

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HK TİP AISI ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN KUM KALIBA
DÖKÜMÜNDE, SOĞUTUCU KULLANIMININ YÜZEY
HATALARINA VE MİKROYAPIYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aykut UÇAR

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ

Temmuz 2024

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

HK TİP AISI ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN KUM KALIBA
DÖKÜMÜNDE, SOĞUTUCU KULLANIMININ YÜZEY
HATALARINA VE MİKROYAPIYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Aykut UÇAR

Enstitü Anabilim Dalı : METALURJİ VE MALZEME
MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 02/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Prof. Dr. Salim ASLANLAR	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Erdal KARADENİZ	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Aykut UÇAR

02/07/2024

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Uğur ÖZSARAÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuar ve testler konusunda olanaklarını, anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Körfez Döküm San.Tic.A.Ş'ye ve tüm çalışanlarına ve mezunu olduğum Karabük Üniversitesinin, Margem laboratuvarındaki çalışanlarına yardımlarından ötürü teşekkürlerimi bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	v
SİMGELER	vi
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	viii
ÖZET.....	xii
ABSTRACT	xiii

BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1

BÖLÜM 2.	
PASLANMAZ ÇELİKLER	3
2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler.....	8
2.1.1. Ferritik paslanmaz çeliklerin özellikleri	9
2.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler	10
2.2.1. Östenitik paslanmaz çeliklerin özellikleri.....	11
2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler	13
2.3.1. Martenzitik paslanmaz çeliklerin özellikleri.....	14
2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler	15
2.4.1. Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri	16
2.5. Çökeltme Sertleştirmeli Paslanmaz Çelikler	17
2.5.1. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin özellikleri.....	18

BÖLÜM 3.	
ÇELİKLERİN KATILAŞMASI.....	20
3.1. Paslanmaz Çeliklerin Katılaşması Ve Faz Oluşumları.....	24
3.2. Dökümün Makro Ve Mikro Yapısını Etkileyen Parametreler	27

3.3. Katılaşmayı Etkileyen Unsurlar	29
3.4. Katılaşma Hızının Mekanik Özelliklere Ve Döküm Hatalarının Oluşumuna Etkisi.....	31
3.5. Katılaşma Kaynaklı Döküm Hataları	33
3.5.1. Sıcak yırtılma	34
3.5.2. Gaz boşlukları	35
3.5.3. Çekinti boşlukları ve çöküntüler	36
3.5.4. Karbon yüzmesi (kish) ve çökme hataları	37
3.6. Yönlendirilmiş Katılaşma	37
3.7. Besleyici Ve Soğutucuların Katılaşmaya Etkileri	39

BÖLÜM 4.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	44
4.1. Simülasyon Analizi Ve Olası Döküm Hataları	50
4.2. Penetrant Testi (PT).....	54
4.3. Sertlik Testi	54
4.4. Çekme Testi	55
4.5. Charpy Çentik Darbe Testi	56
4.6. SEM, EDX ve Mapping Analizleri	57
4.7. Optik Mikroskop Analizi	60

BÖLÜM 5.

DENEYSEL SONUÇLAR.....	61
5.1. Simülasyon Sonuçlarıyla Döküm Parçanın Görsel Olarak Karşılaştırılması ..	65
5.2. Penetrasyon Testi (PT) Sonuçları.....	66
5.3. Sertlik Testi Sonuçları	69
5.4. Çekme Testi Sonuçları.....	70
5.5. Charpy Çentik Darbe Testi Sonuçları.....	72
5.6. SEM, EDX ve Mapping Analiz Sonuçları.....	73
5.7. Optik Mikroskop Analizi	75

BÖLÜM 6.

SONUÇ VE ÖNERİLER.....	77
6.1. Sonuç	77
6.2. Öneriler	79

KAYNAKLAR	81
------------------------	-----------



KISALTMALAR

ASTM	: Uluslararası Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu
ACI-ASTM	: Amerikan Malzeme Testleri Derneği
AISI	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
EDX	: Enerji Dağılımı X-Işını Analizi
HC	: Yüksek Karbonlu Martenzitik Paslanmaz Çelik
HK	: Sertleştirilebilir Martenzitik Paslanmaz Çelik
HMK	: Hacim Merkezli Kübik Yapı
HMT	: Hacim Merkezli Tetragonal Yapı
HSP	: Hegzagonal Sıkı Paket
HSLA	: Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşımli
LPT	: Sıvı Penetrant Testi
MARGEM	: Malzeme Araştırma Ve Geliştirme Merkezi (Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü)
NDT	: Tahribatsız Muayene
PT	: Penetrasyon Testi
PRE	: Çukurlaşma Direnci Eşdeğeri
SDAS	: Sekonder Dendrit Kol Aralığı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskopu
UNS	: Birleşik Numaralandırma Sistemi
YMK	: Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
XRD	: X-Işını Kırınımı

SİMGELER

A	: Yüzey Alanı
cm ³	: Santimetre küp
DS	: Dolum Süresi
g	: Yerçekimi İvmesi
GPa	: Gigapaskal
h	: Yükseklik
HB	: Brinell Sertlik Değeri Birimi
HRC	: Rockwell Sertlik Değeri C Ölçeği Birimi
IACS	: Metal ve Alaşımlar İçin Kullanılan Elektrik İletkenliği Birimi
j	: Joule
K	: Kelvin
kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
ksi	: İnç Kare Başına Kilopound
M	: Modül
mK	: Millikelvin
MPa	: Megapaskal
P	: Basınç
<i>t</i>	: Zaman
v	: Hız
V	: Hacim
Q	: Debi
°C	: Santigrat
°F	: Fahrenheit
ρ	: Yoğunluk
α	: Alfa
γ	: Gama
δ	: Delta

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.1 : ASTM Grade HC (28Cr, J92605) ferritik döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [13].....	8
Tablo 2.1.1.1 : ASTM Grade HC (28Cr, J92605) ferritik döküm paslanmaz çelik özellikleri [13].....	9
Tablo 2.2.1 : ASTM Grade HK (25Cr-20Ni, J94224) östenitik döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [17].....	11
Tablo 2.2.1.1 : ASTM Grade HK (25Cr-20Ni, J94224) östenitik döküm paslanmaz çelik özellikleri [17].....	12
Tablo 2.3.1 : ACI-ASTM CA6N (J91650) martenzitik döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [23].....	13
Tablo 2.3.1.1 : ACI-ASTM CA6N (J91650) martenzitik döküm paslanmaz çelik özellikleri [23].....	14
Tablo 2.4.1 : ACI-ASTM CE8MN (ASTM A890 Grade 2A, J93345) dubleks döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [26].....	15
Tablo 2.4.1.1 : ACI-ASTM CE8MN (ASTM A890 Grade 2A, J93345) dubleks döküm paslanmaz çelik özellikleri [26].....	16
Tablo 2.5.1 : H1100 Hardened CB7Cu-1 çökeltme sertleştirmeli döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [27].....	18
Tablo 2.5.1.1 : H1100 Hardened CB7Cu-1 çökeltme sertleştirmeli döküm paslanmaz çelik özellikleri [27].....	18
Tablo 5.1 : Deney numunelerinin spektrometre sonuçları.....	65
Tablo 5.3.1 : Sertlik değerlerinin Brinell (HB) olarak ölçülmesi.....	69
Tablo 5.4.1 : Mekanik değerlerin ölçülmesi.....	71
Tablo A.1 : 1. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	96
Tablo A.2 : 2. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	97
Tablo A.3 : 3. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	98
Tablo A.4 : 4. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	99
Tablo A.5 : 5. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	100
Tablo A.6 : 6. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	101
Tablo A.7 : 7. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	102
Tablo A.8 : 8. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).....	103

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : Demir krom faz diyagramı [5].....	4
Şekil 2.2 : Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı [6].....	5
Şekil 2.3 : Kafes yapıları (Soldan sağa doğru sırasıyla; Hacim Merkezli Kübik (HMK) Yapı, Yüzey Merkezli Kübik (YMK) Yapı ve Hegzagonal Sıkı Paket (HSP) [10].....	6
Şekil 2.4 : Schaeffker ve DeLong diyagramları [12].....	7
Şekil 3.1 : Demir karbon denge diyagramı [28].....	20
Şekil 3.2 : Zamana göre değişen katılaşma eğilimi (koyu renkli alan sıvı metali, dış yüzeyden başlayan beyaz renkli alan ise katılaştıran metali temsil etmektedir) [30].....	22
Şekil 3.3 : Döküm parçada sıcaklık akışına etki eden faktörler.....	23
Şekil 3.1.1 : Katılaşma faz sınırlarını içeren WRC-1992 diyagramı [12].....	26
Şekil 3.4.1 : Oda sıcaklığında soğumaya bırakılan metalin katılaşması.....	32
Şekil 3.7.1 : Sırasıyla, önerilmeyen ve önerilen besleyici boyutlarına örnekler [30].	41
Şekil 4.1 : ASTM E8/E8M standartına göre döküm parçaya eklenebilen çekme numunesi tasarımı.....	45
Şekil 4.2 : ASTM çekme standardı doğrultusunda üretilen döküm numune ve ölçüleri.....	45
Şekil 4.3 : Farklı soğutucu boyutlarının kullanıldığı kalıp ortamının tasarımı.....	47
Şekil 4.4 : Kalıp ortamı simüle edilen parçanın katılaşması. Sıvı faz oranları sol üstten başlayarak şu şekilde devam etmektedir: %90,751 - %80,781 - %70,159 - %60,629 - %50,036 - %39,360 - 30,746 - %19,948 - %10,287 - %4,667.....	48
Şekil 4.5 : Soğutuculu (1 numaralı) ve soğutucusuz (4 numaralı) numunelere ait simülasyon sonuçları. Sol tarafta termal modül, sağ tarafta ise olası çekinti bölgeleri ve yönelimler gözükmektedir.....	49
Şekil 4.1.1 : Döküm için hazırlanan kalıp ortamının simülasyon datası (1- Soğutucusuz numune, 2-Soğutuculu numune, 3-Soğutucu, 4-Dikey yolluk, 5-Filtre, 6-Yatay yolluk, 7-Girişler).....	50
Şekil 4.1.2 : Metalin, sıvı fazdan katı faza dönüşmesinin zamana bağlı olarak gösterimi (şeffaf kısımlar katılaştıran bölgeleri, sarı ve kırmızı renkli olan bölgeler sıvı fazdaki yapıyı temsil etmektedir).....	51
Şekil 4.1.3 : Çekinti oluşumu (Shrinkage %).....	52
Şekil 4.1.4 : Niyama kriterine göre parçanın sonuçları.....	53
Şekil 4.1.5 : Sıcak noktaların oluşum bölgeleri (Hot Spot).....	54
Şekil 4.4.1 : Döküm numune parçadan çıkarılacak test numuneleri: Çekme numunesi (yeşil renk), Charpy test numunesi (sarı renk) ve mikroyapı inceleme numunesi (mavi renk).....	55

Şekil 4.4.2 : Çekme teslerinin uygulanışı.....	56
Şekil 4.5.1 : Charpy çentik darbe testinin uygulanışı.....	57
Şekil 5.1 : Yapılan plaka modele ve numaralandırma işlemine ait fotoğraflar.....	61
Şekil 5.2 : Plaka modelin derece içindeki dikey yolluk ve soğutuculu yerleşimine ait fotoğraf.....	61
Şekil 5.3 : Plakalar çıkarılarak kum kalıbın elde edilmesini gösteren fotoğraf.....	62
Şekil 5.4 : Kum kalıpların boyanma işlemleri.....	62
Şekil 5.5 : Kum kalıpların boyandıktan sonra yakılarak boyanın kurutulması.....	63
Şekil 5.6 : Kalıpların yakılmış ve döküm öncesi son halleri.....	63
Şekil 5.7 : Kalıpların kapatılarak üzerine ağırlıkların eklenmesi.....	64
Şekil 5.8 : Dökümün yapılışı.....	64
Şekil 5.9 : Dökülmüş, yolluk sistemleri henüz kesilmemiş parçalar.....	64
Şekil 5.1.1 : Penetrasyon testi sonuçlarına ait fotoğraf.....	65
Şekil 5.1.2 : Fiili parçadaki çekintiler - simülasyon programında çekinti oluşabilecek bölgeler (Resmin üzerindeki sayılar numunelere ait numaralardır).....	66
Şekil 5.2.1 : Penetrasyon (PT) testine ait alt ve üst kısımlardan bakış içeren fotoğraflar.....	67
Şekil 5.2.2 : Penetrasyon (PT) testine ait dip kısım ve detay fotoğrafları.....	68
Şekil 5.3.1 : Sertlik değerlerinin alınması ve numunelerin üzerine yazıldığı fotoğraflar.....	69
Şekil 5.3.2 : Sertlik değerlerinin çizgisel gösterimi.....	70
Şekil 5.3.3 : Mekanik ve mikroyapı testleri için hazırlanan numunelerin fotoğrafı.....	70
Şekil 5.4.2 : Çekme mukavemetinin grafiksel gösterimi.....	72
Şekil 5.5.1 : Charpy (çentik darbe) testinin sonuçları.....	73
Şekil A.1 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	88
Şekil A.2 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	89
Şekil A.3 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	90
Şekil A.4 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	91
Şekil A.5 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	92
Şekil A.6 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	93
Şekil A.7 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	94

Şekil A.8 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki).....	95
Şekil A.9 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	96
Şekil A.10 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	97
Şekil A.11 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	98
Şekil A.12 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	99
Şekil A.13 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	100
Şekil A.14 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	101
Şekil A.15 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	102
Şekil A.16 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.....	103
Şekil A.17 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	104
Şekil A.18 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	105
Şekil A.19 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	106
Şekil A.20 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	107
Şekil A.21 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	108
Şekil A.22 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	109
Şekil A.23 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir	

(Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	110
Şekil A.24 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).....	111
Şekil B.1 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	112
Şekil B.2 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	113
Şekil B.3 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	114
Şekil B.4 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	115
Şekil B.5 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	116
Şekil B.6 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	117
Şekil B.7 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	118
Şekil B.8 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).....	119

HK TİP AISİ ÖSTENİTİK PASLANMAZ ÇELİĞİN KUM KALIBA DÖKÜMÜNDE, SOĞUTUCU KULLANIMININ YÜZEY HATALARINA VE MİKROYAPIYA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

ASTM A297 HK paslanmaz çelik, özellikle yüksek sıcaklık direnci ve oksidasyon karşıtı özellikleri nedeniyle tercih edilen bir malzemedir. Bu çelik türü, enerji santralleri, petrokimya endüstrisi ve ısıtma işlem fırınları gibi yüksek sıcaklık koşullarının hüküm sürdüğü birçok ortamda yaygın olarak kullanılır. Bununla birlikte, döküm sırasında hızlı soğuma veya ısıtma işlemleri gibi üretim süreçleri ile, malzemenin mikroyapısal ve mekanik özellikleri değişim gösterebilir.

Kalıp içi soğutucular, döküm işlemi sırasında sıvı metalin daha hızlı bir şekilde katılaşmasını sağlarlar. Bu durum, soğutma hızını değiştirerek, çelikteki tane boyutunu, şeklini ve dağılımını ve dolayısıyla mikroyapıyı etkiler.

Bu çalışmada, kalıp içi soğutucu kullanımının ASTM A297 HK paslanmaz çeliğinin mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini anlamak amacıyla deneyler yapılmıştır. Taramalı elektron mikroskopu (SEM), numunelerin mikroyapısal analizi için kullanılmıştır. Bu yöntemlerle, tane sınırları, çökelti ve olası kusurlar gibi mikroyapı öğeleri görüntülenebilmiştir. X-ışını difraksiyonu (XRD), numunelerin faz bileşimi ve saflığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Bu tekniklerin birleşimi, soğutucunun mikroyapı üzerindeki etkisinin tam bir resmini çizmek için gereklidir.

Malzemenin performansını ve uygulama uygunluğunu belirlemek için mekanik testler yapılmıştır. Çekme testleri, çeliğin gerilme altındaki davranışını ve dayanımını ortaya koymuştur; sertlik testleri, çeliğin yer değiştirmeye karşı direncini değerlendirmiştir; darbe testleri ise çeliğin darbe yükleri altında ne kadar enerji emebildiğini ve bu koşullar altında nasıl başarısız olduğunu göstermiştir.

Çalışma bulguları, yüksek soğutma hızlarının, daha ince taneli bir mikroyapıya yol açtığını ve bu durumun çeliğin sertliğini ve çekme dayanımını artırdığını göstermiştir. Bununla birlikte, ince taneli yapılar genellikle darbe yükleri altında daha az enerji emebilir, bu da yüksek soğutma hızlarının darbe tokluğunda kısmi olarak azalmaya yol açabileceği anlamına gelir. Ayrıca, soğutma hızındaki artışın, çökelti miktarını ve dağılımını değiştirebileceği ve bu durumun da malzemenin toplam mekanik performansını etkileyebileceği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, bu çalışma, ASTM A297 HK paslanmaz çeliğinin üretim süreçlerinin ve özellikle kalıp içi soğutma yöntemlerinin, nihai ürünün mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: ASTM A297 HK, östenitik paslanmaz çelik, döküm, mikroyapı, mekanik özellikler, dökümde soğutucu kullanımı, soğutucu.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF USING IN-MOLD COOLERS ON SURFACE DEFECTS AND MICROSTRUCTURE FORMATION IN SAND CASTING OF HK TYPE AISI AUSTENITIC STAINLESS STEEL

ABSTRACT

A STM A297 HK stainless steel is preferred primarily for its high-temperature resistance and anti-oxidation properties. This type of steel is widely used in environments with high-temperature conditions, such as power plants, petrochemical industries, and heat treatment furnaces. However, the material's microstructural and mechanical properties can vary due to production processes such as rapid cooling during casting or thermal treatments.

In-mold coolers enable the liquid metal to solidify more quickly during the casting process. This alteration in cooling rate affects the grain size, shape, and distribution in the steel, thereby impacting its microstructure.

In this study, experiments were conducted to understand the effects of using in-mold coolers on the microstructural and mechanical properties of ASTM A297 HK stainless steel. Scanning Electron Microscopy (SEM) was used for the microstructural analysis of the samples. This method allowed for the visualization of microstructural elements such as grain boundaries, precipitates, and potential defects. X-ray Diffraction (XRD) was employed to evaluate the phase composition and purity of the samples. The combination of these techniques is essential to draw a complete picture of the cooler's impact on the microstructure.

Mechanical tests were conducted to determine the material's performance and suitability for applications. Tensile tests revealed the behavior and strength of the steel under stress; hardness tests assessed the resistance of the steel to deformation; and impact tests demonstrated how much energy the steel could absorb under impact loads and how it failed under such conditions.

The study's findings indicate that higher cooling rates lead to a finer-grained microstructure, which in turn increases the hardness and tensile strength of the steel. However, finer-grained structures typically absorb less energy under impact loads, suggesting that higher cooling rates might partially reduce impact toughness. Additionally, the increase in cooling rate could alter the amount and distribution of precipitates, which could also affect the material's overall mechanical performance.

In conclusion, this study reveals that the production processes of ASTM A297 HK stainless steel, especially the in-mold cooling methods, have a decisive impact on the final product's microstructural and mechanical properties.

Keywords: ASTM A297 HK, austenitic stainless steel, casting, microstructure, mechanical properties, use of coolant in casting, chill.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Paslanmaz çelikler, yüksek korozyon direnci, mekanik özellikleri ve işlenebilirlikleri nedeniyle birçok endüstriyel uygulamada tercih edilen malzemelerdir. Özellikle ASTM A297 HK tipi paslanmaz çelik, yüksek sıcaklık direnci ve oksidasyon karşıtı özellikleri sayesinde petrokimya, termal işlem fırınları ve güç üretim sektörleri gibi yüksek sıcaklıkların hüküm sürdüğü alanlarda kullanılmaktadır. Bu alaşım, yüksek krom ve nikel içeriği sayesinde sıcaklık dayanımını ve korozyon direncini artırmaktadır. Çelikte bulunan kromun koruma sağlayan rolü, esasen krom ve oksijen arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Krom zengini çelik yüzeyleri, koruyucu bir krom oksit katmanıyla kaplanmadıkça, korozyona ve özellikle oksidatif etkilere karşı oldukça duyarlı ve aktiftir [1]. Ancak gerek fiziksel gerekse mekanik özelliklerin optimize edilmesi, üretim süreçlerinin kontrolüne bağlıdır ve bu süreçlerin ve imalat parametrelerinin anlaşılması, doğru parça üretimi için önemlidir.

Döküm, metal şekillendirme işlemlerinin en eski ve en çok yönlü yöntemlerinden biridir. Döküm süreci, erimiş metalin bir kalıba dökülmesini ve soğutulmasını içerir, böylece metal istenilen şekli alır. Bu süreçte, soğutma hızı mikroyapıyı ve dolayısıyla malzemenin nihai mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilir. Geleneksel yöntemlerle, soğutma hızını kontrol etmek zordur ve genellikle döküm parçasının kalınlığına ve döküm ortamının ısısına bağlıdır. Ancak, kalıp içi soğutucuların kullanımı, soğutma hızını daha hassas bir şekilde kontrol etmeyi ve böylece mikroyapı üzerinde daha fazla kontrol sağlamayı mümkün kılar. Katılaşma sırasında, merkeze kıyasla düzgün olmayan yüzey soğuması nedeniyle dökümlerde gerilimler her zaman mevcuttur [2]. Bu gerilmeler, imal edilen parçanın kusurlu olmasına neden olmaktadır.

Bu çalışmada, kalıp içi soğutucu kullanılarak döküm yöntemiyle üretilen ASTM A297 HK paslanmaz çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin nasıl etkilendiği incelenmiştir. Kalıp içi soğutucuların kullanımının, çeliğin kristal yapısını, tane boyutunu, faz dağılımını ve dolayısıyla mekanik özellikleri ve korozyon direncini

nasıl etkilediği detaylı bir Şekilde araŐtırılmıŐtır. Ayrıca, farklı soğutma hızlarının bu parametreler üzerindeki etkilerini incelemek iÇin sistematik bir deney dizisi tasarlanmış ve uygulanmıştır.

Bu tezin ilerleyen bÖlÜmlerinde, öncelikle ASTM A297 HK paslanmaz Őeliđinin kimyasal ve fiziksel özelliklerine genel bir bakış sunulacak, ardından dÖküm işlemlerinin temel prensipleri ve kalıp iÇi soğutma tekniklerinin önemi açıklanacaktır. Takip eden bÖlÜmlerde, kullanılan metodoloji, deney düzeni ve uygulanan test yöntemleri detaylı bir Şekilde anlatılacaktır. SonuÇ bÖlümünde ise, elde edilen bulgular tartıŐılacak ve kalıp iÇi soğutma kullanılarak dÖküm yöntemiyle üretilen ASTM A297 HK paslanmaz Őeliđinin mikroyapısal ve mekanik özelliklerindeki değişimler üzerine kapsamlı bir değerlendirme yapılacaktır.

Bu araştırma, paslanmaz Çelik dÖküm parÇalarının performansını ve dayanıklılığını artırmak iÇin kritik olan, dÖküm sürecinde soğutma yönetiminin daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Ayrıca, endüstriyel uygulamalar iÇin malzeme seŐimi ve işleme rehberliği sağlayarak, ASTM A297 HK gibi yüksek performanslı paslanmaz Çeliklerin daha verimli kullanımını teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

BÖLÜM 2. PASLANMAZ ÇELİKLER

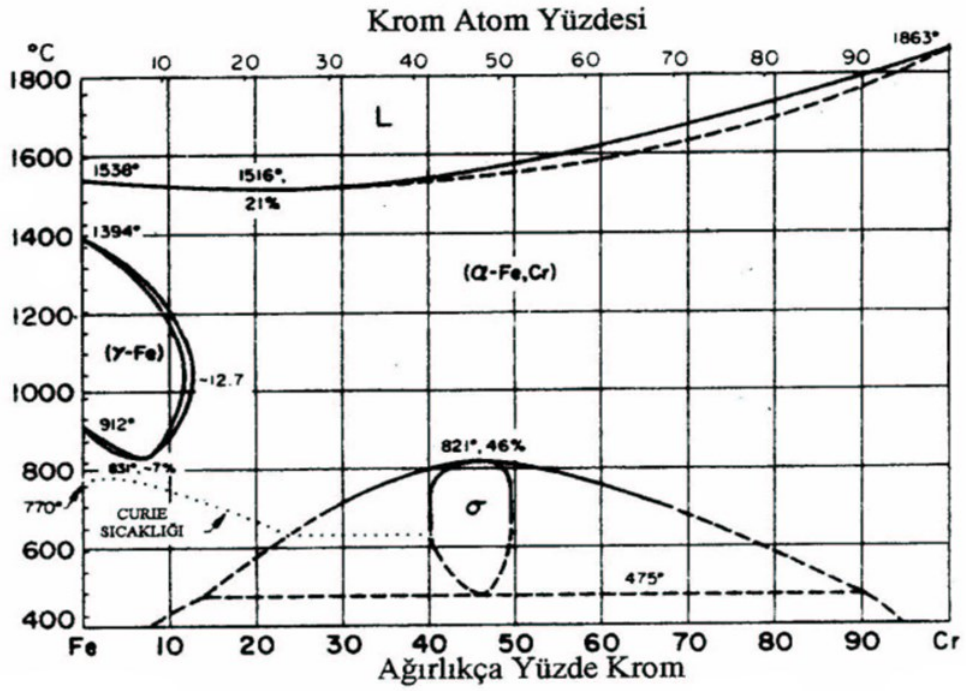
Paslanmaz çelik, korozyona karşı üstün direnci ve yüksek dayanıklılığı sayesinde endüstriyel uygulamaların çeşitli alanlarında tercih edilen kritik bir malzemedir. Bu özel metalin geniş kullanım yelpazesi, temel bileşenlerinin yanı sıra, çeşitli alaşımlarla sağlanan mükemmel mekanik ve estetik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Paslanmaz çeliğin anahtar yapı taşları arasında demir ve krom bulunur, ancak bu çeliğin benzersiz ve çok yönlü nitelikleri, çeşitli alaşım elementlerinin stratejik kombinasyonlarıyla elde edilir.

Krom, paslanmaz çeliğin korozyon direncinin temelini oluşturan kritik bir elementtir. Bu element, atmosferdeki oksijenle etkileşime girerek çeliğin yüzeyinde koruyucu bir krom oksit tabakası oluşturur. Bu ince, fakat oldukça dayanıklı film, metal yüzeyi ile çevresindeki oksijen arasında bir bariyer görevi görerek, altındaki demirin daha fazla oksijenle reaksiyona girmesini önler ve böylece korozyon sürecini engeller. Kromun alaşım içindeki oranı ne kadar yüksek olursa, elde edilen paslanmaz çeliğin korozyon direnci de o kadar artar.

Korozyona dayanıklı paslanmaz çelik çeşitleri 650 °C'nin altındaki sulu ve buharlı çalışma ortamlarında kullanıma uygundur, ısıya dayanıklı çeşitler ise 650 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda çalışmak için uygundur. Ancak bu sıcaklık ayrımları bazı durumlarda örtüşür. Korozyona dayanıklı paslanmaz çeliklerin kullanımıyla ilgili temel husus; korozyona karşı direnç yeteneğidir, mekanik özellikler ise ikinci derecede öneme sahiptir. Isıya dayanıklı paslanmaz çelikler için ise; sürünme ve kopma dirençleri öncelikli konulardır [3]. Paslanmaz çelik alaşımlara ait ikili ve üçlü faz diyagramları mevcuttur (Şekil 2.1, 2.2).

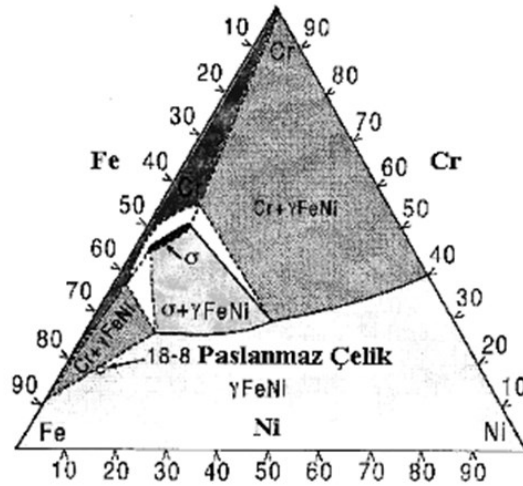
Bununla birlikte, paslanmaz çeliğin performansı sadece kromla sınırlı değildir; nikel, molibden, vanadyum, mangan ve azot gibi diğer alaşım elementleri de çeliğin mekanik ve kimyasal özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Nikel, örneğin, çeliğe hem yüksek sıcaklık dayanımı sağlar hem de mükemmel şekillendirme kabiliyetleri

kazandırır. Mangan ve azot, çeliğin genel mukavemetini ve sertliğini artırarak, daha zorlu çalışma koşullarında bile üstün performans sağlamasına yardımcı olur. Molibden, özellikle klorürler gibi agresif ortamlarda korozyon direncini daha da güçlendirir. Bazı durumlarda östenitik paslanmaz çeliğe katılan bakır elementiyle beraber alaşımın artan mukavemetinin, düşük deformasyon sıcaklıklarında gerinimin neden olduğu martenzit oluşumuyla birlikte açıklandığı gözlemlenmiştir [4].



Şekil 2.1 : Demir krom faz diyagramı [5].

Paslanmaz çelik, geniş bir mekanik özellik yelpazesine sahiptir. Bu özelliklerin başında yüksek mukavemet, tokluk ve yorulma direnci gelir. Mukavemet, bir malzemenin şekil değiştirmeden ne kadar yük altında kalabileceğini belirtirken, tokluk, malzemenin darbe veya ani yükler altında kırılmadan ne kadar enerji emebileceğini ifade eder. Paslanmaz çelik, sıkılaştırma ve ısıl işlemlerle farklı mekanik özellikler kazanabilir. Örneğin, bazı paslanmaz çelik türleri, sertleştirilerek yüksek mukavemet elde edebilirken, diğerleri daha esnek ve dayanıklı olabilir.



Şekil 2.2 : Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı [6].

Isıya dayanıklılık açısından paslanmaz çelik, genellikle yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan özelliklerini koruyabilme yeteneğine sahiptir. Bu, paslanmaz çeliğin petrokimya, enerji üretimi gibi sektörlerde tercih edilmesinin ana nedenlerinden biridir. Yüksek sıcaklıklarda, paslanmaz çeliklerin mikro yapısı değişebilir, ancak uygun alaşım elementleri ile bu yapıların sıcaklık dayanımları optimize edilebilir.

Korozyon direnci, paslanmaz çeliğin en belirgin özelliklerinden biridir. Krom, paslanmaz çeliğin yüzeyinde bir oksit tabakası oluşturarak malzemeyi dış ortamdandan korur. Bu tabaka, malzemenin yüzeyine oksijenle temas ederek sürekli yenilendiği için, çizikler ve hasarlar bile bu koruyucu tabakanın yeniden oluşmasına engel olmaz. Bazı paslanmaz çelik türleri, özellikle deniz suyu, asidik ortamlar veya yüksek klor içeren ortamlar gibi agresif koşullarda bile mükemmel korozyon direnci gösterebilir.

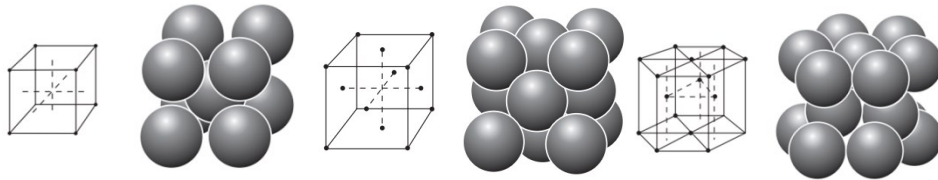
Paslanmaz çeliklerin elektrik iletkenliği, karbonlu çeliklerin ısı iletkenliği ile kıyaslandığında, karbonlu çeliklere göre oldukça düşük olduğu gibi, elektrik öz direnci de karbonlu çeliklere göre altı kat daha yüksektir [7].

Alaşım elementlerinin etkisi altında, paslanmaz çeliklerin ısı ve korozyon direnci önemli ölçüde değişkenlik gösterebilir. Örneğin, molibdenin eklenmesi, klorür içeren ortamlarda korozyon direncini artırırken; vanadyum ve niobyum, yüksek sıcaklıkta mukavemeti artırabilir. Yapılan çalışmalarda; artan karbon ve mangan ilavesi ile liquidus ve solidus sıcaklıklarının azaldığı fakat, artan karbon ilavesi ile katılma aralığı artarken, mangan oranındaki artışın katılma aralığını değiştirmedeği

gözlemlenmiştir [8]. Kısacası, her bir paslanmaz çelik türünün benzersiz alaşım bileşenleri, belirli uygulamalar için ideal özellikleriyle sonuçlanır. Bu nedenle, her türlü uygulama için en uygun paslanmaz çelik türünün dikkatlice seçilmesi gerekir.

Paslanmaz çeliğin benzersiz özelliklerinin kombinasyonu, onu birçok endüstride vazgeçilmez kılar. Örneğin, gıda ve içecek endüstrisinde, paslanmaz çelikten yapılmış ekipmanlar temizlenmesi kolaydır ve bu da hijyenik koşulların sürdürülmesine yardımcı olur. Tıbbi aletlerde, çelik biyouyumludur ve sterilize edilmesi kolaydır, bu nedenle cerrahi aletlerden protezlere kadar birçok üründe tercih edilir. Enerji endüstrisinde, özellikle deniz altı petrol ve gaz boru hatlarında, paslanmaz çeliğin korozyon direnci esastır. İnşaat sektöründe ise estetik ve dayanıklılık nedeniyle hem iç mekanlarda hem de dış mekanlarda sıkça kullanılır. Otomotiv endüstrisinde, hafiflik ve mukavemetin bir arada olması, paslanmaz çeliği cazip kılar. Bunlar, paslanmaz çeliğin çeşitli kullanım alanlarından sadece birkaçıdır; gerçekte, bu malzeme hemen hemen her sektörde karşımıza çıkar.

Paslanmaz çelikler genellikle farklı kübik kristal yapılarına sahiptir. Bunlar genellikle; yüzey merkezli kübik (YMK), hacim merkezli kübik (HMK) ve hegzagonal sıkı paketlenmiş (HSP) yapılar olarak sınıflandırılırlar (Şekil 2.3). Ancak, endüstriyel uygulamalarda en yaygın olarak kullanılan yapının genellikle yüzey merkezli kübik (YMK) yapı olduğu bilinmektedir. Bu yapı, atomların kafesleri ve boşlukları arasında yüksek düzeyde atom hareketliliğine izin verir, bu da çeliğin işlenebilirliğini artırır. Paslanmaz çelikler, dayanıklılık, korozyon direnci ve estetik görünüm gibi özellikleriyle tanınır ve çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılır. [9]



Şekil 2.3 : Kafes yapıları (Soldan sağa doğru sırasıyla; Hacim Merkezli Kübik (HMK) Yapı, Yüzey Merkezli Kübik (YMK) Yapı ve Hegzagonal Sıkı Paket (HSP) [10].

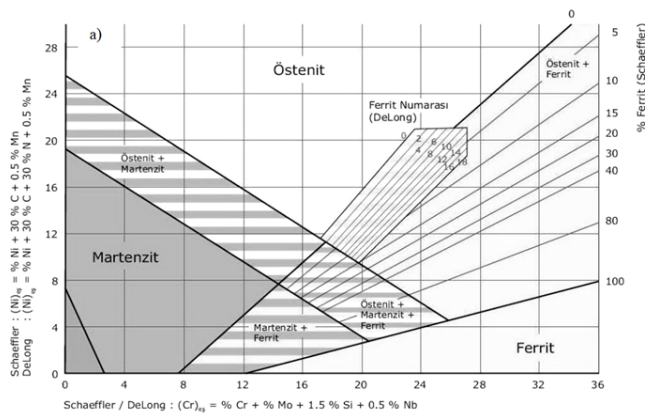
Paslanmaz çelikler hem korozyona karşı hem de yüksek sıcaklık direnci uygulamaları için kullanılır. Paslanmaz çelikleri tanımlamak için aşağıda listelenen üç basamaklı bir sistem kullanılır. Aşağıdaki listede üç haneli numara genellikle

alaşım elementlerinin türüne ve grubuna karşılık gelir. İlk rakam grup belirleyicisi olup son iki rakam spesifik alaşım türünü belirtir:

- 2xx Krom-nikel-manganez sertleştirilemeyen, östenitik, manyetik olmayan
- 3xx Krom-nikel sertleştirilemeyen, östenitik, manyetik olmayan
- 4xx Krom sertleştirilebilir, martenzitik, manyetik
- 4xx Krom sertleştirilemeyen, ferritik, manyetik
- 5xx Krom düşük kromlu, ısıya dayanıklıdır.

Paslanmaz çelikteki korozyon direnci, çeliği koruyan ince, yapışkan, stabil bir krom oksit veya nikel oksit filmi sayesinde elde edilir. Bu yapışkan oksit filmi geliştirmek için en az %10 krom gereklidir [10].

Ayrıca, Schaeffler ve DeLong diyagramları (Şekil 2.4), kaynakçılık endüstrisinde önemli bir rol oynayan paslanmaz çeliklerin kaynağı ve ısıtım işlem davranışlarını anlamak için kullanılan araçlardır. Schaeffler diyagramı, kaynak esnasında çeliklerin mikroyapısını ve kaynak sonrası çeliklerin meydana gelen fazlarını tahmin etmek için kullanılır. Bu diyagram, kaynakta oluşabilecek istenmeyen fazların oluşumunu öngörmeye yardımcı olur ve kaynak sonrası çelikin mekanik özelliklerini etkileyen önemli bir araçtır. Öte yandan, DeLong diyagramı ise kaynak sonrası ısıtım işlem davranışlarını analiz etmek için kullanılır. Bu diyagram, çeliklerin çeşitli ısıtım koşullarında farklı mikroyapılar oluşturabileceği bilgisini sağlar. Böylece, uygun ısıtım işlem koşullarını belirlemek ve istenilen mekanik özelliklere sahip çelikler elde etmek için kullanılır. Bu diyagramlar, paslanmaz çeliklerin kaynak ve ısıtım süreçlerindeki davranışlarını anlamak ve kontrol etmek için önemli araçlardır. [11]



Şekil 2.4 : Schaeffker ve Delong diyagramları [12].

2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler, paslanmaz çelik ailesinin önemli bir üyesi olarak, demirin ferritik kristal yapısına sahip çeliklerdir. Genellikle karbon içeriği düşük olan bu çelikler, yüksek krom oranları (genellikle %10.5 ila %30 arasında) ile karakterize edilir. Tablo 2.1.1'deki örnek bir alaşımda da gösterildiği gibi, yüksek krom içeriği sayesinde ferritik paslanmaz çeliklerin oksidasyona ve çeşitli korozyon türlerine karşı direncini artırır, bu da onları bazı endüstriyel uygulamalar için ideal kılar [10].

Tablo 2.1.1 : ASTM Grade HC (28Cr, J92605) ferritik döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [13].

	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	C	Mo	P	S
Oran (%)	61,9-74	26-30	0-4	0-2	0-1	0-0,5	0-0,5	0-0,040	0-0,040

Bu çelik türü hacim merkezli kübik (HMK) yapıya sahiptir. Belirli özellikleri elde etmek için bazı türleri molibden, alüminyum, silikon, titanyum ve niobyum ile alaşımlanmıştır. Bu çelikler ferromanyetiktir, iyi bir şekil değiştirme yeteneğine sahiptirler ve çalışılması nispeten kolaydır. Bu çelikler için karbon yüzdesi 0,02 ile 0,5 arasında değişir. Düşük karbon içeriği nedeniyle, sertlikleri sıcaklık altında artırılamaz ve sadece soğuk işlemle orta derecede sertleştirilebilir. Soğuk işlem materyali güçlendirir ve şekil değiştirme yeteneğini azaltır. Karşılaştırıldığında bu çelikler, tavlama durumunda karbon çeliğinin yaklaşık 1,5 katı kadar dayanıklıdır. Tavlama durumunda korozyona karşı en iyi dirence sahiptirler. Bu çeliklerin 400 ile 510°C (750 ile 950°F) sıcaklık aralığına uzun süre maruz kalması, kırılma hızına ve çentik etkisine dayalı mukavemetin kaybına neden olabilir [10].

Ferritik paslanmaz çelikler, korozyona karşı direnci artırmak için molibden ilavesi, taneler arası korozyona karşı çeliği kararlı hale getirmek için ise niobyum (Nb) ve titanyum (Ti) ilavesi gibi çeşitli kimyasal katkı maddeleri ile geliştirilebilirler. Bu katkıları, ayrıca süneklik ve darbe direncini artırıcı etkilere sahiptir. Bu özellikler, bu tür çeliklerin kimya endüstrisinde kullanılan tankların imalatında avantaj sağlamasına olanak tanır. Ferritik paslanmaz çelikler, oda sıcaklığında çeşitli yöntemlerle şekillendirilebilirler, ancak östenitik paslanmaz çeliklere göre daha zor şekillenirler. Bununla birlikte, düşük deformasyon sertleşme hızları, bu çeliklerin

kolayca deforme edilmesine olanak tanır ve soğuk dövme ve soğuk şekillendirme işlemleri uygulanabilir [14].

2.1.1. Ferritik paslanmaz çeliklerin özellikleri

Tavlama durumunda, tipik ferritik paslanmaz çeliğin akma mukavemeti, özellikle 444, UNS S 44660 ve S 44627 gibi özel alaşımlı sınıflarda, 240 ila 380 MPa (35 ila 55 ksi) aralığındadır. Bu özel alaşımlı çelikler, aynı zamanda süperferritik paslanmaz çelikler olarak da adlandırılır ve korozyona karşı, Tablo 2.1.1.1'de de gösterildiği gibi, iyi dirence sahiptirler. Ayrıca gerilme korozyon çatlamasına ve çukurlaşmaya karşı dirençleri özellikle iyidir [10].

Mekanik özellikler açısından ferritik paslanmaz çelikler, genellikle iyi bir mukavemet ve sertlik sunar, ancak östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha sınırlı süneklilik ve tokluk değerlerine sahiptirler. Bu durum, bazı tasarım ve uygulama senaryolarında bu malzemenin kullanımını kısıtlayabilir.

Tablo 2.1.1.1 :ASTM Grade HC (28Cr, J92605) ferritik döküm paslanmaz çelik özellikleri [13].

Mekanik Özellikler		Termal Özellikler		Genel Özellikler	
Elastiklik Modülü	200 GPa	Korozyon Dayanımı için Maksimum Sıcaklık	460 °C	Yoğunluk	7,6 g/cm ³
Yorulma Dayanımı	96 MPa	Erime (Solidus)	Başlangıcı 1370 °C	Elektriksel İletkenlik (Eşit Hacim)	% 2,2 IACS
Kopma Uzaması	% 6,0	Erimenin Tamamlanması (Liquidus)	1410 °C	Termal Genleşme	11 mikron/mK
Çekme Dayanımı (UTS)	430 MPa	Maksimum Sıcaklığı	Çalışma 1100 °C	Özgül Isı Kapasitesi	490 J/kg-K

Isıl işlemlere karşı olan tepkileri, östenitik paslanmaz çeliklere göre daha sınırlıdır. Ferritik paslanmaz çelikler, sertleştirilebilirlik özellikleri bakımından martenzitik

çeliklere göre daha az esnektir ve genellikle yüksek sıcaklıkta oksidasyona karşı daha az dirençlidirler.

