlik değerine (191,4 HB) sahip olan Mn3 numunesi ile en düşük sertlik değerine (176,1 HB) sahip Mn1 numunesi arasındaki sertlik farkı 15,3 HB olup bu değer çalışma sertleşmesi ile kazanılan ortalama 550 HB sertlik değerinin yalnızca %2,8'i kadardır. Çekme mukavemetinin artışı ile birlikte genel olarak sertlik değerinde bir artış beklenmesine karşın ortaya çıkan azalışın deney şartlarından ve/veya YMÇ'in hassas sertleşme kabiliyetinden kaynaklanabileceği değerlendirilmektedir. Ayrıca, farklı kalitelerdeki YMÇ için kendi aralarında sertlik değerlerindeki farklılığın çok düşük olduğu literatürde belirtilmiş olup ısıl işlem sonrası sertlik değerlerine bakılarak işlenebilirlik özellikleri veya aşınma dayanımları üzerinde bir tahmin yapmanın doğru sonuçlar vermeyeceğine vurgu yapılmıştır (Anonim, 2023). Akma mukavemeti ile sertlik değerleri incelendiğinde ise, artan akma mukavemeti değerleriyle birlikte sertlik değerlerinde bir miktar artışın olduğu görülmektedir (Şekil 4.23).

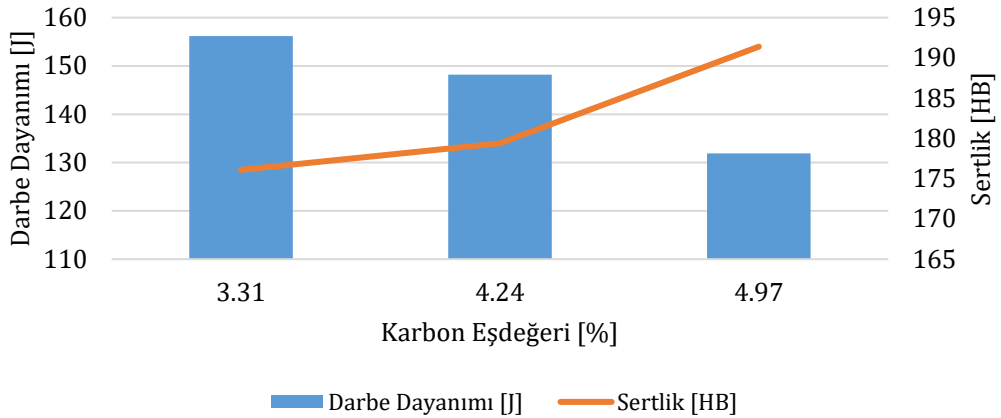
Farklı karbon eşdeğerine sahip numuneler için dayanım ve sertlik değerleri



Şekil 4.23. 1080 °C'de ısıtılmış numunelerin dayanım ve sertlik değerleri

Numunelerin sertlik değerleri ile darbe enerjileri karşılaştırıldığında aralarında çok düşük sertlik değeri farklılıkları olmakla birlikte düşük darbe enerjisine sahip olan numunenin yüksek sertlik değerine, yüksek darbe enerjisine sahip olan numunenin ise nispeten daha düşük sertlik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar tokluk ve sünekliğin de artışı anlamına gelen darbe enerjisi değerinin yüksekliğinin sertlik değeriyle ters bir orantı gösterdiğini ortaya koymaktadır (Şekil 4.24).

Farklı karbon eşdeğerine sahip numuneler için darbe dayanımı ve sertlik değerleri



Şekil 4.24. 1080 °C'de ısıtılmış numunelerin darbe enerjisi ve sertlik değerleri

4.8. YMÇ'den Beklenen Özellikler Bağlamında Yapılan Test ve Analizlerin Önemi ve Değerlendirilmesi

Servis edilen YMÇ'de sertlik değerleri kimyasal bileşim içeriğinde bulunan karbür yapıcı elementlerin varlığından, bu elementlerin yapı içerisindeki segregasyonundan, kesit kalınlığından ve üretim süreci içerisindeki bazı uygulamalardan etkilenmektedir ve görece olarak kontrol edilebilmektedir. Buna karşın yapılan döküm ve ısıl işlemlerin amacının, iç yapının tamamen östenitik bir faz ve işletme şartlarındaki ısıl işlem fırınlarının ısıtma ve fırın içi izolasyon yetenekleri ölçeğinde özellikle karbür yapıcı ve ergime sıcaklığı yüksek olan elementler için iyi bir çözünürlük ortamı sağlanarak bu elementlerin östenit içinde mümkün olduğunca çözünürlüğünü artırmak olduğu için, nihai döküm ürününde beklenen özellikler içerisinde mekanik özelliklerin ön plana çıktığı bir sürecin takip edilmesi büyük bir öneme sahiptir. Özellikle taş ocağı ve çimento sektörü gibi çalışma koşullarında yüksek darbeye ve çevrimsel yüke maruz kalan bu malzemelerin, 550 HB'ye kadar sertleşebilme yeteneği bu gerekliliği ön plana çıkartan en önemli etkidir (Machado vd., 2017). Servis ürünü olan ve nispeten yüksek sertliğe ulaşmış YMÇ için çalışma koşullarındaki aşınma ve darbe dayanımı hakkında olumlu bir öngörüle bulunmanın çok da doğru bir yaklaşım olmayacağı literatürde de belirtilmiştir (Anonim, 2023). YMÇ'de çalışma koşullarındaki yüksek sertleşme kabiliyeti, servis koşullarında ölçülen görece yüksek sertlik değerlerinden çok, metalografik ve mekanik özelliklerin sağlanması motivasyonunu ön plana çıkartmaktadır. Bu bakımdan YMÇ'lerden beklenen birinci özellik, iyi bir tokluk değeridir ve çalışma koşullarında hasara uğraması, istenmeyen birinci önceliktir. Bunun yanında agresif yükler altında malzemenin yüksek sertleşebilme kabiliyeti bu malzemeleri hem güvenli ve hem de yüksek çalışma ömrü sağlaması bakımından diğer alternatif malzemelerden ayırır ve çok önemli bir yere konumlandırmaktadır.

