

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKTE OLUŞAN SİGMA VE CHİ FAZLARININ
OLUŞUM MEKANİZMALARININ FARKLI ISIL İŞLEM PARAMETRELERİYLE
SAPTANMASI**

SEVİLAY AKPINAR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
MALZEME PROGRAMI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. AHMET KARAASLAN**

İSTANBUL, 2014

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKTE OLUŞAN SİGMA VE CHİ FAZLARININ
OLUŞUM MEKANİZMALARININ FARKLI ISIL İŞLEM PARAMETRELERİYLE
SAPTANMASI

Sevilay AKPINAR tarafından hazırlanan tez çalışması 21 Temmuz 2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet TOPUZ

Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Selahattin YUMURTACI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Bu alışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü' nün 2014-07-02-YL02 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Lisans ve yüksek lisans eğitimim süresince bilgi birikimini, tavsiyelerini ve hoşgörüsünü esirgemeyen, mesleki hayatıma büyük katkılarının olduğuna inandığım kıymetli hocam Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN'a içten teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez süresi boyunca deneysel çalışmalarımnda yardımlarını aldığım değerli meslektaşım Sn. Alptekin KISASÖZ'e teşekkür ediyorum.

Yüksek lisans eğitimim süresince hiçbir konuda desteğini esirgemeyen Ahmet TEKO'ya özel teşekkürlerimi iletiyorum.

Hayatım boyunca desteğini hissettiğim canım babam Nurmettin AKPINAR'a, bütün sıkıntılarımı gideren canım annem Huriye AKPINAR'a, ideallerime ulaşmam için büyük fedakârlıklar gösteren ablam Nuray AKPINAR'a ve kardeşim Elifnur AKPINAR'a en içten şükranlarımı sunuyorum. Bu çalışmayı aileme ithaf ediyorum.

Temmuz, 2014

Sevilay AKPINAR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	viii
KISALTMA LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xix
ÖZET	xxi
ABSTRACT.....	xxiii
BÖLÜM 1	
GİRİŞ	2
1.1 Literatür Özeti.....	2
1.2 Tezin Amacı	3
1.3 Hipotez	3
BÖLÜM 2	
PASLANMAZ ÇELİKLER.....	5
2.1 Giriş.....	5
2.2 Paslanmaz Çelik Türleri	6
2.2.1 Ferritik Paslanmaz Çelikler	8
2.2.2 Östenitik Paslanmaz Çelikler	10
2.2.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	13
2.2.4 Çökelme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler	15
2.2.5 Dubleks Paslanmaz Çelikler.....	18
BÖLÜM 3	
DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER	21
3.1 Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi.....	21
3.1.1 1930-1960	21

3.1.2	1960 ve Sonrası	22
3.2	Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	25
3.3	Dubleks Paslanmaz Çelikte Oluşan Fazların Genel Özellikleri	39
3.3.1	Birincil Fazlar	41
3.3.1.1	Östenit Fazı	41
3.3.1.2	Ferrit Fazı	42
3.3.2	İkincil Fazlar	42
3.3.2.1	Sigma Fazı	43
3.3.2.2	Chi Fazı	47
3.3.2.3	Diğer İntermetalik Fazlar	49
BÖLÜM 4		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		51
4.1	Malzemeye Uygulanan Isıl İşlemler.....	51
4.1.1	Çözme Tav Sıcaklığı ve Süresi	52
4.1.2	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı ve Süresi.....	53
4.1.3	Soğutma Ortamları	54
4.2	Metalografi	54
4.3	Mikroyapısal Karakterizasyon.....	57
4.3.1	Optik Mikroskopisi (OM)	57
4.3.2	Tarama Elektron Mikroskopisi (SEM)	58
4.4	Korozyon Testi	60
4.5	Sertlik Ölçümü	62
BÖLÜM 5		
DENEYSEL SONUÇLAR		64
5.1	Isıl İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi	64
5.2	Mikroyapısal Görüntüleme ve Faz Oranlarının Belirlenmesi.....	64
5.2.1	Çözme Tav Süresinin ve Soğutma Ortamlarının Faz Oranlarına ve Mikroyapıya Etkisi.....	65
5.2.2	Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı ve Tav Süresinin Faz Oranlarına ve Mikroyapıya Etkisi	71
5.2.2.1	Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Isıl İşlemi Parametrelerine Bağlı Yapıdaki Ferrit Oranı	72
5.2.2.2	Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Isıl İşlemi Parametrelerine Bağlı Yapıdaki İkincil Faz Oranı ve Ortalama Tane Boyutu	98
5.3	Birincil ve İkincil Fazlara Ait EDS Analizleri.....	128
5.4	Yapının Isıl İşlem Parametrelerine Bağlı Sertlik Değişimi.....	155
5.5	Yapının Isıl İşlem Parametrelerine Bağlı Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi	164
BÖLÜM 6		
SONUÇ VE ÖNERİLER.....		177
KAYNAKLAR		185

ÖZGEÇMİŞ.....	191
---------------	-----

SİMGE LİSTESİ

γ	Birincil östenit fazı (KYM)
γ_2	İkincil östenit fazı (KYM)
δ	Delta ferrit fazı (KHM)
σ	Sigma fazı
C	Karbon
Cr	Krom
Cu	Bakır
Mo	Molibden
Nb	Niobyum
N	Azot
Ni	Nikel
P	Fosfor
S	Kükürt
Se	Selenyum
Si	Silisyum
SO ₂	Kükürt dioksit
Ti	Titanyum

KISALTMA LİSTESİ

AISI	The American Iron and Steel Institute (Amerikan Demir Çelik Enstitüsü)
DSS	Duplex Stainless Steel (Dubleks Paslanmaz Çelik)
EN	Europe Normen
FGD	Flue Gaz Desulfurazition
ITAB	Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
PREN	Oyuklanma Korozyon Dayanımı
SAF	Steel of Austenitic and Ferritic (Östenitik ve Ferritik Çelik)

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 2. 1	2002 yılına ait dünya paslanmaz çelik tüketimi oransal dağılımı [17]..... 5
Şekil 2. 2	Paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan krom oksit tabakası [20] 6
Şekil 2. 3	Scaeffler ve Delong Diyagramları[21]..... 7
Şekil 2. 4	Ferritik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [22] 8
Şekil 2. 5	Ferritik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17] 9
Şekil 2. 6	Östenitik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17] 11
Şekil 2. 7	Nikel ilavesinin kafes yapısına etkisi [31] 12
Şekil 2. 8	Östenitik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [22] 12
Şekil 2. 9	Martenzitik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [24]..... 13
Şekil 2. 10	Martenzitik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17] 14
Şekil 2. 11	Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [25] 15
Şekil 2. 12	Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17]..... 16
Şekil 2. 13	Dubleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [27] 19
Şekil 2. 14	Dubleks sertleşebilen paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17] 19
Şekil 3. 1	Küresel piyasada dubleks paslanmaz çeliğin ham üretiminin yıllara göre değişimi [31]..... 25
Şekil 3. 2	Çeşitli dubleks paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığı ve 300°C arasındaki tipik akma dayanımlarının 316L tipi östenitik paslanmaz çeliklerle karşılaştırılması [31]..... 27
Şekil 3. 3	2 mm (0,08 inc) sac için 2304 ve 2205 dubleks paslanmaz çelik ve 316L tipi östenitik çeliğin bükülmesinin karşılaştırılması [31] 30
Şekil 3. 4	2205 dubleks paslanmaz çelikte soğuk şekillendirmenin mekanik özelliklere etkisi [31]..... 31
Şekil 3. 5	S32101 ve S2205 DSS'den yapılmış çok kademeli hızlı deniz suyunun tuzdan arındırma hücresi [31] 36
Şekil 3. 6	Denizde kullanılan 2507 göbek borularının yağ ve gaz uygulamaları [31]..... 37

Şekil 3. 7	Stonecutters Köprüsü, Hong Kong [31].....	37
Şekil 3. 8	New Doha Uluslararası Havaalanı'nın dubleks paslanmaz çelik çatısı [31]	38
Şekil 3. 9	2307 dubleks paslanmaz çelik köprü kemerleri [31].....	38
Şekil 3. 10	Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı [26]	39
Şekil 3. 11	Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin a) erime diyagramı, b) katılma diyagramı [26]	40
Şekil 3. 12	1000°C'de Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin izotermik bölümü [26].....	41
Şekil 3. 13	%70 Fe içeren dubleks paslanmaz çelikte soğuma sırasında oluşan fazlar [34]	43
Şekil 3. 14	2205 dubleks paslanmaz çelikteki çökeltilere ait sıcaklık-zaman diyagramı [41]	44
Şekil 3. 15	Sigma fazı çökmesinin şematik gösterimi [48].....	45
Şekil 3. 16	Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin a) 900°C'de, b) 800°C'de, c) 650°C'de izotermik bölümü [26]	46
Şekil 3. 17	750°C'de 1 saat yaşlandırılıp suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait SEM görüntüsü [49]	48
Şekil 3. 18	Dubleks paslanmaz çelikte χ -fazının çökmesinin şematik gösterimi [49]	48
Şekil 3. 19	$M_{23}C_6$ içeren ferrit/östenit arayüzeyindeki krom derişimine ait grafik [60]	49
Şekil 4. 1	Malzemeye uygulana ısı işlemlerde kullanılan fırın	52
Şekil 4. 2	Malzemeye uygulanan ısıtma-çözme-soğutma işleminin şematik gösterimi	52
Şekil 4. 3	Çözme tavi sonrası uygulanan a) yaşlandırma tav işleminin, b) izotermal yaşlandırma tav işleminin şematik gösterimi	54
Şekil 4. 4	Numune hazırlama işleminde kullanılan zımparalama cihazı.....	55
Şekil 4. 5	Numune hazırlama işleminde kullanılan parlatma cihazı	56
Şekil 4. 6	Numune hazırlama işleminde kullanılan dağlama düzeneği	57
Şekil 4. 7	Mikroyapı görüntüleme ve faz analizlerinde kullanılan optik mikroskop.....	58
Şekil 4. 8	EDS analizlerinde kullanılan tarama elektron mikroskobu	58
Şekil 4. 9	Korozyon testlerinde kullanılan üç elektrotlu düzenek	60
Şekil 4. 10	Numunelerin sertlik ölçümünde kullanılan Vickers sertlik cihazı	62
Şekil 5.1	SAF 2205 Dubleks paslanmaz çeliğe ait %ferrit- çözme tav süresi grafiği.....	66
Şekil 5. 2	SAF 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait % ikincil faz-çözme tav süresi grafiği.....	67
Şekil 5. 3	2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait ikincil fazların ortalama tane boyutu-çözme tav süresi grafiği.....	68
Şekil 5. 4	1000°C'de 1 saat tavlanan a) fırında (x100), b) fırında (x500), c) suda (x100), d) suda (x500) soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüleri	69

Şekil 5. 5	1000°C'de 8 saat tavlanan a) fırında (x100), b) fırında (x500), c) suda (x100), d) suda (x500) soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüleri	70
Şekil 5. 6	1000°C'de 10 saat tavlanan a) fırında (x100), b) fırında (x500), c) suda (x100), d) suda (x500) soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüleri	71
Şekil 5. 7	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	74
Şekil 5. 8	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	76
Şekil 5. 9	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	77
Şekil 5. 10	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	79
Şekil 5. 11	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	80
Şekil 5. 12	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	81
şekil 5. 13	1000°C'de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) %ferrit -yaşlandırma süresi, b) %ferrit-izotermal yaşlandırma süresi grafiği	82
Şekil 5. 14	1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	84
Şekil 5. 15	1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	85
Şekil 5. 16	1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	86

Şekil 5. 17	1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	87
Şekil 5. 18	1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	88
Şekil 5. 19	1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	89
Şekil 5. 20	1000°C'de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) %Ferrit -Yaşlandırma Süresi, b) %Ferrit-İzotermal Yaşlandırma Süresi grafiği.....	90
Şekil 5. 21	1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	91
Şekil 5. 22	1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	92
Şekil 5. 23	1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	93
Şekil 5. 24	1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	94
Şekil 5. 25	1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	95
Şekil 5. 26	1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	96
Şekil 5. 27	1000°C'de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) %ferrit -yaşlandırma süresi, b) %ferrit-izotermal yaşlandırma süresi grafiği	97

Şekil 5. 28	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	100
Şekil 5. 29	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	101
Şekil 5. 30	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	102
Şekil 5. 31	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	104
Şekil 5. 32	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	105
Şekil 5. 33	1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	106
Şekil 5. 34	1000°C'de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) % ikincil faz-yaşlandırma süresi, b) % ikincil faz- izotermal yaşlandırma süresi grafiği	107
Şekil 5. 35	1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	108
Şekil 5. 36	1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	109
Şekil 5. 37	1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	110
Şekil 5. 38	1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	111

Şekil 5. 39	1000°C’de 8 saat çözme tavının ardından 800°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	112
Şekil 5. 40	1000°C’de 8 saat çözme tavının ardından 950°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	113
Şekil 5. 41	1000°C’ de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) % ikincil faz-yaşlandırma süresi, b) % ikincil faz- izotermal yaşlandırma süresi grafiği	114
Şekil 5. 42	1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından 650°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	115
Şekil 5. 43	1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından 800°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	116
Şekil 5. 44	1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından 950°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	117
Şekil 5. 45	1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından 650°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	118
Şekil 5. 46	1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından 800°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	119
Şekil 5. 47	1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından 950°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri	120
Şekil 5. 48	1000°C’de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) % ikincil faz-yaşlandırma süresi, b) % ikincil faz- izotermal yaşlandırma süresi grafiği	121
Şekil 5. 49	1000°C’de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) ikincil fazların ortalama tane boyutu-yaşlandırma tav süresi, b) ikincil fazların ortalama tane boyutu- izotermal yaşlandırma tav süresi grafiği	124

Şekil 5. 50	1000°C’de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) ikincil fazların ortalama tane boyutu-yaşlandırma tav süresi, b) ikincil fazların ortalama tane boyutu- izotermal yaşlandırma tav süresi grafiği.....	126
Şekil 5. 51	1000°C’de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) ikincil fazların ortalama tane boyutu-yaşlandırma tav süresi, b) ikincil fazların ortalama tane boyutu- izotermal yaşlandırma tav süresi grafiği.....	128
Şekil 5. 52	1000°C’de 1 saat tavlانیp suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına ait EDS spektrumu	130
Şekil 5. 53	1000°C’de 1 saat tavlانیp fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ikincil faza, b) ferrit fazına. c) östenit fazına ait EDS spektrumu.....	131
Şekil 5. 54	1000°C’de 8 saat tavlانیp suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına ait EDS spektrumu	132
Şekil 5. 55	1000°C’de 8 saat tavlانیp fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ikincil faza, b) ferrit fazına, c) östenit fazına ait EDS spektrumu.....	133
Şekil 5. 56	1000°C’de 10 saat tavlانیp suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına ait EDS spektrumu	134
Şekil 5. 57	1000°C’de 10 saat tavlانیp fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ikincil faza, b) östenit fazına, c) ferrit fazına ait EDS spektrumu.....	135
Şekil 5. 58	1000°C’de 10 saat tavlانیp fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait SEM görüntüsü.....	136
Şekil 5. 59	1000°C’de 1 saat tavlانیp, 800°C’de 5 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu	138
Şekil 5. 60	1000°C’de 1 saat tavlانیp, 800°C’de 60 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu	139
Şekil 5. 61	1000°C’de 8 saat tavlانیp, 800°C’de 5 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu	141
Şekil 5. 62	1000°C’de 8 saat tavlانیp, 800°C’de 60 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu	142
Şekil 5. 63	1000°C’de 10 saat tavlانیp, 800°C’de 10 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu	143
Şekil 5. 64	1000°C’de 10 saat tavlانیp, 800°C’de 60 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu	144

Şekil 5. 65	1000°C’de 1 saat tavlانیp, 650°C’de 5 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu.....	148
Şekil 5. 66	1000°C’de 1 saat tavlانیp, 650°C’de 60 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu	149
Şekil 5. 67	1000°C’de 8 saat tavlانیp, 650°C’de 5 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu.....	150
Şekil 5. 68	1000°C’de 8 saat tavlانیp, 650°C’de 60 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu.....	151
Şekil 5. 69	1000°C’de 10 saat tavlانیp, 650°C’de 5 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu.....	152
Şekil 5. 70	1000°C’de 10 saat tavlانیp, 650°C’de 60 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu.....	153
Şekil 5. 71	δ-ferrit fazındaki Cr miktarının a) yaşlandırma, b) izotermal yaşlandırma tav işlemi parametrelerine bağlı değişimi	154
Şekil 5. 72	1000°C’de çözme tavlı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelere ait Vickers sertlik değerlerinin zamana bağlı değişimi	156
Şekil 5. 73	1000°C’de 1 saat çözme tavlının ardından yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi	158
Şekil 5. 74	1000°C’de 8 saat çözme tavlının ardından yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi	159
Şekil 5. 75	1000°C’de 10 saat çözme tavlının ardından yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi	160
Şekil 5. 76	1000°C’de 1 saat çözme tavlının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi	161
Şekil 5. 77	1000°C’de 8 saat çözme tavlının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi	162
Şekil 5. 78	1000°C’de 10 saat çözme tavlının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi	163
Şekil 5. 79	1000°C’de 1, 8 ve 10 saat çözme tavlı uygulanan ve suda soğutulan numunelere ait korozyon eğrileri.....	165

Şekil 5. 80	1000°C’de 1, 8 ve 10 saat çözme tavı uygulanan ve fırında soğutulan numunelere ait korozyon eğrileri	166
Şekil 5. 81	SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin 800°C’de 5 dakika uygulanan yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri.....	167
Şekil 5. 82	SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin 800°C’de 60 dakika uygulanan yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri.....	168
Şekil 5. 83	1000°C’de 1 saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 800°C’de uygulanan yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi	169
Şekil 5. 84	1000°C’de 8 saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 800°C’de uygulanan yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi	170
Şekil 5. 85	1000°C’de 10 saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 800°C’de uygulanan yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi	171
Şekil 5. 87	SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin 650°C’de 60 dakika uygulanan izotermal yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri	173
Şekil 5. 88	1000°C’de 1 saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 650°C’de uygulanan izotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi	174
Şekil 5. 89	1000°C’de 8 saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 650°C’de uygulanan izotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi.....	175
Şekil 5. 90	1000°C’de 10saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 650°C’de uygulanan izotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi.....	176

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	Paslanmaz çelik türlerine ait ortalama fiziksel özellikler [26]..... 18
Çizelge 3. 1	İlk nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31] 22
Çizelge 3. 2	İkinci nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31] 23
Çizelge 3. 2	İkinci nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31] (devamı) 24
Çizelge 3. 2	İkinci nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31] (devamı) 25
Çizelge 3. 3	Dubleks paslanmaz çeliklerin ASTM ve EN standartlarına göre mekanik özelliklerinin minimum değerleri [31] 26
Çizelge 3. 4	Dubleks paslanmaz çeliklerde maksimum gerilim değerleri için basınçlı kap tasarım kodlarında verilen üst sıcaklık limitleri [31] 27
Çizelge 3. 5	Dubleks ve östenitik paslanmaz çeliklerin süneklik özelliklerinin ASTM A 240 ve EN 10088-2'ye göre karşılaştırılması [31] 29
Çizelge 3. 6	Oda sıcaklığında dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31] 32
Çizelge 3. 7	Yüksek sıcaklıklarda dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31]..... 33
Çizelge 3. 7	Yüksek sıcaklıklarda dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31] (devamı)..... 34
Çizelge 3. 7	Yüksek sıcaklıklarda dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31] (devamı)..... 35
Çizelge 4. 1	SAF 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim (wt.%) 51
Çizelge 4. 2	Uygulanan ısıtma-çözme-soğutma işleminin ısı işlem parametreleri 53
Çizelge 4. 3	Uygulanan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlem parametreleri 53
Çizelge 4. 4	EDS analizi yapılan çözme tavi numuneleri..... 59
Çizelge 4. 5	EDS analizi yapılan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavi numuneleri 59

Çizelge 4. 6	Korozyon testinin uygulandığı çözme tavlı numuneleri.....	61
Çizelge 4. 7	Korozyon testinin uygulandığı yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavlı numuneleri	61
Çizelge 4. 8	Vickers sertlik ölçümü yapılan çözme tavlı işlemi numuneleri.....	63
Çizelge 4. 9	Vickers sertlik ölçümü yapılan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavlı işlemi numuneleri	63
Çizelge 5. 1	Çözme tavlı süresi ve soğuma ortamına bağlı birincil ve ikincil fazların hacim miktarları (%)	65
Çizelge 5. 2	SAF 2205 DSS'de çözme tavlı süresi ve soğuma ortamına bağlı ikincil fazların ortama tane boyutları (μm)	68
Çizelge 5. 3	Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlemi parametrelerine bağlı yapıdaki ferrit miktarı (%)	73
Çizelge 5. 4	Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlemi parametrelerine bağlı yapıdaki ikincil faz yüzdesi	99
Çizelge 5. 5	Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlem parametrelerine bağlı yapıdaki ikincil fazların ortalama tane boyutu (μm)	122
Çizelge 5. 6	Çözme tavlı işlem parametrelerine bağlı yapıdaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri	129
Çizelge 5. 7	Yaşlandırma tavlı işlem parametrelerine bağlı yapıdaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri.....	137
Çizelge 5. 8	İzotermal yaşlandırma tavlı işlem parametrelerine bağlı yapıdaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri.....	146
Çizelge 5. 9	Çözme tavlı uygulanan numunelerin Vickers sertlik değerleri	155
Çizelge 5. 10	Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavlı uygulanan numunelerin Vickers sertlik değerleri	157

**DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKTE OLUŞAM SİGMA VE CHİ FAZLARININ
OLUŞUM MEKANİZMALARININ FARKLI ISIL İŞLEM PARAMETRELERİYLE
SAPTANMASI**

Sevilay AKPINAR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN

Dubleks paslanmaz çelikler, mikroyapılarında yaklaşık eşit miktarlarda ferrit ve östenit fazlarını bulunduran, yüksek alaşım elementi içerikleri sayesinde üstün mekanik özelliklere ve korozyon dayanımına sahip olan malzemelerdir. Sergiledikleri yüksek mekanik özellikler ve korozyon dayanımı sayesinde gemcilik ve petrokimya sektörleri ile boru hatlarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Dubleks paslanmaz çelikler yüksek krom ve nikel içeriğine sahip malzemelerdir.

Dubleks paslanmaz çeliklerde karşılaşılan en önemli sorunlardan biri, malzemeye giren ısıya bağlı olarak oluşan ikincil fazlar olup; bunların en tipik olanları σ ve χ fazlarıdır. Bu fazlar, 450-950 °C arasındaki sıcaklıklarda oluşur ve malzemenin korozyon dayanımı ile mekanik özelliklerini olumsuz etkiler. Ayrıca σ ve χ fazlarının oluşumu sırasında ferrit yapısı içerisinde ikincil östenit oluşumu da görülür. İkincil östenit oluşumu ile yapıda istenen ferrit-östenit miktarı değişir. Oluşan fazların giderilmesi ya da malzeme

özellikleri üzerinde oluşan olumsuz etkilerin ortadan kaldırılması ısıtma işlemleri ile mümkün olmaktadır.

Bu çalışmada, SAF 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait ısıtma haritası çıkarılmıştır. Çalışmanın kapsamında çelikte oluşan ikincil fazların, oluşum sıcaklık şartları, ısıtma ve soğutma ortamlarının etkileri ve bunların sonucunda oluşan bu ikincil fazların dağılım ve büyüklüklerinin mekanik ve korozyon özelliklerine etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla dubleks paslanmaz çeliğe farklı sıcaklık ve farklı sürelerde çözme, yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıtma işlemleri uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Dubleks paslanmaz çelik, sigma, chi, ikincil faz çökmesi, ısıtma işlemleri, korozyon, sertlik, mikroyapı

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE FORMATION MECHANISM OF SIGMA AND CHI PHASES WITH THE DIFFERENT HEAT TREATMENT PARAMETERS IN DUPLEX STAINLESS STEEL

Sevilay AKPINAR

Department of Metallurgy and Material Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Prof. Dr. Ahmet KARAASLAN

Duplex stainless steels that have approximately equal amount of ferrite and austenite in the microstructure and have good mechanical and corrosion properties with higher alloying elements content. Duplex steels are widely used in piping, chemical and offshore industries because of their higher mechanical and corrosion properties. Duplex stainless steels have great amount of Nickel and Chrome content.

One of the most important problem that encountered in the duplex stainless steel is formed secondary phases (most typically of these are σ and χ phases) during the heat treatments. These phases occur between 450-950 °C and comprising of σ and χ phases are dramatically deteriorated mechanical properties and corrosion resistance. Moreover, secondary austenite can occur during the comprising of σ and χ phases and desired austenite and ferrite fractions cannot be provide with secondary austenite formation. Elimination of σ and χ phases or minimizing the negative effects of σ and χ phases on the properties of alloy can be provided by heat treatments.

In this study, heat treatment map of SAF 2205 duplex stainless steel was created. Aim of this study is to investigate the temperatures conditions of formation of secondary phases, effects of the heating and cooling mediums and lastly effects of distributions and sizes of secondary phases on mechanical properties and corrosion resistance. For this purpose, solution, aging and isothermal aging heat treatments were applied with different temperatures and times to the duplex stainless steel.

Keywords: Duplex stainless steel, sigma, chi, secondary phase participation, heat treatment, corrosion, hardness, microstructure

1.1 Literatür Özeti

Dubleks paslanmaz çelikler mikroyapısında yaklaşık eşit miktarda δ -ferrit ve östenit (γ) faz bulunduran malzeme türleridir. Dubleks paslanmaz çelikler sahip oldukları bu mikroyapı özelliği sayesinde yüksek tokluk, iyi kaynak edilebilirlik, yüksek dayanım gibi mekanik özelliklerin yanında yüksek korozyon dayanımı da sergilemektedir [1, 2]. Bu sayede gemicilik ve petrokimya sektörlerinde; özellikler gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek dayanımları ile klorürlü ortamlarda yaygın olarak kullanılmaktadır [3, 4]. Ancak üretim süreçlerinde δ -ferrit fazında ve δ/γ tane sınırlarında çekirdeklenen karbürler, nitrürler ve sigma, chi gibi istenmeyen diğer intermetalik fazlar, malzemenin tokluk ve korozyon özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir [5, 6].

Bu tür çeliklerde mikroyapı gelişimi malzemenin ısı geçişinin bir sonucudur. İkincil fazların dubleks paslanmaz çeliklerin yapısında çekirdeklenmesi önemli ölçüde yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma gibi ısı işlemler ve kaynak prosesi sırasında gerçekleşmektedir. Ayrıca çözme tav işlemi ve sürekli soğuma gibi faktörlerin de ikincil fazların oluşumunda etkisi söz konusudur [7-12].

Dubleks paslanmaz çeliklerde oluşan sigma fazı; 650°C-950°C arasında uygulanan yaşlandırma işlemlerinde, malzemenin yüksek sıcaklıklardan yavaş soğutulması sırasında ya da kaynak işlemi sırasında ITAB'ta oluşan; Cr ve Mo'ca zengin bir intermetaliktir [2, 13, 14]. Sigma fazının çekirdeklenmesi ötektoid reaksiyon ile gerçekleşmektedir; $\delta \rightarrow \gamma + \sigma$ reaksiyonu ile meydana gelen sigma fazı çökmesi δ/γ tane sınırlarında başlayıp; δ -ferrit içine doğru gelişim göstermektedir [2]. Oluşum

mekanizması tam olarak saptanamamış olan bu intermetalik faz dubleks paslanmaz çeliklerin korozyon ve tokluk özelliklerini önemli ölçüde azaltmaktadır [15, 16].

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte ısıtma girdiler sonucunda meydana gelen birincil faz oranlarının değişimini ve ikincil faz oluşumunu ve bu fazların dokudaki dağılımını saptamaktır. Bunun sonucunda malzemede oluşacak değişimlerin mekanik ve korozyon özelliklerine etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu sayede çeliğin kullanımında oluşacak sınırlamalar öngörülebilecektir.

SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik malzemede oluşan sigma ve chi fazı gibi ikincil fazlar malzemenin mekanik ve korozyon özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Bu fazların oluşum mekanizmalarını saptamak amacıyla uygulanan ısıtma işlemleri çözme, yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavlama olmak üzere üç grupta toplanmıştır.

Bu çalışmaların sonuçlarına bağlı olarak farklı ısıtma işlemleri ile oluşan ikincil fazların oluşum mekanizmasını saptamak ve malzeme üzerindeki etkilerinin en aza indirilmesi amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

Dubleks paslanmaz çelikler son yıllarda kullanımı gittikçe yaygınlaşan malzeme türleridir. Bu malzeme türlerinin kullanımı sınırlandıran en temel sorun yapısında oluşan sigma ve chi gibi ikincil fazlardır. Bu çalışmada farklı parametrelerde ısıtma işlemleri uygulanmış ve farklı soğutma koşulları ile mikroyapı değişimleri ve malzeme özellikleri incelenmiştir.

Çalışmada literatürden farklı olarak; çözme tavlama sıcaklığı 1000°C olarak uygulanmış, ikincil fazların ısıtma ve soğutma koşullarında ne şekilde oluştuğunu saptamak amacıyla 650°C ile 950°C arasındaki geçişler özel olarak ele alınmıştır. Bu sıcaklık aralığında sürekli soğutma ve izotermal soğutma şeklinde uygulanan farklı soğutma koşulları ile oluşan birincil ve ikincil fazlar belirlenmiştir.

Uygulanan tüm ısıtma işlemleri sonrasında mikroyapısal değişimler optik ve tarama elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiş, oluşan fazların türleri ise EDS yöntemi ile

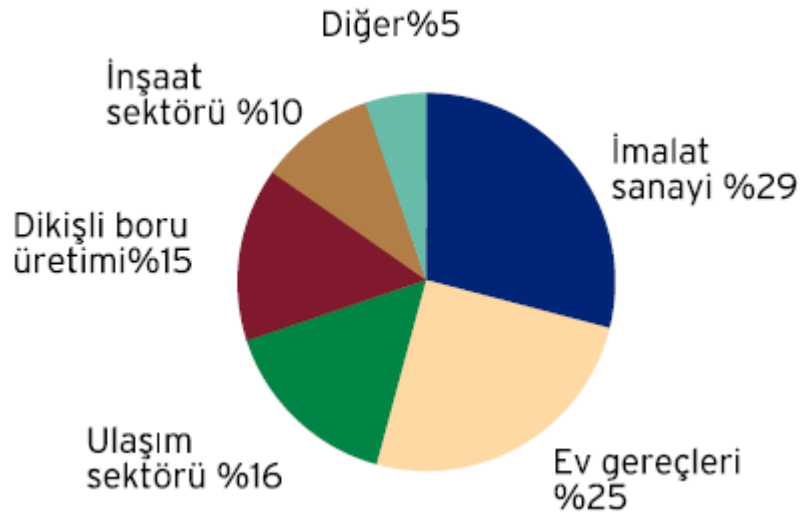
ortaya çıkartılmıştır. Oranı değişen birincil fazların ve oluşan ikincil fazların malzemedeki etkilerinin araştırılması amacıyla ısıl işlemler sonrasında sertlik deneyleri ile mekanik özellikler, oyuklanma korozyon deneyleri ile korozyon dayanımı belirlenmiştir.

Uygulanan ısıl işlemler sonrası elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte kritik dönüşüm sıcaklıkları olan 650-1000°C aralığında oluşan fazların malzeme üzerindeki olumsuz etkileri saptanmış ve bu etkilerin giderilmesine yönelik farklı çalışmalara katkı sağlanması hedeflenmiştir.

PASLANMAZ ÇELİKLER

2.1 Giriş

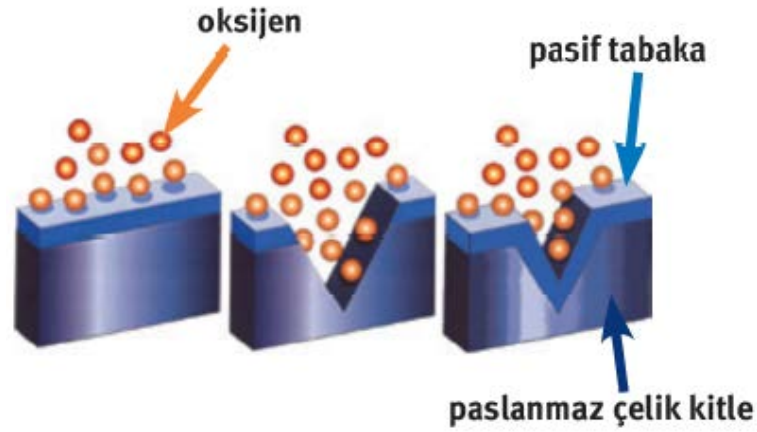
Düşük karbon ve yüksek krom içeriğine sahip demir alaşımları **paslanmaz çelik** olarak tanımlanır. Paslanmaz çelikler, mükemmel korozyon dayanımlarının yanı sıra, değişik mekanik özelliklere sahip olmaları, hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda kullanılabilmeleri sebebiyle son yıllarda tüketimi giderek yaygınlaşan bir malzeme türüdür. Bu malzemenin geri kazanılabilmesi ve uzun ömürlü oluşu da kullanım alanlarında büyük avantaj sağlamaktadır [17]. Şekil 2. 1'de 2002 yılına ait dünya paslanmaz çelik tüketiminin oransal dağılımı verilmiştir.



Şekil 2. 1 2002 yılına ait dünya paslanmaz çelik tüketimi oransal dağılımı [17]

Paslanmaz çelik türleri kromun (Cr) yanı sıra nikel (Ni), molibden (Mo), azot (N) gibi alaşım elementleri de içermektedir. Paslanmaz çelikler, içerdikleri yüksek krom

sayesinde oksitleyici ortamlarda yüksek korozyon dayanımı gösterir [18]. Ancak; bileşiminde alaşım elementi olarak yer alan kromun, karbona olan ilgisi yüksektir. Bu nedenle krom, demir kafesi içerisinde çözünmek yerine karbon ile $Cr_{23}C_6$ karbürlerini oluşturmayı tercih eder. Bu oluşum, demir kafesi içerisinde çözünmüş olan krom miktarını azaltır ve malzemenin paslanmazlık özelliği ortadan kalkar. Bu oluşumu önlemek için, paslanmaz çeliklerin düşük karbon içeriğine (%0,04) sahip olması ve yapısında en az %10,5 oranında serbest krom bulunması istenir [19].



Şekil 2. 2 Paslanmaz çeliğin yüzeyinde oluşan krom oksit tabakası [20]

Yapıdaki serbest krom sayesinde Şekil 2. 2’de görüldüğü gibi çeliğin yüzeyinde yoğun, gevrek olmayan, çok ince bir krom oksit tabakası oluşur [20]. Bu amorf tabaka sayesinde paslanmaz çelikler kimyasal reaksiyonlara karşı pasif davranarak indirgeyici olmayan ortamlarda korozyona karşı dayanım kazanırlar.

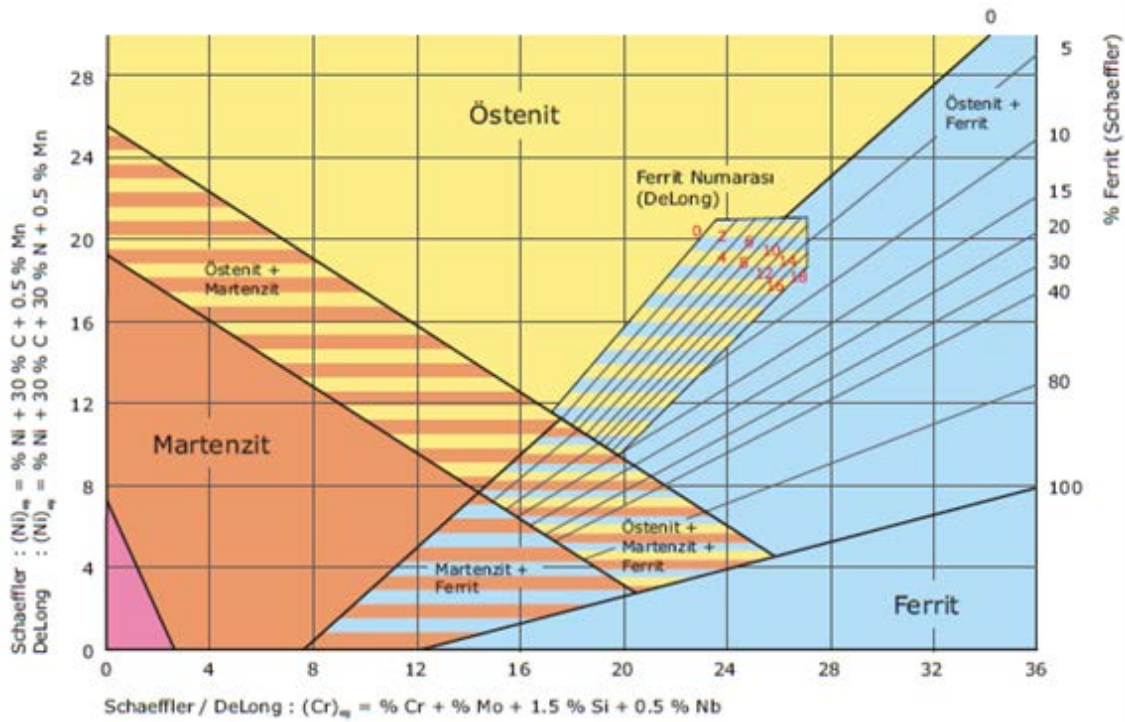
2.2 Paslanmaz Çelik Türleri

Paslanmaz çeliklerin mekanik ve içyapı özellikleri, yapılarında bulunan alaşım elementlerine ve bunların miktarlarına göre değişmektedir. Paslanmaz çelikler malzemenin içyapısına göre 5 gruba ayrılmaktadır. Bunlar;

- Östenitik Paslanmaz Çelikler
- Ferritik Paslanmaz Çelikler
- Martenzitik Paslanmaz Çelikler
- Çökelme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

- Dupleks Paslanmaz Çelikler'dir.

Paslanmaz çeliklerin gruplanmasında Şekil 2. 3'te gösterilen Schaeffler ve DeLong Diyagramı'ndan faydaniılmaktadır. Kimyasal bileşimi bilinen malzemenin $Cr_{eş}$ ve $Ni_{eş}$ değerlerinin 2. 1 ve 2. 2'de verilen denklemlerle hesaplanmasıyla çizilen bu diyagramda; $Cr_{eş}$ değeri arttıkça yapı ferritik özellik kazanmakta; $Ni_{eş}$ değeri arttıkça ise östenitik özellik kazanmaktadır. Bu diyagramdan yola çıkarak; Cr, Mo, Si ve Nb gibi alaşım elementleri ferrit kararlaştırıcı, Ni, C, N ve Mn ise östenit kararlaştırıcı elementler olarak tanımlanmaktadır. Uygun alaşımlandırma ile istenilen özelliklere sahip paslanmaz çelik türü elde edilebilmektedir.



Şekil 2. 3 Scaeffler ve DeLong Diyagramları[21]

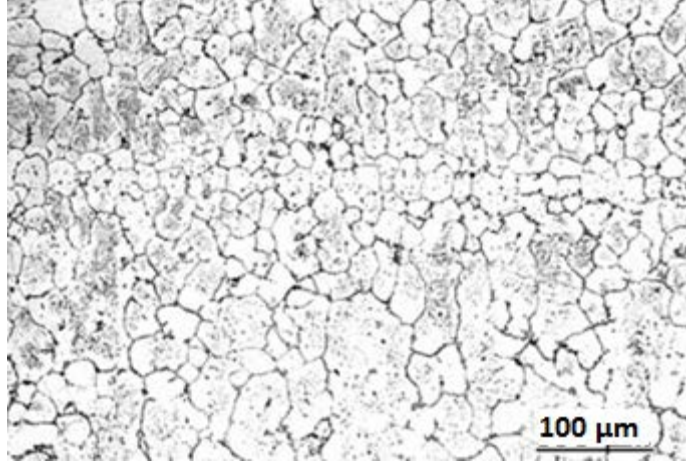
$$Cr_{eş} = \%Cr + \%Mo + 1,5.\%Si + 0,5.Nb \quad (2.1)$$

$$Ni_{eş} = \%Ni + 30.\%C + 30.\%N + 0,5.\%Mn \quad (2.2)$$

Paslanmaz çeliklerin en öne çıkan özelliği olan korozyon dayanımı yapıdaki serbest Cr miktarına bağlıdır. Ancak paslanmaz çeliğin diğer mekanik özelliklerini belirleyen esas faktör mikroyapı özellikleridir. Mikroyapı özelliklerine göre gruplanan paslanmaz çelik türleri aşağıdaki başlıklarda incelenecektir.

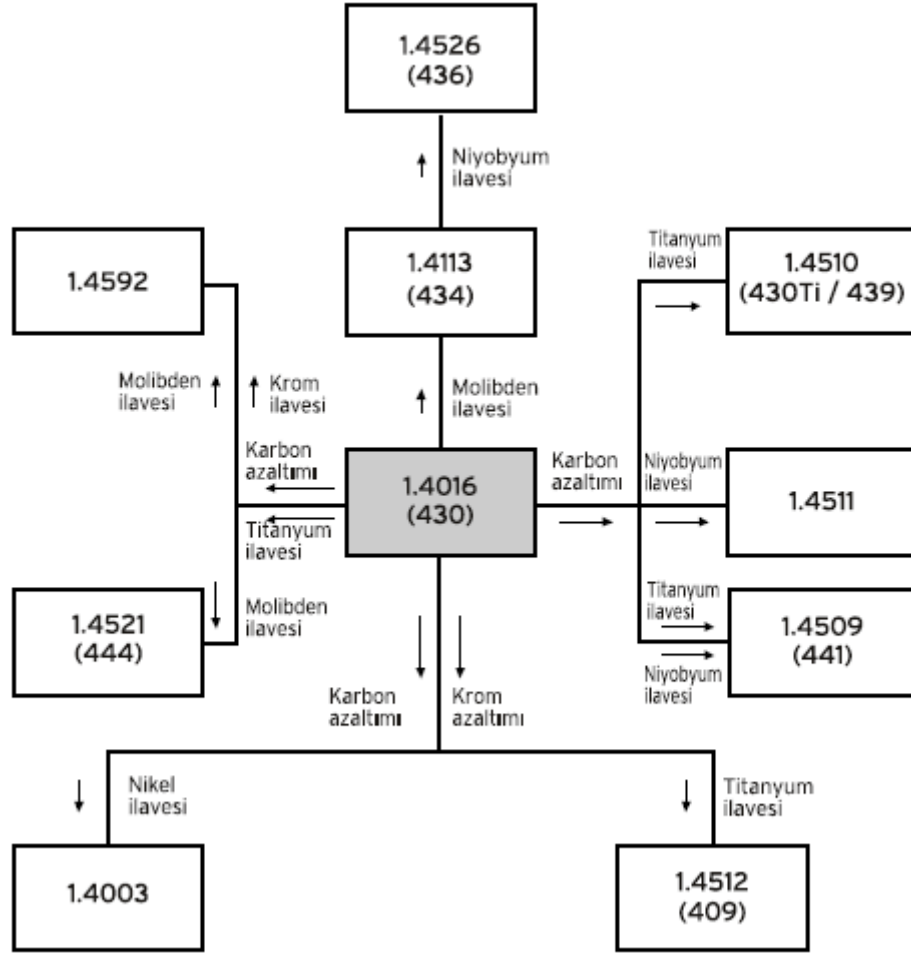
2.2.1 Ferritik Paslanmaz Çelikler

Ferritik paslanmaz çelikler %0,02'ye kadar C, %12-18 Cr ve %0,2'ye kadar Ni içeren malzeme türleridir. Kromun yanı sıra Al, Nb, Ti ve Mo gibi ferrit kararlaştırıcı elementler de içermektedir. Bu çelik türleri her sıcaklıkta ferritik yapıdadır. Bu nedenle içyapıları ve mekanik özellikleri ısıtılışla değiştirilemez [17, 21]. Şekil 2. 4'te ferritik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2. 4 Ferritik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [22]

En çok kullanılan türleri; AISI 405, 409, 430, 442 ve 446 kalite ferritik paslanmaz çeliklerdir. Bu çelik türlerinin sahip oldukları düşük tokluk nedeniyle makine parçası olarak kullanımları sınırlıdır. Şekil 2. 5'te ferritik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması verilmiştir. Bu çelik türlerinin özellikleri ısıtılışla değiştirilemediğinden yüksek dayanım için ince taneli yapıda olması istenir. İnce taneli yapı ise içerdiği alaşım elementleri ve bunların miktarlarına bağlıdır.



Şekil 2. 5 Ferritik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17]

Başlıca özellikleri;

- Krom miktarına bağlı orta ya da iyi derecede korozyon dayanımına sahiptirler.
- Sertlikleri ısıtılarak arttırılmaz.
- Manyetik özellik gösterirler.
- Zor şekillendirilirler.
- Kaynak dikişinde tane büyümesi görüldüğü için tokluk düşüşü meydana gelir. Bu nedenle kaynak kabiliyetleri düşüktür.

Başlıca kullanım alanları;

- Sıcak su tankları,
- Mutfak gereçleri,
- Dekoratif uygulamalar,

- Otomobil şasi parçaları

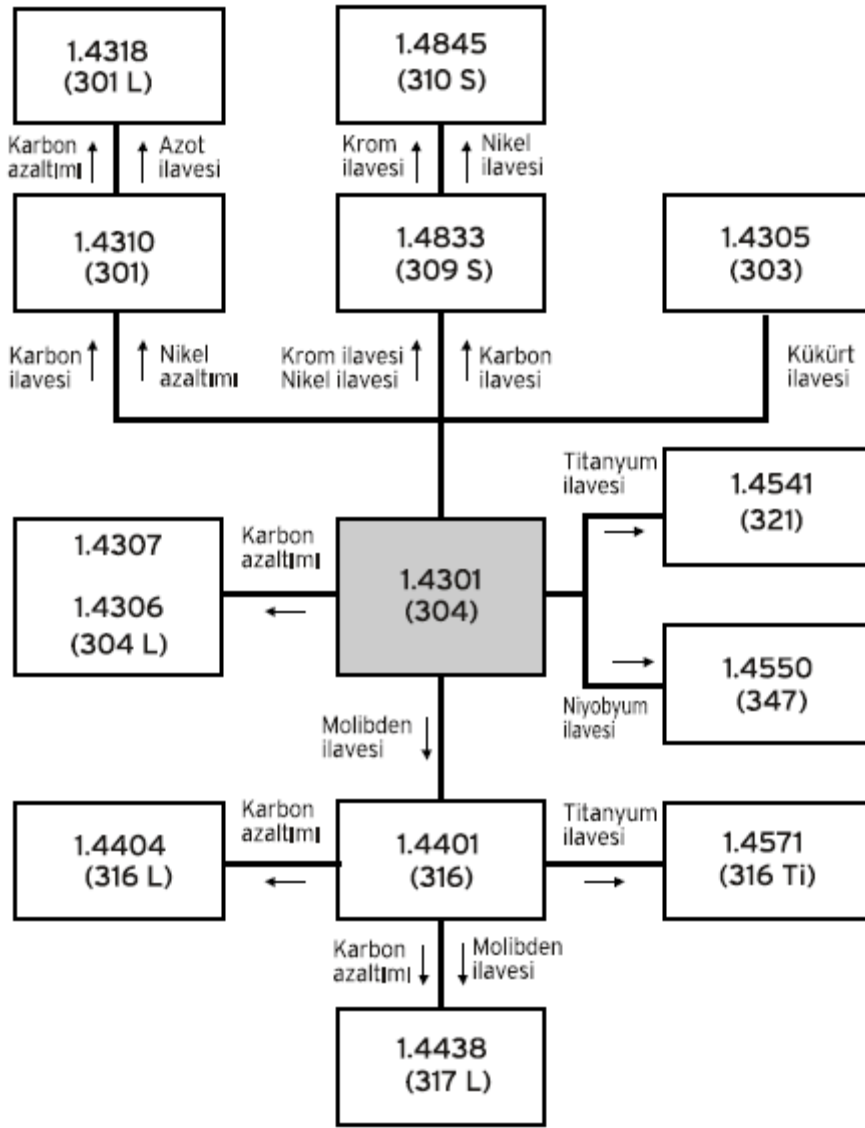
olarak sıralanabilir.

Ferritik paslanmaz çelikler 900°C'nin üzerinde bir sıcaklığa ısıtılıp hızlı soğutuldukları zaman yapıda bir miktar martenzit oluşur. Bu durum içyapıda kırılabilirliğe neden olmaktadır. Bunun dışında ferritik paslanmaz çeliklerde kırılabilirliğe neden olan 3 tip gevreklik görülmektedir. Bunlar;

- **Yüksek sıcaklık gevrekliği:** Belirli bir düzeyde C ve N içeren ferritik paslanmaz çelikler 950°C üzerinde ısıtılıp soğutulduğunda şiddetli kırılabilirlik ve korozyon dayanımında düşme görülür. Yüksek sıcaklık kırılabilirliğinin nedeninin; Cr'ca zengin karbür ve nitrürlerin tane sınırlarında ve/veya distorsiyon çökmesi olduğu düşünülmektedir.
- **σ-fazı gevrekliği:** Fe-Cr alaşımlarında görülen ikincil faz çökmesinden kaynaklanan bir gevreklik türüdür. 550-950°C arasında yeterli süre tutulan malzemelerde sigma fazı çökeltmektedir. Bu faz gevrek olmasının yanı sıra malzemenin korozyon değerlerini de önemli ölçüde azaltmaktadır.
- **475°C sıcaklık gevrekliği:** 400-455°C sıcaklıkları arasında uzun süre bekletilmiş ya da yüksek sıcaklıktan yavaş soğutulmuş %15'ten fazla krom içeren paslanmaz çelik türlerinde çökelmelerin yol açtığı 475°C gevrekliği görülmektedir. Malzeme 650-750°C arasındaki bir sıcaklığa ısıtılıp hızlı soğutulursa bu etki ortadan kalkmaktadır [17].

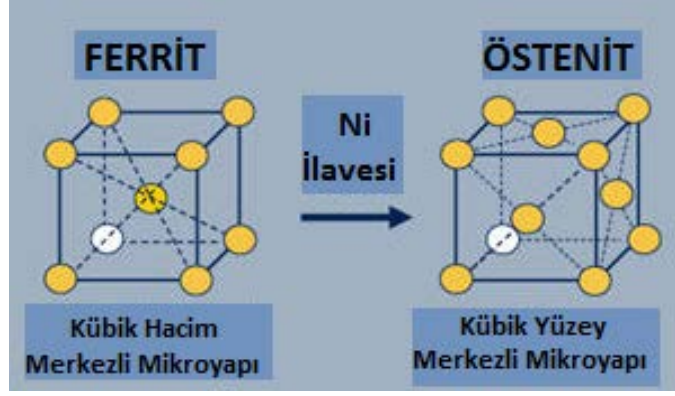
2.2.2 Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler en çok kullanılan paslanmaz çelik türüdür. Paslanmaz çelik üretimindeki payı yaklaşık %70'tir. En çok kullanılan türleri ise AISI 302, 304, 310, 316, 321 ve 347 kalite östenitik paslanmaz çeliklerdir. Şekil 2. 6'da östenitik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması verilmiştir. 3XX serisi, östenitik paslanmaz çeliklerin temel türlerini oluşturmaktadır. Örneğin; 304 kalite östenitik paslanmaz çeliğe Mo ilavesiyle 316 ve 317 kaliteleri üretilmekte ve bu sayede klorürlü ortamda korozyon dayanımında artış sağlanmaktadır. "L" ve "S" uzantılı alaşımlarda ise tanelerarası korozyonu önlemek amacıyla C miktarını azaltma yoluna gidilmiştir[17].



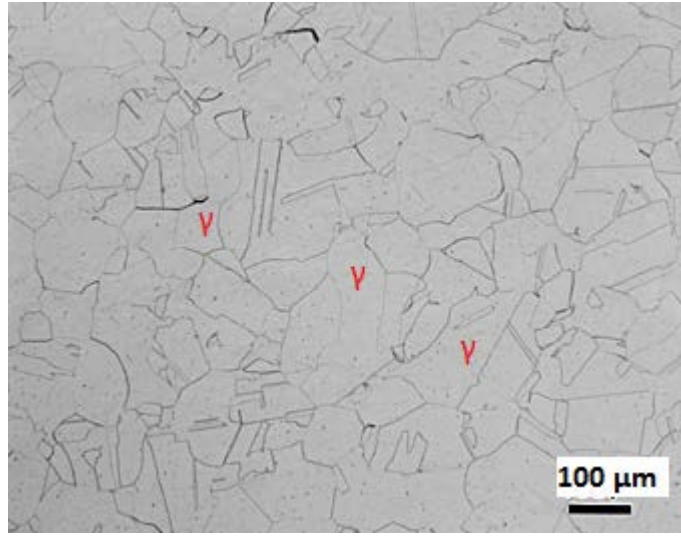
Şekil 2. 6 Östenitik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17]

Östenitik paslanmaz çelikler % 16-25 Cr, %10-24 Ni+Mn, %0,4'e kadar C içermektedir. Karbonlu çeliklerde soğuma esnasında, östenit α -ferrit ve sementite dönüşmektedir. Östenitik paslanmaz çeliklerde ise, yüksek krom ve nikel oranı dönüşümü durdurmaktadır. Bu nedenle östenitik paslanmaz çelikler oda sıcaklığında dahi tamamen östenit fazını içermektedir. Burada nikel soğuma esnasında östenit fazı korurken, krom ise dönüşümü yavaşlatmaktadır. Tamamen östenitik yapı en az %8 nikel oranı ile sağlanmaktadır [23].



Şekil 2. 7 Nikel ilavesinin kafes yapısına etkisi [31]

Şekil 2. 7'de östenit kararlaştırıcı olan nikel ilavesinin etkisi görülmektedir. Nikel ilavesi ile kübik hacim merkezli ferrit yapısı kübik yüzey merkezli östenit yapısına dönüşmektedir. Şekil 2. 8'de ise östenitik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Bu çelik türleri, geniş bir sıcaklık aralığında sahip oldukları yüksek tokluk ve yüksek dayanım özellikleri ile ön plana çıkmaktadırlar.



Şekil 2. 8 Östenitik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [22]

Başlıca özellikleri;

- Yüksek korozyon dayanımına sahiptirler.
- Yüksek kaynak kabiliyetine sahiptirler.
- Yüksek süneklik ve tokluk özelliklerine sahiptirler.
- Manyetik özellik göstermezler.
- Dayanımları sadece soğuk deformasyonla artırılabilir.

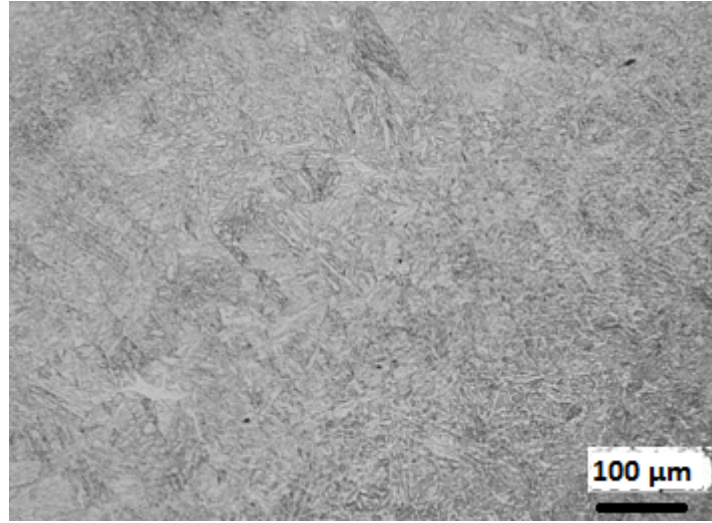
Başlıca kullanım alanları;

- Makine ve imalat sanayi,
- Asansörler,
- Mimari uygulamalar,
- Gıda işleme ekipmanları

olarak sıralanabilir.[17]

2.2.3 Martenzitik Paslanmaz Çelikler

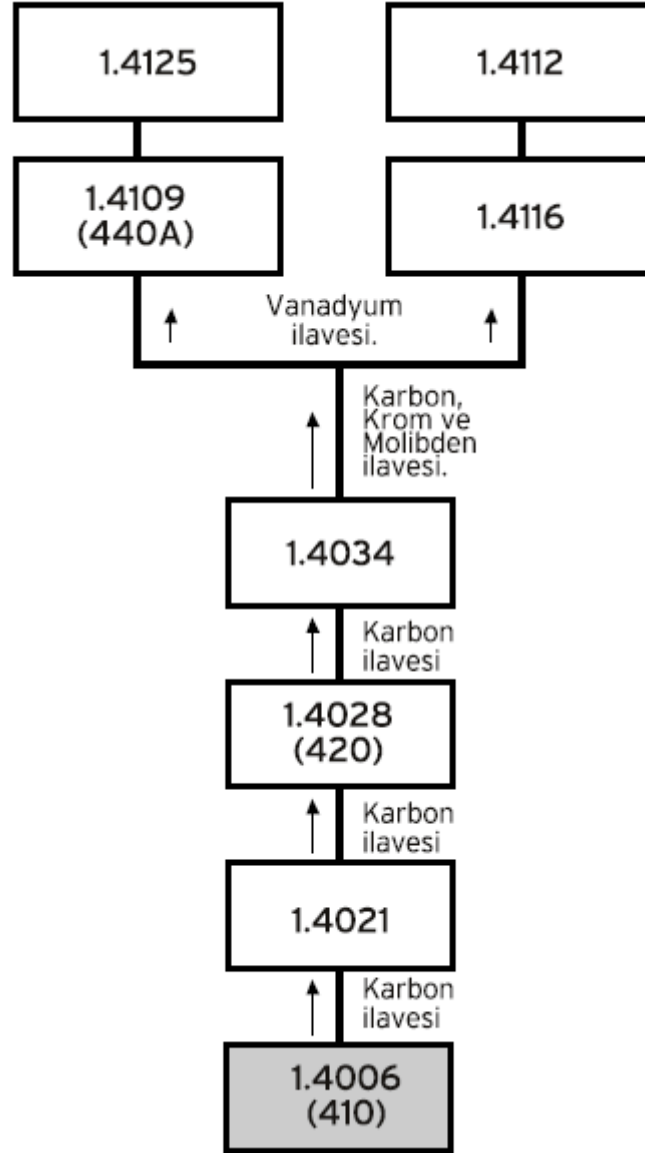
Martenzitik paslanmaz çelikler %0,1'den fazla C içeriğinin yanında %11-17 arasında Cr içeriğine sahip paslanmaz çelik türleridir. Bu çelik türleri, östenitleme sıcaklığı olan 950-1050°C arasında bekletildiğinde östenitik bir içyapıya sahip olurlar. Bu östenitik yapı su verme işlemine tabi tutulursa, oda sıcaklığında Şekil 2. 9'da görüldüğü gibi martenzitik hale dönüşür. Bu sayede yüksek sertlik ve mekanik dayanım elde edilir [17, 21].



Şekil 2. 9 Martenzitik paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [24]

Bilindiği üzere, martenzitik yapı sert ve kırılgandır. Bu nedenle, martenzitik paslanmaz çelik türleri bu haliyle kullanıma ve kaynak işlemine uygun değildir. Malzemeler ıslah ve temperleme işlemlerine tabi tutularak bir miktar tokluk artışı sağlanır. Menevişleme sıcaklığı karbon ve alaşım elementi içeriğine göre 205-315°C arasında değişmektedir. Yüksek korozyon dayanımı elde etmek için tavsiye edilen ısı işlem sıcaklıklarına uymak son derece önemlidir [21]. En çok kullanılan türleri, AISI 403, 410, 414, 422, 431 kalite

martenzitik paslanmaz çeliklerdir. Şekil 2. 10'da östenitik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması verilmiştir. Su verme ve temperleme sonrası mekanik özellikler genelde C miktarına bağlıdır. Yapıya C ve Cr ilavesiyle martenzit oluşumunu dengeleyecek şekilde martenzitik paslanmaz çelik türleri geliştirilmiştir.



Şekil 2. 10 Martenzitik paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17]

Başlıca özellikleri;

- Cr içeriğinden dolayı orta derecede korozyon dayanımına sahiptir.
- Isıl işlemler sayesinde yüksek dayanım ve sertlik elde edilebilir.

- Martenzitik yapının sert ve kırılgan olması nedeniyle kaynak dikişinde çatlama görülür. Bu nedenle kaynak kabiliyetleri düşüktür.
- Manyetik özellik gösterirler.

Başlıca kullanım alanları;

- Bıçaklar,
- Ameliyat aletleri,
- Kalıp parçaları,
- Miller ve pimler

olarak sıralanabilir.

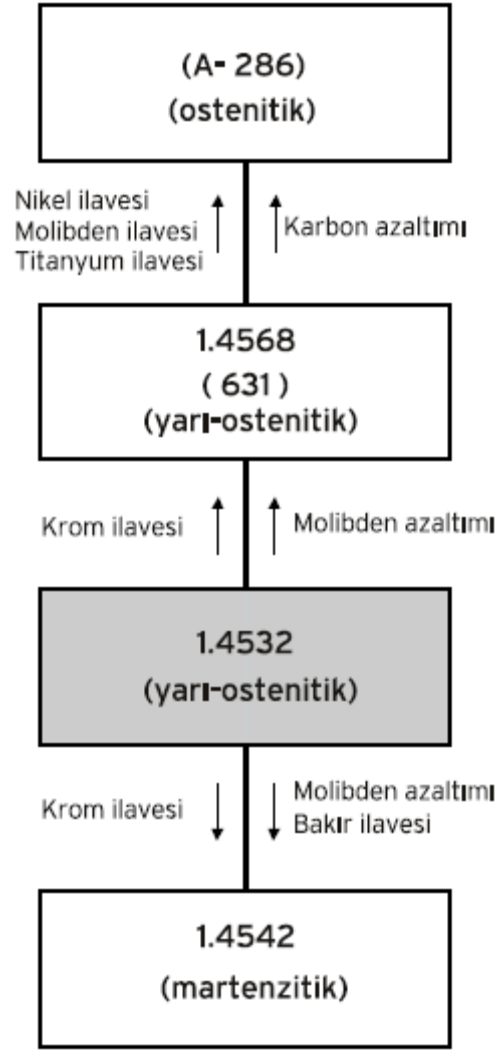
2.2.4 Çökeltme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler

Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerde C içeriği çok düşük miktarda olduğundan dolayı, martenzitik olan türlerinde bile, temel sertleşme çökelmeye bağlıdır. Yapıdaki çökelti oluşumu sayesinde mukavemet değeri 1700 MPa kadar çıkarılabilmektedir. Şekil 2. 11'de çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2. 11 Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [25]

Çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çelikler; martenzitik, yarı östenitik ve östenitik olmak üzere üç gruba ayrılır. Şekil 2. 12'de çökeltme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2. 12 Çökelme yoluyla sertleşebilen paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17]

• **Martenzitik paslanmaz çelikler:** Yaklaşık 1040°C olan östenitleştirme sıcaklığından itibaren hızlı soğutulan paslanmaz çelik malzemeye 480-620°C sıcaklık aralığında bir yaşlandırma ısıl işlemleri uygulanarak sertleştirilebilir. Bu tür çeliklerin C içeriği % 0,07'nin altında olduğu için, oluşan martenzit çok sert değildir. Yapıdaki sertliği sağlayan ana mekanizma yaşlandırma (çökelme) reaksiyonudur. Bu tür çeliklere örnek olarak; 17-4PH, 15-5PH ve PH13-8Mo tipi çelikler gösterilebilir.