Korozyon direnci, ferritik çeliklerin en dikkat çekici özelliklerinden biridir. Bununla birlikte, yüksek klorür içeren ortamlarda dupleks veya östenitik çeliklere kıyasla daha az direnç gösterebilirler. Özellikle tuzlu su gibi agresif ortamlarda kullanım için önerilmemektedirler.

Alaşım elementlerine gelince, ferritik paslanmaz çeliklerde molibden veya alüminyum gibi elementlerin eklenmesi, korozyon direncini ve oksidasyon direncini artırabilir. Ancak, genel olarak bu çelikler, alaşım bileşenleri sayesinde belirli uygulamalar için optimize edilmemişlerdir ve özellikle belirli ortamlarda ve sıcaklıklarda kullanılmaları önerilir.

Feritik paslanmaz çelik, östenitik paslanmaz çelikle karşılaştırıldığında daha düşük maliyet, daha yüksek termal iletkenlik, daha küçük lineer genleşme ve stres-korozyon çatlamasına, atmosferik korozyona ve oksidasyona karşı daha iyi direnç gibi özelliklere sahiptir. Düşük maliyet ve iyi özelliklerin birleşimi, feritik paslanmaz çeliği çeşitli uygulama alanlarında daha da çekici hale getirmiştir.

Ancak, geleneksel feritik paslanmaz çeliğin şekillendirilebilirliği östenitik paslanmaz çeliğinki kadar iyi değildir. Kalıplama süreci sırasında sıkça rastlanan çatlama görülmeleri, kalıplama parçalarının görünümüne zarar veriyordu. Bu durum, feritik paslanmaz çelik üretimini ve uygulanmasını yoğun bir şekilde kısıtlamıştır [15].

Sonuç olarak, ferritik paslanmaz çelikler, belirli endüstriyel uygulamalar için uygun maliyetli ve etkili bir seçenek sunar. Ancak kullanım alanlarını seçerken korozyon, oksidasyon direnci ve mekanik özellikler dikkate alınmalıdır.

2.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, paslanmaz çelik ailesinin en geniş ve en yaygın üyesidir. Bu çelikler, temel olarak demir, krom ve nikel alaşımından oluşmaktadır. Östenitik yapının stabilizasyonunda nikelin kritik bir rolü vardır. Tablo 2.2.1'de örnek olarak gösterildiği gibi genellikle yüksek nikel içerikleri, çeliklerin östenitik yapısını korumasına yardımcı olur ve bu da onlara oda sıcaklığında ferromanyetik olmayan bir karakter kazandırır. Östenitik paslanmaz çeliklerde alaşım bileşiminde

fazla miktarda krom bulunması, kaynak esnasında ısı iletiminin azalmasına neden olur [16].

Östenitik paslanmaz çeliklerin ısı iletim yeteneği, karbonlu çeliklerinkinin yalnızca üçte biri kadardır. Bu fark, kaynak işlemi sırasında belirgin bir etkiye sahiptir, çünkü kaynak bağlantısındaki yüksek sıcaklık daha uzun süre korunur ve bu durum bazı zorluklara neden olabilir. Ayrıca, östenitik paslanmaz çeliklerin termal genişleme katsayısı, karbonlu çeliklere göre %50 daha yüksektir. Bu özellik, yapısal tasarımlarda önemli bir faktördür ve bazı kısıtlamalar gerektirebilir [12].

Tablo 2.2.1 : ASTM Grade HK (25Cr-20Ni, J94224) östenitik döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [17].

	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	C	Mo	P	S
Oran (%)	44,8-57,8	24-28	18-22	0-2	0-2	0,2-0,6	0-0,5	0-0,040	0-0,040

Östenitik matrisli çelikler, soğuk ve sıcak şekillendirme işlemleri için uygundur ve yüksek sıcaklık dayanıklılığı ferritik matrisli çeliklerden daha yüksektir. Soğuk işlemler sırasında deformasyon etkisi, matrisin kısmen martensite dönüşmesine neden olabilir. Ayrıca, bu çelikler daha yüksek termal genişleme katsayısına, daha düşük termal iletkenliğe ve daha yüksek oksidasyon ve korozyon direncine sahiptirler. Bu nedenle, bu çelikler farklı uygulamalarda avantaj sağlarlar [18].

2.2.1. Östenitik paslanmaz çeliklerin özellikleri

Östenitik paslanmaz çeliğin mukavemeti, hafif karbon çeliğiyle çok benzerdir, tipik akma mukavemeti 200 ila 275MPa (30 ila 40ksi) arasındadır, uzama %40 ila %60 arasında ölçülmektedir. 200 serisi çelikler, tavlama koşullarında daha iyi akma mukavemetine sahiptir, 345MPa'dan 482MPa'ya (yaklaşık 50 ila 70ksi) kadardır. Bu çeliklerin korozyon direnci, çoğu ortamda mükemmeldir. 3xx serisi paslanmaz çeliklerden temel 304 kalitesi, gıda, süt ve içecek endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır. Aynı zamanda oksitleyici ortamlarda da iyidirler; temel olan 304'ün stabilize edilmiş formu, 321 (titanyum stabilizasyonlu) ve 347 (niyobyum stabilizasyonlu) olarak yeniden numaralandırılarak termal olarak indüklenmiş kırılma direnci gösterebilir.

Daha yüksek krom ve karbon seviyesine sahip olan 310, daha yüksek sıcaklık hizmetleri için uygundur; benzer şekilde, 316, deniz ortamından direnç kazandırmak için molibden ile alaşımlıdır (Tablo 2.2.1.1).

Bununla birlikte, bu çeliklerin bazı sınırlamaları da vardır. Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek sıcaklıkta uzun süreli servislerde krom karbür oluşumu riskine sahip olabilirler. Bu, intergranüler korozyona neden olabilir. Ancak bu sorun, karbon içeriği düşük olan veya stabilize edilmiş sürümlerle azaltılabilir.

Tablo 2.2.1.1 : ASTM Grade HK (25Cr-20Ni, J94224) östenitik döküm paslanmaz çelik özellikleri [17].

Mekanik Özellikler		Termal Özellikler			Genel Özellikler	
Elastiklik Modülü	200 GPa	Korozyon için Sıcaklık Dayanımı	440 °C	Yoğunluk	7,8 g/cm ³	
Yorulma Dayanımı	150 MPa	Erime (Solidus)	Başlangıcı 1350 °C	Elektriksel İletkenlik (Eşit Hacim)	% 2,0 IACS	
Kopma Uzaması	% 11	Erime Tamamlanması (Liquidus)	1400 °C	Termal Genleşme	17 mikron/mK	
Çekme Dayanımı (UTS)	500 MPa	Maksimum Sıcaklığı	Çalışma 1100 °C	Özgül Kapasitesi	Isı	480 J/kg-K

Soğuk işlem ile sertleştirilebilir, ancak ısı ile sertleştirilemezler. Bu özellik, östenitik çeliklerin soğuk şekillendirilmesini kolaylaştırırken, sertlik veya mukavemet ihtiyaçlarını karşılamak için gerekli olabilecek ısı ile sertleştirilmelerini sınırlamalarını getirir. %0,3 vanadyum eklemenin incelenen östenitik paslanmaz çeliklerin nihai çekme dayanımı üzerinde ise çok az etkisi vardır [19].

Tablo 2.4’de rakamsal olarak özelliklerine değinilen östenitik paslanmaz çelikler, korozyon direnci, mükemmel mekanik özellikler ve geniş formabilite kapasitesi nedeniyle birçok endüstride popülerdir. Ancak, uygulamalarını seçerken, özellikle yüksek sıcaklıkta uzun süreli hizmetlerde dikkate alınması gereken sınırlamaları da vardır.

2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler, genellikle yüksek karbon ve krom içeriğine sahip olan, ısıya duyarlı bir yapıya sahip çeliklerdir. Bu çelik türü, hızla soğutulduğunda östenitten martensite dönüşen bir yapıya sahip olmasıyla tanınır. Yüksek mukavemet ve sertlik elde etmeye yönelik geleneksel yaklaşım, östenizasyon ve ardından su verme yoluyla tam bir martenzitik yapının oluşumunu içerir [20,21] . Bununla birlikte, bu geleneksel yapı, martenzitik dönüşümün neden olduğu önemli iç gerilim nedeniyle sıklıkla kırılabilirlik ve sınırlı süneklik sergiler [22]. Bu dönüşüm, martenzitik paslanmaz çeliklerin sertleştirilebilir olmasına olanak tanır. Tablo 3.2'deki örnek değerlerden de belli olduğu üzere, mikro yapılarındaki bu özellik, martenzitik paslanmaz çeliklere yüksek mukavemet ve sertlik kazandırır. Ancak, bu sertlik, onları diğer paslanmaz çelik türlerine göre potansiyel olarak daha kırılabilir kılar. Karbon içeriği, martenzitik paslanmaz çeliklerin sertlik derecesini belirleyici bir faktördür; yüksek karbon içeriği, genellikle daha yüksek bir sertlik anlamına gelir.

Tablo 2.3.1 : ACI-ASTM CA6N (J91650) martenzitik döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [23].

	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	C	Mo	P	S
Oran (%)	44,8-57,8	24-28	18-22	0-2	0-2	0,2-0,6	0-0,5	0-0,040	0-0,040

Bu alaşımlar temelde FeCrC alaşımlarıdır ve sertleştirilmiş bir durumda martensit olan hacim merkezli tetragonal (HMT) kristal yapıya sahiptirler. Bu çelikler ferromanyetiktir; ısı işlem ile sertleştirilebilirler. Bu çelikler, hafif ortamlarda korozyona karşı direnç gösterebilir. Az miktarda nikel eklenmesi, korozyon direnci özelliklerini artırır. Genellikle, bu çelikler %11,5 ila %18 krom ve en fazla %1,2 karbon içerir. Krom-karbon oranı, martenzitik yapının korunması için dengelenir. Bu çelik grubuna örnekler olarak: 403, 410, 420 ve 501 serileri verilebilir.

Diğer alaşım elementleri olan vanadyum, silikon, tungsten ve niyobyum da sertleştikten sonra temperlemeyi indüklemek için alaşıma eklenebilir. Tablo 3.1'de örnek olarak gösterildiği gibi, alaşım, martenzitik yapının korunması için çok sınırlı ölçekte olmalıdır.

2.3.1. Martenzitik paslanmaz çeliklerin özellikleri

Tavlama durumunda bu çelikler iyi çekme özellikleri gösterir. Genellikle bu çeliklerin akma mukavemeti yaklaşık 275MPa (40ksi)'dir. Çelik, soğuk işleme ile orta derecede sertlik artışına tepki verir. Tavlama durumunda bu alaşımlar iyi tokluk ve süneklığe sahiptir, bu sertlik ısı işlem arttıkça, artış gösterir. Isıl işleme sertleştirme ve temperleme, akma mukavemetini 1.900 MPa (275ksi)'ya kadar artırır. Genellikle sertlik değerleri, tavlama durumunda 150 HB'den tamamen sertleştirilmiş durumda 600 HB'ye kadar değişir.

Tablo 2.3.1.1 : ACI-ASTM CA6N (J91650) martenzitik döküm paslanmaz çelik özellikleri [23].

Mekanik Özellikler		Termal Özellikler		Genel Özellikler	
Elastiklik Modülü	1900 GPa	Korozyon Dayanımı için Maksimum Sıcaklık	390 °C	Yoğunluk	7,8 g/cm ³
Yorulma Dayanımı	640 MPa	Erime Başlangıcı (Solidus)	1400 °C	Elektriksel İletkenlik (Eşit Hacim)	% 2,6 IACS
Kopma Uzaması	% 17	Erime Tamamlanması (Liquidus)	1440 °C	Termal Genleşme	9,9 mikron/mK
Çekme Dayanımı (UTS)	1080 MPa	Maksimum Çalışma Sıcaklığı	740 °C	Özgül Isı Kapasitesi	480 J/kg-K

Martenzitik paslanmaz çelikler manyetiktir ve kolayca soğuk işlenebilir. Tavlama durumunda iyi toklukları, orta derecede korozyon dirençleri vardır ve kolayca sıcak işlenirler (Tablo 2.3.1.1). Doğru şekilde ısı işlem gördüklerinde, korozyona karşı önemli derecede dirençli olurlar. Yüksek alaşım içeriği nedeniyle, bu çelikler ağır dönüşümler geçirir ve bu yüksek sertleşebilirliğe yol açar. Maksimum sertlik, hava

soğutma ile elde edilebilir. Tip 416 çelikler, işlenebilirliği artırmak için az miktarda kükürt içerir, bu da korozyon direncini azaltır [24].

Korozyon direnci açısından, martenzitik paslanmaz çelikler, yüksek krom içerikleri sayesinde makul bir dirence sahip olmasına rağmen, austenitik veya ferritik paslanmaz çeliklere kıyasla bu direnç genellikle daha düşüktür. Bu nedenle, aşındırıcı ortamlarda kullanım için özel dikkat gerektirirler.

Isıl işlem, martenzitik paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini optimize etmek için kritik bir adımdır. Genellikle, bu çelikler, belirli sıcaklıkta ısıtılır ve hızla soğutularak sertleştirilir. Ardından, kullanım şartlarına göre farklı sıcaklıklarda temperleme işlemi uygulanabilir. Bu, çeliğin iç yapısını optimize ederek hem sertliğini hem de tokluğunu dengede tutar.

Martenzitik paslanmaz çelikler, belirli uygulamalar için idealdir, özellikle yüksek mukavemet ve sertliğin gerektiği durumlarda. Ancak, bu özellikleri elde etmek için dikkatli bir ısıl işlem uygulanması gerekmektedir. Uygun kullanım ve işlem koşulları altında, martenzitik paslanmaz çelikler, performanslarıyla birçok endüstriyel uygulamada etkileyici sonuçlar sunabilir.

2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Dupleks paslanmaz çelikler, adından da anlaşılacağı gibi, iki farklı fazın bir kombinasyonunu içerir: östenitik ve ferritik. Bu özgül mikro yapısı, dupleks çeliklere hem ferritik hem de östenitik paslanmaz çeliklerin karakteristik özelliklerini kazandırır. Genellikle, dupleks çeliklerin mikro yapısında yaklaşık olarak yarı yarıya ferrit ve östenit bulunur.

Tablo 2.4.1 : ACI-ASTM CE8MN (ASTM A890 Grade 2A, J93345) dupleks döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [26].

	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	C	Mo	N	P	S
Oran (%)	56-66,4	22,5-25,5	8-11	0-1,5	0-1	0-0,08	3-4,5	0,1-0,3	0-0,040	0-0,040

Dupleks östenitik-ferritik paslanmaz çelikler, östenit ve ferrit fazlarının korozyon direnci ve mekanik özelliklerini birleştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Östenit fazı, dayanıklılık ve genel korozyon direnci sağlarken ferrit fazı, mukavemet ve gerilmeli

korozyona direnç sağlar [25]. Tablo 2.4.1’de örnek bir dubleks paslanmaz çelik kompozisyonu mevcuttur.

2.4.1. Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Özellikleri

Bu çeliklerin akma mukavemeti 550 ila 690MPa (80 ila 100ksi) arasında değişir. Alaşım, ferritik yapısı nedeniyle yüksek sıcaklıklarda mekanik mukavemet kaybına ve kırılma eğilimine yatkındır. 300°C (570°F) ve üzeri sıcaklıklarda uzun süreli kullanım önerilmez.

Duplex paslanmaz çeliğin en büyük avantajı, özellikle çukurlaşma korozyonuna karşı direncidir. Alaşım, 22 (UNSS32304) ila 47 (UNS S 32750) arasında değişen çukurlaşma direnci eşdeğerini (PRE) sergiler.

Tablo 2.4.1.1 : ACI-ASTM CE8MN (ASTM A890 Grade 2A, J93345) dubleks döküm paslanmaz çelik özellikleri [26].

Mekanik Özellikler		Termal Özellikler		Genel Özellikler		
Elastiklik Modülü	200 GPa	Korozyon için Sıcaklık	Dayanımı Maksimum	440 °C	Yoğunluk	7,8 g/cm ³
Yorulma Dayanımı	370 MPa	Erime (Solidus)	Başlangıcı	1400 °C	Elektriksel İletkenlik (Eşit Hacim)	% 2,2 IACS
Kopma Uzaması	% 29	Erime Tamamlanması (Liquidus)		1440 °C	Termal Genleşme	13 mikron/mK
Çekme Dayanımı (UTS)	500 MPa	Maksimum Sıcaklığı	Çalışma	1100 °C	Özgül Isı Kapasitesi	480 J/kg-K

Bu çelikler, mükemmel korozyon direncine ve yüksek çekme mukavemetine sahiptir (Tablo 2.4.1.1). Bunun yanı sıra, yüksek krom, nikel ve molibden içeriği sayesinde özellikle klorür içeren ortamlarda yüksek korozyon direnci gösterirler. Molibden, tuzlu su ve diğer agresif ortamlara karşı direncin artmasında özellikle kritik bir role sahiptir.

Östenitik çeliklerin duktilite ve tokluk özelliklerini alarak, ferritik çeliklerin mukavemet ve korozyon direnci avantajlarını birleştiren dubleks çelikler, özellikle aşındırıcı ortamlarda ve yüksek sıcaklıkta uygulamalar için oldukça elverişlidir.

Aynı zamanda, dubleks paslanmaz çelikler, ısı genleşme katsayısının daha düşük olmasından dolayı yüksek sıcaklık değişimlerine karşı daha stabil bir yapıya sahiptir. Bu, özellikle sıcaklık değişikliklerinin sıkça yaşandığı endüstriyel süreçlerde büyük bir avantajdır.

Ancak, bu çelik türünün işlenmesi ve kaynak yapılması, diğer paslanmaz çelik türlerine göre daha zor olabilir. Bu, mikro yapılarındaki farklı fazların varlığından kaynaklanır. Bu nedenle, dubleks paslanmaz çeliklerle çalışırken özel işleme ve kaynak yöntemlerinin kullanılması gerekmektedir.

Dubleks paslanmaz çelikler, benzersiz mikro yapıları sayesinde, çeşitli uygulamalarda kullanılacak dengeli bir kombinasyon sunar. Hem mukavemet hem de korozyon direnci konusunda mükemmel performansları, onları birçok endüstriyel uygulama için ideal kılar. Ancak, bu materyalin özelliklerini tam olarak değerlendirebilmek için, işleme ve kaynak konusunda özel dikkat gerektiren özelliklerine de hakim olmak gerekir.

2.5. Çökeltme Sertleştirmeli Paslanmaz Çelikler

Çökeltme sertleştirme işlemi, paslanmaz çeliklerin mukavemetini ve sertliğini artırmak için kullanılan bir termomekanik işlemdir. Bu yöntem, özellikle yüksek sıcaklıkta servis şartlarında yüksek mukavemet gereksinimleri olan uygulamalarda tercih edilir. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler, mikro yapılarındaki ince çökelti sayesinde geliştirilmiş mekanik özelliklere sahiptir.

Bu tür paslanmaz çeliklerin sertleştirilmesi, belirli bir sıcaklıkta çözültüye alma işleminden sonra daha düşük bir sıcaklıkta yaşlandırma işlemi gerçekleştirilerek yapılır. Çözültüye alma işlemi sırasında, alaşım elementleri matris içerisinde homojen bir şekilde çözünür. Bu homojen yapı, yaşlandırma işlemi sırasında çökelti nükleasyonu ve büyümesi için ideal bir ortam oluşturur. Yaşlandırma sırasında, matris içerisinde nano boyutlu ya da mikroskobik çökelti oluşur. Bu çökelti, paslanmaz çeliğin plastik deformasyonu sırasında dislokasyon hareketini kısıtlar, bu

da malzemenin sertliğinin ve mukavemetinin artmasına neden olur. Tablo 2.5.1’de bu tür paslanmaz çeliklere ait kimyasal analiz örneği verilmiştir.

Tablo 2.5.1 : H1100 Hardened CB7Cu-1 çökeltme sertleştirmeli döküm paslanmaz çelik kimyasal kompozisyonu örneği [27].

	Fe	Cr	Ni	Si	Mn	C	Cu	N	P	S
Oran (%)	72,3-78,4	15,5-17,7	3,6-4,6	0-1	0-0,7	0-0,07	2,5-3,2	0-0,05	0-0,035	0-0,03

2.5.1. Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin özellikleri

Çökeltme sertleştirme işlemi, paslanmaz çelik alaşımları, 690 ila 1700 MPa (100ksi ila 250ksi) arasında yüksek mukavemet elde edebilir (Tablo 2.5.1.1).

15-7 Mo (UNS S15700) sınıfı, 1590 MPa (230 ksi) verim mukavemetine ve 46 HRC'nin üzerinde bir sertliğe sahiptir, ancak süneklik ölçütü olan uzama %1 ila %15 arasında değişir, bu tüm Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çeliklerin alaşımlarında ciddi derecede düşüktür. Bu alaşımların korozyon direnci en iyi ihtimalle ortadır [10].

Tablo 2.5.1.1 : H1100 Hardened CB7Cu-1 çökeltme sertleştirmeli döküm paslanmaz çelik özellikleri [27].

Mekanik Özellikler		Termal Özellikler			Genel Özellikler	
Elastiklik Modülü	190 GPa	Korozyon Dayanımı için Maksimum Sıcaklık	-		Yoğunluk	7,8 g/cm ³
Yorulma Dayanımı	460 MPa	Erime (Solidus)	Başlangıcı	1430 °C	Elektriksel İletkenlik (Eşit Hacim)	% 2,0 IACS
Kopma Uzaması	% 10	Erime Tamamlanması (Liquidus)		1500 °C	Termal Genleşme	11 mikron/mK
Çekme Dayanımı (UTS)	870 MPa	Maksimum Sıcaklığı	Çalışma	-	Özgül Isı Kapasitesi	480 J/kg-K

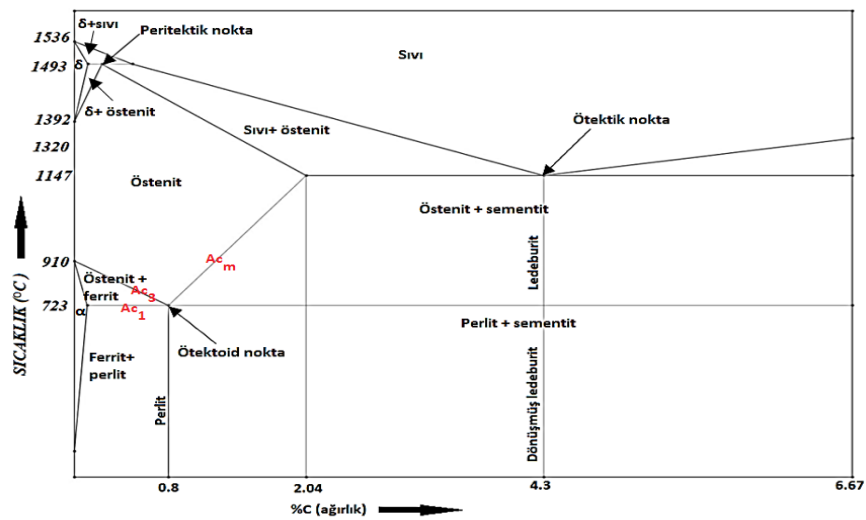
Çökeltme sertleştirmeli paslanmaz çelikler, alüminyum, titanyum, niobyum ve bakır gibi çeşitli elementleri içerebilir. Bu elementlerin varlığı, çökeltilerin tipini, büyüklüğünü ve dağılımını etkiler, bu da sonuçta elde edilen malzemenin mekanik özelliklerini belirler. Örneğin, bakır içeren bir paslanmaz çelikte bakır zenginleşmiş bölgelerde bakır çökeltileri oluşabilir. Bu çökeltiler, sıcaklık ve yaşlandırma süresine bağlı olarak değişik boyut ve dağılımlarda olabilir.

Bu tür paslanmaz çelikler, havacılık, nükleer ve petrokimya endüstrileri gibi yüksek performans gereksinimleri olan alanlarda kullanılır. Ancak, bu tür çeliklerin üretimi ve işlenmesi sırasında yaşlandırma koşulları, çözeltiye alma sıcaklığı ve soğutma hızı gibi parametrelerin doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerekir, çünkü bu parametreler malzemenin son özelliklerini doğrudan etkiler. Bu nedenle, belirli bir uygulama için doğru çelik türünün ve işlem koşullarının seçilmesi, malzemenin performansı açısından kritik bir öneme sahiptir.

BÖLÜM 3. ÇELİKLERİN KATILAŞMASI

Döküm, erimiş malzemenin bir kalıba döküldüğü ve ardından istenen nihai şekli alması için dondurulduğu bir katılaştırma işlemidir. Ürün özelliklerini kontrol eden yapısal özelliklerin birçoğu katılaştırma sırasında belirlenir. Ayrıca, gaz gözenekliliği ve katılma büzülmesi gibi birçok döküm kusuru da katılaştırma olayıdır ve katılma sürecini kontrol ederek azaltılabilir veya ortadan kaldırılabilir.

Bu hususta, demir-karbon denge diyagramı (Şekil 3.1), demir ve karbonun farklı oranlardaki karışımlarının sıcaklık ve kompozisyonlarına bağlı olarak hangi fazların oluşacağını ve bu fazların özelliklerini belirten bir grafiktir. Bu diyagram, demir-karbon alaşımlarının soğuma ve ısınma süreçlerini anlamak için temel bir araçtır ve metalurji, malzeme bilimi ve metal işleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılır. Demir-karbon denge diyagramı, demir ve karbonun farklı fazları olan alfa demir (α -Fe), gama demir (γ -Fe), delta demir (δ -Fe) ve çeşitli karbon bileşiklerini içerir. Bu diyagram, malzemenin sıcaklık ve karbon içeriğine bağlı olarak hangi fazın hakim olduğunu gösterir. Bu bilgi, malzemenin özelliklerini ve işlenebilirliğini belirlemede kritiktir. [9]



Şekil 3.1 : Demir karbon denge diyagramı [28].

Katılaşma, çekirdeklenme ve büyüme olmak üzere iki aşamalı bir süreçtir ve bu iki aşamanın da kontrol edilmesi önemlidir. Çekirdeklenme, erimiş sıvı içerisinde katı parçacıkların oluştuğu zaman meydana gelir. Bir malzeme erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta olduğunda, katı hali sıvıdan daha düşük bir enerjiye sahiptir. Katılaştırma meydana geldiğinde, iç enerji salınır. Ancak aynı zamanda, yeni katının ve ana sıvının arasında arayüzey yüzeyleri oluşturulmalıdır. Bu yüzeylerin oluşumu enerji gerektirir. Çekirdeklenmenin meydana gelmesi için enerjide net bir azalma veya salınım olmalıdır. Sonuç olarak, çekirdeklenme genellikle denge erime noktasının (sıvı ve katının iç enerjilerinin eşit olduğu sıcaklık) biraz altında başlar. Erime noktası ile çekirdeklenmenin gerçek sıcaklığı arasındaki fark, soğuma miktarı olarak bilinir.

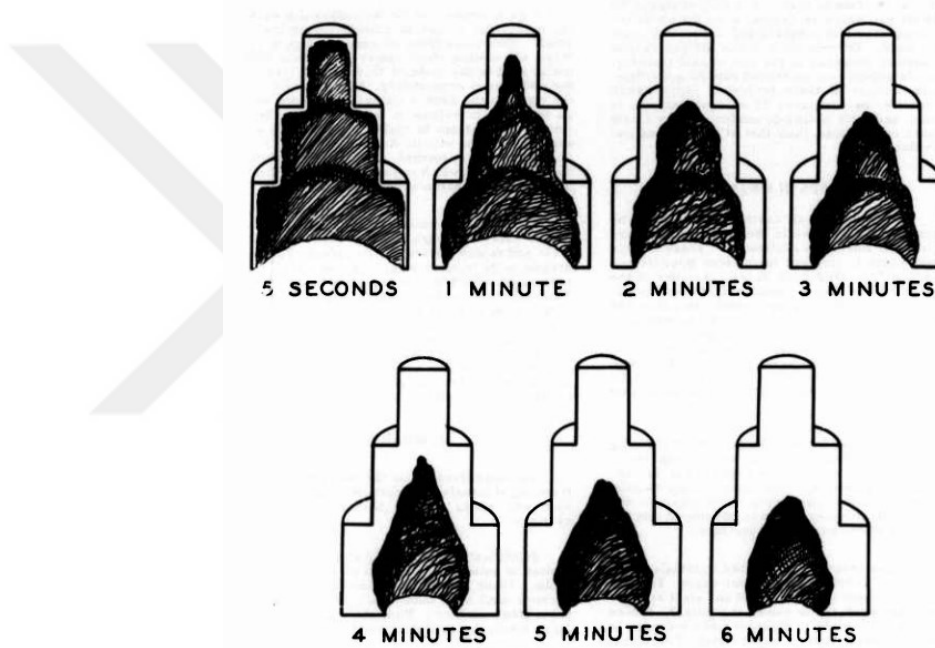
Eğer çekirdeklenme mevcut bir yüzey üzerinde gerçekleşirse, tam çevreleyen bir arayüzeyin oluşturulması gerekmez ve gerekli enerji azalır. Bu tür yüzeyler genellikle kalıp veya kap duvarları şeklinde ya da erimiş sıvı içerisinde bulunan katı safsızlık parçacıkları şeklinde mevcuttur. Buz küpleri bir tepside oluşturulduğunda, ilk katı kabın duvarları üzerinde oluşur. Aynı olay metaller ve diğer mühendislik malzemeleri için de beklenmektedir.

Her çekirdeklenme olayı, nihai dökümde bir kristal veya tane üretir. İnce taneli malzemelerin (birçok küçük tane) gelişmiş mekanik özelliklere sahip olmasından dolayı, çekirdeklenmeyi teşvik etmek için çabalar gösterilebilir. Erimiş sıvıya kalıba dökülmeden önce mevcut katı parçacıklar eklenir. Bu parçacıklar çekirdeklenme için gerekli yüzeyleri sağlar ve ince taneli bir ürünün oluşumunu teşvik eder. Katı parçacıkların eklenmesi uygulamasına aşılama veya tane inceltme denir.

Katılaştırma sürecindeki ikinci aşama olan büyüme; füzyon ısısının sıvı malzemedan alınmasıyla gerçekleşir. Bu ısının nasıl alındığına bağlı olarak büyümenin yönü, hızı ve türü kontrol edilebilir. Katılaştırma arayüzünün malzeme içerisinde sürekli hareket ettiği yönlü katılaştırma, sağlam bir döküm üretmenin garantisi olabilir. Arayüzün sıvı tarafındaki erimiş malzeme, malzemenin sıvıdan kata geçerken meydana gelen büzülme için kalıba sürekli olarak akabilir. Çekirdeklenme ve büyüme hızlarının göreceli oranları, sonuçta oluşan kristallerin boyutunu ve şeklini kontrol eder. Daha hızlı soğuma oranları genellikle daha ince tane boyutuna ve üstün mekanik özelliklere sahip ürünler üretir [29].

Paslanmaz çeliklerin sıvı halden katılaşması, bir dizi kompleks fiziksel ve kimyasal dönüşümü içeren bir süreçtir. Bu dönüşüm, sıcaklık, zaman, alaşım bileşenleri ve soğutma hızı gibi birçok faktöre bağlı olarak farklı karakteristiklere ve mikro yapısal özelliklere yol açar.

Bir paslanmaz çelik eritildiğinde, belli bir sıcaklıkta (ergime sıcaklığında) tamamen sıvı bir faz oluşturur (Şekil 3.2). Bu sıvı fazın soğutulmasıyla, katılaşma başlar ve sıvıdan katıya geçiş süreci gerçekleşir. Soğutma hızı, katılaşan metalin mikro yapısını büyük ölçüde etkiler. Örneğin, yavaş bir soğutma hızı, genellikle büyük tane boyutlarına yol açarken, hızlı bir soğutma, ince tane yapısına yol açar.



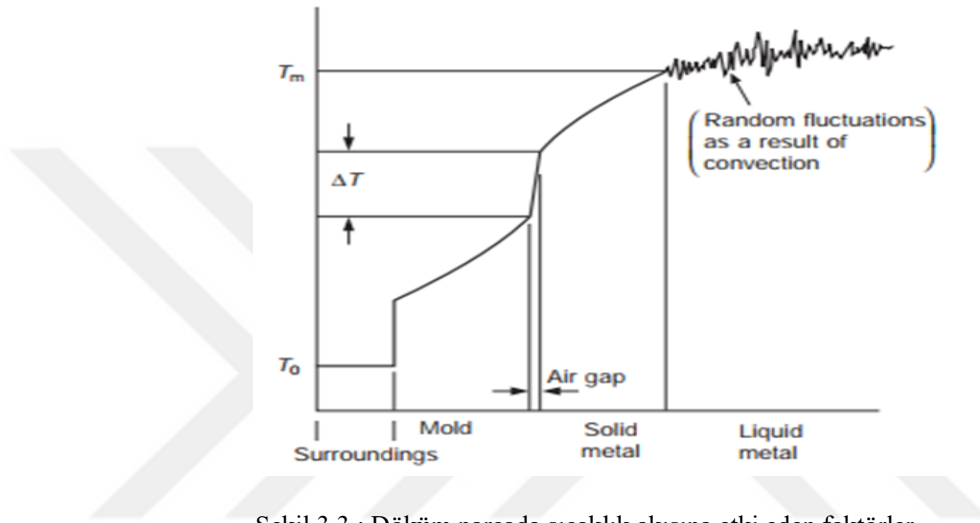
Şekil 3.2 : Zamana göre değişen katılaşma eğilimi (koyu renkli alan sıvı metali, dış yüzeyden başlayan beyaz renkli alan ise katılaşan metali temsil etmektedir) [30].

Ayrıca, katılaşma esnasında, farklı alaşım elementlerinin sıvı fazdan katı faza geçişi homojen olmayabilir. Bu, bazı elementlerin (örneğin, krom veya nikel) sıvı fazda daha fazla kalma eğiliminde olmaları veya soğutma sırasında özellikle belirginleşen mikro yapısal bölgelere neden olmalarıyla sonuçlanabilir. Bu tür bölgelere "segregasyon" denir ve malzemenin mekanik ve korozyon direnci üzerinde önemli bir etkisi olabilir.

Bu sıvı halden katılaşma sürecinde, paslanmaz çeliklerin oluşturduğu kristal yapılar (örneğin, ferritik, östenitik, martensitik) de sıcaklık, soğutma hızı ve alaşımın kimyasal bileşenlerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Özellikle, yavaş soğutulan

bazı paslanmaz çeliklerde, sıvı halden katılaşma sırasında δ -ferrit oluşumu gözlenebilir.

Çeliklerin sıvı halden katılaşması, hem alaşımın kimyasal bileşimi hem de soğutma koşullarının karmaşık etkileşimlerini içerir. Bu etkileşimler (Şekil 3.3), son katı malzemenin mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve korozyon direncini belirleyen ana faktörlerdendir. Bu nedenle, belirli bir uygulama için istenen özelliklere sahip paslanmaz çeliklerin üretimi, katılaşma sürecinin dikkatlice kontrolünü gerektirir.



Şekil 3.3 : Döküm parçada sıcaklık akışına etki eden faktörler.

Sıcak sıvı metalin ısını kaybedip katılaşması zaman alır. Isıyı ne hızda kaybedebileceği, Flemings (1974) tarafından tanımlanan ve dökümün iç kısmından sıcaklık akışına etki eden beş ana direnç bulunmaktadır. Bunlar sırasıyla:

0. Sıvı
1. Katılaşmış metal
2. Metal-kalıp arayüzü
3. Kalıp
4. Kalıbın ortamı

Bu dirençler, Şekil 6'da şematik olarak gösterildiği gibi, seri olarak eklenir.

Genellikle, ilgi odağında olan tüm durumlarda, direnç (0) ihmal edilebilir. Bu, doldurma sırasında zorla konveksiyonla karıştırma ve soğuma sırasında termal konveksiyon sonucudur. Tübulent akış ve karıştırma hızla ısıyı taşır, bu nedenle sıcaklık gradyanları hızla düzelir. Sıvının akışkanlığı genellikle düşüktür, bu nedenle sıvının akışı hızlıdır ve ısı büyük döküm ve ingotların merkezinden kısa bir sürede

taşınır. Bu süre, oranları difüzyonla kontrol edilen kalan dirençlere kıyasla çok daha kısadır.

Birçok durumda, direnç (4) de pratikte ihmal edilebilir. Örneğin, normal kum kalıpları için kalıp ortamı katılaşmayı etkilemez, çünkü döküm içeride katılaştığı zaman kalıp dış yüzeyi hemen hemen sıcak olmaz.

Ancak, genel kurala tabii ki bir dizi istisna bulunmaktadır ve tüm bu istisnalar, kalıp kabuğunun inceliği nedeniyle ortamlarına biraz duyarlı olan ince duvarlı kalıplarla ilgilidir.

3.1. Paslanmaz Çeliklerin Katılaşması Ve Faz Oluşumları

Çözünen elementlerin ayrışması ve hareketi, katılaşma sürecinin bir parçası olarak üniform bir kompozisyon elde etmeyi etkiler. Sıvıdan katıya geçişte çözünen elementlerin ayrışması, katılaşma sürecine bağlı olarak gerçekleşir. Denge durumunda, çözünen elementlerin ayrışma oranları veya katsayıları, özellikle faz diyagramlarına dayalı olarak belirlenir. Denge durumundan sapmış olan çoğu katılaşma sürecinde, çözünen elementlerin ayrışma oranları sıvı/katı arayüzey hızından etkilenir.

Çözünen elementlerin hareketi, katılaşma koşullarına bağlı olarak belirlenir. Hızlı katılaşma sonrasında oluşan katı fazın kimyasal kompozisyonu sıvı fazınkinden farklı değildir. Bu aşamada çözünen elementler arasında herhangi bir hareket olmaz. Ancak, oluşan katı fazın kompozisyonu sıvı fazdan farklı ise, çözünen elementlerin sıvı faz içindeki dağılımı çeşitli modellerde gerçekleşir.

Sıvı fazdaki çözünen elementlerin hareketi yeterince hızlı ise, sıvı fazın kompozisyonu homojen olur ve çözünen içeriği sürekli olarak artar. Eğer sıvı fazdaki çözünen elementlerin hareketi yeterince hızlı değilse, sıvı içinde zenginleşmiş sınır tabakaları oluşur. Sıvı fazdaki çözünen elementlerin hareketi, kararlı bir durum oluşmadan önce zenginleşmiş sınır tabakaları ve sıvı içindeki çözünen element miktarının artmasına neden olur. Çözünen elementlerin hareketi daha da yavaşladığında, zenginleşmiş sınır tabakalarındaki çözünen element miktarı son katılaşma aşamasına kadar artmaya devam eder.

Döküm sürecinde soğumanın düzgün bir şekilde kontrol edilmesi son derece önemlidir çünkü bu, tasarlanan makine veya ekipmanın istenilen mekanik ve fiziksel

özelliklerini etkiler. Ayrıca, soğuma sırasında gerçekleşen faz dönüşümleri yalnızca mekanik özellikleri etkilemekle kalmaz, aynı zamanda malzeme içinde iç gerilmelere neden olur. Bu giderilebilen gerilmeler, malzemede hasara yol açan çatlakların oluşmasına neden olabilir [31].

Mikroyapıda XRD ve DSC tarafından ortaya farklı sürünme davranışları ve değişiklikleri çıkarılabilir ve birçok krom bakımından zengin çökeltmenin tane içinde ve tane sınırlarında dağıldığı çökeltme süreçleri ve faz dönüşümleri gözlemlenebilir. Sigma (σ) fazı, tane sınırları birleşim noktalarında oluşabilir [32].

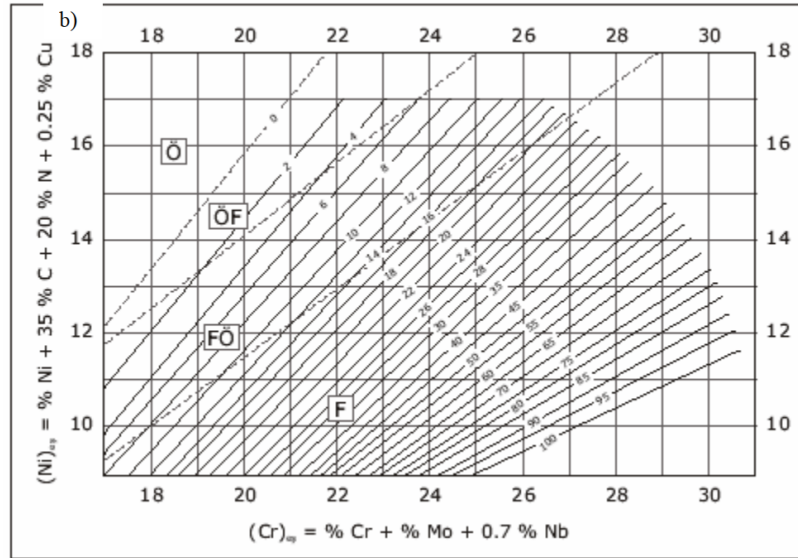
Paslanmaz çeliklerin katılaşma süreci, bu çeliklerin mikro yapılarındaki temel özellikleri ve performanslarını belirleyen kritik bir evredir. Katılaşma, sıvıdan katı hale geçiş süreci olarak tanımlanabilir ve bu süreç, paslanmaz çeliklerde değişken faz yapılarının oluşumuna neden olabilir.

Yavaş soğuma hızı, sadece orta derecede bir alt soğumaya izin verir ve östenit dönüşümü, alt kritik sıcaklığının biraz altında gerçekleşir. Oluşan yapı, nispeten düşük mukavemetli, düşük sertlikte ve yüksek süneklikte kaba taneli perlit ile karakterizedir. Yavaş soğumada, yaklaşık %0.80 karbonun altındaki çeliklerde ferritin çökmesi de sözkonusudur. Çelik dökümlerinin büyük çoğunluğu bu tür çelikten yapılmıştır ve bu nedenle yavaş soğuma sonucu mikroyapı, perlit ve ferritden oluşur.

Daha hızlı soğuma hızları, hava soğutması gibi, lamellar perlitin giderek daha ince hale gelmesine izin verir ve ferritin çökmesi de matris boyunca daha ince ve daha yaygın hale gelir, sonucunda daha az sünek, daha sert ve daha yüksek mukavemetli bir çelik oluşur.

Soğuma hızı, sıvı soğutma gibi, daha da artarsa, azaltılmış dönüşüm sıcaklıklarındaki östenit dönüşümünün ürünü perlit ve ferrit değil, beynit veya martensit olarak adlandırılan yeni bir sert bileşenler serisidir. Bu bileşenler, tamamen sertleştirilmiş çeliğin özellikleridir. Çeliğin tamamen martensitik bir duruma sertleşmesine neden olan soğuma hızına "kritik soğuma hızı" denir ve esas olarak çeliğin bileşimi ve kesitin kalınlığına bağlıdır. Hızlı soğuma ile oluşan martensit, temperlenmemiş durumda çok sert ve kırılgandır ve bu durumdaki çelik, iç gerilmeleri spontan çatlaklarla hafifletmeye eğilimlidir.