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Günümüzde aşınmaya ve darbe dayanıklı malzeme olarak büyük ölçüde kırıcı ve öğütücü işlevi gören makinelerde kullanılan yüksek manganlı çelikler (YMÇ) TWIP çelikleri, Hadfield çelikleri ve özellikle aşınma dayanımının geliştirilmesi için mangan oranı yükseltilerek içeriğinde krom, molibden, titanyum, vanadyum gibi mikro alaşım katkılarının bulunduğu çelikler olarak kullanılmaktadır (Korshunov vd., 2011). Yüksek tokluk ile beraber pekleşme mekanizmalarının sağladığı aşınma direnci özellikleriyle vazgeçilmez malzemelerdir (Yan vd., 2007). Bu tez çalışmasında, kırıcı ve öğütücü parçaların üretimlerinde aşınmaya ve darbeye dayanıklı malzeme olarak kullanılan YMÇ'in çeşitli kimyasal bileşim ve ısıl işlem şartlarına göre mekanik özelliklerin nasıl değiştiğini göstermek ve bununla birlikte uygun malzeme seçimine katkı sağlayarak hem üretici ve hem de kullanıcı sektörler için ekonomik kayıplarla sonuçlanacak kararların önüne geçilmesi motivasyonu ile yapılmıştır. Bu amaçla, çekme testleri, darbe testleri, aşınma testleri, sertlik testleri, metalografik inceleme, SEM-EDS analizleri, regresyon analizleri gibi birçok çalışma yapılarak YMÇ'de alaşım ve ısıl işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkileri anlaşılmasına çalışılmıştır.

Çekme testleri kılavuzlu çekme deney cihazı düzeneğinde TS 138 EN 10002-1 standardına göre hazırlanmış deney numuneleri ile ve Taguchi deney tasarımına göre yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre çekme mukavemetinin artan östenitleme sıcaklığı ile artış gösterirken, kimyasal bileşimin etkisine bakıldığında karbon eşdeğeri kriterine göre, karbon eşdeğeri arttıkça genel olarak çekme mukavemetinde bir azalma eğilimi olduğu görülmüştür (Hosseini vd., 2013; Jafarian vd., 2021). Deney sonuçlarına göre, en düşük çekme mukavemeti değeri IS: 1030 °C, KE: %3,31 deney şartlarında 606,4 MPa olarak elde edilirken, en yüksek çekme değeri ise IS: 1080 °C, KE: %3,31 deney şartlarında 749,3 MPa olarak bulunmuştur.

Darbe testleri Charpy test cihazında ISO 148-1 standardına göre hazırlanmış deney numuneleri ile ve Taguchi deney tasarımına göre yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde, darbe dayanımının artan östenitleme sıcaklığı ile arttığı tespit edilmiştir (Hosseini vd., 2013). Bunun yanısıra kimyasal bileşimin darbe dayanımı üzerinde kesin belirleyici bir etkisi olduğu görülmüştür. Deney sonuçları incelendiğinde kimyasal bileşimde karbon eşdeğerinin artışı darbe dayanımını düşürmektedir. Bunun nedeninin karbür yapıcı mikro alaşım katkılarının östenitleme sıcaklığında tamamen östenit yapıda çözünememesi, taneler arasında bir safsızlık olarak çökmesi nedeniyle tokluk özelliklerini olumsuz yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Deney sonuçlarına göre en düşük darbe dayanımı, IS: 1030 °C, KE: %4,97 deney şartlarında 102 J ile elde edilirken, en yüksek darbe dayanımı ise IS: 1080 °C, KE: %3,31 deney şartlarında 156,2 J değeriyle elde edilmiştir.

Aşınma testi ASTM G99-05(2010) standartlarına göre disk üzeri aşındırma tipi aşınma test cihazında 180'lik silisyum karbür (SiC) aşındırıcı zımpara kâğıdı kullanarak ve Taguchi deney

tasarımına göre yapılmıştır. Aşınma testlerinin sonuçlarına bakıldığında, test planındaki 1030 °C östenitleme sıcaklığında ısıtma işlemi görmüş %3,31 karbon eşdeğerine sahip numunenin 10 N aşındırma yükü altında 90 d/d aşındırma hızındaki aşınma deneyi sonucunda numunede aşınma miktarı 0,2851 gr ile en düşük, 1080 °C östenitleme sıcaklığında ısıtma işlemi görmüş %3,31 karbon eşdeğerine sahip numunenin 30 N aşındırma yükü altında 180 d/d aşındırma hızındaki aşınma deneyi sonucunda numunede aşınma miktarı 0,81101 gr ile en yüksek aşınmanın gerçekleştiği test olmuştur. Bu sonuçlarla birlikte aşındırma yükünün ve ısıtma işleminin aşınma davranışlarındaki en etkin parametreler olduğunu ortaya çıkmaktadır. Östenitleme sıcaklığı ve aşındırma yükü arttıkça YMC'de aşınma miktarının da doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür.