• **Yarı östenitik paslanmaz çelikler:** Bu tür çelikler östenitleme sıcaklığından oda sıcaklığına soğutulduklarında martenzit oluşturmazlar. Bunun temel nedeni; martenzit dönüşüm sıcaklığının oda sıcaklığının altında olmasıdır. Karbonun ve/veya diğer alaşım elementlerinin karbürler ya da diğer intermetalik fazlar şeklinde çökebilmesini sağlayabilmek için bu tür çeliklere 730-950°C sıcaklık aralığında kondisyonlama ısıl

işlemi uygulanmalıdır. Bu işlem sayesinde yapıdaki alaşım elementleri çözüldükten ayrılarak östeniti kararsız hale getirecek ve martenzit dönüşüm sıcaklığının yükselmesine neden olacaktır. Böylece, çeliğin oda sıcaklığına hızlı soğutulmasıyla martenzitik bir yapının oluşması mümkün olmaktadır. Yaklaşık olarak 450-590°C arasında gerçekleştirilen bir yaşlandırma ısıl işlemi sayesinde gerilmeler ortadan kalkacak ve martenzit temperlenerek tokluk, süneklik, sertlik ve korozyon dayanımı artacaktır. 17-7 PH, PH 15-7 Mo ve AM350 bu grupta yer alan paslanmaz çeliklerin en tipik örnekleridir.

• **Östenitik paslanmaz çelikler:** Çökelme yoluyla sertleşebilen östenitik tip paslanmaz çelikler çözüldükten sonra sıcaklığından itibaren hızlı soğutulduktan ve hatta yüksek oranda soğuk deformasyona uğradıktan sonra bile içerdikleri alaşım elementleri sayesinde östenitik yapılarını korumaktadır. Bu çelikler sadece yaşlandırma ısıl işlemi ile sertleştirilebilirler. Çözüldükten sonra sıcaklığı 980-1120°C arasında olan malzeme, bu sıcaklıktan 700-730°C'ye hızlı soğutulup yine bu sıcaklık aralığında 24 saat süren bir yaşlandırma işlemine tabi tutulmaktadır. Bu tür çeliklere örnek olarak A286 ve 17-10P gösterilebilir.

Başlıca özellikleri;

- Orta ve iyi derecede korozyon dayanımına sahiptirler.
- Yüksek mekanik dayanıma sahiptirler.
- Çökelme yoluyla sertleşebilen martenzitik ve yarı östenitik paslanmaz çelikler yüksek kaynak kabiliyetine sahipken, çökelme yoluyla sertleşebilen östenitik paslanmaz çelikler sıcak çatlak oluşumu nedeniyle zor kaynak edilir.
- Manyetik özellik gösterirler.

Başlıca kullanım alanları;

- Pompa ve vana şaftlarıdır.

Paslanmaz çelik türlerinin özellikleri; içyapısı, kimyasal bileşimi ve uygulanan ısıl işlem gibi faktörlere bağlıdır. Çizelge 2. 1'de paslanmaz çelik türlerine ait elastisite modülü, yoğunluk, ısıl genleşme katsayısı gibi veriler yer almaktadır. Bu değerler ortalama olarak verildiği için daha detaylı bilgilere ASM Handbook, 9. Baskı, Cilt 3'ten ulaşılabilir.

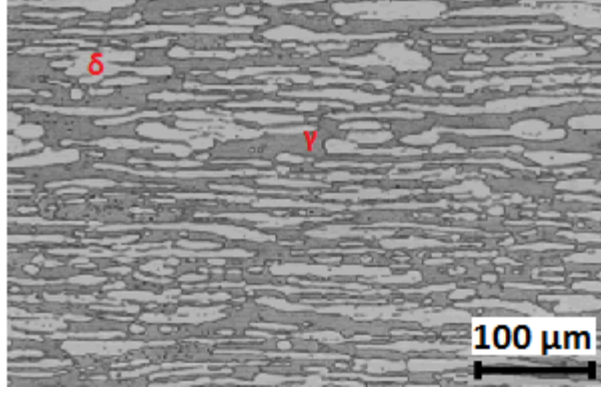
Çizelge 2. 1 Paslanmaz çelik türlerine ait ortalama fiziksel özellikler [26]

Fiziksel Özellikler	Östenitik Paslanmaz Çelikler	Ferritik Paslanmaz Çelikler	Martenzitik Paslanmaz Çelikler	Çökeltme Yoluyla Sertleşebilen Paslanmaz Çelikler
Elastisite Modülü (GPa)	195	200	200	200
Yoğunluk (g/cm ³)	8,0	7,8	7,8	7,8
Isıl Genleşme Katsayısı (mm/m°C)	16,6	10,4	10,3	10,8
Isıl İletkenlik (W/mk)	15,7	25,1	24,2	22,3
Özgül Isı (J/k °K)	500	460	460	460
Elektriksel Direnç (mWcm)	74	61	61	80
Manyetik Geçirgenlik	1,02	600-1100	700-1000	95
Ergime Aralığı (°C)	1375-1450	1425-1530	1425-1530	1400-1440

2.2.5 Dupleks Paslanmaz Çelikler

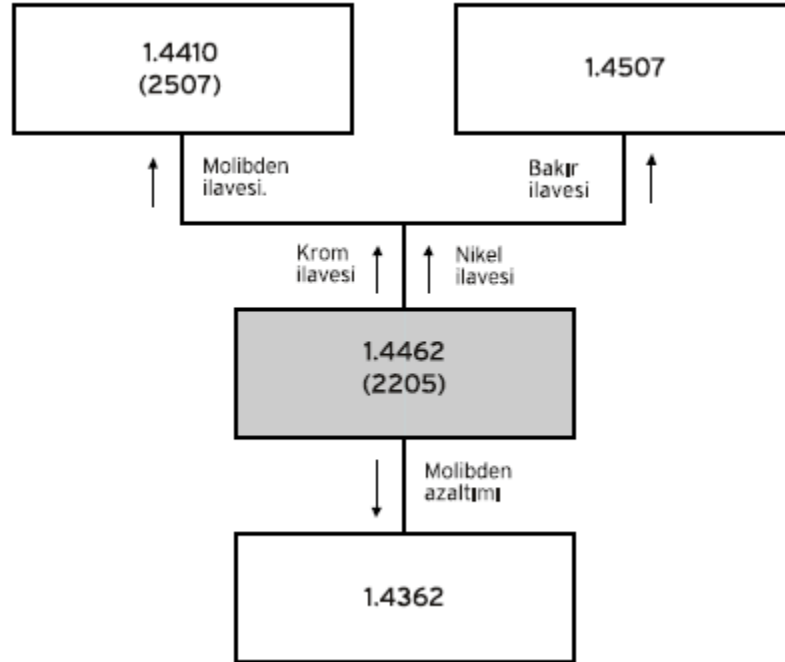
Dupleks paslanmaz çelikler östenit ve ferrit fazlarının özelliklerini birleştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Yapısında neredeyse eşit miktarda ferrit ve östenit içeren paslanmaz çelik türüdür. Yapıdaki ferrit, mekanik dayanım ve gerilmeli korozyon çatlakına karşı dayanım sağlarken, östenit yapısı süneklik ve genel korozyon dayanımı sağlamaktadır. Dupleks paslanmaz çelikler öne çıkan bu özellikleri ile petrokimya ve gemicilik sektöründe geniş kullanım alanı bulmuştur.

Dupleks paslanmaz çeliklerin C içeriği %0,03-0,04 aralığındadır. Ayrıca %18-28 Cr, %4,5-8 Ni ve %2,5-4 oranında Mo içermektedir. Nikel oranının %8'den düşük olması içyapının tamamen östenitik olmasını engellemektedir. Şekil 2. 13'te dupleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2. 13 Dupleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüsü [27]

En çok kullanılan dupleks paslanmaz çelik türleri; 2205, 2304, 2507, 255 ve Z100 tipi paslanmaz çeliklerdir. Şekil 2. 14'te dupleks sertleşebilen paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2. 14 Dupleks sertleşebilen paslanmaz çeliklerin alaşım elementi ilavesiyle sınıflandırılması[17]

Başlıca özellikleri;

- Gerilmeli korozyona karşı yüksek dayanıma sahiptir.
- Östenitik ve ferritik çeliklerle kıyaslandığında daha yüksek mekanik özelliklere sahiptir.
- Kaynak kabiliyeti yüksektir.

- Şekillendirilmesi kolaydır.

Başlıca kullanım alanları;

- Deniz ve tuzlu ortamları,
- Isı değiştiricileri,
- Petrokimya tesisleri

olarak sıralanabilir.

Bu çalışmanın konusu olan dubleks paslanmaz çelikler, bir sonraki bölümde detaylı bir Şekilde ele alınacaktır.

DUBLEKS PASLANMAZ ÇELİKLER

3.1 Dupleks Paslanmaz Çeliklerin Tarihsel Gelişimi

Dupleks paslanmaz çelikler korozyon dayanımı, yüksek mekanik özellikler ve kolay üretim gibi özelliklerin bir arada toplandığı malzemelerdir. Bu çelik türü 1980'li yıllardan itibaren, üretim maliyeti, geliştirilmiş metalurji teknikleri, kaynak ve korozyon özellikleri ve geniş kullanım yelpazesi gibi faktörlerden dolayı östenitik ve diğer paslanmaz çeliklere göre daha fazla tercih edilir duruma gelmiştir. Dupleks paslanmaz çeliklerin geçmişiyle ilgili yapılan kapsamlı çalışmalar doğrultusunda [28-30], tarihsel gelişimi iki döneme ayrılabilir.

3.1.1 1930-1960

İlk geliştirilen dupleks paslanmaz çelikler 1930 yılında İsviçre'de üretilmiştir. Bu "İlk Nesil Dupleks Paslanmaz Çelikler" olarak adlandırılan türler alaşım elementi olarak sadece Cr, Ni ve Mo içermekteydi ve yüksek karbonlu östenitik paslanmaz çeliklerde görülen tanelerarası korozyonu azaltmak amacıyla üretilmişti. İlk dupleks döküm 1930 yılında Finlandiya'da üretilmiş ve ilk patent 1936 yılında Fransa'da dupleks dökümün öncüsü olarak bilinen Uranüs 50'ye verilmiştir. İlk nesil dupleks paslanmaz çeliklerin östenitik paslanmaz çeliklere göre sıcak yırtılma dayanımı daha yüksektir. Bu da o yıllarda karmaşık şekilli parçaların daha kolay şekilde dökümünü sağlamıştır. Avesta, Creusot-Loire ve Sandvik gibi öncü şirketler, östenitik paslanmaz çeliklere kıyasla daha yüksek mekanik özelliklere sahip ve (o yıllarda kolay olmayan) çok düşük karbon oranı gerektirmeden elde edilen tanelerarası korozyon dayanımı yüksek olan dupleks paslanmaz çelik türleri geliştirmiştir. Ancak, yüksek karbon içeriği kaynak işleminde

baskın olarak ferritik olan ITAB'larda ve ferrit-ferrit tane sınırındaki korozyon özelliklerinin ana metalden daha düşük olması kullanımını sınırlamıştır [31]. Çizelge 3. 1'de ilk nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik sınıflarının kimyasal bileşimi verilmiştir.

Çizelge 3. 1 İlk nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31]

İlk Nesil Dubleks Paslanmaz Çelikler									
Kalite	UNS No	EN No	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu
329	S32900	1.4460	0,08	23-28	2,5-8	1,0-2,0	-	1	-
**	S31500	1.4424	0,03	18-19	4,3-5,2	2,5-3	0,05-0,1	-	-
	S32404		0,04	20,5-22,5	5,5-8,5	2,0-3,0	0,2	2	1,0-2,0

Sonuç olarak bu ilk nesil dubleks paslanmaz çeliklerde metalurjik değişkenlerin hassas olarak ayarlanamaması, tek şirket ürünü olması gibi sebeplerden dolayı istenen mekanik ve içyapı özellikleri elde edilememiş ve kullanımını çok fazla yaygınlaşmamıştır.

3.1.2 1960 ve Sonrası

İlk nesil dubleks paslanmaz çelikler bazı özellikleri bakımından avantaj sağlasa da kaynak işleminde sergilediği özelliklerden dolayı kullanımını sınırlandırılmıştır. 1968 yılında elektrik ark fırınlarında rafine tekniklerinin geliştirilmesiyle (Argon Oksijen Dekarbürizasyonu-AOD), düşük C içeriğine sahip malzeme üretimi, ısının daha kontrol edilebilir olması ve yapıdaki empürite miktarlarının azaltılmasıyla son ürün kalitesinde önemli bir artış sağlanmıştır. Bu durum dubleks paslanmaz çeliklere geniş bir yelpaze aralığı sunmuştur. AOD tekniği sayesinde azotun alaşım elementi olarak yapıya eklenmesi mümkün hale gelmiştir. Azot elementi dubleks paslanmaz çeliklerde ITAB'ın tokluğunu ve korozyon özelliklerini arttırıcı bir etki sağlamaktadır. Östenitin kararlılığını arttırmasının yanında, N elementi ayrıca zararlı intermetalik oranını azaltan bir faktördür [31]. Çizelge 3. 2'de ikinci nesil dubleks paslanmaz çelik sınıflarına ait kimyasal bileşimler verilmiştir.

Çizelge 3. 2 İkinci nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31]

İkinci Nesil Dubleks Paslanmaz Çelikler										
Kalite	UNS No	EN No	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	W	Cu
Yalın										
	S32001	1.4482	0,03	19,5-21,5	1-3	0,6	0,05-0,17	4-6	-	1
	S32101	1.4162	0,04	21-22	1,35-1,7	0,1-0,8	0,2-0,25	4-6	-	0,1-0,8
	S32202	1.4062	0,03	21,5-24	1-2,8	0,45	0,18-0,26	2	-	-
	S82011		0,03	20,5-23,5	1-2	0,1-1	0,15-0,27	2-3	-	0,5
2304	S32304	1.4362	0,03	21,5-24,5	3-5,5	0,05-0,6	0,05-0,2	2,5	-	0,05-0,6
		1.4655	0,03	22-24	3,5-5,5	0,1-0,6	0,05-0,2	2	-	1,0-3,0
Standart										
	S32003		0,03	19,5-22,5	3-4	1,5-2	0,14-0,2	2	-	-
2205	S31803	1.4462	0,03	21-23	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,2	2	-	-
2205	S32205	1.4462	0,03	22-23	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,2	2	-	-

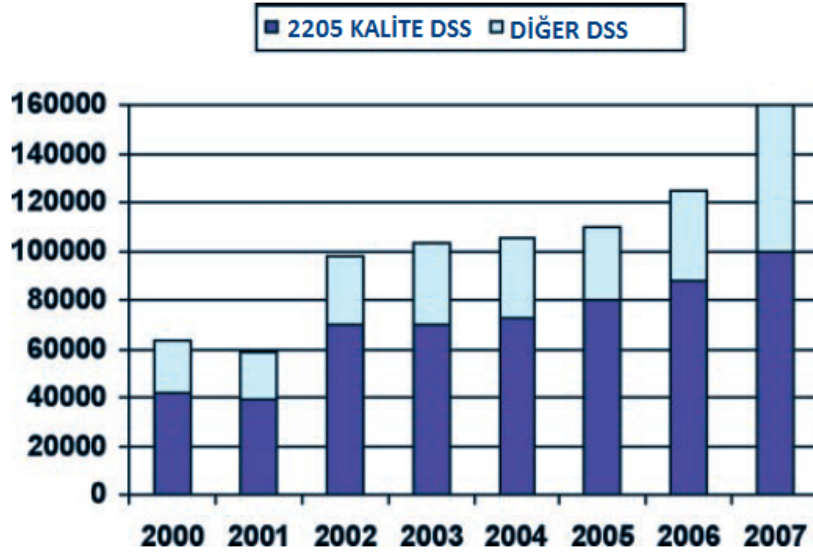
Çizelge 3. 2 İkinci nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31] (devamı)

25 Cr										
	S31200		0,03	24-26	5,5-6,5	1,2-2	0,14-0,2	2	-	-
	S31260		0,03	24-26	5,5-7,5	2,5-3,5	0,1-0,3	1	0,1-0,5	0,2-0,8
	S32506		0,03	24-26	5,5-7,2	3-3,5	0,08-0,2	1	0,05-0,3	-
	S32520	1.4207	0,03	24-26	5,5-8	3-4	0,2-0,35	1,5	-	0,5-2
255	S32550	1.4507	0,04	24-27	4,5-6,5	2,9-3,9	0,1-0,25	1,5	-	1,5-2,5
Süper Dubleks										
2507	S32750	1.4410	0,03	24-26	6,0-8,0	3,0-5	0,24-0,32	1,2	-	0,5
	S32760	1.4501	0,03	24-26	6,0-8,0	3,0-4	0,2-0,3	1	0,5-1	0,5-1
	S32808		0,03	27-27,9	7-8,2	0,8-1,2	0,3-0,4	1,1	2,1-2,5	-
	S32906		0,03	28-30	5,8-7,5	1,5-2,6	0,3-0,4	0,8-1,5	-	0,8
	S32950		0,03	26-29	3,5-5,2	1-2,5	0,15-0,35	2	-	-
	S39274		0,03	24-26	6,5-8,5	2,5-3,5	0,24-0,32	1	1,5-2,5	0,2-0,8
	S39277		0,025	24-26	6,5-8,5	3,0-4	0,23-0,33	0,8	0,8-1,2	1,2-2
		1.4477	0,03	28-30	5,8-7,5	1,5-2,6	0,3-0,4	0,8-1,5	-	0-0,8

Çizelge 3. 2 İkinci nesil dökülmüş ve dövülmüş dubleks paslanmaz çelik türlerine ait kimyasal bileşim [31] (devamı)

Hiper Dubleks								
S32707	0,03	26-29	5,5-9,5	4-5	0,3-0,5	1,5	-	1
S33207	0,03	29-33	6,0-9	3-5	0,4-0,6	1,5	-	1

İkinci nesil dubleks paslanmaz çelikler içerdikleri N elementi ile tanımlanmıştır. Ancak dubleks paslanmaz çelik metalurjisindeki en büyük ilerleme, 1970’lerde 2205 sınıfının geliştirilmesiyle yaşanmıştır. Bugün hala piyasaya sürülen dubleks paslanmaz çeliklerin çok büyük bir kısmını bu sınıf oluşturmaktadır. Şekil 3. 1’de 2205 kalite dubleks paslanmaz çelik ve diğer DSS türlerinin yıllara göre üretim oranları verilmiştir.



Şekil 3. 1 Küresel piyasada dubleks paslanmaz çeliğin ham üretiminin yıllara göre değişimi [31]

3.2 Dubleks Paslanmaz Çeliklerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

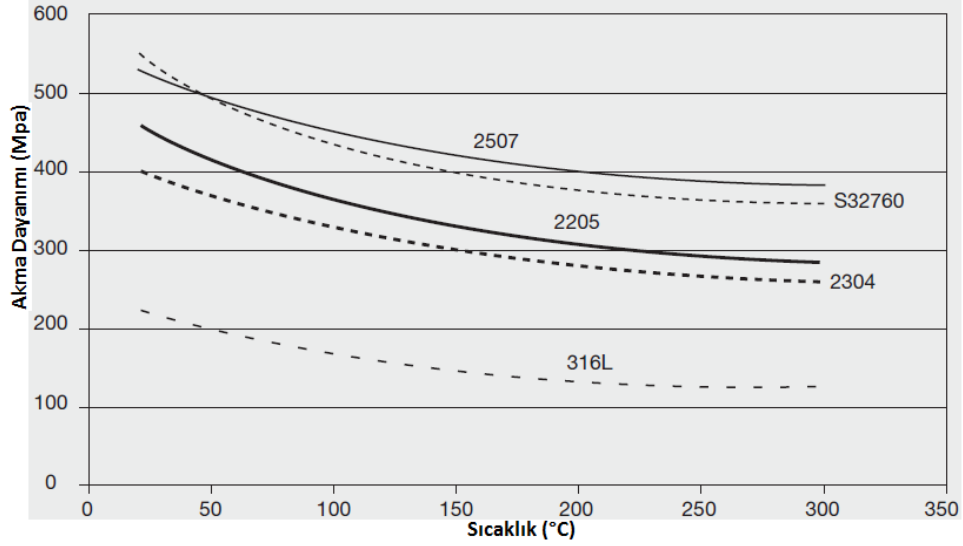
Dubleks paslanmaz çelikler, daha öncede bahsedildiği üzere, yüksek korozyon dayanımı, yüksek mekanik özellikler ve kolay üretim gibi özellikleri bir arada taşıyan malzemelerdir. Dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özellikleri östenitik ve ferritik paslanmaz çeliklerin arasındadır, fakat ferritik paslanmaz çelikler ve karbon çeliklerine daha yakındır. Bu çelik türlerinin çukurcuk ve çatlak korozyonuna karşı dayanımı

içerdiği Cr, Mo, W ve N elementleri ile sağlanmaktadır. Dupleks paslanmaz çelikler, korozyon özellikleri bakımından 300 serisi östenitik paslanmaz çeliklerden üstündür. Ayrıca yüksek dayanım ve yüksek tokluk özelliklerini bir arada sergilemesiyle de östenitik paslanmaz çeliklerden daha üstün konuma gelmiştir [31].

Dupleks paslanmaz çelikler yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Çizelge 3. 3'te bazı dupleks paslanmaz çelik sınıflarına ait mekanik özellikler verilmiştir. Dupleks paslanmaz çeliklerin, çözme tavlama uygulanmış haldeki akma mukavemeti standart östenitik paslanmaz çeliklerin iki katından fazladır. Bunun temel nedeni; alaşım elementi olarak azotun kullanılmasıdır. Bu sayede, bazı mimarı uygulamalarda duvar kalınlığı azaltılmıştır. Şekil 3. 2'de çeşitli dupleks paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığı ve 300°C arasındaki tipik akma dayanımlarının 316L kalite östenitik paslanmaz çelik ile karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 3. 3 Dupleks paslanmaz çeliklerin ASTM ve EN standartlarına göre mekanik özelliklerinin minimum değerleri [31]

ASTM				
Sınıf	UNS No	%0,2'lik Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
2304	S32304	400	600	25
2205	S32205	450	655	25
2507	S32750	550	795	15
EN				
	EN No	Akma Dayanımı Rp0,2 (MPa)	Çekme Dayanımı Rm (MPa)	Uzama- A5 (%)
2304	1.4362	400	630	25
2205	1.4462	460	640	25
2507	1.4410	530	730	20



Şekil 3. 2 Çeşitli dubleks paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığı ve 300°C arasındaki tipik akma dayanımlarının 316L tipi östenitik paslanmaz çelikle karşılaştırılması [31]

Önceki bölümlerde sözü edilen ferritik paslanmaz çeliklerde görülen 475°C gevrekliği dubleks paslanmaz çelikler için de geçerlidir. Bu nedenle; Çizelge 3. 4'te verilen uygulanabilir basınçlı kap tasarım kodlarının üzerindeki sıcaklıklarda çok uzun süre kullanılmamalıdır.

Çizelge 3. 4 Dubleks paslanmaz çeliklerde maksimum gerilim değerleri için basınçlı kap tasarım kodlarında verilen üst sıcaklık limitleri [31]

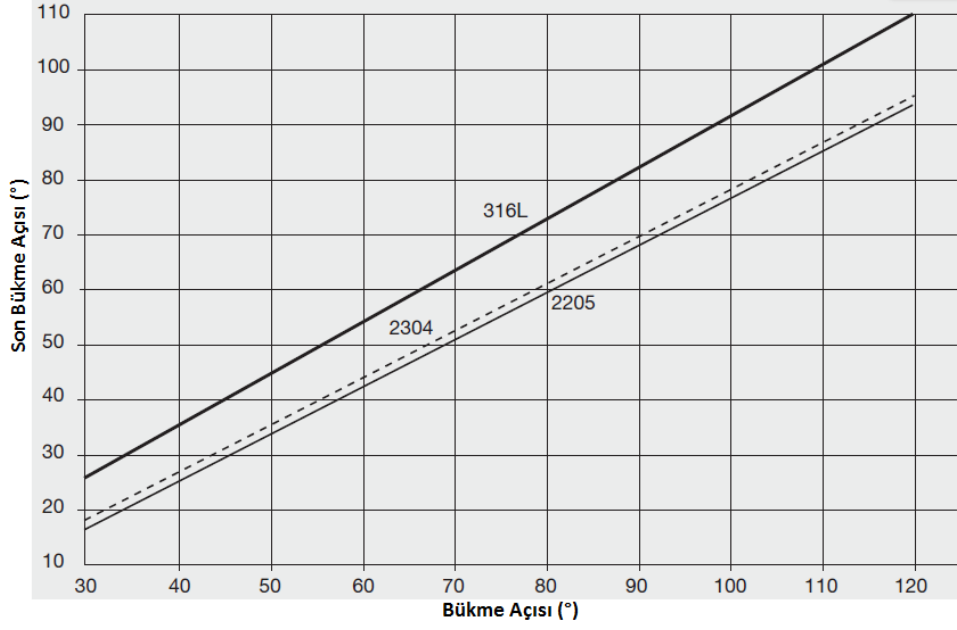
Sınıf	Şartlar	ASME		TÜV	
		°C	°F	°C	°F
2304	Kaynaksız	315	600	300	570
2304	Kaynaklı, eşleştirilen dolgu maddesi	315	600	300	570
2304	2205 ve 2209 ile kaynak edilmiş	315	600	250	480
2205	Kaynaksız	315	600	280	535
2205	Kaynaklı	315	600	250	480
2507	Dikişsiz tüp	315	600	250	480
255 Alaşımı	Kaynaklı ya da kaynaklı	315	600	-	-

Dövülmüş dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik özellikleri yöne bağlı olduğundan genellikle anizotropiktir. Bu anizotropi; soğuk ya da sıcak haddeleme sonucunda yönlenmiş tanelerden kaynaklanmaktadır. Dubleks paslanmaz çeliklerin katılaşma yapısı izotropik özellik göstermesine rağmen, haddeleme dövme ve tavlama gibi işlemlerden sonra anizotropik özellik göstermektedir. İki faz görünümlü nihai doku yönlenmiş bir görünüme sahiptir. Dayanım tokluk haddeleme yönünde daha yüksektir.

Çizelge 3. 5 Dupleks ve östenitik paslanmaz çeliklerin süneklik özelliklerinin ASTM A 240 ve EN 10088-2'ye göre karşılaştırılması [31]

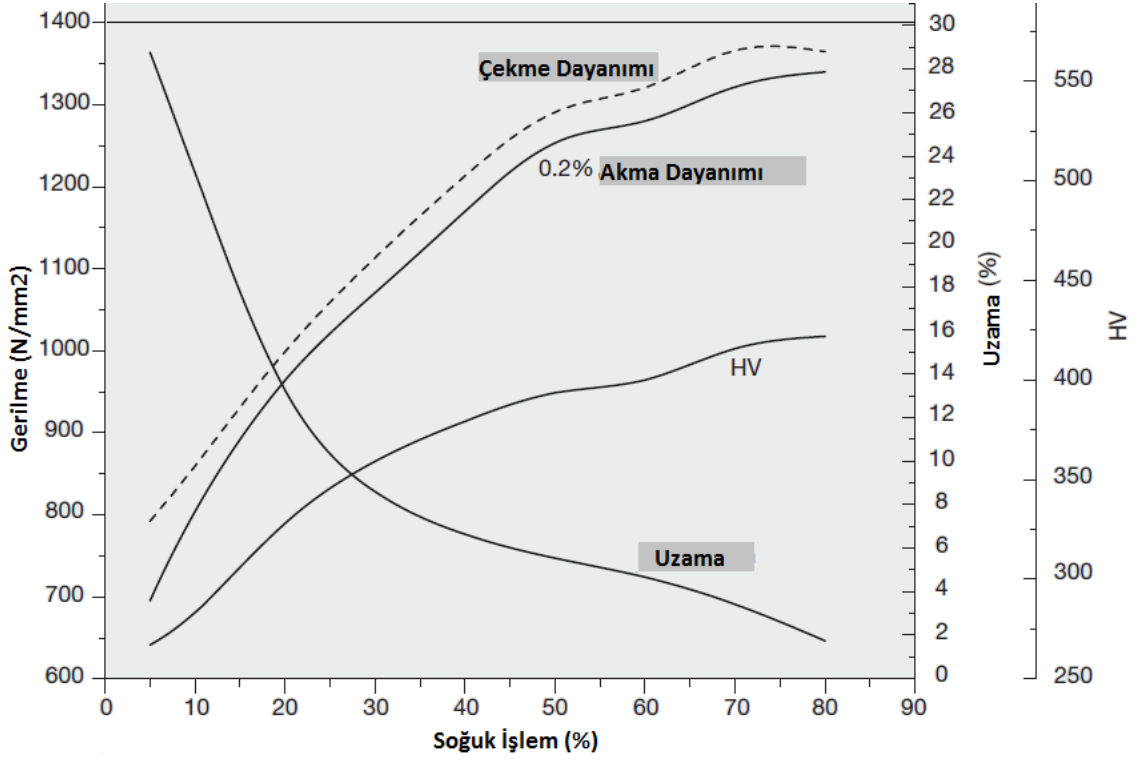
UNS No	Sınıf	Min. Uzama (%)	EN No	Min. Uzama (%)*		
				P	H	C
S32003		25				
S32101		30	1.4162	30	30	30
S32202		30	1.4062			
S32304	2304	25	1.4362	25	20	20
S32205	2205	25	1.4462	25	25	20
S32750	2507	15	1.4410	20	15	15
S30403	304L	40	1.4307	45	45	45
S32603	316L	40	1.4404	45	40	40
P=Sıcak Haddelenmiş Plaka C=Soğuk Haddelenmiş Bobin *Enine yön						

Dupleks paslanmaz çelikler; yüksek dayanımın yanında yüksek süneklik ve tokluk özelliklerine sahiptir. Karbon çelikleri ve ferritik çeliklerle karşılaştırıldıklarında, dupleks paslanmaz çeliklerin süneklikten gevrekliğe geçişinin daha kademeli olduğu görülmektedir. Ancak östenitik paslanmaz çeliklere göre daha düşük tokluk ve süneklğe sahiptirler. Çizelge 3. 5'te dupleks ve östenitik paslanmaz çeliklerin çekme testinde minimum uzamaları verilmiştir.



Şekil 3. 3 2 mm (0,08 inc) sac için 2304 ve 2205 dubleks paslanmaz çelik ve 316L tipi östenitik çeliğin bükülmesinin karşılaştırılması [31]

Dubleks paslanmaz çeliklerin akma dayanımı Young Modülü sınırlamalarına bağlı olarak düşebilmektedir. Ayrıca, imalat sırasında da sorunlar oluşabilmektedir. Sahip oldukları yüksek dayanımları plastik şekillendirme esnasında yüksek itici güç gerektirmektedir. Şekil 3. 3'te 2304 ve 2205 dubleks ve 316L östenitik paslanmaz çeliğin şekillendirilmesinin karşılaştırılması verilmiştir. Görüldüğü gibi dubleks paslanmaz çelikler östenitik paslanmaz çelikten daha düşük sünekliğe sahiptir. Bu nedenle dubleks paslanmaz çeliklerde çatlamalardan kaçınmak için artan bükülme yarıçapına dikkat edilmelidir.



Şekil 3. 4 2205 dubleks paslanmaz çelikte soğuk şekillendirmenin mekanik özelliklere etkisi [31]

Şekil 3. 4 2205 dubleks paslanmaz çelikte soğuk şekillendirmenin mekanik özelliklere etkisi verilmiştir. Dubleks paslanmaz çelikler, yüksek sertlikleri ve çalışma esnasında pekleşme hızının yüksek olması nedeniyle alet ömrünü azaltmaktadır. Bu nedenle bükme işlemi esnasında çeşitli tavlamalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Dubleks paslanmaz çeliklerin oda sıcaklığındaki ve yüksek sıcaklıktaki fiziksel özellikleri Çizelge 3. 6 ve Çizelge 3. 7'de verilmiştir. Çizelge 3. 6 ve Çizelge 3. 7'de karşılaştırma yapılabilmesi için karbon çelikleri ve östenitik çeliklerin de özellikleri verilmiştir. Dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özellikleri arasındaki küçük farklılıkların test prosedüründeki farklılıklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Çizelge 3. 6 ve Çizelge 3. 7'deki değerler karşılaştırıldığında dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik paslanmaz çelikler arasında olduğu görülmektedir.

Çizelge 3. 6 Oda sıcaklığında dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31]

Sınıf	UNS No	Yoğunluk		Özgül Isı		Elektriksel Özdirenç		Young Modülü	
		g/cm ³	lb./in ³	j/kg K	Btu/lb. /F°	micro Ω m	micro Ω in.	GPa	x10 ⁶ psi
Karbon çeliği	G10200	7,64	0,278	447	0,107	0,1	3,9	207	30
304	S30400	7,98	0,29	502	0,12	0,73	28,7	193	28
316	S31600	7,98	0,29	502	0,12	0,75	29,5	193	28
329	S32900	7,7	0,28	460	0,11	0,8	31,5	200	29
	S31500	7,75	0,28	482	0,115			200	29
	S32101	7,8	0,281	500	0,119	0,8	31,5	200	29
2304	S32304	7,75	0,28	482	0,115	0,8	31,5	200	29
	S31803	7,8	0,281	500	0,119	0,8	31,5	200	29
2205	S32205	7,8	0,281	500	0,119	0,8	31,5	200	29
	S31260	7,8	0,281	502	0,12			200	29
	S32750	7,85	0,285	480	0,114	0,8	31,5	205	29,7
255	S32550	7,81	0,282	488	0,116	0,84	33,1	210	30,5
	S39274	7,8	0,281	502	0,12			200	29
	S32760	7,84	0,281			0,85	33,5	190	27,6
	S32520	7,85	0,28	450	0,108	0,85	33,5	205	29,7
2507	S32750	7,79	0,28	485	0,115	0,8	31,5	200	29

Çizelge 3. 7 Yüksek sıcaklıklarda dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31]

Sınıf	UNS No	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
GPa Birimiyle Sıcaklığın Fonksiyonu Olarak Elastiklik Modülü							
Karbon çeliği	G10200	207					
304	S30400	193	192	183	177	168	159
329	S32900	200	195	185			
	S31500	200	190	180	170	160	150
	S32101	200	194	186	180		
2304	S32304	200	190	180	170	160	150
	S31803	200	190	180	170	160	150
2205	S32205	200	190	180	170	160	150
255	S32550	210	200	198	192	182	170
	S32520	205	185	185	170		
2507	S32750	200	190	180	170	160	150

Çizelge 3. 7 Yüksek sıcaklıklarda dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31] (devamı)

Sınıf	UNS No	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
10⁻⁶/K Birimiyle Isıl Genleşme Katsayısı							
Karbon çeliği	G10200	NA	12,1	13		14	
304	S30400	NA	16,4	16,9	17,3	17,6	18
329	S32900	NA	10,9	11	11,6	12,1	12,3
	S31500	NA	13	13,5	14	14,5	15
	S32101	NA	13	13,5	14		
2304	S32304	NA	13	13,5	14	14,5	15
	S31803	NA	13	13,5	14	14,5	15
2205	S32205	NA	13	13,5	14	14,5	15
255	S32550	NA	12,1	12,6	13	13,3	13,6
	S32520	NA	12,5	13	13,5		
2507	S32750	NA	13	13,5	14	14,5	15

Çizelge 3. 7 Yüksek sıcaklıklarda dubleks paslanmaz çeliklerin fiziksel özelliklerinin karbon çelikleri ve östenitik çeliklerle karşılaştırılması [31] (devamı)

Sınıf	UNS No	20°C	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C
GPa Birimiyle Sıcaklığın Fonksiyonu Olarak Elastiklik Modülü							
Karbon çeliği	G10200	52	51	49		43	
304	S30400	14,5	16,2	17,8	19,6	20,3	22,5
329	S32900						
	S31500	16	17	19	20	21	22
	S32101	15	16	17	18		
2304	S32304	16	17	19	20	21	22
	S31803	16	17	19	20	21	22
2205	S32205	16	17	19	20	21	22
255	S32550	13,5	15,1	17,2	19,1	20,9	22,5
	S32520	17	18	19	20		
2507	S32750	16	17	19	20	21	22

Dubleks paslanmaz çeliklerin sahip oldukları fiziksel ve mekanik özellikler sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Bunlar;

- **Baca gazı kükürt giderme (FGD) sistemleri:** Bilindiği gibi, hava kalitesinin planlanması kapsamında kömür yakıtlı elektrikli araçlar belirsiz bir gelecekle karşı karşıyadır. Havaya salınan SO₂'nin daha da azaltılması gerekmektedir ve FGD yöntemi SO₂ emisyonunu azaltan yöntemlerden biridir. Şekil 3. 5'te görülen bu sistemde SO₂'nin azaltılması "ıslak temizleme" olarak adlandırılan yöntemle yapılmaktadır. Modern FGD sistemleri farklı sıcaklık, farklı klorit derişimleri ve farklı pH değerlerine sahip birçok bölgeden oluşmaktadır. SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik sahip olduğu düşük maliyet ve yüksek

korozyon dayanımı ile Asya, Güney Amerika ve Avrupa'da FGD sistemlerinde tercih edilen malzeme türü olmuştur.



Şekil 3. 5 S32101 ve S2205 DSS'den yapılmış çok kademeli hızlı deniz suyunun tuzdan arındırma hücresi [31]

- **Tuzdan arındırma:** Tuzdan arındırma sistemlerinde yüksek klorit oranı ve yüksek sıcaklığın bir arada bulunduğu korozif bir ortam mevcuttur. Bu nedenle, tuzdan arındırma sistemlerinde kullanılacak malzemelerde aranılan en temel özellik korozyon dayanımıdır. Özellikle SAF 2205 kalite dubleks paslanmaz çelik yüksek dayanımın yanında sahip olduğu yüksek korozyon dayanımı ile bu sistemlerde kullanılan bir malzeme haline gelmiştir.

- **Yağ ve Gaz:** Petrol ve gaz sektöründe dubleks paslanmaz çelikler zorlu koşullara dayanmada önemli bir role sahiptir. Sadece genel korozyon dayanımı ve mekanik özellikleriyle değil, ayrıca çukurcuk ve oyuklanma korozyonu dayanımıyla da östenitik paslanmaz çeliklere göre daha üstündür. Nitekim, PREN değerleri genellikle 40'ın üzerindedir. Dubleks paslanmaz çeliklerin temel kullanım alanları; akış hattı, proses borulama sistem ve ekipmanlarıdır (ayırıcılar, temizleyiciler, pompalar). Ayrıca denizaltı boru sistemlerinde de tercih edilmektedir. Süper dubleks olarak tanımlanan türler ise; tasarım gerilmesi sayesinde çubuk, dövme, döküm, sac, levha, tüp ve bağlantı elemanları gibi öğelerde kullanılmaktadır. Şekil 3. 6'da SAF 2507 dubleks paslanmaz çeliğin göbeklerde kullanımına örnek verilmiştir.



Şekil 3. 6 Denizde kullanılan 2507 göbek borularının yağ ve gaz uygulamaları [31]

- **Biyoyakıtlar:** Karada kullanılan biyoyakıtlar, özellikle etanol, dubleks sınıflarının kullanımının arttığı bir sektördür. Bu biyokütleler sıvı halde SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik tanklarda muhafaza edilmektedir.
- **Gıda ve içecek:** Gıda ve içecek endüstrisinde de dubleks paslanmaz çelik kullanımı yıllara bağlı olarak artmaktadır.
- **Mimari ve İnşaat:** Dubleks paslanmaz çelikler korozif bir ortam olan tuzlu koşullarında yüksek yük taşıma kabiliyetinden dolayı köprü yapımında tercih edilen bir malzemedir. Şekil 3. 7'de 2000 ton SAF 2205 DSS çelik malzeme kullanılarak yapılan Stonecutters Köprüsü verilmiştir.



Şekil 3. 7 Stonecutters Köprüsü, Hong Kong [31]

Dubleks paslanmaz çelik malzemenin kullanıldığı bir diğer yapı ise, Şekil 3. 8'de verilen Katar'daki New Doha Uluslararası Havaalanı'nın çatısıdır. Bu yapı yaklaşık 195,000 metre uzunluğu ile dünyanın en uzun çatısı olma özelliğine sahiptir. Burada dubleks

paslanmaz çelik kullanılmasının birçok nedeni vardır. En önemlisi, havalanının denize çok yakın olmasından dolayı korozif etkilere açık olmasıdır. Ayrıca Orta Doğu'da bulunmasından dolayı yoğun sıcaklık ve nem ortamındadır. Bir diğer sebebi ise; malzemenin yüksek dayanım/ağırlık oranıdır.



Şekil 3. 8 New Doha Uluslararası Havaalanı'nın dubleks paslanmaz çelik çatısı [31]

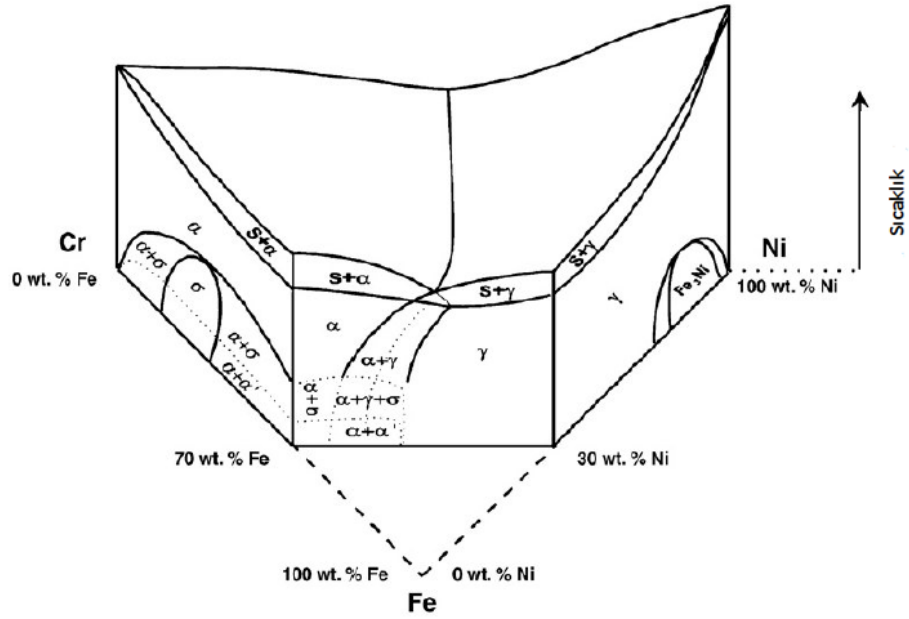
Şekil 3. 9'da, 570 ton dubleks paslanmaz çelik kullanılarak inşa edilen bir yaya köprüsü verilmiştir. DNA'ya benzeyen bu çarpıcı tasarımda iki spiral boru şeklinde paslanmaz çelik üye kullanılmıştır.



Şekil 3. 9 2307 dubleks paslanmaz çelik köprü kemerleri [31]

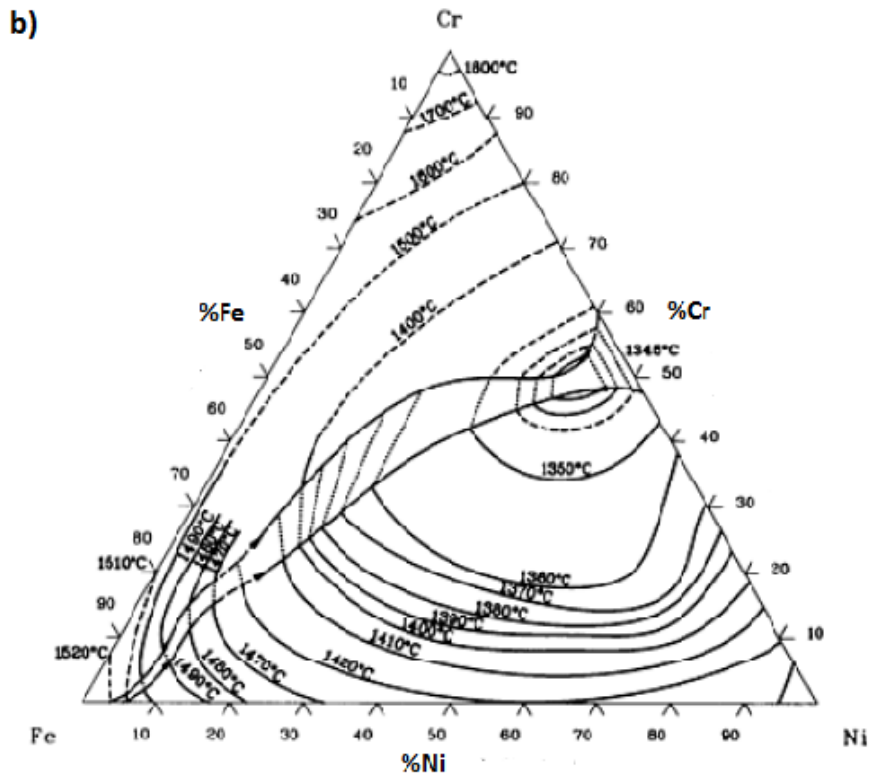
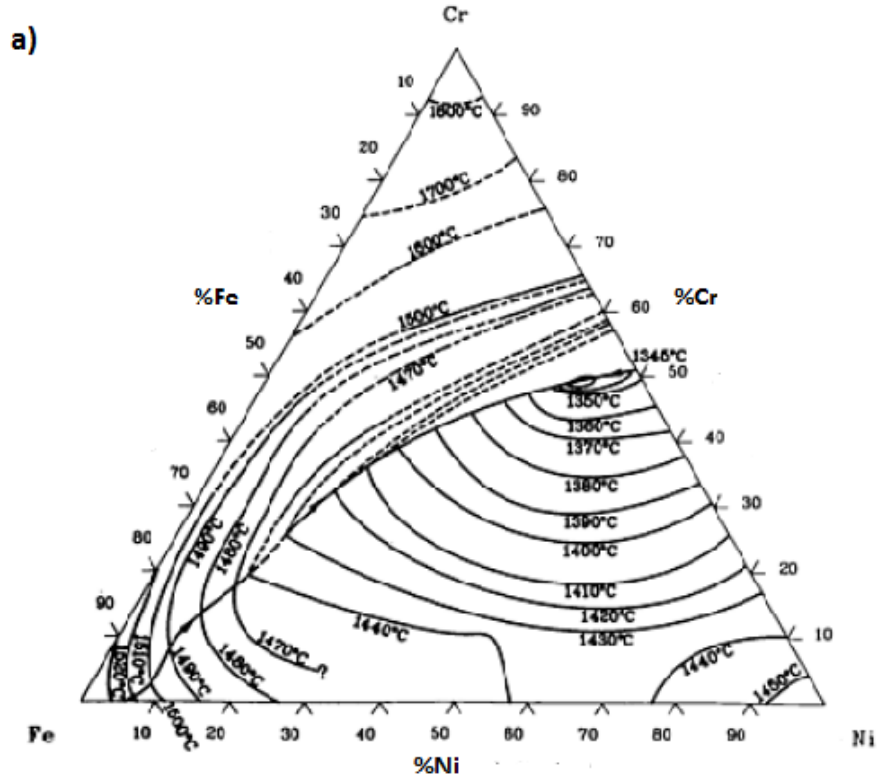
3.3 Dupleks Paslanmaz Çelikte Oluşan Fazların Genel Özellikleri

Dupleks paslanmaz çelikler Şekil 3. 10'da verilen Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramından faydalanılarak geliştirilen malzeme türleridir. Dupleks paslanmaz çeliklerde genel mikroyapı ferrit matris içerisinde oluşan östenit adaları şeklinde tanımlanır. Yapısında, neredeyse eşit miktarda bulundurduğu birincil fazlar dışında ısıtma ve soğutma şartlarında ayrıca sigma ve chi gibi ikincil fazlarda oluşabilmektedir.



Şekil 3. 10 Fe-Cr-Ni üçlü faz diyagramı [26]

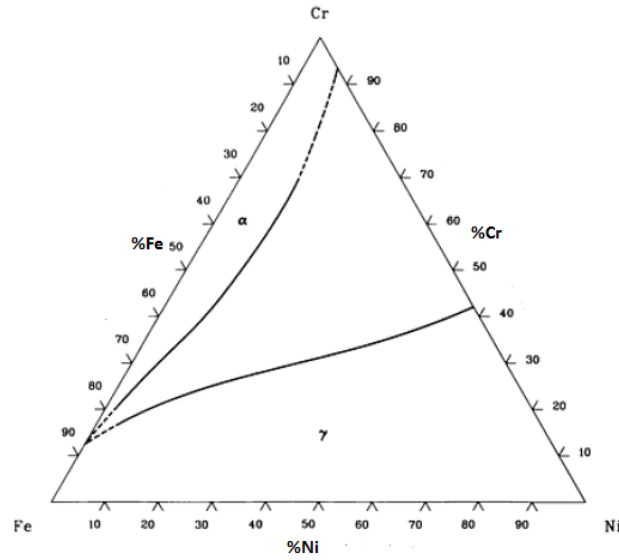
Dupleks paslanmaz çelikler ilk olarak ferritik alaşım olarak katılaşmaktadır. Ardından azalan sıcaklık ile birlikte katı hal reaksiyonu olarak adlandırılan dönüşüm ile ferrit fazı östenite dönüşmektedir. Ana alaşım elementleri olan Fe, Cr ve Ni'nin yapıdaki miktarları ergime ve katılaşma sıcaklıklarını değiştirmektedir. Bu duruma ait üçlü faz diyagramları Şekil 3. 11'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 11 Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin a) erime diyagramı, b) katılaşma diyagramı [26]

3.3.1 Birincil Fazlar

Dubleks paslanmaz çeliklerin ana yapısı δ -ferrit ve östenitten oluşmaktadır. Bu çift fazlı mikroyapı çeliğin 1000-1050°C'de tavlaniıp hızlı soğutulmasıyla elde edilmektedir [18]. Şekil 3. 12'de 1000°C'de Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin izotermik bölümü verilmiştir. Faz diyagramında da görüldüğü gibi; yapıda değişen alaşım elementi miktarına göre ferrit-östenit oluşum alanlarında sapmalar meydana gelmektedir. Örneğin; östenit dengeleyeci olarak tanımlanan Ni elementinin yapıdaki yüzdesi arttıkça östenitin oluşum sahası genişlemektedir. Benzer durum ferrit kararlaştırıcı bir element olan Cr için de geçerlidir.



Şekil 3. 12 1000°C'de Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin izotermik bölümü [26]

Dubleks paslanmaz çelikler, içerdikleri yüksek krom (%18-28) ve orta miktarda nikel (%4,5-8) sayesinde yapısında birincil faz olarak hem ferrit, hem de östenit bulundurabilmektedir.

Aşağıdaki başlıklarda ferrit ve östenitin yapıya etkileri incelenecektir.

3.3.1.1 Östenit Fazı

Şekil 3. 13'te görüldüğü gibi, %70 Fe ve %25 Cr içeren dubleks paslanmaz çelik ferrit olarak katılaşımaktadır. Östenitin çekirdeklenmesi ötektoid dönüşüm denilen katı hal dönüşümü ile $\alpha/(\alpha+\gamma)$ arayüzeylerinde gerçekleşmektedir. Östenitin yapıdaki miktarı soğuma hızına bağlıdır. Düşük soğuma hızlarının östenit oluşumu için daha avantajlı

olduğu bilinmektedir. Dupleks paslanmaz çeliklerin tarihsel gelişiminde ilk nesil dupleks paslanmaz çeliklerin azot elementi içermediği belirtilmişti. Östenit kararlaştırıcı element olan azotun yapıya ilavesiyle ferrit-östenit dönüşümünün daha yüksek sıcaklıklarda meydana geldiği görülmüştür [32].

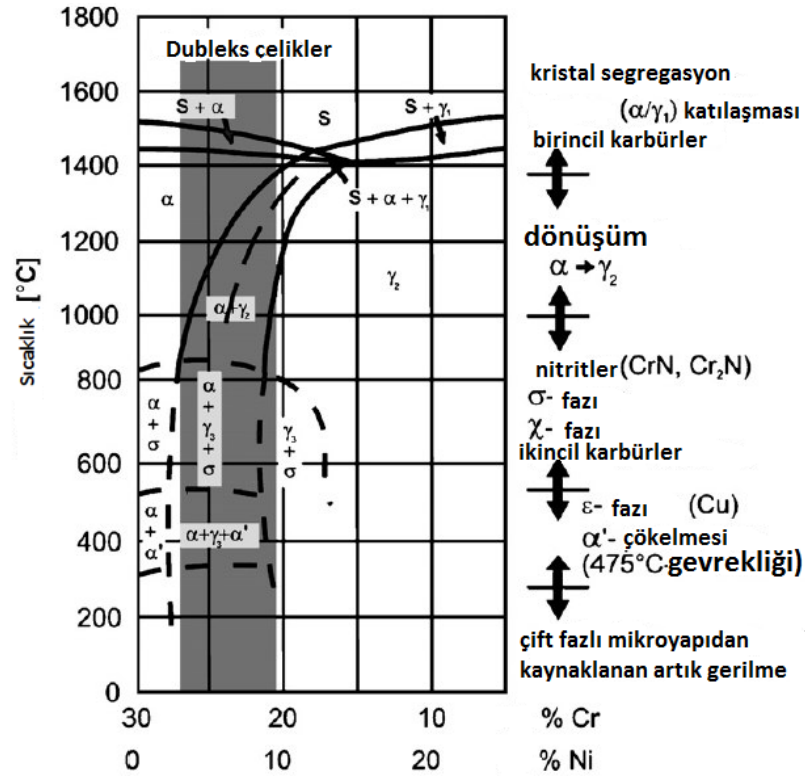
3.3.1.2 Ferrit Fazı

Dupleks paslanmaz çelikler östenitik türlere bir alternatif olarak üretilmiştir. Bunun en önemli nedeni, bu çeliğin yapısında ferrit fazının bulunmasıdır. Bu sayede klorlu ortamlarda gerilmeli korozyon dayanımını daha yüksek olan malzeme üretilmiştir.

Dupleks paslanmaz çelikte oluşan birincil fazlardaki alaşım elementlerinin dağılımı bir diferansiyel ile geliştirilmiştir. Alaşım elementlerinin ferrit fazı içerisinde daha hızlı yayılması nedeniyle teknik olarak bütün ikincil fazlar ferrit içine doğru büyümektedir [33]. Yapıdaki ferrit miktarı ikincil fazların büyümesini etkilediği için mekanik ve korozyon özelliklerini de etkilemektedir.

3.3.2 İkincil Fazlar

Dupleks paslanmaz çelikler, içerdikleri yüksek alaşım elementi nedeniyle karmaşık bir katılaşma davranışı sergilemektedir. Birincil faz olarak çekirdeklenen ferrit ve östenitin dışında değişen sıcaklıklarda farklı fazlar da çekirdeklenmektedir. %70 Fe içeren dupleks paslanmaz çelikte soğuma sırasında oluşan fazlar şekil 3. 13'te gösterilmiştir.



Şekil 3 13 %70 Fe içeren dubleks paslanmaz çelikte soğuma sırasında oluşan fazlar [34]

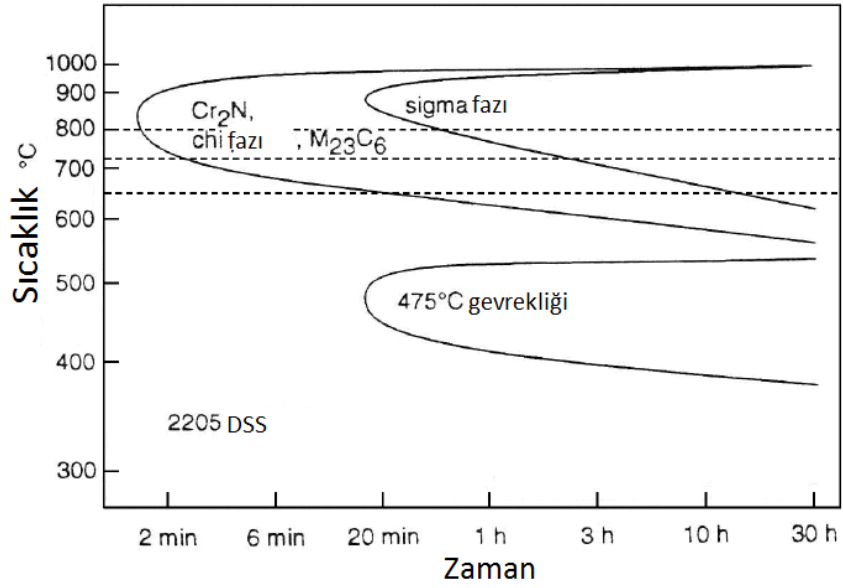
Dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik ve korozyon özelliklerinde çökelen bu fazların etkisi son derece büyüktür.

3.3.2.1 Sigma Fazı

Yapıda sigma fazının oluşumu dubleks paslanmaz çeliklerin kullanımını sınırlayan en önemli faktörlerden biridir. Sigma fazı dubleks paslanmaz çeliklerin mekanik, korozyon ve kaynak özellikleri gibi öne çıkan avantajlarını olumsuz etkilemektedir. Bu fazın yapıda oluşumu, döküm, haddeleme, kaynak, dövme ve yaşlandırma gibi işlemler sırasında gerçekleşmektedir.

Sigma fazı, ilk olarak 1907'de Treitscke ve Tammann [35] tarafından Fe-Cr ikili sisteminde bulunmuştur. 1927 yılında Bain ve Griffiths [36] Fe-Cr-Ni üçlü sisteminde oluşan sigma fazını gözlemlemiştir. Ayrıca oluşan bu fazın çok sert ve kırılman olduğunu ve çeliğin tokluğunu azalttığını belirtmişlerdir. O yıllarda sigma fazı "B bileşeni" olarak tanımlanmıştır. 1936 yılında ise, Jett ve Foote [37] tarafından resmi ismi " σ fazı" olarak seçilmiştir. 1951 yılında Yano ve Abiko [38] ilk kez σ fazının kristal yapısını incelemiştir. Bu ikili, σ fazının Fe-Cr ikili sisteminde Fe-Cr-Ni ve Fe-Cr-Mo üçlü sistemine göre çekirdeklenme kinetiğinin daha yavaş olduğuna dikkat çekmiştir. 1966 yılında,

Hattersley ile Hume-Rothery [39] ve Hall ve Algie [40] çalışmalarında östenitik paslanmaz çeliklerde oluşan sigma fazını incelemiştir. 1966 ve sonrasında ise, sigma fazı, Cr-Ni, Fe-Cr-Ni, Fe-Cr-Mo, Fe-Cr-Mn, Fe-Cr-Ni-Mo, Fe-Cr-Si, Fe-V, Re-Cr, Mo-Re, Ta-Al, W-Te, Ta-V, Zr-Ir, Nb-Pd, Ti-Mn ve Nb-Fe sistemleri gibi 50'nin üzerindeki alaşımda incelenen bir faz haline gelmiştir. Ancak bu fazın bugün hala oluşum mekanizması tam olarak çözelebilmemiş değildir [40].



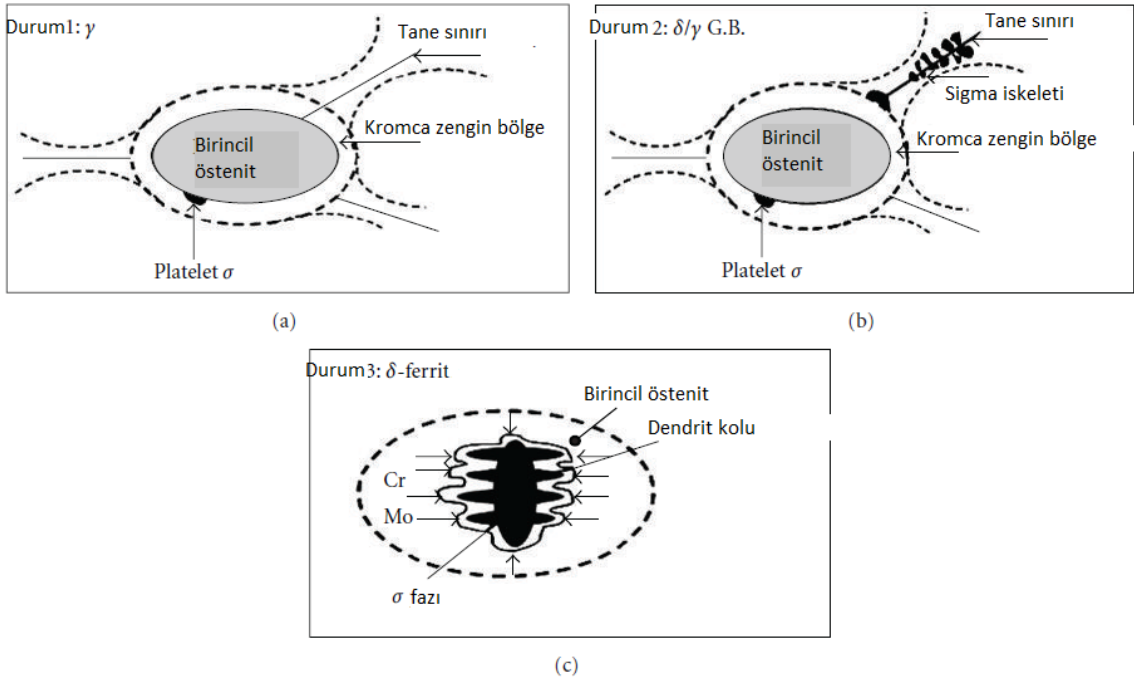
Şekil 3. 14 2205 dubleks paslanmaz çelikteki çökeltilere ait sıcaklık-zaman diyagramı [41]

Sigma fazı tetragonal kristal yapısına sahip, 600-1000°C aralığında çökelen bir fazdır [42-44]. Şekil 3. 14'te verilen grafikte 2205 dubleks paslanmaz çelikte oluşan diğer intermetaliklerle birlikte sigma fazının da çökmesinin sıcaklık ve zaman bağlı grafiği verilmiştir. Bu grafikte tutma zamanıyla birlikte sigma fazının oluşum aralığında genişlediği görülmektedir.