Soğuma sırasında ferrit etkilenmezken, yüksek karbonlu östenit, yüksek karbonlu martensite dönüşür. Düşük veya orta karbonlu çelik, şimdi zayıf, sünek ferrit ile yüksek mukavemetli, yüksek sertlikli, yüksek karbonlu martensit karışık bir mikroyapıya sahiptir. Çift fazlı yapı, HSLA (Yüksek Mukavemetli Düşük Alaşım) malzemelerle kıyaslanabilir bir mukavemet sunar, iyileştirilmiş şekillendirme özellikleri ve kaynak yapılabilirlik özelliklerinde herhangi bir kayıp olmaksızın. Yüksek iş sertleşme oranları ve mükemmel uzama, düşük başlangıç akma mukavemeti ile birlikte yüksek nihai çekme mukavemetine yol açar. Yüksek deformasyon hızı hassasiyeti, çeliğin ne kadar hızlı darbe aldığına bağlı olarak daha fazla enerji emdiği anlamına gelir, otomotiv yapılarının çarpışma direncini daha da artırır [29].



Şekil 3.1.1 : Katılaşma faz sınırlarını içeren WRC-1992 diyagramı [12].

Dökme çeliğin alaşım içeriğinin, soğuma sonucu elde edilen yapı üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Artan alaşım içeriği, Şekil 3.1.1'de gösterildiği gibi, östenitin dönüşüm hızını yavaşlatır, bu da nispeten yavaş soğuma hızlarında bile daha ince ve biraz daha sert lamelli yapıların oluşmasına neden olur. Alaşım içeriğindeki daha fazla artış, yavaş soğuma sırasında beyritin oluşmasına neden olur. Bu nedenle, "hava sertleşmesi" çelik, dönüşüm hızının yeterli alaşım eklemeleri ile öyle bir yavaşlatıldığı bir çeliktir ki, östenitik durumdan hava soğutma ile bile sert martensit veya beyrit yapıları oluşur [33].

Östenitik paslanmaz çeliklerin soğuma esnasındaki katılaşma davranışı, genellikle sıvı fazdan önce ferritik bir fazın oluşumuyla başlar. Ancak soğuma hızına ve

alaşımın kimyasal bileşimine bağlı olarak bu ilk oluşan ferrit, soğutulduğunda östenite dönüşebilir. Bu dönüşüm, nikelin östenit fazını stabilize eden özelliğinden kaynaklanır.

Martensitik paslanmaz çeliklerde ise katılaşma sırasında, yavaş soğuma koşullarında ferritik bir yapı öncelikli olarak oluşur. Ancak bu, karbonun çözünürlüğüne bağlı olarak hızla martensite dönüşebilir. Yüksek karbon içeriği, martensitik dönüşümün olasılığını artırır.

Dupleks paslanmaz çeliklerde katılaşma, hem ferritik hem de östenitik fazların aynı anda oluşumunu içerir. Bu türler, her iki fazın dengeli bir kombinasyonu nedeniyle yüksek korozyon direnci ve mukavemet avantajlarına sahiptir. Katılaşma sırasındaki soğuma hızı, bu iki faz arasındaki dengeyi belirleyebilir.

Çeliklerin döküm anındaki ham tane yapısı, katılaşma süreci sırasındaki çekirdeklenme ve büyüme süreci ile yakından ilişkilidir. Çekirdeklenmeyi teşvik etmek veya çekirdek yapısının büyümesini engellemek, ince bir ham tane yapısı üretmeye yardımcı olur. Çekirdeklenmeyi teşvik etmenin etkili yollarından biri, eriyiğe heterojen çekirdek yapısı eklemektir [15].

Ayrıca, paslanmaz çeliklerdeki diğer alaşımlar, çeşitli faz oluşumlarını da etkileyebilir. Örneğin, molibden ve vanadyum gibi elementler, karbür oluşumunu teşvik ederken, nikel ve manganez östenit oluşumunu destekleyebilir.

Katılaşması ve faz oluşumu, paslanmaz çelik malzemelerin nihai özellikleri ve uygulamaları için belirleyici faktörlerdendir. Alaşım bileşenleri, soğuma hızı ve termal işlem koşulları gibi faktörler, bu faz dönüşümlerini derinden etkileyebilir ve malzemenin son performansını şekillendirebilir. Bu nedenle, paslanmaz çeliklerin üretim ve işlenmesi sırasında bu faktörlerin dikkatlice kontrol edilmesi esastır.

3.2. Dökümün Makro Ve Mikro Yapısını Etkileyen Parametreler

Paslanmaz çeliklerin dökümünden elde edilen ürünlerin makro ve mikro yapıları, döküm süreci boyunca etki eden birçok parametreye duyarlıdır. Bu parametreler, hem malzemenin özelliklerini hem de nihai ürünün performansını belirleyebilir.

Döküm sıcaklığı, paslanmaz çeliklerin mikro yapıları üzerinde belirleyici bir rol oynar. Döküm sıcaklığının ideal bir aralıkta olması, homojen bir yapıyı ve istenilen

kristal büyüklüğünü teşvik eder. Aşırı yüksek döküm sıcaklıkları, aşırı tane büyümesine yol açabilirken, düşük sıcaklıklar ise istenmeyen fazların oluşumuna neden olabilir.

Beta-Fe fazının oluşumu, katılaşma hızına özellikle duyarlı görünmektedir. Daha hızlı donma, mikroyapının çoğu özelliğini daha ince yapar, ancak beta-Fe'nin özellikle duyarlı olması için bir neden olabilir. Bunun nedeni, partikülün büyüebilmesi için bifilm sınının viskoz sürüklenmesine karşı uzatabilir bir alt tabaka olarak açılması gerektiğidir. Bu, beta-Fe'nin yalnızca nispeten yavaş soğuma hızlarında oluşabileceği anlamına gelir. Alfa-Fe fazı da beklendiği gibi daha hızlı donma ile baskılanabilir, ancak daha az duyarlıdır, oluşumunu azaltmak için daha yüksek donma hızları gerektirir [34].

Soğutma hızı, döküm sonrası malzemenin mikro yapısını ve makro yapıdaki kusurların oluşumunu doğrudan etkileyen bir diğer kritik parametredir. Hızlı soğutma, ince taneli bir yapı oluşturarak malzemenin mukavemetini artırabilir, ancak aynı zamanda iç gerilmelere ve çatlak oluşumuna da yol açabilir. Yavaş soğutma ise daha büyük tane boyutlarına ve bazen istenmeyen mikro yapısal fazlara neden olabilir.

Alaşım elementlerinin içeriği ve oranı da döküm sonrası yapıyı etkileyen önemli bir faktördür. Örneğin, yüksek krom içeriği, çeliğin paslanmazlık özelliğini artırırken, nikel östenit fazını stabilize eder. Fakat bu elementlerin konsantrasyonlarındaki herhangi bir dengesizlik, mikro yapıda istenmeyen fazların oluşumuna veya tane sınırlarında zayıflamalara neden olabilir.

Dökümdeki gaz içeriği ve saflık derecesi, özellikle makro yapı üzerindeki porozite ve gaz cebi oluşumunu etkiler. Aşırı hidrojen veya oksijen içeren bir döküm, malzemenin içinde gaz kabarcıkları oluşmasına neden olabilir, bu da malzemenin mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir.

Yapılan örnek çalışmalarda, sertleştirme (serbest kayan dislokasyonlar neredeyse hareketsiz ağ dislokasyonlarıyla etkileşerek dislokasyon ağ yapısını inceletir ve dislokasyon yoğunluğunu artırır) bunun yanı sıra, yüksek sıcaklıkta plastik deformasyon sırasında iyileşmenin de gerçekleştiği kesin bir şekilde bilinmektedir. Bu, dislokasyon yoğunluğundaki azalma ve bazen dislokasyonların karşılaştıkları yerlerde nihai duraklama noktasını sağlayan karakteristik bir alt yapı oluşturan

metalografik olarak gözlemlenebilir özelliklerden anlaşılmaktadır [35]. Yüksek sıcaklık mukavemeti ve mikroyapı ilişkileri ile ilişkili sorunların, mukavemetin büyük ölçüde engel yoğunluğuna dayalı olarak rasyonelleştirildiği sürece çözülmeyeceği giderek daha açık hale gelmektedir, bu durumda bu engellerin ne hızda aşıldığına fazla dikkat edilmez. Kristal malzemelerin yüksek sıcaklıklarda iyileşme kontrolünde deformasyonunda, yani engellerin aşılma hızı, iyileşmenin hızı tarafından belirlenir, yani üç boyutlu dislokasyon ağ yapısının büyümesiyle karakterize edilen (uzun bağlar sürekli kayan dislokasyonları tedarik etmek ve plastik gerinim üretmek için büyür, kısa bağlar kaybolmak için küçülür) yapıya sahiptir ve dislokasyon yoğunluğunun azalması ve ortalama bağ uzunluğunun artması ile belirlenir [36]. Metallerin plastik akışı ve gerilme-gerinme eğrisinin şeklinin artık gerinme sertleşmesi ve iyileşme arasındaki dinamik denge tarafından belirlendiğine inanılmaktadır. Gerinme sertleşmesi, dislokasyonların depolanmasıyla, istatistiksel bir doğada gerçekleşir (dislokasyon etkileşimleriyle dislokasyon ağının incelenmesi), ve iyileşme, dislokasyonların yeniden düzenlenmesini ve yok edilmesini içerir (iyileşme ile dislokasyon ağının büyütülmesi). Bu iyileşme süreçleri, dislokasyonların düzlemlerinden çıkararak gerçekleşir, bu ya vida dislokasyonlarının çapraz kaymasının, düşük sıcaklıklarda baskın olan bir yöntemle veya yüksek sıcaklıklarda işleyen vakans difüzyonu tarafından taşınan kenar dislokasyonlarının tırmanışıyla gerçekleşir [37].

Son olarak, döküm sırasında kullanılan kalıp malzemeleri ve kalıp tasarımı, sıvı metalin akışını, soğuma hızını ve sonuçta malzemenin makro ve mikro yapısını etkileyen faktörler arasında yer alır. Özellikle karmaşık geometrilere sahip parçaların dökümünde, metalin akışını optimize eden ve sıcak noktaları veya soğuk böğüm riskini en aza indiren bir kalıp tasarımı kritik öneme sahiptir. Paslanmaz çeliklerin dökümünde elde edilen makro ve mikro yapı, birçok entegre parametrenin sonucudur ve bu parametrelerin her biri, nihai ürünün kalitesi ve performansı üzerinde belirleyici bir etkiye sahiptir.

3.3. Katılaşmayı Etkileyen Unsurlar

Katılaşma işlem süreçleri, temelde iki aşamadan oluşur: bir ısıtma döngüsü ve bir soğutma döngüsü. Üçüncü bir faktör (aşama değil), bir veya daha fazla sıcaklıkta zamanın unsuru ve sıcaklık değişikliklerinin ne hızda gerçekleştiği, herhangi bir çelik

için bir ısı işlem programı oluşturulurken göz önünde bulundurulmalıdır. Sıcaklık değişim hızı, istenen mikroyapıyı ve özellikleri belirlemede soğutma döngüsünde son derece önemlidir.

Paslanmaz çeliklerin sıvıdan katıya geçişindeki katılaşma süreci, birçok endüstride, özellikle döküm ve metalürji alanlarında kritik bir öneme sahiptir. Bu süreç, çeliklerin mikro yapısını, mekanik özelliklerini ve son kullanım özelliklerini doğrudan etkiler.

Paslanmaz çelikler sıvı haldeyken, belirli bir sıcaklıkta, soğutma altında katılaşmaya başlarlar. Bu sıcaklık, çeliğin sıvılaştırma sıcaklığı olarak bilinir ve genellikle çeliğin kimyasal bileşimine bağlı olarak değişir. Paslanmaz çeliklerin katılaşma sıcaklığı, içerdikleri alaşımların (krom, nikel, molibden vb.) yoğunluğuna göre değişkenlik gösterebilir.

Katılaşma hızı, soğutma koşullarına, döküm geometrisine ve çeliğin kimyasal bileşenlerine bağlı olarak farklılık gösterir. Yavaş bir soğutma hızı, daha büyük tane boyutlarına yol açabilirken, hızlı soğutma daha ince tane yapılarına neden olabilir. Tane boyutu ve yapısı, malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir.

Katılaşma esnasında, sıvı metalin içindeki alaşımların dağılımı da kritik bir rol oynar. Bu alaşımların homojen bir şekilde dağılması, malzemenin korozyon direncini ve diğer özelliklerini olumlu yönde etkiler. Ancak, alaşımların heterojen dağılımı, yerel olarak farklı mekanik ve kimyasal özelliklere sahip bölgelerin oluşmasına neden olabilir.

Alüminyum alaşım dökümlerinde gözenekliğin büyümesi üzerine kesin araştırma, Fred Major'un öncülük ettiği Alcan Kingston Laboratuvarları'nda gerçekleştirildi (Tynelius 1993). Bu örnek çalışmada, gaz içeriğinin, alaşım bileşiminin, donma süresinin ve solidus hızının dökümlerdeki gözenek büyümesi üzerindeki etkilerini ayırmak için farklı koşullar altında küçük konik plakalar ve uçtan soğutmalı plakalar döküldü. Okuyucu, bu etkileyici mantıklı çalışmayı incelemesi önerilir; yazma anında bir ilktir ve tekrar edilmemiştir.

Tabii ki normalde, katılaştırma süresi, sıcaklık gradyanı ve katılaştırma hızının etkileri o kadar yakından bağlantılıdır ki, çoğu pratik döküm deneyinde etkin olarak ayrılamazlar. Ancak bu deneyde, döküm geometrisinin etkisinin diğer

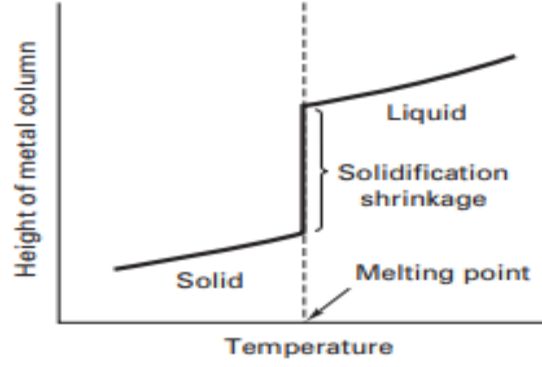
parametrelerden ayrıldığı şekilde akıllıca tasarlanmıştır. Bu sayede, katılaştırma süresi ve solidus hızının gözenekliliği öngörmek için en uygun termal parametreler olduğu ortaya konulmuştur. Bu, çeşitli sıcaklık gradyanı terimlerinden daha iyi sonuçlar vermiştir [34].

Bu süreçte oluşabilecek mikro ve makro segregasyonlar da dikkate alınmalıdır. Bu segregasyonlar, belirli alaşımların veya elementlerin, sıvı metalden katılma sırasında belirli bölgelerde birikmesi sonucu oluşur. Bu, paslanmaz çeliklerin yerel mekanik ve korozyon özelliklerini olumsuz yönde etkileyebilir.

Yolluk sistemi, besleyiciler ve soğutucular yakından ilişkilidir. Birinin işlevi, diğerlerine atıfta bulunmadan açıklanamaz. Bu iç içe ilişki, dökümün kendisine de yansır. En iyi yolluk sistemi, kötü bir besleyici uygulamasıyla boşa çıkabilir, ve soğutucuların yanlış kullanımı, iyi düşünülmüş ve uygun şekilde besleyici ile desteklenmiş dökümlerin hurdaya çıkmasına neden olabilir. Kalıplama sisteminin amacı, erimiş metali kalıba iletmeektir. Besleyiciler, ağır bölümlerde katılma sıkışmasını telafi etmek için sıvı metal sağlamak üzere kullanılır; yani, dökümü "beslerler". Soğutucular, bir dökümde sıcaklık gradyanları oluşturmak ve yönlü katılmanın tam olarak kullanılabilmesine olanak sağlamak için kullanılır. Bir döküm parçasının diğerinden önce katılmasını ya da katılmamasını sağlarlar. Yolluk sistemi, besleyiciler ve soğutucuların uygun kullanımı, dökümcünün iyi bir döküm üretebilmesi için önemli araçlardır [30].

3.4. Katılma Hızının Mekanik Özelliklere Ve Döküm Hatalarının Oluşumuna Etkisi

Kalıp boşluğuna girdiklerinde ve soğumaya başladıklarında, birçok metal ve alaşım belirgin bir hacimsel daralma yaşar. Şekil 3.4.1'de, malzemenin aşırı ısıtılmış sıvıdan oda sıcaklığındaki katı hale gelirken geçirdiği tipik değişiklikleri göstermektedir. Üç ana daralma aşaması vardır: (1) katılma başlamadan önce sıvının soğuyarak daralması, (2) sıvının katıya dönüşmesiyle oluşan katılma daralması ve (3) katılmış malzemenin oda sıcaklığına soğumasıyla katı metalin daralması.



Şekil 3.4.1 : Oda sıcaklığında soğumaya bırakılan metalin katılaşması.

Paslanmaz çeliklerin katılaşma sürecinde sıvı metalin soğuma hızı, elde edilen malzemenin mikroyapısını ve sonuçta mekanik özelliklerini büyük ölçüde etkiler. Sıvı metalden katılaşma hızı, hem dendritik yapının özelliklerini hem de mikro segregasyonu belirleyici bir faktördür.

Sıvı metalden yavaş bir katılaşma hızı, genellikle daha büyük dendritik kolların ve interdendritik bölgelerin oluşmasına neden olur. Bu da genellikle, malzemenin çekme özelliklerine olumsuz bir etki yapar, çünkü büyük dendritik yapılar, çeliğin genel mukavemetini ve tokluğunu azaltabilir. Öte yandan, hızlı katılaşma, daha ince ve sık dendritik yapıların oluşmasını teşvik eder. Bu da malzemenin homojenliğini ve dolayısıyla mukavemetini artırabilir.

Öte yandan, döküm ile imalatta ısının döküm parçadan transferi, kalıp malzemesi ile döküm metal-kalıp arayüzü veya döküm parçasının kendisi tarafından kontrol edilebilir. Eğer kalıbın ısı iletim özelliği düşükse, ısı transferini kontrol eden faktör kalıp malzemesi olur. Aynı şekilde, eğer döküm metalinin ısı iletim özelliği düşükse, ısı transferini kontrol eden faktör döküm alaşımı olur. Ancak, hem kalıbın hem de döküm metalinin iyi ısı iletim özelliklerine sahip olduğu durumlarda, ısı transferini metal-kalıp arayüzü kontrol eder [24].

Büyük donma aralıklarına sahip alaşımlarda, malzemenin kıvamlı (sıvı artı katı) bir durumda olduğu bir zaman dilimi vardır. Malzeme, sıvı fazı ve katı faz arasında soğurken, katı miktarı artar ve küçük, izole sıvı ceplerini sıkıştırma eğiliminde bir yol izler. Bu bölgelere ek sıvının beslenmesi neredeyse imkansızdır ve sonuç olarak dökümde, tüm yüzeylere dağılmış küçük ama çok sayıda çekme gözeniği ortaya çıkar. Bu tür bir çekmenin önlenmesi çok daha zordur ve gözenekli bir ürün

kaçınılmazdır. Dağılmış gözenekliliğe sahip dökümler, düşük süneklik, tokluk ve yorulma ömrüne sahiptir [29].

Gaz boşluğu oluşumu, katılma hızıyla da yakından ilişkilidir. Yavaş katılan bir sıvı metal, genellikle gazların kaçışına daha az fırsat tanır, bu da gaz boşluklarının veya porozitenin oluşumuna daha yatkın olabilir. Hızlı bir katılma süreci, gazların metalden daha etkili bir şekilde kaçmasına yardımcı olarak bu tür kusurların azaltılmasında rol oynayabilir.

Mekanik özellikler üzerindeki etki, katılma hızının yanı sıra kullanılan paslanmaz çelik türüne ve alaşımlama elementlerinin doğasına da bağlıdır. Ancak, genel bir kural olarak; hızlı katılma hızı, homojen bir mikro yapı oluşturarak malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırma potansiyeline sahiptir. Ayrıca, farklı kaynak hızlarının da mikroyapı gelişiminde önemli farklılıklara yol açtığı çalışmalar bulunmaktadır [38].

Özetle katılma hızı, elde edilen ürünün mikro yapısal özelliklerini ve sonuçta mekanik özelliklerini etkileyen kritik bir faktördür. Bu nedenle, belirli bir uygulama için istenen özelliklere sahip paslanmaz çelik üretimi, katılma hızının dikkatlice kontrol edilmesini gerektirir.

3.5. Katılma Kaynaklı Döküm Hataları

Döküm sürecinde sıvı metalin katılması sırasında birçok hata meydana gelebilir. Bu hataların kökenleri, döküm koşullarına, metalin özelliklerine, kalıp tasarımına ve diğer birçok faktöre bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Öncelikle, sıvı metalin hızla soğuması sonucunda çekme çatlakları oluşabilir. Bu, metalin katılma sırasında hacmindeki azalmaya bağlı olarak meydana gelir. Hızlı soğuma, yeterince doldurulmamış bölgelerde veya yoğun stres altında olan bölgelerde çatlak oluşumuna yol açabilir. Eğer dökümde seçilmiş noktalarda besleyiciler sağlanmazsa, dökümde büzülme boşlukları oluşacaktır. Bu boşluklar, dökümün şekline ve metalin türüne bağlı olarak farklı şekillerde oluşabilir [30]. Sıcak noktalar, katılma sürecinde gecikmelere neden olur ve bu durum, kalıba soğutucu yerleştirilerek kontrol edilebilir [39].

3.5.1. Sıcak yırtılma

Katılaşma sırasında sıvı metalin çekilmesi nedeniyle meydana gelir. Bu, katılaşmanın son evrelerinde, sıvı ve katı fazlarının bir arada bulunduğu sıcaklık aralığında oluşur. Bu yırtılmalar, dökümün iç yapısını zayıflatarak mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir.

Yapılan çalışmalarda; östenitik paslanmaz çelikler için soğuma hızı azaldıkça, katılaşma başlangıç sıcaklığı, aşırı soğuma derecesinin azalması nedeniyle arttığı ve akabinde artan kalıntı sıvı fazın ayrışması sonucunda katılaşma tamamlama sıcaklığını düşüğü ve bu durumun da katılaştan yapının çatlama duyarlılığının artmasına neden olduğu ispatlanmıştır [40].

Sıcak yırtılma veya çatlama oluşumunun ana tetikleyicileri genellikle geçiş radyüsündeki yetersizlik ve bu durumun soğuma süreci esnasında yüksek mekanik gerilim oluşturmalarıdır. Bu bölgelerde, besleme mekanizmaları ne kadar yeterli olursa olsun, yırtılma riski devam etmektedir. Geçiş radyüsünün optimize edilmesi, bu tür mekanik kusurları önleme potansiyeli taşırken, çekinti oluşturma riskini de minimize eder. Aynı zamanda, dış soğutucuların uygulanması da benzer bir koruyucu etki yaratabilir.

Ayrıca, kesit kalınlığında meydana gelen ani değişimler, soğuma hızı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir. Bu değişiklikler, yeterli besleme sağlansa bile, yüksek mekanik gerilime ve dolayısıyla katılaşma sonrasında yırtılma veya çatlama riskine yol açabilir. Bu bağlamda, kalın meme tasarımı, bu tür gerilim yüklü "sıcak noktaların" oluşumuna katkı sağlar. Bu tür sorunları önlemek için, kesit değişim bölgelerinde daha fazla ve daha uygun meme yerleşimi önerilmektedir.

Metalurjik tasarım ve döküm süreçlerinde, U-şekilli veya kanal kesitli, T bağlantılı I-şekilli kesit gibi karmaşık geometrilere sahip kalıplar, metallerin doğal büzülmesine mekanik direnç gösterebilirler. Bu, soğuma aşamasında yüksek mekanik gerilimlerin oluşumuna neden olabilir. Bu tip dizaynların sıkça kullanıldığı endüstrilerde, çözüm genellikle soğutma mekanizmalarının optimize edilmesi veya kalıp ve kesit tasarımında yapılan hafifletici değişiklikler ile sağlanır [41].

Mikro yapının heterojenitesi; dökümün farklı bölgelerinde farklı soğuma hızlarından kaynaklanabilir. Bu, bazı bölgelerde istenmeyen mikro yapıların oluşmasına neden olabilir, bu da dökümün genel özelliklerini etkileyebilir.

Katılma sırasında oluşabilecek inklüzyonlar; dökümün içerisinde istenmeyen yabancı malzemelerin veya partiküllerin varlığını belirtir. Bu inklüzyonlar, metali zayıflatabilir ve korozyon direncini azaltabilir.

3.5.2. Gaz boşlukları

Döküm parçalarda gaz boşluklarının oluşumu, genellikle küresel, yassı veya uzamış şekillerde görülebilir. Bu tür boşlukların oluşum mekanizması, temel olarak sıvı metalin katılma sürecinde, belirli bir bileşen bölgesinde gazın hidrostatik basıncının sıvı metalin basıncını aşmasıyla ilişkilidir. Gaz boşlukları, genellikle döküm süreci boyunca en düşük dirençli yolları takip eder ve bu, çoğu durumda bileşenin üst kısmında kümelenmelerine yol açar. Bu gaz boşlukları, yüzeyde baskılanmış alanlar olarak ya da yüzey altında kapsüllenmiş boşluklar şeklinde manifeeste olabilir.

Yüksek üretim hızlarını desteklemek adına, sıvı fazda daha hızlı katılan bir metal alaşımı seçilmiş olabilir. Ancak, bu yaklaşım genellikle gaz basıncının etkin bir şekilde denetlenmesini zorlaştırabilir ve tasarım aşamasında bu faktörün göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Gaz boşluklarının oluşumunu minimize etmek için tasarım aşamasında uygun basınç kontrol mekanizmalarının entegre edilmesi önerilmektedir [41].

Gazların sıvı metal içindeki çözünürlüğü, büyük ölçüde basınç ve sıcaklık koşullarına bağlıdır. Bu çözünürlük, özellikle metal eriyiğinin soğuması ve katılma sürecinde önemli ölçüde değişebilir. Katılma sırasında, çözünmüş gazların metal eriyiğinden ayrılması gereklidir. Eğer bu çözünmüş gazlar etkili bir şekilde çıkamazsa, parça içinde gözeneklerin ve gaz boşluklarının oluşmasına ve sonuç olarak malzeme özelliklerinin olumsuz etkilenmesine neden olabilirler. Bu nedenle, katılma süreci boyunca gazların serbest bırakılması kritik bir öneme sahiptir [42].

Porozite de aynı şekilde, katılma sırasında sıvı metal içindeki gazların serbest kalmasıyla oluşan boşluklardır. Gazların sıvı metalden tamamen uzaklaşmaması sonucu metalin içerisinde küçük gözenekler oluşur. Bu gözenekler, dökümün mukavemetini azaltabilir ve estetik açıdan kabul edilemez hale getirebilir. Metal katılırken gazlar hapsolür. Bazı durumlarda, gaz, metal içinde kimyasal

reaksiyonlar tarafından üretilir. Örneğin, çelikte karbon ve oksijen arasında bazen karbon monoksit oluşturacak reaksiyonlar meydana gelebilir [30].

3.5.3. Çekinti boşlukları ve çöküntüler

Sıvı haldeki metalin soğuması ve katılaşması sırasında ortaya çıkan döküm hatalarıdır. Genellikle kalıp malzemesinin ısıl iletkenliği ile ilgilidir ve metalin büzülmesinin yeterince karşılanamamasından kaynaklanır. Bu tür hatalar; uygun olmayan yolluk ve besleyici sistemlerinden kaynaklanır. Metaldeki yüksek büzülme katsayısı nedeniyle, yüzey ve besleyicilerin hızlı katılaşmasının ardından ısıl büzülmenin devam etmesi sonucu iç çekinti boşlukları oluşur [43].

Tasarımlarda kesitler arası ani geçişler sıklıkla karşılaşılan bir sorun olup, bu durum özellikle ağırlık tasarrufu ve estetik iyileştirmelerin hedeflendiği projelerde kritik bir öneme sahiptir. Ancak tasarım süreçlerinde, kesitlerin farklı kalınlıklara sahip olması, katılaşma dinamiklerini ve dolayısıyla malzeme beslemesini olumsuz etkileyebileceğine dair bir farkındalık eksikliği olabilir. Optimal bir tasarım için, bitişik kesitlerin birbiriyle uyumlu olması esastır; aksi halde, yönlenmiş katılaşma ve uygun beslemeyi sağlamak için ek soğutucu elementlerin kullanılması gerekebilir.

Ayrıca, izole edilmiş ve yetersiz beslemeye tabi tutulan kalın kesitler, tasarımın genel bütünlüğü için risk oluşturabilir. Özellikle ağırlık optimizasyonunun hedeflendiği tasarımlarda, ince kesitlerin devamında yer alan kalın kesitlerin beslenmesi kısıtlayıcı olabilir. Bu durumu daha da karmaşık hale getiren faktör, geçiş radyuslarının inadına küçük tutulmasıdır. Tasarımcılar, sistemin boyut sınırlamalarına uygun çözümler geliştirirken, gereksiz yere küçük geçiş radyusları oluşturabilirler. Eğer mümkünse, bu tür tasarım hataları düzeltilene kadar geçiş radyusları arttırılmalıdır.

Öte yandan, tasarımda gereğinden fazla büyük geçiş radyuslarının kullanılması da olasıdır. Bu durum, modelin formdan çıkarılmasını kolaylaştırmak veya yapısal mukavemeti arttırmak gibi sebeplerle tercih edilebilir. Ancak, eğer geçiş radyusu aşırı büyük tutulursa, bu durum ince kesitlerin yeterli beslemeyi alamamasına yol açabilir. Eğer geçiş radyusunu küçültmek veya yanındaki kesitleri kalınlaştırmak mümkün değilse, bu bölgede ek soğutucu unsurların kullanılması kaçınılmaz olacaktır [41].

3.5.4. Karbon yüzmesi (kish) ve çökme hataları

Karbon yüzmesi, sıvı demir matrisinden ayrılan ve serbest halde bulunan grafitir. Bu türden brüt çökelmeler, sfero dökme demirler ve demir dışı alaşımlar da dâhil olmak üzere, bir veya birden fazla elementin maksimum çözünürlük sınırına yaklaştığı veya bu sınırı aştığı tüm metal sistemlerinde meydana gelebilir. Çökme oluşumu, özellikle soğuma hızı ve alaşımın kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle, soğuma hızını etkileyen faktörler, alaşımın doğru kimyasal analizini belirleme konusunda kritik bir rol oynamaktadır.

Denge faz diyagramları, ideal koşullarda yavaş soğuma sırasında beklenen ötektik bileşenleri ve sınırlı çözünürlük değerlerini sağlar. Ancak, daha hızlı soğuma hızları, çökme oluşumunu engelleyerek farklı bir kimyasal bileşen dağılımına yol açabilir. Örneğin, gri dökme demirin ötektik noktası, yavaş soğuma koşullarında karbon eşdeğeri olarak %4.3'tür. Ancak, uygulamada, hızlı soğuma durumları, örneğin otomotiv sektöründeki ince kesitli döküm parçaları gibi, bu ötektik noktanın %4.5'e kadar yükselmesine neden olabilir. Diğer yandan, daha kalın kesitli döküm parçalar, aynı kimyasal bileşen dağılımında kolaylıkla kish oluşturabilirler. Yavaş soğuma koşulları, örneğin döküm sürecinde yatay yolluk veya döküm sisteminin diğer bileşenlerine olan yakınlık nedeniyle, ötektik bileşenleri ve dolayısıyla çökme davranışlarını da etkileyebilir [44].

Katılaşma esnasında meydana gelebilecek döküm hataları, döküm sürecinin kalitesini ve son ürünün özelliklerini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle, bu hataların tanımlanması, önlenmesi ve giderilmesi, yüksek kaliteli döküm üretiminin temel bir parçasıdır.

3.6. Yönlendirilmiş Katılaşma

Dökümün katılaşması, kalıbın soğutma etkisiyle meydana gelir. Dökme işleminden sadece birkaç saniye sonra, kalıp duvarına yakın ince bir metal tabakası katılaşmaya başlamak için yeterince soğumaktadır. Bu aşamada, katı metalin ince bir kabuğu veya kabuk benzeri bir yapı oluşur. Bu kabuk, daha fazla metal soğudukça yavaş yavaş kalınlaşır, ta ki tüm metal katılaşana kadar. Katılaşma her zaman yüzeyde başlar ve bir kesitin merkezinde tamamlanır. Diğer bir deyişle, katılaşma metalin soğutulduğu yönde ilerler [30].

Yönlendirilmiş katılma, sıvı metalin kontrollü bir şekilde soğutulmuş belirli bir yönde katılmasını sağlama sürecini ifade eder. Bu süreç, daha düzenli mikroyapılar ve geliştirilmiş mekanik özellikler elde etmek için kullanılır. Sıvı metalin hızla soğutulduğu klasik hızlı katılma süreçlerinden farklı olarak, yönlendirilmiş katılma, soğutma hızını ve yönelimini belirli bir kontrol altında tutarak metalin kristal büyümesini yönlendirir.

Katılma hızı, gerekli ısının kalıp tarafından ne kadar hızlı çıkarılabileceğine bağlıdır. Isı çıkarma hızı, metalin hacmi ile yüzey alanı arasındaki ilişkiye bağlıdır. Diğer şeyler eşit olduğunda, ince kesitler kalın olanlardan önce katılır. Bir dökümün dış köşeleri, dökümden ısıyı uzaklaştırmak için daha fazla kalıp yüzeyi mevcut olduğu için diğer kesimlerden daha hızlı katılır. İç köşeler, dökümün katılmanın en yavaş olduğu kesimleridir. Bu durumda kum, iki taraftan metale maruz kaldığı için yüksek sıcaklıklara ulaşır. Bu nedenle, ısıyı bu kadar hızlı taşıyamaz. Katılma hızını kontrol etmek için tasarımda bazen değişiklikler yapılabilir. Ancak, iyi bir döküm üretmek için katılma hızında bir değişiklik gerekiyorsa bile, bu değişiklikler genellikle dökümün şeklinde az veya hiç değişiklik olmayacak yöntemlerin kullanımıyla sınırlıdır. Katılma hızı üç başka şekilde etkilenebilir; kalıbın bazı kısımlarından ısı çıkarma hızını soğutucular ile değiştirerek; uygun kaplama ve besleyicilerle kalıp-ısı değişimi manipülasyonu ve dökme hızının kontrolü ile ve daha sonra tornalanabilecek ekstra metal ekleyerek [30].

Etkili bir besleme sürecinin sağlanabilmesi için ilk olarak, katılmanın besleyicilere doğru ilerlemesi ve besleyicilerde tamamlanması gerekmektedir. Bu tür bir katılma süreci, yönlendirilmiş katılma olarak adlandırılır. Bu aşamada, en önemli kriter, döküm parçası içinde izole sıcak noktaların olmaması ve sıcak noktaların yalnızca besleyicilerin üzerinde oluşmasıdır [30]. Bu kriteri sağlayabilmek için besleyicilerin dökümle en azından aynı anda veya biraz daha sonra katılması gerekmektedir. Kuma dökümlerde, bir dökümün katılma süresi, o dökümün hacmini (V) yüzey alanına (A) oranlayan Chvorinov yaklaşımı [41] ile hesaplanabilir. Bu yaklaşımı gösteren denklem aşağıda verilmiştir.

$$t = k \left(\frac{V}{A} \right)^2$$

(1)

Bu denklemde (t) zaman birimiyle ölçülen katılma süresini temsil eder ve (k) döküm alaşımı ve kalıp malzemesine bağlı olarak değişen sabit bir değerdir. Dökümhane uygulamalarında, (V/A) oranı sıkça kullanılır ve genellikle (cm) biriminde ifade edilen bu oran "modül" (M) olarak adlandırılır.

Yönlendirilmiş katılmanın başarılı bir şekilde gerçekleşebilmesi için, soğutma hızının ve termal gradyanın dikkatlice kontrol edilmesi esastır. Bu kontrol, katılma sırasında tercih edilen kristal yönlerin belirli bir şekilde hizalanmasını teşvik eder. Bu da, malzemeye, yüksek sıcaklıkta daha iyi mekanik dayanım ve korozyon direnci gibi geliştirilmiş özellikler kazandırır.

Birçok endüstriyel uygulamada, malzemenin mekanik özelliklerini optimize etmek için yönlendirilmiş katılma teknikleri kullanılır. Özellikle gaz türbin kanatları gibi yüksek sıcaklıkta çalışan bileşenler için bu yöntem, bileşenin uzun ömürlü ve dayanıklı olmasını sağlar. Yönlendirilmiş katılma, aynı zamanda belirli kristal yönlerin tercih edilmesini sağlayarak malzemenin korozyon ve oksidasyona karşı direncini artırabilir.

Yönlendirilmiş katılma, metal malzemelerin mikroyapılarını ve bu nedenle mekanik özelliklerini optimize etmek için kritik bir teknolojik süreçtir. Bu sürecin uygulanması, metal üretiminin performansını artırarak daha dayanıklı, daha uzun ömürlü ve daha güvenilir bileşenlerin üretimini mümkün kılar.

3.7. Besleyici Ve Soğutucuların Katılma Etkileri

Sıvı metallerin katılma süreci, döküm endüstrisinde önemli bir rol oynar ve bu süreci etkileyen pek çok faktör vardır. Besleyiciler ve soğutucular, metalin katılma sürecinde kritik bir rol oynayan bileşenlerdir ve bu bileşenlerin etkilerini anlamak, döküm kalitesini optimize etmek için hayati öneme sahiptir.

Besleyiciler, katılma büzülmesini telafi etmek için döküm işlemine sıvı metal beslemek üzere tasarlanmış ekstra rezervuarlardır. Bu işlevi etkili bir şekilde yerine getirebilmek için, besleyiciler dökümden sonra katılmalıdır. Eğer tersi doğru olsaydı, sıvı metal katılma besleyicilere doğru akacak ve döküm büzülmesi daha da artardı. Bu yüzden, dökümler, kalıp boşluğunun uçlarından besleyicilere doğru yönlendirilmiş katılmayı üretecek şekilde tasarlanmalıdır. Bu sayede, besleyiciler sürekli olarak ergimiş metal besleyebilir ve tüm kalıp boşluğunun katılma

büzülmesini telafi edebilir. Besleyicilerin, yönlendirilmiş katılaşmanın inceden kalına doğru hareket ettiği ve büzülme boşluğunun dökümden besleyicilere taşındığı şekilde konumlandırılmasına dikkat edilmelidir. Eğer tek bir yönlü katılaşma mümkün değilse, birden fazla besleyici gerekebilir ve dökümün çeşitli bölümleri kendi besleyicisine doğru katılaşabilir [29].

Dökümlerde, katılaşma ve besleme mekanizmaları bir arada düşünüldüğünde, özellikle katılaşma sırasında oluşabilecek büzülme nedeniyle taneler ve dendritler arasında oluşabilecek hataları gidermek için besleyicilerin kullanılması gereklidir [45].

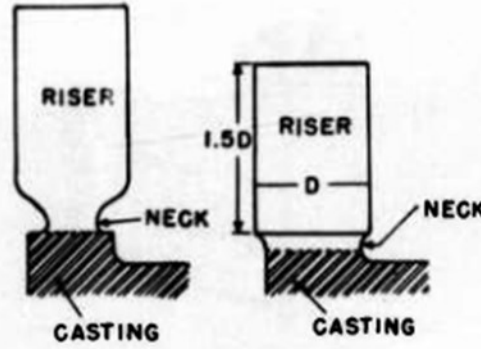
Besleyici ve çıkıcıların, katılaşırken hacmi azalan parçayı sıvı metal ile besleyebilmeleri için atmosfer basıncı ile sürekli temasta olmaları gereklidir. Bu nedenle çıkıcının üstünde bir kabuk oluşmaması için yalıtkan veya egzotermik örtülerden yararlanılır [46].

Besleyiciler, kalıp boşluğunun uç noktalarından besleyiciye doğru yönlü katılaşmanın gerçekleşeceği şekilde yerleştirilmelidir. Bir dökümün en kalın bölgeleri, en son katılaşan bölgeler olacağından, besleyiciler bu yerleri doğrudan beslemelidir. Farklı türlerde besleyiciler vardır. Üst besleyiciler, bir döküm parçanın üstünde yer alır. Konumları nedeniyle, üst besleyiciler daha kısa besleme mesafelerine sahiptir ve kalıbın içinde daha az yer kaplarlar. Tasarımcıya kaplama ve kaplama sistemi için daha fazla özgürlük sağlarlar. Yan besleyiciler, kalıp boşluğuna bitişik, parça çizgisine yatay olarak yer alırlar. Eğer besleyici tamamen kalıp içindeyse, buna kapalı besleyici denir. Atmosfere açıksa, açık besleyici olarak adlandırılır. Kapalı besleyicilerde, besleyicinin üst kısmı kalıp malzemesi ile temas halinde olduğunda ekstra ısı kaybı olur, bu yüzden genellikle açık besleyicilerden daha büyük olarak kullanılmalıdırlar [29].

Kullanılan besleyicilerin ana sebebi, dökümdeki katılaşma büzülmesini telafi etmek için sıvı metal sağlamaktır. Bu ana işlevine ek olarak, bir besleyicinin kullanılmasının diğer nedenleri de vardır. Kalıp tamamen dolu olduğunda görülen hidrolik çarpmayı (bir vananın aniden kapatılmasından kaynaklanan su "darbesi" gibi) engeller, soğuk metali akıtarak dışarı atar ve kalıbı havalandırır. Bir kalıp tamamen metalle doldurulduğu anda, akışkan metalin hareketi nedeniyle kalıptaki basınçta ani ve büyük bir artış olabilir. Eklenen bu basınç, dökümün taşmasına veya

deforme olmuş bir döküm oluşturmasına yetecek kadar olabilir. Bir besleyici, metalin aniden durmak yerine sürekli olarak akmasına izin verir. Bu, bu tür kusurları oluşturan basınç veya hidrolik çarpma etkisini azaltır. Açık bir besleyici, kalıbın ne kadar hızlı dolduğunu görmek için kalıbı döken kişiye görüş sağlar ve metalin akışını düzenlemesi için bir yol sunar. Bir dökümün hızlı bir şekilde dökülmesi gerektiğinde, kumun geçirgenliği, hava ve gazların yeterince hızlı bir şekilde kaçmasına izin vermez. Bu tür bir durumda, besleyiciler gazlar için kolay bir çıkış yolu sağlar [30].

Besleyici boyutu; pratik dökümhane deneyimi, en az metal kullanarak maksimum besleme üretmek için bir besleyicinin en etkili yüksekliğinin çapının 1.5-2 katı olduğunu göstermiştir. Bu değerden daha yüksek bir besleyici, metalin israfına yol açabilir ve döküm sağlamlığına zararlı olabilir. Yanlış yükseklikte bir besleyici ve önerilen yükseklikte bir besleyici, Şekil 3.7.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.7.1 : Sırasıyla, önerilmeyen ve önerilen besleyici boyutlarına örnekler [30].

Soğutucular ise, sıvı metalin istenen hızda ve düzenli bir şekilde katılaşmasını sağlamak için kullanılır. Katılaşma hızı, metalin mikroyapısını ve sonuç olarak mekanik özelliklerini etkileyebilir. Hızlı bir soğutma, daha ince taneli bir yapıya yol açabilir, bu da genellikle daha yüksek mukavemet ve toklukla sonuçlanır. Ancak, aşırı hızlı bir soğutma, çeşitli kusurların oluşumuna neden olabilir. Soğutucuların yerleştirilmesi, katılaşma sürecini kontrol ederek, metalin homojen bir yapıya sahip olmasını ve istenen mekanik özellikleri kazanmasını sağlar.