Deneysel çalışmalarda yapılan mekanik testler ile en iyi alaşım ve ısıtma sıcaklığının belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan çekme, darbe ve aşınma testlerinin tümü için sonuçlar incelendiğinde en iyi mekanik değerlere ulaşan test numunesinin Mn1 (1,1C; 12Mn) alaşımı olduğu belirlenmiştir.

Isıtma işlemi sıcaklığına bakıldığında, çekme ve darbe testlerinde en iyi sonuçların elde edildiği ısıtma işlemi sıcaklığının 1080 °C olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra aşınma deneylerinde Mn1 (1,1C; 12Mn) alaşımı için 1030 °C ısıtma işlemi sıcaklığı en az aşınma kaybının, 1080 °C ısıtma işlemi sıcaklığı ise en çok aşınma kaybının gerçekleştiği deneyler olmuştur. 1080 °C ısıtma işlemi sıcaklığı, en çok aşınma kaybının gerçekleştiği deney şartlarını göstermekle birlikte bu deney şartlarını taşıyan numunenin daha tok ve sünek bir malzeme olduğunu göstermektedir. Çalışmanın ulaşılmaya istenen başlıca hedeflerinden birisi de, mümkün olan en iyi darbe dayanımı değerinin elde edilmesiyle ve bununla birlikte en iyi çekme dayanımı değerlerini sağlayan deney şartlarının belirlenmesi olarak ortaya konmuştur. Çünkü çalışma şartlarında bu malzemelerdeki en temel problemin, agresif ve yüksek darbe altındaki çalışma koşullarında malzemelerin plastik deformasyon davranışlarının çatlama veya kırılma ile sonuçlanması ve bununla birlikte çalışma ömrünü önemli ölçüde kısaltması olduğu bilinmektedir ve bu temel probleme giriş bölümünde de değinilmiştir. Bundan dolayı 1080 °C ısıtma işlemi sıcaklığı, yapılan karakterizasyon çalışmalarında esas alınmıştır. Buna göre deneysel çalışmalar için belirlenmiş tüm alaşımlar (Mn1 (1,1C; 12Mn), Mn2 (1,2C; 16Mn), Mn3 (1,3C; 19Mn)) için mikroyapısal incelemeler ve SEM-EDS analizleri 1080 °C ısıtma işlemi sıcaklığı baz alınarak karakterize edilmiş ve sonuçlar detaylı bir şekilde incelenerek karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu sonuçlara göre, tüm numuneler için genel metalografik yapının östenitik bir matris içinde belirgin ve yaygın şekilde oksit bileşiklerinin varlığı ile östenit tane sınırları boyunca çökelmiş karbür yapılarının tane sınırları boyunca uzandığı bir tabloyu karşımıza çıkarttığı söylenebilmektedir (Jafarin vd., 2021; Ayadi vd., 2020).

Mn1 (1,1C; 12Mn) kodlu alaşımda taneler arası karbür oluşumlarına genelde rastlanmazken östenit tane sınırları boyunca çökelmiş karbürlerin varlığı gözlemlenmiş ve matris bölgesinden yapılan SEM-EDS analizlerinin kimyasal bileşimle uyumlu olduğu görülmüştür. Yapıdaki

noktasal fazlar tanımlandığında belirgin kükürt varlığının ve yüksek afinitesi bulunan mangan elementi ile MnS bileşiği yaparak bir arada bulunduğu (Anonim, 2022) ve bunun yanı sıra aynı bileşik içerisinde alüminyum, silisyum ve oksijen gibi elementlerin bulunması ise yapıdaki karmaşık oksit oluşumlarını açıklamaktadır. Mn2 (1,2C; 16Mn) kodlu alaşımda mikroyapısal incelemelerde görüldüğü üzere ilk numuneye göre nispeten daha belirgin östenit tane sınırlarının varlığı dikkat çekmektedir. Ayrıca taneler arasında çökelen beyaz renkli karbür bileşiklerinin olduğu gözlenmiştir. Elde edilen bu bulguların kimyasal bileşime bağlı olarak ve belirlenen ısı işlem sıcaklığı olan 1080 °C de, östenit yapı içerisinde tamamen çözünmenin olmadığını kanıtlamıştır. Genel matris fazı tanımlamalarında kimyasal bileşimle uyumlu analiz sonuçları elde edilmiş, noktasal fazlar tanımlandığında mangan elementinin kükürt ile reaksiyona girerek (MnS) bileşiği yapma isteği belirgin şekildeki kükürt yoğunluğundan anlaşılmıştır. Ayrıca faz içerisindeki alüminyum, oksijen ve silisyum gibi elementlerinde bulunması tüm numuneler için de geçerli olmak üzere kompleks oksit varlığını göstermiştir. Mn3 (1,3C; 19Mn) kodlu alaşımda taneler arası karbür varlığının yaygın şekilde gözlenmesi, bu numuneyi diğer numunelerden ayıran en belirgin özellik olarak dikkat çekmiştir. Alaşım miktarı en yüksek olan bu numunede 1080 °C ısı işlem sıcaklığında, karbür yapılarının östenit tanelerinin içinde çözünebilme kapasitesinin çok daha düşük olduğunu göstermiştir. Yapıda gözlenen ve mekanik özellikleri kötüleştirdiği literatürde sabit olan çözünmemiş karbür varlıklarının olumsuz etkisi Tablo 3.5 ve Tablo 3.10'te verilen çekme ve darbe deneyi sonuçları incelendiğinde açıkça görülmektedir.