Sigma fazı, δ -ferritin ikincil östenite (γ_2) ötektoid dönüşüm ile parçalanması esnasında oluşmaktadır. Cr oranı %20'nin üzerinde olan çeliklerde sigma oluşumunu engellemek neredeyse imkansız olarak tanımlanmıştır [45]. Ayrıca önceki bölümlerde sözü edilen Cr, Si ve Mo gibi ferrit kararlaştırıcı elementler yapıda sigma oluşumunu tetikleemektedir. δ -ferrit östenite (γ) göre kromca zengin bir fazdır ve kübik hacim merkezli kristal yapısına sahiptir. Bu sayede Cr ve diğer alaşım elementlerinin yapıya

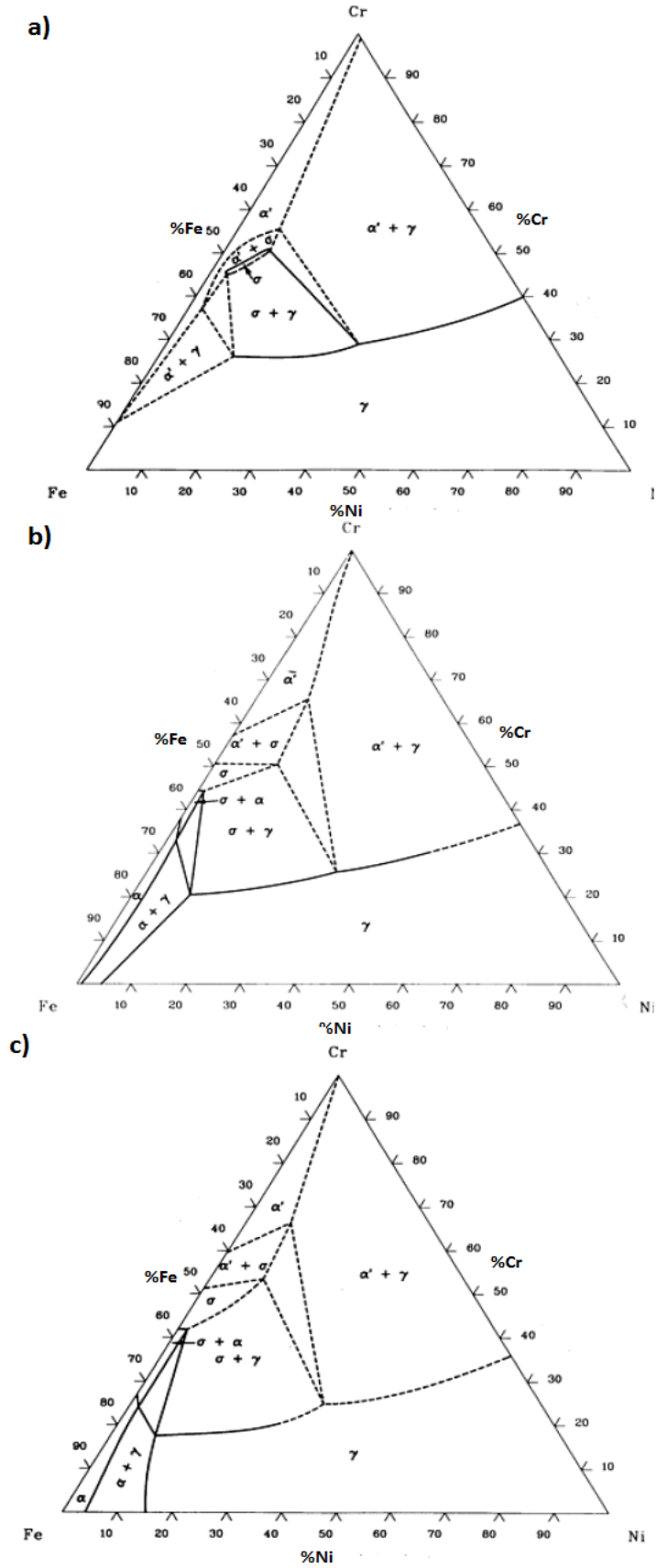
yayınımı östenit (γ) fazına göre daha kolay olmaktadır. Bu durum sigma fazının ferrit fazının içerisinde doğru büyümesini kolaylaştırmaktadır [46].

Sigma fazının çökmesi, yapı içerisinde yüksek enerjili bölgelerde gerçekleşmektedir. Şekil 3. 15'te sigma fazı çökmesinin şematik gösterimi verilmiştir. Birinci durum, teorik olarak sigma fazının östenit tane sınırında çekirdeklenip östenit içerisinde doğru da büyüebileceğini göstermektedir. Ancak Padilha ve Rios [47] bu çökmenin binlerce saat bekledikten sonra gerçekleşebileceğini belirtmişlerdir. Bunun nedeni, sigma fazı ve östenit fazı arasındaki kristalografik uyumsuzluk ve difüzyon mekanizmasının çok yavaş olmasıdır. İkinci durumda ise, yine yüksek enerji bölgesi olan δ/γ tane sınırında çekirdeklenen, üçüncü durumda ise δ/δ tane sınırında çekirdeklenen sigma fazı gösterilmektedir.



Şekil 3. 15 Sigma fazı çökmesinin şematik gösterimi [48]

Şekil 3.16'da Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin 900°C, 800°C ve 650°C'de çizilen izotermik bölümü verilmiştir. Bu üçlü faz diyagramlarından yola çıkarak sigma fazının oluşum aralığının sıcaklıkla değiştiği görülmektedir. 650°C'de daha dar bir aralıkta oluşan sigma fazı, sıcaklık arttıkça daha geniş bir bölgede oluşmaktadır.



Şekil 3. 16 Fe-Cr-Ni üçlü faz sisteminin a) 900°C'de, b) 800°C'de, c) 650°C'de izotermik bölümü [26]

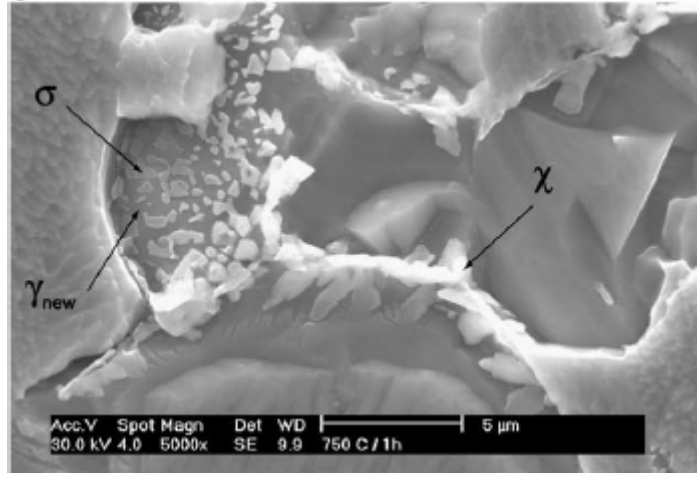
3.3.2.2 Chi Fazı

Chi fazı, dubleks paslanmaz çeliklerde en sık görülen üç intermetalik fazdan biridir. Bu intermetaliklerin oluşumu; matristeki Cr, Mo ve Nb gibi alaşım elementlerinin miktarını azaltarak tokluk kaybı ve korozyon dayanımının azalması gibi istenmeyen sonuçlara yol açmaktadır.

Chi fazı östenitik, ferritik ve dubleks paslanmaz çeliklerde görülen bir fazdır. Ayrıca sigma fazından farklı olarak sadece Fe-Cr-Ni-Mo ve Fe-Cr-Ni-Ti dörtlü sisteminde oluşmaktadır [49-52]. Chi fazı, ilk olarak Andrews [53] tarafından Cr-Ni-Mo içeren çeliklerde α -Mn türü kübik yapısıyla tanımlanmıştır. Ardından Kasper [50] chi fazının kristal yapısını detaylı olarak inceleyerek aynı fazı $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ bileşimi ile tanımlamıştır. Ayrıca chi fazı Hughes ve Llewelyn [51] tarafından Fe-Cr-Ni-Ti dörtlü sisteminde $Fe_{35}Ni_3Cr_{13}Ti_7$ şeklinde gözlemlenmiştir. Okafor ve Carlson kafes parametresindeki düzenli artış ile chi fazının $Fe_{36}Cr_{12}Mo_{10}$ bileşiminden $Fe_{36}Cr_{12}Mo_3Ti_7$ bileşimine kadar değişen çeşitli davranışlar sergilediğini göstermiştir. Genel olarak chi fazı elektron/atom numarası oranı 6,3 ile 7,8 arasında olan sistemde oluşmaktadır [49]. Sigma fazı ile çok benzer olmasına karşın, sigma fazının aksine bu fazın içerisinde C atomu çözünmemektedir. Bu özelliği nedeniyle χ -fazı geçmişte $M_{18}C$ tipi karbürü olarak tanımlanmıştır [54].

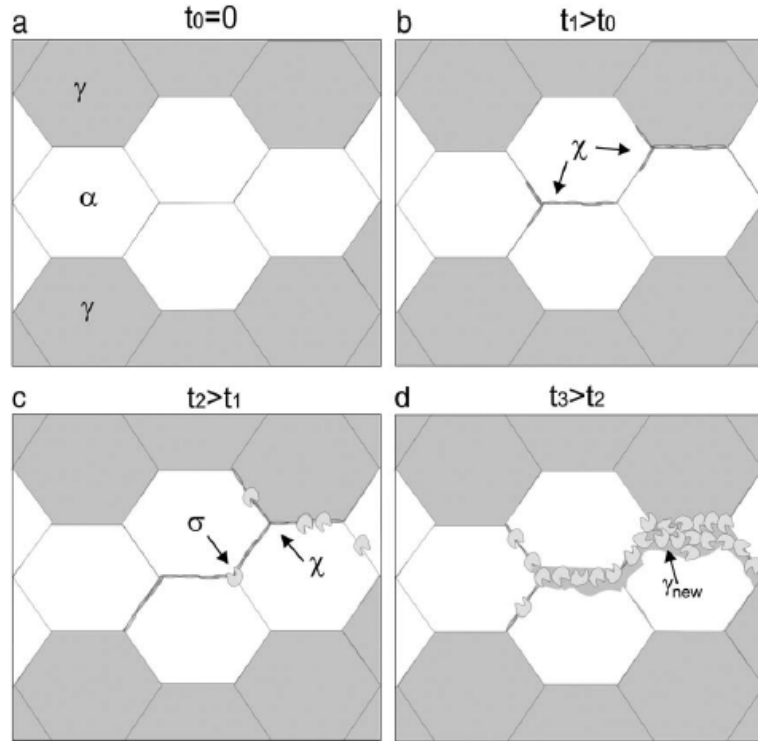
Dubleks paslanmaz çeliklerde χ -fazının σ -fazından daha düşük oranlarda oluşması nedeniyle bu konuda yapılan çalışmalar daha sınırlıdır. Ancak yine de malzemenin özellikleri açısından tehlikeli olduğu saptanmıştır [55].

χ -fazı σ -fazından SEM cihazında geri saçılan elektronlar sayesinde kolayca ayırt edilebilmektedir. χ -fazı σ -fazından Mo içeriği bakımından daha zengin olduğu için daha parlak olarak görüntülenmektedir [56-59]. Şekil 3. 17'de 750°C'de 1 saat yaşlandırılıp suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait SEM görüntüsü verilmiştir. χ -fazı ile σ -fazı arasındaki parlaklık farkı net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3. 17 750°C’de 1 saat yaşlandırılıp suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait SEM görüntüsü [49]

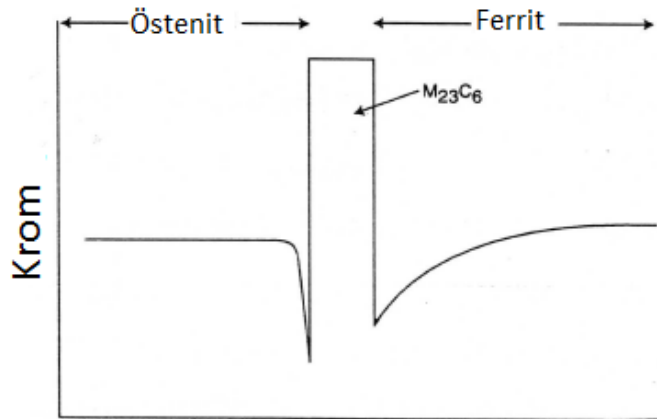
Şekil 3. 18’de dubleks paslanmaz çelikte χ -fazının çökmesinin şematik gösterimi verilmiştir. Bu grafikte χ -fazının σ -fazından daha düşük sıcaklıklarda çekirdeklendiği görülmektedir. Yapıda χ -fazının çekirdeklenmesi σ -fazından önce gerçekleşmektedir. Şekil 3. 18’de görüldüğü gibi, χ -fazı genellikle ferrit/ferrit arayüzeyinde çekirdeklenmektedir. Zamanla σ -fazı χ -fazını da tüketerek büyümektedir.



Şekil 3. 18 Dubleks paslanmaz çelikte χ -fazının çökmesinin şematik gösterimi [49]

3.3.2.3 Diğer İntermetalik Fazlar

Dubleks paslanmaz çeliklerde en sık görülen ikincil fazlardan üçüncüsü $M_{23}C_6$ karbürüdür. Bu karbür de sigma ve chi fazları gibi östenit-ferrit arayüzeyinde oluşup δ -ferrit içine doğru büyümektedir. Şekil 3. 19'da $M_{23}C_6$ içeren ferrit/östenit arayüzeyindeki krom derişimine ait grafik verilmiştir. Cr difüzyonu ferritte östenite göre 100 kat daha hızlı olduğu için karbürlerin δ -ferrit içine doğru büyümesi olağandır. Şekil 3. 19'da da görüldüğü gibi; ferrit tarafında geniş ve yüzeysel bir kromca fakirleşmiş bölge oluşurken; östenit tarafında dar ve derin bir kromca fakirleşmiş bölge oluşmaktadır. Östenit tarafında çok dar bir fakirleşmiş bölge oluştuğu için geri difüzyonla ortadan kaldırılabilir. Öte yandan ferrit-karbür arayüzeyindeki krom fakirleşmesi daha belirgin olduğundan, bu durum tanelerarası korozyona neden olmaktadır. Bu olumsuzluktan kaçınmak için, dubleks paslanmaz çeliğin mikroyapısındaki uzun ve sürekli östenit/östenit tane sınırlarından kaçınmak gerekmektedir [60, 61].



Şekil 3. 19 $M_{23}C_6$ içeren ferrit/östenit arayüzeyindeki krom derişimine ait grafik [60]

Dubleks paslanmaz çeliklerde oluşan diğer intermetalikler krom nitrür, birincil alfa, M_7C_6 karbürü ve R-fazı (Fe_2Mo)'dır. Yapıda krom nitrürün bulunması özellikle korozyon özelliklerini olumsuz etkilemekte ve çatlak korozyonu krom nitrürün çekirdeklendiği bölgelerden başlamaktadır. Bu ikincil fazlardan bazılarının oluşum sıcaklıkları yaklaşık olarak Şekil 3. 13'te verilmiştir. Şekil 3. 13'te verilen grafiğe ilave olarak R-fazı 600-700°C, M_7C_6 karbürü ise yaklaşık 1000°C civarında oluşmaktadır [62].

Dubleks paslanmaz çeliklerde görülen intermetaliklerin çekirdeklenmesi ve büyümesi için gerekli olan alaşım elementlerinin östenit içerisinde yavaş difüzyonu Mo ve Cr'ca

zengin bölgeler ile sonuçlanmaktadır. Bu nedenle yapının çukurcuk, tanelerarası ve çatlak korozyonuna karşı dayanımı azalmaktadır [63, 64].

DENEYSEL ÇALIŞMALAR**4.1 Malzemeye Uygulanan Isıl İşlemler**

Bu çalışmada; kimyasal bileşimi Çizelge 4. 1’de verilen 15x10x10mm boyutlarında SAF 2205 (1.4462) malzeme kullanılmıştır. Bu malzemedeki oluşan ikincil fazların oluşum mekanizmalarını saptamak, bu fazların malzemenin korozyon özelliklerine ve sertlik değerlerine etkisini incelemek ve literatürdeki eksikliği gidermek amacıyla farklı ısıl işlem parametreleri uygulanmıştır.

Çizelge 4. 1 SAF 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait kimyasal bileşim (wt.%)

C	Cr	Ni	Mo	Mn	Si	P	S	N	Fe
0.02	22.56	5.42	2.95	1.29	0.457	0.031	0.014	0.170	Kalan

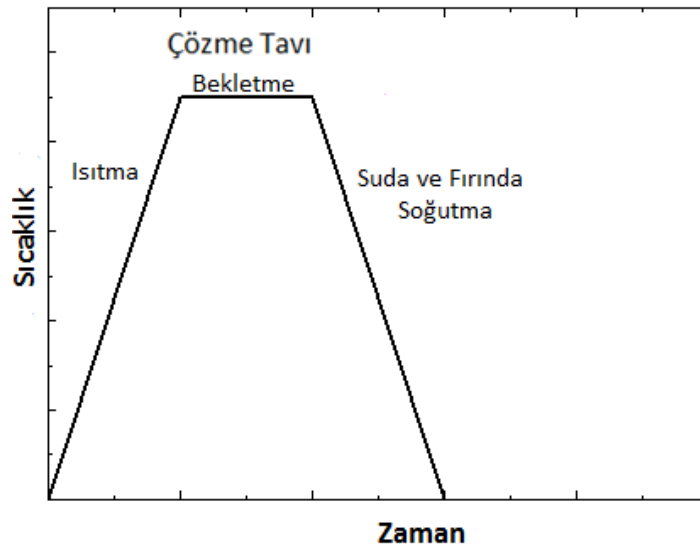
Uygulanan ısıl işlemler ve şartları Çizelge 4. 2 ve Çizelge 4. 3’te verilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ve bu veriler doğrultusundaki sonuçların malzemeye etkisi Bölüm 5’te incelenecektir. Isıl işlemler için kullanılan protherm marka fırına ait resim Şekil 4. 1’ de verilmiştir.



Şekil 4. 1 Malzemeye uygulana ısı işlemlerde kullanılan fırın

4.1.1 Çözme Tav Sıcaklığı ve Süresi

Bu çalışmada Çizelge 4. 2'de belirtildiği üzere çözme tav sıcaklığı 1000°C olarak seçilmiştir. SAF 2205 malzeme bu sıcaklıkta 1, 2, 4, 6, 8 ve 10 saat bekletildikten sonra suda ve havada soğutulmuştur. Gerçekleştirilen ısıtma-çözme-soğutma işleminin şematik gösterimi Şekil 4. 2'de verilmiştir.



Şekil 4. 2 Malzemeye uygulanan ısıtma-çözme-soğutma işleminin şematik gösterimi

Çizelge 4. 2 Uygulanan ısıtma-çözme-soğutma işleminin ısı işlem parametreleri

Çözme Sıcaklığı (°C)	Çözme süresi (saat)	Soğutma Ortamı
1000	1	Su ve Fırın
	2	
	4	
	6	
	8	
	10	

4.1.2 Yaşlandırma Tav Sıcaklığı ve Süresi

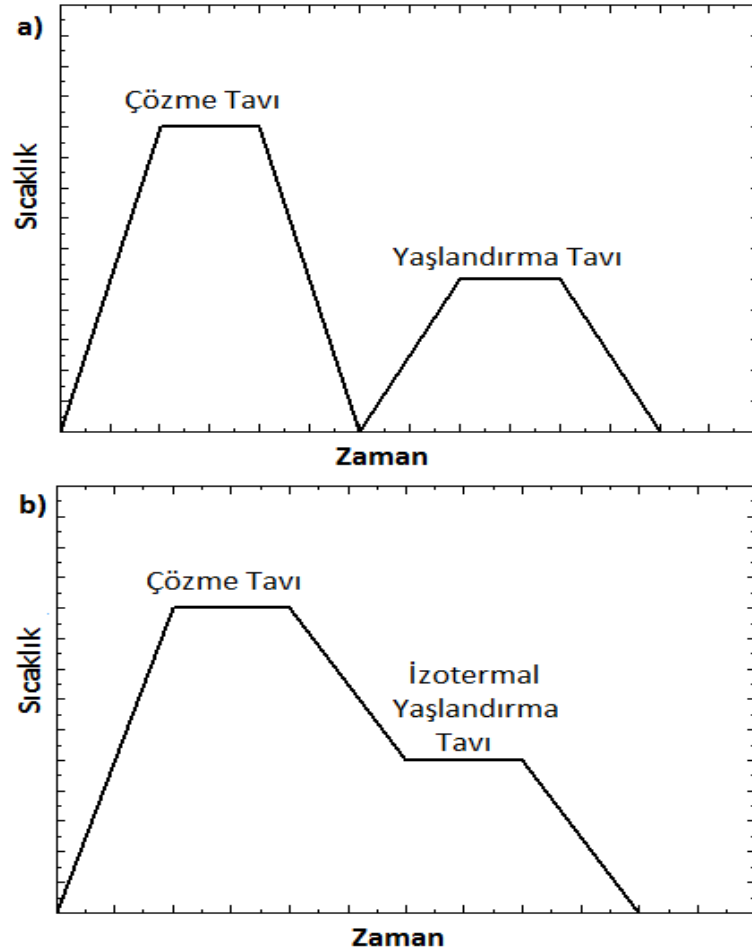
Çözme tavından elde edilen veriler doğrultusunda, 1000°C’de 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulanan numunelere yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanmıştır. Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma sıcaklığı 650°C, 800°C ve 950°C olarak seçilmiştir. Numuneler her bir sıcaklıkta 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika bekletilerek suda soğutulmuştur. Uygulanan ısı işlemler Çizelge 4. 3’te verilmiştir.

Çizelge 4. 3 Uygulanan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlem parametreleri

Çözme Tav Sıcaklığı (°C)	Çözme Tav Süresi (saat)	Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Süresi (dakika)	Soğutma Ortamı
1000	1 8 10	650 800 950	5	Su ve Fırın
			10	
			20	
			30	
			60	

Şekil 4. 3’de uygulanan ısı işlemlerin şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 4. 3’de görüldüğü gibi, yaşlandırma işleminde çözme tavi uygulandıktan sonra oda sıcaklığına

kadar soğutulan malzeme, tekrar yaşlandırma sıcaklığına ısıtılıp bu sıcaklıkta belli bir süre beklenerek soğutulmaktadır. İzotermal yaşlandırma işleminde ise, çözme tavi uygulanan malzeme izotermal yaşlandırma sıcaklığına kadar süreli soğutulduktan sonra bu sıcaklıkta belli bir süre bekletilip tekrar soğutulmaktadır.



Şekil 4. 3 Çözme tavi sonrası uygulanan a) yaşlandırma tav işleminin, b) izotermal yaşlandırma tav işleminin şematik gösterimi

4.1.3 Soğutma Ortamları

Çizelge 4. 2 ve Çizelge 4. 3'te görüldüğü gibi, hızlı soğutma için soğutma ortamı olarak su; yavaş soğutma için soğutma ortamı olarak fırın seçilmiştir.

4.2 Metalografi

15x10x10mm boyutlarında kesilen SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik uygulanan ısıl işlemlerin ardından numune hazırlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Numunelerin incelenecek yüzeyi dışındaki yüzeyler, yüzeydeki oksit tabakasını gidermek amacıyla, 60

mesh'lik zımpara ile zımparalanmış, ardından, metalografik olarak incelenecek yüzeye sırasıyla 180, 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 mesh'lik zımpara ile zımparalama işlemi uygulanmıştır. Kullanılan Metkon Gripo-1 marka zımparalama cihazının resmi Şekil 4. 4'te verilmiştir.



Şekil 4. 4 Numune hazırlama işleminde kullanılan zımparalama cihazı

Zımparalama işleminden sonra numunelerin yüzeyi 1µm elmas pasta çözeltisi ve alkol ile parlatma diskinde parlatılmıştır. Numunelerin yüzeyi önce su ardından alkol ile temizlenerek sıcak hava ile kurutulmuştur. Metkon Gripo-1 model parlatma cihazının resmi Şekil 4. 5'te verilmiştir.



Şekil 4. 5 Numune hazırlama işleminde kullanılan parlatma cihazı

Parlatma işleminin ardından numunelere elektrolitik dağlama işleminde uygulanmıştır. Dağlama işleminde Geratech MCH-305B marka cihaz kullanılmıştır. Elektrolitik dağlama düzeneği Şekil 4. 6'da verilmiştir. 1/3 oranında KOH/Saf su karıştırılarak dağlama işleminde kullanılacak çözelti elde edilmiştir. Akım değeri 0,2 V'ye ayarlanmıştır. Düzeneğin anoduna titanyum çubuk, katoduna SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numuneler bağlanmıştır. Elektrolitik dağlama işleminde iki farklı sürede uygulanmıştır. Birinci işleminde, bu çözeltide 5 saniye tutulan numuneler sadece ikincil fazların ortaya çıkarılması amacıyla tekrar parlatılmıştır. Ardından bu numuneler aynı çözeltide 1 saniye dağlanmıştır. Yüzeyleri önce su, sonra alkolle temizlenen numuneler sıcak hava ile kurutulmuştur.



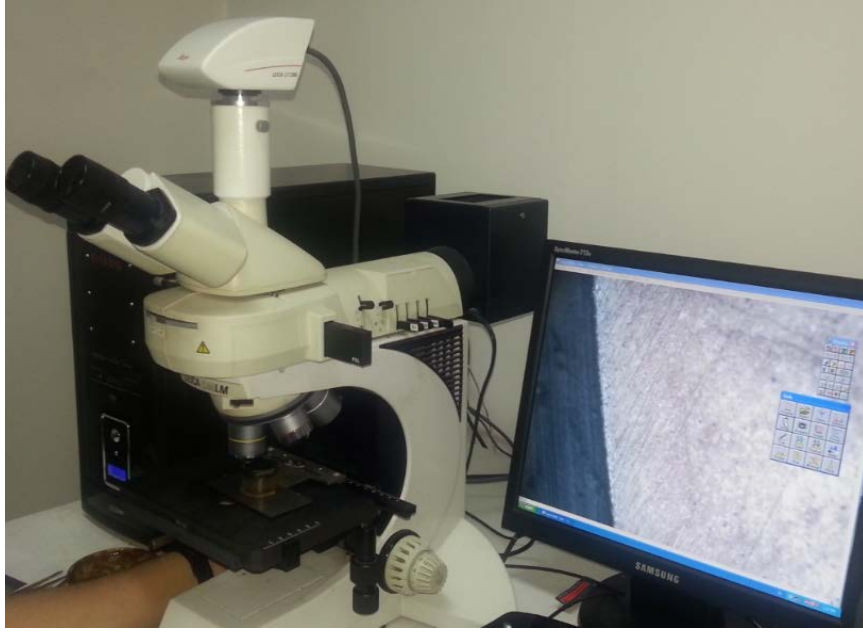
Şekil 4. 6 Numune hazırlama işleminde kullanılan dağlama düzeneği

4.3 Mikroyapısal Karakterizasyon

Mikroyapısal karakterizasyon optik mikroskopisi ve tarama elektron mikroskopisinde yapılan işlemleri kapsamaktadır.

4.3.1 Optik Mikroskopisi (OM)

Şekil 4. 7'de verilen Leica ICM 1000 model optik mikroskopundan 100, 200 ve 500 büyütmelerde görüntüleme gerçekleştirilmiştir. Bu görüntülerden birincil ve ikincil faz tespitleri yapılmıştır. Birinci dağlama işleminden elde edilen numunelerde 200 büyütmede yapıdaki ikincil faz oranları ölçülmüştür. İkinci dağlama işleminden elde edilen numunelerde ise, yine 200 büyütmede, yapıdaki birincil faz oranları ölçülmüştür. Ardından 500 büyümede alınan görüntüler ile çökelen ikincil fazların boyutları ölçülmüştür.



Şekil 4. 7 Mikroyapı görüntüleme ve faz analizlerinde kullanılan optik mikroskop

4.3.2 Tarama Elektron Mikroskobisi (SEM)

Şekil 4. 8’de verilen JEOL JSM 5410 LV model tarama elektron mikroskobu ile SAF 2205 malzemenin mikroyapısındaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri yapılmıştır. EDS analizi yapılan numunler Çizelge 4. 4 ve Çizelge 4. 5’te verilmiştir.



Şekil 4. 8 EDS analizlerinde kullanılan tarama elektron mikroskobu

Çizelge 4. 4 EDS analizi yapılan çözme tavi numuneleri

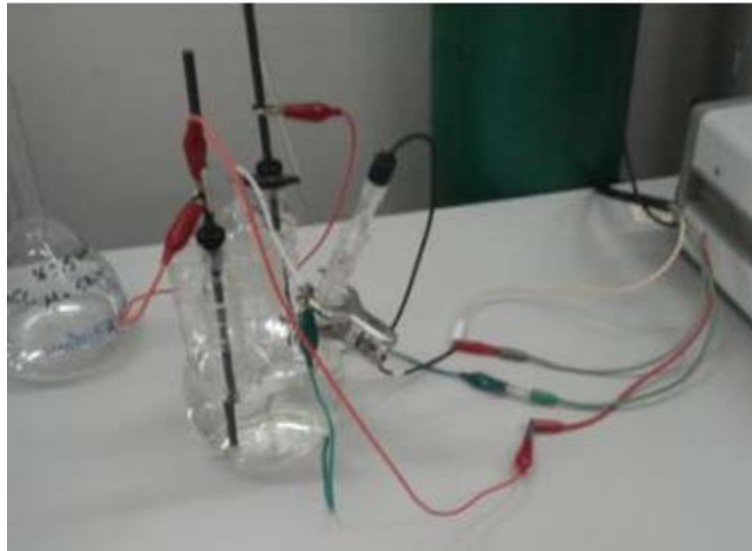
EDS analizi yapılan çözme tavi numuneleri		
Çözme Tavi Sıcaklığı (°C)	Çözme Tavi Süresi (saat)	Soğutma Ortamı
1000	1 8 10	Su ve Fırın

Çizelge 4. 5 EDS analizi yapılan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavi numuneleri

EDS analizi yapılan numuneler	
1000°C-1 Saat	
Yaşlandırma Tavi Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tavi Sıcaklığı (°C)
800	650
5 dakika	5 dakika
60 dakika	60 dakika
1000°C-8 Saat	
Yaşlandırma Tavi Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tavi Sıcaklığı (°C)
800	800
5 dakika	5 dakika
60 dakika	60 dakika
1000°C-10 Saat	
Yaşlandırma Tavi Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tavi Sıcaklığı (°C)
800	800
10 dakika	5 dakika
60 dakika	60 dakika

4.4 Korozyon Testi

Malzemeye uygulanan çözüme tavlama, yaşlandırma tavlama ve izotermal yaşlandırma tavlama yöntemlerinden elde edilen veriler doğrultusunda seçilen numunelere korozyon testi uygulanmıştır. Bu testte kullanılan numuneler Çizelge 4. 6 ve Çizelge 4. 7’te verilmiştir. Çözüme tavlama numunelerinden 1000°C’de 1, 8 ve 10 saat tavlama yapılan su ve fırın ortamlarında soğutulan numunelere korozyon testi uygulanmıştır. Yaşlandırma tavlama numunelerinde; 800°C sıcaklık için ikincil faz oranı en düşük ve en yüksek olan iki numuneye korozyon testi uygulanmıştır. İzotermal yaşlandırma tavlama numunelerinde ise; 650°C sıcaklık için ikincil faz oranı en düşük ve en yüksek olan iki numuneye korozyon testi uygulanmıştır. Korozyon testinin düzeneği Şekil 4. 9’da verilmiştir. Korozyon testlerinde üç elektrotlu bir sistem kullanılmıştır. Bu sistemde, 2 adet grafit elektrot, kalomel elektrot olan referans elektrot ve çalışan elektrot olarak korozyon testinin uygulanacağı dubleks paslanmaz çelik numuneler kullanılmıştır. %3,5’lik NaCl çözeltisinin bulunduğu beherede uygun şekilde yerleştirilen elektrotlardan çalışan elektrot olan numunenin Gamry Echem analiz programı ile ilk olarak OCP değerlerine bakılmıştır. Sistemde elektrik akımının geçtiği numunelere ise “Linear Sweep Voltammetry” deneyi ile korozyon testi uygulanmıştır. Deney süresince -0,7-0,7 V akım değeri uygulanmıştır. Her bir numune için tarama hızı 10 mV/s, elektrot alanı 1 cm² ve maksimum akım 0,3 mA olarak seçilmiştir.



Şekil 4. 9 Korozyon testlerinde kullanılan üç elektrotlu düzenek

Çizelge 4. 6 Korozyon testinin uygulandığı çözme tavaı numuneleri

Korozyon testi uygulanan numuneler		
Çözme Tav Sıcaklığı (°C)	Çözme Tav Süresi (saat)	Soğutma Ortamı
1000	1 8 10	Su ve Fırın

Çizelge 4. 7 Korozyon testinin uygulandığı yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavaı numuneleri

Korozyon testi uygulanan numuneler	
1000°C-1 Saat	
Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)
800	650
5 dakika	5 dakika
60 dakika	60 dakika
1000°C-8 Saat	
Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)
800	800
5 dakika	5 dakika
60 dakika	60 dakika
1000°C-10 Saat	
Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)
800	800
10 dakika	5 dakika
60 dakika	60 dakika

4.5 Sertlik Ölçümü

Malzemeye uygulanan çözüme tavlama, yaşlandırma tavlama ve izotermal yaşlandırma tavlama yöntemlerinden elde edilen veriler doğrultusunda seçilen numunelere resmi Şekil 4. 10'da verilen HVS 10000 model Vickers sertlik cihazı ile sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlik ölçümünde kullanılan numuneler Çizelge 4. 8 ve Çizelge 4. 9'da verilmiştir. Numuneler 3 N yük altında 10 saniye tutularak Vickers sertlik değeri ölçülmüştür.



Şekil 4. 10 Numunelerin sertlik ölçümünde kullanılan Vickers sertlik cihazı

Çizelge 4. 8 Vickers sertlik ölçümü yapılan çözme tav işlemi numuneleri

Sertliği Ölçülen Numuneler		
Çözme Tav Sıcaklığı (°C)	Çözme Tav Süresi (saat)	Soğutma Ortamı
1000	1	Su ve Fırın
	2	
	4	
	6	
	8	
	10	

Çizelge 4. 9 Vickers sertlik ölçümü yapılan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav işlemi numuneleri

Çözme Tav Sıcaklığı	Çözme Tav Süresi	Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Sıcaklığı	Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Süresi	Soğutma Ortamı
(°C)	(saat)	(°C)	(dakika)	
1000	1	650	5	Su ve Fırın
	8	800	10	
	10	950	20	
			30	
			60	

DENEYSEL SONUÇLAR

5.1 Isıl İşlem Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu çalışmada; kimyasal bileşimi Çizelge 4. 1’de verilen SAF 2205 (1.4462) dubleks paslanmaz çelik malzeme kullanılmıştır. Bu malzemede oluşan ikincil fazların hangi şartlarda, ne şekilde oluştuğunu saptamak amacıyla farklı ısıl işlem parametreleri uygulanmıştır. İlk olarak; 1000°C’de çözme tav süresi ve soğutma ortamlarının birincil ve ikincil faz oluşumuna etkisini incelemek amacıyla Çizelge 4. 2’de verilen ısıl işlemler yapılmıştır. Bu çalışmalardan elde edilen veriler doğrultusunda, 3 farklı çözme tav süresi seçilerek malzemeye izotermal yaşlandırma ve yaşlandırma tavlı uygulanmıştır. Bu işlemlerin parametreleri Çizelge 4. 3’te verilmiştir. Dubleks paslanmaz çeliklerin kullanımını sınırlayan en önemli faktörlerden olan ikincil fazlar yani σ ve χ gibi intermetalikler, karbür ve nitrürlerin 500°C’nin üzerinde oluştuğu tahmin edilmektedir. [56, 65] Literatürdeki eksikliği gidermek amacıyla yaşlandırma sıcaklığı olarak; 650°C, 800°C ve 950°C seçilmiştir. Yapılan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavlalarının ardından, yapıdaki ferrit değişimi, ikincil fazların oran ve boyut değişimi ve bu değişimlerin malzemenin korozyon ve sertlik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

5.2 Mikroyapısal Görüntüleme ve Faz Oranlarının Belirlenmesi

Bu çalışma kapsamında, 2205 dubleks paslanmaz çelikte ötektoid reaksiyon sonucunda oluşan σ fazı gibi ikincil fazların oluşum mekanizmasını ve birincil faz oranlarının ne şekilde değiştiğini saptamak amacıyla çeşitli ısıl işlemler yapılmıştır. Bu ısıl işlemlerin ferrit oranına, ikincil faz oranına ve ikincil fazların ortalama tane boyutuna etkisi; çözme tavlı ve yaşlandırma tavlı işlemleri için ayrı başlıklarda incelenmiştir.

5.2.1 Çözme Tav Süresinin ve Soğutma Ortamlarının Faz Oranlarına ve Mikroyapıya Etkisi

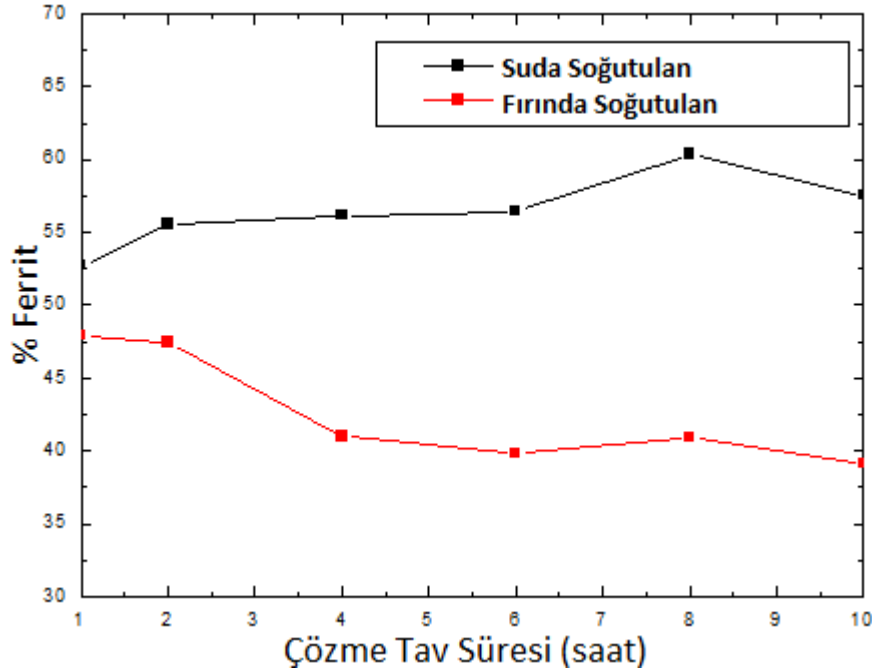
Çözme tav sıcaklığı ve süresi dubleks paslanmaz çeliklerde meydana gelen metalurjik dönüşümleri etkileyen önemli faktörlerdendir [66]. Bu çalışma kapsamında çözme tav süresi 1000°C olarak seçilmiştir. 1000°C'de uygulanan çözme tav süreleri Çizelge 4. 2'de verilmiştir. Sözü edilen dönüşümü etkileyen bir diğer faktör ise, soğutma hızıdır. Bu çalışmada fırın ve su gibi farklı soğutma ortamları kullanılarak soğutma hızının etkisi de incelenmiştir.

Çizelge 5. 1 Çözme tav süresi ve soğuma ortamına bağlı birincil ve ikincil fazların hacim miktarları (%)

1000°C'DE ÇÖZME TAVI SÜRESİ (saat)	SUDA SOĞUTULAN MALZEMELERDE			FIRINDA SOĞUTULAN MALZEMELERDE		
	Ferrit Fazı (%)	Östenit Fazı (%)	Sigma Fazı (%)	Ferrit Fazı (%)	Östenit Fazı (%)	Sigma Fazı (%)
1	52,72	47,38	0	47,93	50,41	1,66
2	55,6	44,4	0	47,48	50,53	1,99
4	56,16	44,86	0	41	56,69	2,31
6	56,42	43,48	0	39,79	57,8	2,41
8	60,36	39,64	0	40,92	56,37	2,71
10	57,54	42,56	0	39,12	58,61	2,27

1000°C'de 1, 2, 4, 6, 8 ve 10 saat yapılan tavlama neticesinde suda ve fırında soğutulan numunelere ait birincil ve ikincil fazların hacim yüzdeleri Çizelge 5. 1' de verilmiştir. Çizelge 5. 1'de çözme tav süresi ve soğuma ortamının yapıdaki birincil ve ikincil fazların miktarına etkisi görülmektedir. 1000°C'ye ısıtılan malzemede ısıtıldığı süre boyunca ötektoid tepkime ile östenit fazı (γ) ferrit fazına (δ) dönüşmektedir. Şekil 5. 1'de SAF 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait %Ferrit-Çözme Tav Süresi grafiği verilmiştir. Çözme tavi dönüşüm hattı ile kesiştiği için yapıdaki ferrit miktarı zamanla artmıştır. Malzemeyi ısıtma esnasında yapıda σ , χ ya da diğer intermetaliklerin oluşması söz konusudur. Ancak 1000°C'ye çıkıldığında bu intermetalikler yapı içerisinde

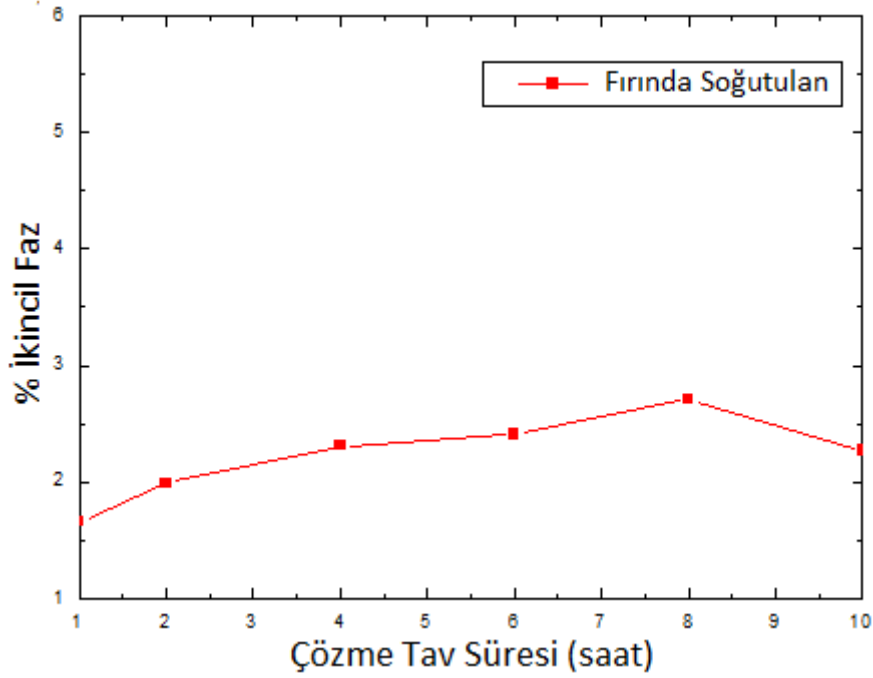
çözünmekte ve yapısını koruyamamaktadır. Suda soğutulan malzemelerde bu nedenle ikincil faz oluşumu gözlemlenmemektedir. Ayrıca Calliari ve ekibi de [56] yaptıkları çalışmada hızlı soğutmanın intermetalik oluşumunu engellediğini vurgulamıştır.



Şekil 5.1 SAF 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait %ferrit- çözme tav süresi grafiği

Fırında soğutulan malzemelerde ise, soğutma esnasında ötektoid tepkime ters yönde meydana geleceği için, ferrit (δ) parçalanarak ikincil östenit (γ_2) ve sigma fazı (σ) gibi intermetalik fazları oluşturmaktadır. Çözme tav süresinin artması ile daha fazla sayıda ferrit parçalandığı için, ferritin miktarı zamanla azalmakta, östenit ($\gamma+\gamma_2$) ve sigma (σ) fazının miktarı ise zamanla artmaktadır. Şekil 5. 1' de verilen grafikte de tespit edilen bu durum görülmektedir.

Şekil 5. 1'de verilen grafikte, yapıdaki ferrit miktarının 8. saatte bir miktar arttığı daha sonra ise azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni; termomekanik işlem görmüş malzemenin yeniden kristalleşmesidir. Reick ve ekibinin çalışmasında [67] östenitin ferritten daha fazla pekleştiği ve yeniden kristalleşebilmek için daha yüksek itici güç verilmesi gerektiği ortaya konulmuştur. Yani ferrit fazının östenit fazından daha az enerji verilerek yeniden kristalleşmesi mümkündür. Bu nedenle uygun koşullar yakalandığında ilk olarak yeniden kristalleşecek olan faz ferrit fazıdır. Yapıda yeni ferrit tanelerinin çekirdeklenmesi ve toparlanma safhasına geçmesi 8. saatte ferrit miktarının zamanla artmasına neden olmuştur.



Şekil 5. 2 SAF 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait % ikincil faz-çözme tav süresi grafiği

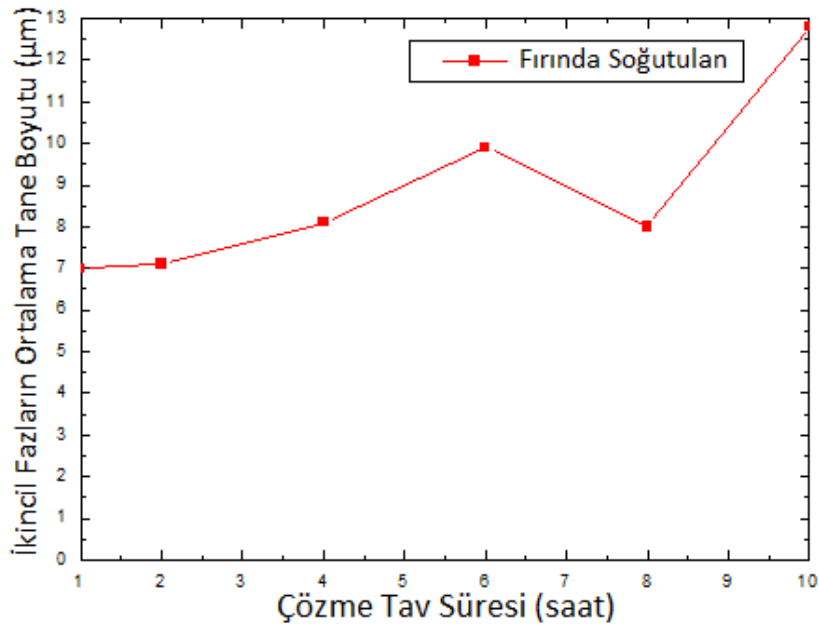
Fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait % ikincil faz- İzotermal Tavlama Süresi grafiği Şekil 5. 2' de verilmiştir. Malzemedeki fırında soğutulduğu süre boyunca ötektoid dönüşümün devam etmesi nedeniyle, yapıdaki sigma fazı miktarı zamanla artmaktadır.

Yeniden kristalleşme mekanizması sigma fazının çekirdeklenmesini de etkilemektedir. Bilindiği üzere, genel olarak ikincil fazlar tane sınırları, ara yüzeyler, dislokasyonlar gibi yüksek enerjili bölgelerde; özel olarak σ fazı ise δ/γ ara yüzeyinde ya da δ/δ tane sınırında çekirdeklenerek difüzyon kontrollü bir mekanizma ile δ içine doğru tercihli olarak gelişen bir fazdır. Bu bağlamda, küçük taneli yapılarda, tane sınırı ve ara yüzey gibi yüksek enerjili bölgeler daha fazla olduğundan σ fazının çekirdeklenmesi daha kolay olmaktadır. Dolayısıyla yeniden kristalleşmiş yapıda daha fazla sayıda σ çekirdeklenmesi beklenmektedir [66]. Şekil 5. 4'te 1000°C'de 1 saat, Şekil 5. 5'te 1000°C'de 8 saat ve Şekil 5. 6'da 1000°C'de 10 saat tavllanmış malzemeye ait optik mikroskop görüntüleri karşılaştırıldığında ferrit tane boyutunun 8 ve 10. saatlerde 1. saate göre daha küçük olduğu görülmektedir. Bu da ferrit tanelerinin yeniden kristalleştiğini göstermektedir. Bu tespit ölçüm sonuçlarına da yansımıştır. Nitekim 8 saatlik ısıtma işlemi, yapının yeniden kristalleşmesiyle, ferrit taneleri küçülmüş, σ fazının çekirdeklenme potansiyeli yüksek olan tane sınırı sayısı artmış ve çekirdeklenen σ

miktarında belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Shinohara ve arkadaşları yaptıkları çalışmada[68]; yeniden kristalleşen ve henüz yeniden kristalleşmemiş tanelerin tane sınırlarının ikincil fazların çekirdeklenecekleri tercihli bölgeler olduğu belirtilmiştir. 8 saatten itibaren yeniden kristalleşmeye başlayan taneler, sürenin artmasıyla Şekil 5. 6’da görüldüğü gibi kabalaşma aşamasına geçmiştir. Bu nedenle, 10 saatlik ısıl işlemden ferrit taneleri 8 saatlik ısıl işleme kıyasla bir miktar büyüdüğünden çekirdeklenen σ fazı bir miktar azalmıştır.

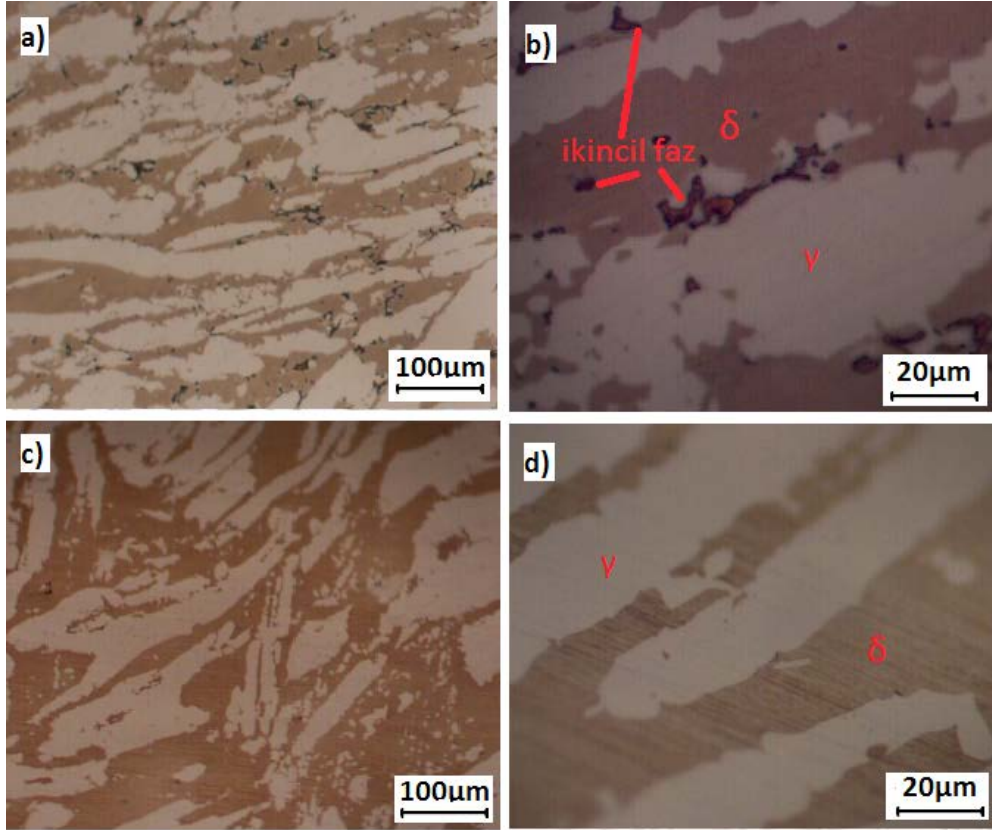
Çizelge 5. 2 SAF 2205 DSS’de çözme tav süresi ve soğuma ortamına bağlı ikincil fazların ortama tane boyutları (μm)

Çözme Tav Sıcaklığı (°C)	Soğuma Ortamı	Çözme Tav Süresi (saat)	İkincil Fazların Ortalama Tane Boyutu (μm)
1000	Fırın	1	7
		2	7,1
		4	8,1
		6	9,9
		8	8
		10	12,8



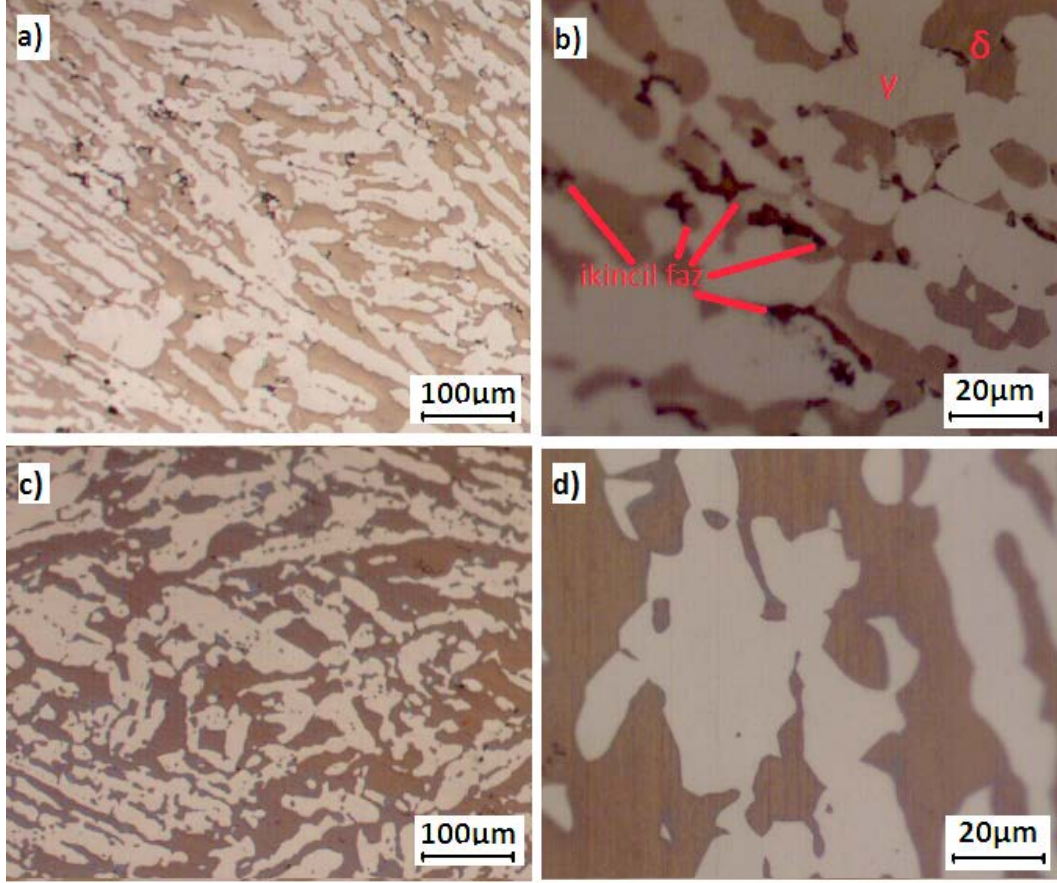
Şekil 5. 3 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait ikincil fazların ortalama tane boyutu-çözme tav süresi grafiği

Çizelge 5. 2’de fırında soğutulan SAF 2205 DSS malzemelerde, ikincil fazların ortalama tane boyutlarının çözme tav süresine bağlı değerleri verilmiştir. Bu değerlere ait grafik Şekil 5.3’te görülmektedir. Genel olarak, çözme tav süresi arttıkça, yapıdaki σ miktarı ve σ fazının ortalama tane boyutu zamanla artmaktadır. Ancak 8. saatte yeniden kristalleşme mekanizmasının devreye girmesiyle, yapıda çekirdeklenen σ miktarı artmış, buna karşılık σ fazının ortalama tane boyutu azalmıştır. Bu durum yeniden kristalleşme mekanizmasının σ fazının büyüme hızını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir.



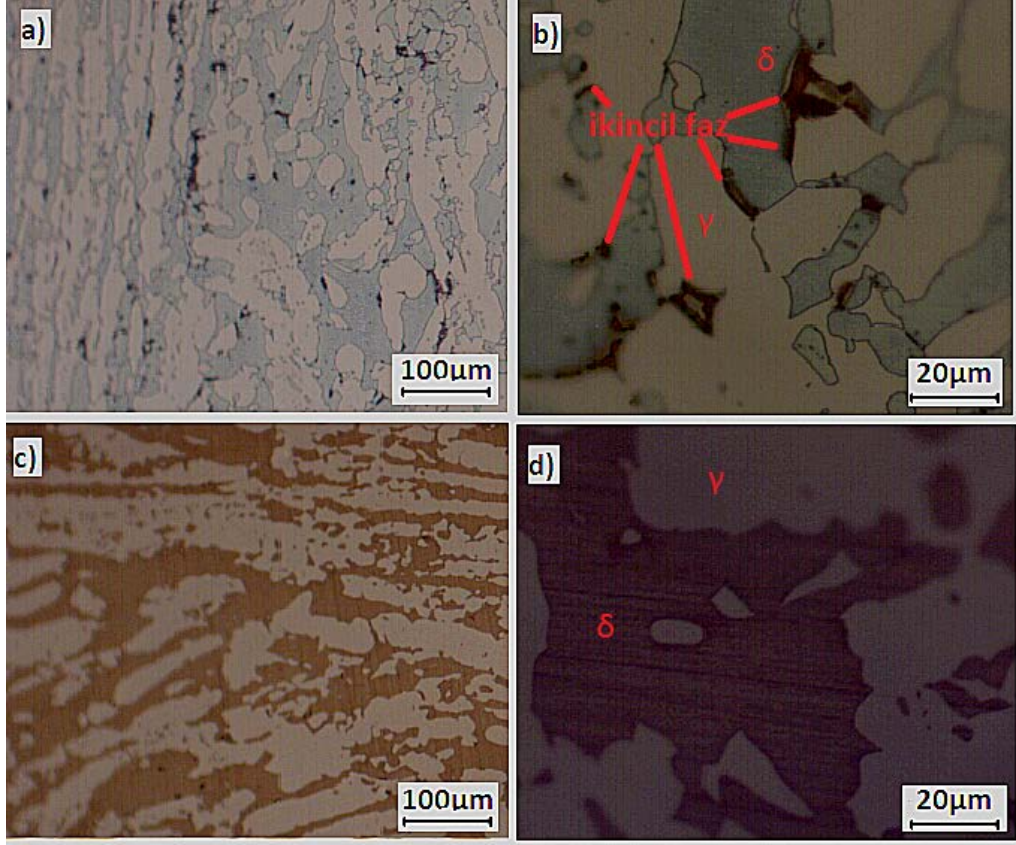
Şekil 5. 4 1000°C’de 1 saat tavlanan a) fırında (x100), b) fırında (x500), c) suda (x100), d) suda (x500) soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüleri

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, σ fazı uygun sıcaklık, süre ve soğuma hızlarında, δ/γ ara yüzeyinde çekirdeklenip ferrit içine doğru büyüyen bir fazdır [13]. Şekil 5. 4c, Şekil 5. 5c, Şekil 5. 6c’de görüldüğü gibi suda soğutulan malzemelerde herhangi bir ikincil faz çökmesi gözlemlenmemiştir. Bunun nedeni, ötektoid dönüşüm hattının hızlı geçilmesidir.



Şekil 5. 5 1000°C’de 8 saat tavlanan a) fırında (x100), b) fırında (x500), c) suda (x100), d) suda (x500) soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüleri

Fırında soğutulan malzemelerde ötektoid dönüşüm hattı yavaş geçildiği için, bu malzemelerde, Şekil 5. 4b, Şekil 5. 5b, Şekil 5. 6b’de de net şekilde görüldüğü gibi, σ fazı çökmesi gözlemlenmiştir. σ fazının, δ/γ arayüzeyinde çekirdeklenip ferrit içine doğru büyüdüğü optik mikroskop görüntülerinde görülmektedir. Yeterli sürenin geçmesi halinde bu ikincil fazın zamanla bütün ferrit fazını kaplayacağı öngörülmektedir. σ fazının hangi sebeplerden dolayı ferrit içine doğru büyüdüğü ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.



Şekil 5. 6 1000°C’de 10 saat tavlanan a) fırında (x100), b) fırında (x500), c) suda (x100), d) suda (x500) soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait optik mikroskop görüntüleri

Ayrıca, çözme tav süresinin yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav işlemlerinde çökelen σ miktarını ne şekilde etkilediği bir sonraki bölümde incelenecektir.

5.2.2 Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı ve Tav Süresinin Faz Oranlarına ve Mikroyapıya Etkisi

Çözme tavinin ferrit oranına ve ikincil faz çökmesine etkisinin incelenmesinin ardından üç farklı çözme tav süresi seçilerek yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlemleri uygulanmıştır. Bu çalışmada yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma işlemi için 650°C, 800°C ve 950°C olmak üzere üç farklı sıcaklık seçilmiştir. Bu sıcaklıkların seçilmesinde σ ve χ fazlarının oluşum sıcaklık aralığı göz önünde bulundurulmuştur. Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma süresi ise; ikincil fazların ne şekilde çekirdeklenip büyüdüğünü saptamak amacıyla 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika olarak seçilmiştir.