Çeşitli yöntemler, besleme işleminin (döküm parçaya yedek metal verme işlemiyle, katılaşmayı kontrol ederek) işini yapabilmesi için geliştirilmiştir. Bazıları katılaşmayı yönlendirerek teşvik etmeyi amaçlarken, diğerleri besleyici sayısını ve boyutunu azaltmayı ve böylece dökümün verimini artırmayı hedefler. Bu teknikler genellikle döküm parçanın katılaşmasını hızlandırmak (soğutucular) veya besleyicilerin katılaşmasını yavaşlatmak (egzotermik izolasyon veya tozlar) yoluyla çalışır.

İç soğutucular ise, ısıyı emmek ve daha hızlı katılaşmayı teşvik etmek için kalıp boşluğu içine yerleştirilen metal parçalardır. Ergimiş metal, soğutucu etrafını sardığında, Kalıp boşluğundaki soğutucu çevresiyle dengeye gelmeye çalışırken ısıyı emer. İç soğutucular, nihai dökümün bir parçası olacağı için, dökülen alaşım ile aynı ya da uyumlu bir alaşımdan yapılmalıdır [29].

İç soğutucuların boyutu çok önemlidir çünkü çok büyük olduklarında beslemeyi engelleyebilir, çok küçük olduklarında ise doğru şekilde çalışmazlar. Soğutucu, döküm sağlam olacaksa mükemmel bir şekilde kaynamalıdır. Çok büyük iç soğutucular bazen dökme demirlerde çatlaklara neden olabilir [30].

Dış soğutucular, yüksek ısı kapasiteli ve yüksek termal iletkenliği olan materyaller (örneğin çelik, demir, grafit veya bakır) olup, döküm parçaya temas edebilecek şekilde kalıba yerleştirilirler. Bu materyaller ısıyı emerek çeşitli bölgelerin soğumasını hızlandırır. Soğutucular etkin bir şekilde yönlü katılaşmayı teşvik edebilir veya bir besleyicinin etkin besleme mesafesini artırabilir. Ayrıca, bir döküm için gerekli olan besleyici sayısını azaltmak için de kullanılabilirler. Dış soğutucular sıklıkla döküm parçayla birleşmeyi önlemek için koruyucu bir kaplama, silika kumu veya diğer refrakter malzeme ile kaplanır.

Dökümün herhangi bir bölgesinde katılaşma hızını artırmak gerektiğinde, dış soğutucuların kullanılması tercih edilir. Bu soğutucular, demir, çelik, bronz veya bakırda şekillendirilebilir veya plaka, çubuk veya çubuklar şeklinde oluşturulabilirler.

Dış soğutucuların uygulanmasında takip edilmesi gereken genel kurallar şu şekilde özetlenebilir:

- Yüzeyleri temiz olmalı ve soğutulacak alanı doğru bir şekilde uygun hale getirmelidir.
- Büyük, kütleli soğutucuların uçları ve yanları konik olmalıdır. Soğutucuların kenarlarında çok ani soğuma, çatlaklara yol açan döküm gerilmeleri oluşturabilir.
- Soğutucular, döküme yapışmamaları için yeterince büyük olmalıdır.
- Döküm parçayı çatlatmamalı ya da beslemeye müdahale etmemelidirler.
- Soğutucu ve döküm arasındaki temas alanı kontrol edilmelidir.

Kurallar genellikle, soğutulacak döküm bölümü ile aynı kalınlıkta bir soğutucu kullanılarak sağlanabilir. Bu kalınlıkta bir artış, katılaşma hızını önemli ölçüde artırmayacaktır. Eğer uzun bir soğutucunun yüzeyi pürüzlü ise, soğuyan metalin normal büzülmesi engellenebilir ve dökümde bir çatlak oluşabilir. Dış soğutucuların yaygın bir kullanımı, büzülme gerilmeleri nedeniyle kalıpta çatlama eğilimli olan köşeler veya parçalardır [30].

Besleyiciler ve soğutucular, sıvı metalin katılaşma sürecinde hayati öneme sahip bileşenlerdir. Bu bileşenlerin etkili bir şekilde kullanılması, döküm kalitesini artırır, potansiyel kusurları minimize eder ve metalin istenen özellikleri kazanmasını sağlar.



BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

ASTM A297 HK paslanmaz çelik, yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen östenitik bir paslanmaz çelik türüdür. Özellikle yüksek sıcaklık direnci ve oksidasyona karşı dayanıklılık gereksinimleri olan uygulamalarda öne çıkar. Bu özellikler, özellikle kimyasal bileşiminde bulunan belirli elementler sayesinde.

Kimyasal bileşim açısından, ASTM A297 HK genellikle yaklaşık %25 Cr ve %20 Ni içerir. Bu yüksek krom ve nikel içeriği, materyalin oksidatif ortamlarda ve yüksek sıcaklıklarda bile korozyon direncini artırır. Ayrıca, karbon içeriği genellikle %0.25'in altında olup, bu da çeliğin yüksek sıcaklıkta mukavemetini ve sertliğini artırabilir. Diğer iz elementler olarak mangan, silikon, fosfor ve kükürt de bulunabilir, ancak bunların konsantrasyonları genellikle çok daha düşüktür.

Mekanik özelliklerine gelince, ASTM A297 HK paslanmaz çelik yüksek mukavemet ve sertlik gösterir. Tipik bir çekme mukavemeti, yaklaşık 515 MPa'dır, ancak bu değer ısı işlemine, ürün formuna ve diğer üretim parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Akma mukavemeti yaklaşık 205 MPa'dır. Elongasyon değeri, genellikle %40 civarında olup, bu da ASTM A297 HK'un yüksek süneklik gösterdiğini işaret eder. Ayrıca, Brinell sertlik değeri, genellikle 217 HB'nin altında olup, bu da malzemenin yüksek sıcaklıklarda bile mükemmel bir sertlik değerine sahip olduğunu gösterir.

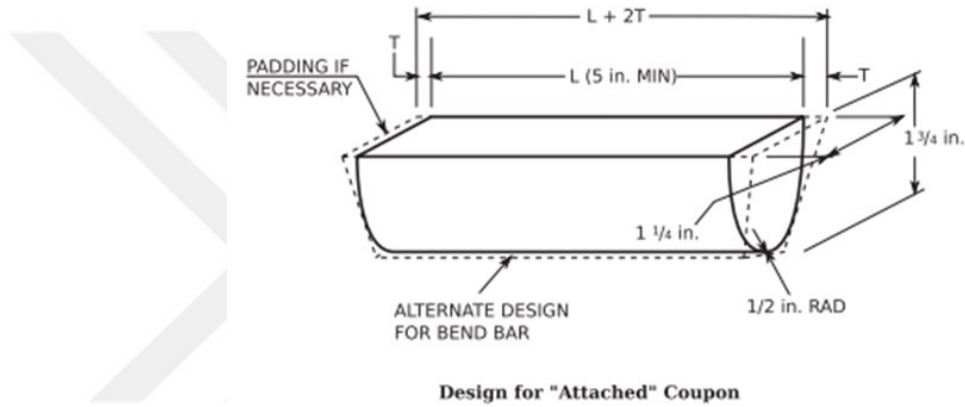
Anlaşıldığı üzere, ASTM A297 HK paslanmaz çelik, yüksek sıcaklıkta mükemmel performansı ve korozyon direnci ile bilinir. Kimyasal bileşimindeki yüksek krom ve nikel içeriği, bu özelliklerin anahtar bileşenleridir. Mekanik özellikler, çelik türü için karakteristik olan yüksek mukavemet ve duktillliği yansıtmaktadır. Bu değerler, belirli uygulama gereksinimlerini karşılamak için üretim sürecinde ve ısı işlemlerinde yapılan ayarlamalara bağlı olarak değişiklik gösterebilir.

Sıvı metalin katılaşması üzerine yapılan çoğu çalışmada, östenitik paslanmaz çeliklere odaklanılmıştır. Diğer türler; özellikle ferritik çelikler başta olmak üzere

daha az ilgi görmüştür. Bu, östenitik paslanmaz çeliklerin en yaygın kullanılan ve uygulanan çelik türü olmalarından kaynaklanmaktadır [47].

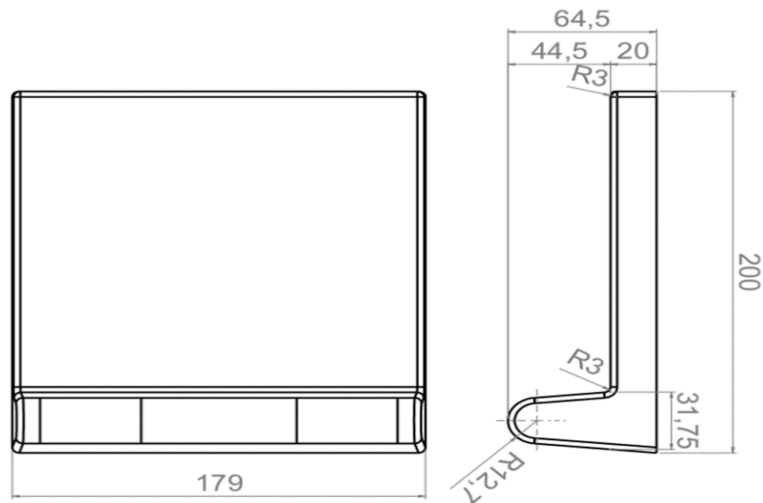
Isıl işlemler tane boyutunun büyümesine, gözenekliliğin artmasına ve sertliğin azalmasına neden olur [48]. Bu yüzden, deney numunelerine ısıl işlem uygulanmamıştır.

Bu çalışmada, ASTM E8/E8M standardına [49] göre numune formu oluşturulmuş ve döküm parçalara eklenebilecek şekilde standartta bulunan çekme numunesi formu, numunelere eklenmiştir. Şekil 4.1’de ASTM çekme numunesi için tasarım ve ölçüler mevcuttur.



Şekil 4.1 : ASTM E8/E8M standartına göre döküm parçaya eklenebilen çekme numunesi tasarımı.

İlgili standartta minimum ölçüler inç olarak verilmiş olup, standartta uygun olarak üretilen numunenin ölçülerinde 1 inç = 25,4mm olarak referans alınmış ve döküm plakaya ilave edilerek oluşturulan parça formu Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : ASTM çekme standartı doğrultusunda üretilen döküm numune ve ölçüleri.

Çalışmada kullanılan yolluk sistemi aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanmıştır. Sıvı metalin yolluk sistemi içindeki akış, Bernoulli denklemi kullanılarak teorik olarak hesaplanabilir. Bu denklem, sürtünme etkilerinin ihmal edildiği durumlarda akışkan bir sıvı için basınç, hız ve yükseklik değişkenlerinin, her noktada aynı olduğunu ifade eder.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = C \text{ (sabit)} \quad (2)$$

(*p*: basınç, *v*: hız, *ρ*: yoğunluk, *h*: yükseklik, *g*: yerçekimi ivmesi)

Kalıp ortamı atmosfer basıncı altında ise şu şekilde hesaplama yapılır:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho gh_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (3)$$

Bu formül ile yolluk bağlantılarındaki çıkış hızı hesaplanabilir. Daha sonra bu denklemin başlangıç hızının “0” olduğu kabul edilek formül şu şekilde sadeleştirilir:

$$v_2 = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

Yolluk tasarımı boyunca kesit kalınlıkları değişse bile, sürekliliğin doğruluğu açısından debinin sabit kalması gerekmektedir.

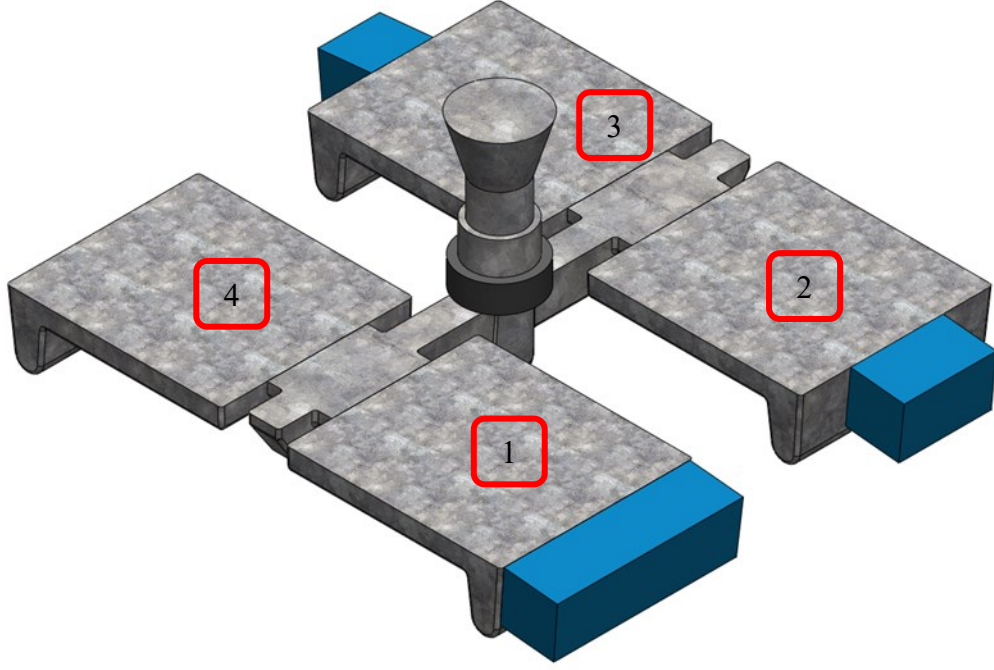
$$Q = v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (5)$$

Dökülen sıvı metalin çıkış noktalarına yaklaşıldıkça hızı artar. Bu yüzden, süreklilik kavramına göre, yolluk kesitinin küçültülmesi gerekmektedir. Eğer kesit küçültülmez ve ölçüler sabit bırakılırsa, sıvı metal ilerlediği boşluğu dolduramaz ve bu durum, yolluk içerisindeki havanın da kalıba dolmasına neden olur. Bu duruma engel olmak için v.A değerleri sabit kalacak şekilde yolluk kesiti daraltılır.

Sıvı metalin kalıbı doldurma süresi şu şekilde formüle edilir:

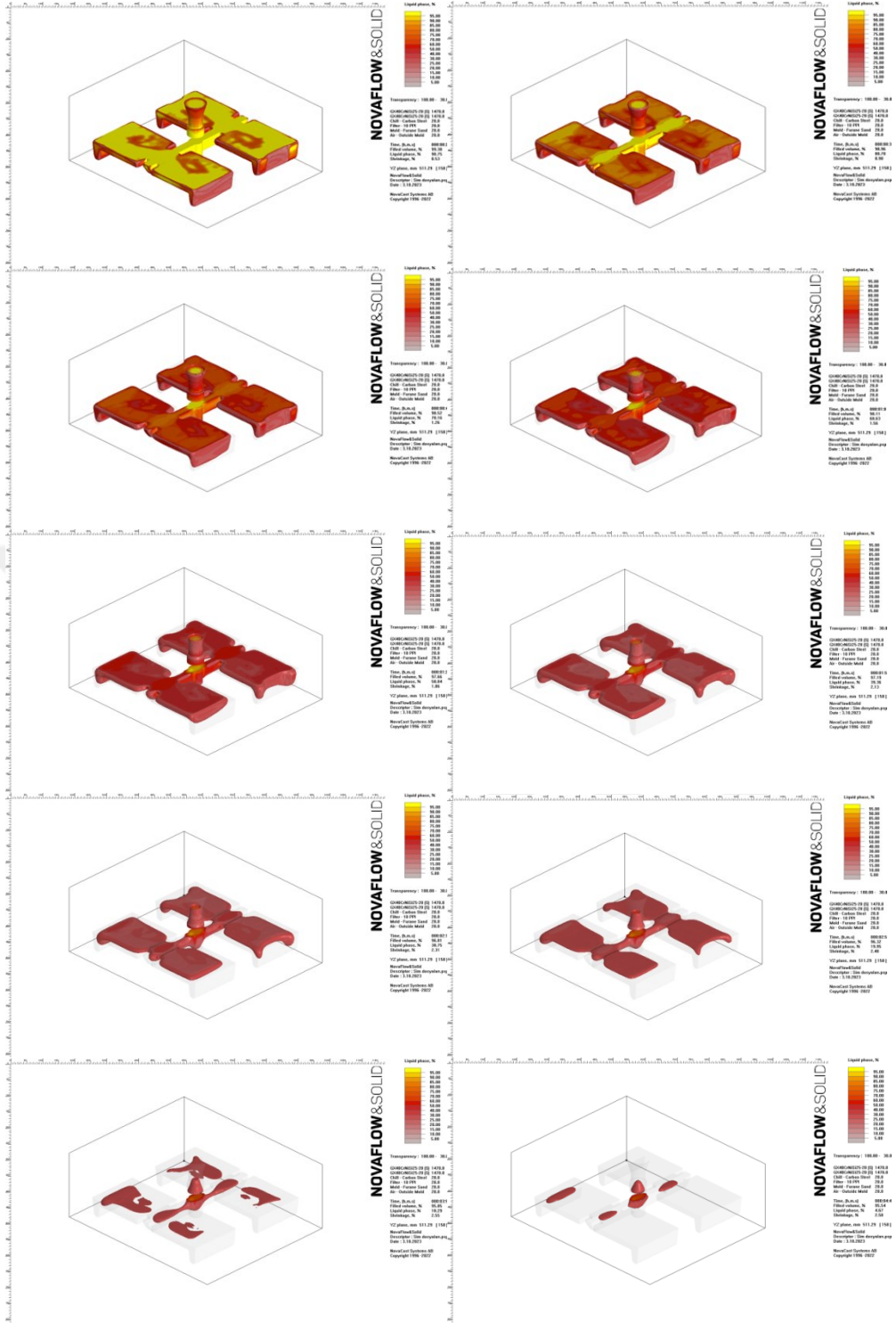
$$DS = V/Q = V/(A_2 \sqrt{2gh}) \quad DS: \text{Dolum süresi} \quad (6)$$

Soğutucuların hesaplanması: kalıp içi soğutucu kullanım yöntemine dair özel bir hesaplama yöntemi bulunmamaktadır. Ancak genel olan kanı doğrultusunda; küçük parçalar için yüzeyin tamamını kaplayacak şekilde ve tek parça olarak soğutucu tasarım ve uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır. Geniş yüzey alanına sahip parçalarda ise bu durum söz konusu olamamaktadır. Dolayısıyla, genel bir formülden ziyade, parça formuna uygun ve simülasyon programı ile analiz ederek etkili soğutucu formuna ulaşılabilir.

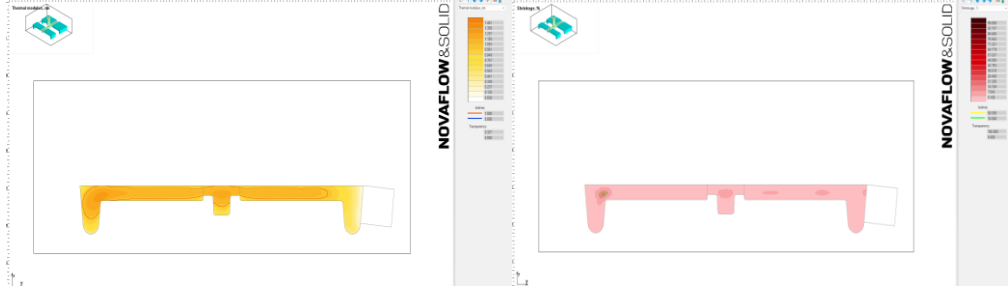


Şekil 4.3 : Farklı soğutucu boyutlarının kullanıldığı kalıp ortamının tasarımı.

Şekil 4.3’de gösterildiği üzere, 1 numaralı parçanın dış yüzeyini tamamen kaplayacak şekilde soğutucu kullanılmıştır. 2 numaralı parçada yüzeyin 1/2 si oranında, aynı şekilde 3 numaralı parçada ise yüzeyin 1/3 ü oranında soğutucu kullanılmış ve denemeler yapılmıştır. Yapılan denemelere ait dolun ve katılşma (Şekil 4.4) sonuçları şu şekildedir:



Şekil 4.4 : Kalıp ortamı simüle edilen parçanın katılaşması. Sıvı faz oranları sol üstten başlayarak şu şekilde devam etmektedir: %90,751 - %80,781 - %70,159 - %60,629 - %50,036 - %39,360 - 30,746 - %19,948 - %10,287 - %4,667.



Şekil 4.5 : Soğutuculu (1 numaralı) ve soğutucusuz (4 numaralı) numunelere ait simülasyon sonuçları. Sol tarafta termal modül, sağ tarafta ise olası çekinti bölgeleri ve yönelimler gözükmemektedir.

Örnek çalışmanın sonuçları ve değerlendirilmesi sonrasında (Şekil 4.5), fiili deneyin (numune döküm parçasının da küçük ebatlı olduğu göz önünde bulundurularak) yüzeyi tamamen kaplayan soğutucunun kullanılmasına karar verilmiştir.

Bu çalışma için gerekli numuneler önce kontrplak malzemeden imal edilerek plakaya bağlanmış ve daha sonra kalıplanarak dökümü gerçekleştirilmiştir. Kalıplama işlemi için furan kalıp kumu kullanılmış ve yüzeyler zirkopal boya ile boyanmıştır. Numunelere temas eden soğutucular, karbon çeliği olarak imal edilmiştir.

Kalıplanan numuneler döküm sonrası 1. ve 2. grup olarak numaralanmış ve izlenmiştir. 1. Gruptaki numuneler 1-2-3-4 olarak kodlanmış, aynı şekilde 2. gruptaki numuneler de bu kodların devamı olacak şekilde (5-6-7-8) olarak isimlendirilmiştir.

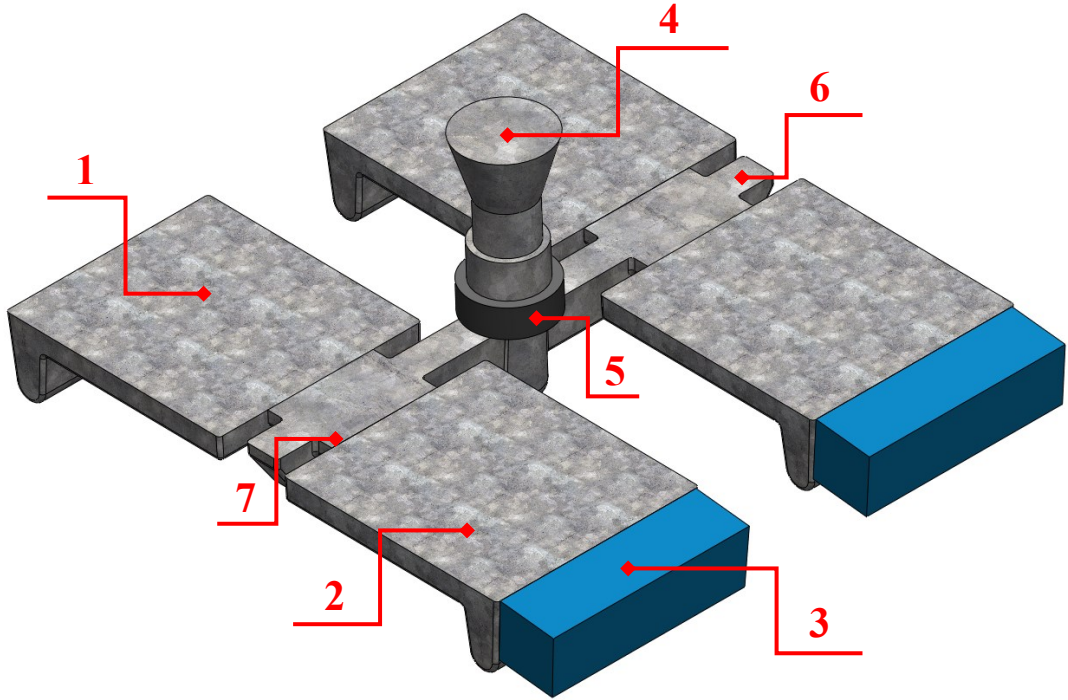
Tahribatsız muayene (NDT - Non-Destructive Testing), malzemenin iç yapısını veya gizli kusurlarını tespit etmek için kullanılan, malzemeye zarar vermeyen test yöntemleridir. Döküm yöntemiyle imal edilen paslanmaz çelikler, çeşitli endüstriyel uygulamalarda kritik bileşenler olarak kullanıldıklarından, bu parçaların güvenilirliği ve dayanıklılığı hayati öneme sahiptir. Bu nedenle, tahribatsız muayene, üretim sürecinin bir parçası olarak, bu bileşenlerin güvenliğini ve işlevselliğini sağlama amacıyla geniş çapta uygulanır. Tahribatsız testin güvenilirlik ve güven düzeyi, genellikle birden fazla test yöntemi kullanılarak artırılır [50]. Aşağıda, döküm paslanmaz çeliklerin tahribatsız muayenesi için kullanılan başlıca yöntemler açıklanmıştır. Açıklanan bu yöntemlerden RT ve UT uygulanabilirliğin ve anlaşılabilirliğin zorluğu açısından yapılmayacak olup, genel anlamda bilgi verilmiştir.

Tahribatlı muayene testleri ise, bir malzemenin temel mekanik özelliklerini anlamak için kritik öneme sahiptir. Döküm yöntemiyle imal edilen paslanmaz çelikler, kullanıldıkları uygulamalarda belirli bir performans standardını karşılamak

zorundadır ve bu testler, malzemenin bu standartlara uygun olup olmadığını belirlemek için kullanılır. Aşağıda, döküm paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan başlıca tahribatlı muayene testleri açıklanmaktadır. Bu yöntemlerden olan yorulma ve eğilme testleri tez kapsamına girmediğinden dolayı sadece açıklama olarak eklenmiştir ve yapılmayacaktır.

4.1. Simülasyon Analizi Ve Olası Döküm Hataları

Sıvı metal döküm simülasyon programları, endüstriyel süreçlerde kullanılan metallerin dökümü sırasında olası hataları analiz etmek ve optimize etmek için önemli araçlardır. Bu programlar genellikle karmaşık matematiksel modelleri ve akışkan dinamik simülasyonları kullanarak döküm sürecini taklit eder.

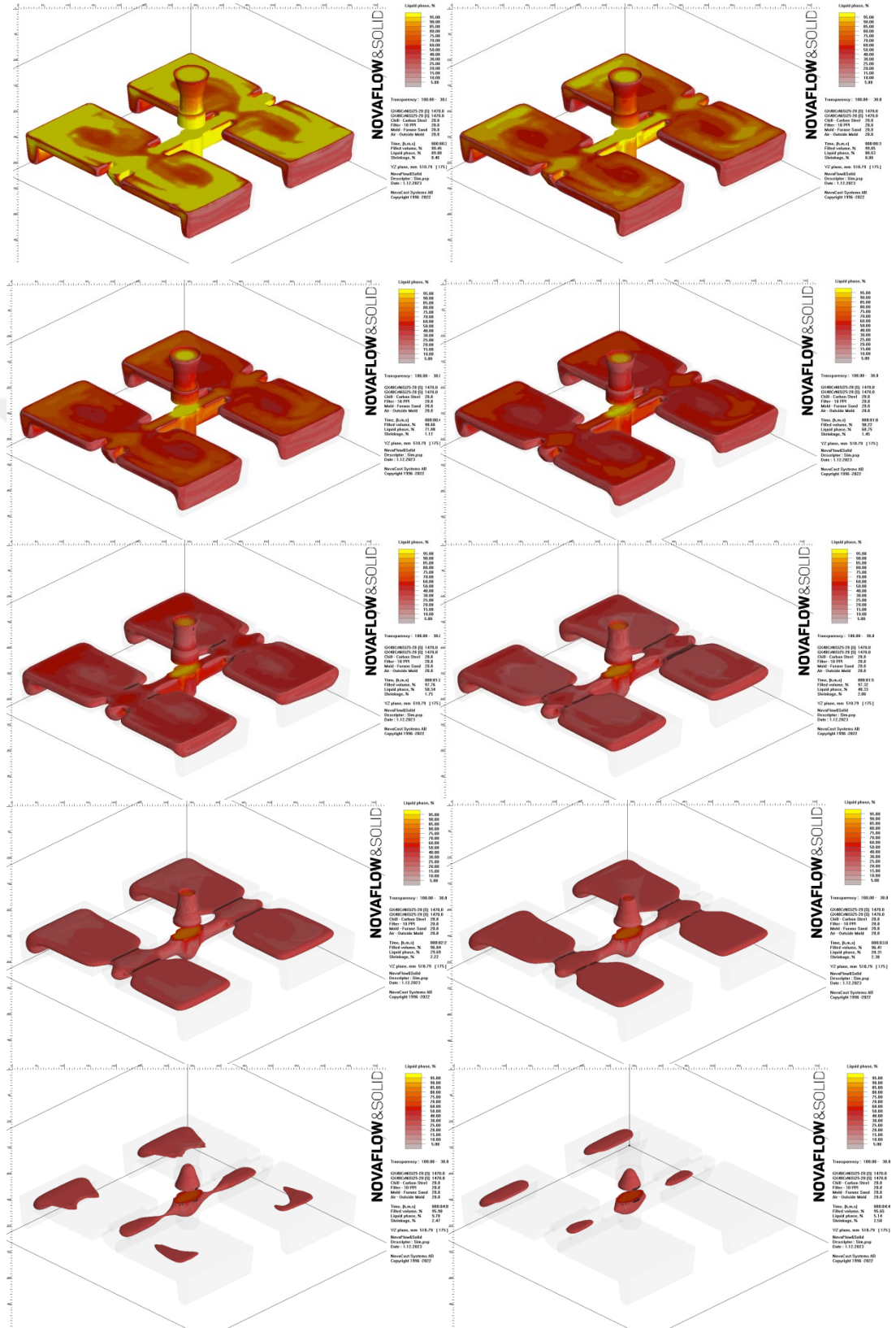


Şekil 4.1.1 : Döküm için hazırlanan kalıp ortamının simülasyon datası (1-Soğutucusuz numune, 2-Soğutuculu numune, 3-Soğutucu, 4-Dikey yolluk, 5-Filtre, 6-Yatay yolluk, 7-Girişler).

Daha önce, simülasyon ortamında soğutucu hesaplamaları ve uygunluğu kontrol edilen döküm kalıp ortamı, deney ortamı düzenlenerek ve nihai hale getirilerek Şekil 4.1.1'deki gibi yeniden oluşturulmuştur.

Şekil 4.1.2'de gösterildiği üzere figürler, kalıp ortamında (kum kalıp içerisinde) ısı transferi ve zamana bağlı olarak soğumaktadır. Soğuma esnasında, sarı renk daha sıcak olan sıvı metali, kırmızı renk ise daha düşük sıcaklıktaki (sarı renge göre) sıvı

metali temsil etmektedir. Şeffaf ve renksiz kısımlar, katılaşılan bölgeleri temsil etmektedir.

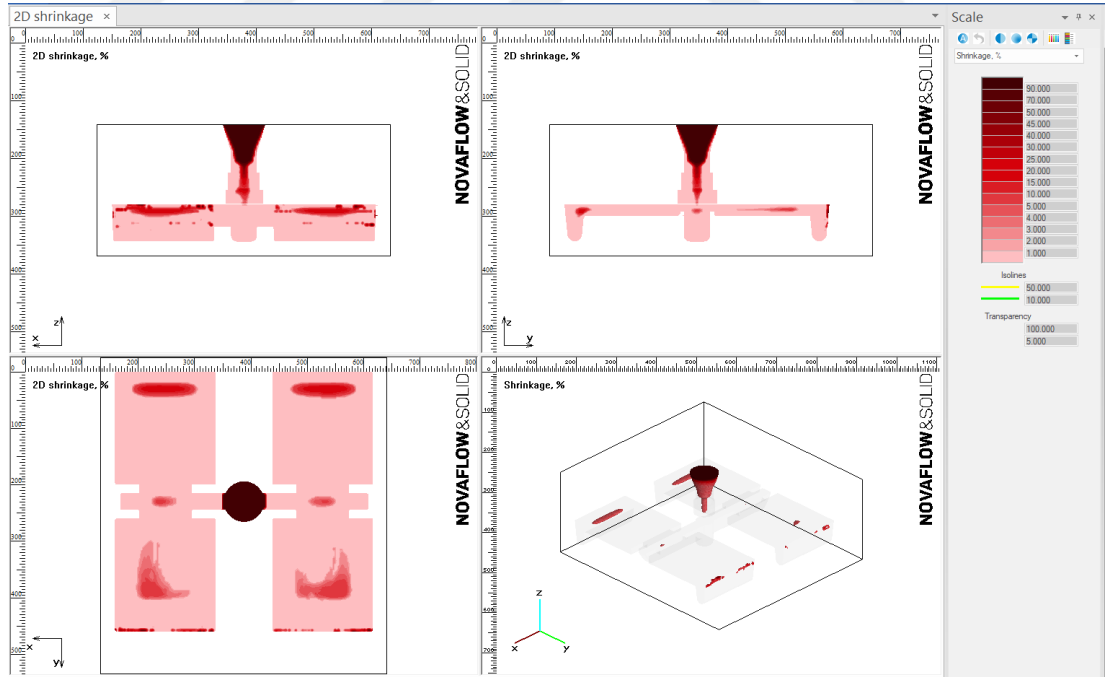


Şekil 4.1.2 : Metalin, sıvı fazdan katı faza dönüşmesinin zamana bağlı olarak gösterimi (şeffaf kısımlar katılaşılan bölgeleri, sarı ve kırmızı renkli olan bölgeler sıvı fazdaki yapıyı temsil etmektedir).

Döküm simülasyon programlarında çekinti oluşumu (shrinkage) terimi, sıvı metalin katılaşma sürecindeki hacim değişikliklerini ifade eder. Bu olgu, genellikle döküm parçasının iç kısımlarında veya belirli bölgelerinde gözlenen bir çekinti ya da çökme fenomenini anlatır. Şekil 4.1.3’de de gösterildiği gibi çekinti oluşumu, metalin soğuması ve katılaşması sırasında malzemenin bir miktar hacim kaybetmesi sonucunda ortaya çıkar.

Katılaşma sürecinde sıvı metal, belirli bir sıcaklık aralığında katı hale geçerken genellikle hacimde bir azalma meydana gelir. Bu çekinti genellikle parçanın kalın bölgelerinde, köşe birleşimlerinde veya metalin yoğunluğunun değiştiği diğer bölgelerde ortaya çıkabilir. Çekinti oluşumu, döküm parçasının iç yapısında veya yüzeyinde çatlaklar, boşluklar veya deformasyonlar gibi istenmeyen durumlarla ilişkilendirilebilir.

Çekinti oluşumu önemli bir döküm hata kaynağı olabilir, çünkü bu fenomen parçanın dayanıklılığını, mekanik özelliklerini ve genel kalitesini etkileyebilir. Bu nedenle, döküm simülasyonları çekinti oluşumunu belirlemek ve en aza indirmek için döküm süreçlerini optimize etmede önemli bir araç olarak kullanılır.

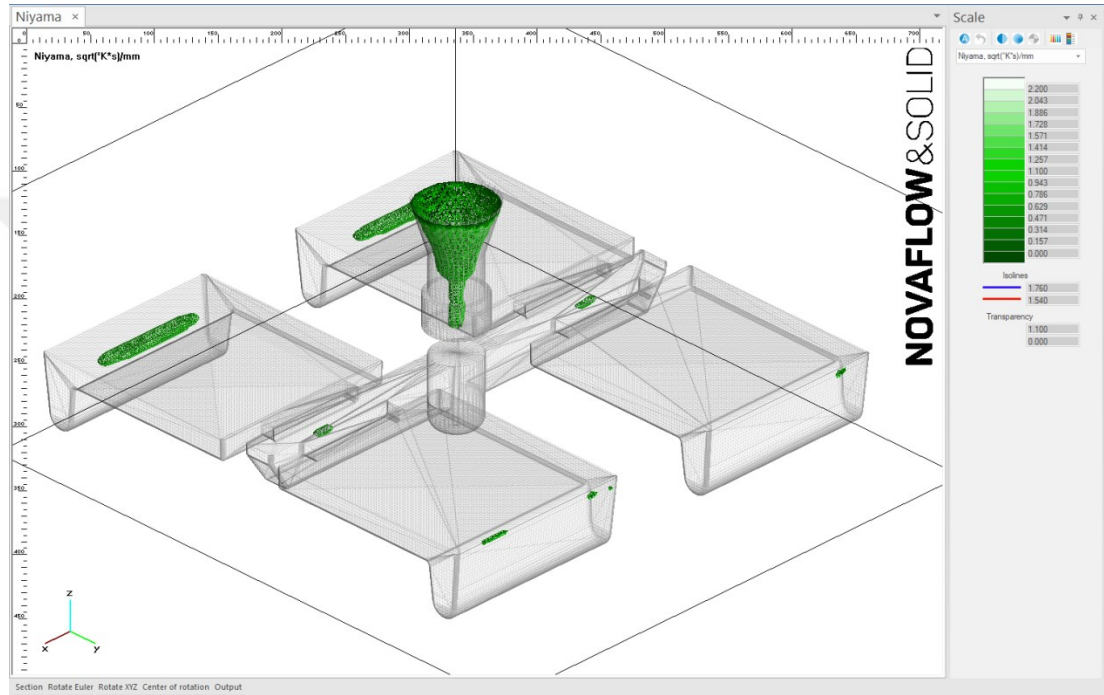


Şekil 4.1.3 : Çekinti oluşumu (Shrinkage %).

Niyama kriteri, metalin kalıp içindeki akış hızının, kalıp geometrisine ve döküm parametrelerine bağlı olarak belirli bir eşiği aşması gerektiğini ifade eder. Yani, belirli bir bölgede akışın yeterince güçlü olup olmadığını belirlemek için kullanılır.

Eğer Niyama kriteri belirlenen sınırlar içindeyse, metalin akışı düzenli ve yeterince hızlı olarak değerlendirilir; ancak bu kriterin altında kalması durumunda, akış problemleri ve dolayısıyla döküm hataları meydana gelebilir.

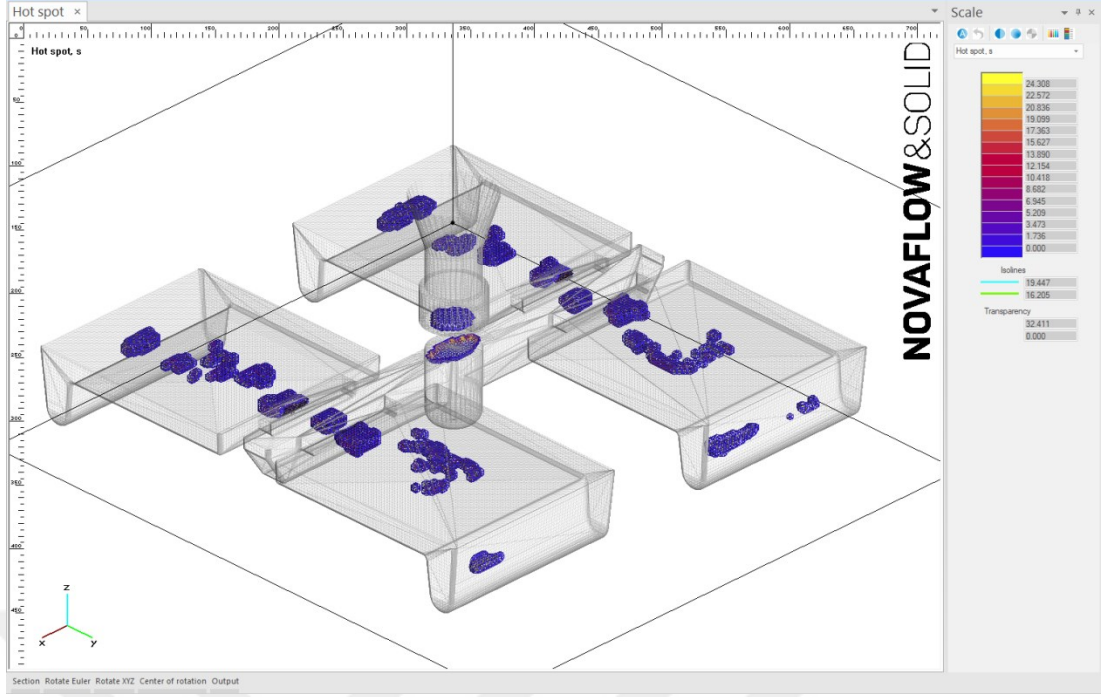
Niyama kriteri döküm simülasyon programlarında (Şekil 4.1.4), özellikle kalıp doldurma aşamasında, metalin akış özelliklerini analiz etmek ve optimize etmek amacıyla kullanılır. Bu sayede döküm hataları önceden tespit edilerek, üretim süreçlerinde kaliteyi artırmak ve malzeme kullanımını optimize etmek mümkün olur.



Şekil 4.1.4 : Niyama kriterine göre parçanın sonuçları.

Döküm simülasyon programlarında "Hot Spot" terimi, döküm işlemi sırasında belirli bir bölgede yoğun ısınmanın veya yüksek sıcaklığın meydana geldiği olayları ifade eder. Bu olaylar, genellikle metalin belirli bir noktada daha yavaş soğuduğu veya ısının biriktiği yerlerde ortaya çıkar.

Hot Spot'lar, döküm parçasının belirli bir bölgesindeki sıcaklık dalgalanmalarını veya aşırı ısınmayı ifade eder (Şekil 4.1.5). Bu durumlar, malzemenin homojen bir şekilde soğumasını engelleyebilir ve bu da çeşitli döküm hatalarına neden olabilir.



Şekil 4.1.5 : Sıcak noktaların oluşum bölgeleri (Hot Spot).

4.2. Penetrant Testi (PT)

Sıvı penetrant testi (LPT), gözenekli malzemeler dışında çok çeşitli malzemelerin kontrolünde kullanılabilindiğinden endüstride kullanılan en kolay ve etkili çatlak tespit yöntemlerinden biridir [51]. Çok küçük yüzey kusurlarını tespit etmek için kullanılır. Sıvı penetrant, kusurlu yüzeye uygulanır, daha sonra fazla penetrant silinir ve geliştirici uygulanır. Geliştirici, kusuru belirginleştirmek için penetrantı emer.

Uygulanabilirlik: Yüzey çatlakları veya poroziteler gibi yüzey kusurlarını tespit etmek için etkilidir, malzemenin kalınlığından etkilenmez.

Sınırlılıklar: Yalnızca malzemenin yüzey kusurlarını tespit edebilir, alttaki kusurlar tespit edilemez. Ayrıca, yüzeyin temiz ve kaplamasız olması gerekmektedir.

4.3. Sertlik Testi

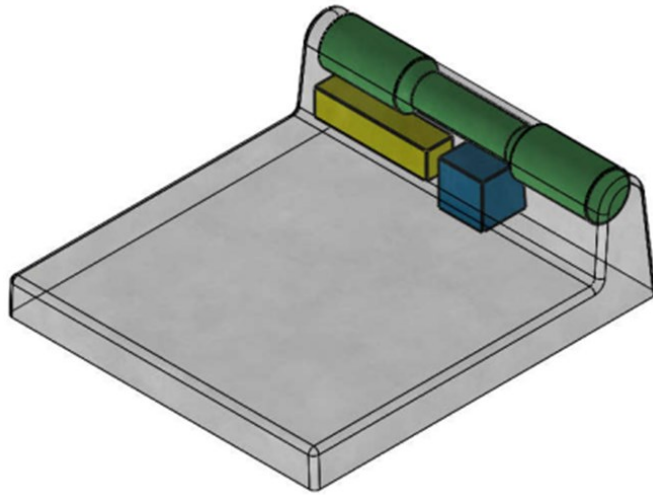
Sertlik testi, bir malzemenin yüzeyine uygulanan belirli bir yük altında ne kadar direnç gösterdiğini ölçer. Brinell, Rockwell ve Vickers olmak üzere çeşitli sertlik testi yöntemleri vardır ve her biri malzemeye uygulanan kuvvetin ve indenterin geometrisinin farklı olduğu durumlar için uygundur. Döküm paslanmaz çeliklerde sertlik, aşınma direnci ve işlenebilirlik gibi özelliklerle doğrudan ilişkilidir.