1080 °C sıcaklıkta ısı işlem görmüş olan numunelerin sertlik değerleri ölçülmüş, Mn1 (1,1C; 12Mn) deney numunesinin 176,1 HB ile en düşük sertlik değerine sahip olduğu, Mn3 (1,3C; 19Mn) kodlu numunenin ise 191,4 HB değeriyle en yüksek sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. Çekme mukavemetinin artışı ile birlikte genel malzeme davranışı olarak sertlik değerinde bir artış beklenirken deney sonuçlarındaki bu nispi azalmanın deney şartlarından ve/veya YMÇ'in hassas sertleşme kabiliyetinden kaynaklanabileceği değerlendirilmiştir. Bununla birlikte YMÇ malzemelerin servis koşullarında ve darbe etkisi altında 550 HB sertlik değerlerine kadar sertleşebildiği ve bu özelliğinin yüksek deformasyon sertleşmesi özelliğinden kaynaklandığı bilinmektedir (Dastur ve Leslie, 1981). Ölçülen sertlik değerleri görece kıyaslamaya imkân vermesi bakımından değerlendirilse bile, servis koşullarındaki değişken darbe yükleri altında ulaştığı sertlik değerleri bu malzemelerin aynı zamanda hem servis ömrünü doğrudan etkileyen ve hem de plastik deformasyon özelliklerini ortaya çıkartan bir parametre olarak göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, YMÇ malzemeler için ısı işlem sonrası sertlik değerlerine bakılarak işlenebilirlik özellikleri veya aşınma dayanımları üzerinde bir tahmin yapmanın doğru sonuçlar vermeyeceği bilinmekle birlikte (Anonim, 2023), kazanılan mekanik özelliklerin çalışma koşullarındaki performansını etkilenmesi bakımından çok önemli bilgiler verdiği söylenebilmektedir.

Yapılan tüm deneysel çalışmalar değerlendirildiğinde, mekanik ve metalografik özellikler bakımından en iyi ısıl işlemler sıcaklığının 1080 °C, en iyi alaşımın ise Mn1 (1,1C; 12Mn) olduğu görülmüştür.

Ayrıca YMÇ için, darbe etkisi altında yüksek deformasyon sertleşmesi özelliği gösteriyor olması ve bu sayede yüksek aşınma dayanımı özelliği kazanması nedeniyle farklı darbe yükleri altında sertleşme mekanizmalarının incelenmesinin faydalı olacağı değerlendirilmiştir.



KAYNAKÇA

- Abbasi, M., Kheirandish, S., Kharrazi, Y., & Hejazi, J. (2010). On the comparison of the abrasive wear behavior of aluminum alloyed and standard Hadfield steels. *Wear*, 268(1-2), 202-207.
- Agunsoye, J. D., Talabi, S. I., Bello, O. (2015). Wear characteristic of heat-treated Hadfield austenitic manganese steel for engineering application. *Journal of Apem*. 10(2), 97-107.
- Allain, S., Chateau, J. P., & Bouaziz, O. (2004). A physical model of the twinning-induced plasticity effect in a high manganese austenitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 387, 143-147.
- Alyaz, S. (2003). Isıl İşlem ve Kompozisyonun Hadfield Çeliklerinin Mikroyapısına ve Mekanik Özelliklerine Olan Etkileri. (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Anonim. (1992). [https://www.ekstrametal.com.tr/upload/Node/42966/xfiles/15- Östenitik mangan Çelikleri.pdf](https://www.ekstrametal.com.tr/upload/Node/42966/xfiles/15-Östenitik%20mangan%20Çelikleri.pdf).
- Anonim. (2020). [https://www.ekstrametal.com.tr/images/kutuphane/pdf/15-Ostenitik Mangan Çelikleri.pdf](https://www.ekstrametal.com.tr/images/kutuphane/pdf/15-Ostenitik%20Mangan%20Çelikleri.pdf), Erişim Tarihi: 14.06.2020.
- Anonim. (2022). https://www.celikmetal.com.tr/genel_bilgiler/detay/alasim-elementlerinin-celige-etkisi, Erişim Tarihi: 14.12.2022.
- Anonim. (2023). <https://celikonline.photo.blog/ostenitik-manganli-celikler/>, Erişim Tarihi: 22.08.2023.
- Atabaki, M. M., Jafari, S., & Abdollah-pour, H. (2012). Abrasive wear behavior of high chromium cast iron and Hadfield steel—A comparison. *Journal of iron and steel research international*, 19(4), 43-50.
- Ayadi, S., Hadji, A., Hakan, K., & Selman, D. (2020). Microstructure and wear behavior of a Cr-Mo-Nb alloyed manganese steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 11545-11562.
- Azadi, M., Pazuki, A. M., & Olya, M. J. (2018). The effect of new double solution heat treatment on the High manganese Hadfield steel properties. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 7(5), 618-626.
- Bal, B. (2018). A study of different microstructural effects on the strain hardening behavior of Hadfield steel. *International Journal of Steel Structures*, 18(1), 13-23.
- Balogun, S. A., Esezobor, D. E., & Agunsoye, J. O. (2008). Effect of melting temperature on the wear characteristics of austenitic manganese steel. *Journal of minerals & materials characterization & engineering*, 7(3), 277-289.
- Başak, H., & Baday, Ş. (2016). Küreselleştirilmiş orta karbonlu bir çeliğin işlenmesinde, kesme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin regresyon analizi ile modellenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 253-258.
- Bayraktar, E. (1993). Hadfield Çeliğinin Deformasyon Davranışı ve Biçimlendirme Özellikleri. (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Bayraktar, E., Khalid, F. A., & Levallant, C. (2004). Deformation and fracture behaviour of high manganese austenitic steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 147(2), 145-154.
- Behjati, P., Kermanpur, A., Najafzadeh, A., Baghbadorani, H. S., Jung, J. G., & Lee, Y. K. (2014). Influence of precooling and deformation temperature on microstructure and mechanical properties in a high-manganese austenitic steel. *Materials Science and Engineering: A*, 614, 232-237.
- Bembenek, M., Krawczyk, J., & Pańcikiewicz, K. (2022). The wear mechanism of mill beaters for coal grinding made-up from high manganese cast steel. *Engineering Failure Analysis*, 142, 106843.