5.2.2.1 Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Isıl İşlemi Parametrelerine Bağlı Yapıdaki Ferrit Oranı

Yapıdaki ferrit miktarını etkileyen çeşitli faktörler vardır. Bu faktörler genel olarak;

- Çözme tav sıcaklığı
- Çözme tav süresi
- Soğutma ortamı
- Yeniden kristalleşme durumu
- İzotermal yaşlandırma ve yaşlandırma tav sıcaklığı
- İzotermal yaşlandırma ve yaşlandırma tav süresi
- Çökelen ikincil fazların miktarı

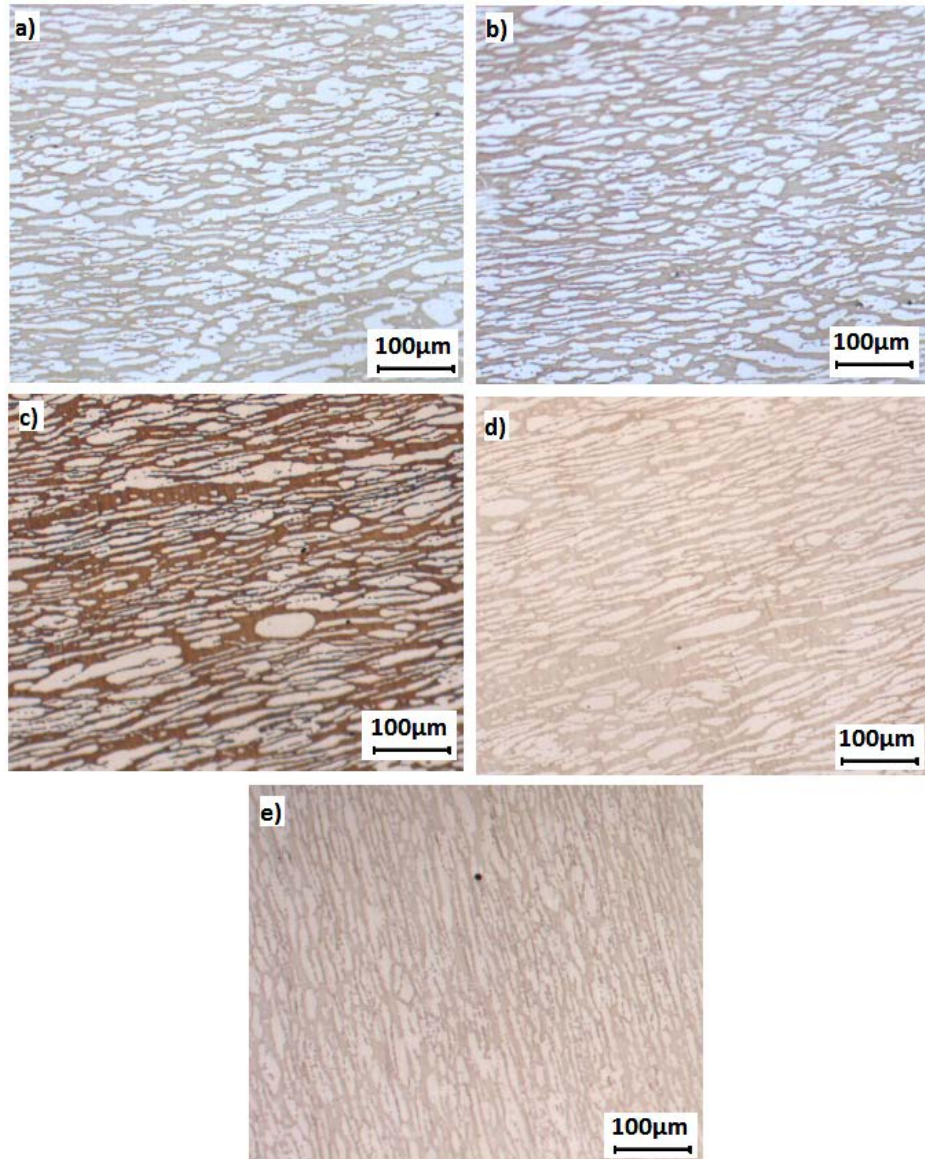
olarak sıralanabilir.

Çözme tav sıcaklığı, çözme tav süresi, soğutma ortamı ve yeniden kristalleşme durumunun etkileri Bölüm 5.2.1’de incelenmiştir. Bu bölümde, izotermal yaşlandırma ve yaşlandırma tav sıcaklığı ve tav süresinin ferrit oranına etkisi yorumlanacaktır. Çizelge 5. 3’te yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlemi parametrelerine bağlı yapıdaki ferrit miktarı verilmiştir.

Çizelge 5. 3 Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlemleri parametrelerine bağlı yapıdaki ferrit miktarı (%)

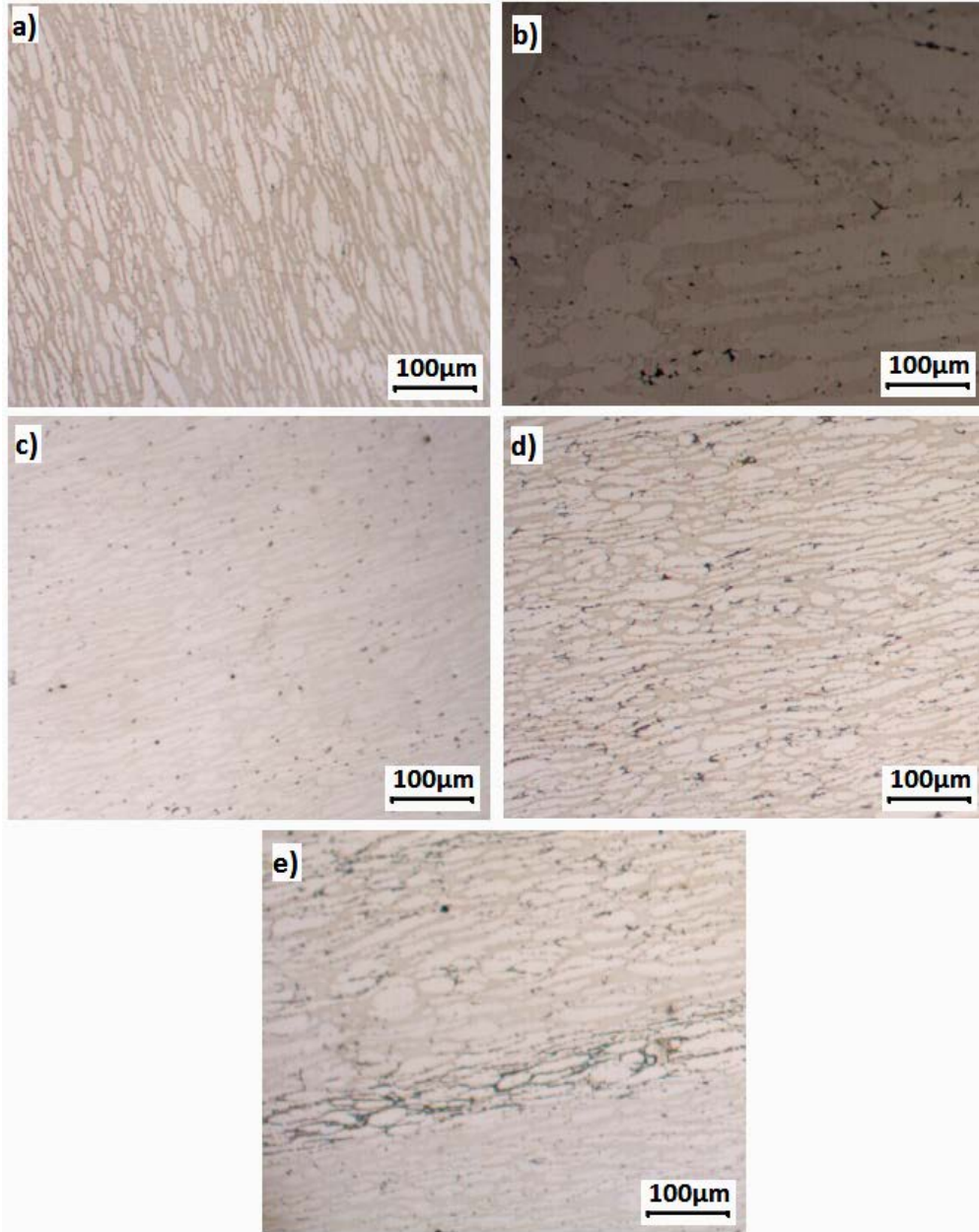
		Yapıdaki Ferrit Miktarı (%)					
Yaşlandırma Tav Süresi (dakika)	1000°C-1 Saat						
	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			
	650	800	950	650	800	950	
5	46,32	47,14	48,21	46,43	47,11	48	
10	47,19	47,88	48,40	44,65	45,46	46,62	
20	48,16	48,28	49,26	42,10	42,03	46,03	
30	48,51	48,92	49,83	40,81	41,09	44,09	
60	49,66	49,74	50,31	39,11	40,87	42,82	
Yaşlandırma Tav Süresi (dakika)		1000°C-8 Saat					
	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			
	650	800	950	650	800	950	
5	51,13	53,11	55,37	51,04	53,54	54,88	
10	51,29	53,82	55,68	49,04	49,75	52,10	
20	52,27	54,74	56,04	48,31	49,10	51,73	
30	54,99	55,18	56,71	47,95	48,17	48,78	
60	55,69	56,96	57,67	44,74	46,15	47,21	
Yaşlandırma Tav Süresi (dakika)		1000°C-10 Saat					
	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			
	650	800	950	650	800	950	
5	53,04	54,80	59,83	52,80	54,10	55,05	
10	53,32	54,68	56,55	49,72	49,96	54,74	
20	54,47	55,04	57,39	48,99	49,58	51,81	
30	55,59	55,76	57,84	48,12	49,51	49,81	
60	55,95	57,22	58,65	47,79	48,82	49,17	

Şekil 5. 7 1000°C’de 1 saat çözme tavi uygulandıktan sonra suda soğutulan ve ardından 650°C’de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 1000°C’de 1 saat çözme tavi uygulanan malzemede bu sırada ötektoid dönüşüm gerçekleşerek, γ fazı δ -ferrit fazına dönüşmektedir. Oda sıcaklığından 650°C’ye çıkıldığında da ötektoid reaksiyon aynı yönde meydana gelmektedir. Bu nedenle, yapıdaki ferrit miktarı zamanla artmış ve %46,32’den %49,66’ya yükselmiştir. Mikroyapılarda, koyu renkler δ -ferrit fazını açık renkler ise östenit (γ) fazını temsil etmektedir.



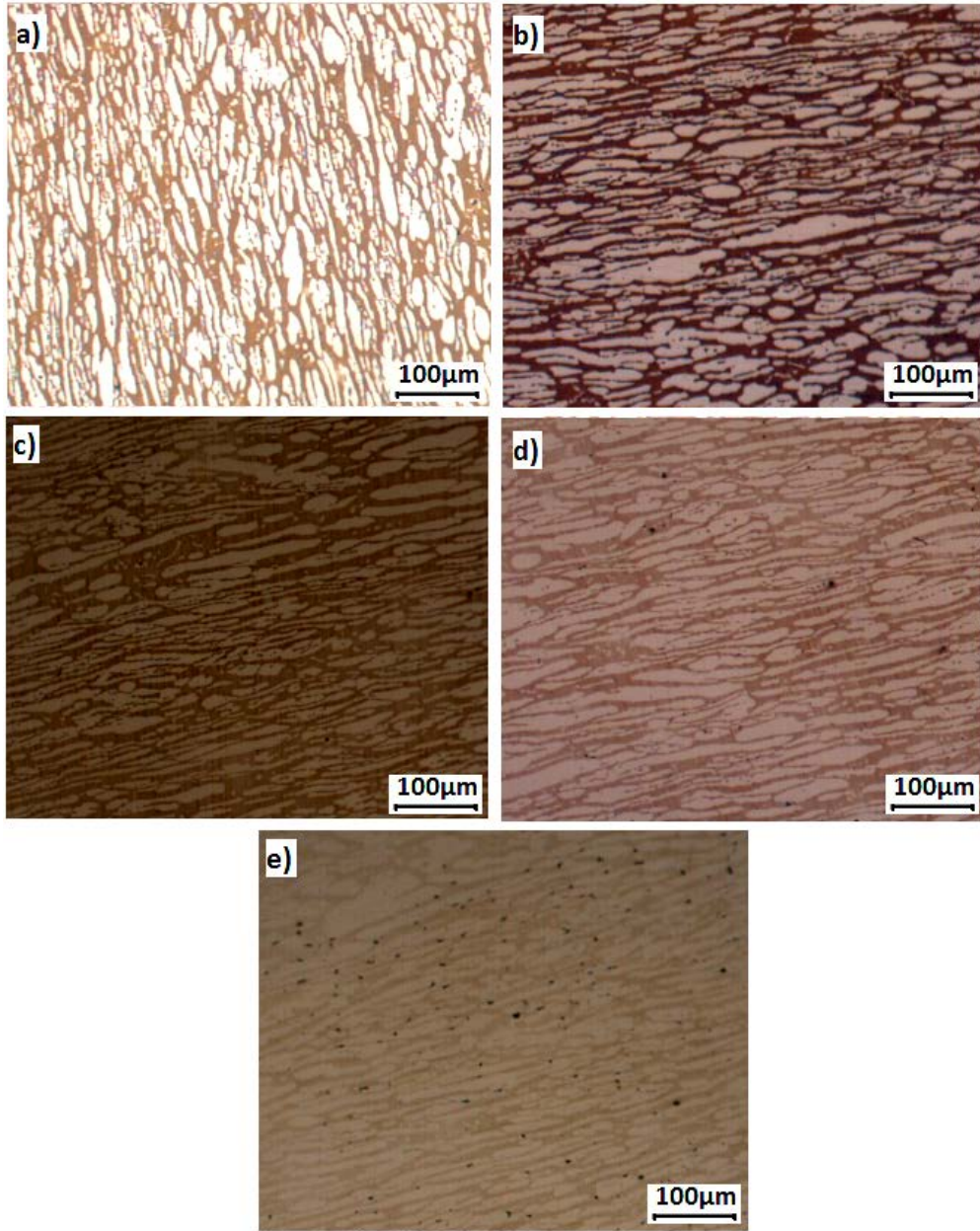
Şekil 5. 7 1000°C’de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Yaşlandırma tav sıcaklığı 800°C'ye çıkarıldığında, yapıda ferrit oranı bakımından meydana gelen durum 650°C'de gözlemlenen durum ile paraleldir. Şekil 5. 8'de 1000°C'de 1 saat çözme tavi uygulandıktan sonra suda soğutulan ve ardından 800°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Ötektoid reaksiyon yaşlandırma ısıl işlemi sırasında ferrit yönünde gerçekleştiğinden, sıcaklığın 800°C'ye çıkarılmasıyla yapının ferrit miktarı zamanla %47,14'ten %49,74'e yükselmiştir. Ancak; 650°C'den farklı olarak, bu sıcaklıkta uygulanan işlemde sigma fazının oluşum sıcaklığına da çıkıldığından dolayı 10. dakikanın ardından yapıda belirgin bir ikincil faz oluşumu gözlemlenmiştir. Bu fazlar yapıda γ/δ tane sınırlarında siyah renk olarak görünen fazlardır. İkincil fazların yapı içerisindeki gelişimi ilerleyen bölümlerde ele alınacaktır.



Şekil 5. 8 1000°C’de 1 saat çözme tavinin ardından 800°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Yaşlandırma tav sıcaklığı 950°C’ye çıkarıldığında yine ısıtma esnasında meydana gelen aynı mekanizma ile östenitin δ -ferrite dönüşümü söz konusudur. Bu nedenle yapıdaki ferrit miktarı zamanla artarak %50’nin üzerine çıkmıştır. Şekil 5. 9’da 1000°C’de 1 saat çözme tavi uygulandıktan sonra suda soğutulan ve ardından 950°C’de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 950°C’de görece uzun beklemelemlerde sigma fazının çekirdeklendiği görülmektedir.

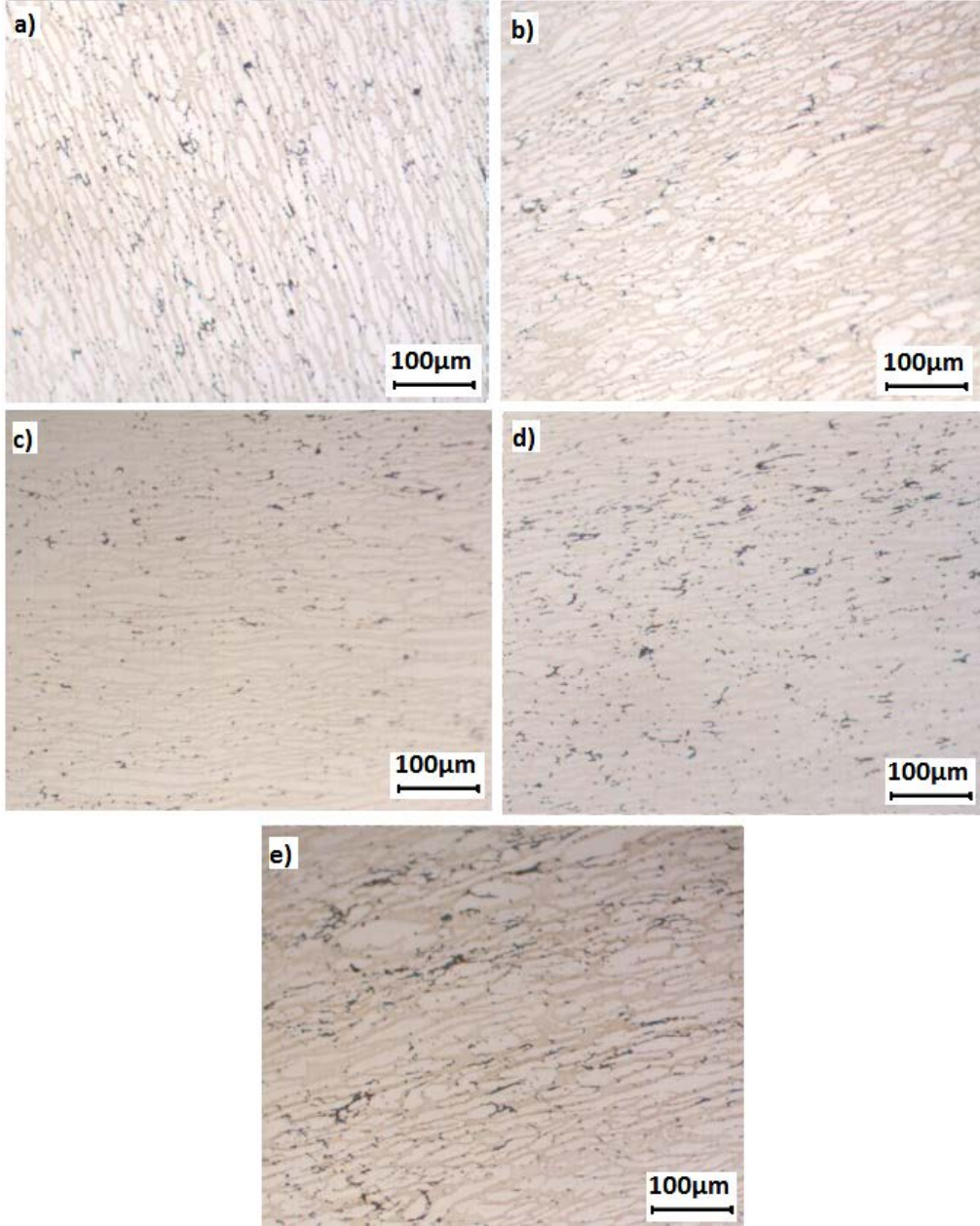


Şekil 5. 9 1000°C’de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

İzotermal yaşlandırma ısı işlemi ise 1000°C’den 650°C’ye yavaş soğutma söz konusu olduğu için sözü edilen ötektoid reaksiyon ters yönde gerçekleşmektedir ($\delta \rightarrow \gamma + \sigma$). Bu nedenle yapıdaki ferrit miktarı zamanla azalmıştır. Şekil 5. 10’da 1000°C’de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C’de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. İzotermal yaşlandırma ısı işlemi sırasında özellikle sigma fazı gibi ikincil fazların oluşum hattına girildiği için yapıda belirgin bir ikincil faz çökmesi söz konusudur. 60.

Ötektoid reaksiyonun sonuna yapıdaki ferrit miktarının %39'lara kadar inmesinde hem ötektoid reaksiyonun, hem de yapıda çekirdeklenen ikincil fazların ferrit fazı içine doğru büyümesinin etkisi vardır. Nitekim Hsieh ve Wu [45] yaptıkları çalışmada izotermal yaşlandırma tav süresinin yeterli olması durumunda ötektoid reaksiyonun ferriti tamamen tüketebileceğini vurgulamıştır.

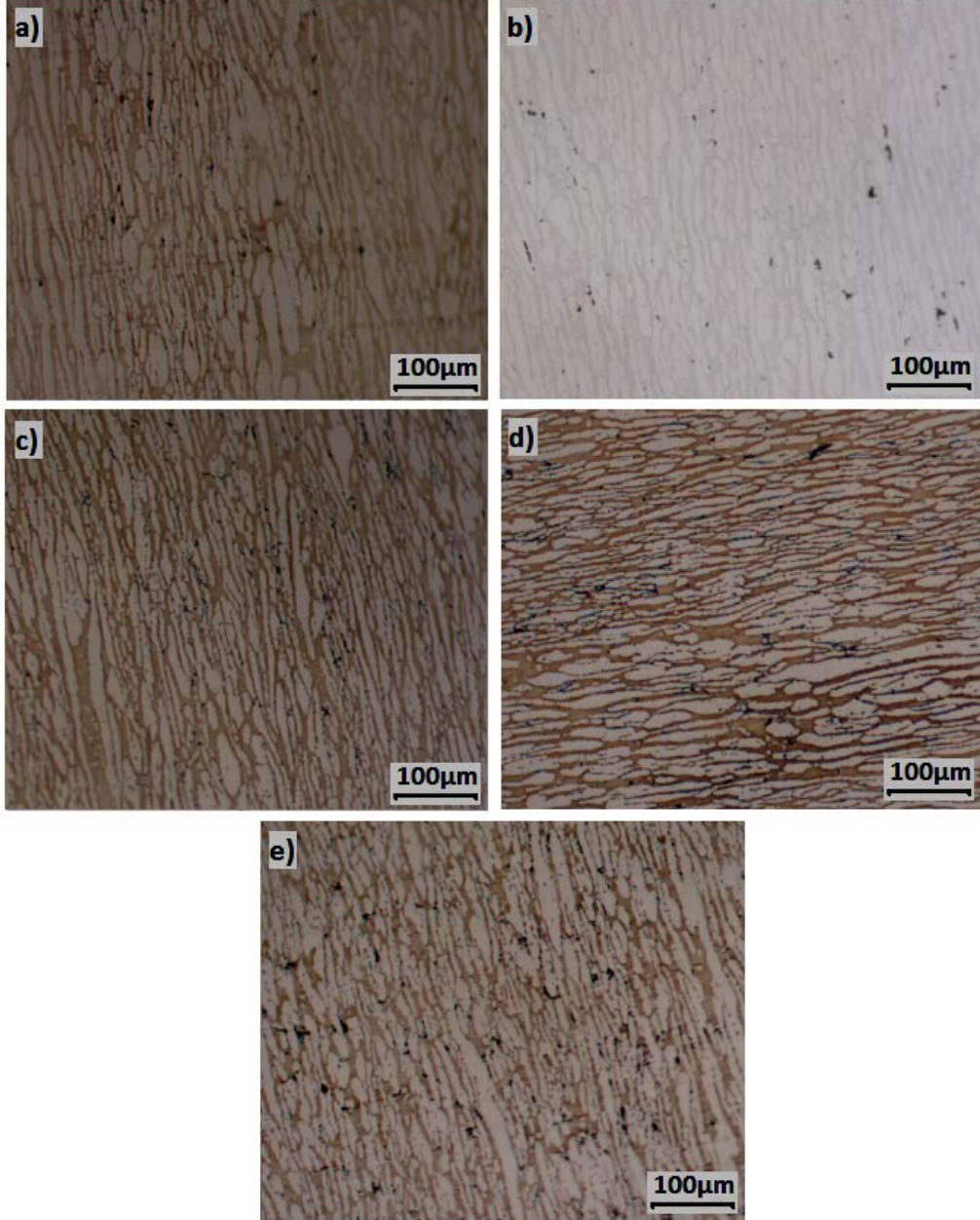
650°C'de uygulanan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma işlemleri sonunda; iki yapıdaki ferrit miktarları bakımından büyük farklılıklara sahip olduğu görülmektedir. Yaşlandırma işlemi sonunda yapıda %49,66 oranında ferrit ölçülürken; izotermal yaşlandırma işlemi sonunda bu oran %39,11'e düşmüştür. Yapıdaki ikincil faz miktarlarının yorumlanması ise ileriki bölümlerde ele alınacaktır.



Şekil 5. 10 1000°C’de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C’de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 11’de ise 1000°C’de 1 saat çözme tavinin ardından yavaş soğutularak 800°C’de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapı 1000°C’den 800°C’ye soğutulurken ötektoid dönüşüm yine δ -ferritten östenite doğru gerçekleşeceğinden yapıdaki δ -ferritin miktarı azalmaktadır. Ancak, 650°C’ye kadar inilmediğinden 800°C’de uygulanan işlemden yapının ferrit oranı %40,87’ye kadar bir düşme belirlenmiştir. Ayrıca yapıda 1000°C’den itibaren çökelmeye başlayan ikincil fazlar mevcuttur.

800°C'de uygulanan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma işlemleri sonunda; iki içyapının ferrit oranları karşılaştırıldığında; izotermal yaşlandırma işlemi sonunda %40,87 iken yaşlandırma tav işleminde ise bu oran %49,74 olduğu görülmüştür.

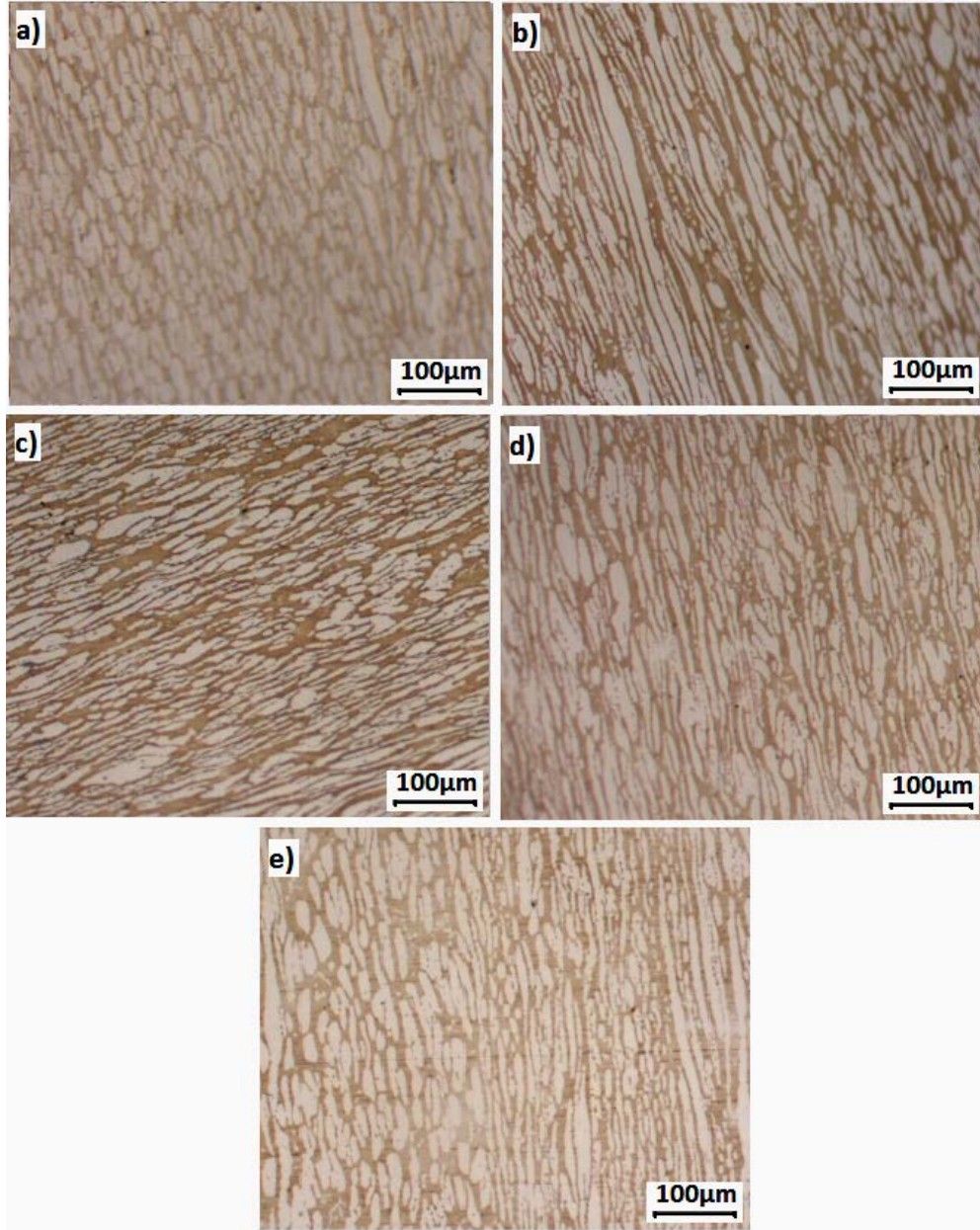


Şekil 5. 11 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 12'de 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 950°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Ötektoid dönüşüm ferritin parçalanması şeklinde gerçekleşeceği için yapıdaki ferrit miktarı %42,88'e düşmüştür. Yapıda herhangi bir ikincil faz

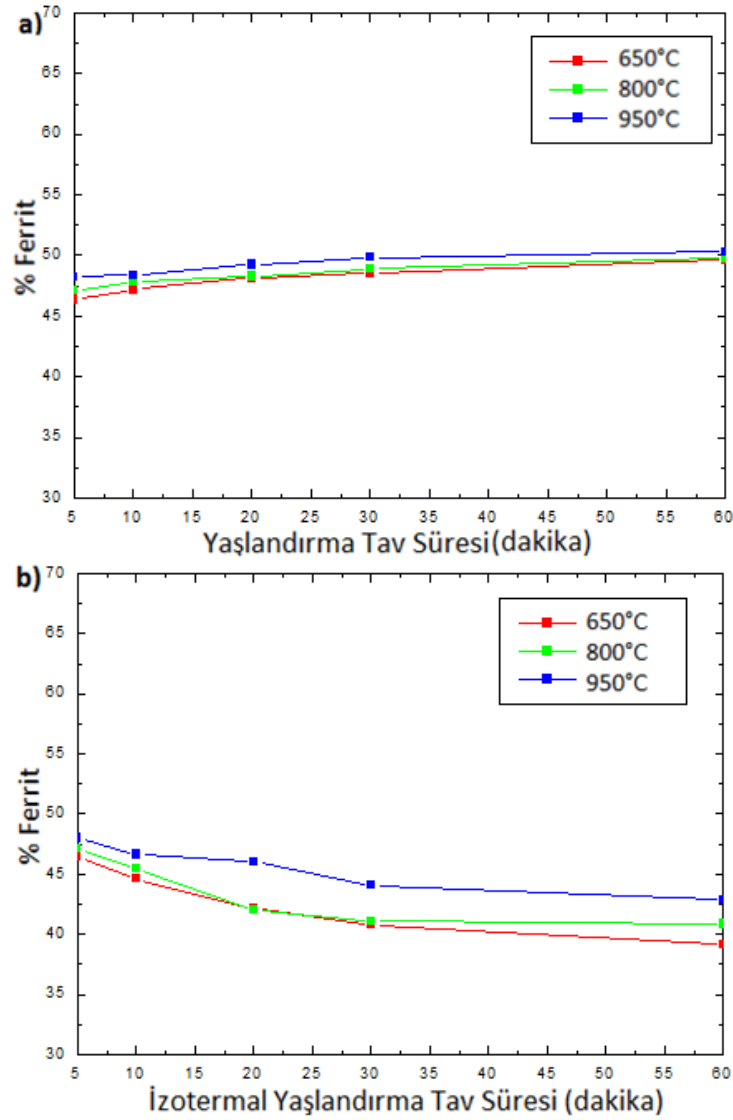
belirlenmemiştir. Bu da sigmanın çekirdeklenmesinin 950°C'nin altında meydana geldiğini göstermektedir.

950°C'de uygulanan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlemleri karşılaştırıldığında; iki yapının ferrit oranları arasında yaklaşık %7'lik bir fark meydana gelmiştir. Bu durum ötektoid reaksiyonun yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma şartlarında ters yönde meydana geldiğinin ispatıdır.



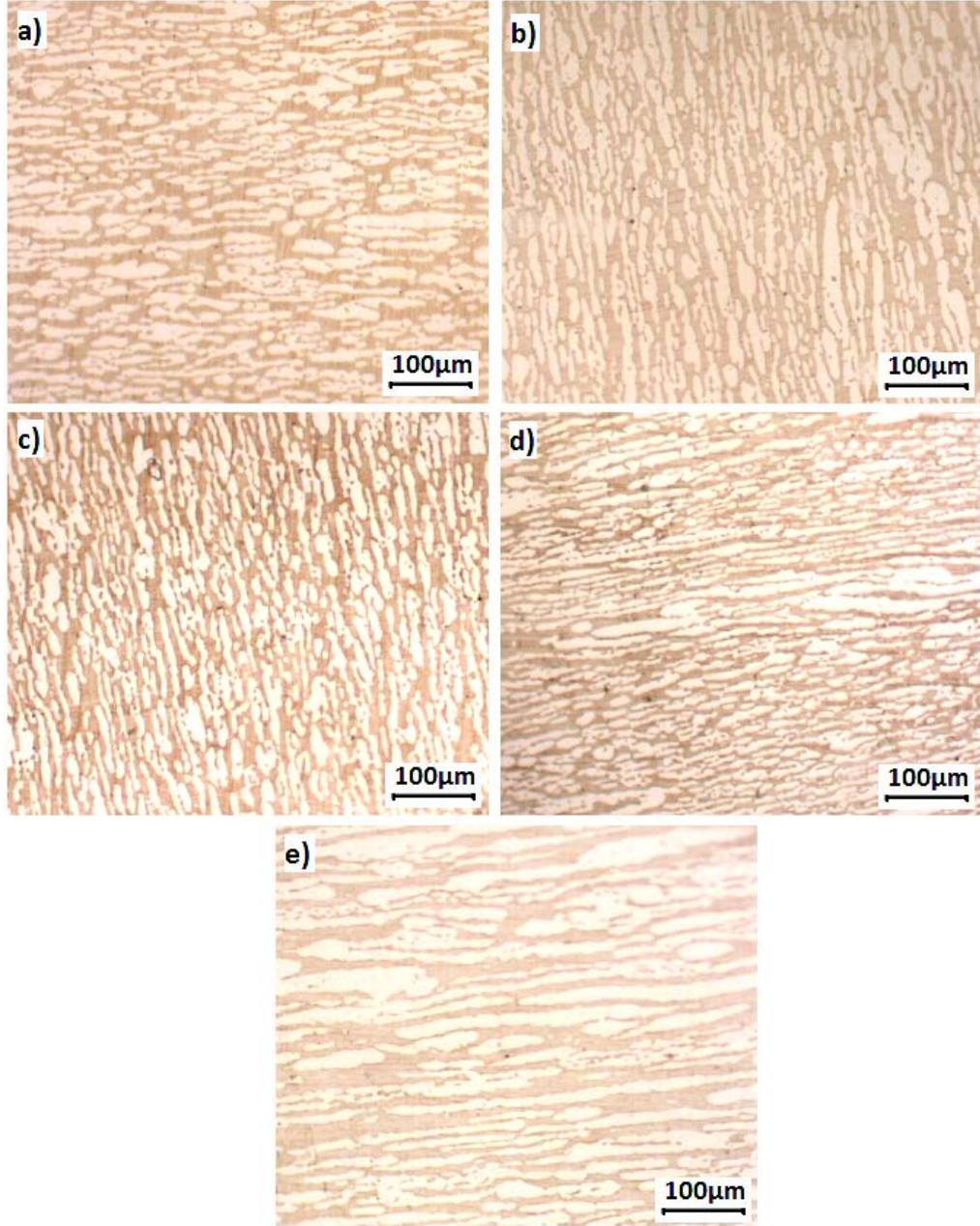
Şekil 5. 12 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 13'te 1000°C'de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğin yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma şartlarındaki ferrit oranının değişim grafiği verilmiştir. Bu grafiklerde de görüldüğü gibi; yaşlandırma ısıl işlemi sırasında ötektoid reaksiyon δ -ferrit yönünde gerçekleşeceği için ısıl işlem süresi ve sıcaklığı arttıkça yapıdaki ferrit miktarı artmaktadır. Buna karşın; izotermal yaşlandırma ısıl işlemi sırasında ötektoid reaksiyon γ yönünde gerçekleşeceği için ısıl işlem süresi arttıkça yapıdaki ferrit miktarı azalmaktadır. Sıcaklık ile ferrit miktarı arasında ise ters bir orantı gözlemlenmektedir. Bunun nedeni; 1000°C'den itibaren yavaş soğutulan yapıda gerçekleşen reaksiyon miktarının 650°C'de 950°C'den daha fazla olmasıdır. Yapıda çekirdeklenen ikincil faza ait yorumlar ileriki bölümlerde ele alınacaktır.



Şekil 5. 13 1000°C'de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) %ferrit - yaşlandırma süresi, b) %ferrit-izotermal yaşlandırma süresi grafiği

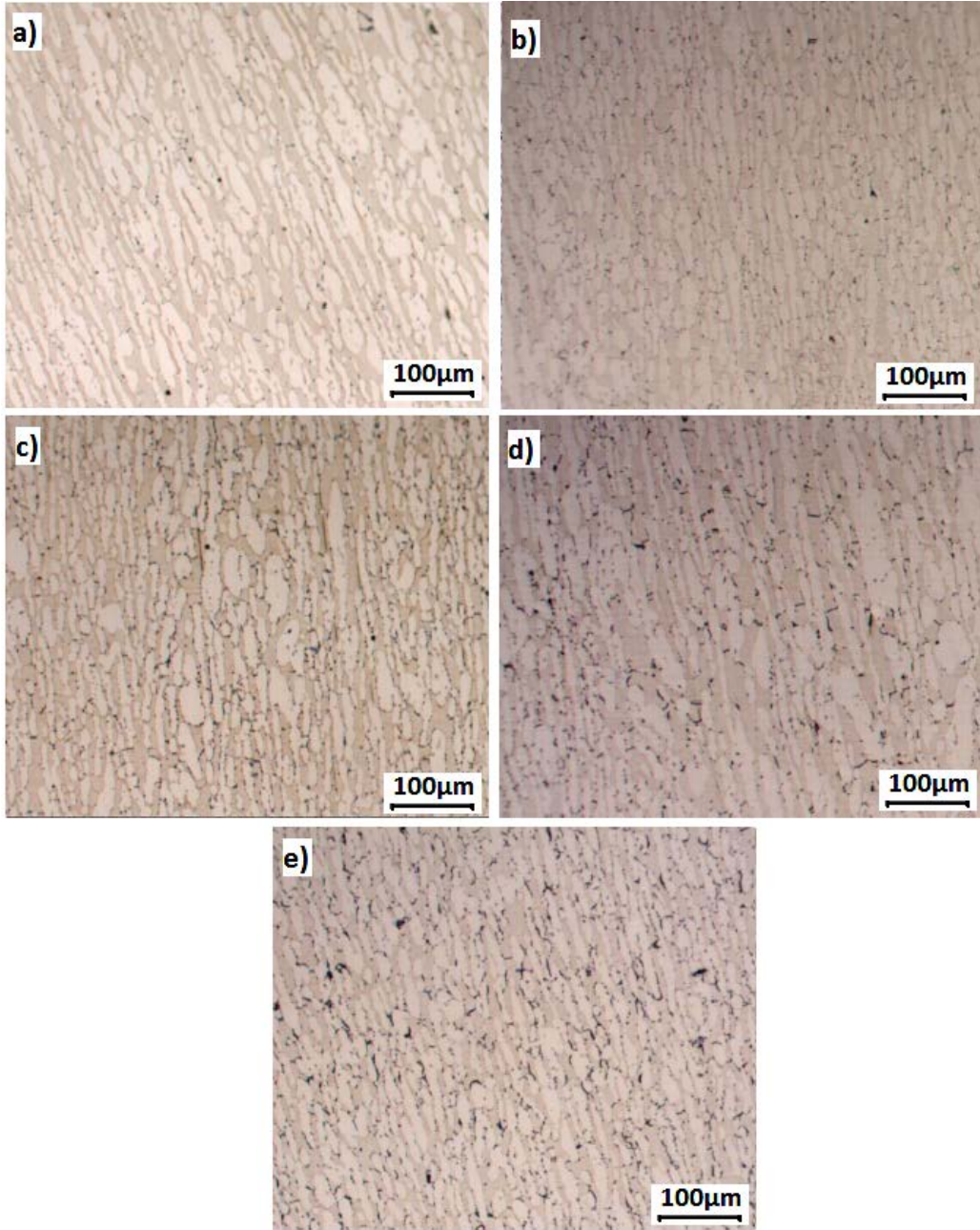
Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işleminin uygulandığı diğer gruptaki numuneler bu işlem öncesinde 8 saat çözme tav işlemine tabi tutulmuştur. İlk olarak; optik mikroskop görüntüleri Şekil 5. 14'te verilen 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 650°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanmıştır. Çözme tav süresinin artmasıyla birlikte yapıdaki ferrit miktarının da arttığından Bölüm 5.2.1'de bahsedilmişti. Bu nedenle 8 saat çözme tavi ardından 650°C'de yaşlandırma tavi uygulanan malzemelerde oluşan ferrit miktarının, 1 saat çözme tavi ardından 650°C'de yaşlandırma tavi uygulanan malzemelere göre daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 5. 14'te verilen mikroyapıda da uzamış ferrit tanelerinin bir miktar irileştiği gözlemlenmektedir. Yaşlandırma tav işleminin sonunda yapının ferrit içeriği %55,69 olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma tavının uygulandığı 650°C, 1 saatlik malzemelerde olduğu gibi, ikincil faz oluşumu için yeterli bir sıcaklık değildir. Bu nedenle yapıda ikincil faz çekirdeklenmesine rastlanmamıştır.



Şekil 5. 14 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de yaşlandırma tav işleminin uygulandığı malzemelerde ferrit oranının yaşlandırma tav süresi boyunca ötektoid dönüşümün δ -ferrit yönünde olmasından dolayı %53,11'den %56,96'ya yükseldiği görülmektedir. Ayrıca; çözme tavi esnasında da yapıda aynı reaksiyon gerçekleşeceğinden, ferrit miktarının 1000°C'de 1 saat çözme tavi uygulanıp ardından aynı yaşlandırma şartlarının uygulandığı malzemelerden daha fazla olduğu saptanmıştır. Şekil 5. 15'te 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de 5, 10, 20,

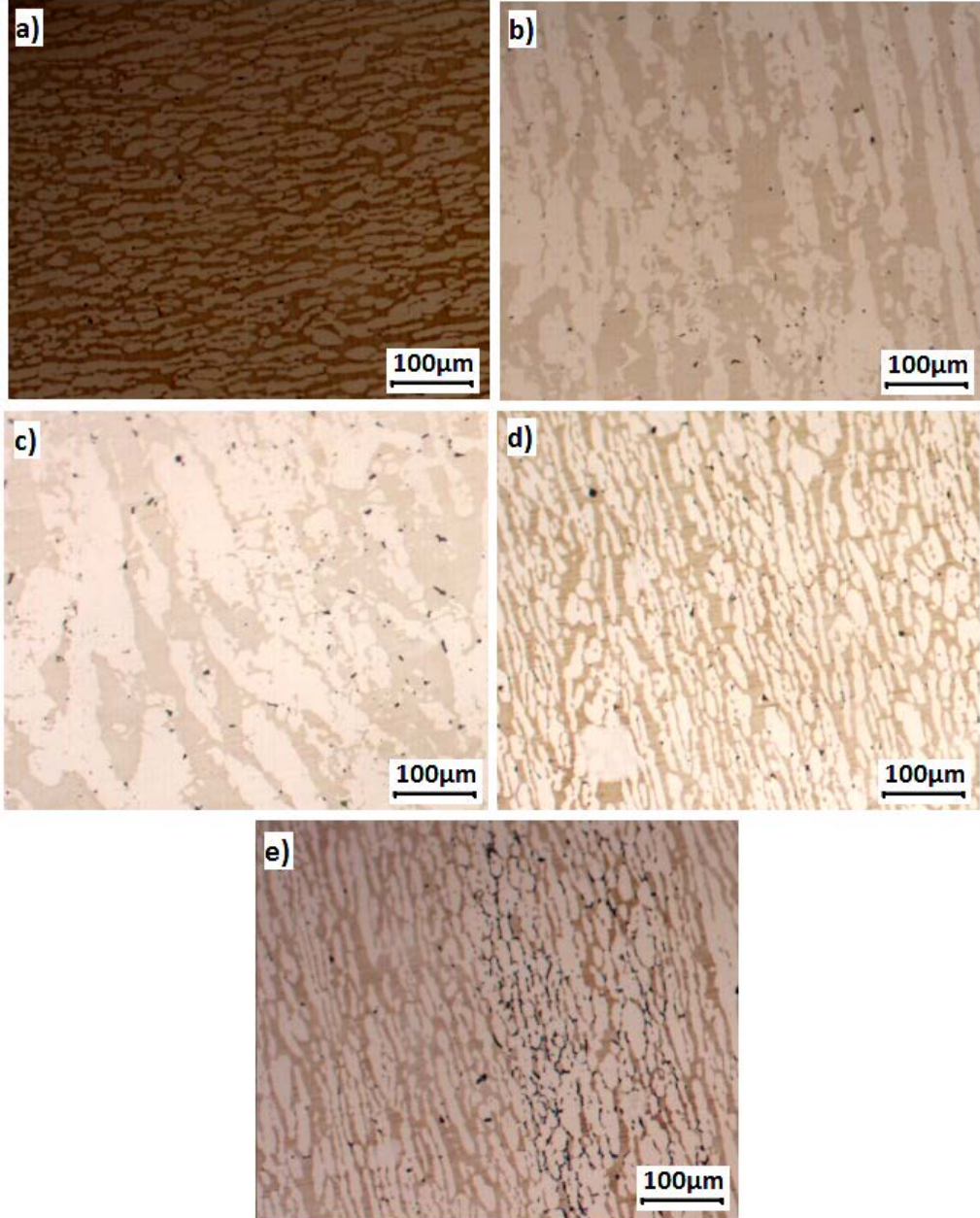
30 ve 60 dakika yaşlandırma tavlı uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Burada yapıdaki ferritlerin bir miktar irileştiği ayrıca ikincil fazların oluşum hattına girildiğinden dolayı yapıda ikincil fazların çekirdeklendiği görülmektedir.



Şekil 5. 15 1000°C'de 8 saat çözme tavlının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavlı uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

1000°C'de 8 saat çözme tavlının ardından 950°C'de uygulanan yaşlandırma işleminde ısıtma süresince yine yapıdaki ferritin %55,37'den %57,67'ye çıktığı görülmektedir.

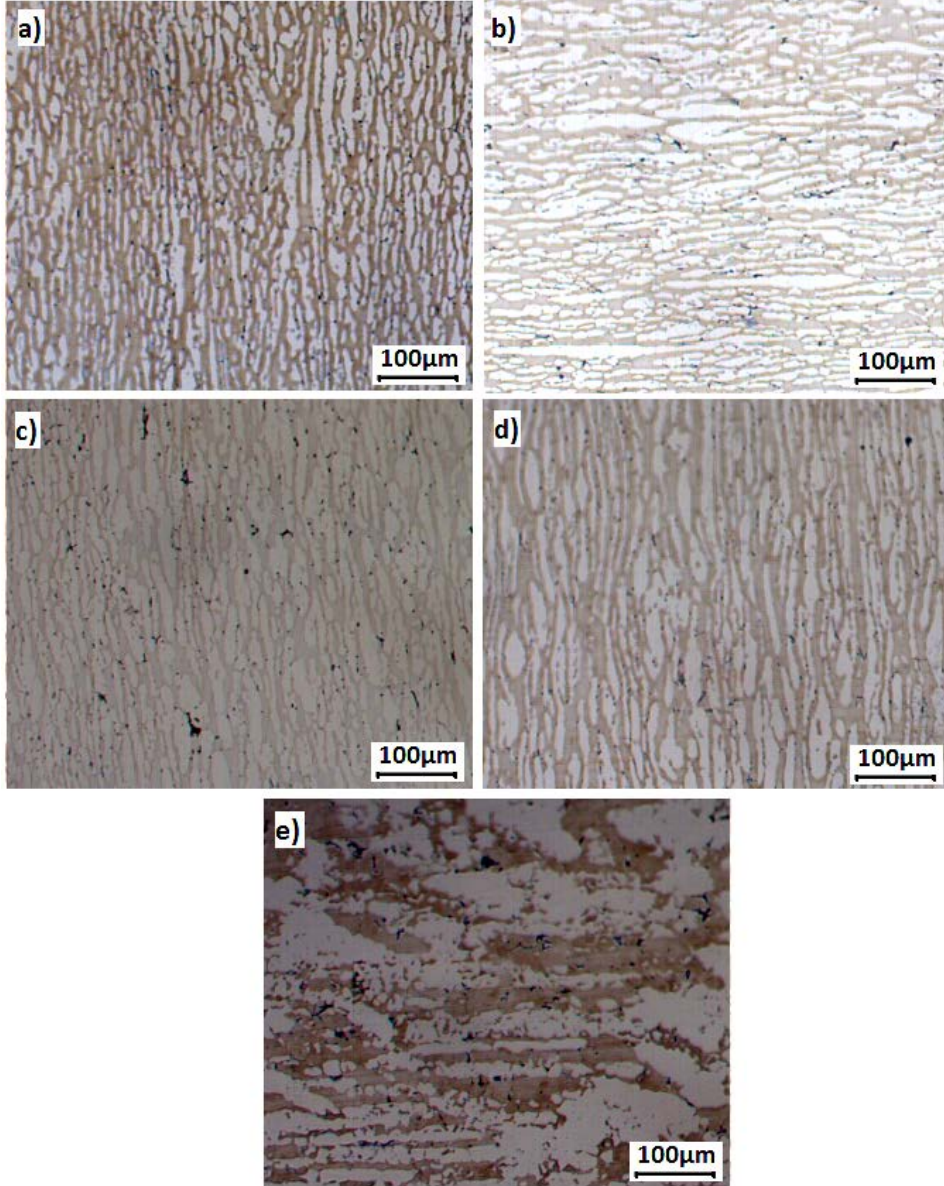
Ayrıca, optik görüntüsü Şekil 5. 16'da verilen 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelerde 5 dakikanın sonrasında yapıda ikincil fazların çekirdeklendiği de gözlemlenmektedir.



Şekil 5. 16 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

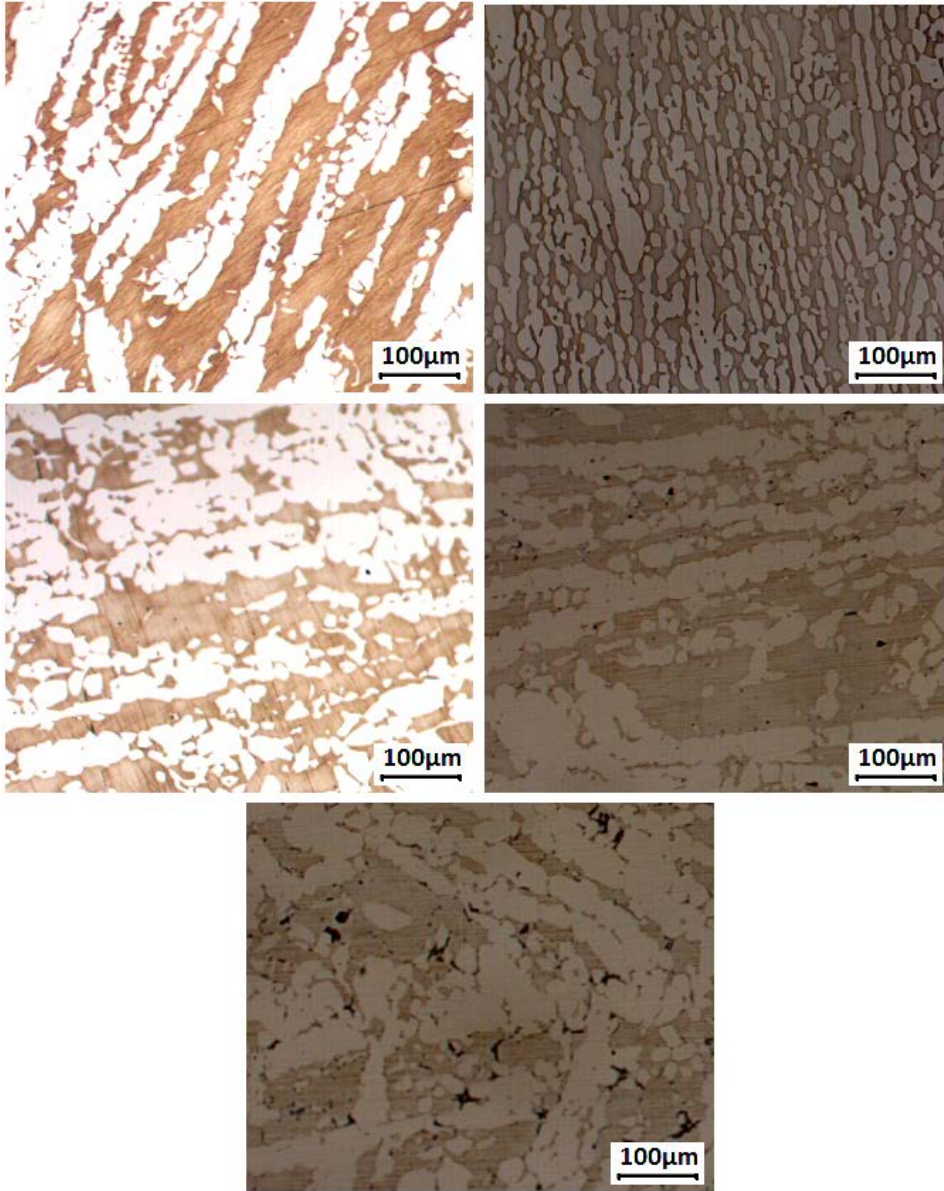
8 saat çözme tavinin ardından 650°C'de izotermal yaşlandırma tavi uygulanan malzemelere gelindiğinde; burada da 1 saatte olduğu gibi ötektoid tepkime mekanizması 650°C'de yaşlandırma tavi uygulanan malzemelere göre ters tarafa doğru gerçekleşerek δ -ferrit yönünde bir davranış sergilemiştir. Bu nedenle yapıdaki ferrit

miktarı %44,74'e düşmüştür. Ancak çözme tav süresi boyunca yapıda ferrit oluşmaya devam ettiği için 1 saatlik gruptaki numunelere kıyasla ferrit miktarı yaklaşık %5 oranında daha fazladır. Şekil 5. 17'de 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 650°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 1000°C'den soğumaya bırakılan yapıda 1 saat çözme tavisinde olduğu gibi yine yoğun bir ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmektedir.



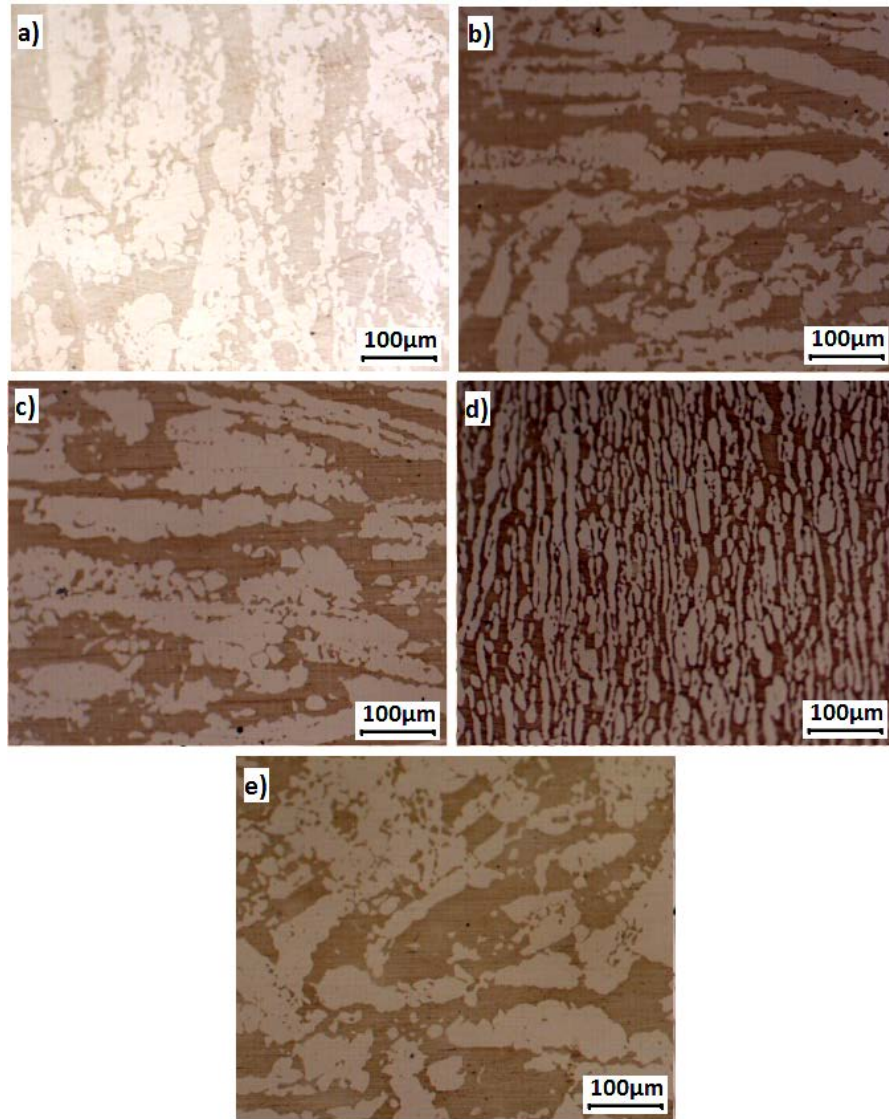
Şekil 5. 17 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma işleminde yapıda soğutma süresince δ -ferritten östenite (γ) doğru bir dönüşüm gerçekleştiği; δ -ferrit miktarının %53,54'ten %46,15'e düştüğü görülmektedir. Ancak 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 800°C'de izotermal yaşlandırılan malzeme ile karşılaştırıldığında çözme tav süresinin etkisiyle ferrit miktarının daha fazla olduğu görülmektedir. Şekil 5. 18'de 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



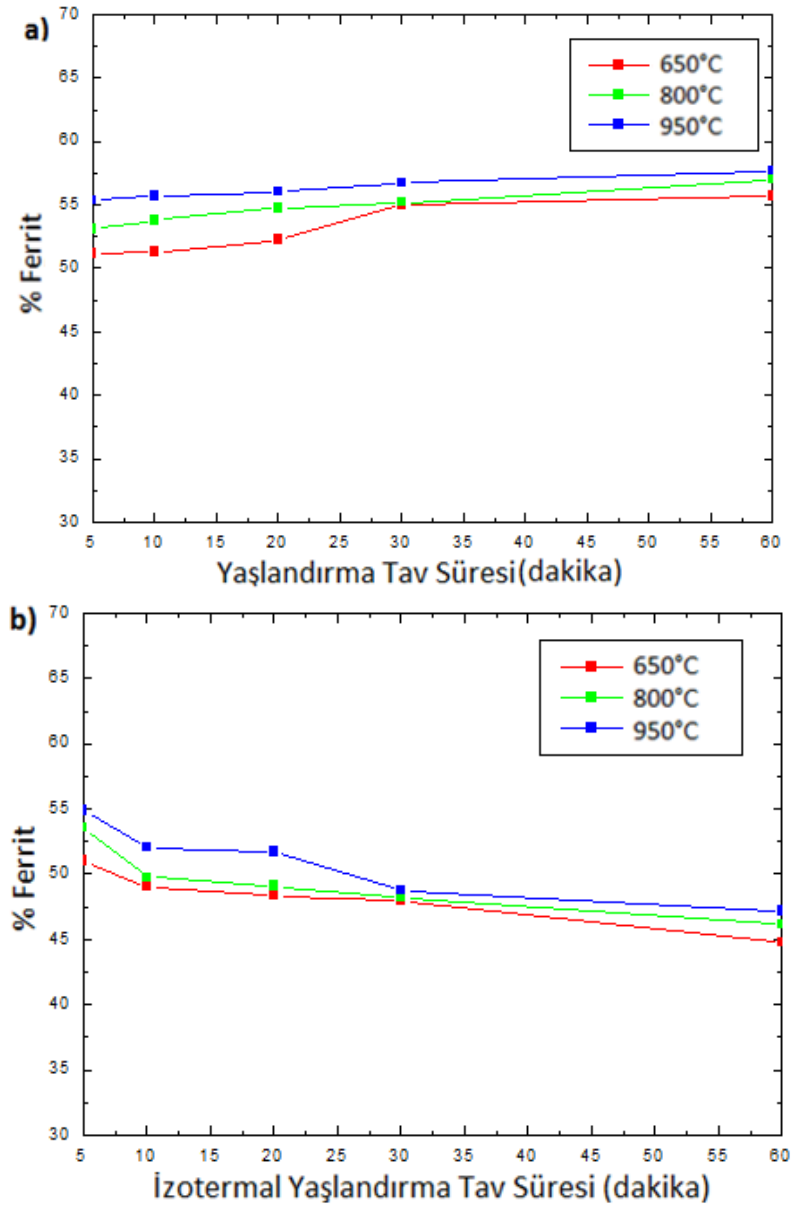
Şekil 5. 18 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma işleminde 1 saatte aynı şartlarda uygulanan izotermal yaşlandırma tavinin göre ferrit miktarında belirgin bir artış gözlemlenmektedir. Ancak işlem süresi boyunca ferritin östenite dönüşmesi söz konusu olduğundan yapıdaki ferrit miktarı %54,88'den %47,21'e düşmüştür. Şekil 5. 19'da 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma işleminde 1 saatte olduğu gibi ikincil faz oluşumu gözlemlenmemiştir.



Şekil 5. 19 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 20'de yer alan grafiklerde genel değişimi görmek adına 1000°C'de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğin yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma şartlarındaki ferrit oranının değişimi verilmiştir. Grafikte de görüldüğü gibi; yaşlandırma ısıl işlemi sırasında δ -ferrit yönünde gerçekleşen ötektoid reaksiyon izotermal yaşlandırma ısıl işlemi sırasında γ yönünde gerçekleşmektedir. Elde edilen sonuçlar 1000°C'de 1 saat tavlanan malzemelerle paraleldir. Ancak burada çözme tav süresi boyunca yapıda ferritin oluşması nedeniyle yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma işlemi uygulanan bütün dokularda ferrit miktarının 1 saatteki malzemelere göre daha fazla olduğu ölçülmüştür.