Uygulanabilirlik: Sertlik testleri, östenitik paslanmaz çeliklerin işlenebilirliği ve aşınma direnci gibi özelliklerini anlamak için kullanılır. Özellikle Rockwell ve Vickers sertlik testleri, bu tür çeliklerin sertliğini ölçmede yaygın olarak kullanılır.

Sınırlılıklar: Östenitik paslanmaz çeliklerin sertliği, alaşım elementlerinin miktarına ve ısıl işlem koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bu nedenle, sertlik değerleri, çeliğin kullanım özelliklerini tam olarak yansıtmayabilir.

4.4. Çekme Testi

Çekme testi, bir malzemenin çekme mukavemetini, akma sınırını, uzama yüzdesini ve daralma oranını ölçer. Bu test, standart bir çekme test makinesi kullanılarak (Şekil 4.4.2), malzemeden alınan bir numunenin çekilerek kopma noktasına kadar uzatılmasıyla gerçekleştirilir. Döküm paslanmaz çeliklerin, hizmet koşulları altında maruz kalacakları yüklerin altında nasıl performans göstereceğini anlamak için bu test kritik öneme sahiptir. Buna ek olarak, başlangıç tane boyutuna bağlı olarak çekme deformasyonu sırasında dislokasyonların yoğunluğunda artış gözlemlendiği de yapılan çalışmalarda ispatlanmıştır [52]. Döküm numunelerdeki mekanik testler ve mikroyapı incelemeleri için gereken numunelerin parça içerisindeki konumları Şekil 4.4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.4.1 : Döküm numune parçadan çıkarılacak test numuneleri: Çekme numunesi (yeşil renk), Charpy test numunesi (sarı renk) ve mikroyapı inceleme numunesi (mavi renk).



Şekil 4.4.2 : Çekme teslerinin uygulanışı.

Uygulanabilirlik: Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek derecede süneklik gösterir, bu da çekme testi sırasında belirgin bir plastik deformasyon bölgeleri ve yüksek uzama oranlarına yol açar. Çekme testi, bu çeliklerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve uzama oranları gibi temel mekanik özelliklerini belirlemek için uygundur.

Sınırlılıklar: Yüksek süneklik, numunelerin kopma noktasına ulaşmasını zorlaştırabilir ve bu da testin uzun sürmesine sebep olabilir. Ayrıca, soğuk işlem veya ısıl işlem gibi önceden yapılan işlemler malzemenin mekanik özelliklerini etkileyebilir.

4.5. Charpy Çentik Darbe Testi

Charpy darbe testi 120 yıldan daha eskidir ve yapısal bir metalin kırılma direncini değerlendirmek için en yaygın mekanik testtir. Neredeyse tüm yapısal bütünlük değerlendirme prosedürleri bunu kullanır [44]. Darbe testi, özellikle Charpy V-darbe testi, bir malzemenin darbe yükleri altındaki enerji emilim kapasitesini ölçer (Şekil 4.5.1). Bu, malzemenin kırılma ve tokluk arasındaki dengeyi belirlemek için önemlidir, çünkü bazı uygulamalar yüksek enerjili darbelere maruz kalabilir. Döküm paslanmaz çeliklerin darbe direnci, kullanıldıkları ortamın şartlarına bağlı olarak kritik önem taşıyabilir.



Şekil 4.5.1 : Charpy çentik darbe testinin uygulanaşı.

Uygulanabilirlik: Östenitik paslanmaz çelikler, düşük sıcaklıklarda bile mükemmel darbe tokluğuna sahiptir. Charpy V-darbe testi, bu çeliklerin darbe enerjisini absorbe etme kabiliyetini ölçmek için idealdir.

Sınırlılıklar: Standart darbe testi sıcaklıkları, östenitik çeliklerin darbe davranışını değerlendirmede sınırlı olabilir çünkü bu malzemeler, kriyojenik sıcaklıklarda bile yüksek tokluk gösterir.

4.6. SEM, EDX ve Mapping Analizleri

Taramalı elektron mikroskobu (SEM), elektron demeti kullanarak numunenin yüzeyini tarar ve her bir noktadan gelen ikincil elektronların sayısını ve enerjisini ölçer. Bu bilgiler, numunenin topografik ve morfolojik özelliklerinin yüksek çözünürlüklü görüntülerini oluşturmak için kullanılır.

SEM, bir elektron kaynağı, elektron demeti oluşturmak için kullanılır. Bu demet, odaklanma lensleri tarafından numunenin yüzeyine yönlendirilir. Elektronlar numuneye çarptığında, ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar ve karakteristik X-ışınları gibi çeşitli sinyaller üretilir. Bu sinyaller, dedektörler tarafından algılanır ve numunenin morfolojisi ve kimyasal bileşimi hakkında bilgi edinmek için kullanılır.

SEM, malzeme bilimi, nanoteknoloji, biyoloji, jeoloji, tıp ve mühendislik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır. Bu yöntem, nanomalzemelerin karakterizasyonu,

biyolojik dokuların incelenmesi, jeolojik örneklerin analiz edilmesi ve arıza tespiti gibi çeşitli amaçlar için kullanılabilir.

Avantajları;

- Yüksek çözünürlüklü görüntüler
- Geniş uygulama alanı
- Hızlı ve kolay analiz
- Numuneye zarar vermez

Dezavantajları;

- Yüksek maliyet
- Vakum ortamında çalışır
- İletken olmayan numuneler için özel işlem gerektirir

Enerji dağılımı spektroskopisi (EDX), numuneden gelen karakteristik X-ışınlarının enerjisini ve yoğunluğunu ölçerek numunenin kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılır. SEM'de olduğu gibi, elektron demeti numunenin yüzeyine yönlendirilir. Elektronlar numunedeki atomları iyonlaştırır ve bu iyonlar, karakteristik X-ışınları yayar. Bu X-ışınları, bir dedektör tarafından algılanır ve her element için özgü olan enerji seviyelerine göre analiz edilir. Bu yöntem, malzeme bilimi, nanoteknoloji, jeoloji, tıp ve mühendislik gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Avantajları;

- Nitel ve kantitatif kimyasal analiz
- Küçük alanlarda analiz
- Hızlı ve kolay analiz

Dezavantajları;

- Hassasiyet sınırlamaları
- Yüksek maliyet
- Vakum ortamında çalışır

Element haritalama (Mapping), numunenin belirli bir elementinin dağılımını gösteren bir görüntü oluşturmak için EDX verilerini kullanır. EDX tarafından elde

edilen elementer bilgiler, her bir element için ayrı bir görüntü oluşturmaktadır. Bu görüntüler, numunenin yüzeyindeki elementlerin dağılımını görselleştirirler.

Element haritalama, malzeme bilimi, nanoteknoloji, jeoloji, biyoloji ve tıp gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır.

Element haritalama, alaşım bileşenlerinin dağılımını, mineral içeriklerini, doku yapılarındaki element farklılıklarını ve kirleticilerin lokalizasyonunu belirlemek için kullanılabilir.

Avantajları;

- Elementlerin uzamsal dağılımının görselleştirilmesi
- Farklı elementlerin ilişkisinin incelenmesi
- Karmaşık malzemelerin bileşiminin anlaşılması

Dezavantajları;

- Yüksek çözünürlüklü haritalama uzun zaman alabilir.
- Veri analizi karmaşık olabilir.
- Vakum ortamında çalışır.

SEM, EDX ve element haritalama genellikle birlikte kullanılır. SEM, numunenin morfolojisini görüntülerken, EDX elementer bileşimi sağlar ve element haritalama ise elementlerin uzamsal dağılımını ortaya koyar. Bu birlikte kullanım, malzemelerin kapsamlı bir şekilde karakterize edilmesini ve malzeme bilimi, nanoteknoloji ve diğer birçok alandaki araştırmalarda kritik bir rol oynamaktadır.

Faz Analizi: Östenitik paslanmaz çelikler genellikle östenit (gama fazı) içerir, ancak işleme ve ısıtma koşullarına bağlı olarak ferritik veya martensitik fazlar da oluşabilir. Döküm sırasında oluşan hızlı soğuma, delta ferrit gibi istenmeyen fazların oluşumuna yol açabilir. Mikroyapı analizi, bu fazların varlığını ve miktarını belirlemek için kullanılır.

Tane Boyutu ve Dağılımı: Çeliğin mekanik özellikleri, büyük ölçüde mikroyapıdaki tane boyutuna ve dağılımına bağlıdır. İnce taneli yapılar, genellikle daha yüksek dayanım ve tokluk gösterir. Döküm süreci, soğutma hızları ve sonraki ısı işlemi, tane boyutunu ve şeklini etkiler.

İkincil Fazlar ve Çökeltiler: Karbürler, nitritler veya intermetalik fazlar gibi ikincil fazların varlığı, çeliğin korozyon direnci ve mekanik özellikleri üzerinde önemli etkilere sahip olabilir. Bu fazlar genellikle sınırlı çözünürlükteki elementlerin yüksek sıcaklıklarda çökmesiyle oluşur.

4.7. Optik Mikroskop Analizi

Paslanmaz çelikler, farklı mikro yapılara sahip olabilen ve bu mikro yapıların mekanik ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilediği karmaşık malzemelerdir. Bu nedenle, paslanmaz çeliklerin karakterizasyonunda optik mikroskop analizi önemli bir rol oynar.

Optik mikroskop, metalürjik incelemelerde yaygın olarak kullanılan bir araçtır. Bu mikroskop, ışık kullanarak numunenin yüzeyinin büyütülmüş görüntülerini elde etmeyi sağlar. Çelik örneği, aşındırma ve parlatma işlemleri ile hazırlandıktan sonra optik mikroskop altında incelenebilir. Bu sayede, örneğin aşağıdaki bilgiler elde edilebilir:

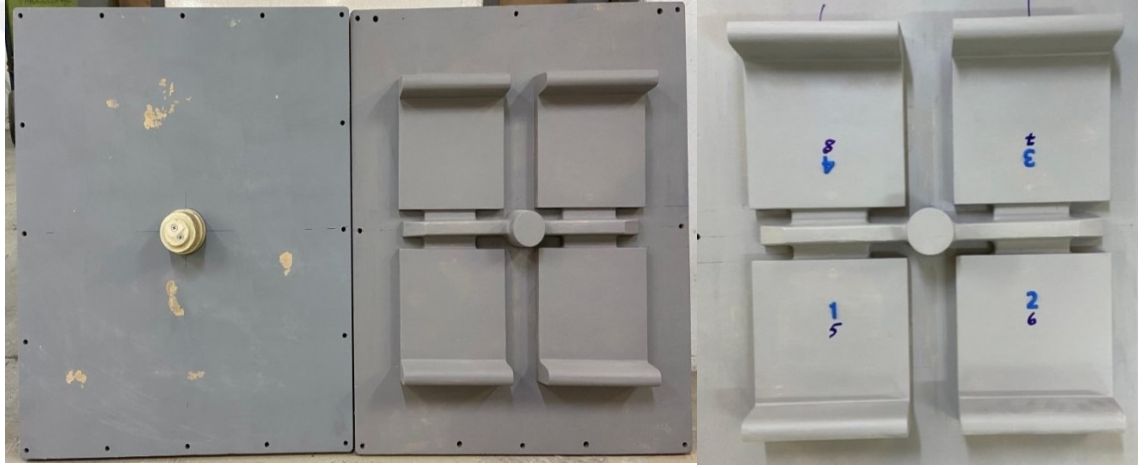
Tanecik boyutu ve dağılımı: Tanecik boyutu ve dağılımı, paslanmaz çeliklerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Optik mikroskop ile taneciklerin boyutları ve birbirleriyle olan ilişkileri incelenebilir.

Fazların dağılımı: Paslanmaz çeliklerde birden fazla faz bulunabilir. Farklı fazların dağılımı ve morfolojisi, malzemenin kimyasal ve mekanik özelliklerini etkileyebilir. Optik mikroskop ile farklı fazlar ayırt edilebilir ve dağılımları incelenebilir.

Mikroyapıdaki kusurlar: Gözenekler, çatlaklar ve segregasyonlar gibi mikro yapıdaki kusurlar, malzemenin dayanıklılığını ve performansını olumsuz etkileyebilir. Optik mikroskop ile bu tür kusurlar tespit edilebilir ve boyutları ölçülebilir.

BÖLÜM 5. DENEYSEL SONUÇLAR

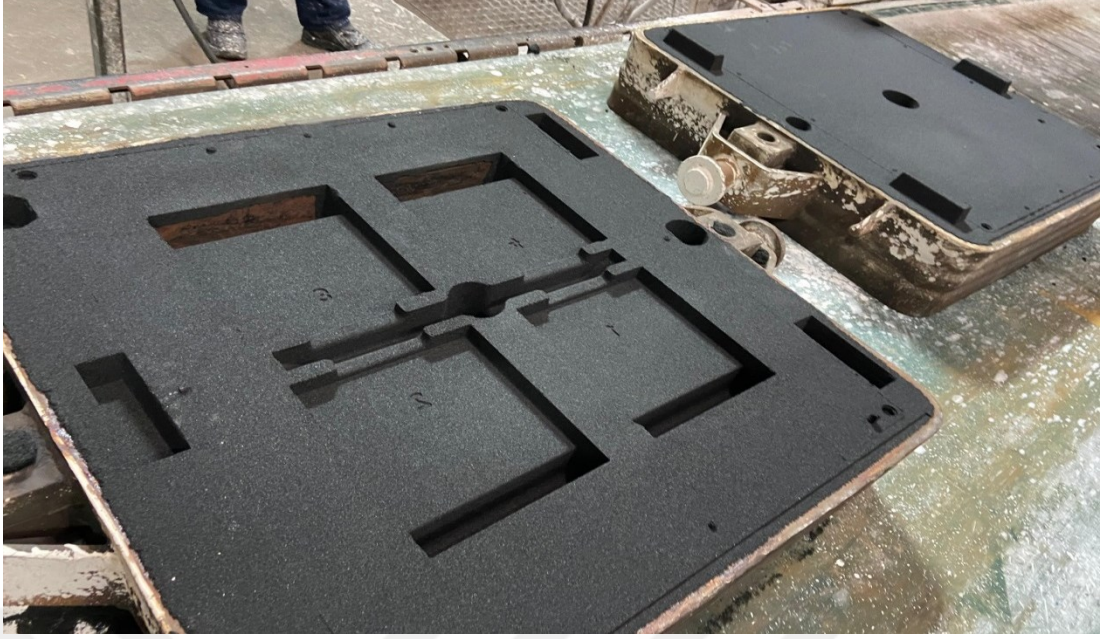
Kum kalıplama ile dökülecek modellerin tasarımları, simülasyon programı ve ilgili hesaplamalar doğrultusunda yapılmıştır. Bu bağlamda, numunelerin tutarlılığı açısından figürler plakaya bağlanmış ve numaralandırılarak döküm yöntemi ile imal edilmiştir (Şekil 5.1-5.9).



Şekil 5.1 : Yapılan plaka modele ve numaralandırma işlemine ait fotoğraflar.



Şekil 5.2 : Plaka modelin derece içindeki dikey yolluk ve soğutuculu yerleşimine ait fotoğraf.



Şekil 5.3 : Plakalar çıkarılarak kum kalıbın elde edilmesini gösteren fotoğraf.



Şekil 5.4 : Kum kalıpların boyanma işlemleri.



Şekil 5.5 : Kum kalıpların boyandıktan sonra yakılarak boyanın kurutulması.



Şekil 5.6 : Kalıpların yakılmış ve döküm öncesi son halleri.



Şekil 5.7 : Kalıpların kapatılarak üzerine ağırlıkların eklenmesi.



Şekil 5.8 : Dökümün yapılması.



Şekil 5.9 : Dökülmüş, yolluk sistemleri henüz kesilmemiş parçalar.

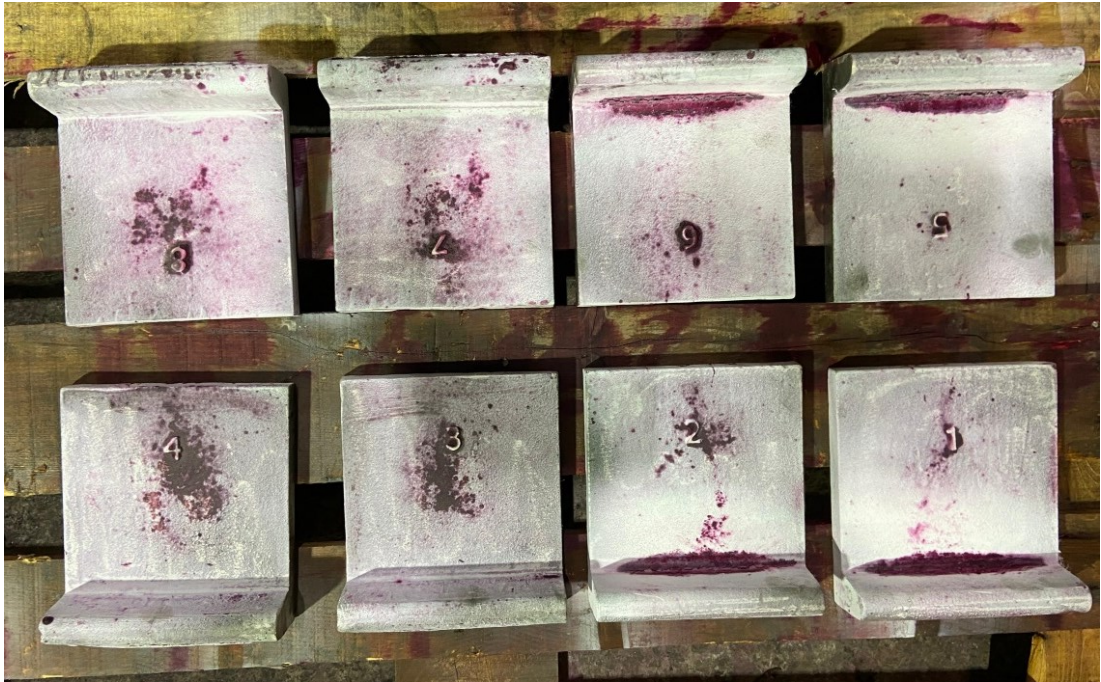
Döküm, tek potadan iki derece doldurulacak şekilde yapılmıştır. Spektrometre ile yapılan kimyasal analiz sonuçları ve hemen alt satırında malzemenin standart değer aralıkları Tablo 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 : Deney numunelerinin spektrometre sonuçları.

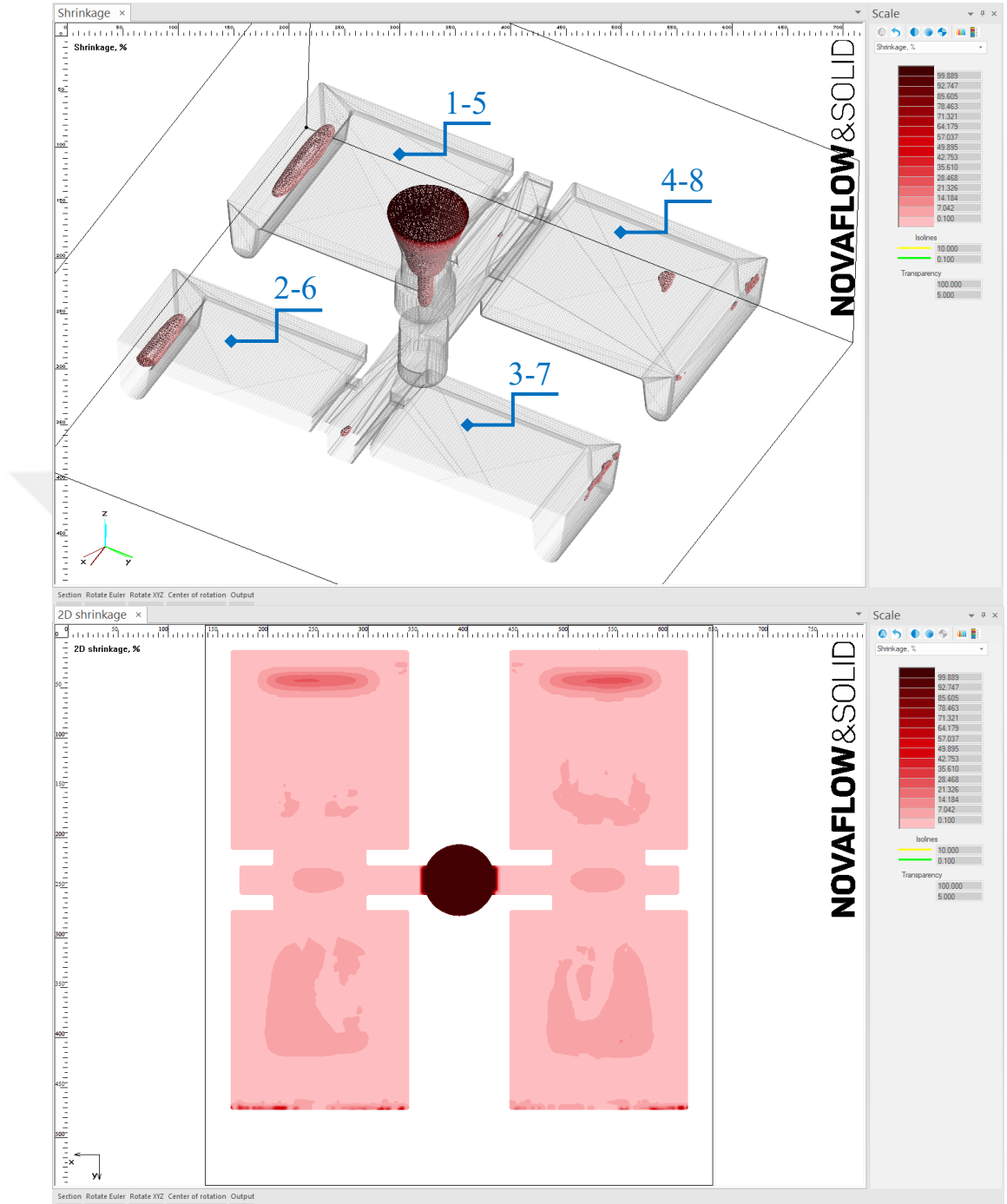
%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Mo	%Ni	%Fe
0,344	2,05	0,465	0,0228	0,0229	24,79	0,125	19,88	Null
0,2-0,4	0-2	0-2	0-0,04	0-0,04	24-28	0-0,5	18-22	Null

5.1. Simülasyon Sonuçlarıyla Döküm Parçanın Görsel Olarak Karşılaştırılması

Dökülen numunenin görselliğine dair karşılaştırmalar Şekil 5.1.1 üzerinden gösterilmektedir. Programda yapılan analize göre, soğutucu kullanılmadan dökülen numunelerin köşe bağlantı noktalarında çekinti oluşma olasılığı yüksektir. Nitekim bu risk, dökülen fiili numune parçasında da mevcuttur. Ek olarak, soğutucu kullanılan numunelerin, soğutucu kullanılmayan numunelere kıyasla, orta kısmında da çekinti bölgeleri olduğu hem simülasyon programında hem de fiili parçalarda gözlemlenmektedir. Simülasyon programından alınan verilerle ve numunelerin penetran testi aşamalarındaki görsellerinin kıyaslamaları şu fotoğraflar üzerinden yapılmıştır:



Şekil 5.1.1 : Penetrasyon testi sonuçlarına ait fotoğraf.

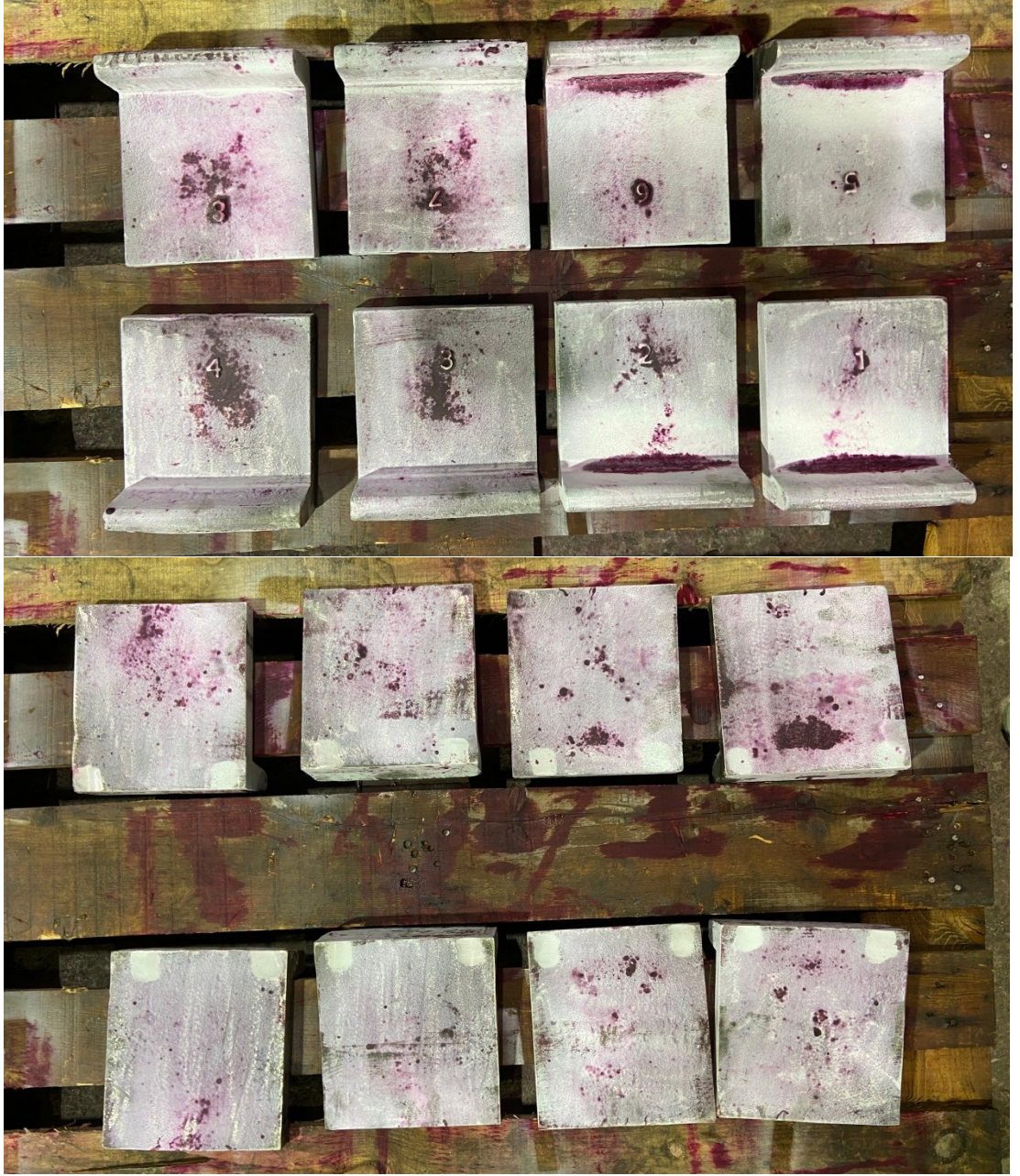


Şekil 5.1.2 : Fiili parçadaki çekintiler - simülasyon programında çekinti oluşabilecek bölgeler (Resmin üzerindeki sayılar numunelere ait numaralardır).

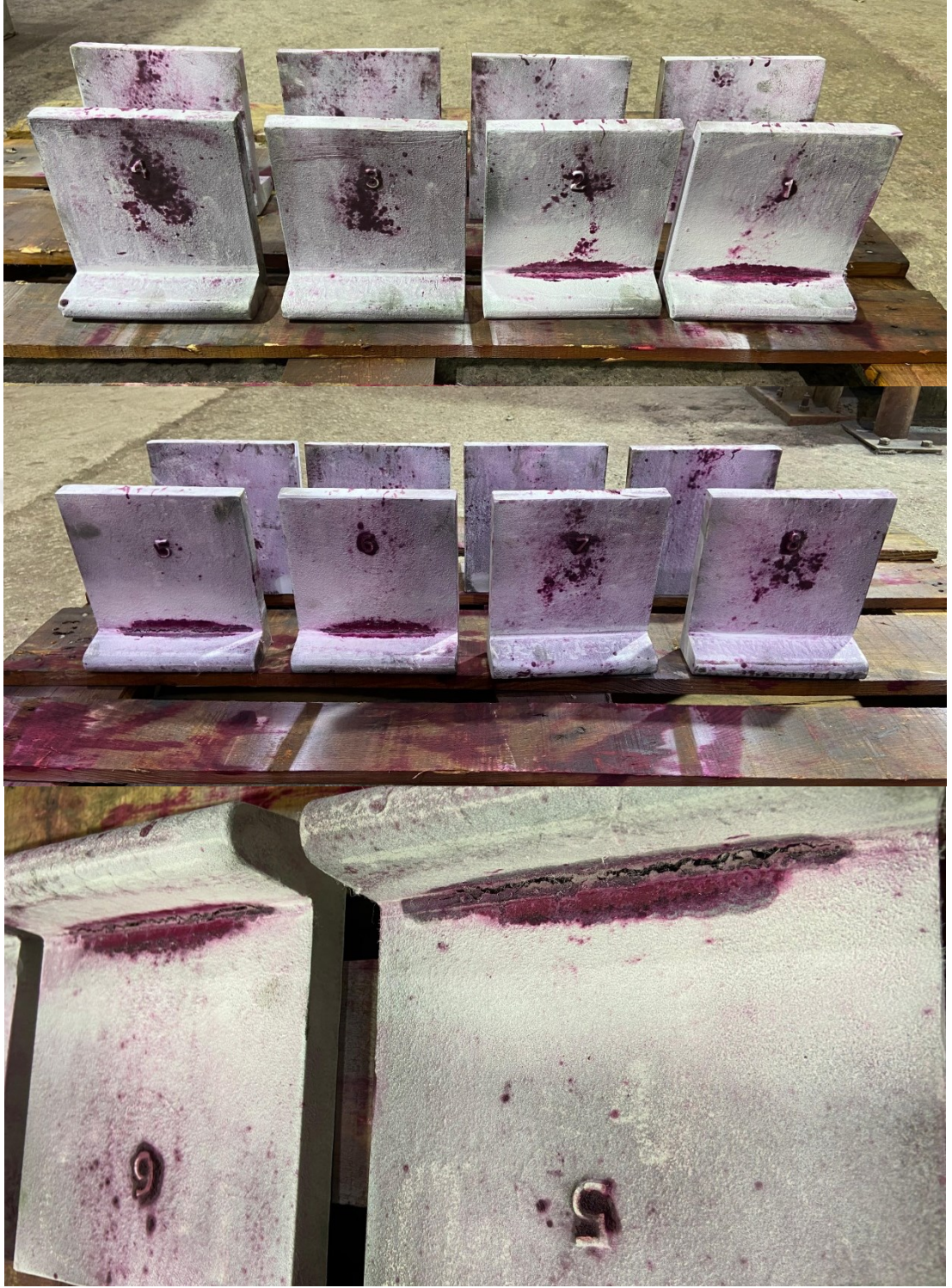
5.2. Penetrasyon Testi (PT) Sonuçları

Paçanın yüzeysel olarak incelenmesi, penetrasyon testi aracılığıyla yapılmıştır. Penetrasyon testi şu adımlar gözetilerek uygulanmıştır: yüzey temizliği, penetrantın uygulanması, penetrantın yüzeyden çıkarılması ve geliştirici uygulama. Sonuçlar,

testin yapıldığı malzemenin yüzeyindeki çatlaklar, delikler veya diğer kusurların varlığını gösterir. Yüzeğe açık süreksizliklerde penetrasyon rengi koyu kırmızı dönüşerek hatalı bölgenin görünür olmasını sağlamıştır (Şekil 5.2.1-5.2.2).



Şekil 5.2.1 : Penetrasyon (PT) testine ait alt ve üst kısımlardan bakış içeren fotoğraflar.



Şekil 5.2.2 : Penetrasyon (PT) testine ait dip kısım ve detay fotoğrafları.

5.3. Sertlik Testi Sonuçları

Döküm sonrasında yolluk ve giriş bağlantıları kesilen numuneler, penetrasyon işleminden önce sertlik bakılacak bölgeler Şekil 5.3.1’de de gösterildiği üzere taşlanmış ve değerlerin okunması mümkün olacak hale getirilmiştir.



Şekil 5.3.1 : Sertlik değerlerinin alınması ve numunelerin üzerine yazıldığı fotoğraflar.

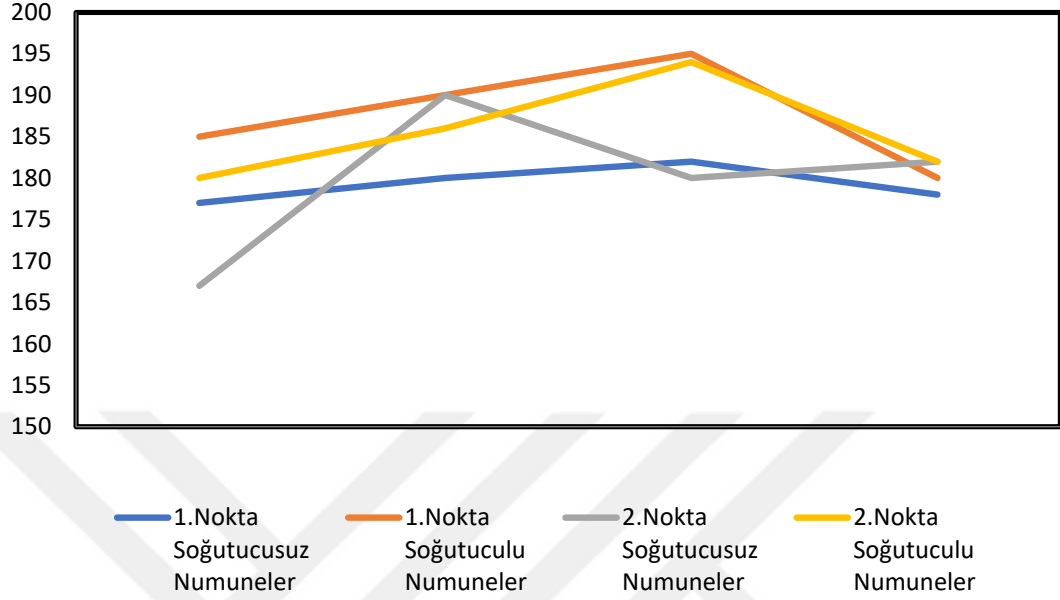
Ölçülen sertlik değerleri (Tablo 5.3.1) farklılık göstermekle beraber, soğutucu kullanılan numunelerin sertlik değer aralıklarının daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Kullanılan deney malzemesinin ısı işlem görmemiş haliyle sertlik değeri ortalama 150 HB olarak kabul edilmektedir [17].

Tablo 5.3.1 : Sertlik değerlerinin Brinell (HB) olarak ölçülmesi.

	1. Numune	2. Numune	3. Numune	4. Numune	5. Numune	6. Numune	7. Numune	8. Numune
1. Nokta	177	180	185	190	182	178	195	180
2. Nokta	167	190	180	186	180	182	194	182
Ortalama	172	185	182,5	188	181	180	194,5	181

Elde edilen verilerin ortalaması alındığında, soğutucu kullanılmayan numunelerin ortalama sertlik değerleri: 179,5HB iken, soğutucu kullanılan numunelerin sertlik değerleri ise: 186,5HB olarak gözlemlenmiştir. Yine aynı şekilde, soğutucu kullanılmayan numunelerin sertlik değerlerindeki değişkenlik aralığı 167-190HB

(dört numunenin ortalaması 179,5HB) olmasına rağmen, soğutucu kullanılan numunelerin sertlik değerlerindeki değişkenlik aralığı 180-195HB (dört numunenin ortalaması 186,5HB)'dir (Şekil 5.3.2).



Şekil 5.3.2 : Sertlik değerlerinin çizgisel gösterimi.

Yüzeysel testler yapıldıktan sonra, numuneler Şekil 5.3.3'de gösterildiği gibi kesilerek, mekanik testler ve mikroyapı incelemeleri için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 5.3.3 : Mekanik ve mikroyapı testleri için hazırlanan numunelerin fotoğrafı.

5.4. Çekme Testi Sonuçları

Döküm parçalarının mekanik özelliklerini belirlemek için çekme testi yapılmıştır. Testler, ASTM E8 standardına uygun olarak bir universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Yapılan testler sonucunda, soğutuculu ve soğutucusuz dökülen numuneler arasındaki farklar aşağıdaki Tablo 5.4.1'de gösterildiği gibi ortaya

çıkıştır. Bu tabloda, çekme mukavemeti değerlerinde soğutucusuz dökülen numunelerin (1-2-5-6 numaralı numuneler) ortalaması: 382.684 MPa iken, soğutucu ile dökülen numunelerin (3-4-7-8 numaralı numuneler) ortalaması: 449.271 MPa olarak ölçülmüştür. Soğutuculu dökülen numunelerin çekme mukavemeti (Şekil 5.4.2), soğutucusuz döküm numunelere göre %17.44 daha yüksektir. Bu, soğutucunun döküm sırasında metalin daha hızlı soğumasını sağlayarak daha ince ve daha homojen bir mikro yapı oluşmasına neden olduğu içindir.

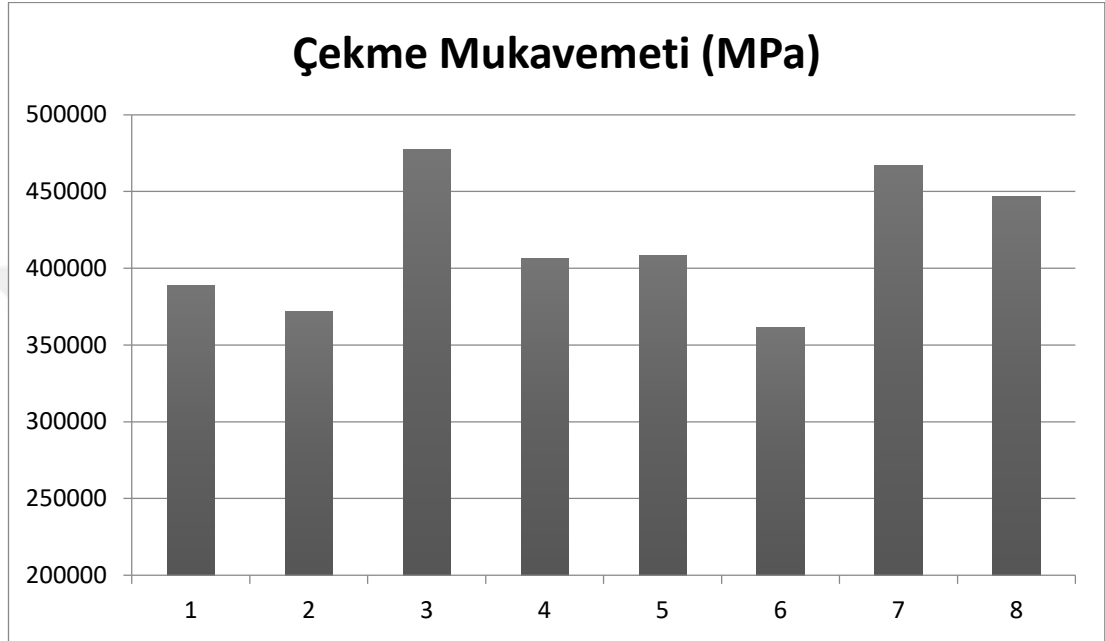
Maksimum kuvvet değerlerinin ortalaması soğutucusuz dökülen numuneler için 19.235 kN gelmekteyken, soğutuculu dökülen parçalar için bu değer 22.583 kN'dur. Soğutuculu döküm numunelerin maksimum kuvveti, soğutucusuz döküm numunelere göre %17.47 daha yüksektir. Bu da soğutucunun döküm sırasında metalin daha homojen bir şekilde dağılmasını sağlayarak daha dayanıklı bir parça oluşmasını sağladığı anlamına gelmektedir.

Tablo 5.4.1 : Mekanik değerlerin ölçülmesi.

Numune No	İlk Çap (mm)	İlk Boy (mm)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Son Boy (mm)	Maksimum Kuvvet (kN)	Akma Mukavemeti (MPa)	Uzama Miktarı (mm)
1	8	35	388.930	42	19.550	214.095	7
2	8	35	372.071	42	18.702	210.394	7
3	8	35	477.098	44	23.982	244.303	9
4	8	35	406.017	43	20.409	221.316	8
5	8	35	408.492	44	20.533	221.569	9
6	8	35	361.244	42	18.158	216.546	7
7	8	35	467.112	43	23.480	245.913	8
8	8	35	446.860	43	22.462	235.928	8

Bir diğer mekanik özellik olan akma mukavemeti değerlerinin ortalaması ise, soğutucusuz dökülen numuneler için; 215.651 MPa ve soğutuculu dökülen numuneler için; 236.865 MPa olarak ölçülmüştür. Soğutuculu döküm numunelerin akma mukavemeti, soğutucusuz döküm numunelere göre %9.82 daha yüksektir. Bu da soğutucunun döküm sırasında metalin daha yüksek bir mukavemet kazanmasını sağlayarak daha fazla deformasyona karşı dayanıklı bir parça oluşmasına yardımcı olur.

Döküm parçalarda soğutucu kullanımının döküm parçaların mekanik özelliklerini iyileştirmesinin temel nedeni, daha küçük ve daha homojen tane yapısı oluşması sayesinde meydana gelmektedir. Hızlı soğutma, erimiş metalin daha hızlı katılaşmasına neden olur. Bu da tane büyümesini sınırlar ve daha homojen bir tane yapısı oluşmasını sağlar. Daha küçük ve daha homojen tane yapısı, döküm parçaların daha yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine sahip olmasını sağlar.



Şekil 5.4.2 : Çekme mukavemetinin grafiksel gösterimi.