- Bhero, S. W., Nyembe, B., & Lentsoana, K. (2014, April). Common failures of Hadfield steel in application. In International Conference on Mining, Mineral Processing and Metallurgical Engineering (ICMMME) April (pp. 15-16).
- Bouaziz, O., Allain, S., Scott, C. P., Cugy, P., & Barbier, D. (2011). High manganese austenitic twinning induced plasticity steels: A review of the microstructure properties relationships. Current opinion in solid state and materials science, 15(4), 141-168.
- Bozkurt, Y. B., Kovacı, H., Yetim, A. F., & Çelik, A. (2022). Tribocorrosion properties and mechanism of a shot peened AISI 4140 low-alloy steel. Surface and Coatings Technology, 440, 128444.
- Brodyanski, A., Klein, M. W., Merz, R., Smaga, M., Beck, T., & Kopnarski, M. (2020). Microstructural changes caused by friction loading in high manganese TWIP steel and case-hardened 16MnCr5. Materials Characterization, 163, 110231.
- Cao, J. L., Zhao, A. M., Liu, J. X., He, J. G., & Ding, R. (2014). Effect of Nb on microstructure and mechanical properties in non-magnetic high manganese steel. Journal of Iron and Steel Research International, 21(6), 600-605.
- Cetin, E., Baykasoğlu, A., Erdin, M. E., & Baykasoğlu, C. (2023). Experimental investigation of the axial crushing behavior of aluminum/CFRP hybrid tubes with circular-hole triggering mechanism. Thin-Walled Structures, 182, 110321.
- Chen, C., Lv, B., Ma, H., Sun, D., & Zhang, F. (2018). Wear behavior and the corresponding work hardening characteristics of Hadfield steel. Tribology International, 121, 389-399.
- Chen, H., Wang, S., Lu, S., Qiao, Y., Wang, X., Fan, N., ... & Niu, J. (2018). Simulation and experimental validation of residual stress and surface roughness of high manganese steel after shot peening. Procedia CIRP, 71, 227-231.
- Chen, L., Zhao, Y., & Qin, X. (2013). Some aspects of high manganese twinning-induced plasticity (TWIP) steel, a review. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 26(1), 1-15.
- Cheng, H., Sun, L., Li, W., Zhang, Y., Cui, Y., Chen, D., & Zhang, Z. (2024). Enhancing strength-ductility synergy in high-Mn steel by tuning stacking fault energy via precipitation. Journal of Materials Science & Technology, 187, 240-247.
- Cornette, D., Cugy, P., Hildenbrand, A., & Bouzekri, M. (2005). Ultra high strength FeMn TWIP steels for automotive safety parts. Revue de Metallurgie, 102(12), 905-918.
- Curtze, S., & Kuokkala, V. T. (2010). Dependence of tensile deformation behavior of TWIP steels on stacking fault energy, temperature and strain rate. Acta materialia, 58(15), 5129-5141.
- Dalai, R., Das, S., & Das, K. (2019). Effect of thermo-mechanical processing on the low impact abrasion and low stress sliding wear resistance of austenitic high manganese steels. Wear, 420, 176-183.
- Dastur, Y. N., & Leslie, W. C. (1981). Mechanism of work hardening in Hadfield manganese steel. Metallurgical transactions A, 12(5), 749-759.
- David Havel, P. E. (2017). Austenitic Manganese Steel Complete Overview, Columbia Steel Casting Co.1-19,
- El-Mahallawi, I., Abdel-Karim, R., & Naguib, A. (2001). Evaluation of effect of chromium on wear performance of high manganese steel. Materials Science and Technology, 17(11), 1385-1390.
- Essoussi, H., Ettaqi, S., & Essadiqi, E. (2018). The effect of alloying elements on the stacking fault energy of a TWIP steel. Procedia Manufacturing, 22, 129-134.
- Eşlisoy, N., 1998. Metalografik Study of Carbides in Chromium Modified Hadfield Steels. Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Falodun, O. E., Oke, S. R., Okoro, A. M., & Olubambi, P. A. (2020). Characterization of cast manganese steels containing varying manganese and chromium additions. Materials Today: Proceedings, 28, 730-733.