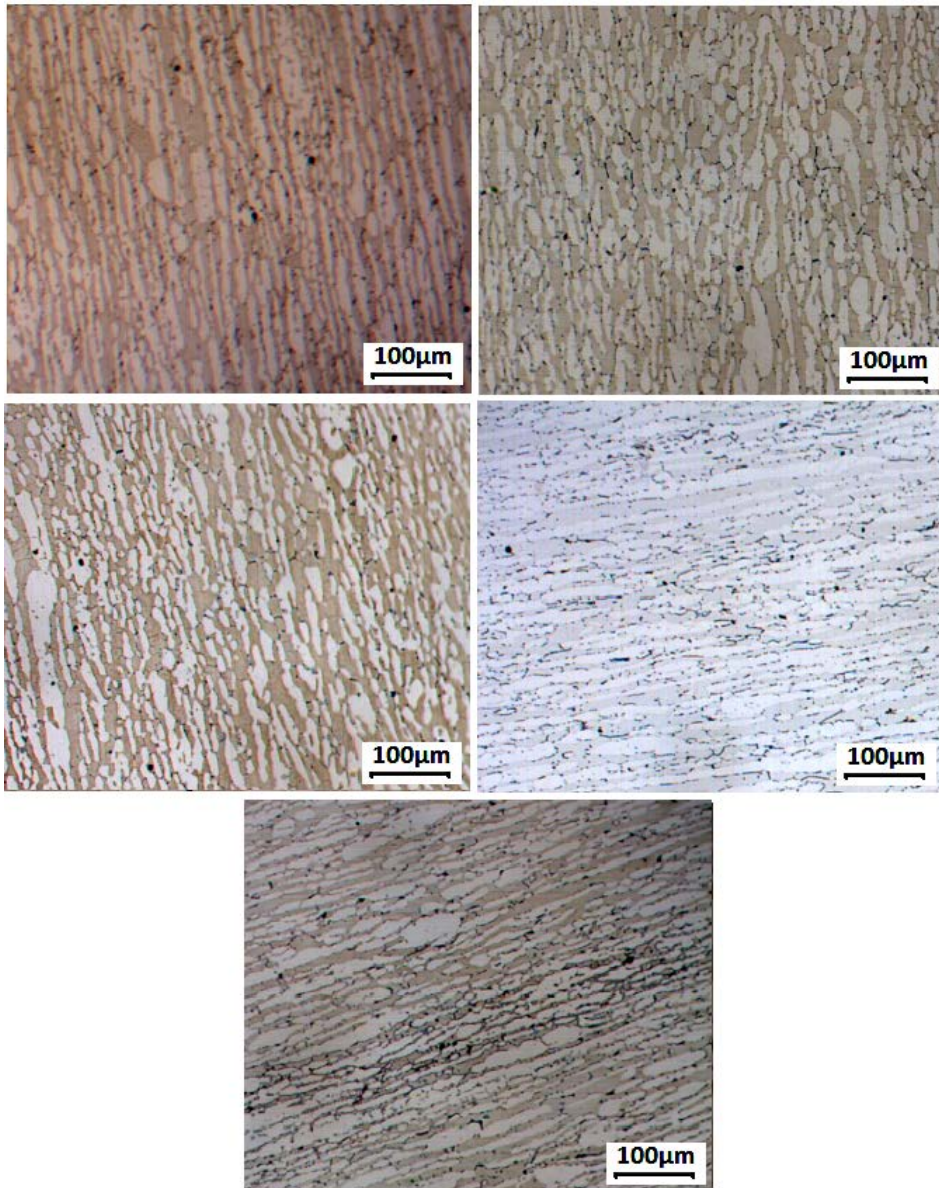
Şekil 5. 20 1000°C'de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) %Ferrit - Yaşlandırma Süresi, b) %Ferrit-İzotermal Yaşlandırma Süresi grafiği

Son olarak; 10 saat çözüme tavinin ardından yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma işlemine tabi tutulan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin ferrit değişimine yer verilecektir. Şekil 5. 21'de 1000°C'de 10 saat çözüme tavinin ardından 650°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan malzemelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Diğer iki gruptaki malzemeler gibi burada da herhangi bir ikincil faz oluşumu söz konusu değildir. Genel mikroyapı yönlenmiş östenit adalarından oluşmaktadır. Çizelge 5. 3'te de görüldüğü gibi, yapının ferrit miktarı %53,04'ten %55,95'e yükselmiştir. Üst sıcaklık olarak seçilen 1000°C'de 10 saatlik yapılan ısıl işlem süresince de yapıda δ -ferrit oluştuğu için 1 saat ve 8 saate göre δ -ferrit miktarı dahafazladır.



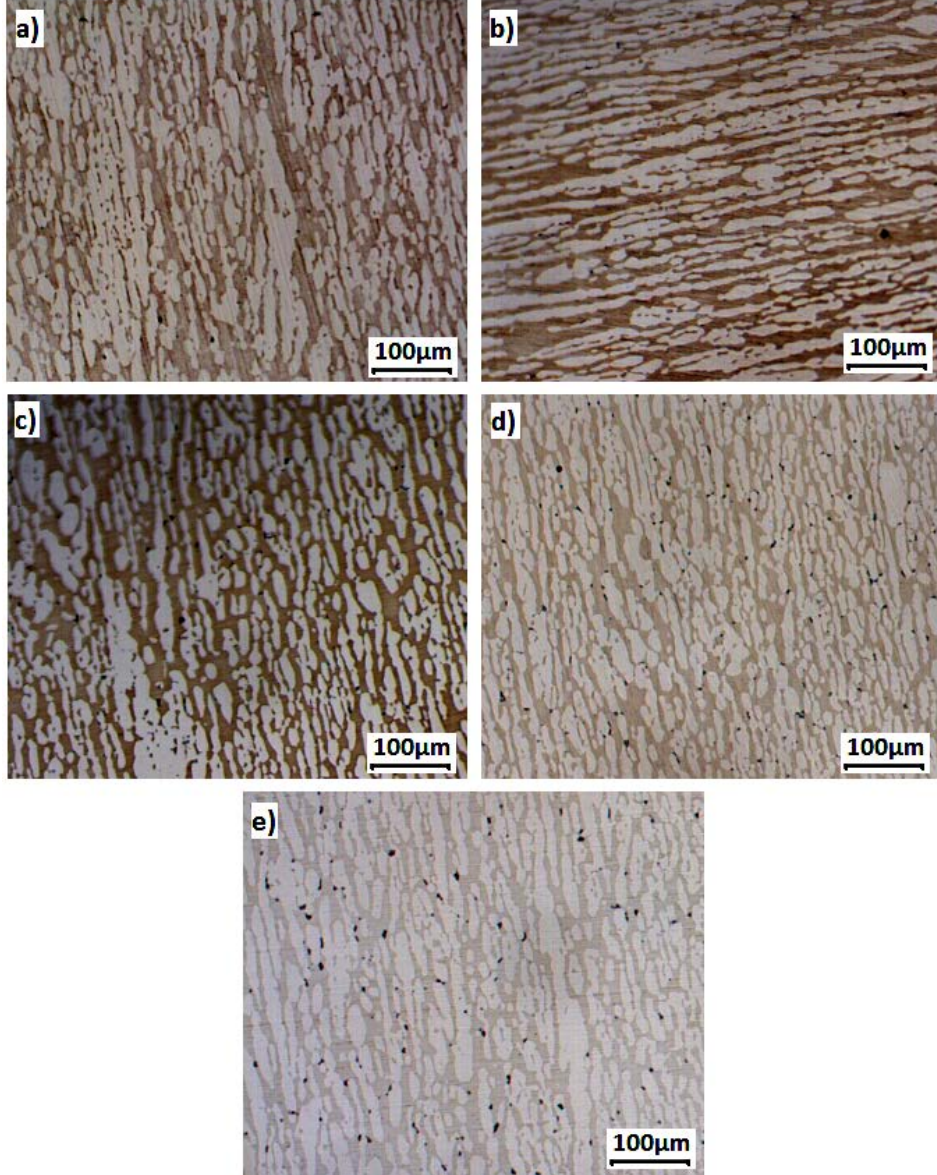
Şekil 5. 21 1000°C'de 10 saat çözüme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Yaşlandırma işlem sıcaklığı 800°C'ye çıkarıldığında; özellikle sigma fazının oluşum sıcaklığına girildiğinden dolayı tane sınırlarında çekirdeklenen ikincil fazlar göze çarpmaktadır. Bu fazların yorumlaması ilerleyen bölümlerde yapılacaktır. Şekil 5. 22'de 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 800°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapıya yönelmiş ferrit tanelerinin hakim olduğu ve yaşlandırma ısıl işlemi boyunca ferrit miktarının %54,8'den %57,22'ye yükseldiği görülmektedir. Bu faz oranında hem üst sıcaklık olan çözme tav süresinin, hem de yaşlandırma tav süresinin etkisi vardır.



Şekil 5. 22 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

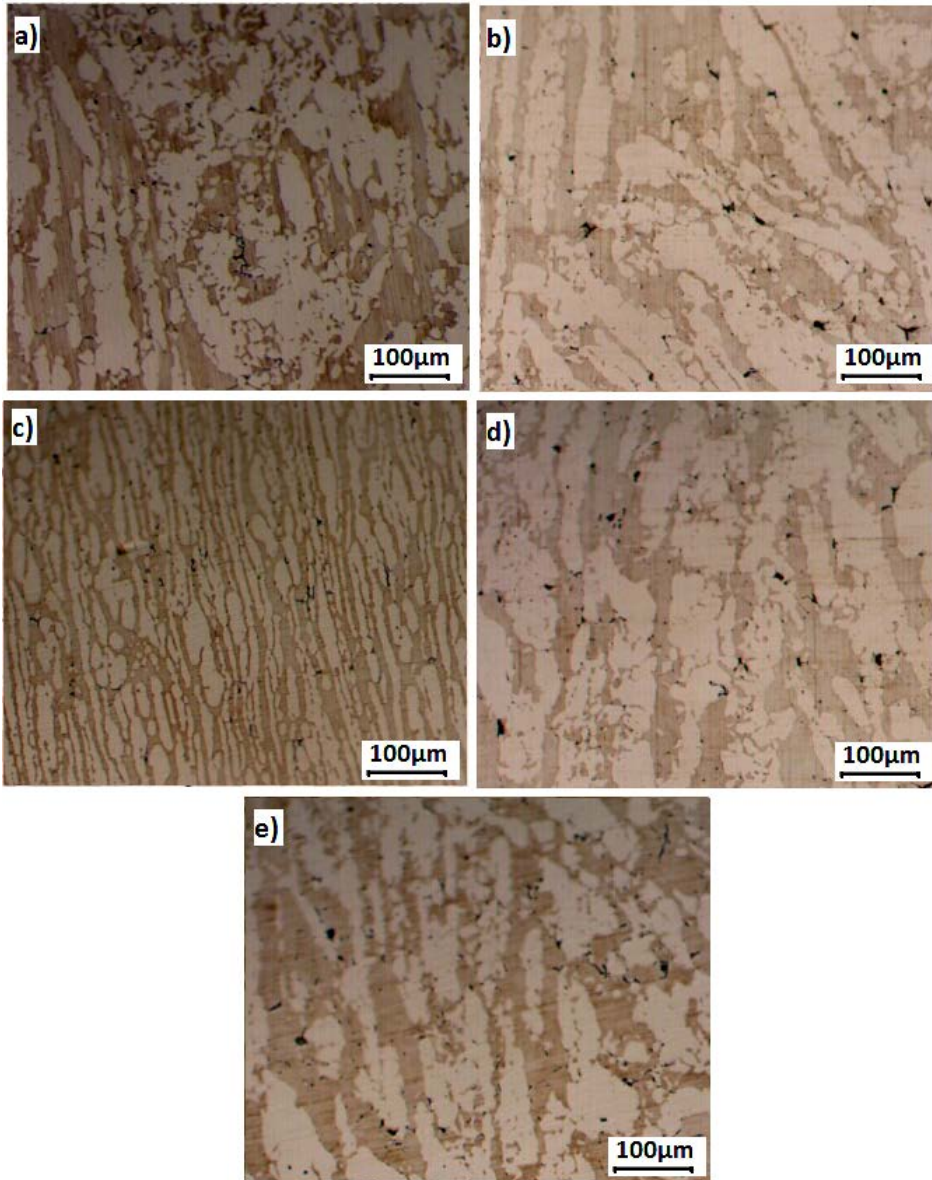
Yaşlandırma ısı işlemi olarak seçilen son sıcaklık olan 950°C'ye çıkıldığında; yapıdaki ferrit oranının en yüksek değerine ulaştığı görülmektedir. Şekil 5. 23'te 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Isıl işlem süresince yapı ferrit oluşturma eğilimindedir. Ayrıca yapıda 10 dakikadan sonra ikincil fazlarında çekirdeklendiği gözlemlenmektedir.



Şekil 5. 23 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

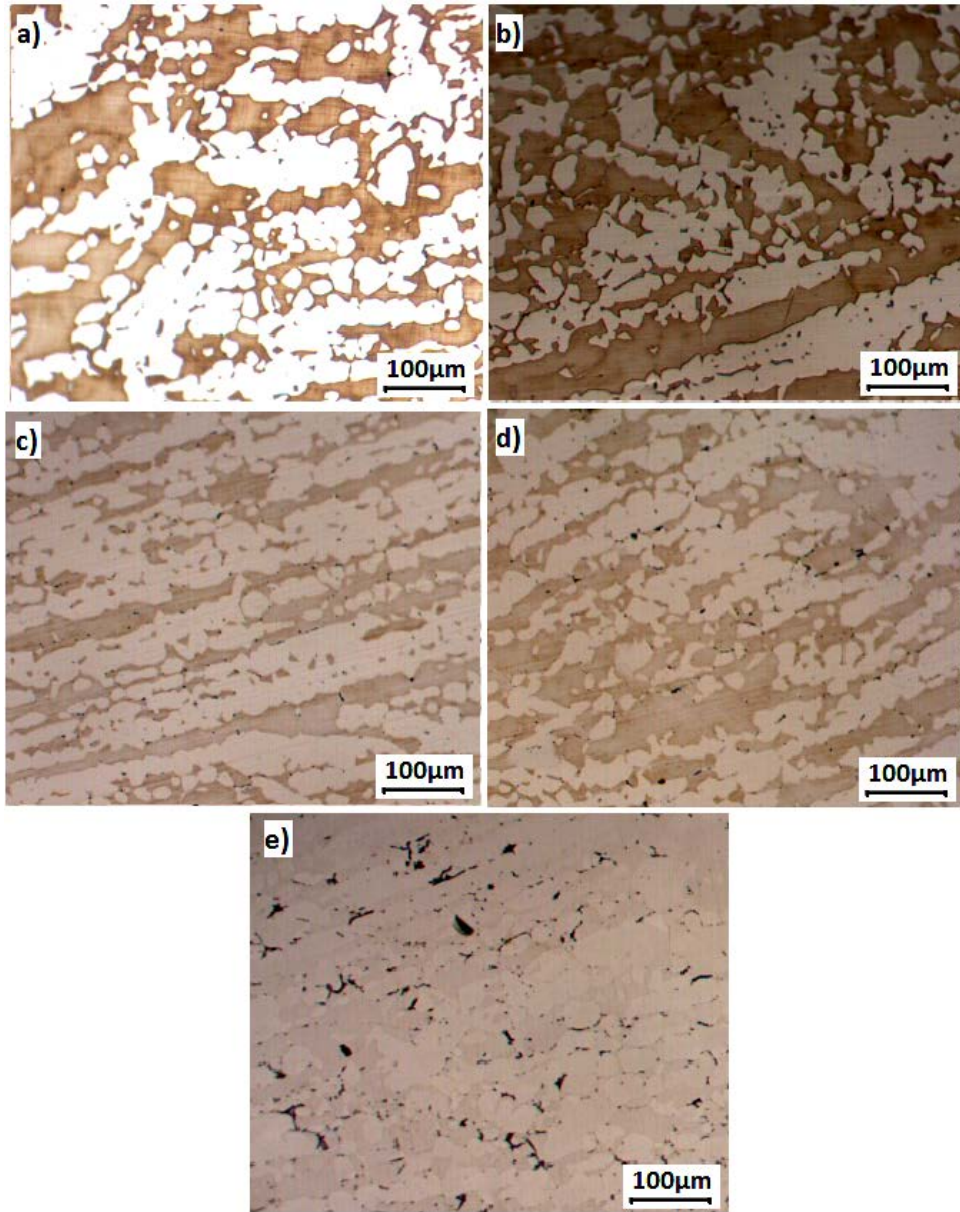
1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 650°C'de yapılan izotermal yaşlandırma işlemine gelindiğinde soğuma şartlarında yapıda, 1 saat ve 8 saatte olduğu gibi,

intermetalik oluşumu gözlemlenmektedir. Şekil 5. 24'te 1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 650°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapıda yeniden kristalleşme mekanizmasının etkileri de mevcuttur. Genel doku yönlenmiş tanelerden ziyade küresele yakın formdaki δ -ferrit tanelerinden oluşmaktadır. Yine ötektoid dönüşüm reaksiyonu soğuma sırasında δ -ferrit aleyhine davrandığından yapının ferrit miktarı %52,8'den %47,79'a düşmüştür. Ancak çözme tav süresinin etkisiyle bu oranın 1 saat ve 8 saatlik çözme tav numunelerinden daha fazla olduğu görülmektedir.



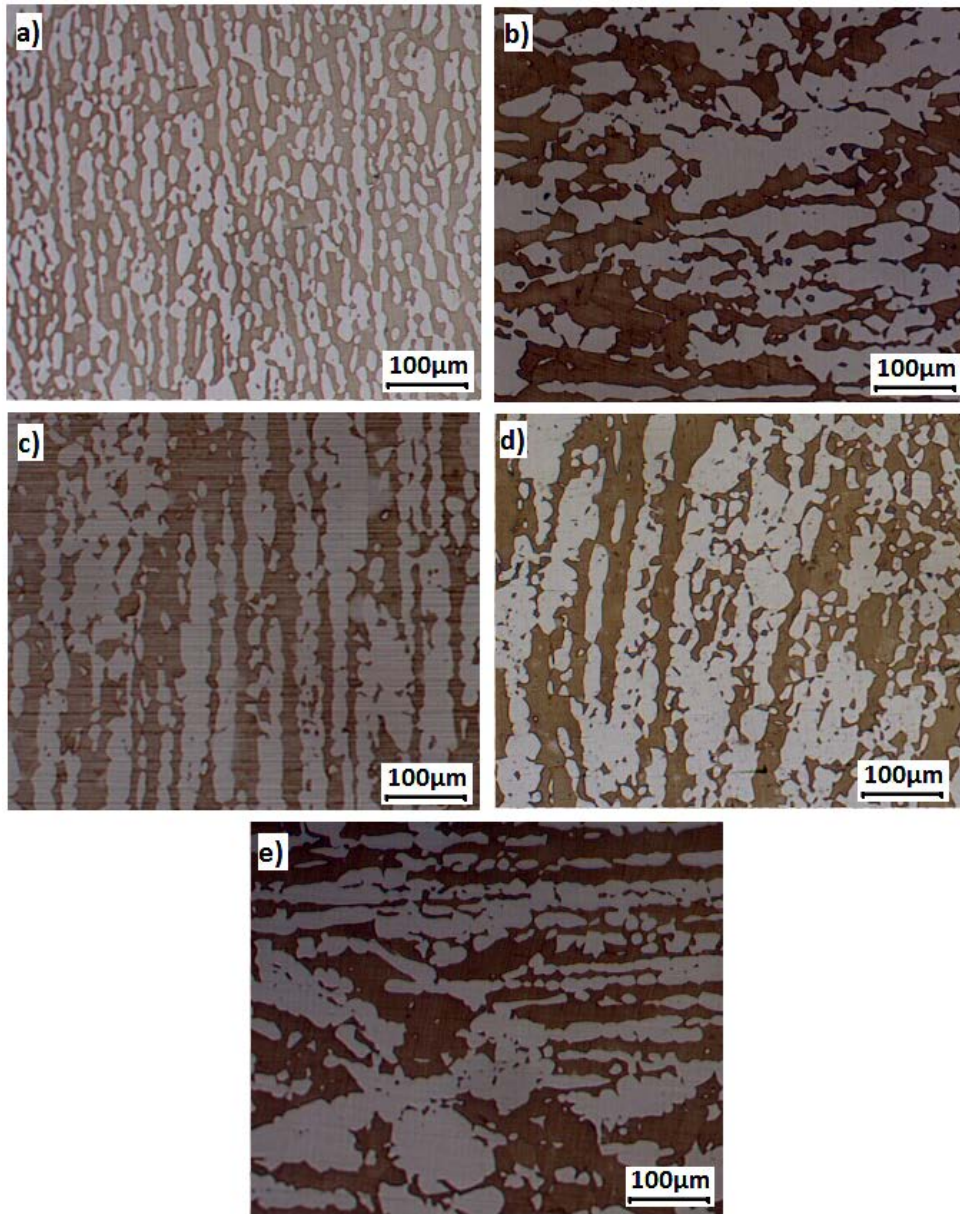
Şekil 5. 24 1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

İzotermal yaşlandırma tavında 1000°C'den 800°C'ye yavaş soğutulduğunda ise; Çizelge 5. 3'te verildiği üzere ferrit oranının işlem süresi boyunca zamanla %54,1'den %48,82'ye düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 5. 25'te 1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 800°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 650°C'de yapılan işlem ile karşılaştırıldığında; 1000°C'den 800°C'ye düşme süresi daha kısa olduğunda daha az ferrit parçalanmıştır. Bu nedenle yapının ferrit oranı 650°C'de yapılan işlemde daha fazladır. Ayrıca işlem sonunda yoğun bir ikincil faz oluşumu gözlemlenmektedir.



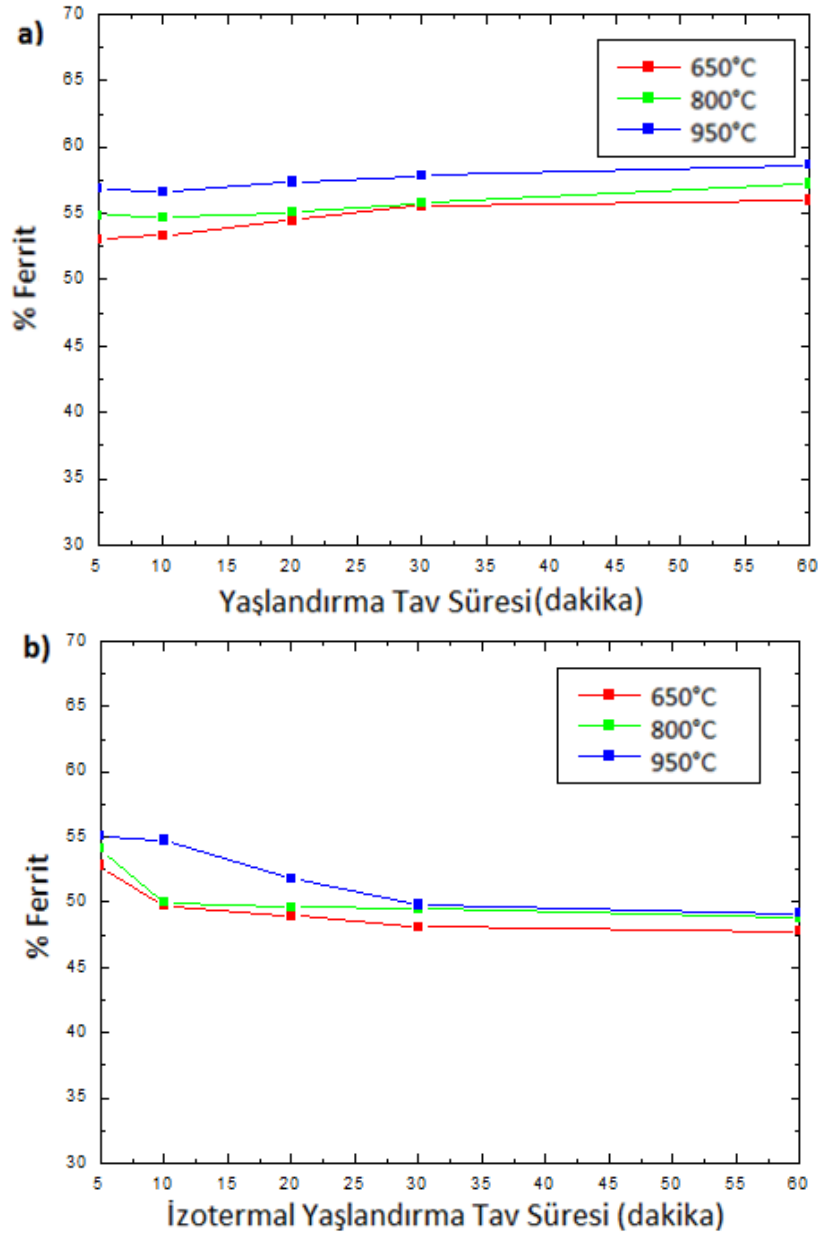
Şekil 5. 25 1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Son olarak işlem sıcaklığı 950°C olarak seçildiğinde soğuma esnasında yapıda ferritin parçalanarak östenite dönüştüğü görülmektedir. 950°C ikincil faz oluşumu için yüksek bir sıcaklık olduğundan herhangi bir ikincil faz çökmesi söz konusu değildir. Şekil 5. 26'da 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapının ferrit oranı %55,05'ten %49,17'ye düşmüştür. Ancak 1000°C'den itibaren 950°C 'ye soğutulan yapıdaki ferrit miktarı 800°C ve 650°C'ye göre daha fazladır. Bunun nedeni; daha az ferrit tanesinin parçalanmasıdır.



Şekil 5. 26 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 100 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 27'de, 1000°C'de 10 saat tavlanan malzemenin yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma işlemlerine bağlı ferrit değişimleri verilmiştir. Isıtma sırasında, ötektoid dönüşüm γ fazından δ -ferrit fazına doğru gerçekleştiği için δ -ferrit faz oranı zamanla artmakta; soğutma esnasında ötektoid dönüşüm δ -ferrit fazdan γ fazına doğru gerçekleştiği için δ -ferrit faz oranı zamanla azalmaktadır. Ayrıca yaşlandırma tav sıcaklığı arttıkça daha fazla γ fazı parçalanacağı için bu durum δ -ferrit oluşumunu olumlu etkilemektedir. İzotermal yaşlandırma işleminde ise gözlemlenen mekanizma ters yönde gerçekleşmektedir.



Şekil 5. 27 1000°C'de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) %ferrit - yaşlandırma süresi, b) %ferrit-izotermal yaşlandırma süresi grafiği

5.2.2.2 Yaşlandırma ve İzotermal Yaşlandırma Isıl İşlemi Parametrelerine Bağlı Yapıdaki İkincil Faz Oranı ve Ortalama Tane Boyutu

Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavlama işlemlerinde ferrit değişiminin yorumlanmasının ardından; bu bölümde aynı ısıl işlem şartlarında yapıdaki ikincil faz çekirdeklenmesi ve büyümesinin ne şekilde gerçekleştiği ele alınacaktır.

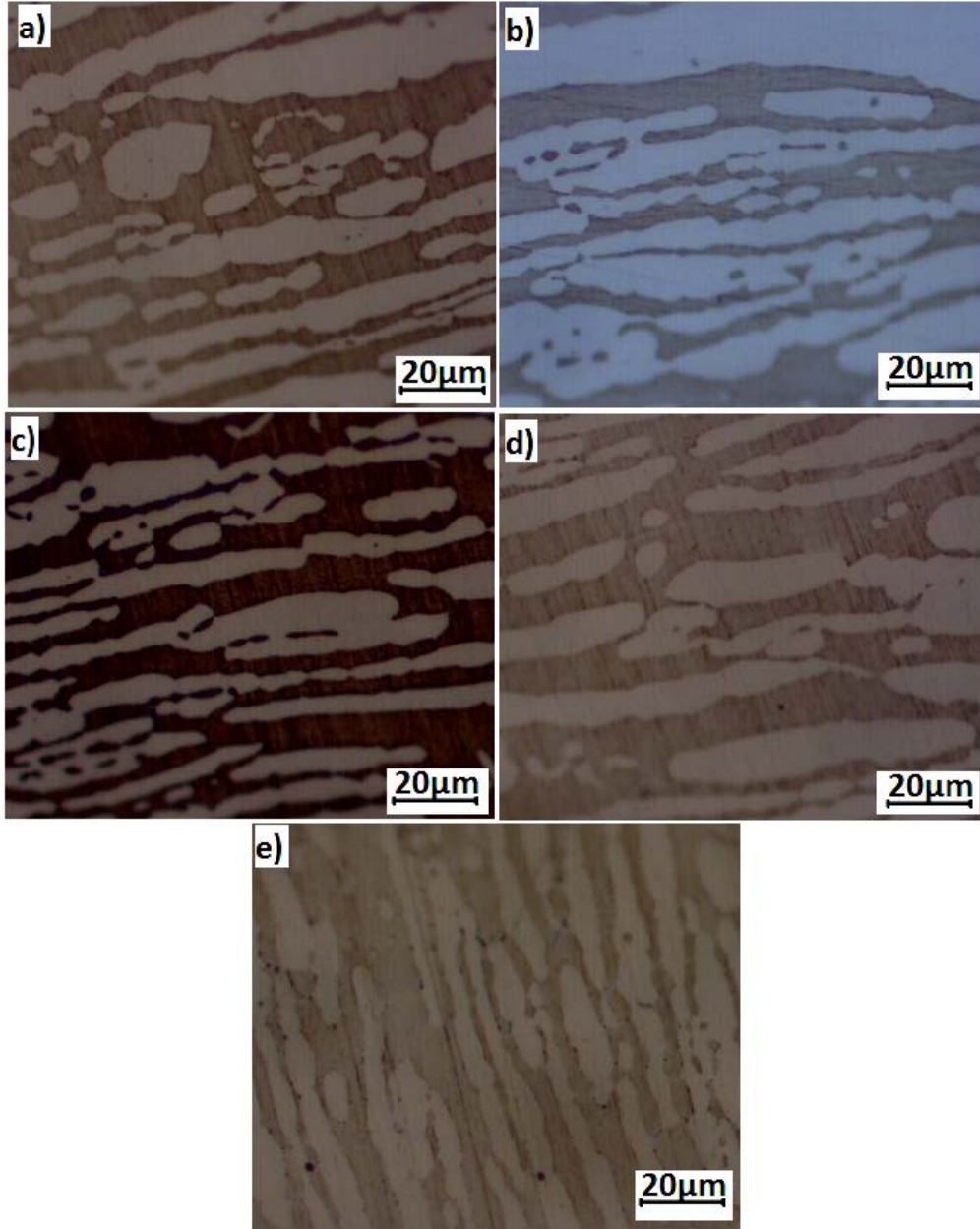
Çizelge 5. 4'te yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlem parametrelerine bağlı yapıdaki ikincil faz yüzdesi verilmiştir. Faz yüzdelerinin yorumlanması optik görüntülerle birlikte aşağıda yer almaktadır.

Çizelge 5. 4 Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlemi parametrelerine bağlı yapıdaki ikincil faz yüzdesi

		Yapıdaki İkincil Faz Miktarı (%)					
Yaşlandırma Tav Süresi		1000°C-1 Saat					
(dakika)	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)					
	650	800	950	650	800	950	
5	0	1,21	0	2,59	1,47	0	
10	0	2,1	0	2,62	1,9	0	
20	0	2,52	0	2,7	1,92	0	
30	0	2,73	0,9	2,85	2,89	0	
60	0,68	2,84	1,52	4,35	3,09	0	
Yaşlandırma Tav Süresi		1000°C-8 Saat					
(dakika)	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)					
	650	800	950	650	800	950	
5	0	1,61	0,26	1,05	0	0	
10	0	2,66	0,8	1,34	0	0	
20	0	3,65	1,01	1,78	0	0	
30	0	4,7	1,11	2,26	1,08	0	
60	0	5,79	1,23	2,38	3,23	0	
Yaşlandırma Tav Süresi		1000°C-10 Saat					
(dakika)	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)	İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)					
	650	800	950	650	800	950	
5	0	0	0	0,64	0	0	
10	0	2,23	0	0,71	0,58	0	
20	0	2,49	0,78	1,02	0,62	0	
30	0	4,33	0,8	1,33	0,93	0	
60	0	5,27	1,21	1,43	2,25	0	

İlk olarak, 1000°C’de 1 saat çözme tavının ardından 650°C’de yaşlandırma tavi uygulanan numuneler ele alınacaktır. Şekil 5. 28’de 500 büyütmedeki optik görüntüleri yer alan numunelerde 5, 10, 20 ve 30. dakikalarda ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmemektedir. Yaşlandırma tav süresi 60 dakika olan Şekil 5. 28’de verilen mikroyapıda ise δ/γ tane sınırında çok ince dokulu ikincil faz çökmesi mevcuttur. Bu

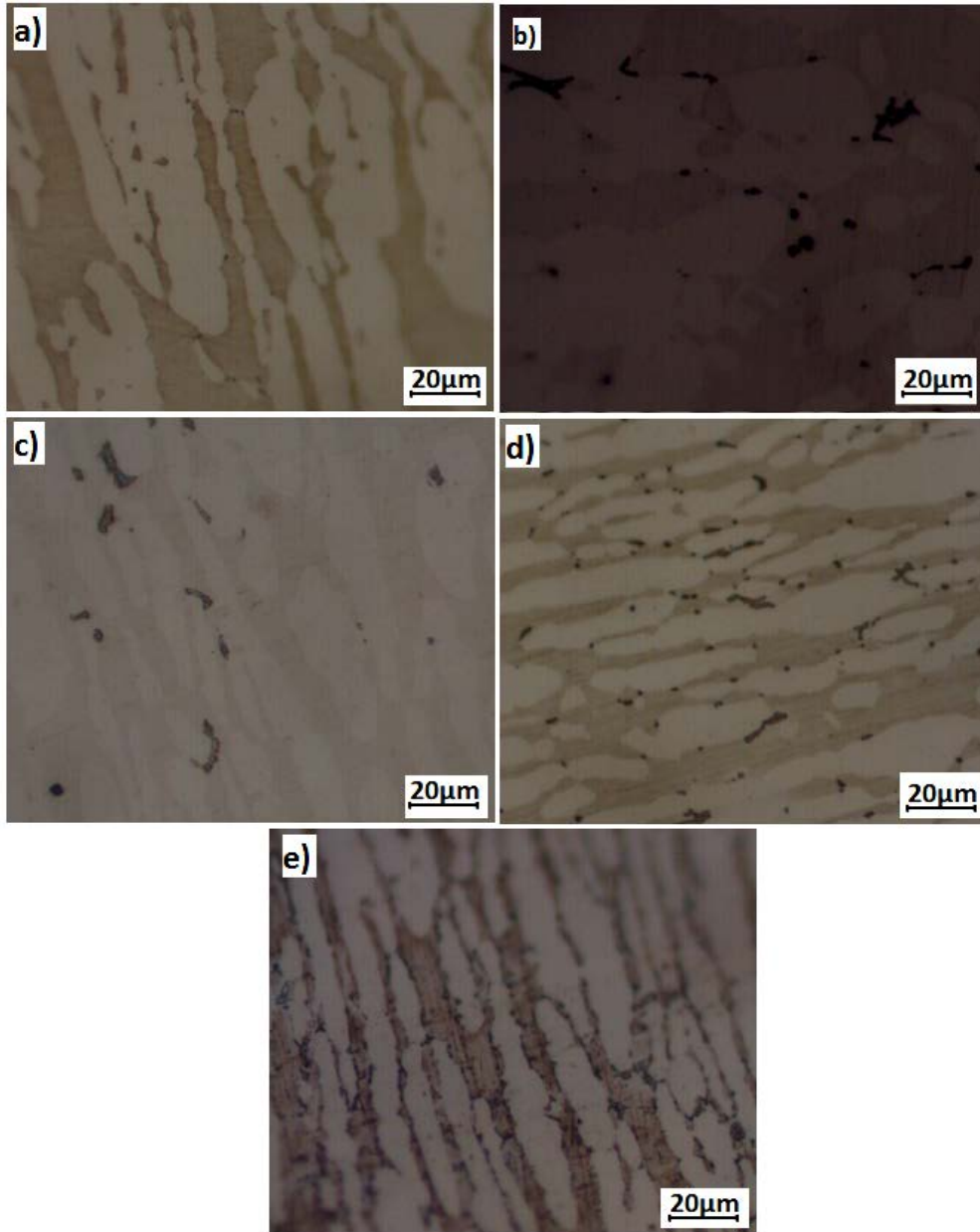
durum; 650°C'de ısıtma esnasında, uzun bekleme sürelerinde yapıda ikincil fazların çekirdeklenebileceğini göstermektedir.



Şekil 5. 28 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

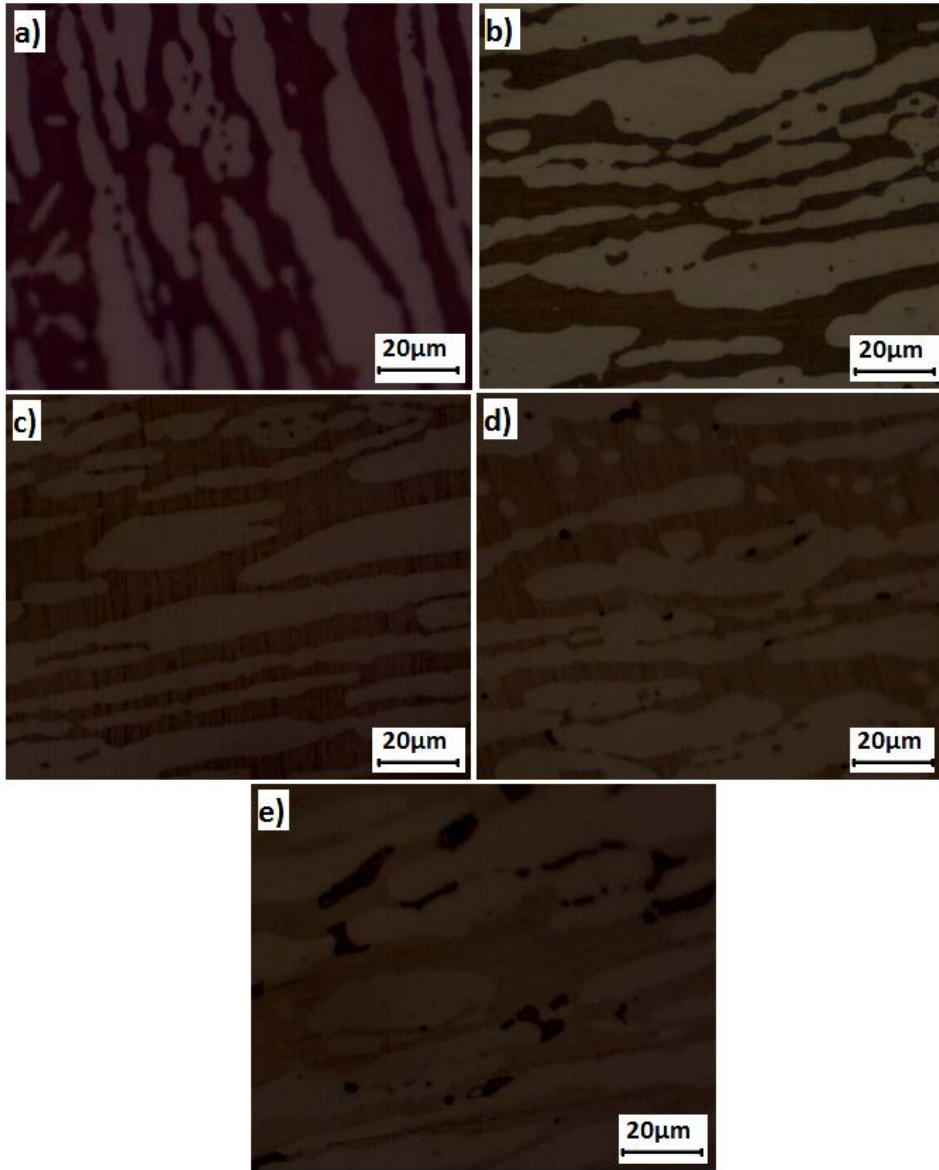
Şekil 5. 29'da 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 800°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 800°C ikincil fazların çekirdeklenmesi için ideal sıcaklıklardan biridir. Nitekim yaşlandırma işleminin 5. Dakikasından itibaren δ/γ tane sınırlarında ikincil faz çökmesi mevcuttur. Bölüm 5. 2. 1'de de belirtildiği üzere δ/γ tane sınırları gibi yüksek

enerjili bölgeler ikincil fazların çekirdeklenmesinin en kolay olduğu yerlerdir. İlk olarak bu bölgelerde çekirdeklenen ikincil fazlar zamanla δ -ferrit içine doğru büyüyerek gelişirler. Bu gelişimi Şekil 5. 29'da gözlemek mümkündür. Yaşlandırma süresi arttıkça hem mevcut ikincil fazların boyutları artmış; hem de tane sınırında çekirdeklenen ikincil fazlar miktarı artmıştır. İşlem sonunda ise yapıdaki ikincil faz oranı %1,21'den %2,84'e yükselmiştir.



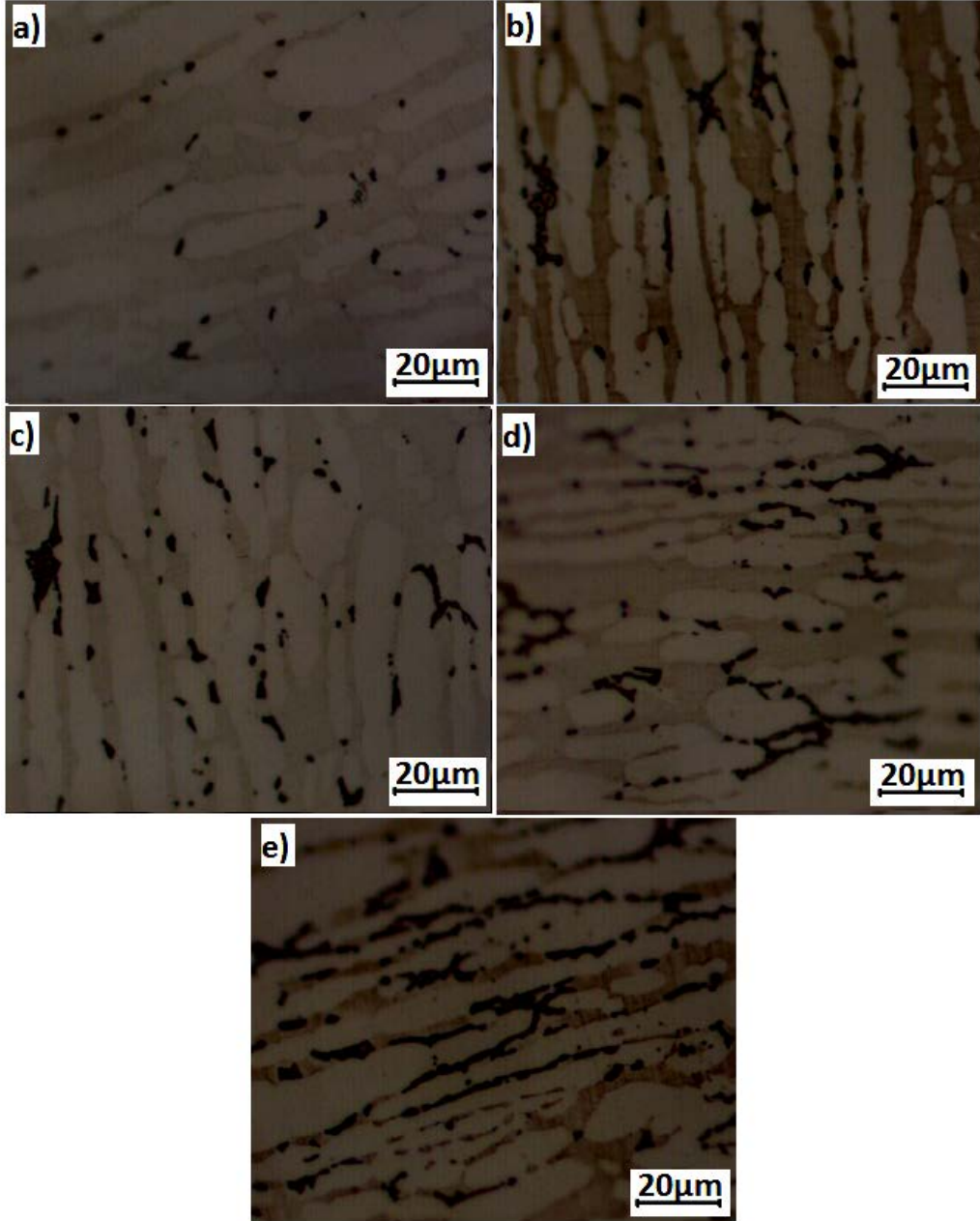
Şekil 5. 29 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Yaşlandırma tav sıcaklığı 950°C'ye çıktığında, ikincil fazların çekirdeklenmesi ancak görece yüksek beklentilerde mümkün olmuştur. Şekil 5. 30'da 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yaşlandırma işleminin ilk yarım saatine kadar herhangi bir ikincil faz oluşumu söz konusu değildir. 30. dakikada çekirdeklenmeye başlayan ikincil fazlar %0,9 oranındayken; 60. dakikada %1.52 oranına ulaşarak daha iri bir görünüm kazanmıştır. Şekil 5. 30'a bakıldığında; ikincil fazların yalnızca ferrit fazı içerisine doğru büyümediği göz çarpmaktadır. Bu durum; yapıyı 950°C'ye ısıttığımızda yapıda σ fazı dışında da ikincil fazların çekirdeklenebileceğini göstermektedir.



Şekil 5. 30 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

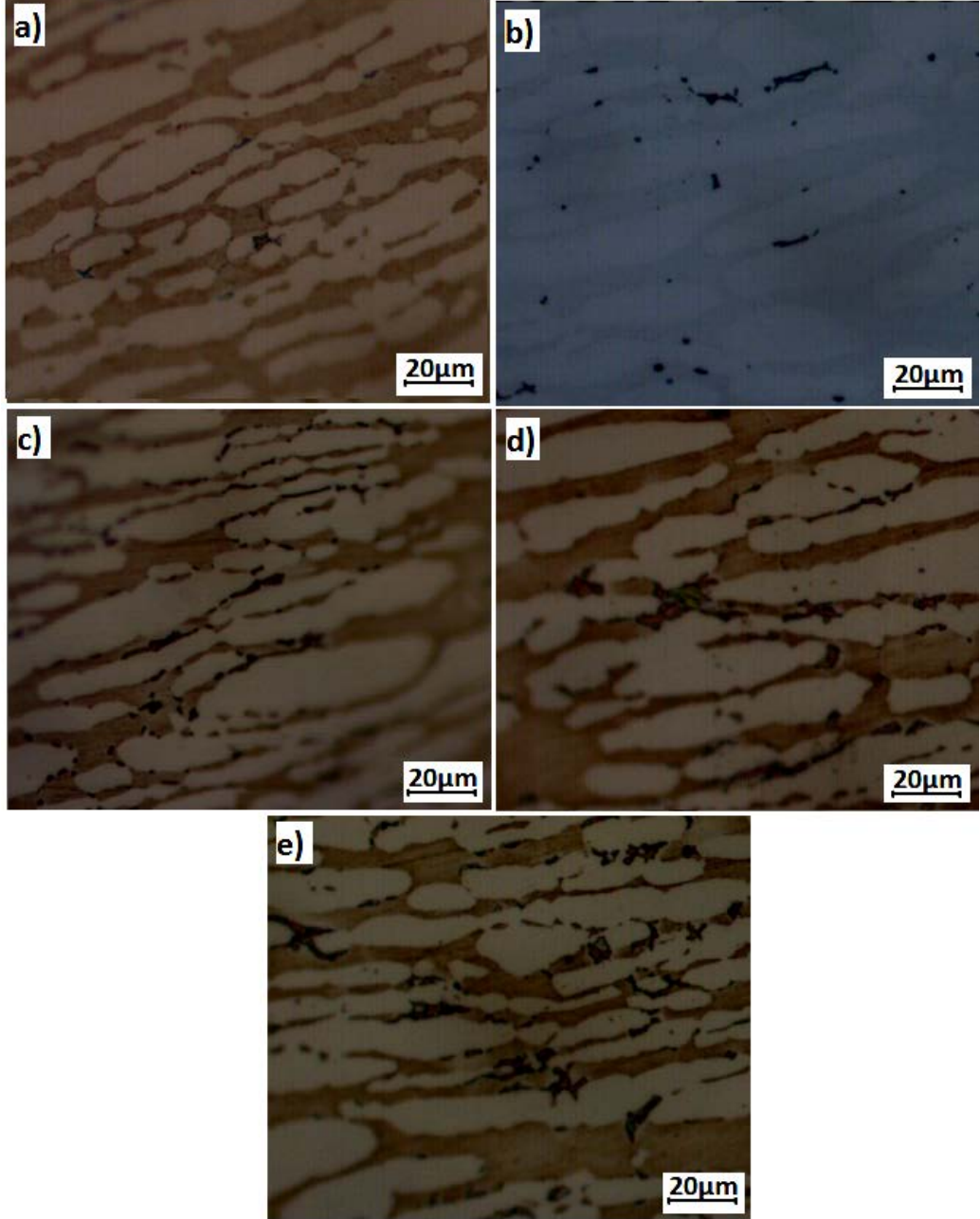
1000°C'de 1 saat çözme tavına tabi tutulan numunelere bu numuneleri yavaş soğutularak izotermal yaşlandırma işlemi uygulanmıştır. İzotermal yaşlandırma işleminin uygulandığı ilk sıcaklık 650°C'dir. Şekil 5. 31'de 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 650°C'ye yavaş soğutulan numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapıda 5. dakikadan itibaren ikincil fazların çekirdeklendiği gözlemlenmiştir. Geçen süre ile beraber δ/γ tane sınırında çekirdeklenen ikincil fazların bütün tane sınırı boyunca çekirdeklenip ferrit içine doğru büyüyerek geliştiği görülmektedir. 1000°C'den itibaren 650°C'ye yavaş soğutulan yapıda ikincil faz oranı 5. dakikada %2,59 iken 60. dakikada %4,35'e yükselmiştir. Bu durum, yavaş soğutma sırasında yapıda ikincil fazların çekirdeklendiğini; izotermal yaşlandırma işlemi sırasında ise yapıyı yoğun olarak kapladığı göstermektedir. Bekleme süresinin artmasıyla; ikincil fazların bütün ferriti tüketerek yapıyı kaplayacağı öngörülmektedir [13].



Şekil 5. 31 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 800°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma işleminde oluşan ikincil faz miktarı 650°C'de aynı şartlarda oluşan ikincil faz miktarından daha azdır. Bunun nedeni; yapıda 650-800°C arasında ikincil fazların çekirdeklenmeye devam etmesidir. Şekil 5. 32'de 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından 800°C'de izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. İzotermal yaşlandırma işleminin 5. dakikasında %1,47 olan ikincil faz oranı 60. dakikanın sonunda %3,09 olarak ölçülmüştür. δ -ferrit ve

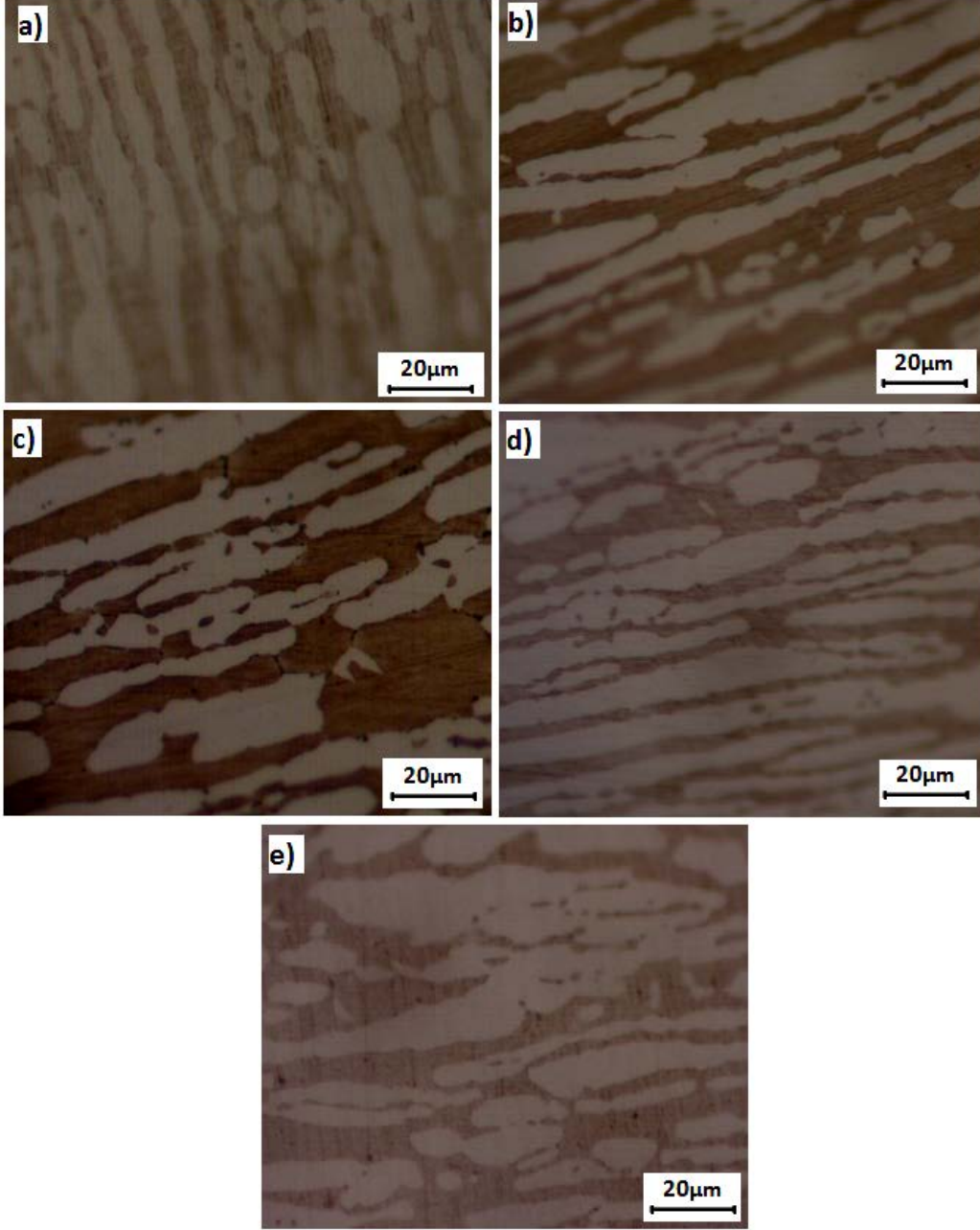
östenit tane sınırında çekirdeklenmeye başlayan ikincil fazlar zaman geçtikçe tane sınırı boyunca ince bir doku haline çekirdeklenmeye devam etmiş; bir yandan da ferrit içerisine doğru büyümüştür.



Şekil 5. 32 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 33'de 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Yapıda 60 dakikanın sonunda herhangi bir ikincil faz çökmesi tespit edilmemiştir. Bu durum,

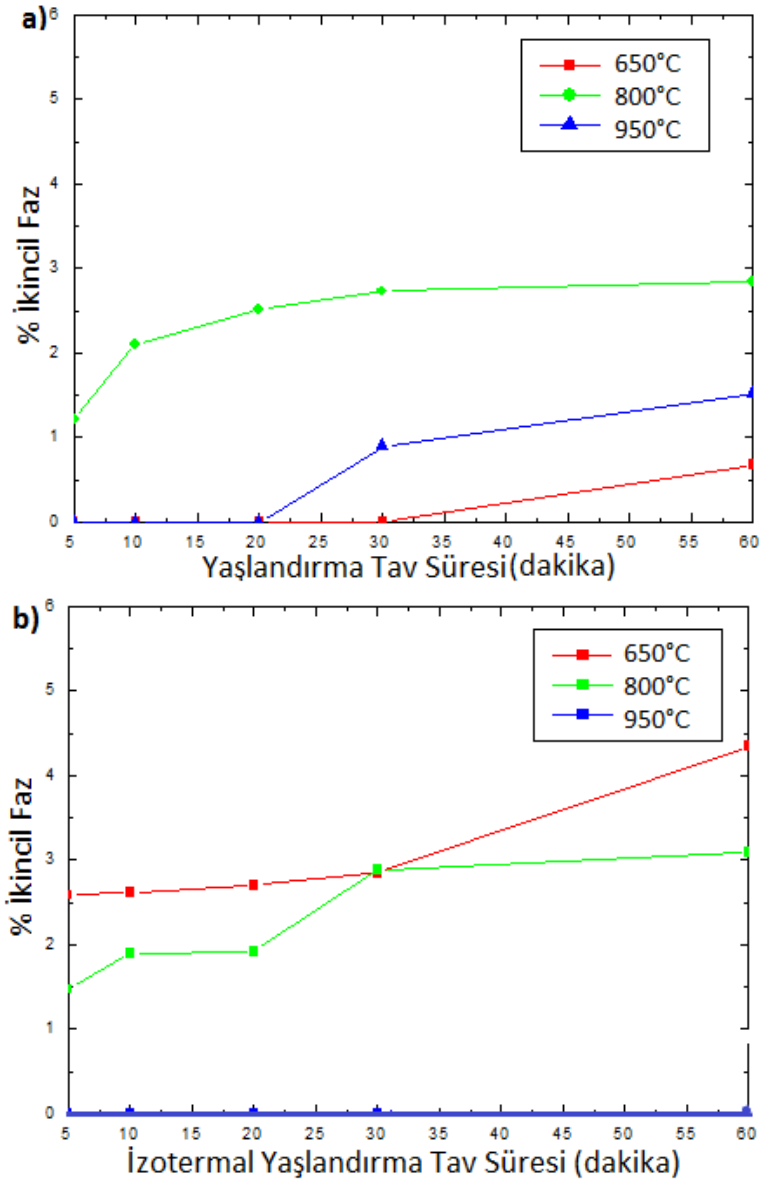
yapıda ötektoid dönüşümün soğutma esnasında 950'ye kadar ikincil faz oluşturmadığını göstermektedir.



Şekil 5. 33 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

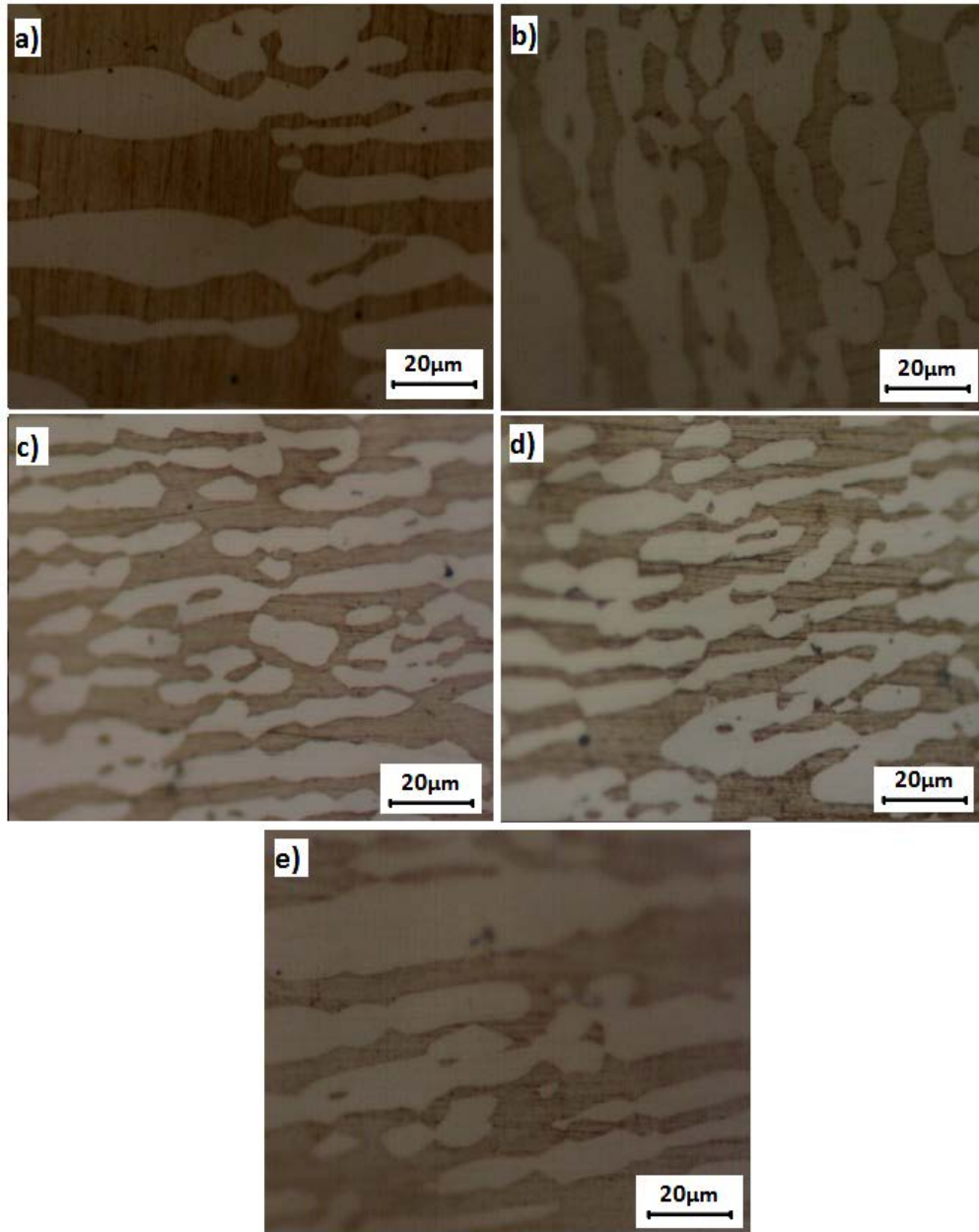
Yapıdaki genel değişimi görmek amacıyla, Şekil 5. 34'te 1000°C'de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çelikte yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma şartlarında oluşan ikincil faz oranlarına ait grafikler verilmiştir. Yaşlandırma ısıl işleminde 800°C'de en yüksek oranda ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmiştir. Geçmişte yapılan çalışmalarda da sigma fazı çekirdeklenmesinin 800-850°C'de en fazla olduğu

belirtilmiştir [69]. İzotermal yaşlandırma ısıl işleminde 650°C’de en yüksek oranda sigma fazı çekirdeklenmektedir. Bunun nedeni yavaş soğutma süresince yapıda ikincil fazların çekirdeklenmesini sürdürmesidir.