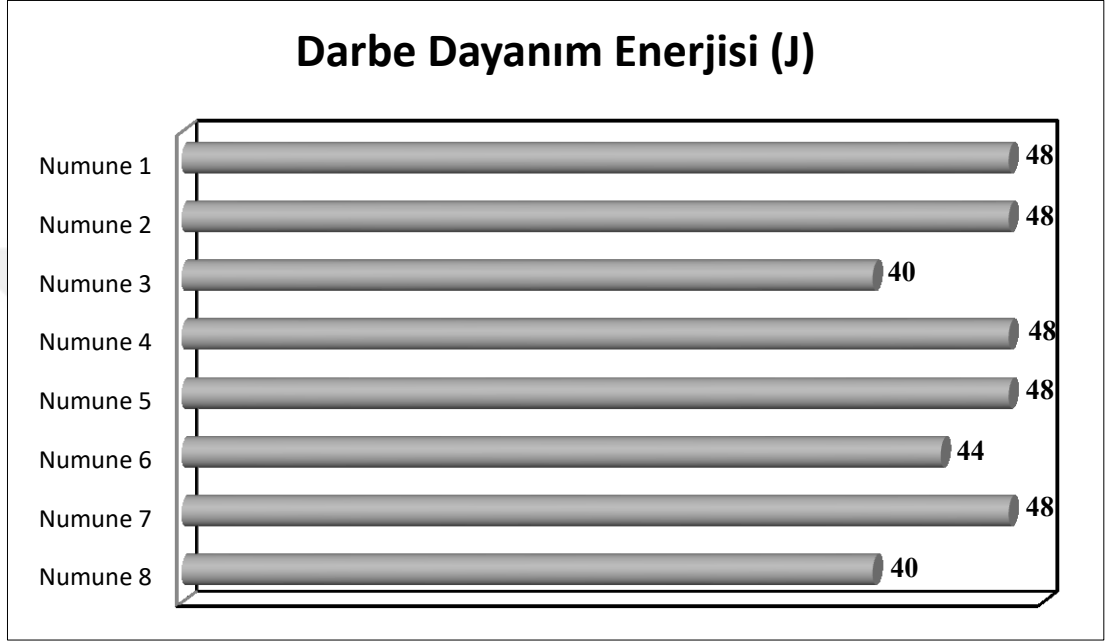
5.5. Charpy Çentik Darbe Testi Sonuçları

Charpy çentik darbe testi, bir malzemenin kırılma direncini veya tokluğunu ölçmek için kullanılan bir test yöntemidir. Bu testte, numuneye belirli bir enerjiye sahip bir çekiç vurarak numunenin kırılması için gereken enerji ölçülmüştür.

Şekil 5.5.1'de de gösterildiği gibi, soğutucusuz dökülmüş numunelerin ortalama darbe enerjisi 47 j'dir. Bu değer, metaller için ortalama kabul edilen değerin (yaklaşık ortalama: 40 j dür) üzerindedir. Bu da soğutucusuz dökülmüş numunelerin tok bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Dört numunenin darbe enerjileri oldukça yakın ve 44-48 j aralığındadır. Bu da numunelerin homojen bir yapıya sahip olduğunu gösterir.

Soğutuculu dökülmüş numunelerin ise, ortalama darbe enerjisi 44 j'dir. Bu değer de metaller için ortalama kabul edilen değer üzerindedir. Soğutuculu döküm işleminin soğutucusuz döküme göre bir dezavantajı olmadığını gösterir.

Dört numunenin darbe enerjileri 40-48 j aralığındadır. Soğutucusuz dökülmüş numunelere göre daha geniş bir dağılıma sahip olması, soğutuculu döküm işleminin homojenlik açısından bir dezavantajı olduğunu gösterir.



Şekil 5.5.1 : Charpy (çentik darbe) testinin sonuçları.

Hem soğutucusuz hem de soğutuculu dökülmüş numunelerin darbe enerjileri ortalama kabul edilen değer biraz üzerindedir. Bu da her iki grup numunenin de tok bir yapıya sahip olduğunu gösterir. Soğutuculu döküm işleminin soğutucusuz döküme göre bir avantajı veya dezavantajı gözlemlenmemektedir. Fakat, soğutuculu döküm işleminin homojenlik açısından bir dezavantajı olduğu gözlemlenmektedir.

5.6. SEM, EDX ve Mapping Analiz Sonuçları

Bu çalışmada, numunelerin mikro yapıları Karabük Üniversitesi MARGEM Laboratuvarında taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. SEM ile mikroyapılara bakılmış, Enerji Dağılımı X-Işını Analizi (EDX) ve Haritalama görüntüleri alınmıştır.

Mikro yapı analizi, malzemelerin özelliklerini ve bileşenlerini incelemek için kullanılan önemli bir tekniktir. Bu analizlerin birçoğu, malzemenin yüzey

özelliklerini belirlemek için SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve bileşenlerini belirlemek için EDX (Enerji Dağılımı X-ışını Spektroskopisi) gibi tekniklerin bir kombinasyonunu kullanır. Bu bağlamda, SEM-EDX mapping analizi, malzemenin yüzey yapısını incelemek ve aynı anda bileşenlerini haritalamak için kullanılan güçlü bir tekniktir.

SEM-EDX mapping analizi, öncelikle numunenin taramalı elektron mikroskobu altında incelenmesiyle başlar. SEM, yüzeyin yüksek çözünürlüklü görüntülerini elde etmek için kullanılır. Bu, numunenin morfolojisini, yüzey pürüzlülüğünü ve diğer önemli detayları görselleştirmek için kullanılır. Daha sonra, EDX spektrometresi devreye girer. Bu cihaz, numunenin bileşenlerini belirlemek için kullanılır. X-ışınları numuneye uygulandığında, numunedeki elementler bu x-ışınlarını absorbe eder ve karakteristik enerji seviyelerinde fluoresan üretir. Bu fluoresan sinyalleri, numunedeki elementlerin tespit edilmesine ve kimyasal bileşenlerin belirlenmesine olanak tanır.

SEM-EDX mapping analizi, bu iki teknik bir araya getirilerek yüzeyin detaylı bir haritasını çıkarmak için kullanılır. SEM görüntülerinin alındığı noktalarda, EDX spektrometresi numunedeki her bir noktanın kimyasal bileşenlerini belirler. Böylece, numunenin hangi bölgelerinde hangi elementlerin yoğunlaştığı ve dağılımının nasıl olduğu gibi bilgiler elde edilir. Bu veriler bilgisayar yazılımları aracılığıyla işlenir ve yorumlanır. Böylece, malzemenin yüzey morfolojisi ile kimyasal bileşenlerinin dağılımı arasındaki ilişki anlaşılabilir. Bu analiz, malzemenin performansını ve özelliklerini anlamak, kalite kontrolü yapmak ve geliştirme süreçlerini optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

Benzer nitelikte alüminyum malzeme ile yapılan bir çalışmada, soğutucu kullanımı dökümün mikro yapısını önemli ölçüde etkilediği gözlemlenmiştir. Soğutucu kullanımı, alüminyum döküm parçadaki tane boyutunu azaltmış ve mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. [53]

SDAS (sekonder dendrit kol aralığı), doğrudan soğutma hızına ve katılaşma hızına bağlıdır. [54] Mikroyapı fotoğraflarında görüldüğü gibi, soğutucu bölgesinden (kalıp duvarı da dahil) uzaklık arttıkça SDAS artmıştır, bu da SDAS'ın azalan soğutma hızı ile birlikte arttığı anlamına gelir.

Köşeye yakın, merkezinde tamamlanmamış dendrit gözlemlenmiş ve eğimli dallanmaları platformda düzgün bir şekilde dizilmiş olan yapılar, dendrit dallanması ve termal stres yoğunlaşmasının başlaması, katılma sırasında ardışık olarak gerçekleşmektedir. Yetersiz mukavemete sahip tamamlanmamış dendrit, dallanmadan önce deforme olmuş ve konsantre stres etkisi dışlanmıştır. Bu tür bir dendrit deformasyonu, yanal akış kuvvetinin etkisine de atfedilebilir. [55]

SEM, EDX ve Mapping mikroyapı görüntülerinin incelenmesi sonucunda, soğutucu kullanımının ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik dökümlerin mikro yapısını değiştirdiği tespit edilmiştir. Östenitik paslanmaz çelik olan ana yapıdaki ferritik ve martenzitik bölgelerin çoğaldığı ve bununla doğru orantılı olarak mekanik özelliklerin de değiştiği gözlemlenmiştir. Şayet, tane sınırlarında oluşan krom karbürler ve yapı içerisinde bulunan martenzitik bölgeler dökümü yapılan parçanın mekanik özelliklerini değiştirmektedir.

Ek A'da sunulan görüntülerde, östenit yapının içerisindeki martenzit ve ferrit bölgeleri gösterilmektedir. Buna ek olarak, yapıya uzaktan bakılan (500x ve 250x yakınlştırılmış) görüntülerde, tane sınırlarının henüz birbirlerine temas etmeden ana östenitik yapının katıldığı ve oluştuğu gözükmektedir.

EDX analiziyle, mikroyapı görüntülerindeki kimyasal bileşenler belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda, dökümdeki ana yapıdaki ferritik ve martenzitik bölgelerin artışı gözlemlenirken, bu değişimin mekanik özellikler üzerinde de etkili olduğu saptanmıştır. Soğutma hızı arttıkça ortalama tane boyutu düşer ve ikinci fazın (Ferrit fazı) hacim oranı yükselir. [56]

Mikroyapıdaki dendritler arasındaki mesafeler de, soğuma miktarına bağlı olarak azalmıştır. Özellikle 500x ve 250x olan SEM görüntülerinde soğutucu kullanılmayan numune mikroyapılarındaki birbirine temas etmeyen bölgeler, dendritlerin bağlantısız olduğu anlamını taşımaktadır.

5.7. Optik Mikroskop Analizi

Karbonsuz veya alaşımli çelikler sıcak şekillendirildiğinde, östenitik durumdadırlar. Ardından, soğuma işlemi östenitin diğer fazlara veya bileşenlere dönüşmesine neden olur. Eğer bir karbonlu veya düşük alaşımli çelik sıcak şekillendirme sonrasında hava ile soğutulursa, difüzyon kontrollü bir dönüşüm gerçekleşir; burada öncelikle ferrit

çöker, ardından ötektoid reaksiyonla perlit (östenitin ferrit ve sementit dönüşümü) oluşur. Martensit, geçiş bölgelerindeki çözelti atomlarının bulunduğu alaşımlarda oluşabilir. Örneğin; C'de, Fe'de. Bunun sonucunda önemli bir sertleşme ve kırılabilirlik durumu ortaya çıkar. Ancak, karbonsuz alaşımlarda yüksek nikel içeriğine sahip çeliklerde olduğu gibi, çözelti durumunda yumuşak ve dövülebilir bir martensit oluşturabilir.

Yüzeyi sertleştirilmiş karbürlenmiş çelikler ve takım çelikleri gibi yüksek karbonlu, yüksek alaşımlı çelikler için aşırı yüksek östenitleme sıcaklığının kullanılması, martensitin başladığı ve dönüşümünü tamamladığı sıcaklıkları düşüren aşırı miktarda karbürün çözülmesine neden olacaktır. [57]

Optik mikroskop yöntemiyle yapılan mikroyapı görüntülerinde (EK B) açıkça görüldüğü üzere, Soğutma hızı, parçanın mikro yapısındaki tane boyutunu ve dağılımını etkilemiştir. Daha ince taneli bir mikro yapıya sahip parçaların daha yüksek mukavemete ve tokluğa sahip olduğu bilinmektedir. Ferritik fazın daha yüksek bir yüzdesine sahip parçaların ise, daha iyi korozyon direncine sahip olduğu bilinmektedir. Aynı şekilde, yavaş soğutmada karbürlerin büyük ve dağınık bir şekilde oluşmasına neden olabilirken, hızlı soğutma ile soğutucu kullanılan numunelerin bazı bölgelerinde daha ince ve düzenli karbür oluşumuna yol açtığı gözlemlenmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Bu çalışma, döküm parçalarının mekanik ve mikro yapısal özelliklerinin soğutucu kullanımı ile nasıl etkilendiğini detaylı bir şekilde incelemiştir. Bu kapsamda, çekme testleri, SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDX (Enerji Dağılımı X-Işını Analizi) gibi ileri mikroskopik teknikler kullanılarak yapılan analizler, soğutucunun döküm süreçlerine olan etkilerini ortaya koymuştur.

Döküm parçalarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için yapılan çekme testleri, ASTM E8 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test sonuçları, soğutucu kullanımı ile dökülen numunelerin çekme mukavemeti ve maksimum kuvvet değerlerinde belirgin bir artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Soğutucusuz dökülen numunelerin ortalama çekme mukavemeti 382.684 MPa iken, soğutucu kullanılarak dökülen numunelerin ortalaması 449.271 MPa olarak ölçülmüştür. Bu, soğutuculu döküm numunelerinin çekme mukavemetinin, soğutucusuz döküm numunelere göre %17.44 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu artış, soğutucunun döküm sırasında metalin daha hızlı ve homojen bir şekilde soğumasını sağlayarak daha ince ve homojen bir mikro yapı oluşmasına neden olmasıyla açıklanabilir.

Maksimum kuvvet değerlerinde de benzer bir artış gözlemlenmiştir. Soğutucusuz dökülen numunelerin ortalama maksimum kuvveti 19.235 kN iken, soğutuculu döküm numunelerinde bu değer 22.583 kN'a ulaşmıştır. Bu da soğutuculu döküm numunelerinin maksimum kuvvetinin, soğutucusuz döküm numunelere göre %17.47 daha yüksek olduğunu göstermektedir. Bu farklılık, soğutucunun döküm sırasında metalin daha homojen bir şekilde dağılmasını ve daha dayanıklı parçalar oluşmasını sağladığını göstermektedir.

Mikro yapı analizleri, Karabük Üniversitesi MARGEM Laboratuvarı'nda taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılımı X-Işını Analizi (EDX) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, soğutucu kullanımının döküm parçalarının mikro

yapısını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. SEM-EDX mapping analizi, malzemenin yüzey yapısını ve kimyasal bileşenlerini detaylı bir şekilde incelemeye olanak tanımıştır.

Soğutucu kullanımı, ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik dökümlerde ferritik ve martenzitik bölgelerin artmasına neden olmuştur. Bu mikro yapısal değişiklikler, döküm parçalarının mekanik özelliklerinde iyileşmeler sağlamıştır. Tane sınırlarında oluşan krom karbürler ve yapı içerisinde bulunan martenzitik bölgeler, malzemenin mukavemetini artırmıştır. Yapılan SEM ve EDX analizleri, soğutma hızının artışı ile ortalama tane boyutunun küçüldüğünü ve ferrit fazının hacim oranının yükseldiğini göstermiştir. Bu, daha homojen ve dayanıklı döküm parçalarının elde edilmesine katkı sağlamıştır.

Mikro yapı fotoğraflarında, soğutucu kullanılan döküm numunelerinin daha ince ve düzenli dendrit yapısına sahip olduğu gözlemlenmiştir. SDAS (sekonder dendrit kol aralığı) değerleri, soğutma hızına bağlı olarak azalmış ve bu da mikro yapının daha ince taneli bir yapıya sahip olmasına neden olmuştur. Soğutucu bölgesinden uzaklık arttıkça SDAS değerlerinin arttığı, bu da soğutma hızının azalmasıyla birlikte SDAS'ın arttığı anlamına gelmektedir. Bu durum, malzemenin homojenliğini ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir.

Ayrıca, yapılan EDX analizleri, soğutucu kullanımının dökümdeki ana yapıdaki ferritik ve martenzitik bölgelerin artmasına neden olduğunu göstermiştir. Bu değişiklikler, malzemenin mekanik özelliklerini ve performansını iyileştirmiştir. Soğutma hızının artışı, ortalama tane boyutunu düşürmüş ve ikinci fazın (ferrit fazı) hacim oranını artırmıştır. Bu, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırırken, korozyon direncini de iyileştirmiştir.

Özellikle yüksek nikel içeriğine sahip östenitik paslanmaz çeliklerde, soğutucu kullanımı ile martenzitik ve ferritik bölgelerin oluşumu artmıştır. Bu bölgeler, malzemenin sertliğini ve mukavemetini artırırken, aynı zamanda kırılgenliğini de azaltmıştır. Mikroyapı görüntülerinde, bu bölgelerin oluşumu ve dağılımı açıkça gözlemlenmiştir. Martenzitik ve ferritik bölgeler arasındaki denge, malzemenin mekanik performansını ve dayanıklılığını olumlu yönde etkilemiştir.

Optik mikroskop yöntemiyle yapılan mikroyapı görüntüleri, soğutma hızının malzemenin mikro yapısını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Hızlı soğutma ile

daha ince ve homojen bir mikro yapı elde edilirken, yavaş soğutma büyük ve düzensiz karbür oluşumuna neden olmuştur. Bu, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu doğrudan etkilemiştir. Ferritik fazın yüksek yüzdesine sahip parçalar, daha iyi korozyon direnci göstermiştir. Bu durum, özellikle korozyon direncinin önemli olduğu uygulamalarda soğutma hızının optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bu tezde yapılan çalışmalar, soğutucu kullanımının döküm parçalarının mekanik ve mikro yapısal özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. Soğutma hızının artırılması, malzemenin ortalama tane boyutunu küçültmüş ve mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Soğutucu kullanımı, malzemenin daha ince ve homojen bir mikro yapıya sahip olmasını sağlayarak, çekme mukavemeti ve maksimum kuvvet değerlerinde önemli iyileşmeler sağlamıştır. Ayrıca, mikro yapı analizleri, soğutucu kullanımı ile malzemenin mikro yapısının daha homojen ve dayanıklı hale geldiğini ortaya koymuştur.

Bu bulgular, döküm süreçlerinde soğutucu kullanımının optimize edilmesi gerektiğini ve bu optimizasyonun malzeme performansını artırmak için kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Döküm parçalarının mekanik ve mikro yapısal özelliklerinin iyileştirilmesi, endüstriyel uygulamalarda daha dayanıklı ve güvenilir malzemelerin kullanılmasına olanak tanıyacaktır. Bu tezde elde edilen sonuçlar, döküm sanayisinde kalite kontrol ve geliştirme süreçlerinin iyileştirilmesine katkı sağlayacak önemli bilgiler sunmaktadır.

6.2. Öneriler

1. Soğutucu Kullanımının Optimizasyonu: Yapılan çalışmalar, soğutucu kullanımının döküm parçalarının mekanik ve mikro yapısal özelliklerinde önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. Bu nedenle, döküm süreçlerinde soğutma hızının optimize edilmesi, hem mekanik hem de mikro yapısal özelliklerin daha da iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Soğutucu türü ve miktarının dökülecek metalin özelliklerine göre ayarlanması, optimal sonuçların elde edilmesi için gereklidir.
2. Gelişmiş Mikro Yapı Analiz Tekniklerinin Kullanımı: SEM-EDX analizlerinin yanı sıra, optik mikroskop ve atomik kuvvet mikroskobu gibi farklı mikroskobik tekniklerin kullanımı, malzemelerin mikro yapı ve bileşenlerinin daha detaylı

incelenmesine olanak tanıyacaktır. Bu tür analizler, döküm işlemlerinin daha iyi anlaşılmasına ve iyileştirilmesine katkıda bulunacak, daha güvenilir ve dayanıklı malzemelerin geliştirilmesine yardımcı olacaktır.

3. Korozyon ve Mekanik Dayanım Testlerinin Genişletilmesi: Soğutuculu döküm parçalarının korozyon direnci ve mekanik dayanımının uzun vadede nasıl değiştiği üzerine daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Farklı çevresel koşullar ve yükler altında yapılan testler, malzemelerin performansını değerlendirmek ve iyileştirme alanlarını belirlemek için kritik öneme sahiptir.
4. Yeni Soğutucu Malzemelerin Araştırılması: Soğutucu olarak kullanılan malzemelerin türleri ve bunların döküm üzerindeki etkileri hakkında daha fazla araştırma yapılmalıdır. Özellikle nanoteknoloji kullanılarak geliştirilen yeni soğutucu malzemeler, daha etkin soğutma sağlayabilir ve döküm parçalarının mekanik ve mikro yapısal özelliklerini daha da iyileştirebilir. Bu tür yenilikler, döküm sanayisinde önemli ilerlemeler sağlayabilir.
5. Endüstriyel Uygulamalar ve Standardizasyon: Bu tezde elde edilen bulguların döküm endüstrisinde pratik uygulamalara dönüştürülmesi ve bu uygulamaların standart hale getirilmesi önemlidir. Standardizasyon, döküm kalitesinin artırılmasına ve üretim maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlayacaktır. Endüstri standartlarının geliştirilmesi ve bu standartlara uygun üretim süreçlerinin benimsenmesi, daha güvenilir ve dayanıklı döküm parçalarının üretilmesini mümkün kılacaktır.

Bu öneriler, döküm işlemlerinin ve döküm parçalarının kalitesini artırmaya yönelik adımlar atılmasını sağlayacak ve endüstriyel uygulamalarda daha dayanıklı ve güvenilir malzemelerin üretilmesine katkıda bulunacaktır. Döküm süreçlerinin sürekli iyileştirilmesi ve optimize edilmesi, gelecekte daha ileri teknolojilerin ve malzemelerin geliştirilmesi için sağlam bir temel oluşturacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Balcı, B., (2008), *AISI 304 östenitik paslanmaz çelik malzemenin işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi*, (Yüksek Lisans Tezi), Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
- [2] Panchal, V.D., (2013), Relieving stress in stainless steels, *World Pumps*, Issue 1, 28-32,
[https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(13\)70030-0](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(13)70030-0)
- [3] Blair, M., Amuda, M.O.H., (2001), Stainless steels: cast, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, 8798-8802.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.02525-X>
- [4] Hauser, M., Nitzsche, P., Weidner, A., Henkel, S., Biermann, H., Volkova, O., Wendler, M., (2022), Effect of Cu addition on solidification, precipitation behavior and mechanical properties in östenitic CrNi–N stainless steel, *Materials Science and Engineering*, 862, 346-355.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2022.144422>
- [5] Smith, W.F., (2000), *Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri*, Nobel Akademik Yayıncılık.
- [6] Padilha, A.F., Rios, P.R., (2002), Decomposition of östenite in östenitic stainless steels, *ISIJ Int.*, 42, 325-337.
<https://doi.org/10.2355/ISIJINTERNATIONAL.42.325>
- [7] Budiski, K.G. ve Budiski, M.K. (1998), *Engineering materials: properties and selection*, Pearson College Div.
- [8] Gürol, U., (2020), *Döküm proses parametrelerinin yüksek manganlı östenitik çeliklerin özelliklerine etkisinin incelenmesi*, (Doktora Tezi), Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.

- [9] Callister, W. D. ve Rethwisch, D. G. (2010), *Materials science and engineering: an introduction*, John Wiley & Sons.
- [10] Singh, R. (2016), *Applied welding engineering: processes, codes and standards*, Elsevier Inc.
- [11] Kou, S. (2003). *Welding metallurgy*. John Wiley & Sons Inc.
- [12] Odabaş C. (2004) *Paslanmaz çelikler, temel özellikleri, kullanım alanları, kaynak yöntemleri*, Kaynak Tekniği Sanayi.
- [13] Material Properties Database. (2023, 20 Ekim). *ASTM Grade HC (28Cr, J92605) cast stainless steel*. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-Grade-HC-28Cr-J92605-Cast-Stainless-Steel>.
- [14] Tekin, A. (1981), *Çeliklerin metalurjik dizaynı*, Doyuran Matbaası.
- [15] Shan, Y., Luo, X., Hu, X., Liu, S., (2010), Mechanisms of solidification structure improvement of ultra pure 17 wt% Cr ferritic stainless steel by Ti, Nb addition, *Journal Of Materials Science & Technolog*, 27/4, 289-384, [https://doi.org/10.1016/S1005-0302\(11\)60073-X](https://doi.org/10.1016/S1005-0302(11)60073-X)
- [16] Naffakh, H., Shamanian, M., Ashrafizadeh, F., (2009), Dissimilar welding of ASTM A297 HK östenitic stainless steel to nickel-based alloy Inconel 657, *Journal of Materials Processing Technology Volume 209*, Issue 7, 3628-3639, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.019>
- [17] Material Properties Database. (2023, 20 Ekim). *ASTM Grade HK (25Cr-20Ni, J94224) cast stainless steel*. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ASTM-Grade-HK-25Cr-20Ni-J94224-Cast-Stainless-Steel>.
- [18] Sun, Y., (2004), *Yüksek kromlu ve nikelli çeliklerin aşınma davranışlarının incelenmesi*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19] Hu, G., Wang, P., Li, D., Li, Y., (2017), The tensile behaviors of vanadium-containing 25Cr-20Ni östenitic stainless steel at temperature between 200 °C and 900 °C, *Materials Science and Engineering*, 711, 543-552, <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2017.11.066>

- [20] Alonso-Falleiros, N., Magri, M., Falleiros, I., (1999), Intergranular corrosion in a martensitic stainless steel detected by electrochemical tests, *Corrosion*, 55, 769-778,
<http://dx.doi.org/10.5006/1.3284032>
- [21] Barlow, L., Toit, M. D., (2012), Effect of östenitizing heat treatment on the microstructure and hardness of martensitic stainless steel AISI 420, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21, 1327-1336,
<http://dx.doi.org/10.1007/s11665-011-0043-9>
- [22] Gao, B., Xu, T., Wang, L., Liu, Y., Liu, J., Zhang, Y., Sui, Y., Sun, W., Chen, X., Li, X., Xiao, L., Zhou, H., (2023), Achieving a superior combination of tensile properties and corrosion resistance in AISI 420 martensitic stainless steel by low-temperature tempering, *Corrosion Science*, 225, 111551.
<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2023.111551>
- [23] Material Properties Database. (2023, 20 Ekim). *ACI-ASTM CA6N (J91650). cast stainless steel*. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ACI-ASTM-CA6N-J91650-Cast-Stainless-Steel>.
- [24] Akar, N., (2006), *Katılaşma sırasında döküm-kalıp ara yüzeyinde ısı transfer katsayısının incelenmesi*, (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [25] Clark, C.A. ve Guha. P., (1982), Welding characteristic of duplex satainless steels, duplex satainless steels, *Conference Proceedings American Society For Metals*, Ohio, 630- 634.
- [26] Material Properties Database. (2023, 20 Ekim). *ACI-ASTM CE8MN (ASTM A890 Grade 2A, J93345) cast stainless steel*. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/ACI-ASTM-CE8MN-ASTM-A890-Grade-2A-J93345-Cast-Stainless-Steel>.
- [27] Material Properties Database. (2023, 20 Ekim). *H1100 Hardened CB7Cu-1 cast stainless steel*. <https://www.makeitfrom.com/material-properties/H1100-Hardened-CB7Cu-1-Cast-Stainless-Steel>.
- [28] Demir-Karbon Denge Diyagramı. (2023, 18 Ekim). *Wikipedia*. https://tr.wikipedia.org/wiki/Demir-karbon_denge_diyagram%C4%B1.

- [29] Black, J. T., Kohser, A. R., (2008), *Degarmo's materials and processes in manufacturing*, John Wiley & Sons, Inc.
- [30] Navy Department. (1944). *Foundry manual*. U.S. Navy Department Bureau of Ships.
- [31] Aydın, E., (2019), *Büyük kesitli dökme çelik malzemelerin mekanik özelliklerinin bileşim ve işlem süreçleri ile ilişkisi*, (Doktora Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [32] Garcia, J. M., Monteiro, A. C. A., Casanova, A. D. M. B., Huaman, N. R. C., Monteiro, S. N., Brandao, L. P., (2023), Microstructural analysis of phase precipitation during high temperature creep in ASTM A297 HK stainless steel. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5953-5966. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.175>
- [33] Briggs, C. W. (1960), *Steel castings handbook: 100th anniversary of the steel casting*, Steel Founders' Society of America.
- [34] Campbell, J. (2011), *Complete casting*, Elsevier Ltd.
- [35] Ardell, A. J., Przystupa, M. A., (1993), Kinetics of dynamic and static recovery during high-temperature deformation and annealing, *High Temperature Materials and Processes*, 12. <https://doi.org/10.1515/HTMP.1993.12.1-2.1>
- [36] Ajaja, O., (1991), Role of recovery in high temperature constant strain rate deformation, *Journal of Materials Science*, 26, 6599–6605. <https://doi.org/10.1007/BF00553683>
- [37] Shi, L., Northwo, D. O., (1994), The mechanical behavior of an AISI Type 310 stainless steel, *Acta Metall, Mater*, 43, No. 2, 453-460. [https://doi.org/10.1016/0956-7151\(94\)00279-Q](https://doi.org/10.1016/0956-7151(94)00279-Q)
- [38] Ramon, J., Basu, R., Voort, G. V., Bolar, G., (2021), A comprehensive study on solidification (hot) cracking in östenitic stainless steel welds from a microstructural approach, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 194, Part B, 104560. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104560>

- [39] Kanthavel, K., Arunkumar, K., Vivek S., (2014), Investigation of chill performance in steel casting process using response surface methodology, *Procedia Engineering*, 97, 329 – 337.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.256>
- [40] Lee, J. H., Yamashita, S., Ogura, T., Saida, K., (2021), Effects of cooling rate on solidification cracking behaviour in 310s stainless steel, *Journal of Advanced Joining Processes*, 3, 100044.
<https://doi.org/10.1016/j.jajp.2021.100044>
- [41] Türkiye Döküm Sanayicileri Derneği (TÜDÖKSAD). (2014). *Döküm Hataları Atlası*.
- [42] Aran, A. (2007), *Döküm teknolojisi*, İTÜ Makine Fakültesi.
- [43] Şahin, S. (2008), *Döküm Ortamında Kalıp Kumu Toplam Isı Transfer Katsayısının Deneysel Ve Matematiksel Analizi*, (Doktora Tezi), Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [44] Wallin, K., (2022), Correlation of charpy-v notch and different charpy-u notch impact specimen energies for structural metals, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 200, 104829.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104829>
- [45] Kahraman, H., (2013), *Dökümlerde besleyicilerin işlevinin süreç benzeşimi ile kontrolü*, (Yüksek Lisans Tezi), Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [46] Aslandoğan, R., (2009), *Dökümde akıcılık ve akıcılığı etkileyen faktörlerin araştırılması*, (Yüksek Lisans Tezi), Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [47] Lai, H. H., Hsieh, H., Kuo, C. Y., Wu, W., (2023), Solidification cracking nature and sequence of different stainless steels, *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1030-1040.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.06.017>
- [48] Bedmar, J., Rodríguez, S. G., Roldán, M., Torres, B., Rams, J., (2022), Effects of the heat treatment on the microstructure and corrosion behavior of 316 l stainless steel manufactured by laser powder bed fusion, *Corrosion Science*, 209,

110777.

<https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110777>

- [49] American Society for Testing and Materials Standart. (2019). *Standard test methods for tension testing of metallic materials* (ASTM Standart No E8/E8M – 13a).
- [50] Dwivedi, S. K., Vishwakarma, M., Soni, A., (2017), Advances and researches on non destructive testing: a review, *Materials Today: Proceedings*, 5, 3690–3698. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.620>
- [51] Manikandan, K. R., Sivagurunathan, P. A., Ananthan, S. S., Moshi, A. A. M., Bharathi, S. R. S., (2021), Study on the influence of temperature and vibration on indications of liquid penetrant testing of a516 low carbon steel, *Materials Today: Proceedings*, 39, Part 4, 1559-1564. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.572>
- [52] Takeshita, K., Ogawa, T., Sun, F., Adachi, Y., (2023), The initial grain size effect on the tensile-deformed microstructure in type 310s östenitic stainless steel. *Materials Letters*, 341, 134285. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134285>
- [53] Tang, H. P., Wang, Q. D., Lei, C., Ye, B., Wang, K., Jiang, H. Y., Ding, W. J., Zhang, X. F., Lin, Z., Zhang, J. B., (2019), Effect of cooling rate on microstructure and mechanical properties of an Al-5.0Mg-3.0Zn-1.0Cu cast alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 801, 596-608. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.06.002>
- [54] Choi, S.W., Kim, Y.M., Lee, K.M., Cho, H.S., Hong, S.K., Kim, Y.C., Kang, C.S., Kumai, S., (2014), The effects of cooling rate and heat treatment on mechanical and thermal characteristics of Al–Si–Cu–Mg foundry alloys, *Journal of Alloys and Compounds*, 617, 654-659. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2014.08.033>
- [55] Chen, C., Sun, J., Diao, A., Yang, Y., Li, J., Zhou, Y. (2021), On the dendrite deformation and evolution mechanism of ni-based superalloy during directional solidification, *Journal of Alloys and Compounds*, 891, 161949. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161949>

[56] Pang, S., Wu, G., Liu, W., Sun, M., Zhang, Y., Liu, Z., Ding, W. (2012), Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of sand-casting Mg–10Gd–3Y–0.5Zr Magnesium alloy, *Materials Science and Engineering*, 562, 152-160.

<https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.11.016>

[57] George, F. V. V. (2006), *Microstructure of Ferrous Alloys*, Taylor & Francis Group LLC.



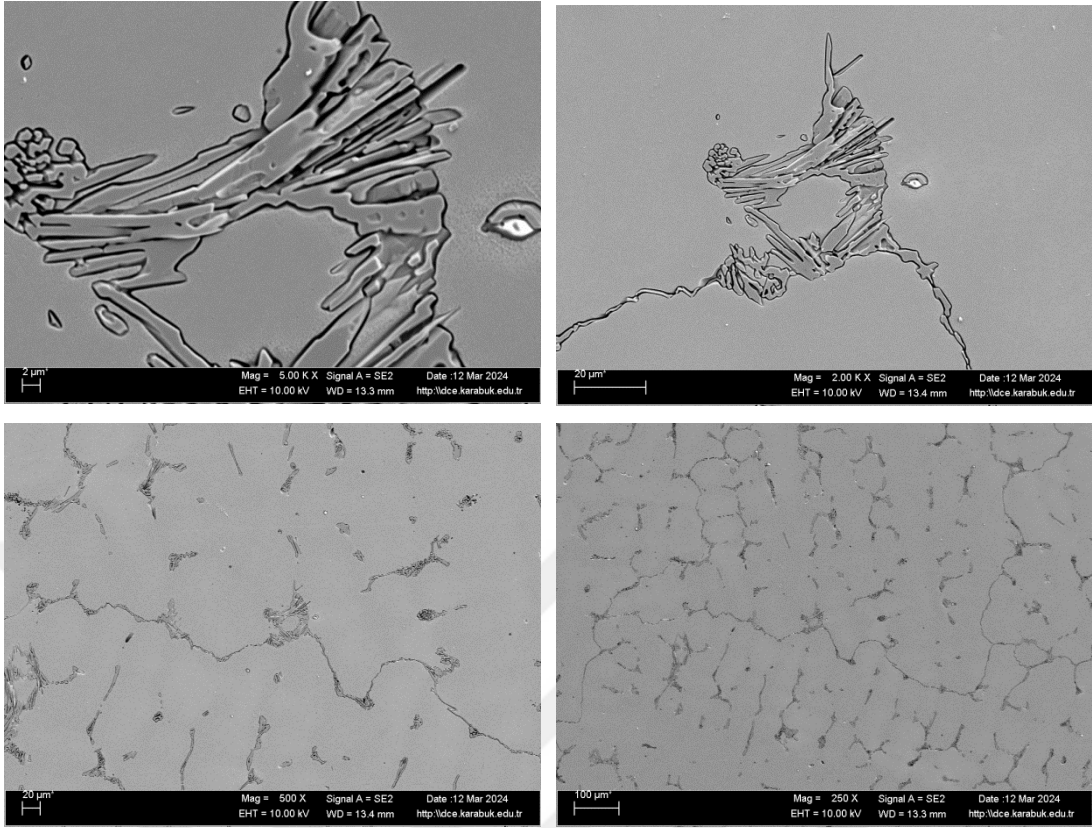
EKLER

EK A : SEM, EDX ve Mapping Görüntüleri

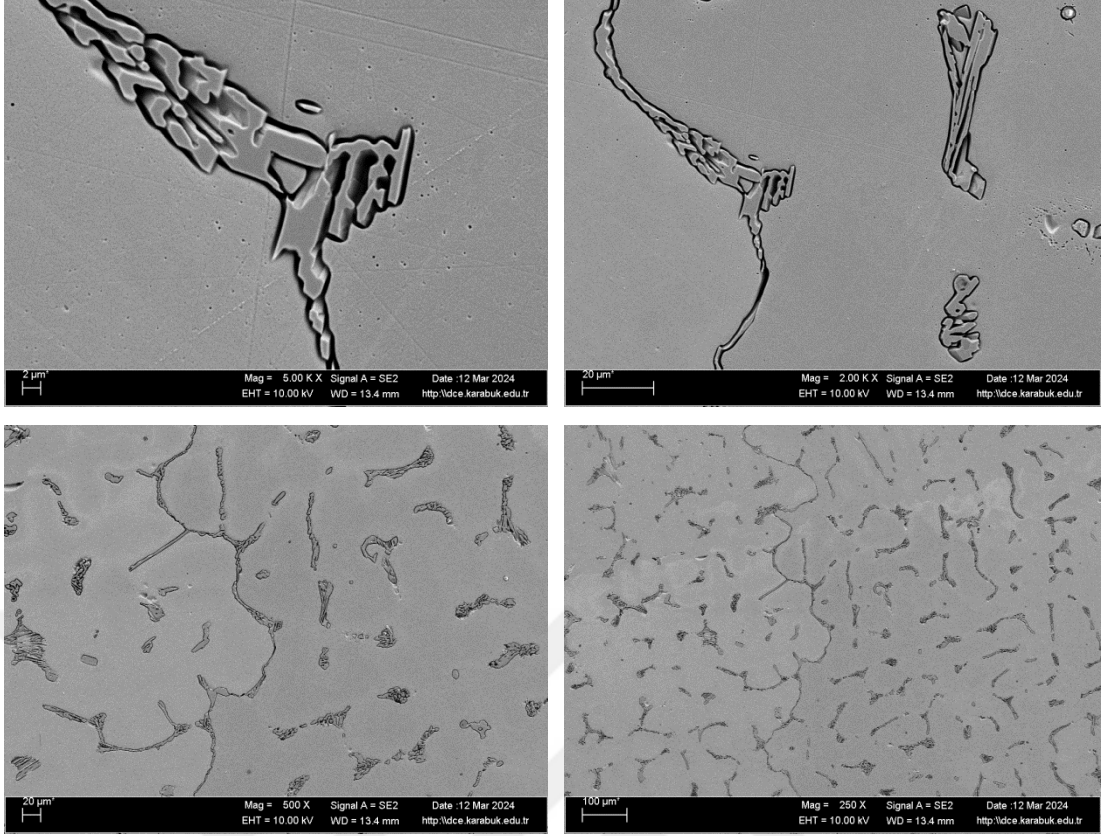
EK B : Optik Mikroskop Görüntüleri



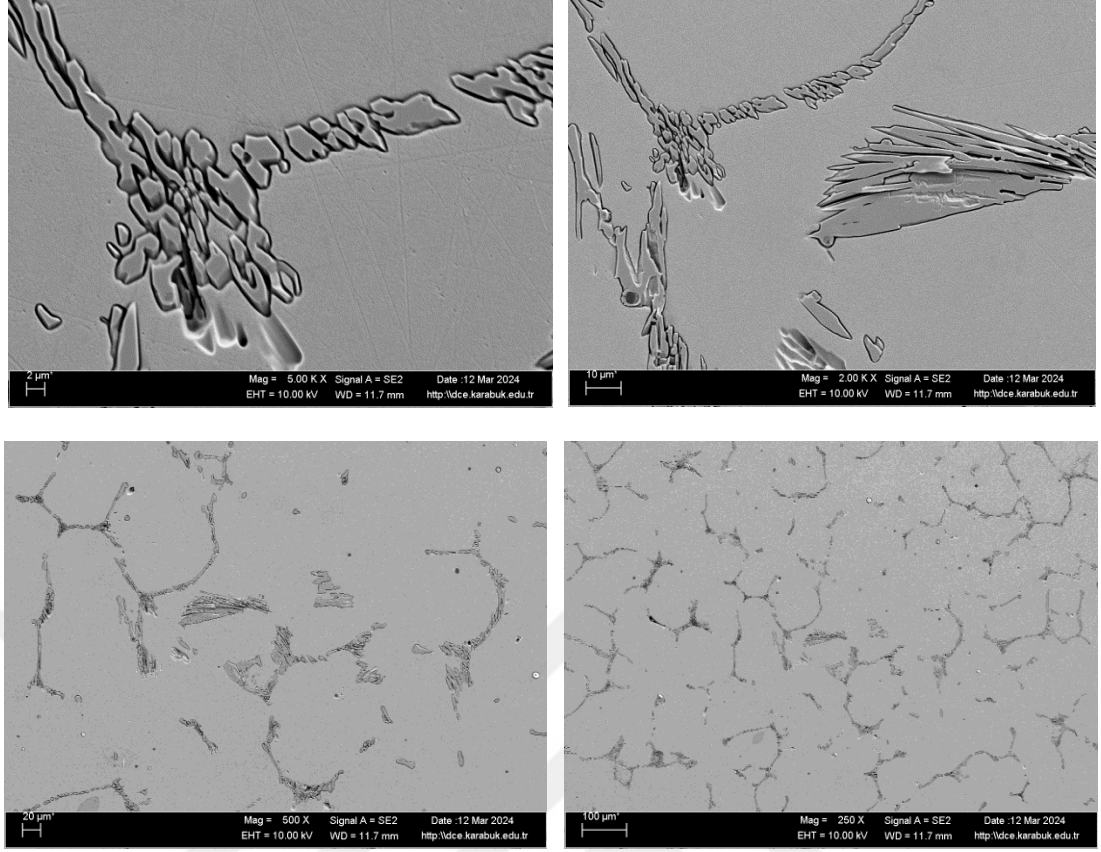
EK A



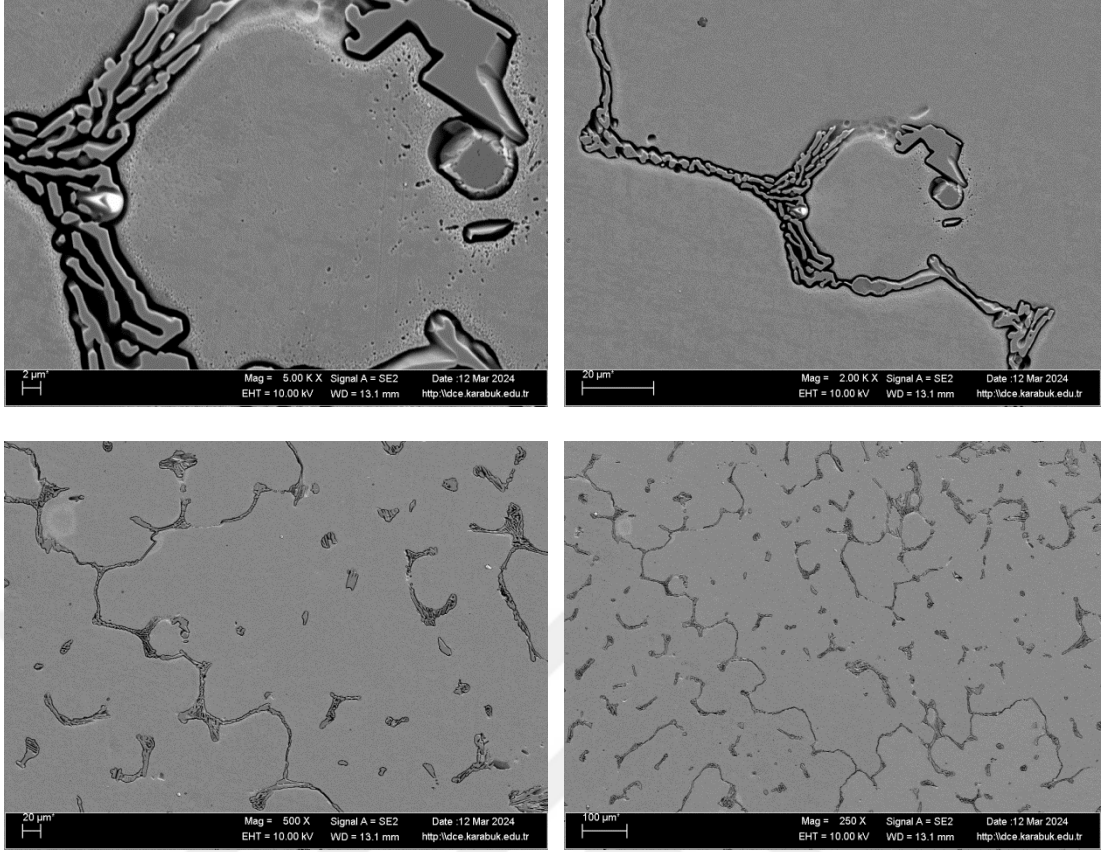
Şekil A.1 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