- Farr, C. W. (1963). Melting practice, heat treatment and properties of Hadfield manganese steel. In Proceedings of Electric Furnace Conference, Chicago (pp. 157-173).
- Gao-Fei, L., Chang-Jiang, S., Xiang-Yang, L., Jian-Guo, L., & Zhen-Ming, X. (2005). Eutectic decomposition in Ca-Si modified austenite medium Mn steel after solidification. *Journal of materials science*, 40(8), 2081-2084.
- Gorlenko, D., Vdovin, K., & Feoktistov, N. (2016). Mechanisms of cast structure and stressed state formation in Hadfield steel. *China foundry*, 13(6), 433-442.
- Gültepe, H. (2002). Kömür Öğütme Değirmenlerinde Kullanılan Hadfield Çeliklerinin Aşınma Davranışına Isıl İşlem Etkisinin İncelenmesi. (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü)
- Günel, A. (2003). Some critics on the use of coefficient of determination as a significance test criterion for regression equation. *Dogus University Journal*, 4(2), 133-140.
- Hai, N. H., Trung, N. D., Khanh, P. M., Dung, N. H., & Long, B. D. (2022). Strain hardening of Hadfield high manganese steels. *Materials Today: Proceedings*, 66, 2933-2937.
- Ham, Y. S., Kim, J. T., Kwak, S. Y., Choi, J. K., & Yoon, W. Y. (2010). Critical cooling rate on carbide precipitation during quenching of austenitic manganese steel. *China Foundry*, 7(2), 178-182.
- Hamada, A. S., Karjalainen, L. P., Somani, M. C., & Ramadan, R. M. (2007). Deformation mechanisms in high-Al bearing high-Mn TWIP steels in hot compression and in tension at low temperatures. In *Materials Science Forum* (Vol. 550, pp. 217-222). Trans Tech Publications Ltd.
- Han, X., Zhang, Z., Wang, B., Thrush, S. J., Barber, G. C., & Qiu, F. (2022). Microstructures, compressive residual stress, friction behavior, and wear mechanism of quenched and tempered shot peened medium carbon steel. *Wear*, 488, 204131.
- Hashemi, B., Yazdi, M. R., & Azar, V. (2011). The wear and corrosion resistance of shot peened-nitrided 316L austenitic stainless steel. *Materials & Design*, 32(6), 3287-3292.
- Hongning, K. (2011). Development of high strength and high ductility nanostructured TWIP steels. The Hong Kong Polytechnic University, 74(08), 182.
- Hosseini, S. H., Limooei, M. B., Zade, M. H., Askarnia, E., & Asadi, Z. (2013). Optimization of heat treatment due to austenising temperature, time and quenching solution in Hadfield steels. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 7(7), 582-585.
- Hosseini, S., & Limooei, M. B. (2011). Optimization of heat treatment to obtain desired mechanical properties of high carbon Hadfield steels. *World applied sciences journal*, 15(10), 1421-1424.
- Jabłońska, M. B., & Kowalczyk, K. (2019). Microstructural aspects of energy absorption of high manganese steels. *Procedia Manufacturing*, 27, 91-97.
- Jacob, R., Sankaranarayanan, S. R., & Babu, S. K. (2020). Recent advancements in manganese steels—A review. *Materials Today: Proceedings*, 27, 2852-2858.
- Jafarian, H. R., Sabzi, M., Anijdan, S. M., Eivani, A. R., & Park, N. (2021). The influence of austenitization temperature on microstructural developments, mechanical properties, fracture mode and wear mechanism of Hadfield high manganese steel. *Journal of Materials Research and technology*, 10, 819-831.
- Jiménez, J. A., & Frommeyer, G. (2010). Analysis of the microstructure evolution during tensile testing at room temperature of high-manganese austenitic steel. *Materials Characterization*, 61(2), 221-226.
- Kim, R., Bae, C., Ha, Y. M., & Kim, J. (2018). Effect of titanium addition on high temperature workability of high manganese austenitic steel. *ISIJ International*, 58(3), 535-541.
- Korshunov, L. G., Kositsina, I. I., Sagaradze, V. V., & Chernenko, N. L. (2011). Effect of the carbide phase on the tribological properties of high-manganese antiferromagnetic austenitic steels alloyed with vanadium and molybdenum. *The physics of Metals and Metallography*, 112(1), 90-100.