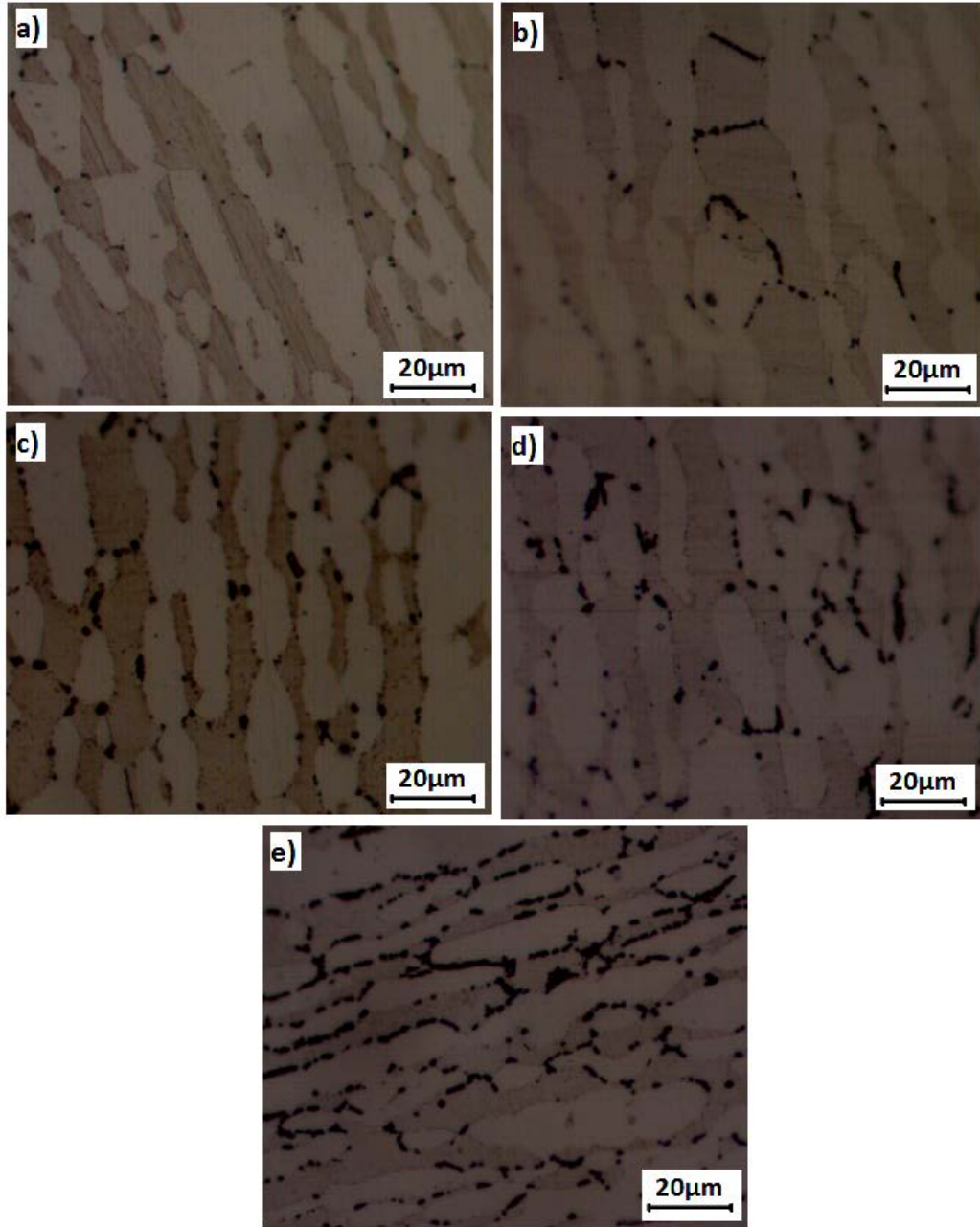
Şekil 5. 34 1000°C’de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) % ikincil faz-yaşlandırma süresi, b) % ikincil faz- izotermal yaşlandırma süresi grafiği

Şekil 5. 35’te 1000°C’de 8 saat çözme tavinin ardından 650°C’de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 1 saat çözme tavisinde olduğu gibi 8 saatte de herhangi bir ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmemektedir. Bu durum ısıl işlem sıcaklığının ya da süresinin yetersiz olmasından kaynaklanmaktadır.



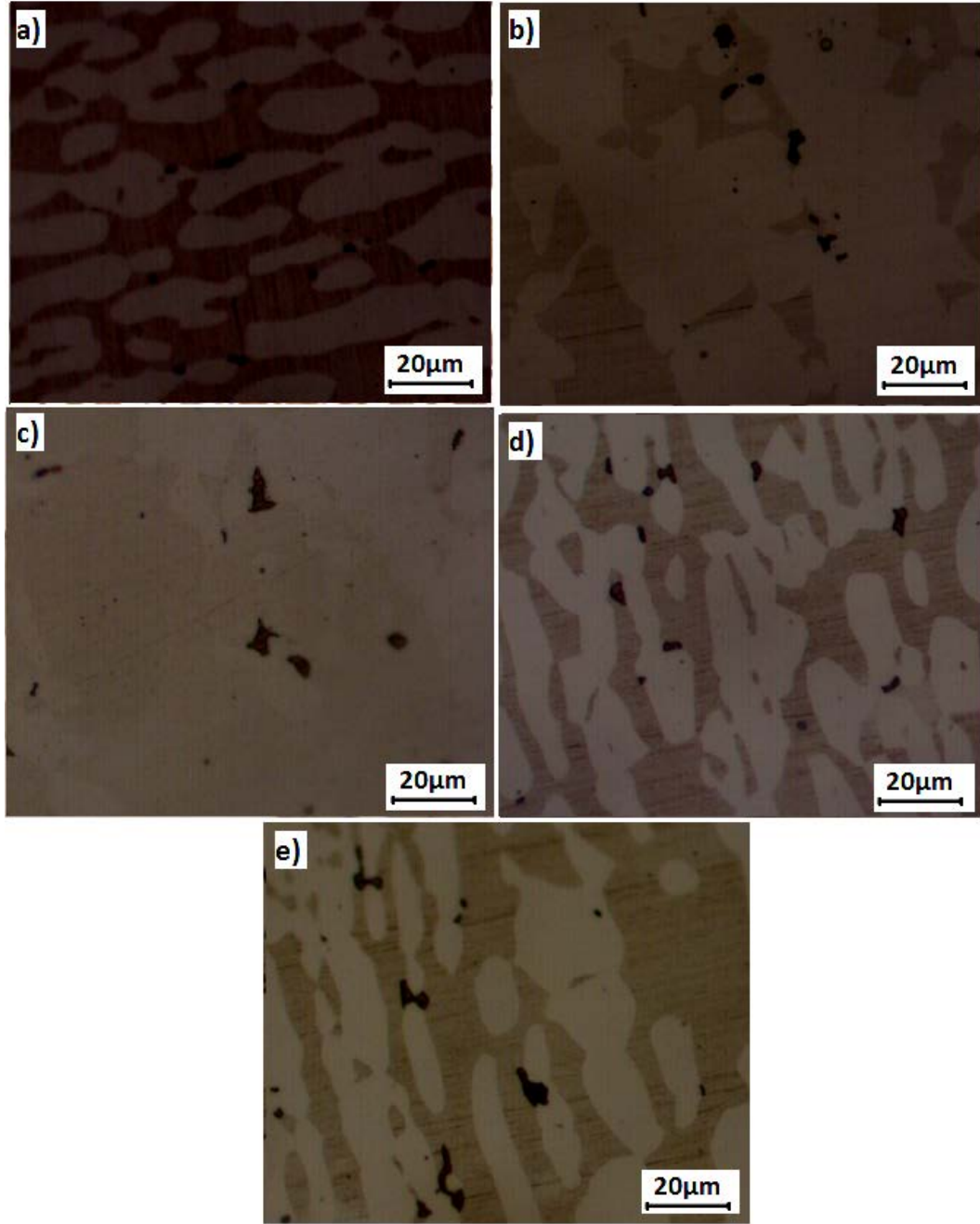
Şekil 5. 35 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 36'da 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 800°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Isıtma şartlarında 800°C ikincil fazların çekirdeklenmesi için uygun bir sıcaklıktır. 5. dakikada tane sınırlarında çekirdeklenmeye başlayan ikincil faz miktarı zamanla artmış ve %1,61'den %5,79'a ulaşmıştır. 1 saatte aynı şartlarda yapılan ısıl işleme göre ikincil faz miktarının artması yapıdaki ferrit miktarının artmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5. 36 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

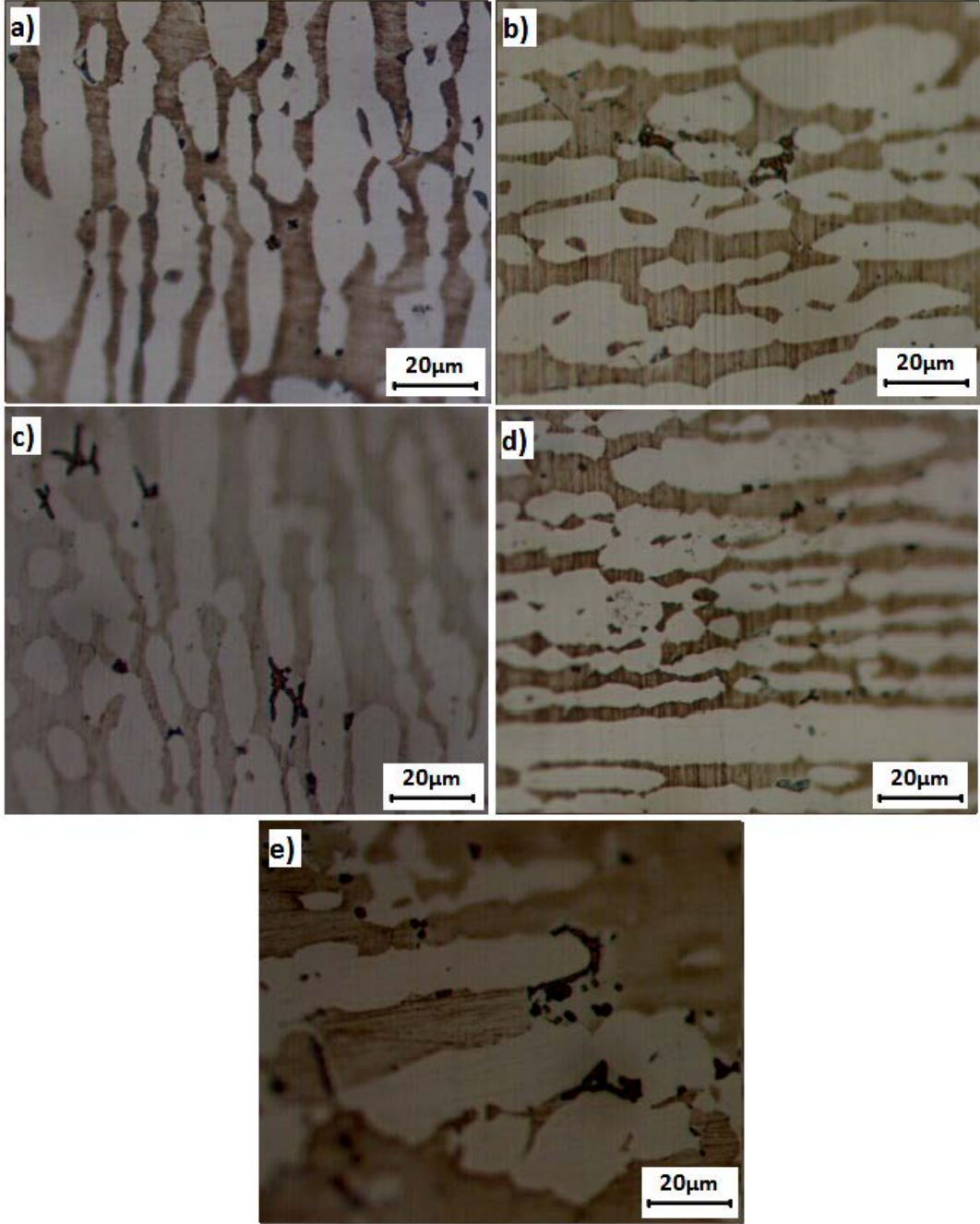
8 saatlik çözme tavındaki son yaşlandırma ısıl işlemi 950°C'de uygulanmıştır. Şekil 5. 37'de 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 950°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Isıtma şartlarında 950°C'de yapıda ikincil fazlara rastlanmıştır. Bunun nedeni; ya daha düşük sıcaklıklarda oluşan fazların henüz yapı içerisinde çözünmemesi; ya da bu sıcaklıkta da ötektoid dönüşümden dolayı yapıda ikincil faz çekirdeklenmesinin devam etmesidir. 5. dakikada 0,26 olan ikincil faz oranı zaman içinde 1,26'ya yükselmiştir.



Şekil 5. 37 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından yapı yavaş soğutularak izotermal yaşlandırma ısı işlemi uygulanmıştır İlk olarak; Şekil 5. 38'de 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 650°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma tav numunelerine ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 1 saat çözme tavınının uygulandığı numunede olduğu gibi soğutma esnasında yapıda ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmektedir. δ -ferrit-östenit tane sınırında çekirdeklenen fazlar

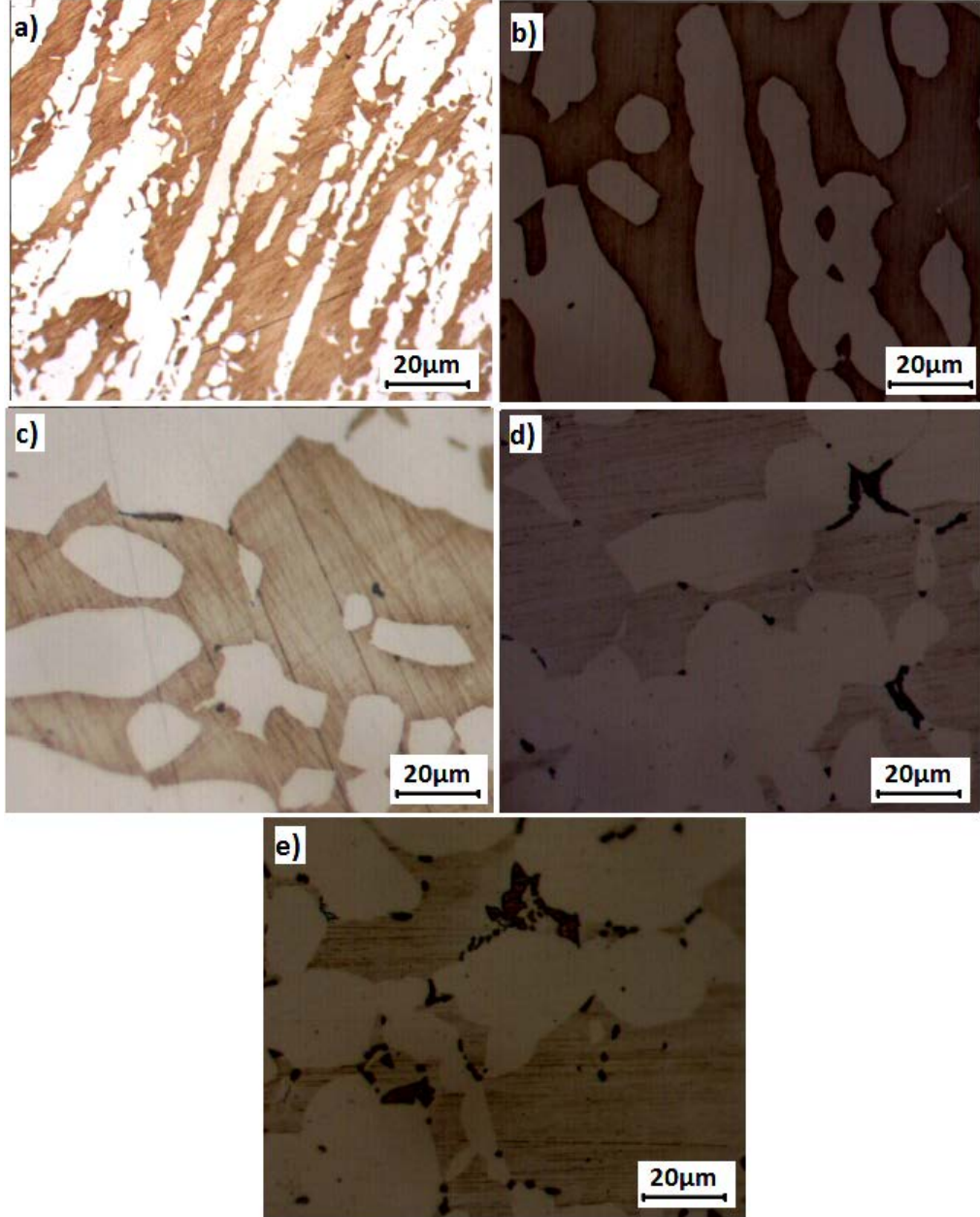
ferrit içerisine doğru gelişmektedir. 5. dakikada 1,05 olan ikincil faz miktarı 60. dakikada 2,38'e yükselmiştir.



Şekil 5. 38 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

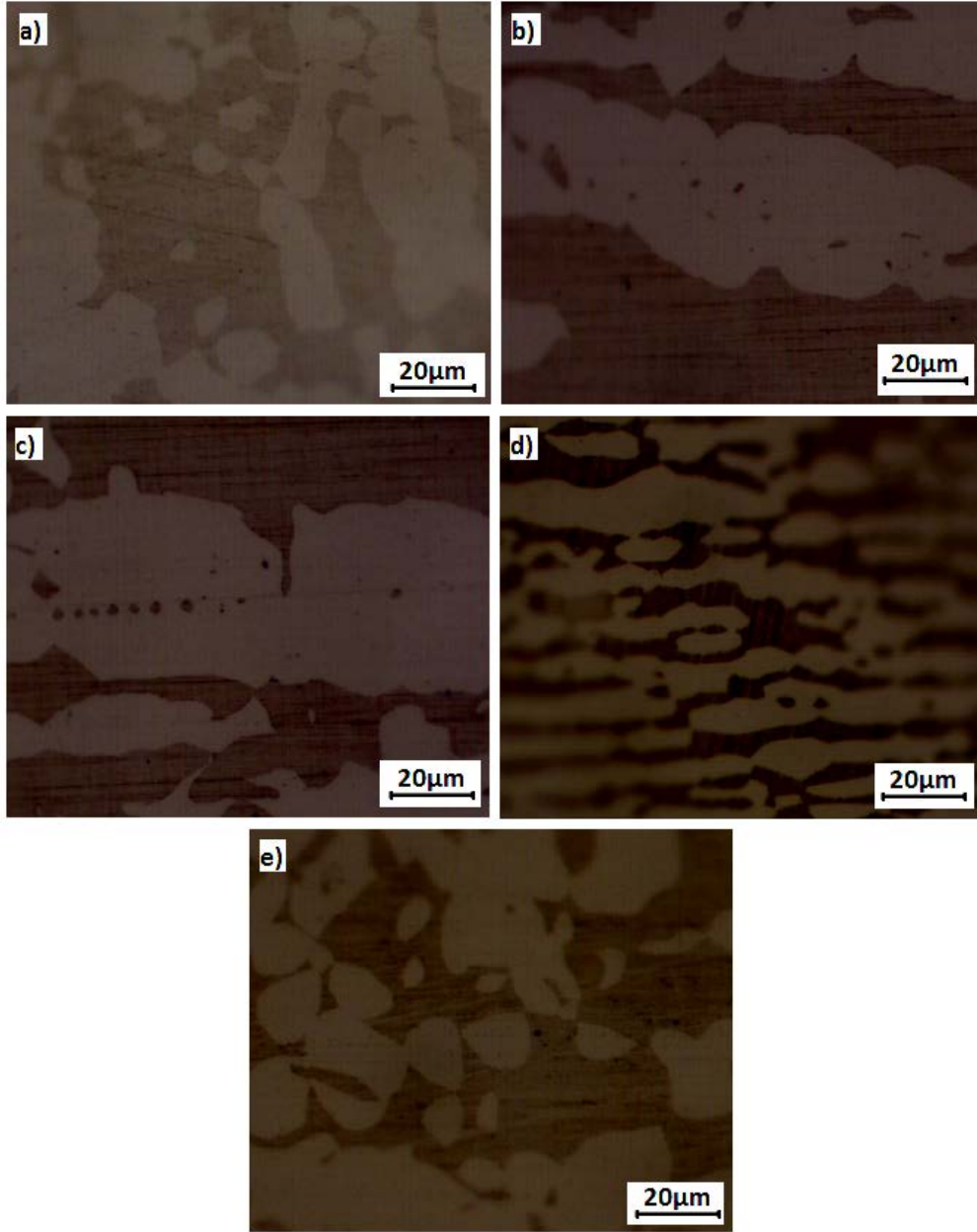
Şekil 5. 39'da 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 800°C'de izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Burada yer alan dokularda, Bölüm 5.2.1'de bahsedilen yeniden kristalleşme mekanizmasının etkisiyle yapıdaki yönlendirilmiş ferrit tanelerinin bir miktar yuvarlaklaşmış olduğu

gözlemlenmektedir. Ayrıca irileşen ferrit taneleri nedeniyle, yapıda ikincil tanelerin çekirdeklenme potansiyeli olan tane sınırı sayısı azalmış ve bu nedenle ikincil fazlar ancak 20 dakikadan itibaren çekirdeklenme imkanı bulmuştur.



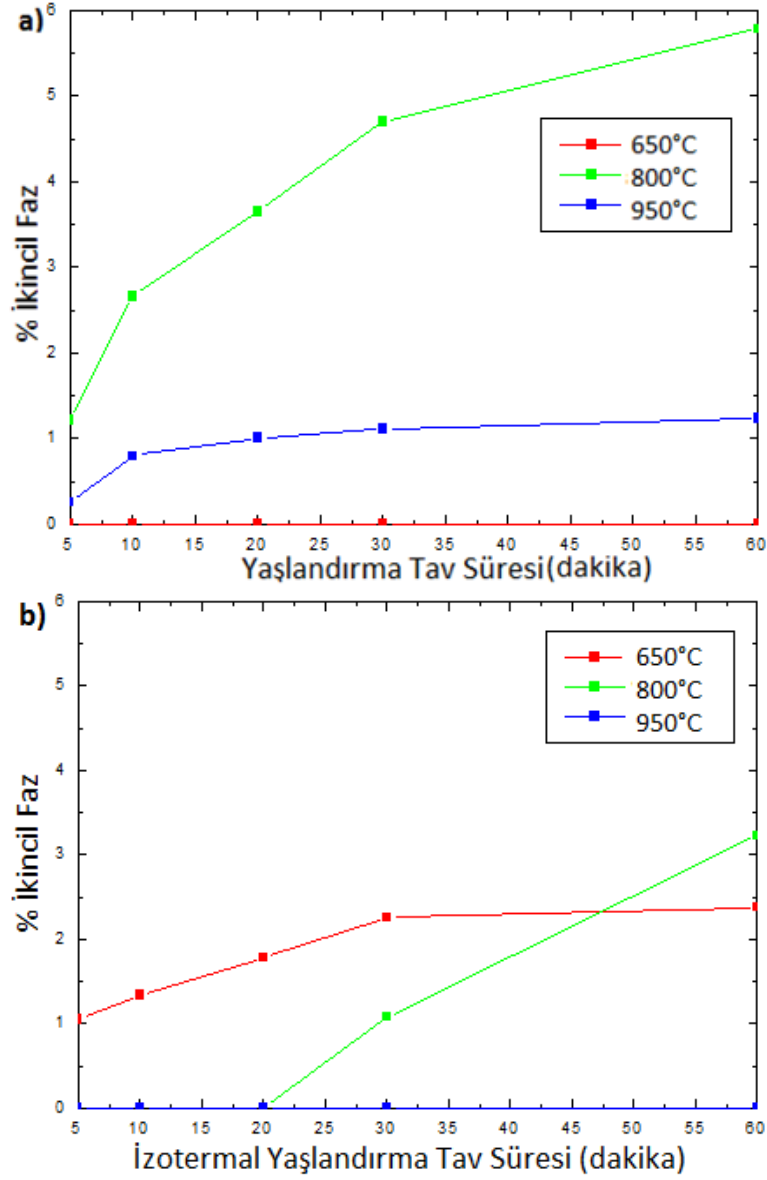
Şekil 5. 39 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 40 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından 950°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 1 saat çözme tavinin uygulandığı numunede olduğu gibi yapıda ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmemektedir.



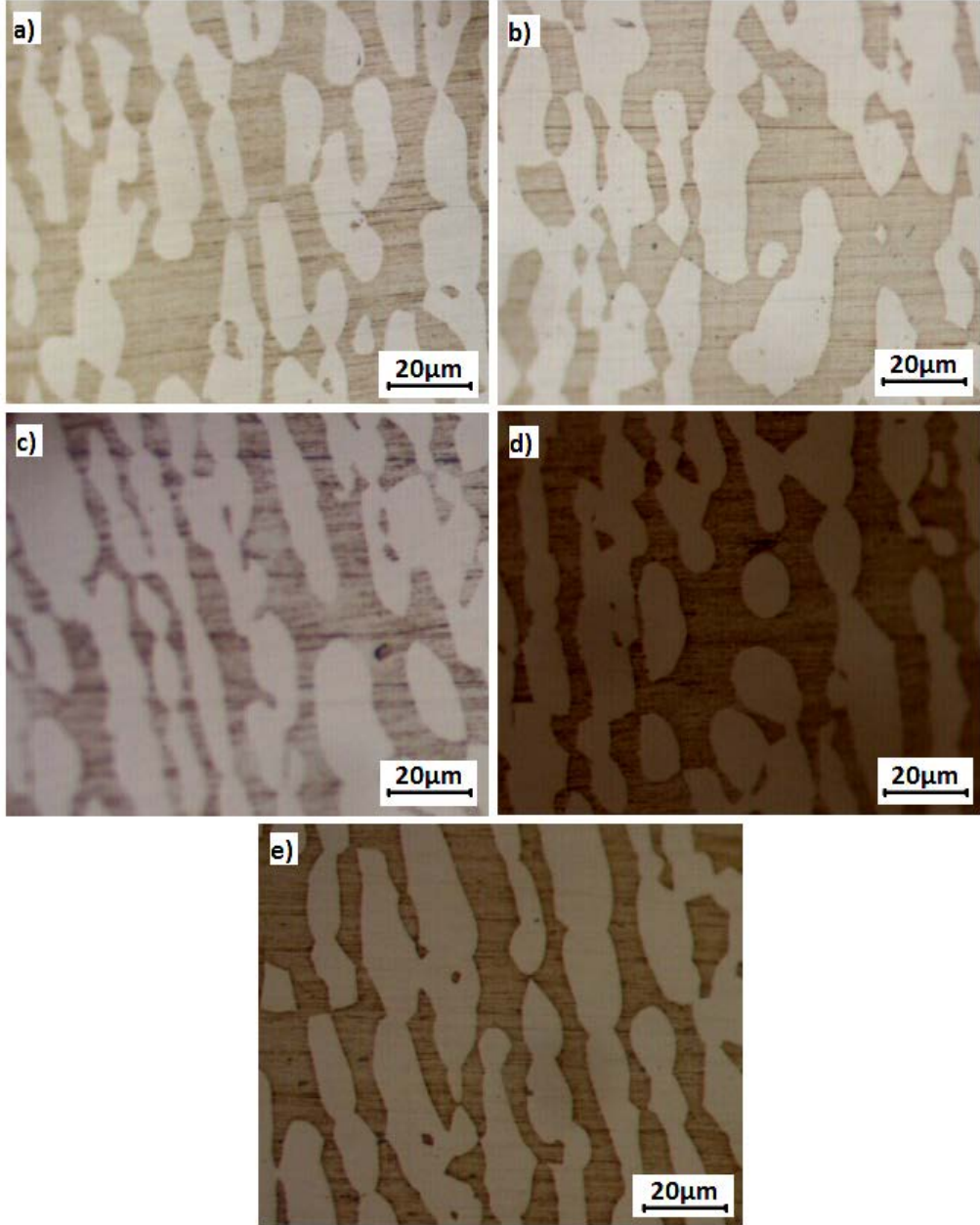
Şekil 5. 40 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

1000°C'de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çelik yapısındaki genel değişim Şekil 5. 41'de, yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma şartlarına ait grafiklerle verilmiştir. Yaşlandırma ısıl işleminde ikincil fazların en yoğun çekirdeklendiği sıcaklık 800°C iken, izotermal yaşlandırma şartlarında bu sıcaklık 650°C'dir. Ancak 60 dakika yapılan ısıl işlem sonucun 800°C'de daha fazla ikincil faz oluşmuştur.



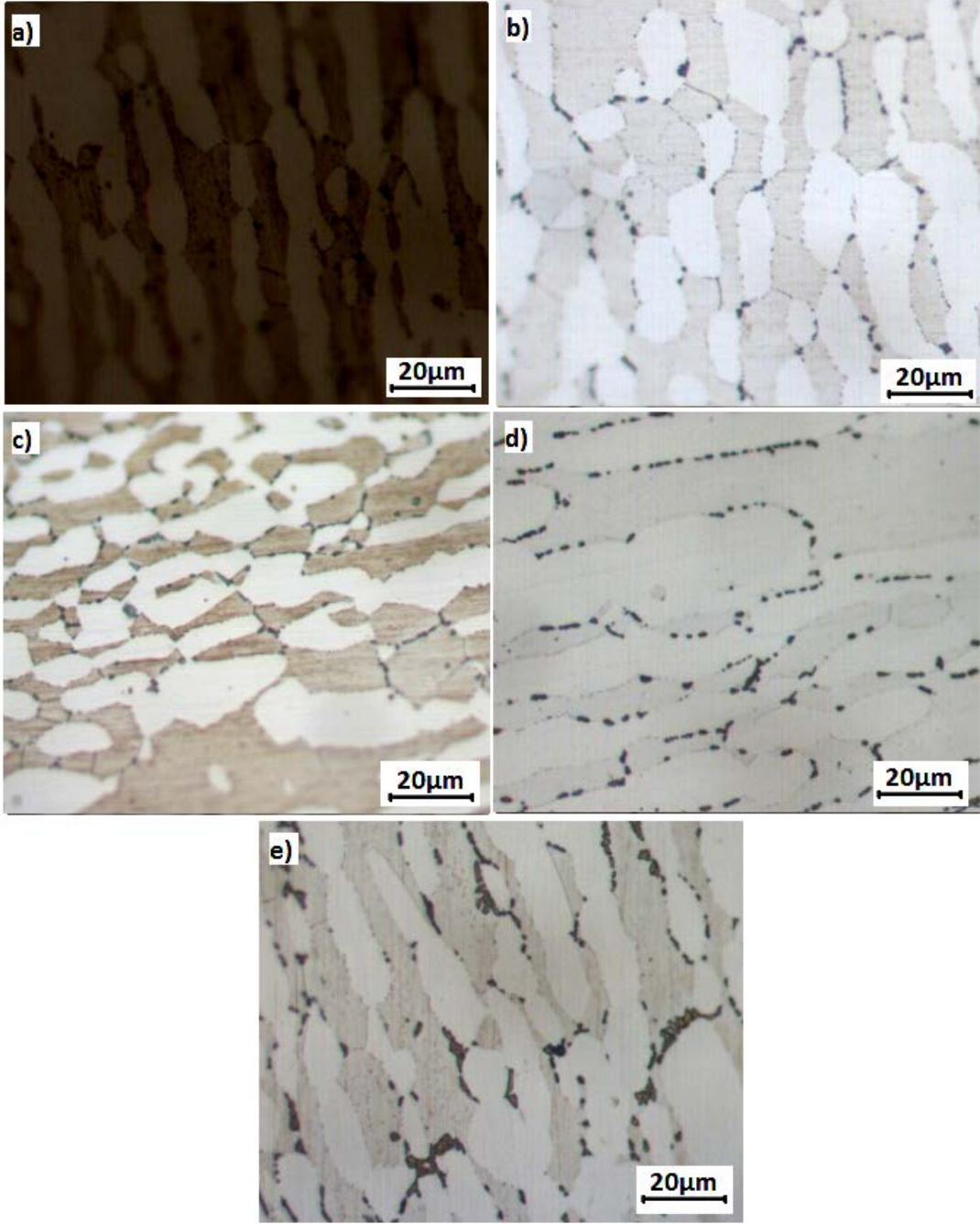
Şekil 5. 41 1000°C' de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) % ikincil faz-yaşlandırma süresi, b) % ikincil faz- izotermal yaşlandırma süresi grafiği

Son gruptaki malzemeler 10 saat çözme tavinin ardından yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5. 42'de 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 650°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. 1 ve 8 saatlik çözme tavinde olduğu gibi 10 saatte uygulanan yaşlandırma ısıl işlemi de 650°C ikincil faz oluşumu için yeterli bir sıcaklık değildir. Bu durum yaşlandırma ısıl işlem süresinin yetersizliğinden de kaynaklanabilir.



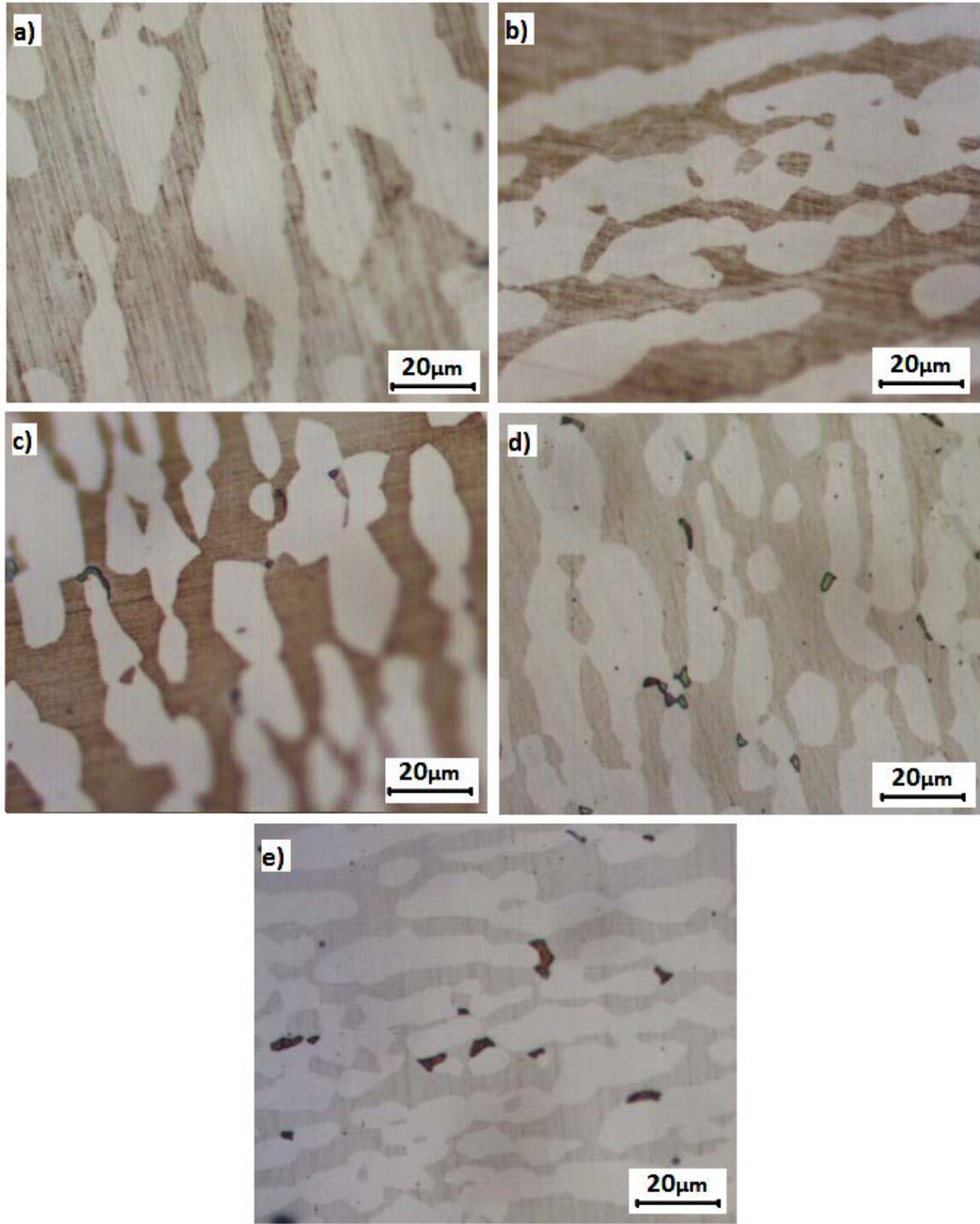
Şekil 5. 42 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 43'te 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 800°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Şekilde de görüldüğü gibi, ısıtma şartlarında 800°C ikincil faz oluşumu için optimum sıcaklıklardan biridir. Nitekim 10 dakikalık ısıl işlemden itibaren δ -ferrit ve östenit tane sınırında çekirdeklenen ikincil fazlar göze çarpılmaktadır. Yaşlandırma tav süresi ile doğru orantılı olarak artan ikincil faz miktarı %5,27'ye kadar yükselmiştir.



Şekil 5. 43 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

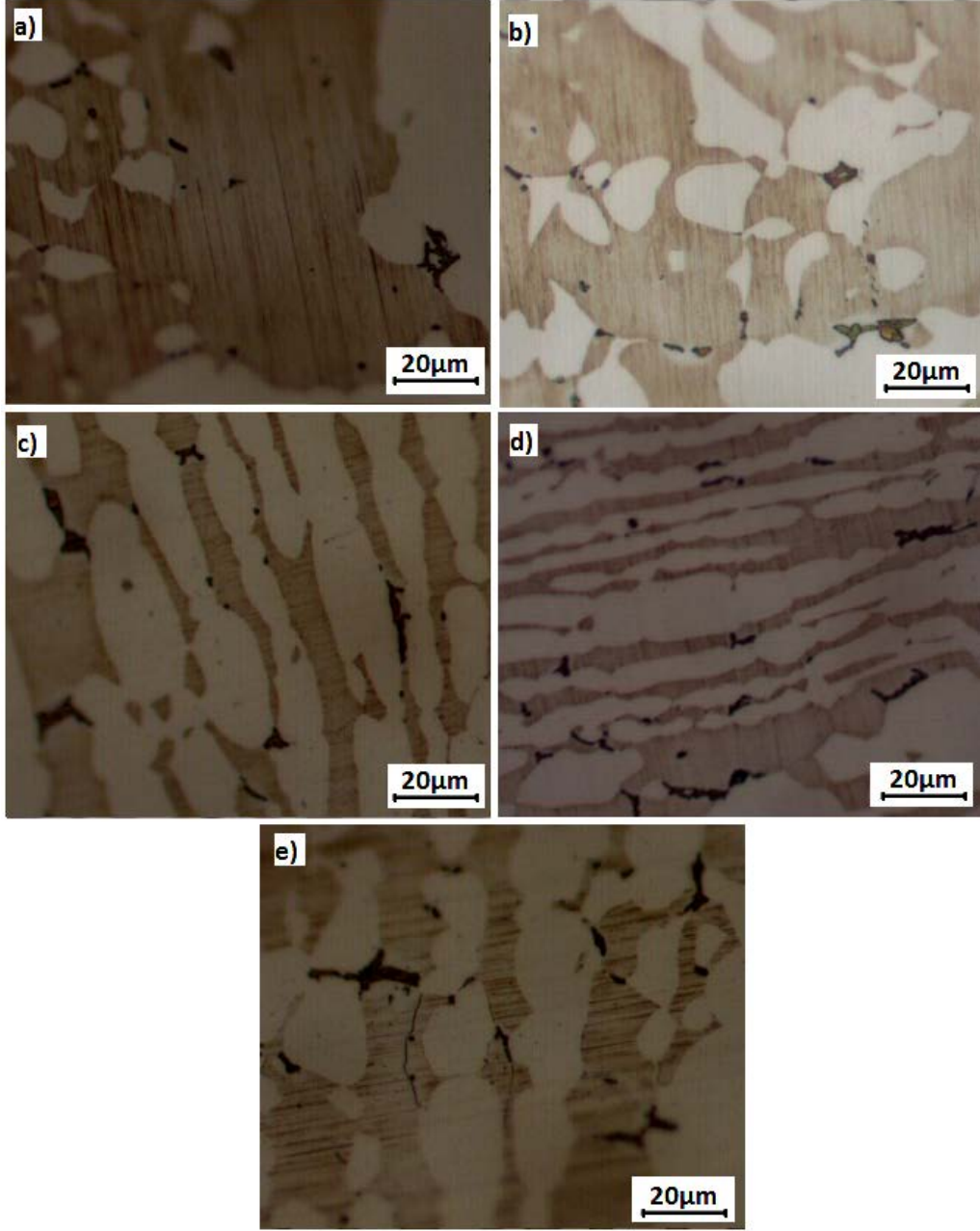
1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de uygulanan yaşlandırma tavinin ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5. 44'te verilmiştir. 8 saatlik çözme tavinin olduğu gibi yapıda az da olsa ikincil fazlar mevcuttur. 20. dakikadan itibaren çekirdeklenen ikincil faz miktarı %0,78'den %1,21'e yükselmiştir.



Şekil 5. 44 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

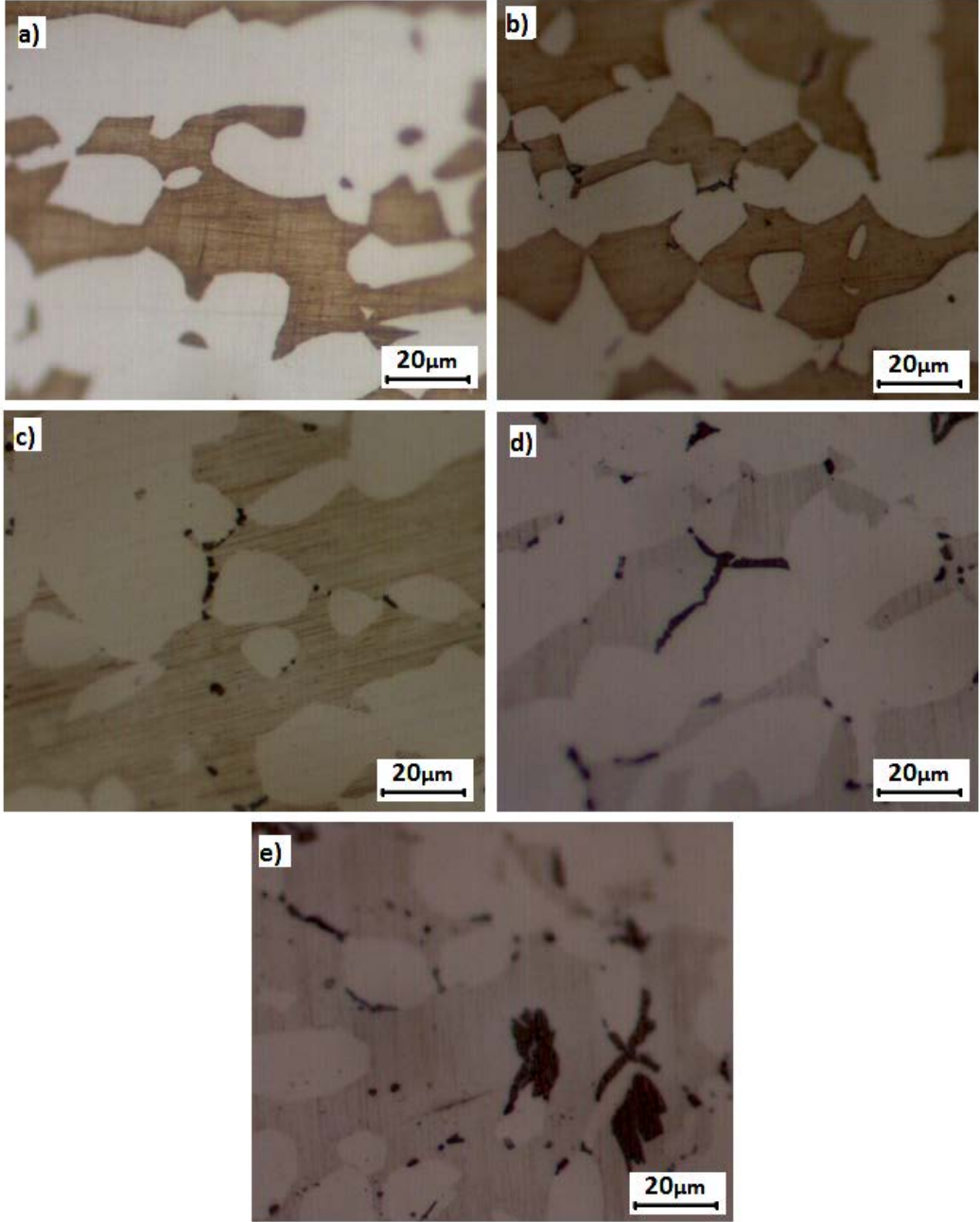
İzotermal yaşlandırma işleminin uygulandığı son grup 10 saat çözme tavi tabii tutulan malzemelerdir. İlk olarak 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 650°C'de izotermal yaşlandırma tavi uygulanmıştır. Bu numunelere ait optik mikroskop görüntüleri Şekil 5. 45'te verilmiştir. 1 ve 8 saat çözme tavinin uygulandığı numune gruplarında olduğu gibi 650°C soğutma şartlarında ikincil faz oluşumuna çok müsait bir sıcaklıktır. 1000°C'den itibaren soğumaya bırakılan yapıda, çekirdeklenen ikincil faz miktarı izotermal

yaşlandırma süresiyle orantılı bir artış göstermiştir. Yapıdaki ikincil faz miktarı 5. dakikada %1,05 iken 60. dakikada %2,38'e yükselmiştir.



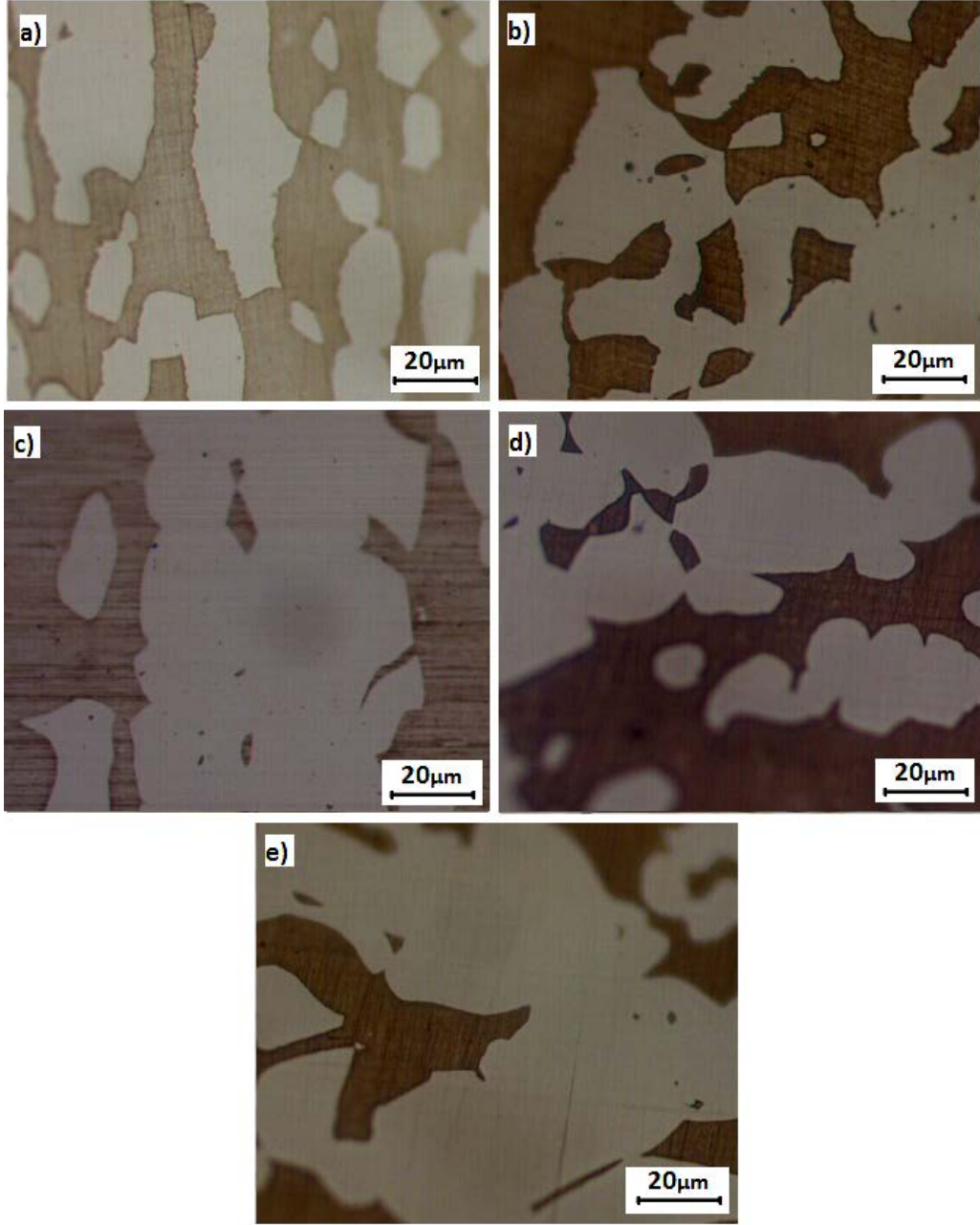
Şekil 5. 45 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 650°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 46'da 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 800°C'de izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. İlk 5 dakikada herhangi bir ikincil faz çökmesi gözlemlenmezken 10. dakikadan itibaren çekirdeklenmeye başlamış ve oluşan bu ikincil fazlar 60. dakikada oldukça irileşmiştir.



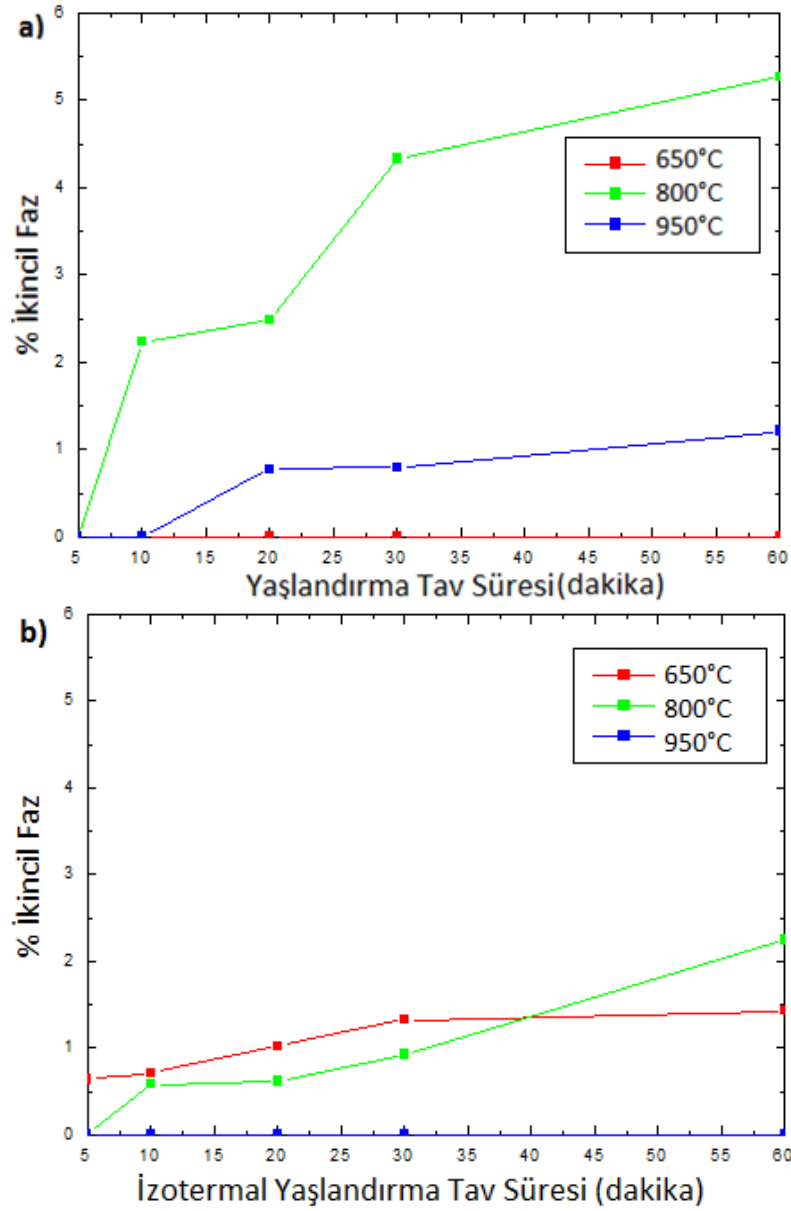
Şekil 5. 46 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 800°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Şekil 5. 47'de 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Bu sıcaklık, 1 ve 8 saatlik çözme tavinin ardından uygulanan izotermal yaşlandırma tav numunelerinde olduğu gibi, ikincil faz oluşumu için çok yüksek bir sıcaklıktır. Bu nedenle ikincil fazlar 950°C'de tutma sırasında çekirdeklenememektedir. Bu durum, malzemede soğutma şartlarında ikincil faz oluşumunun 950°C'nin altında gerçekleştiğini göstermektedir.



Şekil 5. 47 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de a) 5 dakika, b) 10 dakika, c) 20 dakika, d) 30 dakika ve e) 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait 500 büyütmedeki optik mikroskop görüntüleri

Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma şartlarında oluşan ikincil faz oranlarının genel değişimini görmek amacıyla, Şekil 5. 48'de 1000°C'de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çelik ait grafikler verilmiştir. Yaşlandırma ısıl işlem şartlarında ikincil fazlar, 1 ve 8 saat çözme tavi uygulanan numunelerde olduğu gibi, 800°C'de en yoğun şekilde oluşmuştur. İzotermal yaşlandırma ısıl işlem şartlarında ise ilk başlarda 650°C'de daha fazla miktarda ikincil faz oluşurken 60. dakikadan itibaren 800°C'de daha fazla miktarda ikincil faz çökmesi meydana gelmiştir.



Şekil 5. 48 1000°C'de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) % ikincil faz-yaşlandırma süresi, b) % ikincil faz- izotermal yaşlandırma süresi grafiği

Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlemlerinin yapıdaki ikincil faz oranına etkisinin incelenmesinin ardından, bu koşullarda çökelen ikincil fazların iki eksen baz alınarak ortalama tane boyutları μm cinsinden hesaplanmıştır. Çizelge 5. 5'te yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlem parametrelerine bağlı yapıdaki ikincil fazların ortalama tane boyutu verilmiştir.

Çizelge 5. 5 Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlem parametrelerine bağlı yapıdaki ikincil fazların ortalama tane boyutu (μm)

		Yapıdaki İkincil Fazların Ortalama Tane Boyutu (μm)					
Yaşlandırma Tav Süresi	1000°C-1 Saat						
	(dakika)	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)		
		650	800	950	650	800	950
5		-	0,85	-	6,8	0,9	-
10		-	2,97	-	9,1	3,7	-
20		-	4,7	-	9,7	5,4	-
30		-	4,85	3,8	10,5	5,35	-
60		0,5	4,90	7,2	11,1	6,78	-
Yaşlandırma Tav Süresi	1000°C-8 Saat						
	(dakika)	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)		
		650	800	950	650	800	950
5		-	1,9	3	3,1	-	-
10		-	3,7	6,3	4,9	-	-
20		-	4,5	6,8	5,7	-	-
30		-	7,7	6,9	6,6	8,5	-
60		-	10,3	7,4	12,4	8,8	-
Yaşlandırma Tav Süresi	1000°C-10 Saat						
	(dakika)	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)		
		650	800	950	650	800	950
5		-	-	-	5,5	-	-
10		-	3,1	-	6,8	-	-
20		-	5,5	4,2	9,4	4	-
30		-	7,1	4,9	10,1	7,1	-
60		-	8,1	6,4	11,9	10,4	-

1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavinin ardından 650°C'de yapılan yaşlandırma ısıl işlem koşullarında, 1000°C'de 1 saat tavlama suya atılan ardından 650°C'de 60 dakika tavlama malzeme dışında, ikincil faz oluşumu gözlemlenmemiştir. Ayrıca 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavinin ardından 950°C'de yapılan izotermal yaşlandırma ısıl işlem koşullarında da ikincil faz oluşumu gözlemlenmemiştir.

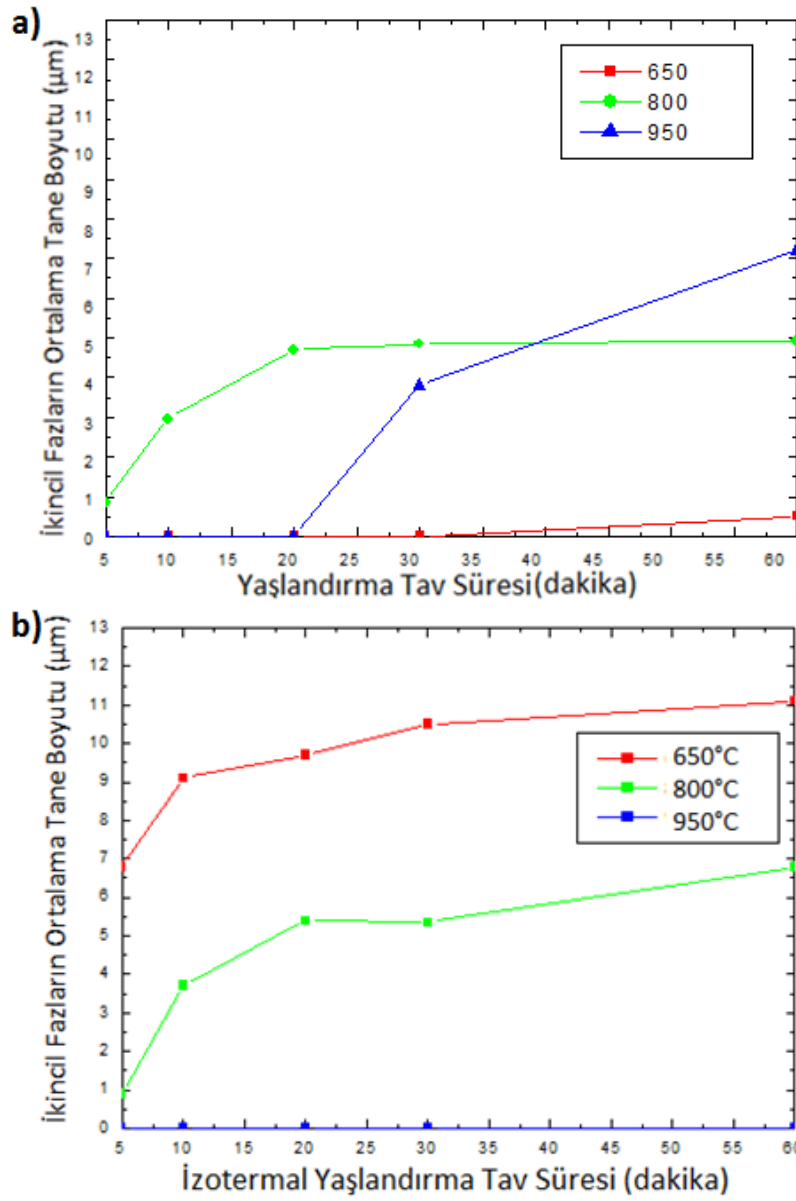
Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlemlerinde ikincil fazların oluşum mekanizması farklı şekilde gerçekleşmektedir. Yaşlandırma ısıl işlemi, bu çalışmada

uygulanan sıcaklıklarda, ikincil fazların en yoğun olduğu sıcaklık 800°C iken; izotermal yaşlandırma ısıl işleminde bu sıcaklık 650'dir. Şekil 5. 49'da 1000°C' de 1 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlem koşullarında oluşan ikincil fazların ortalama tane boyutu grafiği verilmiştir. Yaşlandırma işlemi esnasında ikincil fazların ortalama tane boyutu 0,85 µm'den 4,9 µm'ye yükselmiştir. İkincil fazların çekirdeklenmesi ve büyümesi difüzyon temelli bir mekanizmadır. İkincil fazların büyümesi; Cr, Ni gibi alaşım elementlerinin ferrit içinden sigma gibi ikincil fazların içerisine yayılmasıyla meydana gelmektedir. 800°C' de tavlama süresi boyunca yoğun bir difüzyon olayı gerçekleştiğinden ikincil fazların ortalama tane boyutu zamanla artmıştır. Aynı çözme tav koşullarında 950°C' de yapılan yaşlandırma ısıl işleminde ise, yapıda daha az sayıda ancak daha büyük tane boyutuna sahip ikincil fazlar çekirdeklenmiştir. Nitekim 60 dakikalık yaşlandırma ısıl işlemi sonundaki ortalama tane boyutu 7,2 µm'ye yükselmiştir. 60 dakikada 950°C' de 800°C'ye kıyasla ikincil fazların daha büyük ortalama tane boyutuna sahip olmasının nedeni; 800°C'de ferrit-östenit tane sınırı boyunca oluşan ikincil fazların sayısının daha fazla olması, bu nedenle birbirine baskı yaparak büyümesini zorlaştırmasıdır.

1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından uygulanan izotermal yaşlandırma ısıl işleminde ortalama tane boyutunun en yüksek olduğu sıcaklık 650°C' dir. 1000°C' den itibaren yavaş soğutulan yapıda soğuma süresince ikincil fazların çekirdeklenmesi nedeniyle; 650°C' ye gelindiğinde hâlihazırda oluşmuş olan ikincil fazların büyümesi söz konusudur. Bu nedenle ortalama tane boyutu 5 dakikalık tav süresinde 6,8 µm olarak ölçülmüştür. 60 dakikalık bekleme süresinde ise 11,1 µm'ye yükseldiği gözlemlenmiştir. 1000°C' den 800°C' ye yavaş soğutulup bu sıcaklıkta bekletilen numunelerde ise ikincil fazların ortalama tane boyutunun işlem süresi boyunca 0,9 µm'den 6,78 µm'ye yükseldiği ölçülmüştür.

Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlemleri boyunca çekirdeklenen ikincil fazların ortalama tane boyutlarının zaman içinde arttığı gözlemlenmiştir. Bekleme süresinin yeterince fazla olması durumunda bu fazların δ-ferrit fazını tamamen tüketerek mikroyapıyı kaplayacağı öngörülmektedir. Sigma fazına göre daha düşük sıcaklıklarda çekirdeklenen chi fazı ise çok uzun bekleme sürelerinde östenit-östenit tane sınırlarında dahi çekirdeklenebilmektedir. Dolayısıyla yapıda chi fazının bu şekilde

çekirdeklenmesi durumunda östenit fazının içerisine doğru büyüyeceği öngörülmektedir.