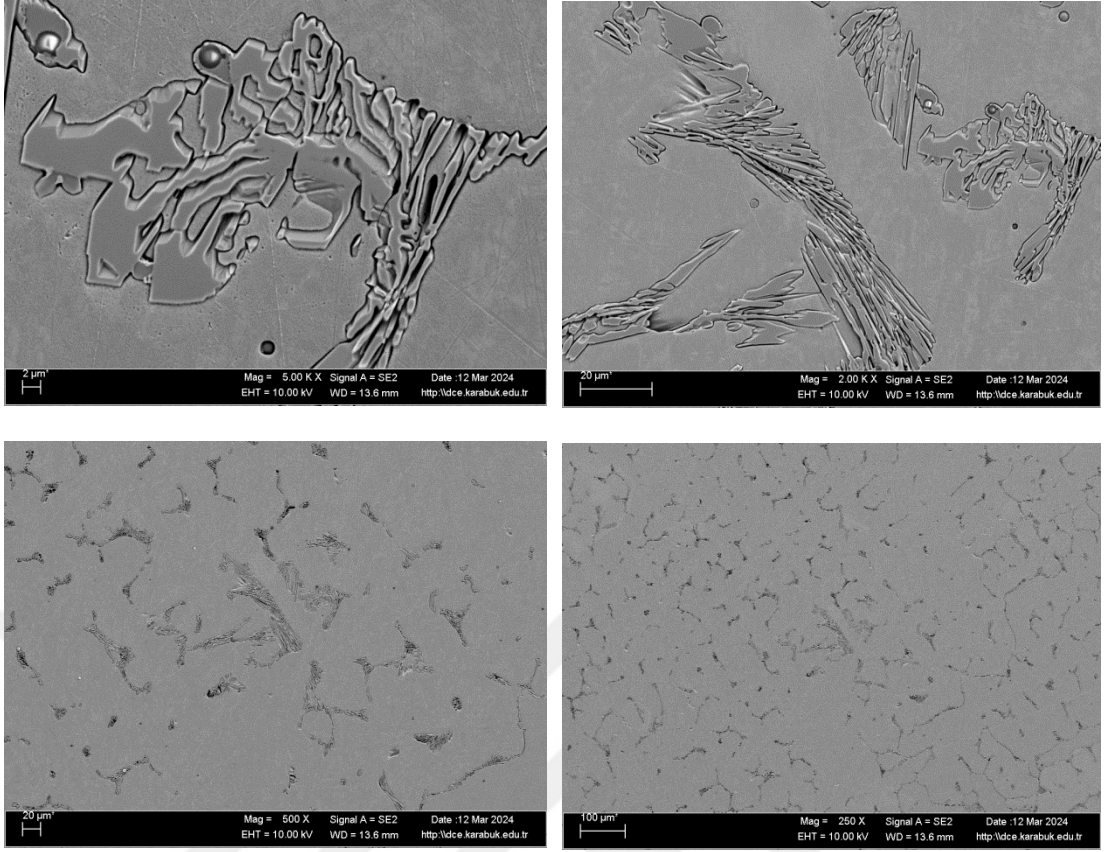
Şekil A.2 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



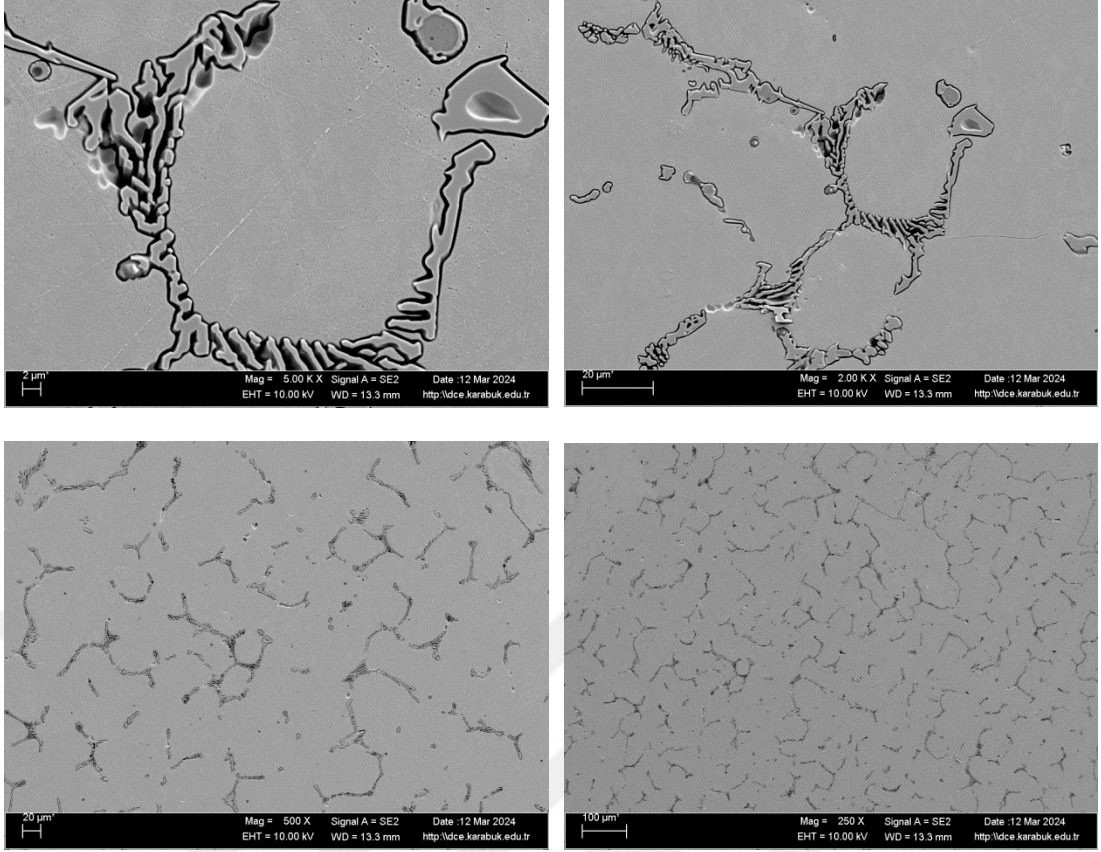
Şekil A.3 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



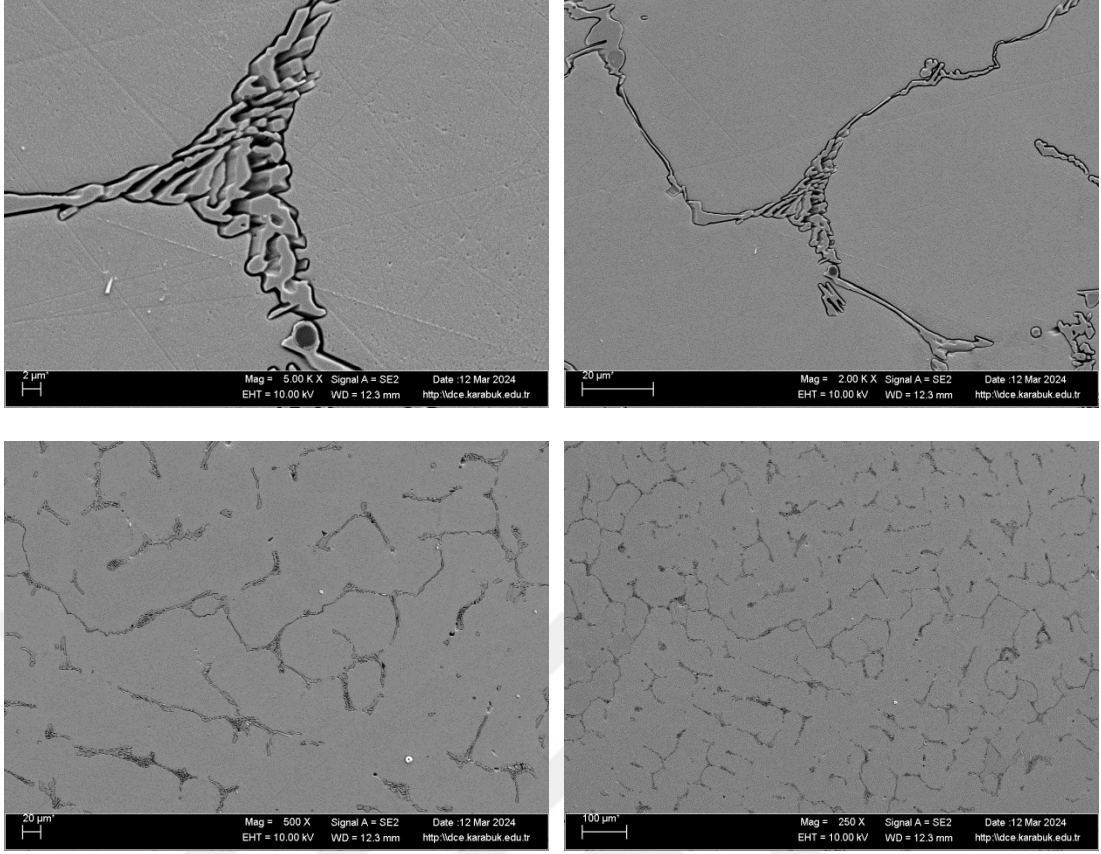
Şekil A.4 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



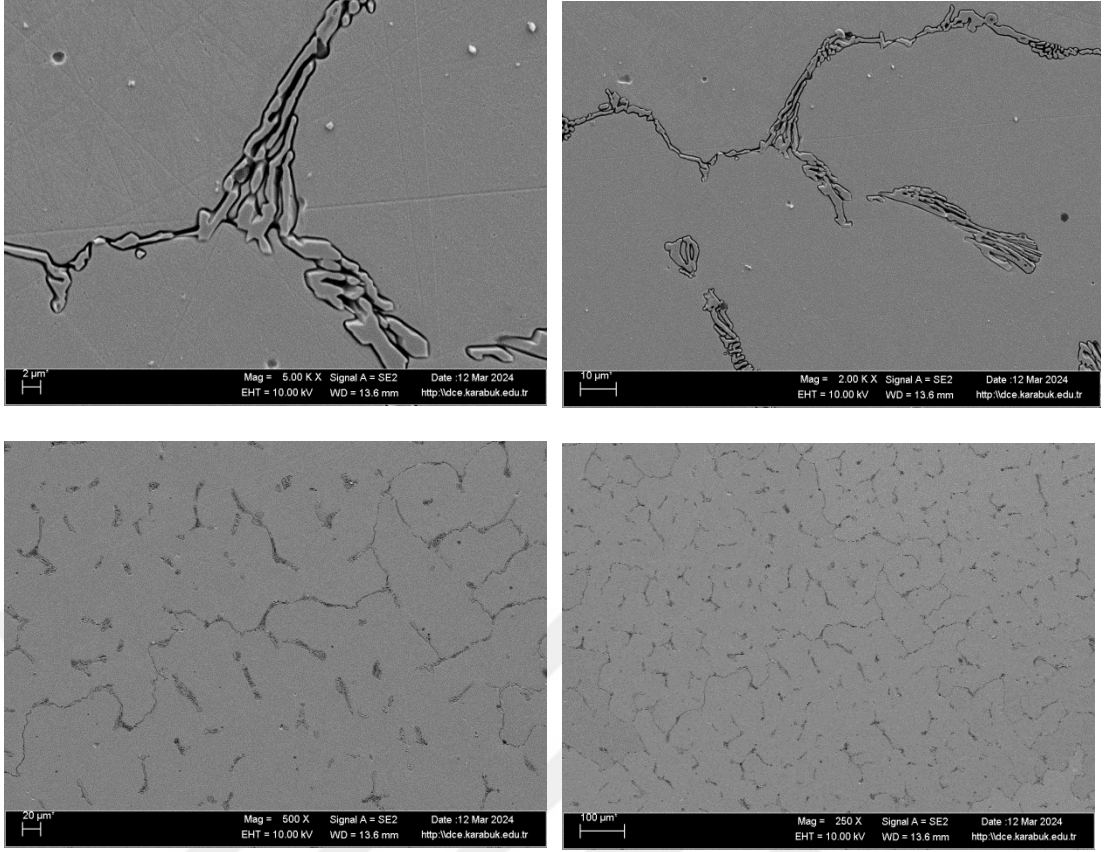
Şekil A.5 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



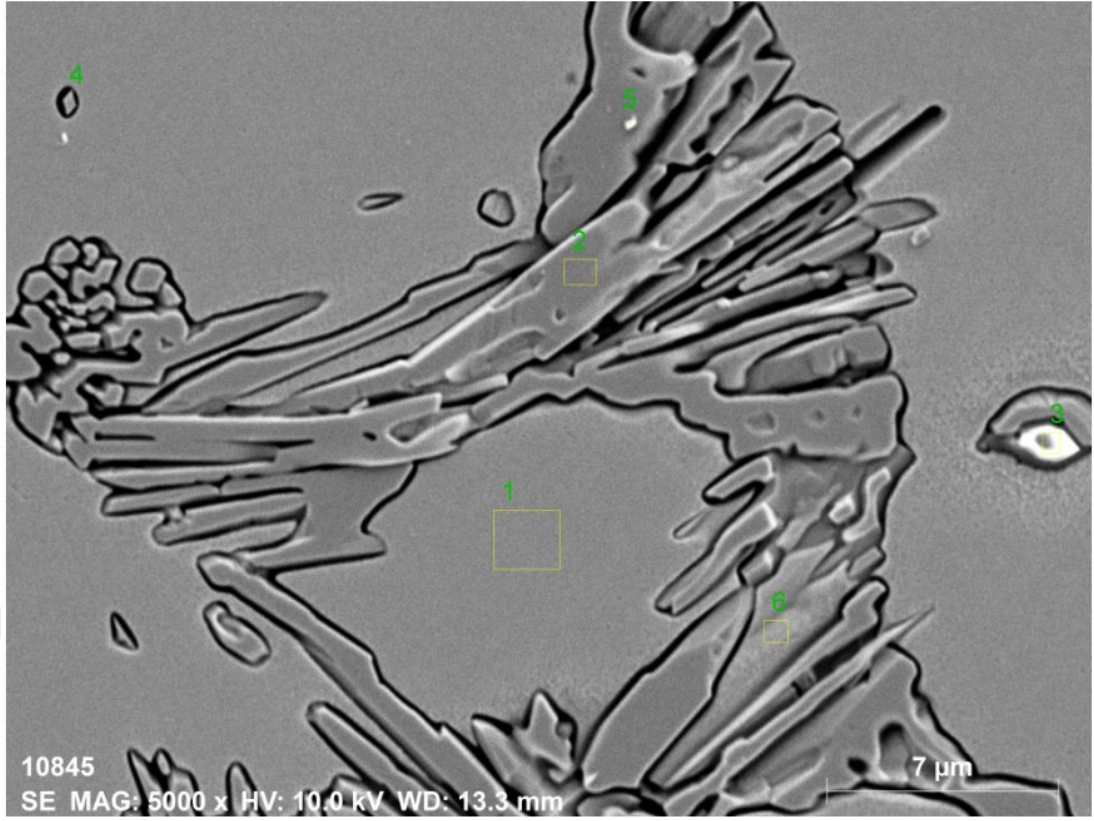
Şekil A.6 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



Şekil A.7 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



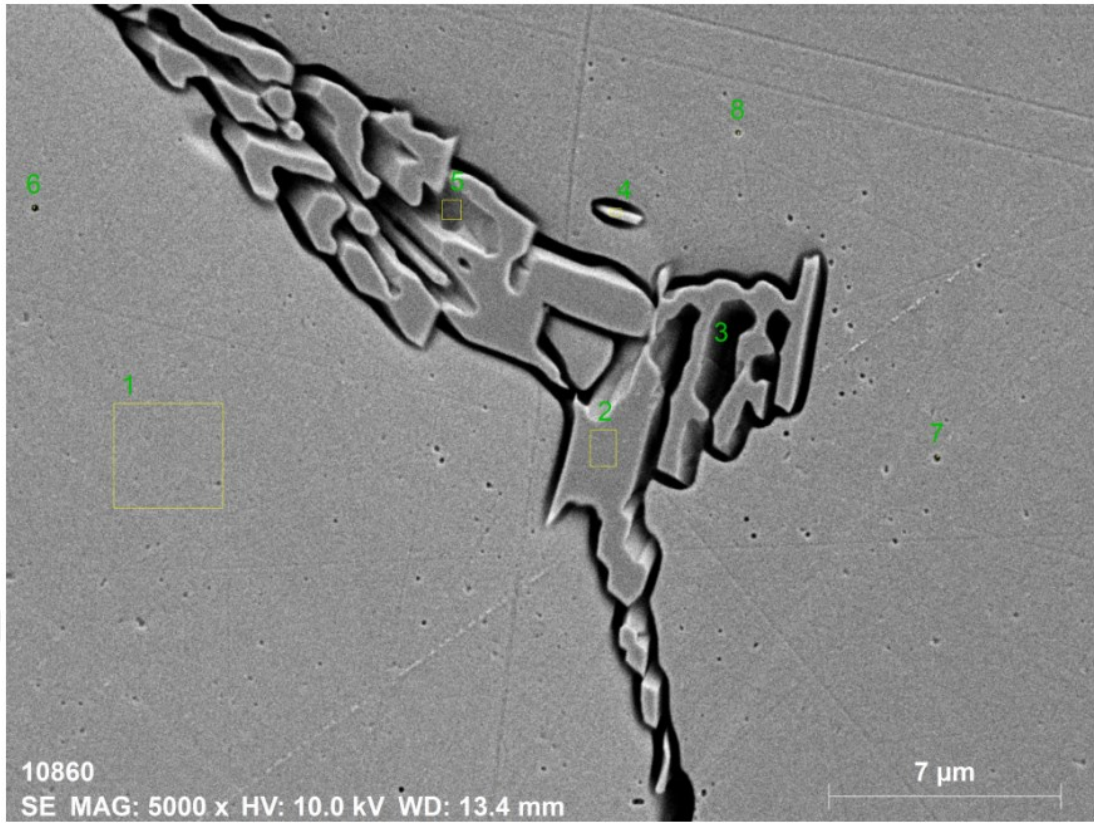
Şekil A.8 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait SEM görüntüleri (yakınlaştırma oranları; 5.000x (sol üstteki), 2.000x (sağ üstteki), 500x (sol alttaki) ve 250x (sağ alttaki)).



Şekil A.9 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.1 : 1. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

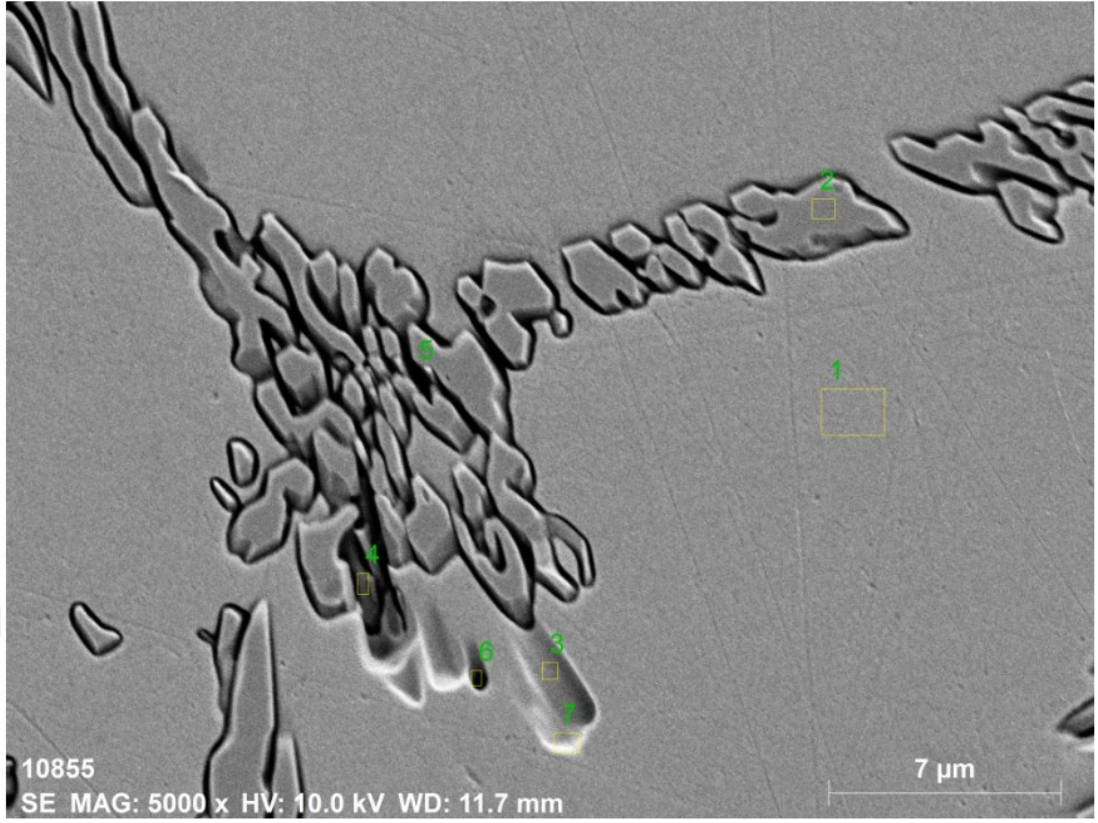
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	23,54	26,89	2,72	3,00	43,86
2. Nokta	73,29	1,74	0,01	13,85	11,12
3. Nokta	31,70	21,16	3,81	5,65	37,68
4. Nokta	21,90	27,49	3,07	3,69	43,85
5. Nokta	72,77	1,76	0,04	13,89	11,54
6. Nokta	29,58	17,14	2,18	5,43	45,68
Ortalama	42,13	16,03	1,97	7,59	32,29



Şekil A.10 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.2 : 2. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

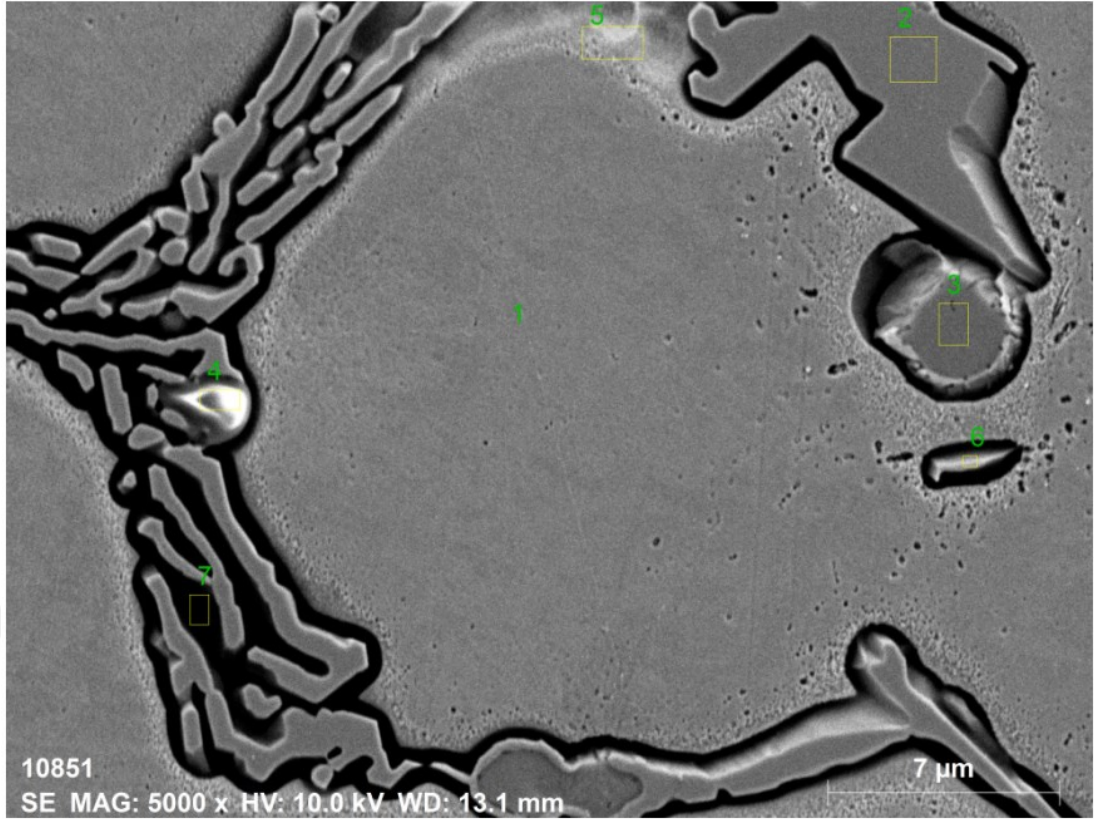
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	19,57	27,52	2,17	3,22	47,52
2. Nokta	72,57	2,23	0,00	14,26	10,93
3. Nokta	79,77	0,00	0,01	9,35	10,88
4. Nokta	19,27	29,31	3,27	4,27	43,88
5. Nokta	70,41	0,87	0,03	18,72	9,96
6. Nokta	20,48	27,85	2,98	3,71	44,97
7. Nokta	20,77	28,43	3,22	3,39	44,19
8. Nokta	23,93	27,01	3,17	4,25	41,63
Ortalama	40,85	17,90	1,86	7,65	34,75



Şekil A.11 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.3 : 3. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

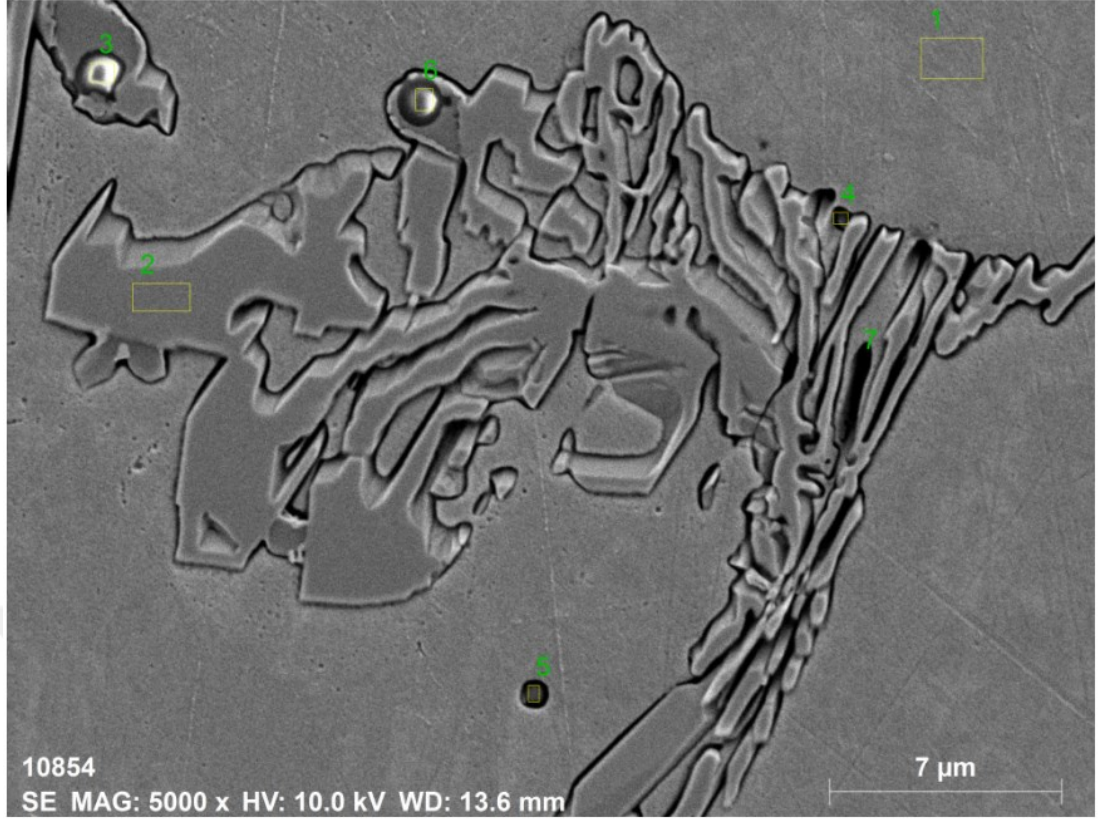
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	22,24	27,67	3,34	3,31	43,44
2. Nokta	76,72	2,16	0,11	8,56	12,45
3. Nokta	16,52	29,05	3,56	3,35	47,52
4. Nokta	52,10	13,38	0,99	6,72	26,80
5. Nokta	65,37	6,93	0,56	8,89	18,24
6. Nokta	18,54	28,00	3,46	3,32	46,68
7. Nokta	18,40	28,33	3,49	3,17	46,61
Ortalama	38,56	19,36	2,22	5,33	34,53



Şekil A.12 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.4 : 4. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

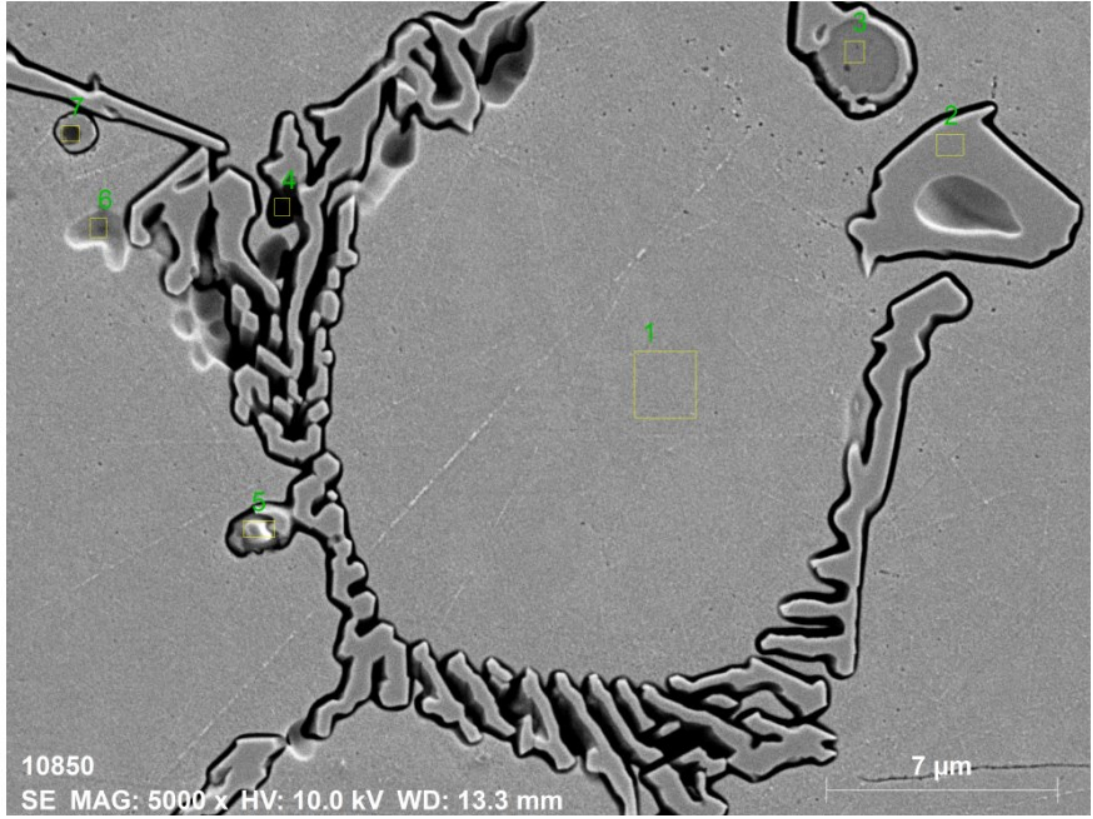
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	25,76	25,19	2,62	2,79	43,64
2. Nokta	74,27	1,84	0,10	13,91	9,88
3. Nokta	64,42	2,77	1,95	3,69	27,17
4. Nokta	3,25	1,78	78,16	14,25	2,56
5. Nokta	19,02	31,15	3,13	4,18	42,52
6. Nokta	65,01	4,11	0,28	15,54	15,06
7. Nokta	82,16	0,00	0,00	0,33	17,51
Ortalama	47,70	9,55	12,32	7,81	22,62



Şekil A.13 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.5 : 5. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

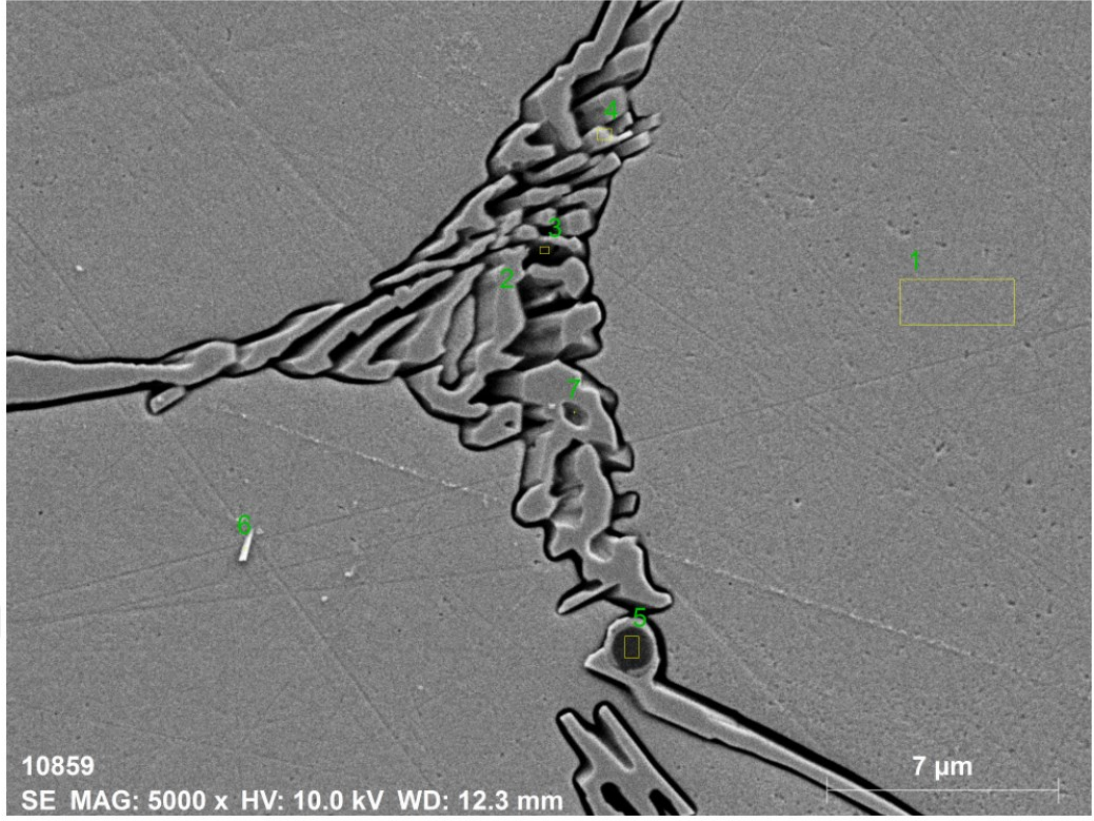
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	21,91	28,71	2,93	3,89	42,56
2. Nokta	71,41	2,38	0,16	15,28	10,76
3. Nokta	4,86	0,72	79,25	15,05	0,11
4. Nokta	77,04	1,55	0,55	5,94	14,92
5. Nokta	13,17	15,21	36,00	6,81	28,81
6. Nokta	3,52	0,12	79,21	14,12	3,04
7. Nokta	30,97	1,36	42,96	4,17	20,54
Ortalama	31,84	7,15	34,44	9,32	17,25



Şekil A.14 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.6 : 6. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

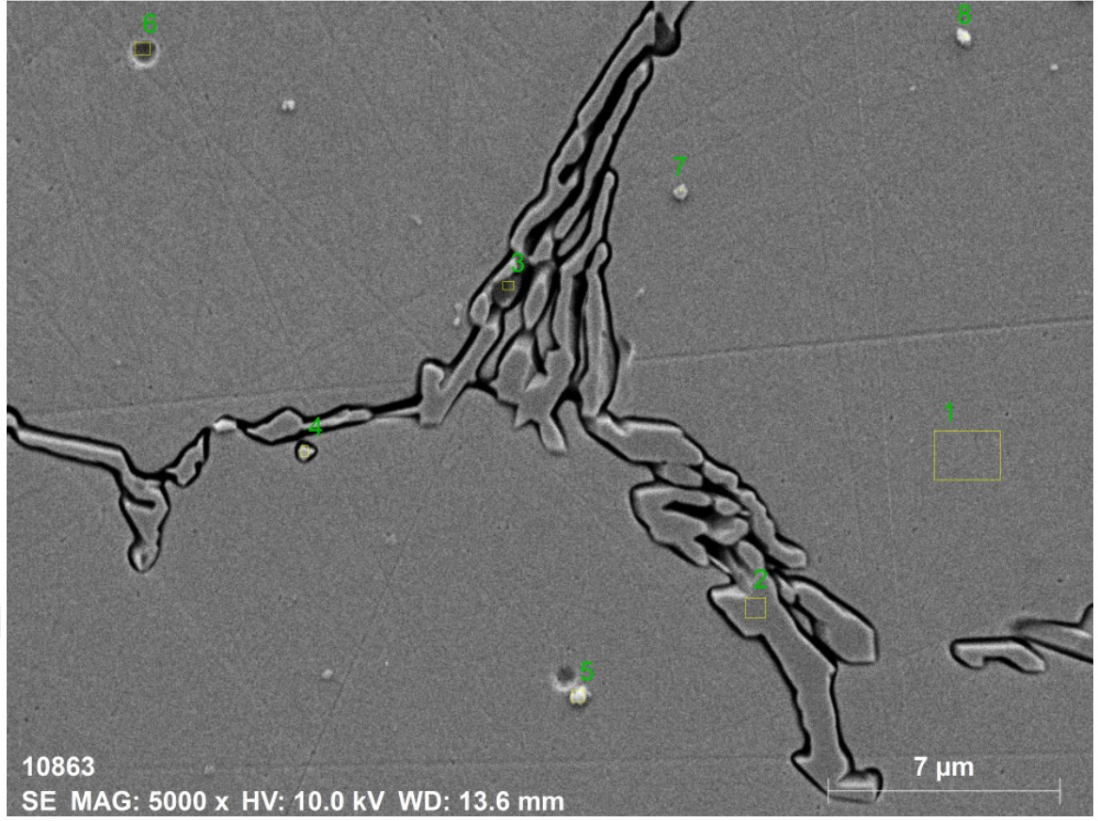
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	21,66	28,90	3,13	3,24	43,07
2. Nokta	71,87	2,26	0,08	14,70	11,09
3. Nokta	62,65	2,80	2,88	3,84	27,83
4. Nokta	89,75	0,00	0,25	0,87	9,12
5. Nokta	15,82	0,29	61,99	16,03	5,87
6. Nokta	24,68	17,84	1,31	2,41	53,76
7. Nokta	27,01	3,19	47,00	10,25	12,54
Ortalama	44,78	7,90	16,66	7,34	23,33



Şekil A.15 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.7 : 7. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

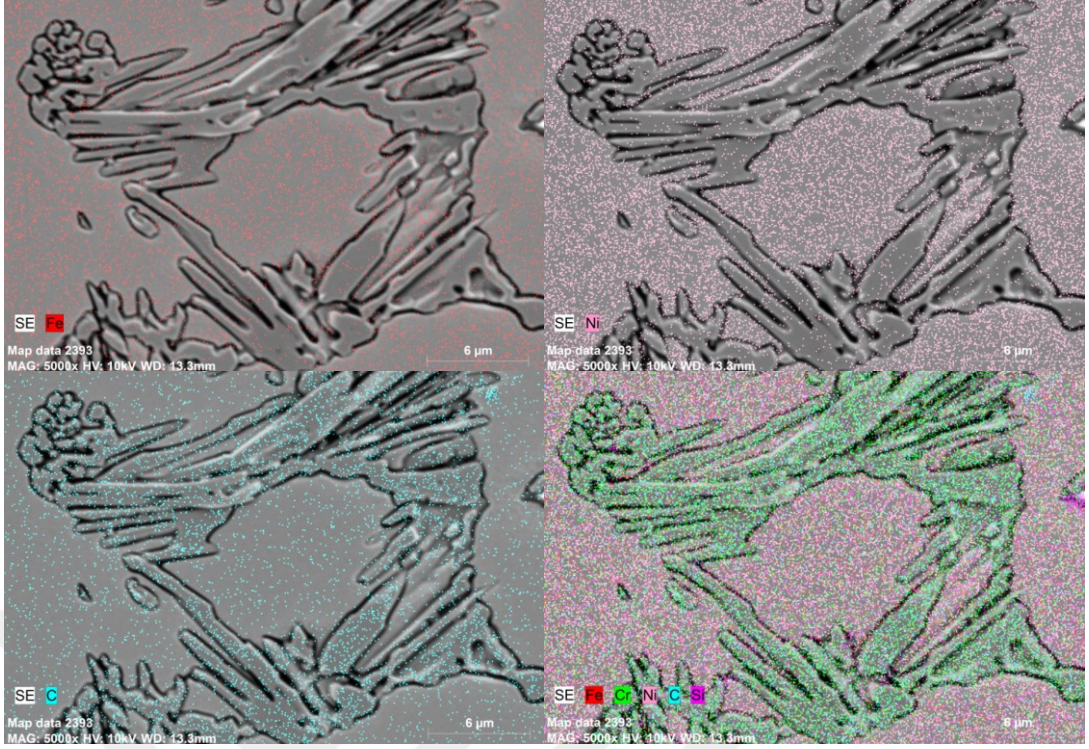
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	20,69	27,36	2,20	3,5	46,26
2. Nokta	32,09	21,05	1,48	6,31	39,07
3. Nokta	88,43	0,00	0,45	1,39	9,73
4. Nokta	72,26	2,09	0,13	13,23	12,29
5. Nokta	2,83	0,25	80,06	13,84	3,02
6. Nokta	61,20	9,01	0,68	16,43	12,68
7. Nokta	72,31	0,94	0,00	14,95	11,80
Ortalama	49,97	8,67	12,14	9,95	19,26



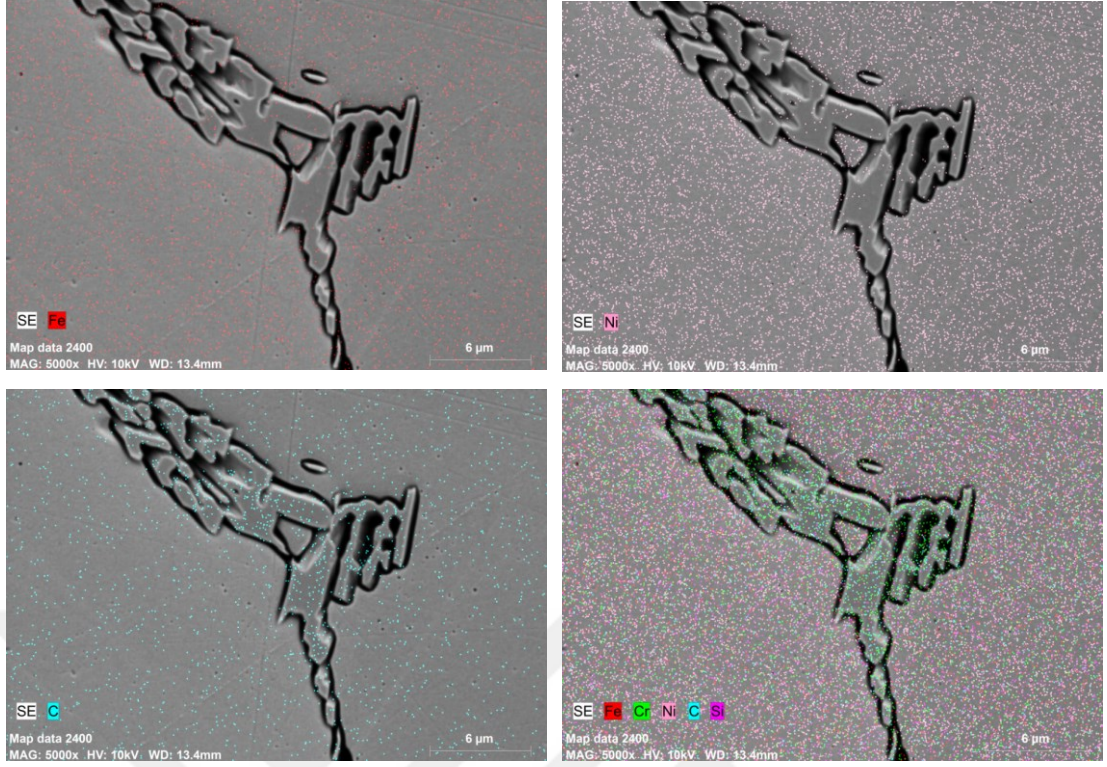
Şekil A.16 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait bölgesel olarak işaretlenmiş EDX görüntüsü.