- Kumar, D. (2015, October). Design of high manganese steels: Calculation of Sfe and Ms temperature. In *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015: Conference Proceedings* (pp. 857-863). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc..
- Kuyucak, S., Gertsma, V. Y., & Zavadil, R. (2004). On the Heat Treatment of Hadfield's Austenitic Manganese Steels Part VIII: Studies on Microcharacterization. In *Transactions of the American Foundry Society and the One Hundred Eighth Annual Metalcasting Congress* (pp. 1065-1074).
- Lencina, R., Caletti, C., Brunelli, K., & Micone, R. (2015). Assessing wear performance of two high-carbon Hadfield steels through field tests in the mining industry. *Procedia Materials Science*, 9, 358-366.
- LI, X. L., WANG, C. H., & Lu, L. U. (2012). Microstructure and impact wear resistance of TiN reinforced high manganese steel matrix. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 19(7), 60-65.
- Lindroos, M., Laukkanen, A., Cailletaud, G., & Kuokkala, V. T. (2018). Microstructure based modeling of the strain rate history effect in wear resistant Hadfield steels. *Wear*, 396, 56-66.
- Luo, Z. C., Ning, J. P., Wang, J., & Zheng, K. H. (2019). Microstructure and wear properties of TiC-strengthened high-manganese steel matrix composites fabricated by hypereutectic solidification. *Wear*, 432, 202970.
- Lychagin, D. V., Filippov, A. V., Novitskaya, O. S., Chumlyakov, Y. I., Kolubaev, E. A., & Lychagina, L. L. (2020). Deformation of hadfield steel single crystals by dry sliding friction with the normal load/friction force orientations $[1\bar{1}0]/[1\bar{1}0]$ and $[1\bar{1}0]/[001]$. *Tribology International*, 147, 106284.
- Lychagin, D. V., Filippov, A. V., Novitskaya, O. S., Kolubaev, A. V., Moskvichev, E. N., Fortuna, S. V., & Chumlyakov, Y. I. (2022). Deformation and wear of Hadfield steel single crystals under dry sliding friction. *Wear*, 488, 204126.
- Machado, P. C., Pereira, J. I., & Sinatora, A. (2021). Abrasion wear of austenitic manganese steels via jaw crusher test. *Wear*, 476, 203726.
- Machado, P. C., Pereira, J. I., Penagos, J. J., Yonamine, T., & Sinatora, A. (2017). The effect of in-service work hardening and crystallographic orientation on the micro-scratch wear of Hadfield steel. *Wear*, 376, 1064-1073.
- Mahlami, C. S., & Pan, X. (2014, May). Challenges and developments of Hadfield manganese steel castings based on service life. In *Proceedings of the 71th World Foundry Congress, Bilbao, Spain* (pp. 19-21).
- Mahlami, C. S., & Pan, X. (2014). An Overview on high manganese steel casting. *World Foundry Congress*, 1-10.
- Mahlami, C. S., & Pan, X. (2017, July). Mechanical properties and microstructure evaluation of high manganese steel alloyed with vanadium. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1859, No. 1, p. 020083). AIP Publishing LLC.
- Maouche, H., Hadji, A., & Bouhamla, K. (2016). Effect of inoculation by molybdenum and nickel on hardening phenomenon and wear behavior of high manganese steel. *Metallurgical & Mining Industry*, (3).
- Matsui, M., & Kakishima, H. (2006). Improvement of tribological performance of steel by solid lubricant shot-peening in dry rolling/sliding contact wear tests. *Wear*, 260(6), 669-673.
- Menezes, M. R., Godoy, C., Buono, V. T. L., Schwartzman, M. M., & Wilson, J. A. B. (2017). Effect of shot peening and treatment temperature on wear and corrosion resistance of sequentially plasma treated AISI 316L steel. *Surface and Coatings Technology*, 309, 651-662.
- Mishra, S., & Dalai, R. (2021). A comparative study on the different heat-treatment techniques applied to high manganese steel. *Materials Today: Proceedings*, 44, 2517-2520.

- Mitrovic, S., Adamovic, D., Zivic, F., Dzunic, D., & Pantic, M. (2014). Friction and wear behavior of shot peened surfaces of 36CrNiMo4 and 36NiCrMo16 alloyed steels under dry and lubricated contact conditions. *Applied Surface Science*, 290, 223-232.
- MKE Kurumu Genel Müdürlüğü Seminer Notları, 20-24 Eylül 1982, Ankara.
- Moghaddam, E. G., Varahram, N., & Davami, P. (2012). On the comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of high-vanadium austenitic manganese steels with the Hadfield steel. *Materials Science and Engineering: A*, 532, 260-266.
- Mohamed, A. M. O., Farhat, Z., Warkentin, A., & Gillis, J. (2020). Effect of a moving automated shot peening and peening parameters on surface integrity of Low carbon steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 277, 116399.
- Mohammadnezhad, M., Javaheri, V., & Naseri, M. (2013). Effect of the molybdenum on the microstructural and mechanical properties of Hadfield austenitic manganese steel. no. October.
- Mousavi Anijdan, S. H., & Sabzi, M. (2018). The effect of heat treatment process parameters on mechanical properties, precipitation, fatigue life, and fracture mode of an austenitic Mn Hadfield steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(10), 5246-5253.
- Nam, N. D., Le Thi Chieu, N. M. T., & Khanh, P. M. (2016). Investigation of phase transformation mechanism of high manganese steel Mn15Cr2 heat-treated by subzero temperature process. *International Journal of Scientific and Engineering Research*, 7(4), 1527-1530.
- Nelson Jr, R. L. (1968). The melting and processing of austenitic manganese steel castings. *Steel Foundry Facts*, 6-8.
- Niu, L., Xu, Y., & Wu, H. (2010). Microstructure and mechanical properties of high-Cr cast iron bars reinforced Hadfield steel matrix composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 25(3), 464-468.
- Nurjaman, F., Bahfie, F., Astuti, W., & Shofi, A. (2017, March). The effect of solid solution treatment on the hardness and microstructure of 0.6% wt C-10.8% wt Mn-1.44% wt Cr austenitic manganese steel. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 817, No. 1, p. 012066). IOP Publishing.
- Okechukwu, C., Dahunsi, O. A., Oke, P. K., Oladele, I. O., & Dauda, M. (2017). Prominence of Hadfield steel in mining and minerals industries: a review. *International Journal of Engineering Technologies IJET*, 3(2), 83-90.
- Peng, H., Wang, S., Si, H., & Wen, Y. (2015). Effect of stacking fault energy on work hardening behaviors in Fe-Mn-Si-C high manganese steels by varying silicon and carbon contents. *Materials & Design*, 85, 707-714.
- Petrov, Y. N., Gavriljuk, V. G., Berns, H., & Schmalt, F. (2006). Surface structure of stainless and Hadfield steel after impact wear. *Wear*, 260(6), 687-691.
- Pham, M. K., Nguyen, D. N., & Hoang, A. T. (2018). Influence of vanadium content on the microstructure and mechanical properties of high-manganese steel. *Int. J. Mech. Mechatronics Eng*, 18(2), 141-147.
- Pribulova, A., Babic, J., & Baricova, D. (2011). Influence of hadfield's steel chemical composition on its mechanical properties. *Chem. Listy*, 105, 430-432.
- Qian, L., Feng, X., & Zhang, F. (2011). Deformed microstructure and hardness of Hadfield high manganese steel. *Materials transactions*, 52(8), 1623-1628.
- Raghavan, K. S., Sastri, A. S., & Marcinkowski, M. J. (1969). Nature of the Work-hardening Behavior in Hadfields Manganese steel. *Trans Met Soc AIME*, 245(7), 1569-1575.
- Sabzi, M., & Farzam, M. (2019). Hadfield manganese austenitic steel: a review of manufacturing processes and properties. *Materials Research Express*, 6(10), 1065c2.