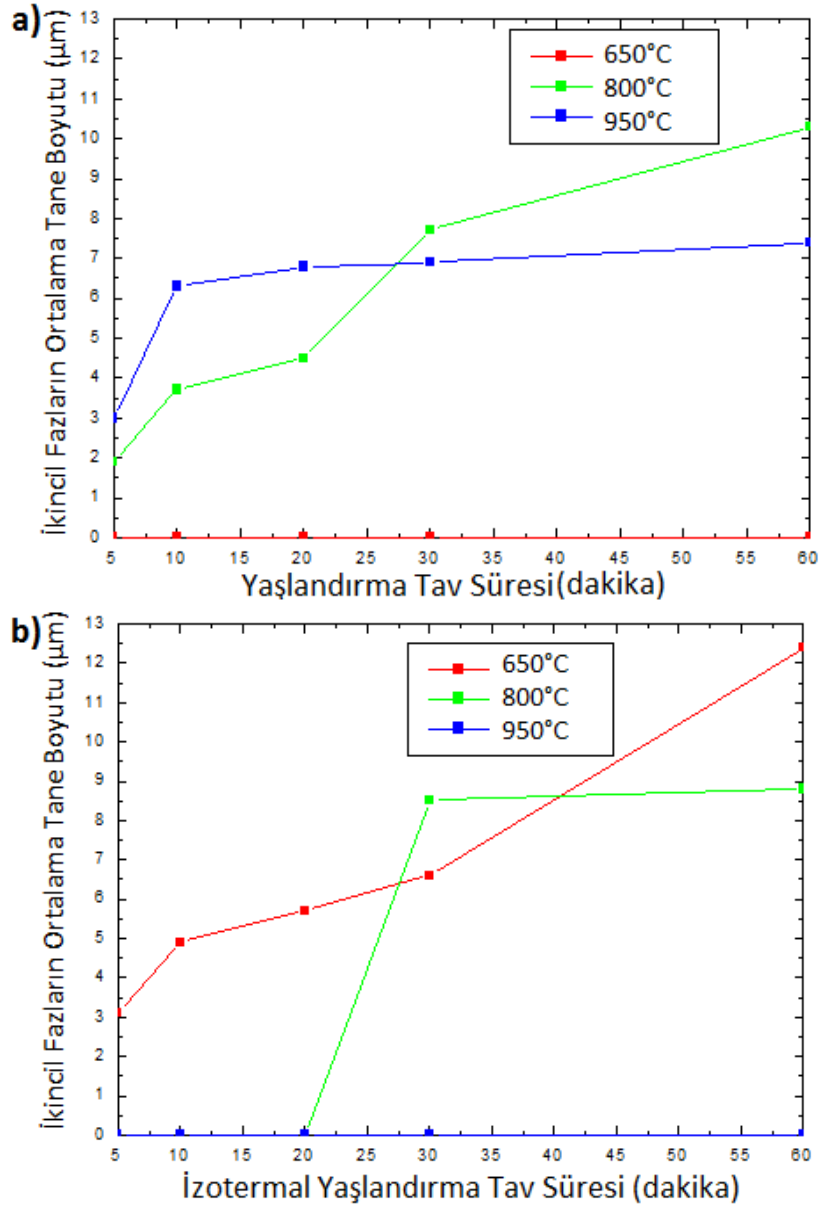


Şekil 5. 49 1000°C'de 1 saat tavlanan 2205 dupleks paslanmaz çeliğe ait a) ikincil fazların ortalama tane boyutu-yaşlandırma tav süresi, b) ikincil fazların ortalama tane boyutu- izotermal yaşlandırma tav süresi grafiği

Çözme tav süresi 8 saate çıkarılıp ardından uygulanan yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav işlemlerinde, ikincil fazların ortalama tane boyutu açısından ortaya çıkan durum Şekil 5. 50'de verilmiştir. Öncelikle yaşlandırma koşulları ele alınacak olursa; grafikte de görüldüğü gibi 800°C'de çekirdeklenen ikincil fazların ortalama tane boyutu yaşlandırma tav süresi boyunca artış göstermiştir. 5 dakika sonunda 1,9 μm ölçülen ortalama tane boyutu 60 dakikalık ısı işlem sonunda yaklaşık 5 kat artarak 10,3

$\mu\text{m}'\text{ye}$ yükselmiştir. Çözme tav süresinin 1 saat olduğu durum ile karşılaştırıldığında; $800^{\circ}\text{C}'\text{de}$ ortalama tane boyutunun yaklaşık iki kat arttığı görülmektedir. Bu durum üst sıcaklık olan $1000^{\circ}\text{C}'\text{de}$ bekleme süresi boyunca daha fazla ötektoid dönüşümün meydana gelmesi; bu sayede daha fazla ferrit oluşarak yaşlandırma esnasında oluşacak ikincil fazların çekirdeklenme potansiyelinin yüksek olduğu bölgeler meydana getirmesidir. $950^{\circ}\text{C}'\text{de}$ oluşan ikincil fazların ortalama tane boyutu ise yaşlandırma tav süresi içinde $3 \mu\text{m}'\text{den}$ $7,4 \mu\text{m}'\text{ye}$ yükselmiştir. 5 dakikalık yaşlandırma tavında $950^{\circ}\text{C}'\text{de}$ $800^{\circ}\text{C}'\text{ye}$ kıyasla daha az sayıda ancak boyut olarak daha büyük ikincil fazlar mevcuttur. Ancak $950^{\circ}\text{C}'\text{de}$ ikincil fazların zaman içindeki gelişimi $800^{\circ}\text{C}'\text{ye}$ göre daha yavaştır. Bunun nedeni $800^{\circ}\text{C}'\text{nin}$ ötektoid dönüşüm için daha uygun bir sıcaklık olması ve difüzyon olayının daha hızlı gerçekleşerek ikincil fazların yapı içerisinde daha kolay büyümesidir. $1000^{\circ}\text{C}'\text{de}$ 8 saat tavlanıp ardından yaşlandırma işlemi uygulanan malzemelerle, aynı yaşlandırma şartlarının öncesinde 1 saatlik çözme tavi uygulanan malzemeler ile karşılaştırıldığında ortalama tane boyutu $800^{\circ}\text{C}'\text{de}$ olduğu gibi yine bir miktar artış göstermiştir.

$1000^{\circ}\text{C}'\text{de}$ 8 saat çözme tavi uygulanıp 650°C , 800°C ve $950^{\circ}\text{C}'\text{de}$ izotermal yaşlandırma ısıl işlemi uygulanan malzemelerde ikincil fazların ortalama tane boyutu 650°C en yüksektir. Isıl işlem süresince ikincil fazların ortalama tane boyutu 5. dakikada $3,1 \mu\text{m}$ iken 30. dakikadan itibaren keskin bir artış göstererek 60 dakikanın sonunda $12,4 \mu\text{m}'\text{ye}$ yükselmiştir. $800^{\circ}\text{C}'\text{de}$ uygulanan izotermal yaşlandırma işleminde ise, Şekil 5. 50'deki grafikte de görüldüğü gibi, ikincil fazlar ancak 20.dakikadan itibaren çekirdeklenmeye başlamış; zaman içinde ortalama tane boyutları $8,5 \mu\text{m}'\text{den}$ $8,8 \mu\text{m}'\text{ye}$ yükselmiştir. $1000^{\circ}\text{C}'\text{de}$ çözme tav süresinin 8 saat olduğu durumda uygulanan 60 dakikalık izotermal yaşlandırma tav ısıl işlemi sonucunda $650^{\circ}\text{C}'\text{de}$ de $800^{\circ}\text{C}'\text{de}$ de oluşan ikincil fazların ortalama tane boyutunun çözme tav süresinin 1 saat olduğu durumdaki numunlerde oluşan ikincil fazların ortalama tane boyutuna göre daha fazla olduğu görülmektedir.

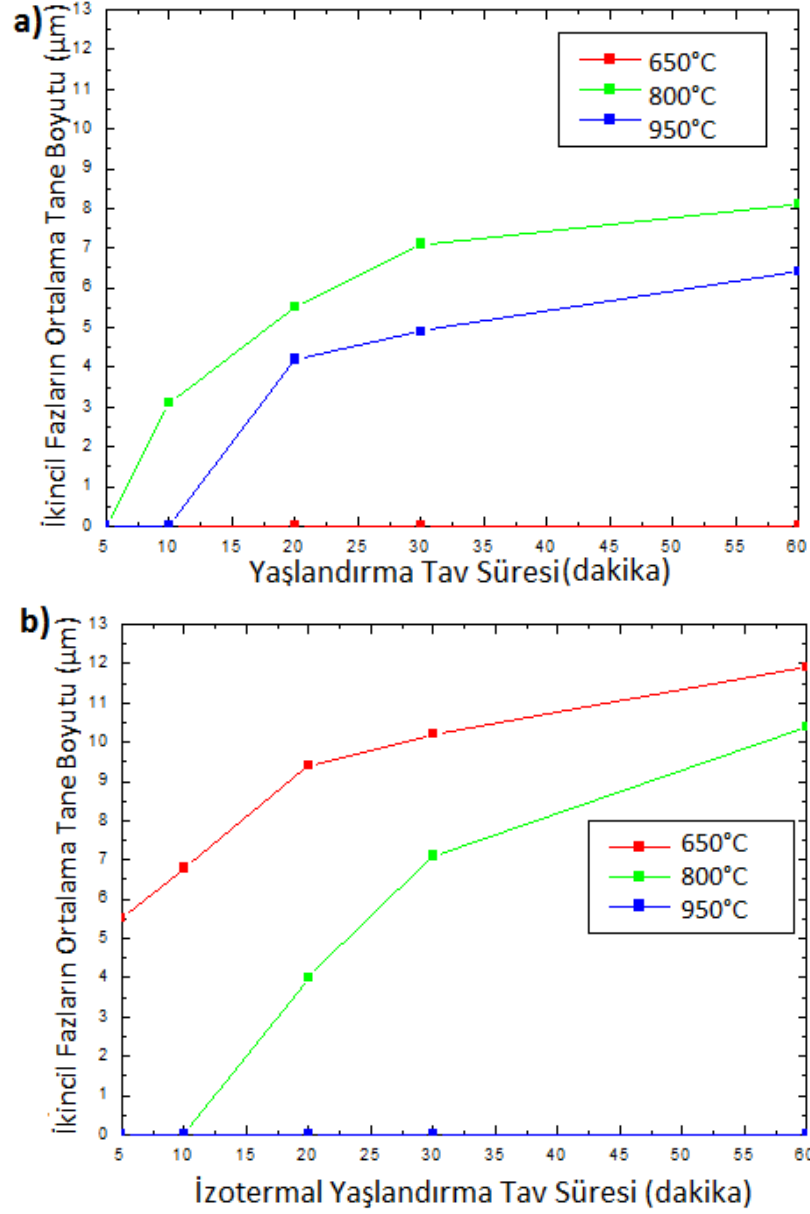


Şekil 5. 50 1000°C’de 8 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) ikincil fazların ortalama tane boyutu-yaşlandırma tav süresi, b) ikincil fazların ortalama tane boyutu- izotermal yaşlandırma tav süresi grafiği

Son olarak; 1000°C’ de 10 saat tavlanan malzemelerde yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlem koşullarındaki oluşan ikincil fazların ortalama tane boyutlarının yorumlanması ele alınacaktır. Şekil 5. 51’de 1000°C’de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısıl işlem koşullarında oluşan ikincil fazların ortalama tane boyutu grafikleri verilmiştir. Yaşlandırma ısıl işleminde ortalama tane boyutunun en yüksek olduğu sıcaklık 800°C’dir. 5 dakikalık bekleme süresinde ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmezken 10 dakikadan itibaren ikincil fazların ortalama tane boyutu zamanla artarak 3,1 µm’den 8,1 µm’ye ulaşmıştır.

Yaşlandırma tav sıcaklığı 950°C'ye çıkarıldığında, 10. dakikadan itibaren çekirdeklenen ikincil fazların ortalama tane boyutunun 4,2 µm'den 6,4 µm'ye yükseldiği ölçülmüştür.

1000°C'de 10 saat tavlanan malzemelerde izotermal yaşlandırma ısıl işlem koşullarındaki oluşan ikincil fazların ortalama tane boyutunun en yüksek olduğu sıcaklık, 1 ve 8 saatlik çözme tavi uygulanan numunelerde olduğu gibi, 650°C'dir. 1000°C'den itibaren yavaş soğutulan yapıda soğutma esnasında çekirdeklenmeye başlayan ikincil fazların ortalama tane boyutu 5. dakikada 5,5 µm iken 60. dakikanın sonunda 11,9 µm'ye ulaşmıştır. 1000°C'den 800°C'ye yavaş soğutulan yapıda ise 10. dakikadan itibaren yapıda ikincil fazlar çekirdeklenmeye başlamıştır. Oluşan bu ikincil fazların ortalama tane boyutu izotermal yaşlandırma ısıl işlemi süresince 4 µm'den 10,4 µm'ye yükselmiştir.



Şekil 5. 51 1000°C'de 10 saat tavlanan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait a) ikincil fazların ortalama tane boyutu-yaşlandırma tav süresi, b) ikincil fazların ortalama tane boyutu- izotermal yaşlandırma tav süresi grafiği

5.3 Birincil ve İkincil Fazlara Ait EDS Analizleri

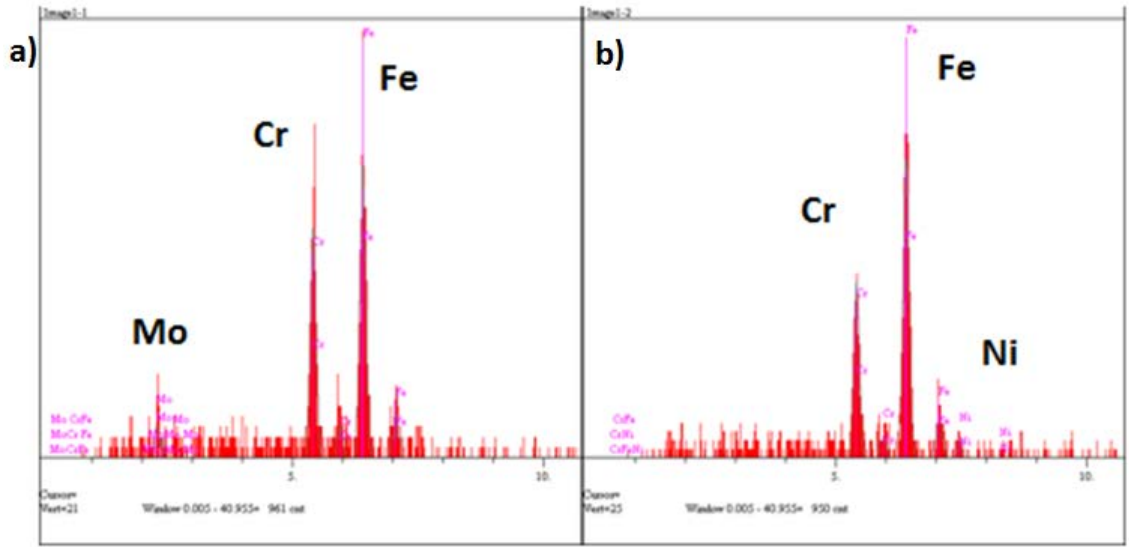
Dubleks paslanmaz çeliklerde bulunan birincil ve ikincil fazların çekirdeklenmesi ve büyümesi difüzyon kontrollü bir mekanizmadır. Alaşım elementlerinin bir fazdan diğerine yayılımı sayesinde yapıda yeni fazlar çekirdeklenebilmektedir. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavı uygulandıktan sonra fırında ve suda soğutulan numunelerde oluşan birincil ve ikincil fazların kimyasal bileşimleri Çizelge 5. 6'da verilmiştir. Şekil 5. 4, Şekil 5. 5 ve Şekil 5. 6'da verilen optik mikroskop görüntülerinde de gözlemlendiği

üzere; suda soğutulan malzemelerde hızlı soğumadan dolayı herhangi bir ikincil faz çekirdeklenmesi meydana gelmemiştir. Fırında soğutulan numunelerde ise, ferrit-östenit tane sınırlarında çekirdeklenip ferrit içerisine doğru büyümüş ikincil fazlara rastlanmaktadır.

Çizelge 5. 6 Çözme tav işlem parametrelerine bağlı yapıdaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri

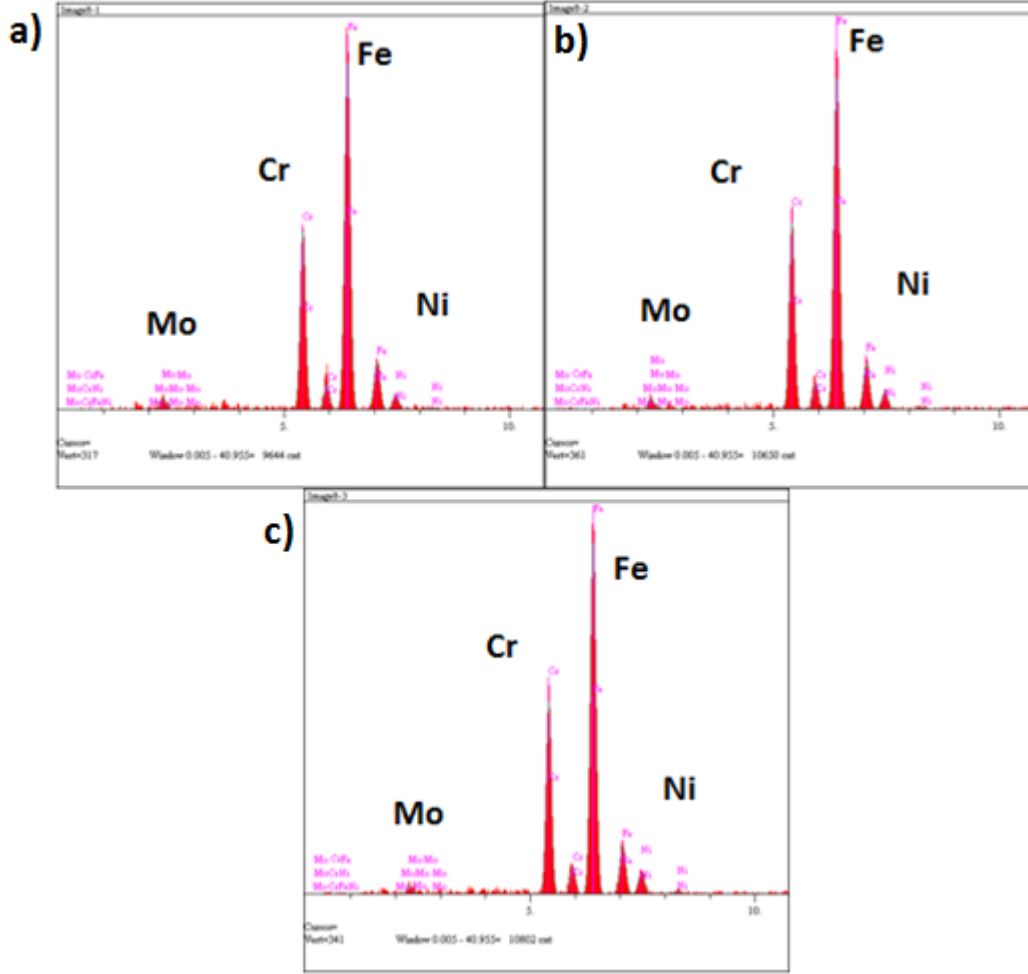
Isıl İşlem Türü	İşlem Parametreleri	Fazlar	Alaşım Elementlerinin Yapıdaki Yüzdesi (%)			
			Cr	Ni	Mo	Fe
ÇÖZME TAVI	1000°C/1sa/su	δ	30,62	-	6,47	62,91
		γ+γ ₂	23,35	7,76	-	68,89
		σ	-	-	-	-
	1000°C/1sa/fırın	δ	22,37	5,77	2,05	69,81
		γ+γ ₂	21,82	6,66	1,50	70,02
		σ	20,99	4,66	2,20	72,15
	1000°C/8sa/su	δ	25,55	3,87	2,85	67,73
		γ+γ ₂	21,60	6,53	1,65	70,22
		σ	-	-	-	-
	1000°C/8sa/fırın	δ	26,10	2,97	3,20	67,74
		γ+γ ₂	21,66	6,54	1,87	69,92
		σ	21,34	3,81	1,66	73,19
	1000°C/10sa/su	δ	24,88	4,64	2,88	67,60
		γ+γ ₂	21,51	6,45	1,80	70,24
σ		-	-	-	-	
1000°C/10sa/fırın	δ	25,48	3,25	2,54	70,27	
	γ+γ ₂	22,10	6,20	1,61	70,10	
	σ	21,01	3,37	1,11	74,51	

İlk olarak, 1000°C'de 1 saat tavlaniıp suda soğutulan dubleks paslanmaz çelikte oluşan birincil fazların kimyasal bileşimi incelenecektir. EDS spektrumu Şekil 5. 52'de yer alan yapıda ferrit fazının Cr ve Mo içeriğinin östenit faza kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Ancak ferrit fazı hiç Ni içermezken; östenit fazının Ni içeriği %7 oranlarında ölçülmüştür. Bu durum, Cr ve Mo elementinin ferrit; Ni elementinin ise östenit faz kararlaştırıcı elementler olmasından kaynaklanmaktadır. Sathirachinda ve ekibi de yaptıkları çalışmalarda [70, 71] benzer sonuçlar ortaya koymuştur.



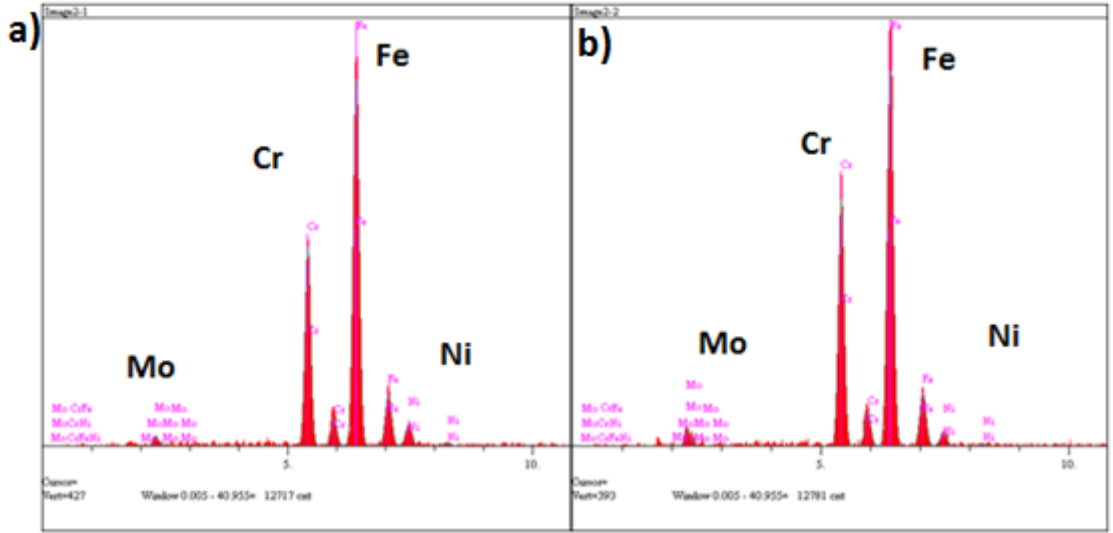
Şekil 5. 52 1000°C'de 1 saat tavlaniıp suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) stenit fazına ait EDS spektrumu

1000°C'de 1 saat tavlaniıp fırında soğutulan dubleks paslanmaz çelikte oluşan birincil fazların kimyasal bileşimine ait spektrum Şekil 5. 53'te verilmiştir. Bu yapıda birincil fazların kimyasal bileşimi suda soğutulan numune ile paralellik göstermektedir. Ferrit fazının Cr ve Mo içeriği yine östenit fazından daha fazla; Ni içeriği ise daha azdır. Ayrıca yavaş soğutulan bu yapıda birincil fazların yanı sıra ikincil fazlarda ekirdeklenmiştir. İçeriğinde Cr, Mo ve Ni gibi alaşım elementleri bulunan bu ikincil fazın, oluşum sıcaklığı da göz önünde bulundurulursa, σ fazı olduğu düşünülmektedir. Fırında soğutulan numunede bulunan ferrit fazının Cr ve Mo içeriğinin; östenit fazının ise Ni içeriğinin suda soğutulan numuneye göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi; fırında soğutulan malzemede soğuma süresince yapıda gerçekleşen difüzyon olayı ile sözü edilen alaşım elementlerinin sigma fazının içerisine yayınmasıdır. Malzemenin sigma fazının oluşum sıcaklık aralığında bekletilmesi durumunda; sigma fazının bu alaşım elementlerini daha da biriktirerek büyümesi beklenmektedir.



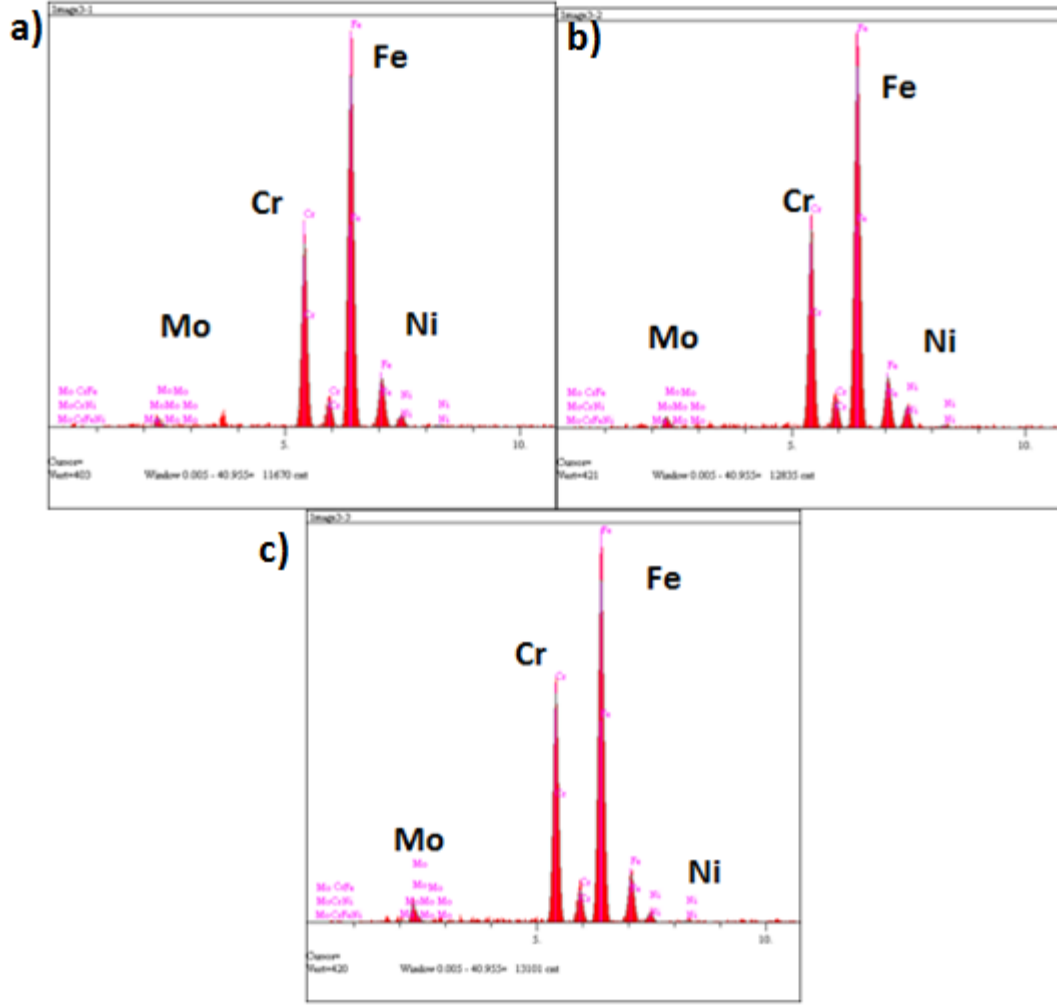
Şekil 5. 53 1000°C'de 1 saat tavlaniş fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ikincil faza, b) ferrit fazına, c) östenit fazına ait EDS spektrumu

1000°C'de 8 saat tavlaniş suda soğutulan numunede oluşan birincil fazların EDS spektrumları Şekil 5. 54'te verilmiştir. 1 saat çözme tavlı uygulanıp suda soğutulan malzemede olduğu gibi; ferrit fazının Cr ve Mo içeriğinin östenit fazından; östenit fazının ise Ni içeriğinin ferrit fazından daha fazla olduğu görülmektedir.



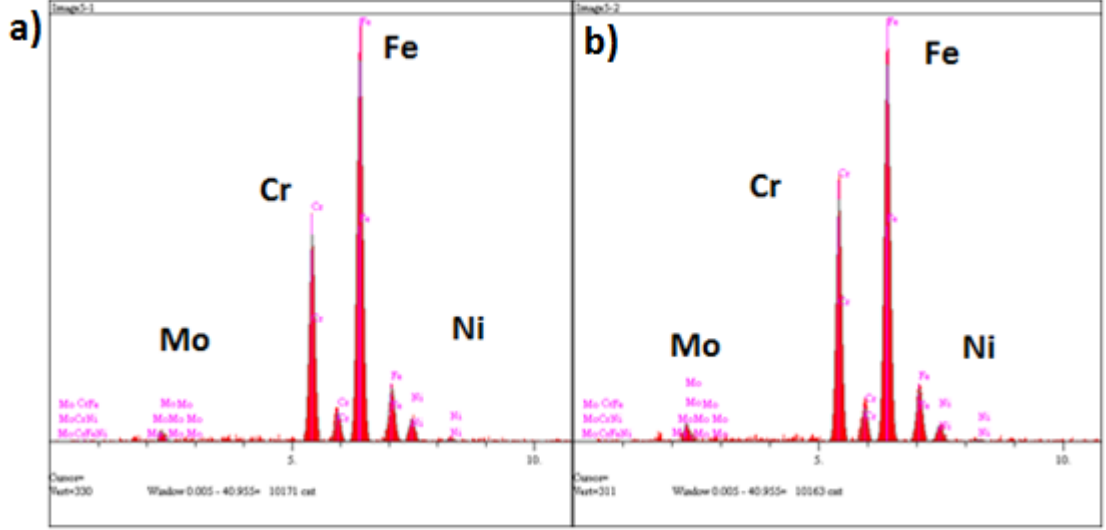
Şekil 5. 54 1000°C'de 8 saat tavlaniş suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına ait EDS spektrumu

1000°C'de 8 saat tavlaniş fırında soğutulan numunede oluşan birincil fazların EDS spektrumları Şekil 5. 55'te verilmiştir. Bu numunede oluşan östenit ve ferrit fazının kimyasal bileşimi ile suda soğutulan numunede oluşan ferrit ve östenit fazının kimyasal bileşimi arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Ancak 1000°C'de 1 saat tavlaniş fırında soğutulan numune ile karşılaştırıldığında ferrit fazının Cr ve Mo içeriğinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni; çözüme tav süresi boyunca ötektoid dönüşümün devam etmesi ve bu sırada Cr ve Mo gibi ferrit kararlaştırıcı elementlerin ferrit fazına doğru yayınma göstermesidir.



Şekil 5. 55 1000°C'de 8 saat tavlانیp fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ikincil faza, b) ferrit fazına, c) östenit fazına ait EDS spektrumu

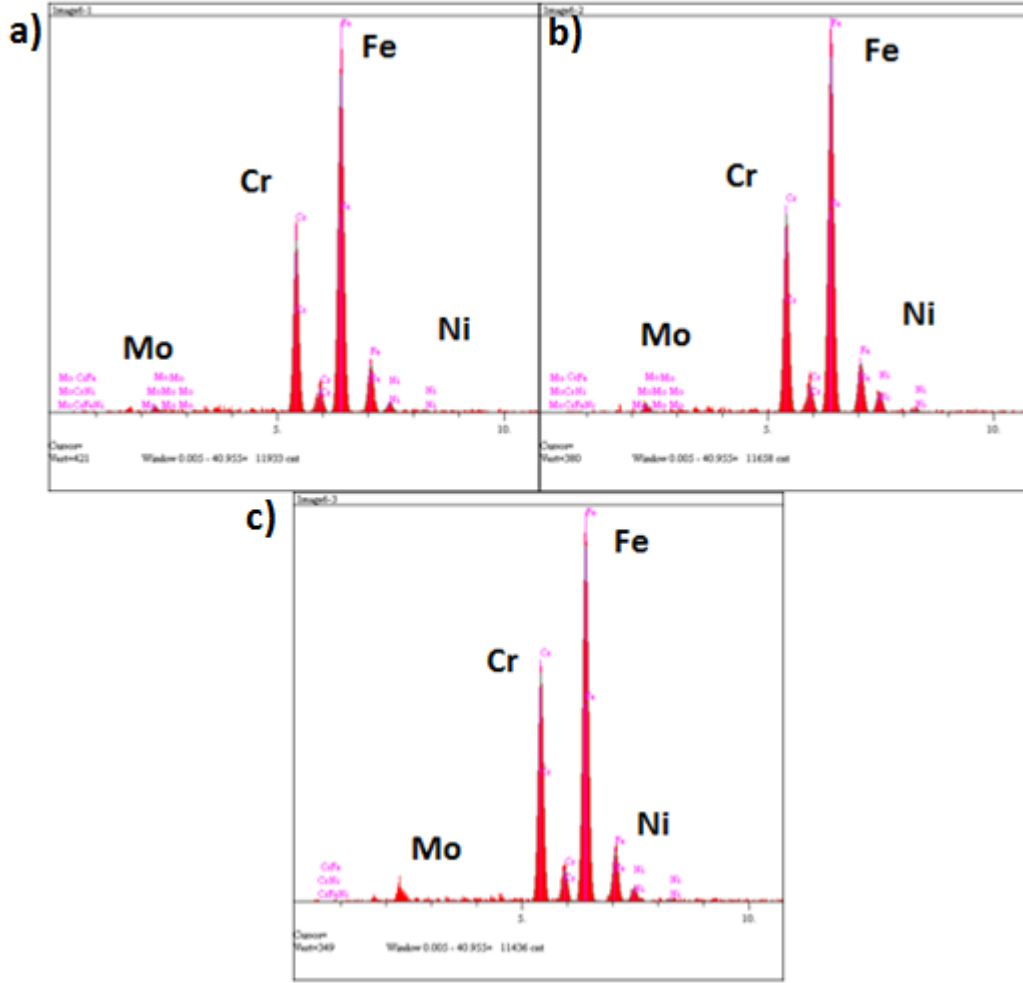
1000°C'de 10 saat tavlانیp suda soğutulan numune de oluşan birincil fazların EDS spektrumları Şekil 5. 56'da verilmiştir. Bu numune de ferrit kararlaştırıcı elementler ferrit fazında daha fazla; östenit kararlaştırıcı elementler ise östenit fazında daha fazla oranda bulunmaktadır. Hızlı soğumadan dolayı yapı içerisinde, suda soğutulan diğer numunelerde olduğu gibi, ikincil fazlar çekirdeklenmesi gözlemlenmemiştir.



Şekil 5. 56 1000°C'de 10 saat tavlaniş suda soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte
a) östenit fazına, b) ferrit fazına ait EDS spektrumu

1000°C'de 10 saat tavlaniş fırında soğutulan numunede oluşan birincil fazların EDS spektrumları Şekil 5. 57'de verilmiştir. Birincil fazların kimyasal bileşiminde suda soğutulan numune ile fırında soğutulan numune arasında belirgin bir fark yoktur. Diğer 5 durumda da olduğu gibi, Cr ve Mo oranı ferrit fazında daha fazla; Ni oranı ise östenit fazında daha fazladır.

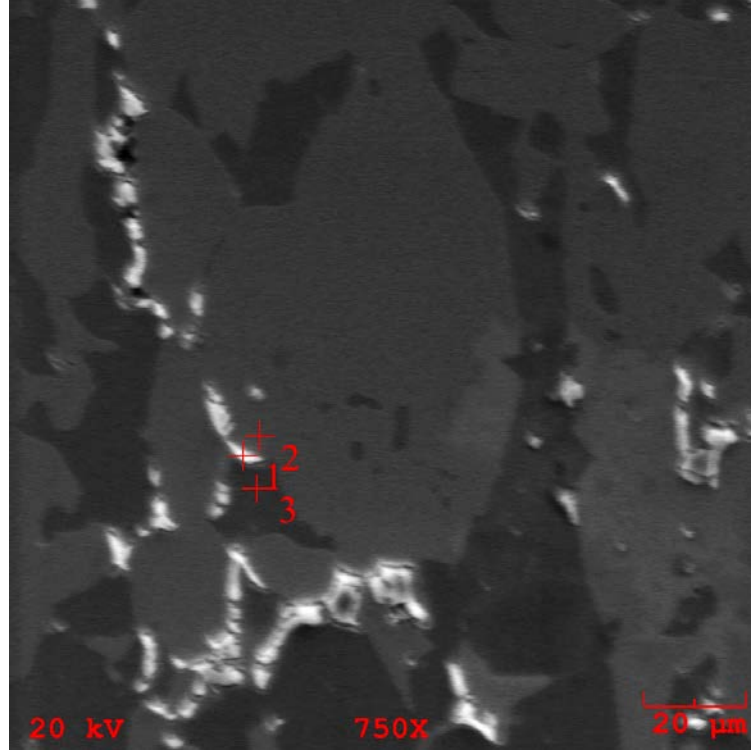
1000°C'de 1 saat, 8 saat ve 10 saat tavlaniş fırında soğutulan numunelerde çekirdeklenen ikincil fazların kimyasal bileşimleri karşılaştırıldığında içerdikleri alaşım elementi miktarlarının neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bu durum çekirdeklenen bu fazların aynı faz olduğunu; içerdikleri alaşım elementleri ve oluşum sıcaklıkları göz önünde bulundurulduğunda ise bu fazın sigma fazı olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 5. 57 1000°C'de 10 saat tavlانیp fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ikincil faza, b) östenit fazına, c) ferrit fazına ait EDS spektrumu

Şekil 5. 58'de 1000°C'de 10 saat tavlانیp fırında soğutulan numuneye ait 750 büyütmedeki SEM görüntüsü ve EDS analizi yapılan noktalar verilmiştir. Nokta 1 EDS analizi yapılan ikincil fazı, Nokta 2 ve Nokta 3 ise bu ikincil fazın çekirdeklenmeye başladığı östenit ve ferrit tanesini göstermektedir. Malzemenin SEM görüntüsünün optik mikroskop görüntüsünden farklı olduğu görülmektedir. Açık gri olan fazlar östenit fazını, daha koyu olanlar ferrit fazını, parlak olan fazlar ise oluşan ikincil fazları temsil etmektedir. Yapı içerisinde oluşan ikincil fazların ferrit fazı içerisinde doğru büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeni; sigma fazının oluşturan Cr ve Mo gibi alaşım elementlerinin difüzyonunun ferrit içerisinde östenite göre çok daha hızlı gerçekleşmesidir [66, 72]. Fırında soğutulan malzemelerde Cr ve Mo ferrit fazından sigma fazına doğru yayılmaktadır. Bu durumda ferritin östenite dönüşümünü mecbur kılar [69, 73]. Sigma fazının çekirdeklenmesi ve ötektoid dönüşümün gerçekleşmesi

başlangıçta en yüksek seviyededir, ancak zaman geçtikçe azalmaktadır. Bu durum difüzyon mekanizmasının karakteristiğinden kaynaklanmaktadır [66]. İkincil fazların difüzyon kontrollü büyümesi iki şekilde sınırlandırılmaktadır. Birincisi sert sıkışma adı verilen komşu tanelerin tane sınırlarının baskı yaparak büyümeyi zorlaştırması; ikinci durum ise yumuşak sıkışma adı verilen üst üste binen difüzyon alanlarıdır [13].



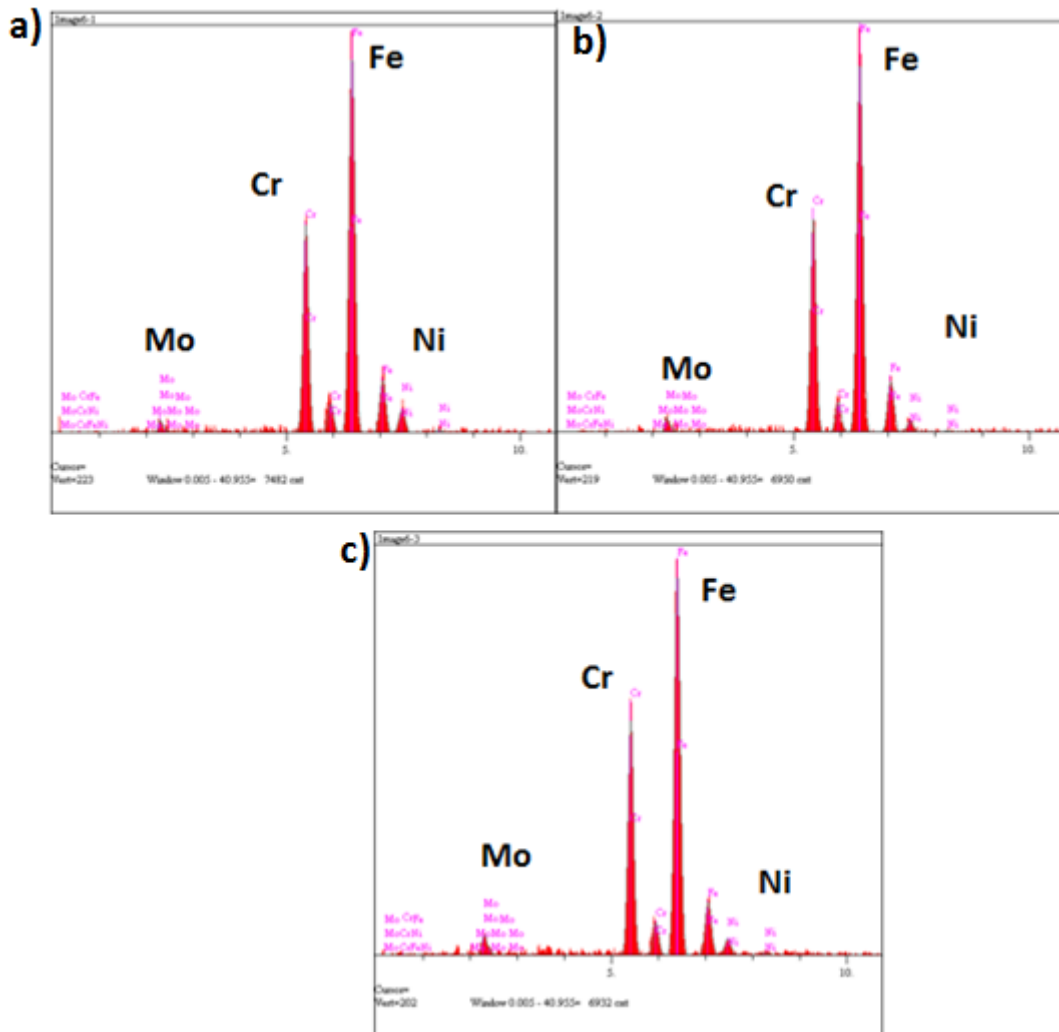
Şekil 5. 58 1000°C'de 10 saat tavlaniıp fırında soğutulan 2205 dubleks paslanmaz çeliğe ait SEM görüntüsü

Önceki bölümlerde ele alındığı üzere çözme tavinin uygulandığı 1, 8 ve 10 saatlik numunelere ayrı ayrı 3 farklı sıcaklık ve 5 farklı sürede yaşlandırma tavi uygulanmıştır. EDS analizi yapılacak olan yaşlandırma tav numunelerinin seçiminde iki faktör göz önünde bulundurulmuştur. Bunlardan birincisi, seçilecek olan yaşlandırma tav sıcaklığı, diğer faktör ise, yaşlandırma tav süresidir. Yaşlandırma tav sıcaklığı olarak ikincil fazların en yoğun olduğu sıcaklık olan 800°C seçilmiştir. Bu sıcaklık için ikincil fazların çekirdeklenmeye başladığı ilk süre ve en uzun yaşlandırma tav süresi olan 60 dakika ele alınmıştır. 800°C'de yaşlandırma tavi uygulanan numunelerde oluşan birincil ve ikincil fazların kimyasal bileşimleri Çizelge 5. 7'de verilmiştir.

Çizelge 5. 7 Yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı yapıdaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri

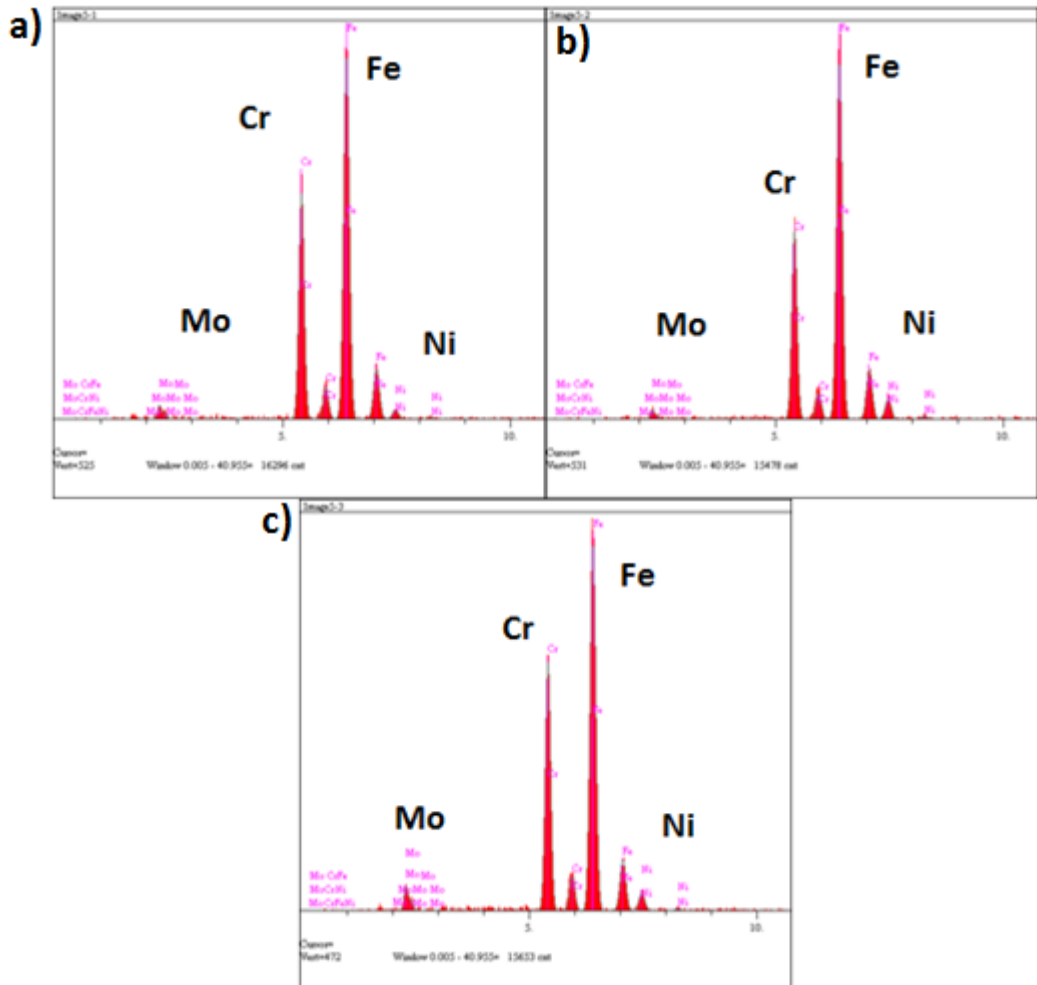
Isıl İşlem Türü	İşlem Parametreleri	Fazlar	Alaşım Elementlerinin Yapıdaki Yüzdesi (%)			
			Cr	Ni	Mo	Fe
YAŞLANDIRMA TAVI	1000°C/1sa/su	δ	23,48	3,31	2,36	70,85
	800°C/5dk	γ	21,86	6,74	1,88	69,53
		σ	24,30	4,49	3,10	68,12
	1000°C/1sa/su	δ	24,93	2,82	2,12	70,06
	800°C/60dk	γ	21,13	6,47	1,56	70,84
		σ	25,91	4,89	3,64	65,56
	1000°C/8sa/su	δ	24,20	-	3,91	71,89
	800°C/5dk	γ	22,88	4,19	5,20	67,73
		σ	25,32	4,40	2,46	67,82
	1000°C/8sa/su	δ	25,86	3,83	3,10	67,20
	800°C/60dk	γ	19,94	8,32	1,70	70,04
		σ	26,74	1,65	4,30	67,31
	1000°C/10sa/su	δ	25,81	4,58	2,43	67,18
	800°C/10dk	γ	20,50	7,71	1,65	70,14
		σ	28,45	2,74	5,38	63,43
	1000°C/10sa/su	δ	26,16	-	4,96	68,88
	800°C/60dk	γ	20,45	7,63	2,19	69,73
		σ	29,04	3,06	3,84	64,06

Şekil 5. 59'da 1000°C'de 1 saat tavlaniş, 800°C' de 5 dakika yaşlandırılan; Şekil 5. 60'ta ise 1000°C'de 1 saat tavlaniş, 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan numunelerdeki östenit, ferrit ve ikincil faza ait EDS spektrumları yer almaktadır. Çizelge 5. 7'de görüldüğü gibi, 800°C'de 5 dakika yaşlandırılan numunedeki ferrit fazının Cr içeriğı %23,48, Mo içeriğı %2,36 ve Ni içeriğı %3,31'tür. Östenit fazında ise, Cr içeriğı %21,86, Mo içeriğı %1,88 ve Ni içeriğı %6,74'tir. Yani, ferrit kararlaştırıcı elementler olan Cr ve Mo'nun oranı ferrit fazında östenit fazına göre daha fazla; östenit kararlaştırıcı element olan Ni oranı ise östenit fazında ferrit fazından daha fazladır. 60 dakika yaşlandırılan numunede de aynı durum söz konusudur. Ayrıca 60 dakika yaşlandırılan numunedeki ferritin Cr oranı 5 dakika yaşlandırılan numunedeki ferritin Cr oranından daha fazladır.



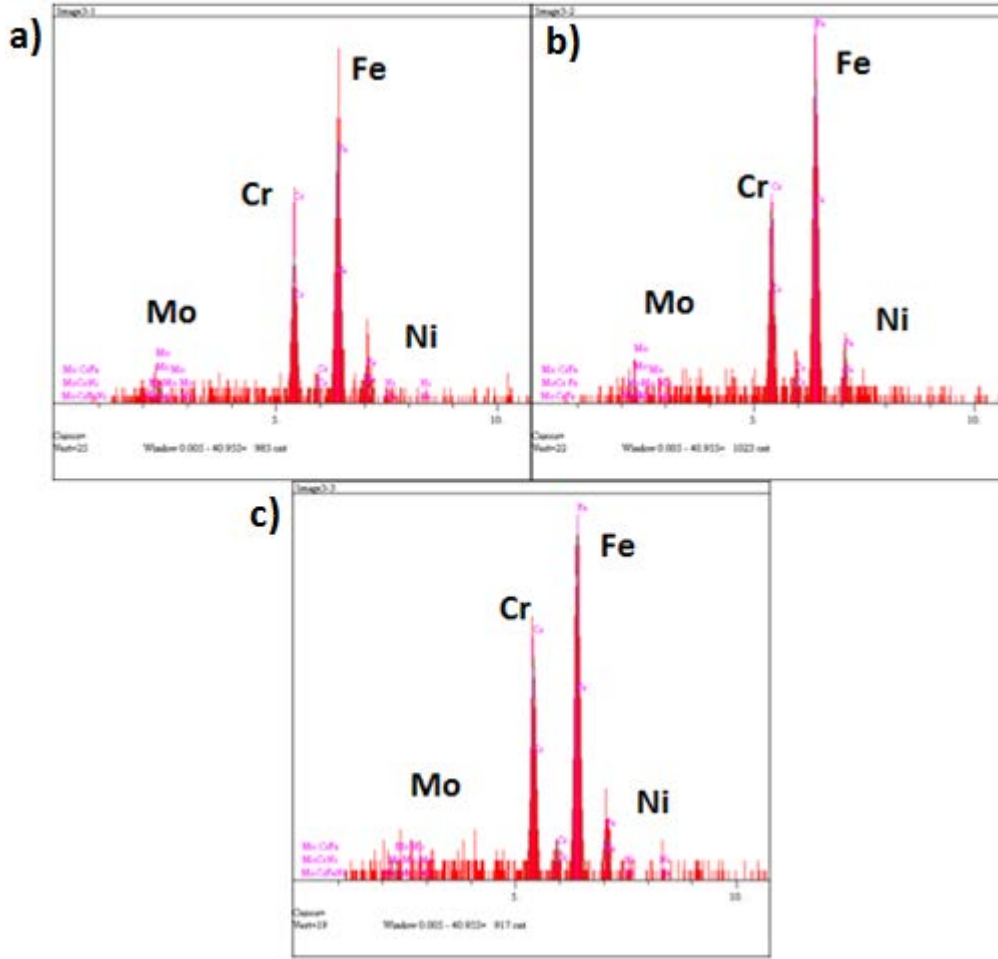
Şekil 5. 59 1000°C'de 1 saat tavlaniş, 800°C'de 5 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

1000°C'de 1 saat tavlانیp, 800°C'de uygulanan yaşlandırma şartlarında yapıda ikincil fazlar da çekirdeklenmiştir. 800°C'de yapıda oluşan en baskın ikincil faz σ fazıdır. Oluşan σ fazının kimyasal bileşimine gelindiğinde ise, Sathirachinda ve ekibinin [70] de belirttiği üzere, Cr ve Mo içeriği bakımından ferrit ve östenit fazından daha zengindir. 5. dakikada çekirdeklenen σ fazında Cr içeriği %24,3, Mo içeriği %3,01 iken; δ fazının Cr içeriği %23,48, Mo içeriği 2,36; γ fazının Cr içeriği %21,86, Mo içeriği %1.88'dir. Yaşlandırma tav süresi arttıkça Cr ve Mo elementlerinin σ fazının içine daha çok yayılması beklenmektedir. Nitekim yaşlandırma tavınının 60. dakikasında çekirdeklenen σ fazının Cr içeriği %25,91 ve Mo içeriği %3,64 değerindedir. Ayrıca yapıda çekirdeklenen σ fazının Cr ve Mo içeriğinin ferrit fazına kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir.



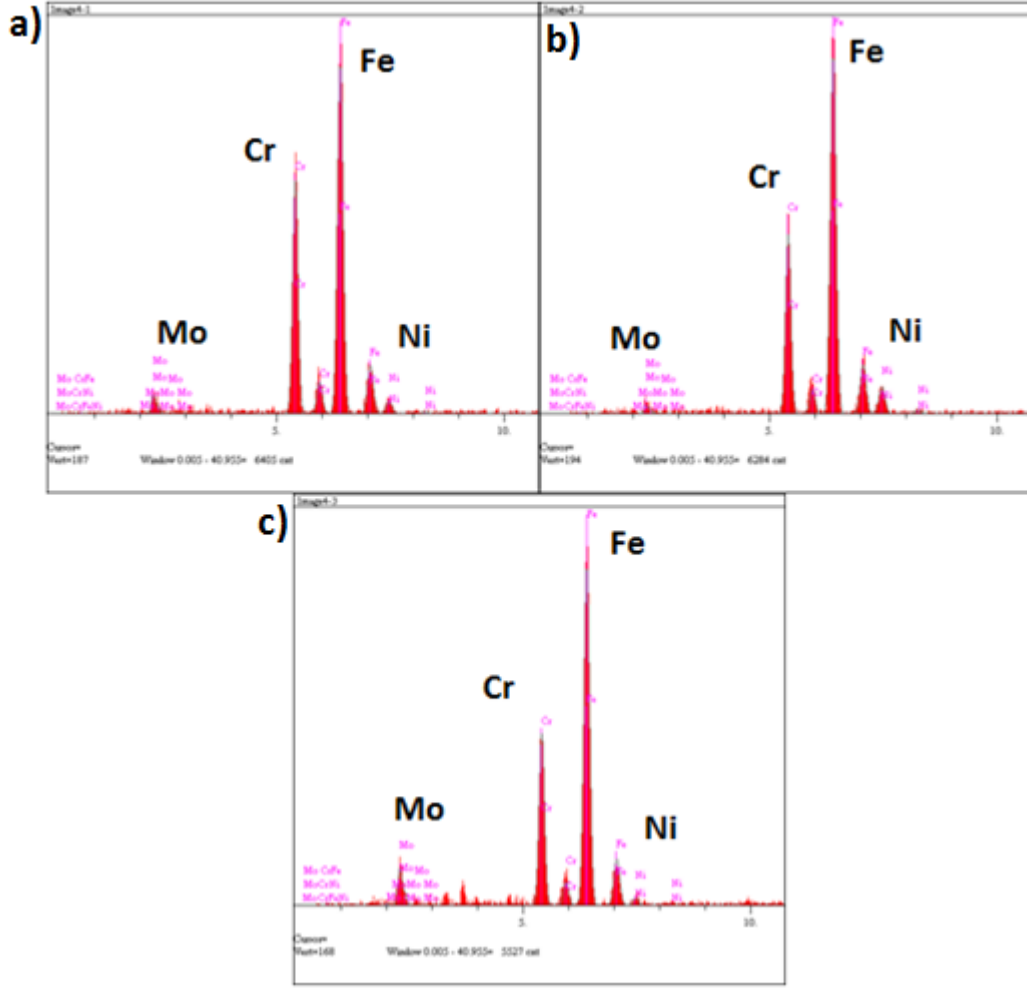
Şekil 5. 60 1000°C'de 1 saat tavlانیp, 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

Çözme tav süresini 1 saatten 8 saate çıkarıp sonrasında 800°C'de 5 dakika yaşlandırılan durumda oluşan birincil ve ikincil fazlara ait EDS spektrumları Şekil 5. 61'de, 60 dakika yaşlandırılan durumdaki EDS spektrumları Şekil 5. 62'de verilmiştir. 800°C'de 5 dakika yaşlandırılan numunede δ fazının Cr ve Mo içeriği; çözme tav süresinin 8 saat olduğu durumda sırasıyla %24,2 ve %3,92'dir. Bu değerler çözme tav süresinin 1 saat olduğu duruma göre daha fazladır. Bunun nedeni; çözme tav süresi boyunca ferrit faz yönünde gerçekleşen difüzyon mekanizmasıdır. Ayrıca diğer bütün numunelerde olduğu gibi burada da ferrit kararlaştırıcı elementler olan Cr ve Mo ferrit fazında östenit fazına göre daha fazla; östenit kararlaştırıcı element olan Ni ise östenit fazında ferrit fazına göre daha fazla miktarda bulunmaktadır. Yaşlandırma süresi 60 dakikaya çıkarıldığında, bu numuneninde ferritteki Cr ve Mo içeriğinin östenitten; östenitteki Ni içeriğinin ise ferritten daha fazla olduğu görülmektedir. 60 dakika yaşlandırılan numunede ferrit fazının Cr içeriği %25,86 iken 5 dakika yaşlandırılan numunedeki ferrit fazının Cr içeriği %24,2'dir. Yaşlandırma ısıl işleminden önce 1 saat çözme tavi uygulanan numunede olduğu gibi bu durumda da zaman geçtikçe ferrit fazının Cr içeriğinin arttığı görülmektedir.



Şekil 5. 61 1000°C'de 8 saat tavlانیp, 800°C'de 5 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

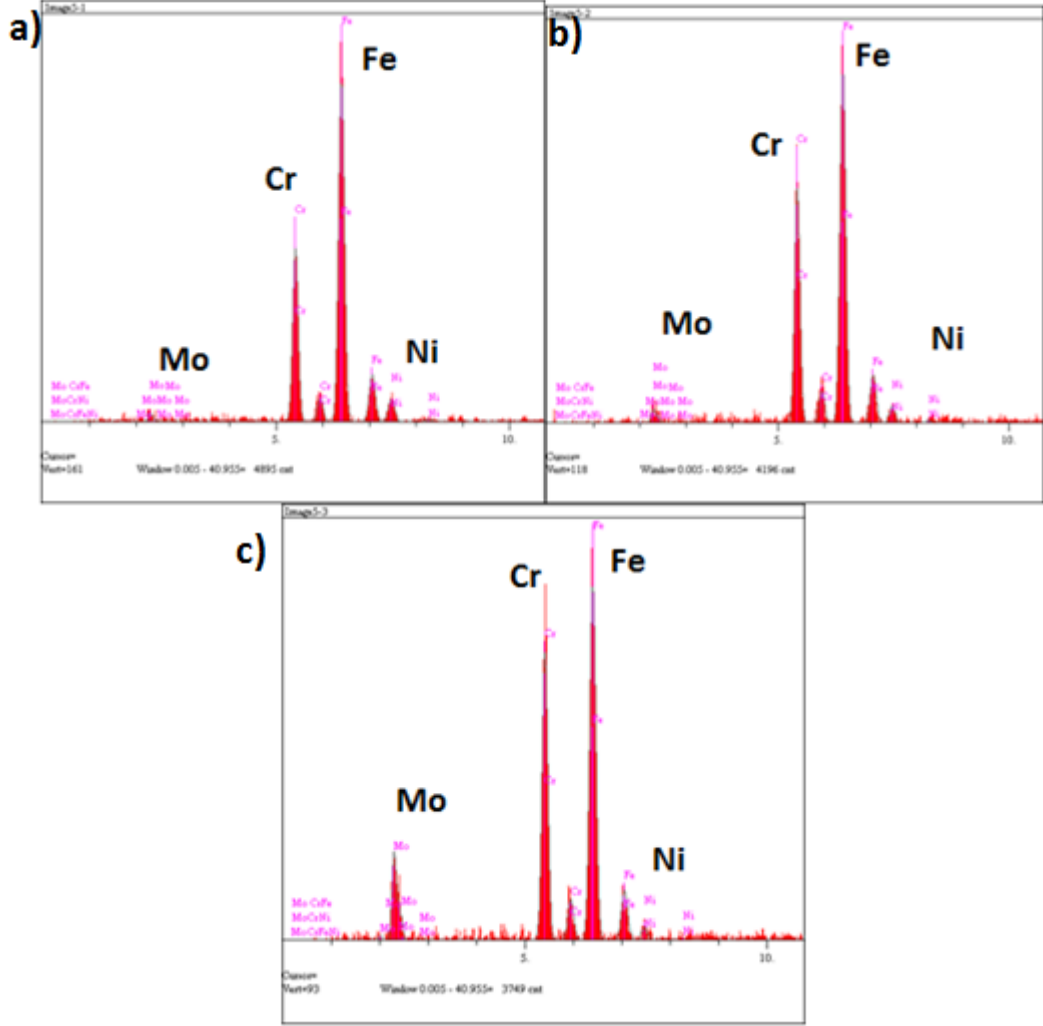
1000°C'de 8 saat tavlانیp suda soğutulan ardından 800°C'de 5 dakika yaşlandırılan numunede çekirdeklenen σ fazının Cr ve Mo içeriği sırasıyla %25,32 ve %2,46'dır. 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan numunede çekirdeklenen σ fazının Cr ve Mo içeriği ise sırasıyla %26,74 ve %4,3'tür. Burada yaşlandırma tav süresi arttıkça çekirdeklenen σ fazının içerdiği Cr ve Mo miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca aynı koşullarda yaşlandırılan, sadece çözme tav süresinin 1 saat olduğu numunelerle karşılaştırıldığında bu numune de σ fazının içerdiği Cr ve Mo miktarının arttığı görülmektedir.