Tablo A.8 : 8. Numuneye ait noktasal olarak elemental analiz sonuçları (%).

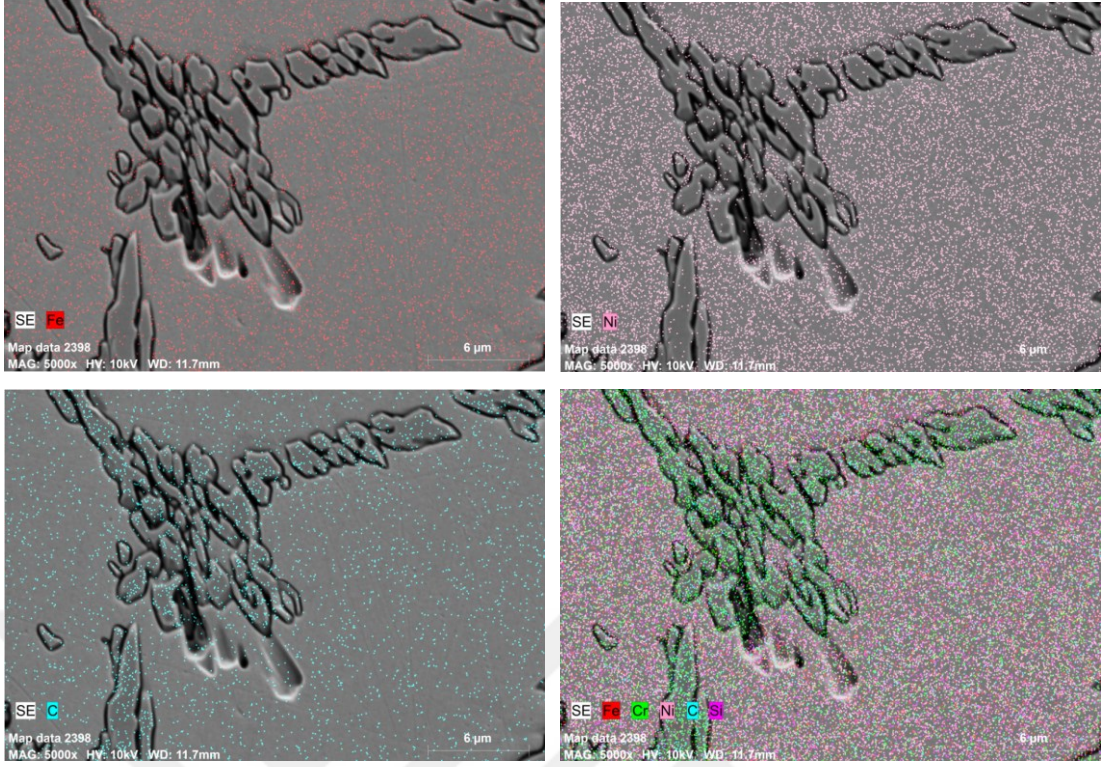
	Cr	Ni	Si	C	Fe
1. Nokta	20,58	28,12	2,81	3,94	44,55
2. Nokta	67,41	3,62	0,64	13,89	14,44
3. Nokta	43,09	4,45	31,00	14,61	6,85
4. Nokta	20,06	25,96	3,25	3,62	47,11
5. Nokta	20,52	25,15	2,83	2,79	48,71
6. Nokta	18,88	30,18	2,59	4,02	44,34
7. Nokta	20,65	26,99	2,59	6,24	43,53
8. Nokta	20,60	25,10	3,12	3,56	47,63
Ortalama	28,97	21,20	6,10	6,58	37,14



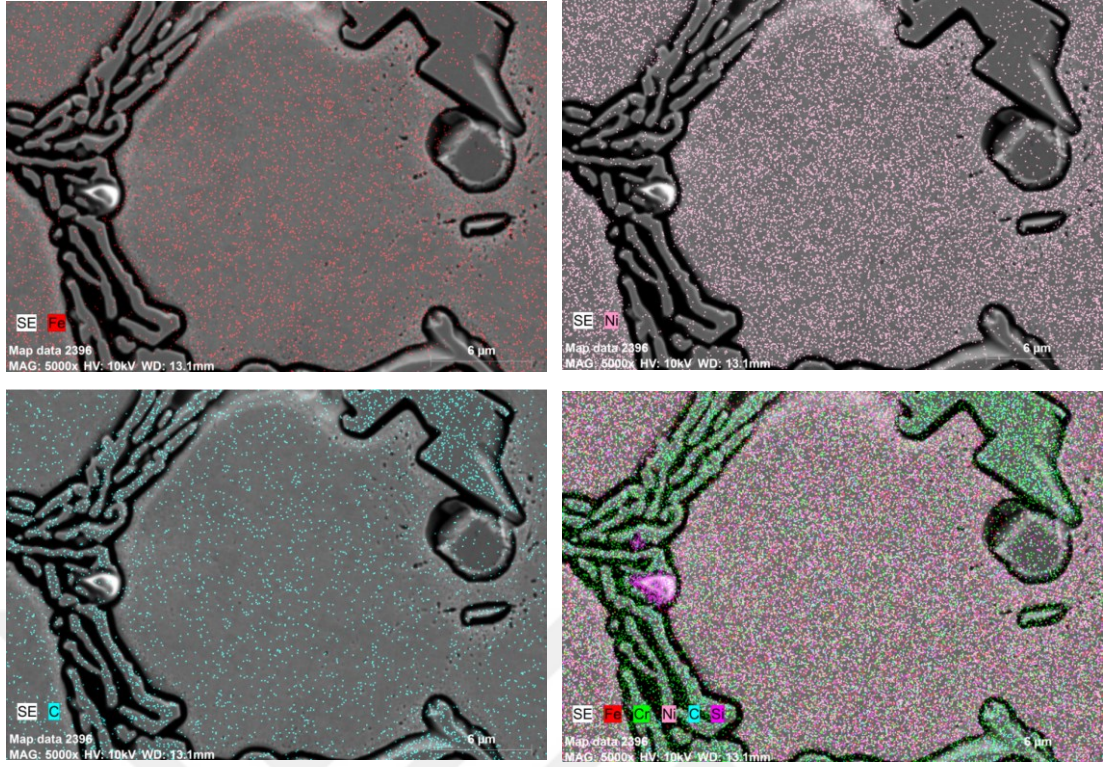
Şekil A.17 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).



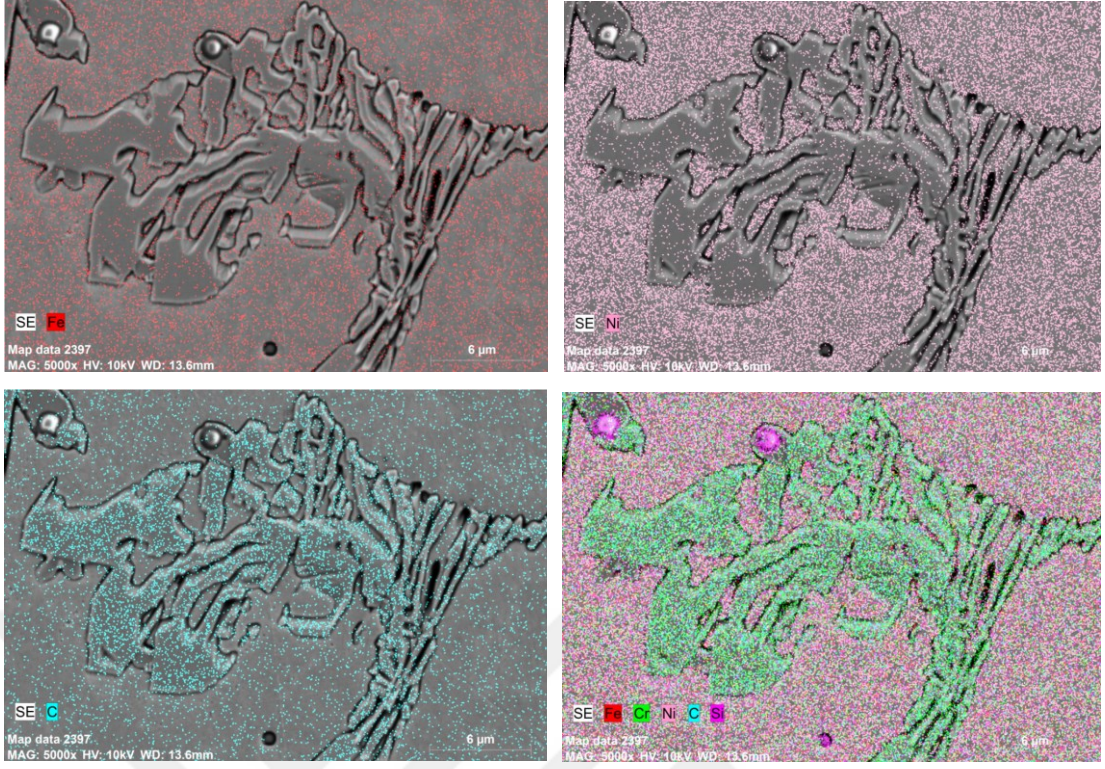
Şekil A.18 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).



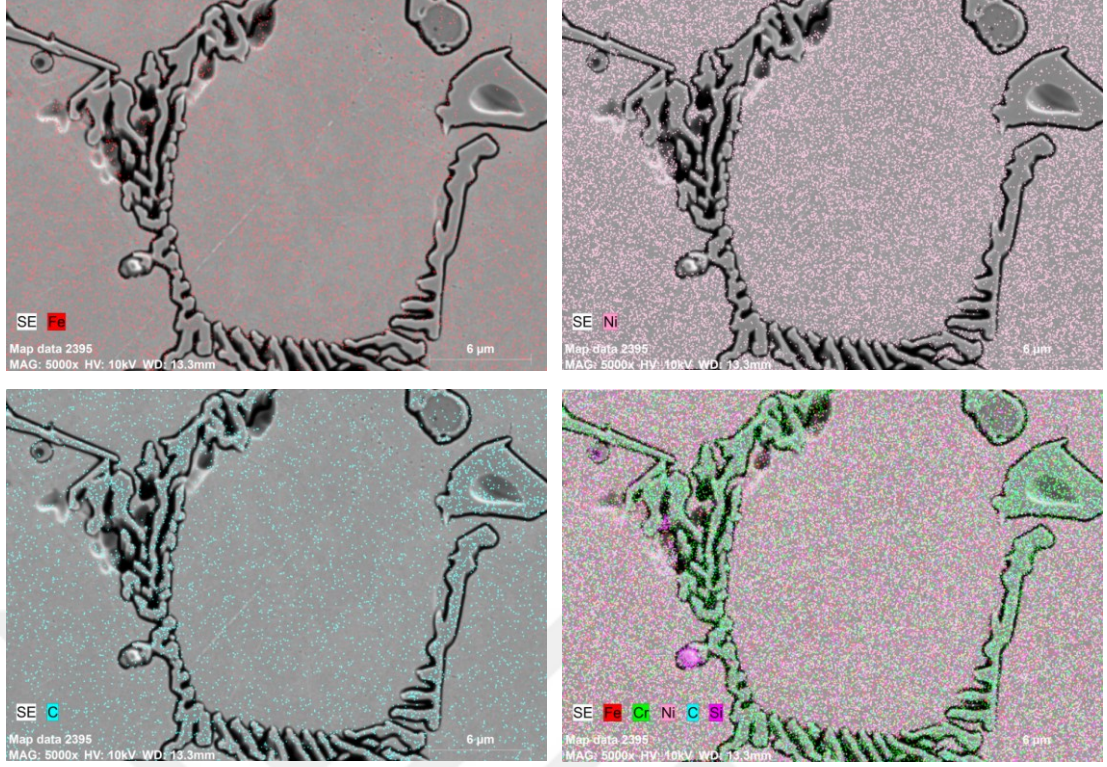
Şekil A.19 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki)).



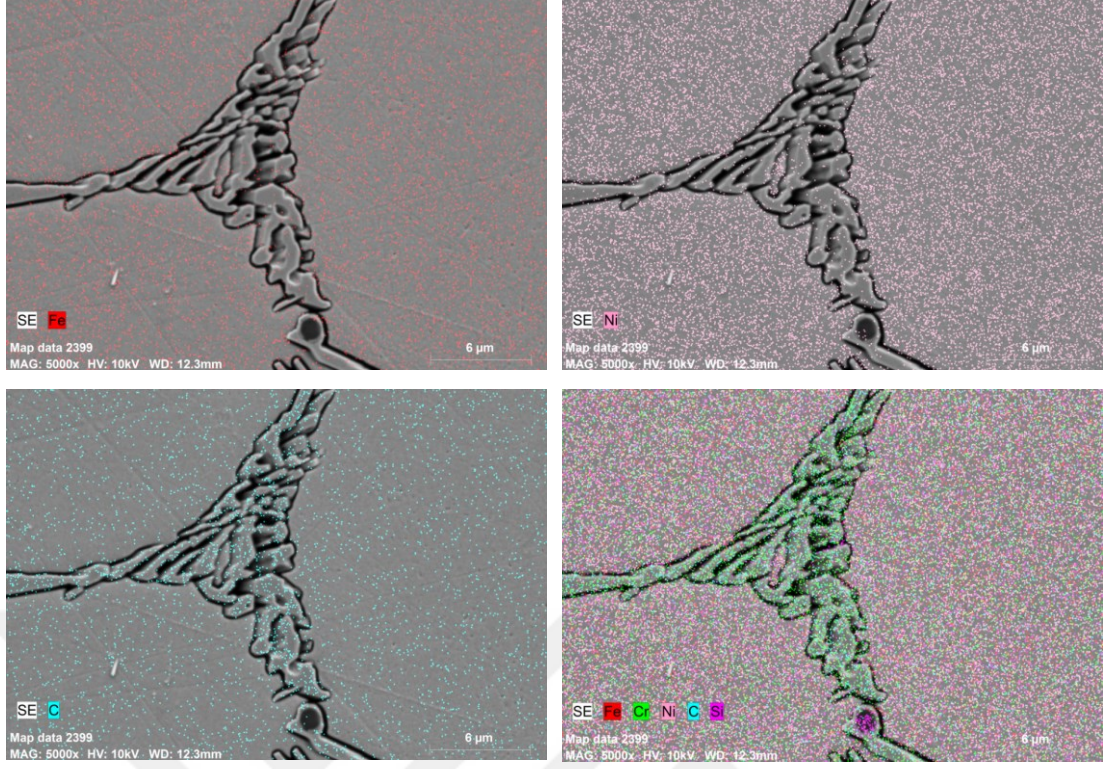
Şekil A.20 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki)).



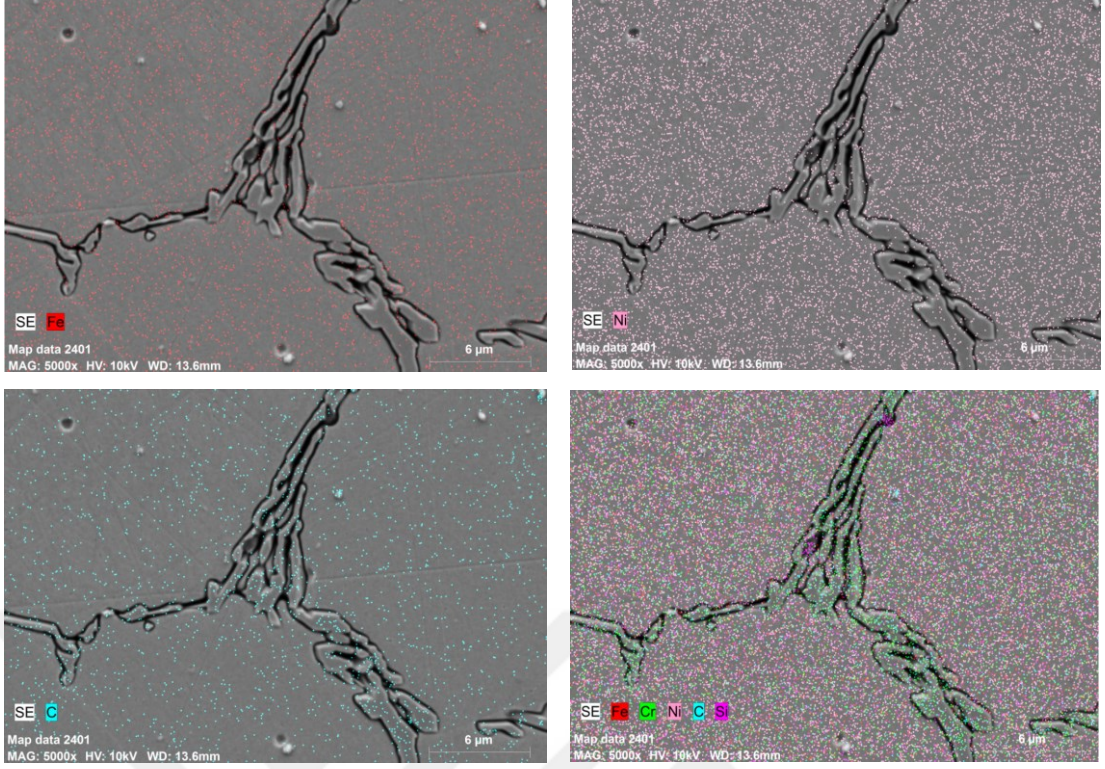
Şekil A.21 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).



Şekil A.22 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki).

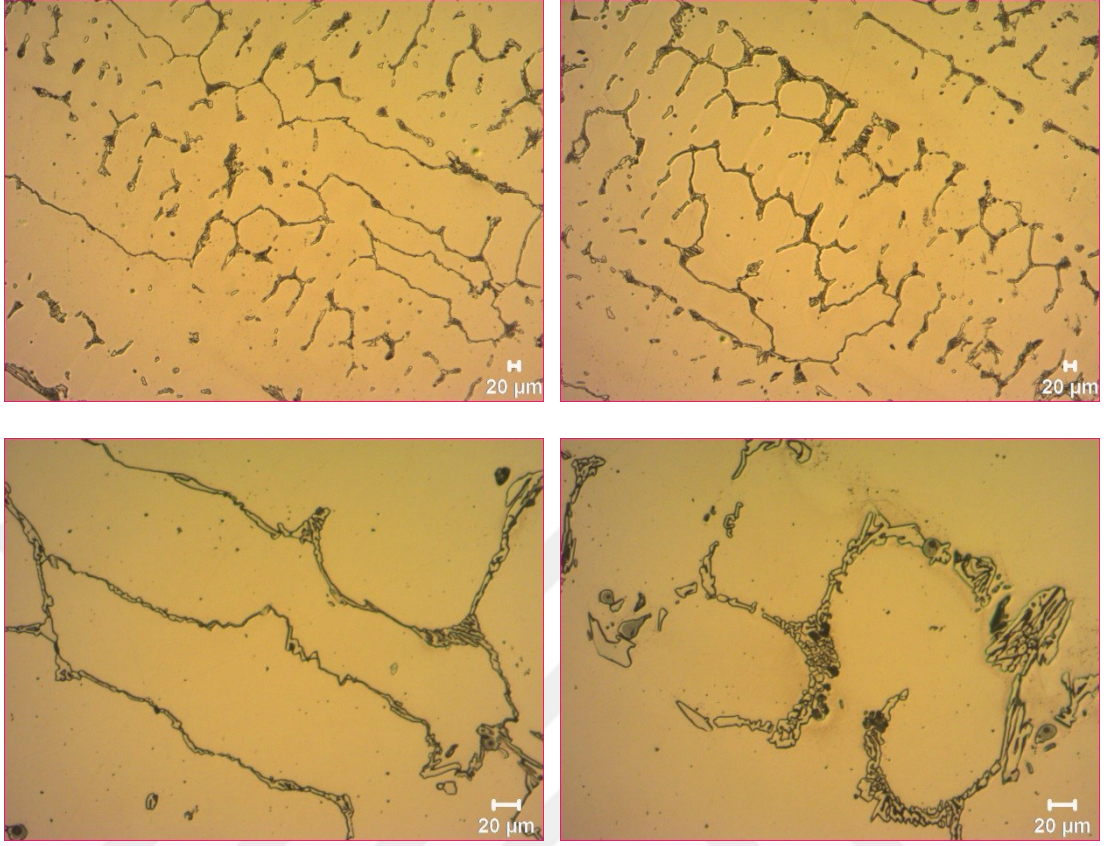


Şekil A.23 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki)).

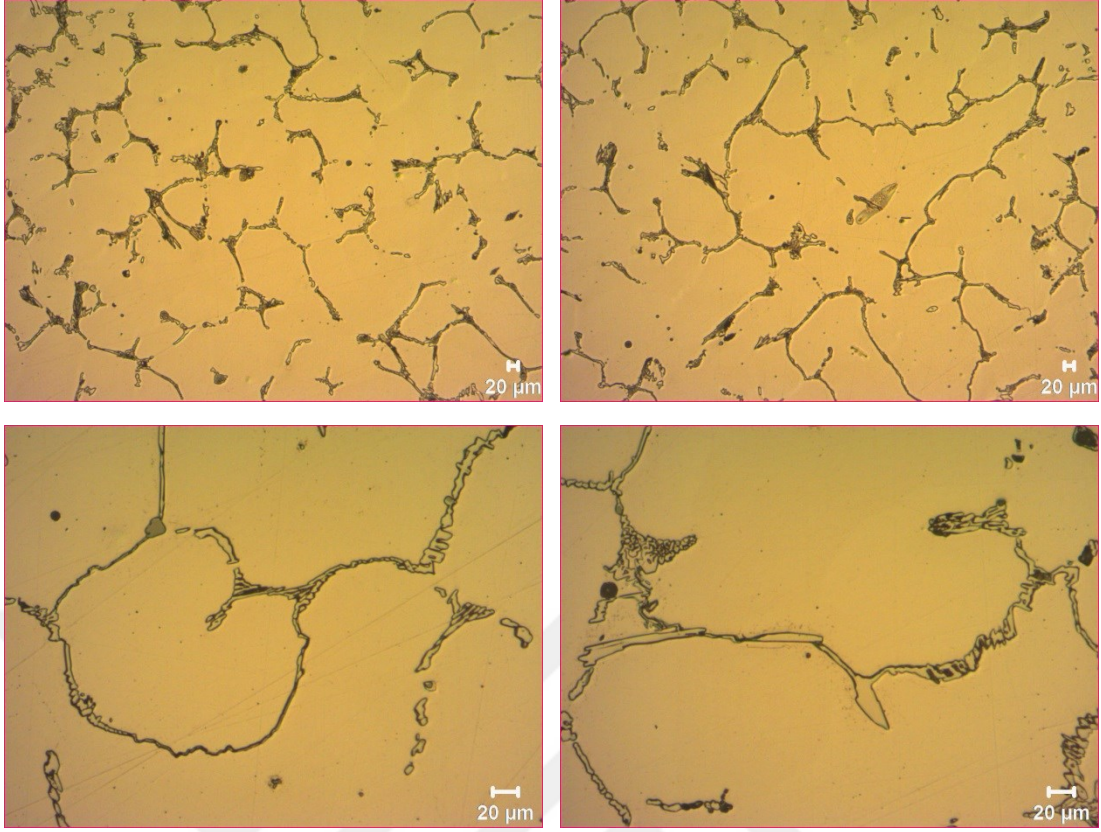


Şekil A.24 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait haritalama (element dağılımları) görüntüleri (demir (Fe) (sol üstteki), nikel (Ni) (sağ üstteki), karbon (C) (sol alttaki) ve bütün yüksek oranlı elementlerin aynı görsel üzerinde gösterilmesi (sağ alttaki)).

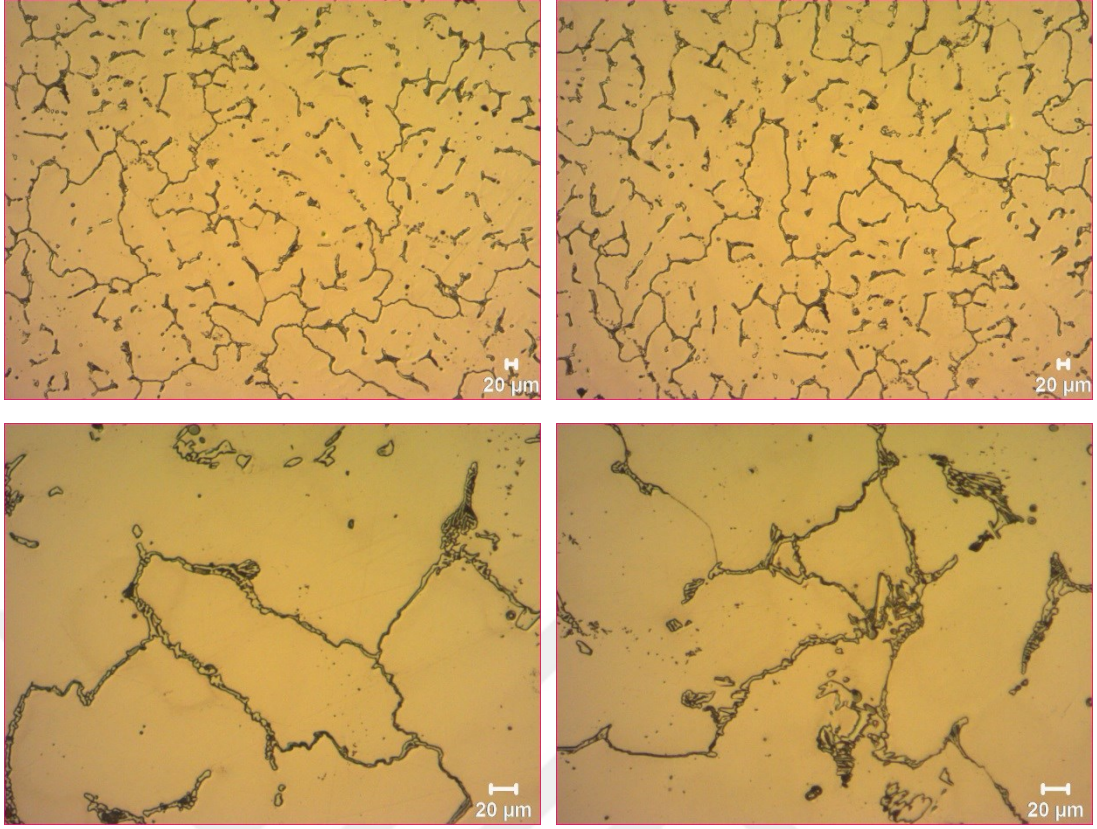
EK B



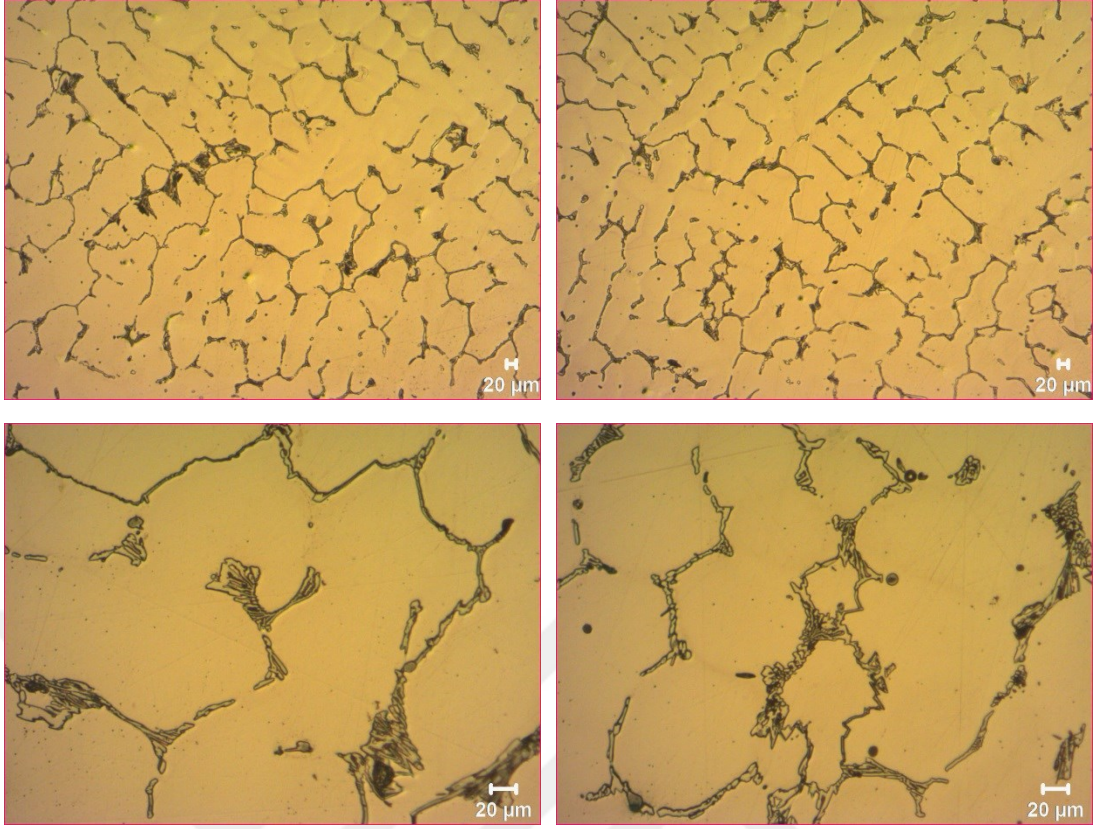
Şekil B.1 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 1. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).



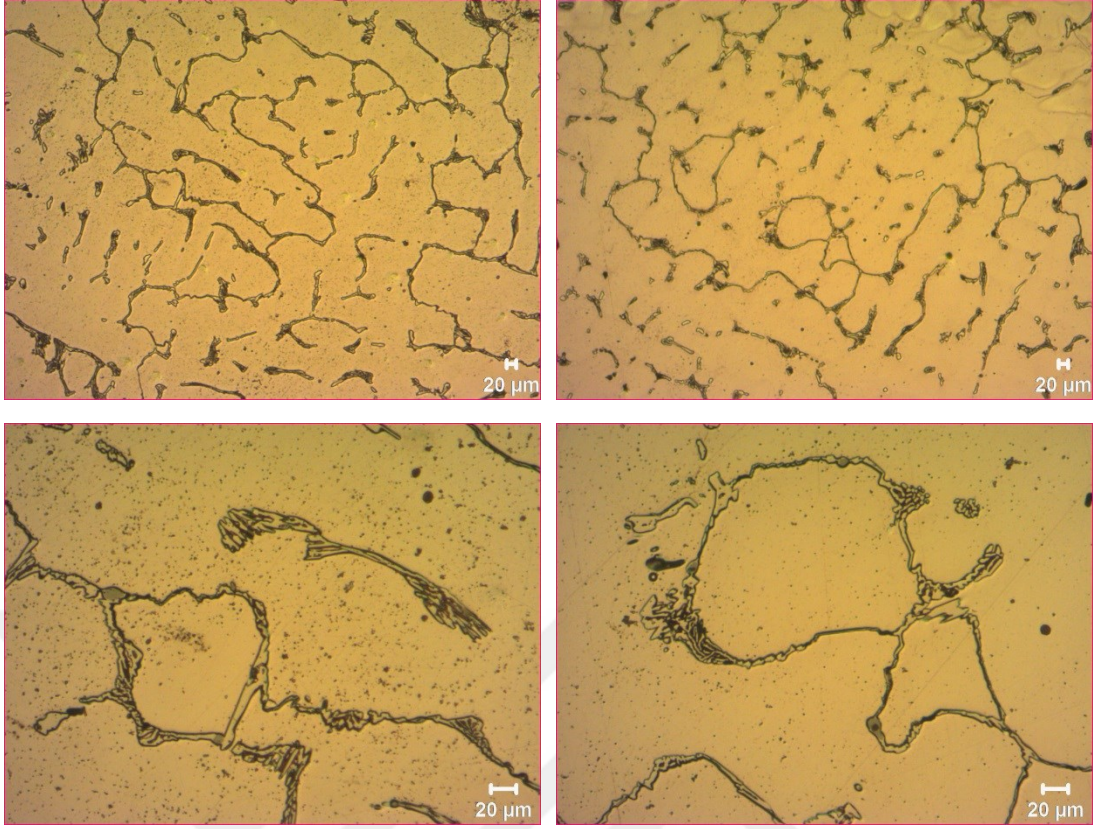
Şekil B.2 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 2. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).



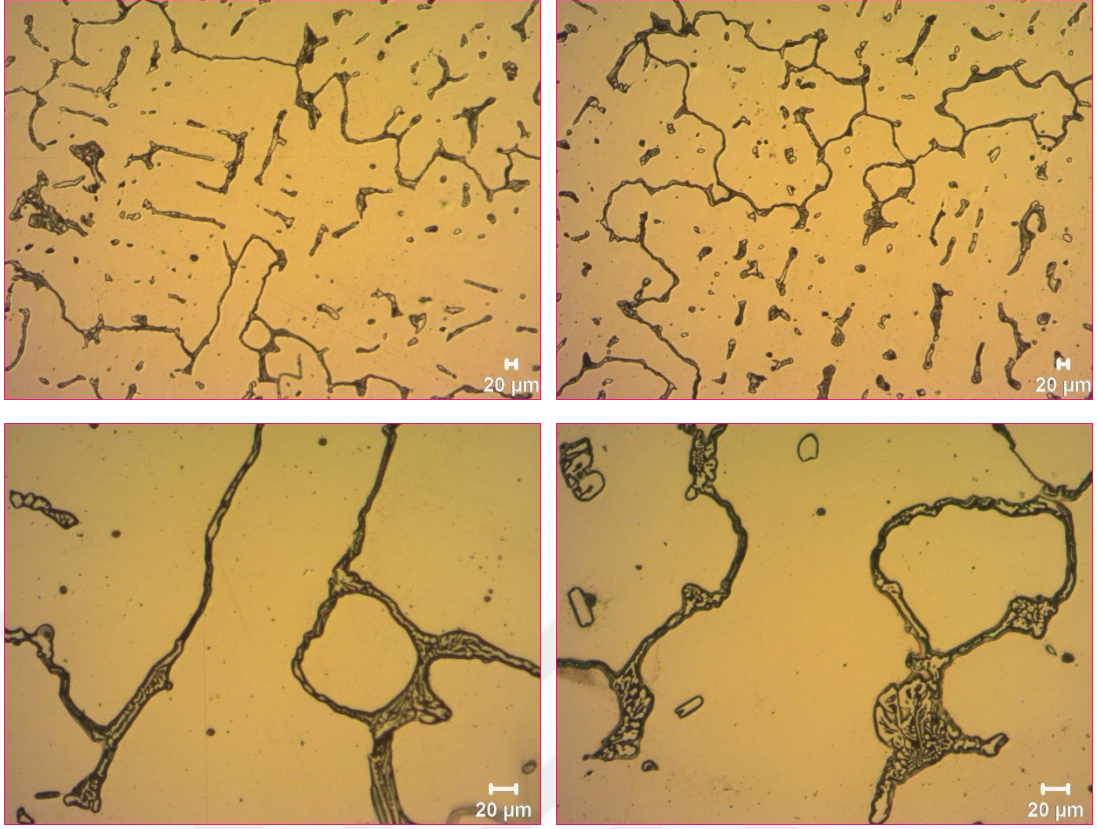
Şekil B.3 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 3. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlştırılmıştır).



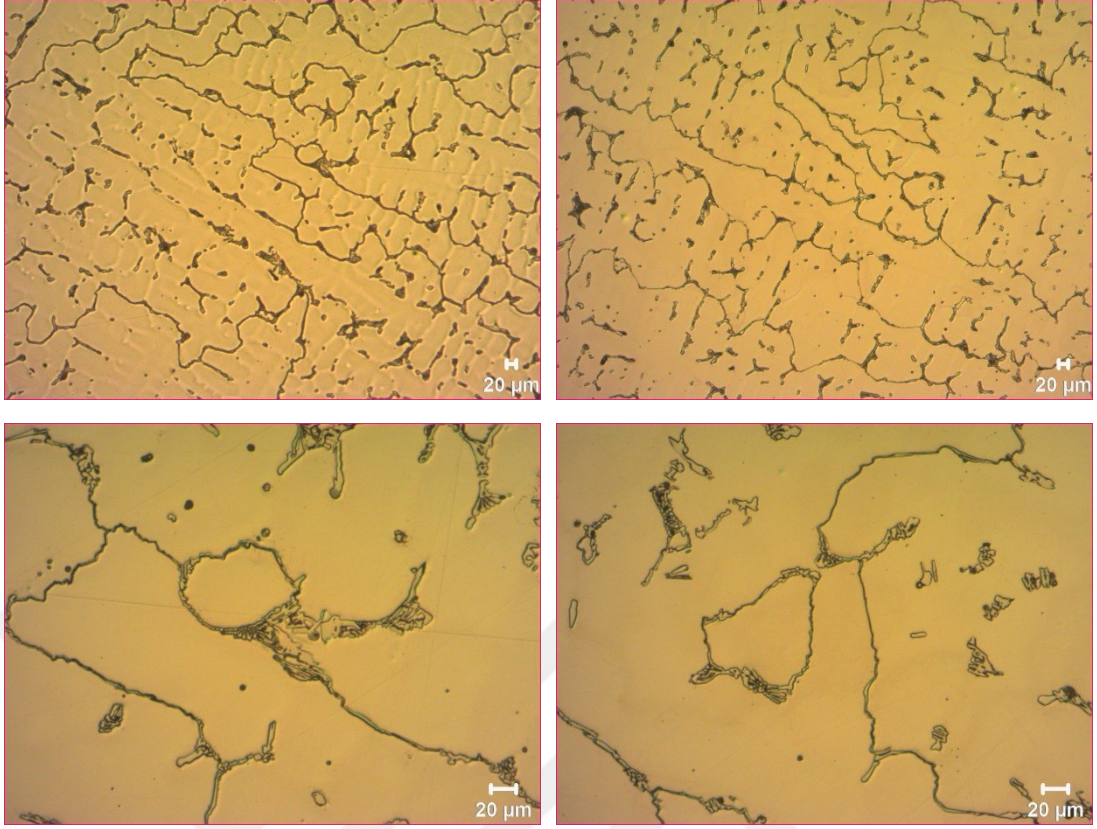
Şekil B.4 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 4. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlştırılmıştır).



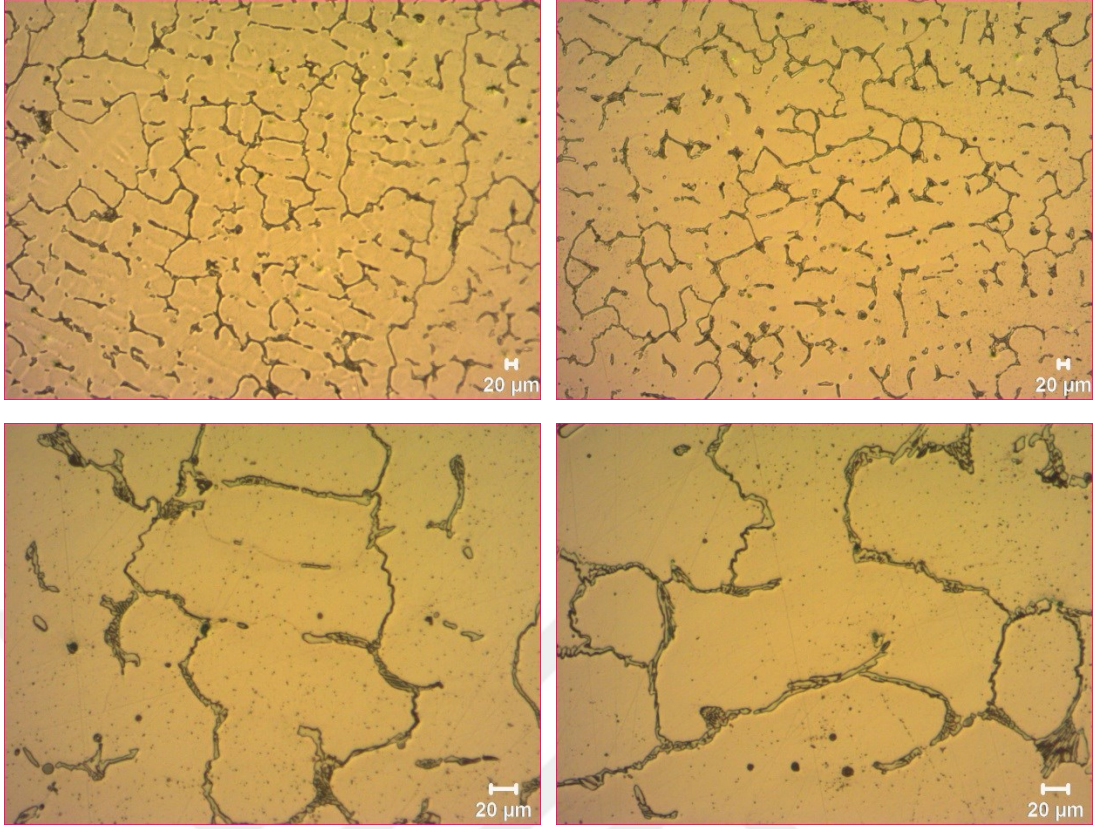
Şekil B.5 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 5. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).



Şekil B.6 : Soğutucusuz dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 6. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlaştırılmıştır).



Şekil B.7 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 7. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlştırılmıştır).



Şekil B.8 : Soğutuculu olarak dökülen ASTM A297 HK östenitik paslanmaz çelik olan 8. Numuneye ait mikroyapı görüntüleri (üstteki görüntüler 50x , alttaki görüntüler 100x yakınlştırılmıştır).