- Sabzi, M., Far, S. M., & Dezfuli, S. M. (2018). Effect of melting temperature on microstructural evolutions, behavior and corrosion morphology of Hadfield austenitic manganese steel in the casting process. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 25(12), 1431-1438.
- Sevsek, S., Brasche, F., Molodov, D. A., & Bleck, W. (2019). On the influence of grain size on the TWIP/TRIP-effect and texture development in high-manganese steels. *Materials Science and Engineering: A*, 754, 152-160.
- Srivastava, A. K., & Das, K. (2008). Microstructural characterization of Hadfield austenitic manganese steel. *Journal of Materials Science*, 43(16), 5654-5658.
- Sutton, B. J. (2013). Solidification behavior and hot cracking susceptibility of high manganese steel weld metals (Doctoral dissertation, The Ohio State University).
- Tecza, G., & Garbacz-Klempka, A. (2016). Microstructure of cast high-manganese steel containing titanium. *Archives of Foundry Engineering*, 16.
- Tüfenk, E., (2012). Farklı Kimyasal Kompozisyona Sahip Isıl İşlemler Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Varela, L. B., Tressia, G., Masoumi, M., Bortoleto, E. M., Regattieri, C., & Sinatora, A. (2021). Roller crushers in iron mining, how does the degradation of Hadfield steel components occur?. *Engineering Failure Analysis*, 122, 105295.
- Vdovin, K. N., Gorlenko, D. A., & Feoktistov, N. A. (2016). Characteristics of excess phase in cast high-manganese steel. *Steel in Translation*, 46(7), 484-488.
- Venturelli, B. N., Albertin, E., & Azevedo, C. R. D. F. (2018). The effect of the austenite grain refinement on the tensile and impact properties of cast Hadfield steel. *Materials Research*, 21.
- Wang, T. S., Lu, B., Zhang, M., Hou, R. J., & Zhang, F. C. (2007). Nanocrystallization and α martensite formation in the surface layer of medium-manganese austenitic wear-resistant steel caused by shot peening. *Materials Science and Engineering: A*, 458(1-2), 249-252.
- Wang, W., Song, R., Peng, S., & Pei, Z. (2016). Multiphase steel with improved impact-abrasive wear resistance in comparison with conventional Hadfield steel. *Materials & Design*, 105, 96-105.
- Wen, Y. H., Peng, H. B., Si, H. T., Xiong, R. L., & Raabe, D. (2014). A novel high manganese austenitic steel with higher work hardening capacity and much lower impact deformation than Hadfield manganese steel. *Materials & Design*, 55, 798-804.
- Xiong, J., Liu, E., Zhang, C., Kong, L., Yang, H., Zhang, X., & Wang, Y. (2023). Tuning mechanical behavior and deformation mechanisms in high-manganese steels via carbon content modification. *Materials Science and Engineering: A*, 881, 145401.
- Yan, H., Zhu, P., Chen, Z., Zhang, H., Zhang, Y., & Zhang, Y. (2022). Effect of shot peening on the surface properties and wear behavior of heavy-duty-axle gear steels. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 22-32.
- Yan, W., Fang, L., Sun, K., & Xu, Y. (2007). Effect of surface work hardening on wear behavior of Hadfield steel. *Materials Science and Engineering: A*, 460, 542-549.
- Yan, W., Fang, L., Zheng, Z., Sun, K., & Xu, Y. (2009). Effect of surface nanocrystallization on abrasive wear properties in Hadfield steel. *Tribology International*, 42(5), 634-641.
- Yang, H., Wu, X., Cao, G., & Yang, Z. (2016). Enhanced boronizing kinetics and high temperature wear resistance of H13 steel with boriding treatment assisted by air blast shot peening. *Surface and Coatings Technology*, 307, 506-516.
- Yuan, X., Chen, L., Zhao, Y., Di, H., & Zhu, F. (2015). Influence of annealing temperature on mechanical properties and microstructures of a high manganese austenitic steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 217, 278-285.

Zhan, K., Zhang, Y., Bao, L., Yang, Z., Zhao, B., & Ji, V. (2021). Surface characteristic and wear resistance of QT-700-2 nodular cast iron after laser quenching combing with shot peening treatment. *Surface and Coatings Technology*, 423, 127589.

Zhang, G. S., Xing, J. D., & Gao, Y. M. (2006). Impact wear resistance of WC/Hadfield steel composite and its interfacial characteristics. *Wear*, 260(7-8), 728-734.

Zheng, Z. B., Yang, H. K., Shatrava, A. P., Long, J., Wang, Y. H., Li, J. X., & Zheng, K. H. (2022). Work hardening behavior and fracture mechanisms of Fe-18Mn-1.3 C-2Cr low-density steel castings with varying proportions of aluminum alloying. *Materials Science and Engineering: A*, 144467.

Zuidema, B. K., Subramanyam, D. K., & Leslie, W. C. (1987). The effect of aluminum on the work hardening and wear resistance of Hadfield manganese steel. *Metallurgical transactions A*, 18(9), 1629-1639.