Şekil 5. 62 1000°C'de 8 saat tavlانیp, 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

Yaşlandırma tavinin uygulandığı son gruptaki numuneler, yaşlandırma tavi öncesinde 1000°C'de 10 saat çözme tavinä tabi tutulan numunelerdir. Şekil 5. 63'te 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 800°C'de 10 dakika yaşlandırılan, Şekil 5. 64'te ise 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan numunelerde oluşan birincil ve ikincil fazlara ait EDS spektrumları yer almaktadır. 1000°C'de 10 saat tavlانیp 800°C'de yaşlandırılan bu numunede yapıda ikincil faz oluşumu daha geç başladığı için, diğer gruptaki numunelerden farklı olarak EDS analizi 10 dakika yaşlandırılan numuneye yapılmıştır. İkincil fazların geç çekirdeklenmesinin nedeni, yeniden kristalleşen ferrit tanelerinin büyümesi ve yapıdaki tane sınırı sayısının azalmasıdır. Çözme tavinin 10 saat olduğu durumda 800°C'de 10 dakika yaşlandırılan yapıdaki ferritin içerdiği Cr ve Mo miktarı sırasıyla %25,81 ve %2,43'tür. Ferrit %4,581 oranında Ni içerirken, östenit %7,71 oranında Ni içermektedir. Ayrıca, aynı yaşlandırma parametrelerinde ferritin içerdiği Cr miktarının 1 saat ve 8 saat çözme tavi uygulanan numunelerden daha fazla olduğu

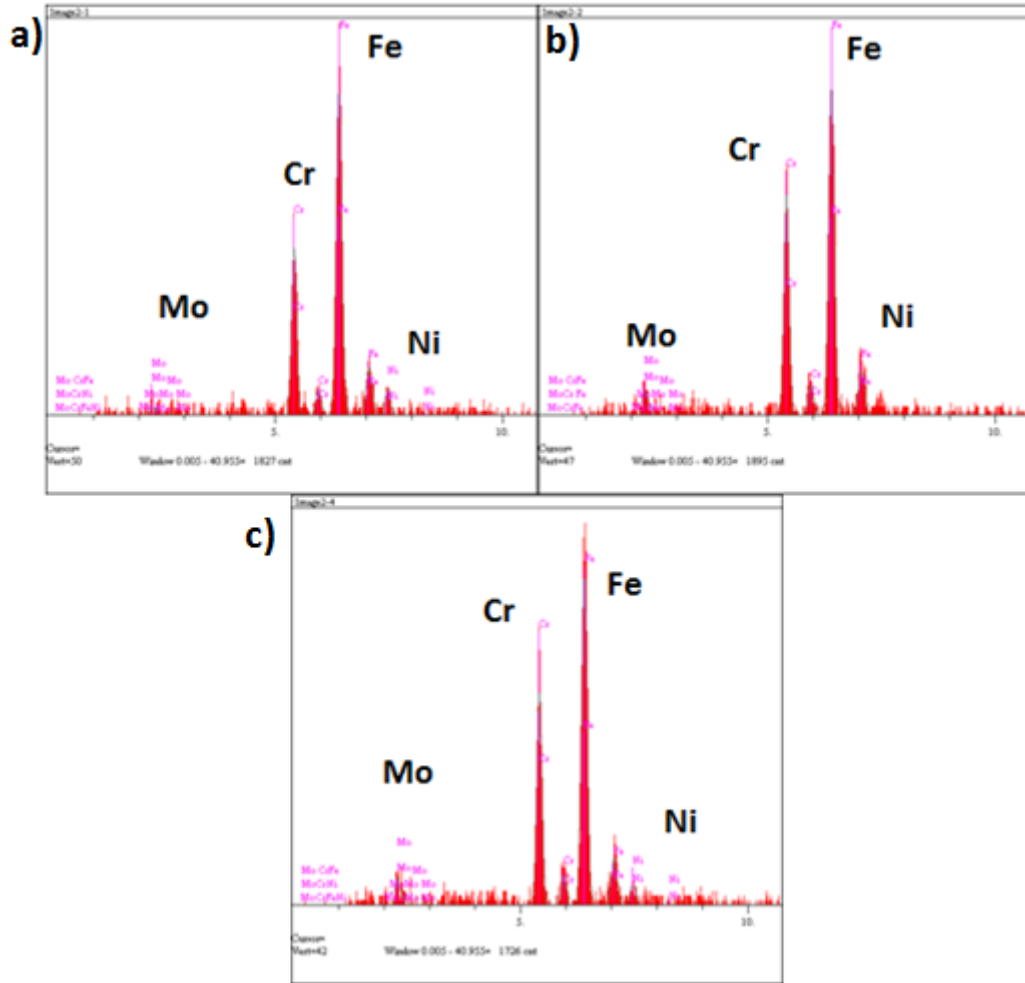
görülmektedir. Bunun nedeni, çözme tavi esnasında difüzyon için geçen süresinin daha fazla olmasıdır. Yaşlandırma tavi süresi 60 dakika olan numunedeki ferrit fazının içerdiği Cr ve Mo miktarı sırasıyla %26,16 ve %4,96'dır. Ferrit fazı hiç Ni içermezken östenit fazının içerdiği Ni oranı %7,63'e ulaşmıştır. Özetle; birincil fazlardan ferrit fazı Cr ve Mo'ca zengin, östenit fazı ise Ni'ce zengin bir fazdır.



Şekil 5. 63 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 800°C'de 10 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

Yaşlandırma şartlarında son olarak 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 800°C'de 10 dakika ve 60 dakika yaşlandırılan yapıda çekirdeklenen ikincil fazların kimyasal bileşimi yorumlanacaktır. 800°C'de 10 dakika yaşlandırılan yapıdaki σ fazının içerdiği Cr ve Mo miktarı sırasıyla %28,45 ve %5,37'dir. Sigma fazı Cr ve Mo elementlerini içene alıp, Ni elementini komşu ferrit fazına yayındırma eğilimi gösteren bir fazdır. Bu durum, Ni oranı artan ferrit fazını östenite dönüşmeye zorlamaktadır. 800°C'de 60 dakika

yaşlandırılan yapıdaki σ fazının içerdiği Cr ve Mo miktarı sırasıyla %29,04 ve %3,84'tür. Yaşlandırma tav süresi arttıkça yapıdaki σ fazının içerdiği Cr miktarı hem ferrit fazından, hem östenit fazından hem de 10 dakika yaşlandırılan numunedeki birincil ve ikincil fazlardan daha yüksektir. Ayrıca 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan yapının içerdiği Cr miktarı EDS analizi yapılan diğer bütün numunelere kıyasla en yüksek seviyeye ulaşmıştır.



Şekil 5. 64 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

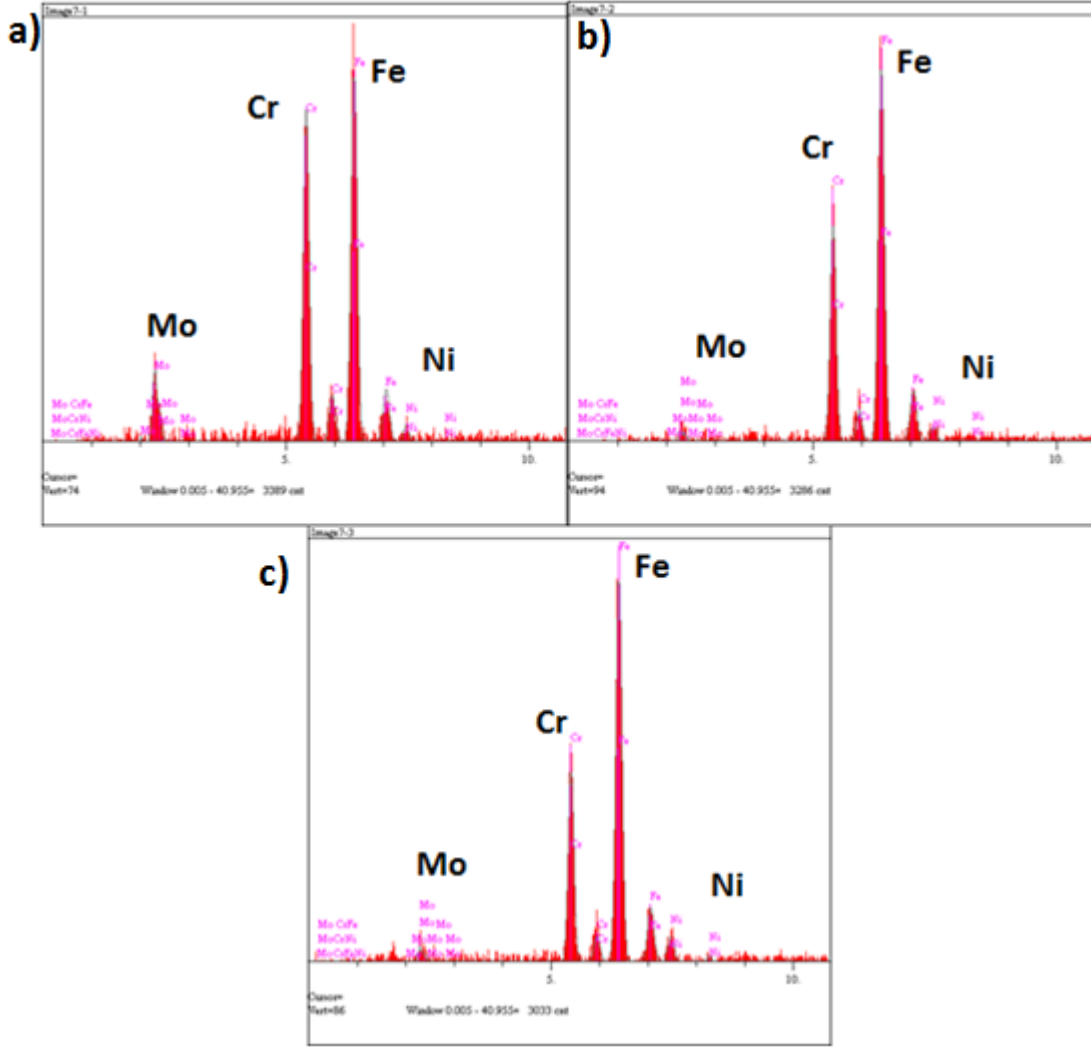
Çözme tavi ve yaşlandırma tav numunelerinin ardından izotermal yaşlandırma tav numunelerinde oluşan birincil ve ikincil fazların EDS analiz sonuçları yorumlanacaktır. Yaşlandırma tav işleminde olduğu gibi, EDS analizi için ikincil fazların çekirdeklenmeye başladığı ilk süre ve en uzun yaşlandırılan numuneler seçilmiştir. Yaşlandırma tav numunelerinden farklı olarak, izotermal yaşlandırma tav işleminde ikincil fazların en yoğun çekirdeklendiği sıcaklık 650°C olduğu için EDS analizi bu sıcaklıktaki tav

numunelerine uygulanmıştır. Çizelge 5. 8'de izotermal yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağı yapıdaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri verilmiştir.

Çizelge 5. 8 İzotermal yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı yapıdaki birincil ve ikincil fazların EDS analizleri

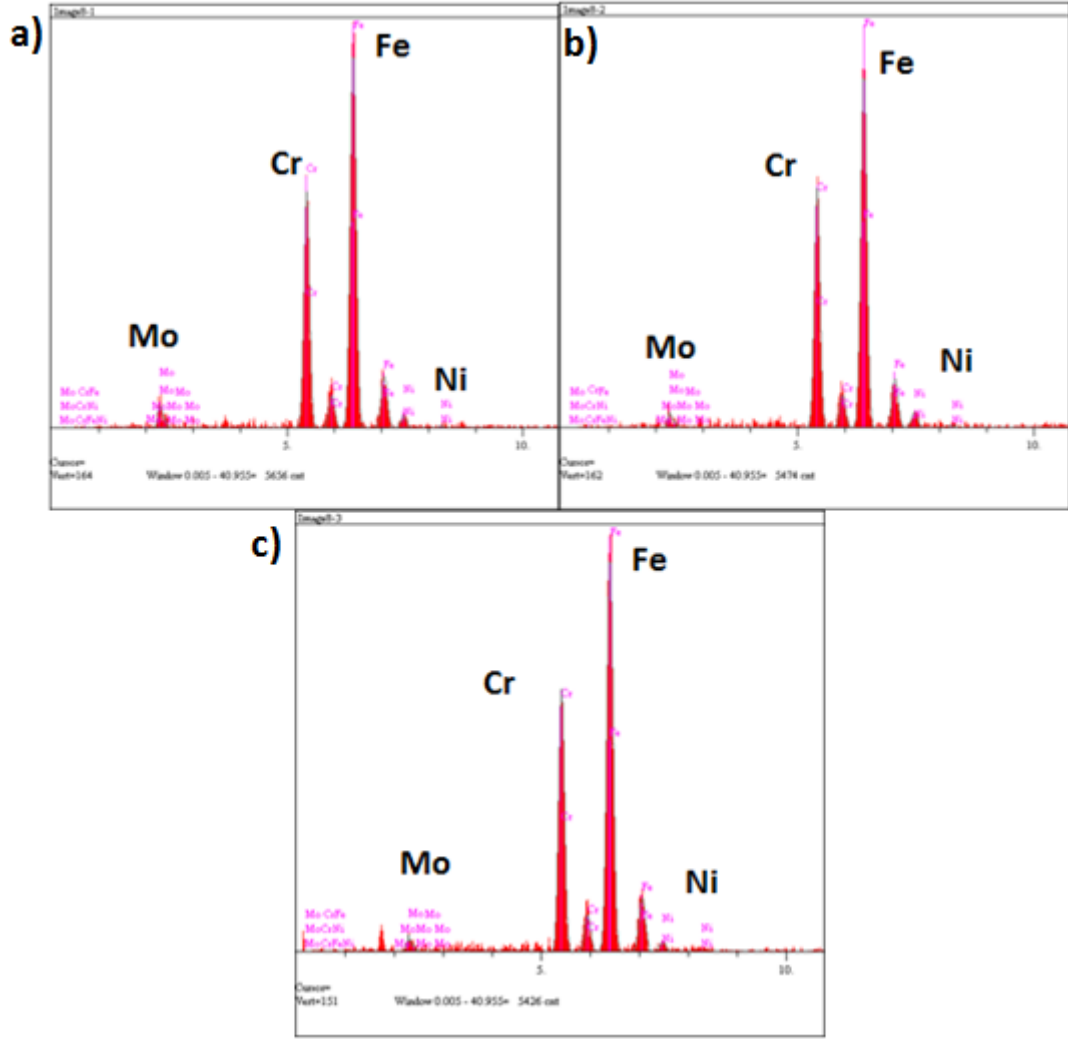
Isıl İşlem Türü	İşlem Parametreleri	Fazlar	Alaşım Elementlerinin Yapıdaki Yüzdesi (%)			
			Cr	Ni	Mo	Fe
İZOTERMAL YAŞLANDIRMA TAVI	1000°C/1sa/su	δ	31,00	3,27	8,94	56,78
	650°C/5dk	γ	23,35	4,43	1,86	70,37
		σ	19,99	6,78	2,35	70,88
	1000°C/1sa/su	δ	27,36	3,29	2,14	67,21
	650°C/60dk	γ	23,93	4,29	3,53	68,25
		σ	26,44	2,03	2,88	68,65
	1000°C/8sa/su	δ	27,02	4,81	3,73	64,44
	650°C/5dk	γ	20,60	6,13	1,42	71,86
		σ	25,62	2,85	1,74	69,79
	1000°C/8sa/su	δ	26,38	2,98	2,63	68,01
	650°C/60dk	γ	22,64	4,48	3,18	69,69
		σ	20,31	8,34	2,35	68,99
1000°C/10sa/su	δ	25,64	3,15	2,99	68,22	
650°C/5dk	γ	21,16	6,25	2,04	70,56	
	σ	22,51	5,49	5,14	66,86	
1000°C/10sa/su	δ	19,83	7,55	1,92	70,68	
650°C/60dk	γ	24,63	2,06	4,47	68,84	
	σ	20,98	6,46	1,57	70,99	

İlk olarak 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından 650°C'ye yavaş soğutulan ve izotermal yaşlandırma işlemi uygulanan numuneler incelenecektir. Şekil 5. 65'te 1000°C' de 1 saat tavlanyl, 650°C' de 5 dakika izotermal yaşlandırılan, Şekil 5. 66'da ise 1000°C' de 1 saat tavlanyl, 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunelerde oluşan birincil ve ikincil fazlara ait EDS spektrumları verilmiştir. 650°C'de 5 dakika izotermal yaşlandırılan numunede ferrit fazının içerdiği Cr ve Mo miktarı sırasıyla %31 ve %8,94'tür. Ferrit kararlaştırıcı olarak bilinen bu iki elementin de miktarları östenit faza kıyasla daha fazladır. Östenit fazın ise içerdiği %4,43 oranındaki Ni miktarı ferrit fazının içerdiği Ni miktarından daha fazladır. 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunede, ferrit fazının içerdiği Cr ve Mo miktarı sırasıyla %27,36 ve %2,14' tür. İzotermal yaşlandırma ısıl işlemi yani malzemenin soğutulması sırasında ötektoid dönüşüm ferritin östenit faza dönüşmesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bu nedenle, izotermal yaşlandırma ısıl işlemi süresince ferrit fazının içerdiği Cr miktarı azalmıştır. Ayrıca östenit fazı %4,287 oranında Ni içerirken; ferrit fazı %3,29 oranında Ni içermektedir.



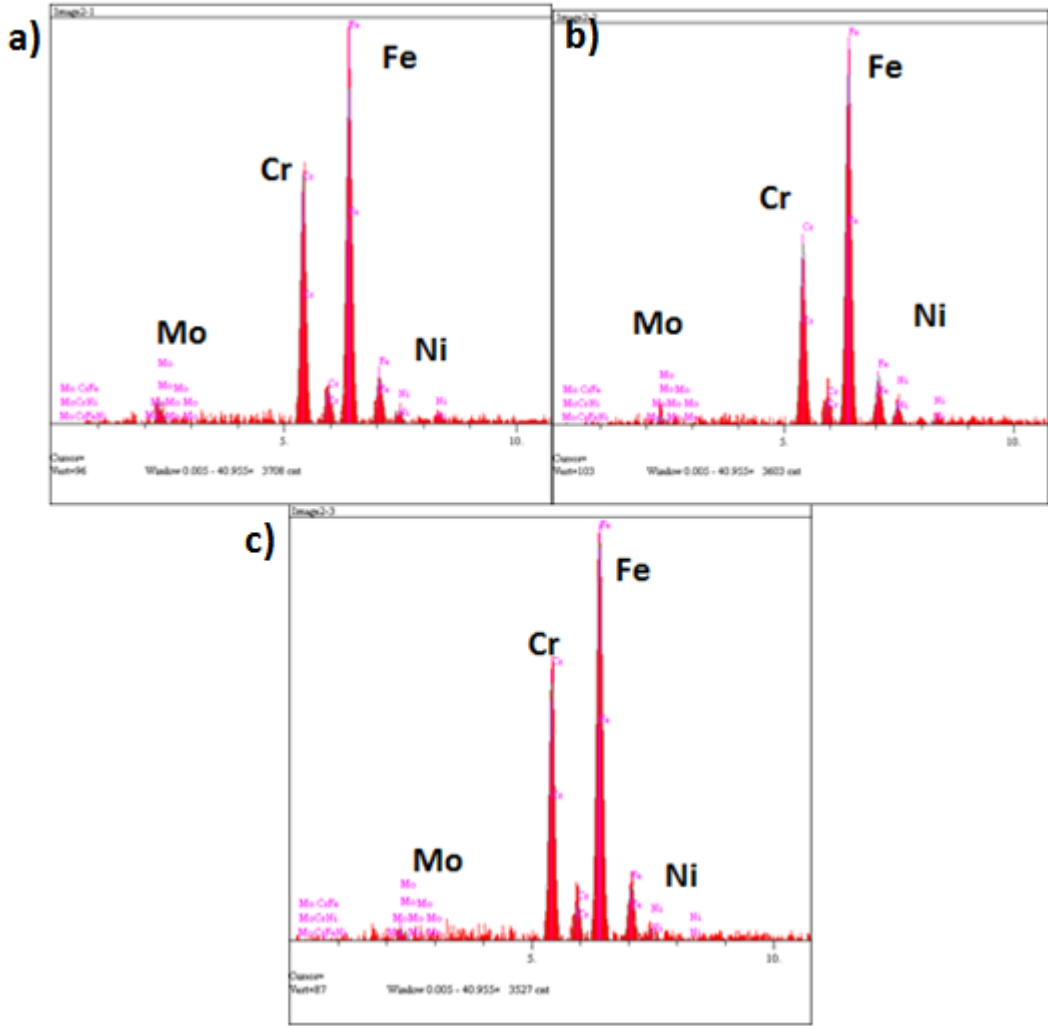
Şekil 5. 65 1000°C'de 1 saat tavlانیp, 650°C'de 5 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

1000°C'de 1 saat tavlانیp, 650°C'ye yavaş soğutulan yapıda çekirdeklenen ikincil faz; 5. dakika %19,99 oranında Cr, %6,78 oranında Ni ve %2,35 oranında Mo elementi içermektedir. İzotermal yaşlandırma süresi 60 dakikaya çıkarıldığında ise, ikincil fazın Cr ve Mo miktarının arttığı, Ni miktarının ise azaldığı görülmektedir. Bilindiği gibi, σ fazı Cr ve Mo elementi içine alıp Ni elementi yayındıran bir fazdır. Yapıda çekirdeklenen ikincil fazdaki elementlerinin miktarlarındaki değişim bu fazın sigma fazı olduğunu göstermektedir.



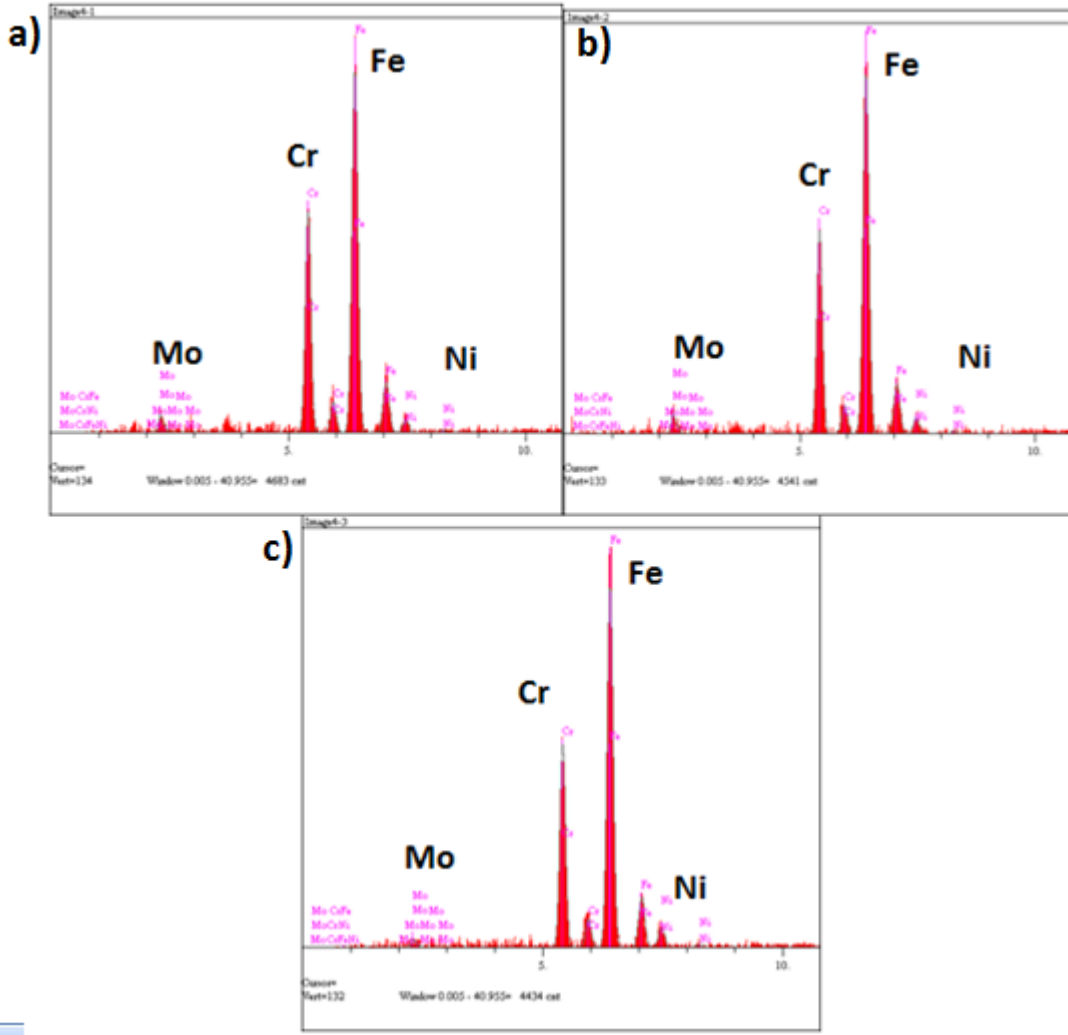
Şekil 5. 66 1000°C’de 1 saat tavlانیp, 650°C’de 60 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) östenit fazına, b) ferrit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

EDS analizi yapılan ikinci gruptaki izotermal yaşlandırma tav numuneleri 1000°C’de 8 saat tavlانیp 650°C’ye yavaş soğutulan numunelerdir. Şekil 5. 67’de 1000°C’de 8 saat tavlانیp, 650°C’de 5 dakika izotermal yaşlandırılan, Şekil 5. 68’de 1000°C’de 8 saat tavlانیp, 650°C’ e 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunelerde oluşan birincil ve ikincil fazlara ait EDS spektrumları yer almaktadır. 5 dakika izotermal yaşlandırılan numunede ferrit fazının içerdiği Cr ve Mo miktarı sırasıyla %27,02 ve %3,72’dir. Östenit fazında bulunan Cr ve Mo miktarı ise sırasıyla %20,6 ve %1,43’tür. Östenit fazın Cr ve Mo içeriği diğer numunelerde olduğu gibi ferrit fazından daha az iken, Ni içeriği daha fazladır. İzotermal yaşlandırma süresi 60 dakikaya çıkarıldığında ise ferrit fazının Cr içeriği ötektoid dönüşümden dolayı bir miktar azalıp %26,38’e düşmektedir. Bunun yanı sıra ferrit fazı %2,63 oranında Mo, %2,98 oranında Ni içermektedir.



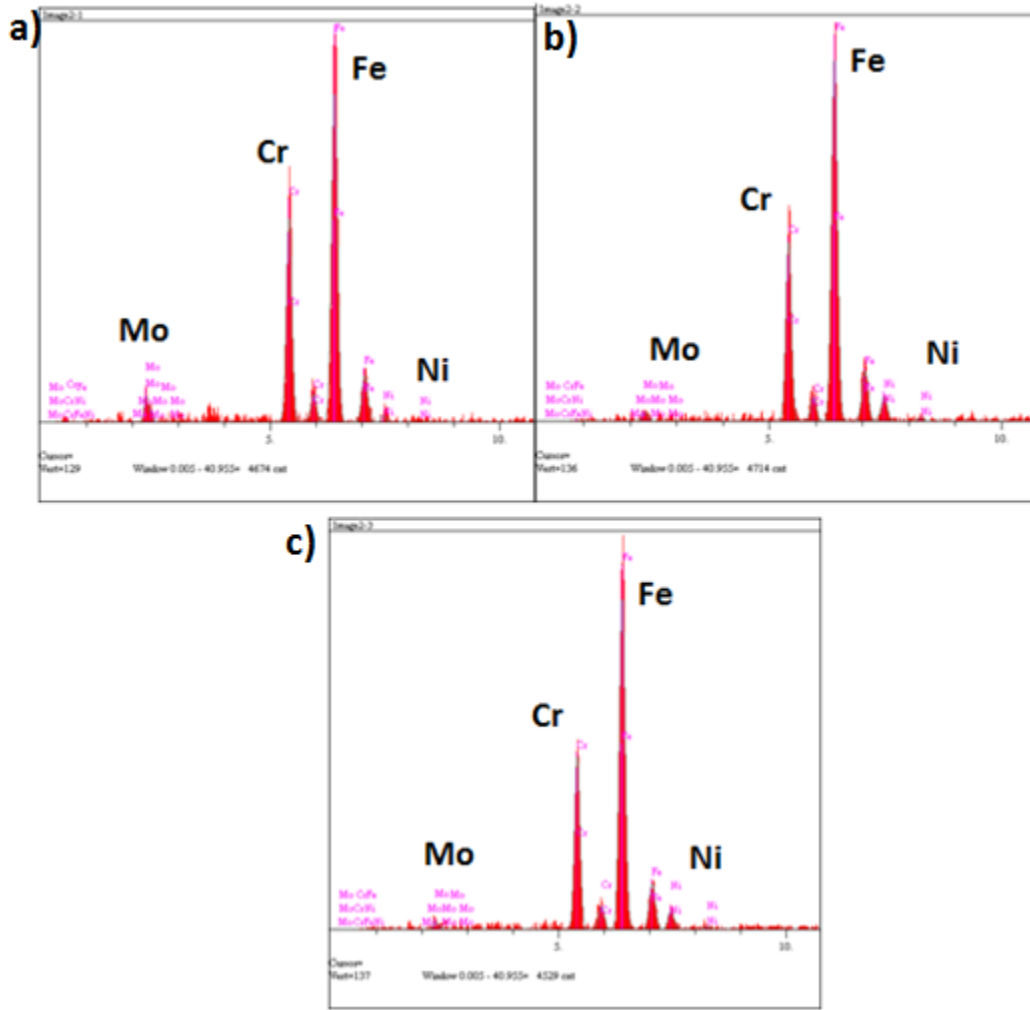
Şekil 5. 67 1000°C'de 8 saat tavlانیp, 650°C'de 5 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

1000°C'de 8 saat tavlandıktan sonra 650°C'de 5 dakika izotermal yaşlandırılan yapıda çekirdeklenen ikincil faz %25,62 oranında Cr, %2,85 Ni ve %1,74 Mo içermektedir. 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan yapıda oluşan ikincil faz ise, sırasıyla %20,31, %8,34 ve %2,35 oranında Cr, Ni ve Mo içermektedir. Yaşlandırma tav işleminde ikincil faz ya da sigma fazının içerdiği Cr miktarı daha fazla idi. İzotermal yaşlandırma işleminde bu fazın daha az Cr içermesinin nedeni; 650°C'de difüzyon olayının 800°C'ye göre daha yavaş gerçekleşmesidir.



Şekil 5. 68 1000°C'de 8 saat tavlانیp, 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

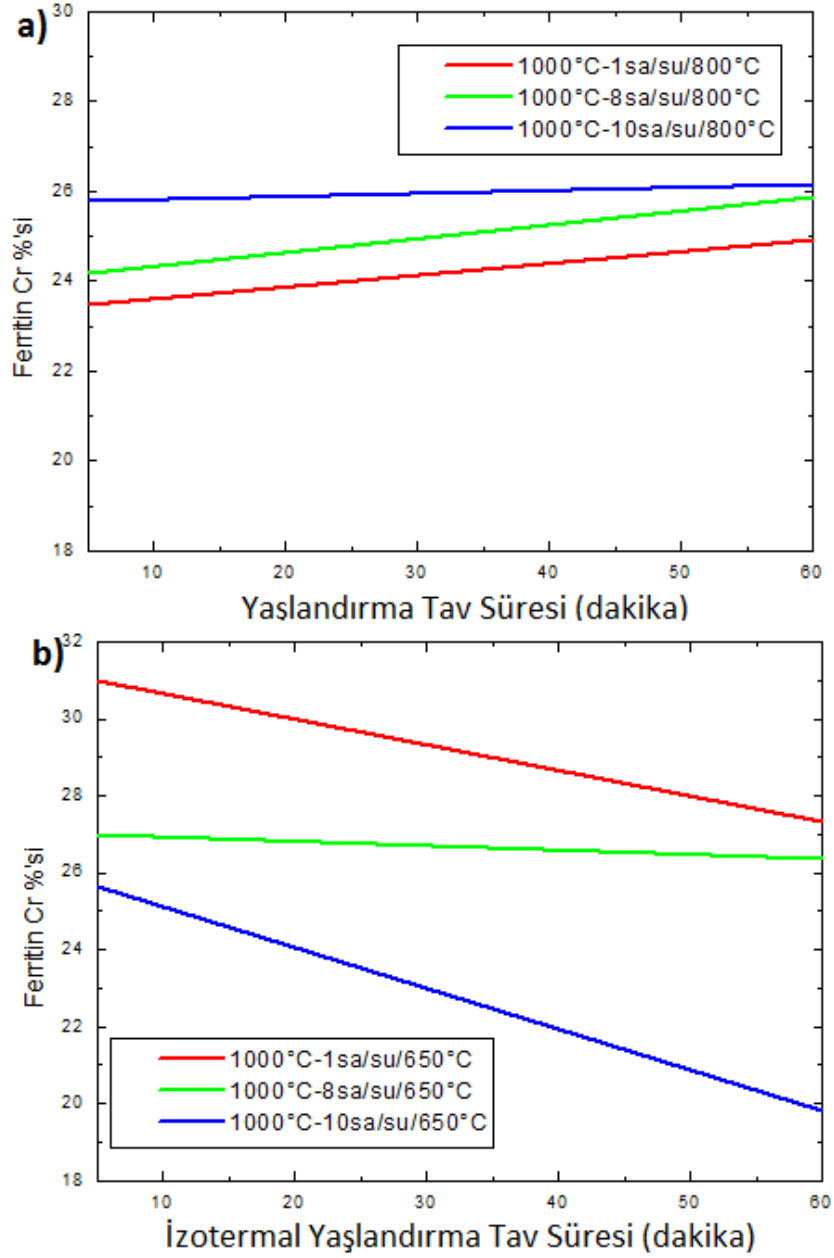
Son olarak 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 650°C'de 5 ve 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunelere ait EDS spektrumları yorumlanacaktır. Şekil 5. 69'da 650°C'de 5 dakika, Şekil 5.70'te 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırma uygulanan numunelerde oluşan birincil ve ikincil fazlara ait EDS spektrumları yer almaktadır. Verilen spektrumlarda görüldüğü gibi, iki durumda da ferrit fazının Cr ve Mo içeriği östenit fazından daha fazla, Ni içeriği ise östenit fazından daha azdır. Bunun yanı sıra ferrit fazının Cr içeriği, önceki dört numunenin de altına düşerek %25,64 olarak ölçülmüştür. İzotermal yaşlandırma işleminin 60. dakikasında ise daha da azalarak %19,83'e düşmüştür. Ötektoid dönüşümün ferritin parçalanması şeklinde gerçekleşmesi ferritin Cr içeriğini azaltmıştır. Ayrıca alaşım elementlerinin difüzyonu ferrit içerisinde östenite göre çok



Şekil 5. 70 1000°C'de 10 saat tavlانیp, 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan 2205 dubleks paslanmaz çelikte a) ferrit fazına, b) östenit fazına, c) ikincil faza ait EDS spektrumu

Dubleks paslanmaz çelikteki ikincil fazların çekirdeklenmesi ve büyümesi difüzyon kontrollü bir mekanizmadır. İkincil fazlar yapıda ferrit-östenit tane sınırlarında çekirdeklenirken, bu oluşumda komşu fazlardaki alaşım elementlerinin difüzyonu söz konusudur. Şekil 5. 71'de δ -ferrit fazındaki Cr miktarının yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav işlemi parametrelerine bağlı değişimi verilmiştir. Her iki ısıtma işlemde de sigma fazının oluşması nedeniyle δ -ferrit fazındaki Cr miktarının tav süresince azalması beklenmektedir. Ancak, izotermal yaşlandırma tav işleminde δ -ferrit fazındaki Cr miktarı tav süresince azalırken, yaşlandırma tav işleminde δ -ferrit fazındaki Cr miktarı tav süresince artmıştır. Bunun nedeni; ısıtma esnasında malzemede meydana gelen ötektoid dönüşümdür. Ötektoid dönüşüm, γ fazının δ -ferrit fazına dönüşmesi şeklinde gerçekleştiği için δ -ferritin içerdiği Cr miktarı zamanla artmaktadır. Bu ötektoid

dönüşüm sırasında yapıda ikincil fazlarda çekirdeklenmektedir. İkincil fazlar ferrit fazındaki Cr elementini yapısına katarak büyümesine rağmen, $\gamma \rightarrow \delta$ dönüşümünün daha baskın olması sebebiyle δ -ferrit fazındaki Cr miktarı tav süresince artmıştır.



Şekil 5. 71 δ -ferrit fazındaki Cr miktarının a) yaşlandırma, b) izotermal yaşlandırma tav işlemi parametrelerine bağlı değişimi

5.4 Yapının Isıl İşlem Parametrelerine Bağlı Sertlik Değişimi

Bu bölümde 2205 dubleks paslanmaz çelikte çözme, yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav işlemleri uygulanan numunelerin Vickers sertlik değerlerinin yorumlanması ele alınacaktır. Çizelge 5. 9'da, 1000°C'de 1, 2, 4, 6, 8 ve 10 saat uygulanan çözme tavının ardından suda ve fırında soğutulan malzemelere ait Vickers sertlik değerleri yer almaktadır.

Çizelge 5. 9 Çözme tavi uygulanan numunelerin Vickers sertlik değerleri

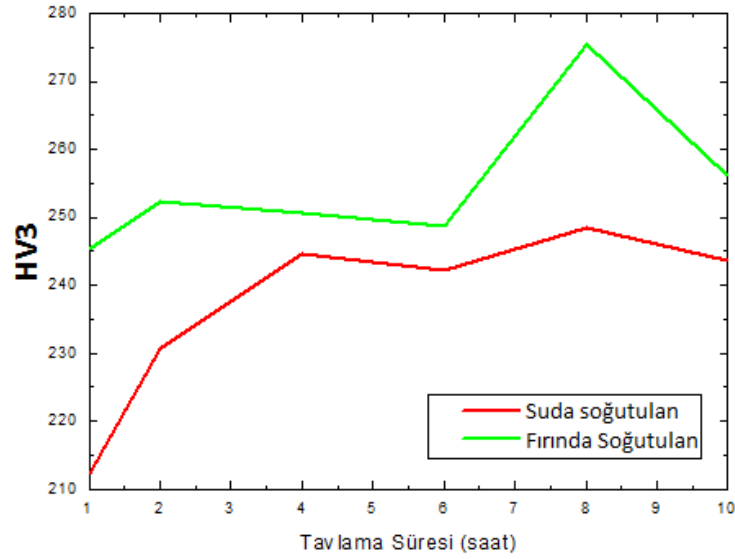
Çözme Tavi Uygulanan Numunelerin Vickers Sertlik Değerleri			
Çözme Tav Sıcaklığı (°C)	Çözme Tav Süresi (saat)	Soğutma Ortamı	
		Su (HV3)	Fırın (HV3)
1000	1	212,47±6	245,33±7
	2	230,54±6	252,45±7
	4	244,54±7	250,65±7
	6	242,25±6	248,78±7
	8	248,42±7	275,33±8
	10	243,69±6	256,22±7

Dubleks paslanmaz çeliklerde yapının sertliği çok çeşitli faktörlere bağlıdır. Bunlardan başlıcaları; yapıdaki tane sınırı sayısı, tanelerin büyüklüğü, birincil ve ikincil fazların miktarı ve yapı içerisindeki dağılımı, yeniden kristalleşme durumu, uygulanan ısı işlemleri olarak sıralanabilir. Şekil 5. 72'de çözme tavı numunelerine ait Vickers sertlik değerlerinin çözme tav süresine bağlı değişimi verilmiştir. Bu grafikte göze çarpan ilk durum, çözme tavının 8 saat olduğu durumda suda soğutulan numunelerde de, fırında soğutulan numunelerde de meydana gelen sertlik artışıdır. Önceki bölümlerde ele alındığı üzere; ısı işlem öncesinde termomekanik işlem görmüş malzeme uygun şartlar yakalandığında yeniden kristalleşmektedir. 1000°C'de 8 saat çözme tavi uygulanan malzeme yeniden kristalleşmekte ve yapıda yeni tanelerin çekirdeklenmesiyle yapının tane sınırı sayısı artmaktadır. Tane sınırı sayısının artması ile de yapının sertliğinde artış meydana gelmektedir.

1000°C'de çözme tavi uygulanıp ardından suda soğutulan numunelerde, çözme tavının 8. saatinde belirgin olmak üzere, sertlik değerlerinde zamanla artış meydana

gelmektedir. Bu durumun sebebi, çözme tav süresi boyunca meydana gelen ötektoid reaksiyon ile yapıdaki ferrit miktarının artışıdır. Bilindiği gibi, δ -ferrit fazı Fe-C diyagramında yer alan en sert fazdır. Yapıdaki ferrit miktarının artması sertlik değerlerinin de artmasına neden olmaktadır. Suda soğutulan malzemelerde hızlı soğumadan dolayı herhangi bir ikincil faz çekirdeklenmesi meydana gelmediğinden sertlik artışı yeniden kristalleşme ve yapıdaki ferrit miktarı ile yorumlanabilir.

1000°C'de çözme tavi uygulanıp ardından fırında soğutulan numunelerin de sertlik değerleri zamanla artmıştır. Çözme tav süresinin 8 saat olduğu durumdaki sertlik artışı yeniden kristalleşme olayından kaynaklanmaktadır. Bunun dışında soğutma esnasında ötektoid dönüşümün östenit yönünde gerçekleşmesine rağmen yapının sertliğinin artması; yapıda çekirdeklenen ikincil fazlar ile açıklanabilir. Yapıda çekirdeklenen intermetalik fazların sertlik değerleri δ -ferrit fazından da yüksek olduğu için fırında soğutulan numunelerin sertlik değerleri suda soğutulanlara kıyasla daha yüksek ölçülmüştür.



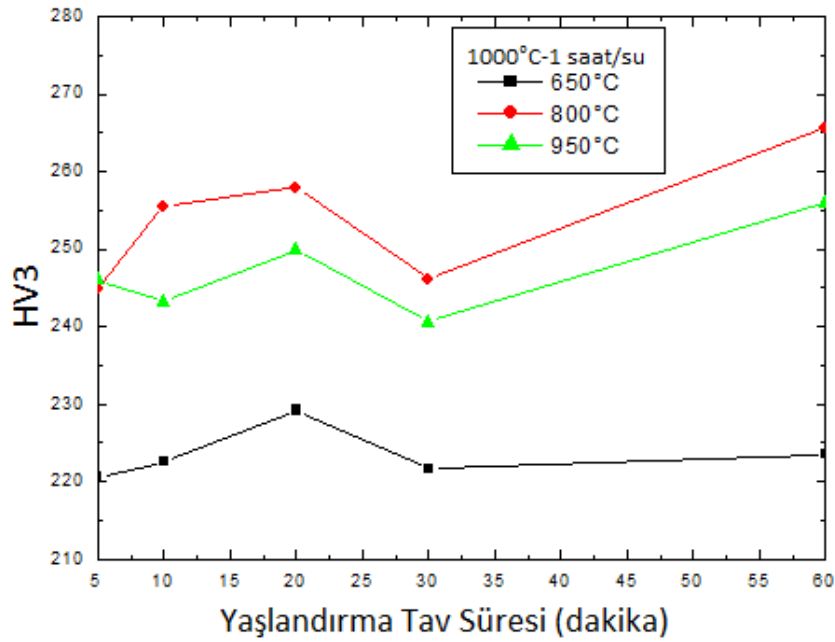
Şekil 5. 72 1000°C'de çözme tavi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelere ait Vickers sertlik değerlerinin zamana bağlı değişimi

Çözme tav numunelerinin ardından yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav numunelerinin sertlik değerleri ölçülmüştür. Çizelge 5. 10'da yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelerin Vickers sertlik değerleri verilmiştir. Bu değerlerin yorumlanması yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma şartları için ayrı ayrı ele alınacaktır.

Çizelge 5. 10 Yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelerin Vickers sertlik değerleri

Sertliği Ölçümü Yapılan Numuneler						
1000°C-1 Saat						
Süre (dk)	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)		
	650 (HV3)	800 (HV3)	950 (HV3)	650 (HV3)	800 (HV3)	950 (HV3)
5	220,62	244,91	245,98	247,92	249,11	252,45
10	222,57	255,47	243,21	249,78	250,29	252,89
20	229,26	257,98	249,87	248,36	248,78	249,23
30	221,75	246,13	240,62	250,14	252,43	250,94
60	223,64	256,55	255,89	249,76	253,84	247,44
1000°C-8 Saat						
	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)		
	650 (HV3)	800 (HV3)	950 (HV3)	650 (HV3)	800 (HV3)	950 (HV3)
5	238,10	244,45	244,16	250,96	251,42	249,49
10	240,22	247,63	243,21	252,56	248,45	246,52
20	240,13	249,15	246,56	255,87	247,56	247,86
30	244,78	248,89	249,34	258,79	244,49	248,16
60	246,80	257,27	251,64	257,03	254,03	246,22
1000°C-10 Saat						
	Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)			İzotermal Yaşlandırma Tav Sıcaklığı (°C)		
	650 (HV3)	800 (HV3)	950 (HV3)	650 (HV3)	800 (HV3)	950 (HV3)
5	241,12	244,65	243,96	251,56	240,85	247,74
10	245,82	250,67	248,81	249,65	238,17	245,89
20	242,78	249,19	247,87	252,78	241,58	252,12
30	249,78	252,53	248,32	254,42	242,96	248,79
60	248,36	256,12	249,71	253,48	244,49	251,2

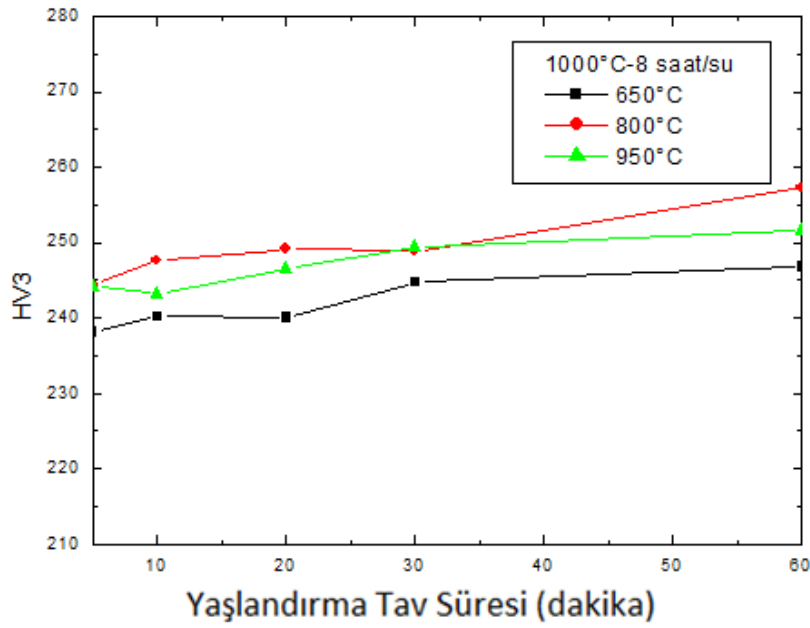
İlk olarak, Şekil 5. 73'te 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından yaşlandırma tav işlemi uygulanan numunelerin yaşlandırma tavi parametrelerine bağlı sertlik değişimi verilmiştir. Yapıda meydana gelen sertlik değişimi iki faktöre bağlı olarak yorumlanabilir. Bunlardan ilki, yapıdaki ikincil faz oranıdır. Yaşlandırma tav işleminde ikincil faz oluşumu en yoğun 800°C'de görülmektedir. Bu nedenle bu sıcaklıktaki sertlik değerleri en yüksek seviyededir. Sertlik değerlerini etkileyen diğer faktör ise; yapıdaki δ -ferrit oranıdır. Yaşlandırma tav işleminde ısıtma esnasında östenit fazı ötektoid dönüşüm ile δ -ferrite dönüştüğünden Şekil 5. 73'te görüldüğü gibi her bir yaşlandırma tav sıcaklığı için işlem süresince yapının sertliği artmaktadır. 800°C için sertlik artışı ayrıca yapıda çekirdeklenen ikincil fazlara da bağlıdır. Bunun dışında, yaşlandırma tav sıcaklığının artması daha fazla δ -ferrit oluşumunu sağlamaktadır. Bu yorumdan yola çıkarak, 950°C'de daha fazla oranda ferrit oluşacağı için bu sıcaklıktaki sertlik değerleri 650°C'den daha yüksektir. Ayrıca, 950°C'de yapıda çekirdeklenen ikincil fazlar 30. dakikadan itibaren yapının sertliğinde ani bir artışa neden olmuştur.



Şekil 5. 73 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi

1000°C'de 8 saat uygulanan çözme tavinin ardından yaşlandırma tav işlemine tabi tutulan numunelerin yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi Şekil 5. 74'te verilmiştir. 800°C'de ölçülen sertlik değerleri bu sıcaklıkta yapıda ikincil fazların

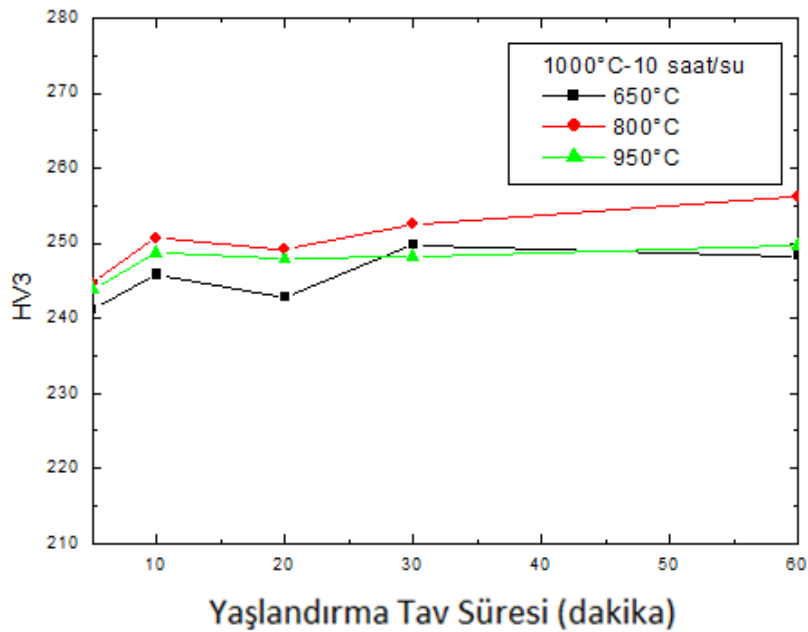
da çekirdeklenmesi nedeniyle en yüksektir. Ötektoid dönüşümün ısıtma esnasında δ -ferrit yönünde gerçekleşmesi nedeniyle yaşlandırma tav işlemi süresince yapının sertliği her bir yaşlandırma tav sıcaklığı için artmaktadır. Çözme tavi süresinin 1 saat olduğu duruma benzer şekilde 950°C'deki yapının ferrit oranı 650°C'dekinden daha yüksek olduğu için bu sıcaklık için ölçülen sertlik değerleri 650°C'deki yapıdan daha yüksektir. 950°C'de ölçülen sertlik değerinin yüksek olmasında yapıda çekirdeklenen ikincil fazların da etkisi vardır.



Şekil 5. 74 1000°C'de 8 saat çözme tavinin ardından yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi

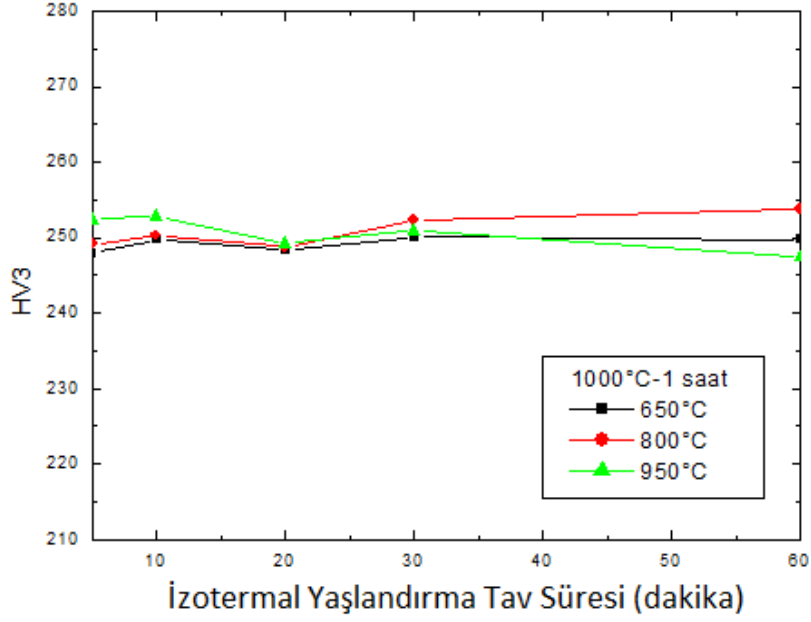
Yaşlandırma tav işlemi için sertlik değerleri ölçülen son grup; yaşlandırma tavi öncesinde 1000°C'de 10 saat çözme tavi uygulanmış olan numunelerdir. Şekil 5. 75'te 1000°C'de 10 saat çözme tavinin ardından 650°C, 800°C ve 950°C'de yaşlandırma tav işlemi uygulanan numunelerin yaşlandırma tav süresine bağlı sertlik değişimi verilmiştir. Önceki iki grupta olduğu gibi, burada da 800°C'de ölçülen sertlik değerleri 650°C ve 950°C'den daha yüksektir. Bu durumun yapıda çekirdeklenen ikincil fazlardan kaynaklandığı belirtilmişti. Ayrıca daha önce de ele alındığı gibi, 950°C'deki yapıda hem ikincil fazların varlığı hem de bu yapının ferrit miktarının 650°C'deki yapıya göre daha yüksek olmasından dolayı sertliği de daha yüksektir.

Yaşlandırma tav işlemi numuneleri öncesinde uygulanan 1000°C'deki çözme tav işlemi süresinin 1, 8 ve 10 saat olmasına göre 3 gruba ayrılabilir. Çözme tav süresinin artmasıyla birlikte yapıda ötektoid dönüşüm ile oluşan δ -ferrit miktarı da artmaktadır. Yani, yaşlandırma tavının uygulandığı 10 saatlik çözme tav numunelerinin ferrit miktarı 8 saatliklerden; 8 saatlik çözme tav numunelerinin ferrit miktarı da 1 saatliklerden daha fazladır. Buna bağlı olarak, yaşlandırma tavi sonrasındaki sertlik değerleri karşılaştırıldığında, 10 saatlik çözme tav numunelerinin sertlik değerlerinin 8 saatliklerden; 8 saatlik çözme tav numunelerinin sertlik değerlerinin ise 1 saatliklerden daha fazla olduğu saptanmıştır.



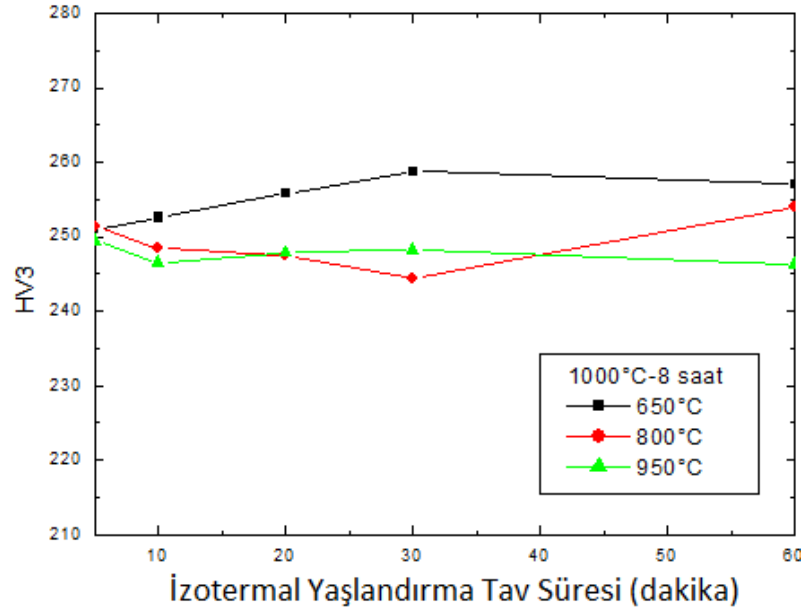
Şekil 5. 75 1000°C'de 10 saat çözme tavının ardından yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi

İzotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan numunelerin sertlik değerleri çözme ve yaşlandırma tav işlemi numunelerine göre daha dengesizdir. Bunun nedeni, sertlik değeri üzerine ters etkisi olan parametrelerin yapıdaki etkinliğidir. Örneğin; izotermal yaşlandırma işlemi sırasında yapı soğutulduğu için ötektoid dönüşüm ferrit fazının östenit faza parçalanması şeklinde gerçekleşmektedir. Bu durumda, ferrit miktarının azalmasıyla birlikte sertlik değerinin de azalması beklenir. Ancak bu sırada yapıda ikincil fazların çekirdeklenmesi de söz konusudur. Bu parametrelerin sertlik değerlerini ne şekilde etkilediği aşağıdaki grafiklerde tek tek ele alınacaktır.



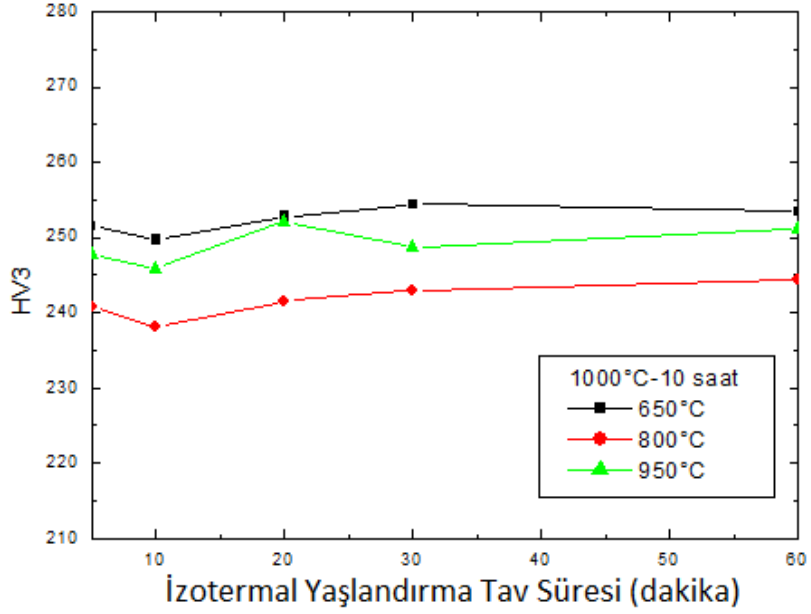
Şekil 5. 76 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi

İlk olarak, 1000°C'de 1 saat çözme tavının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan numunelerin sertlik değerlerinin izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı değişimleri ele alınacaktır. İzotermal yaşlandırma tav sıcaklıkları olan 650°C, 800°C ve 950°C'de ölçülen sertlik değerleri arasında belirgin bir fark yoktur. Bu durumu yapıdaki ikincil faz ve ferrit miktarı ile açıklamak mümkündür. 650°C'de diğer sıcaklıklara kıyasla çekirdeklenen ikincil faz miktarı daha fazla, ferrit miktarı ise daha azdır. 950°C'ye ise yapının ferrit miktarı daha fazla iken yapıda herhangi bir ikincil faz çekirdeklenmesi söz konusu değildir. Kısacası; yapının 650°C'deki sertlik artışını ikincil fazlar sağlarken, 950°C'dekini ferrit fazı sağlamaktadır. 800°C'de ise, yapıda ne 650°C'de olduğu kadar ikincil faz, ne de 950°C'deki ferrit oranı mevcuttur. Bu faktörlerin yapıyı değişik yönlerde etkilemesiyle Şekil 5. 76'daki grafikler elde edilmiştir.



Şekil 5. 77 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi

Şekil 5. 77'de 1000°C'de 8 saat çözme tavının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan numunelerin izotermal yaşlandırma tav süresine bağlı sertlik değişimi verilmiştir. Bu gruptaki numunelerde yapıdaki ikincil fazların etkisiyle en yüksek sertlik değerleri 650°C'deki yapıda mevcuttur. İkincil fazların, 650°C'deki yapıda bulunduğu kadar olmasa da, 800°C'de izotermal yaşlandırılan numunede de çekirdeklenmesi, buna karşın yapının ferrit miktarının azalmasından dolayı sertlik değerleri inişli çıkışlı bir davranış sergilemiştir. 950°C'ye gelindiğinde ise, bu sıcaklıktaki sertlik değerlerinin 650°C ve 800°C'den farklı olmamasının nedeni; yapıdaki ferrit miktarının diğer sıcaklıklardan daha fazla olmasıdır.

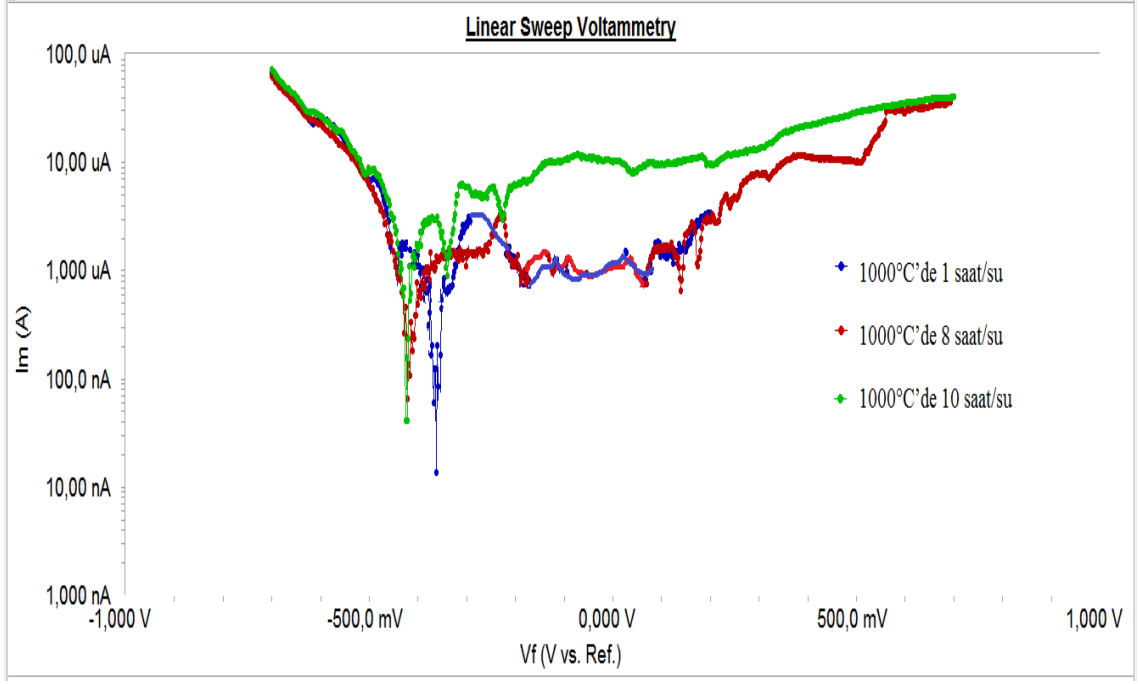


Şekil 5. 78 1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı sertlik değişimi

Son gruptaki numuneler ise; 1000°C’de 10 saat çözme tavının ardından izotermal yaşlandırma tav işlemi uygulanan numunelerdir. Bu numunelerin sertlik değerlerinin izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ve süresine bağlı değişimi Şekil 5. 78’de verilmiştir. 8 saatlik numunelerde olduğu gibi, en yüksek sertlik değerleri ikincil fazların en yoğun olduğu sıcaklık olan 650°C’de izotermal yaşlandırılan numunede ölçülmüştür. 650°C’den sonra en yüksek sertlik değerleri 950°C’de izotermal yaşlandırılan numuneye aittir. 950°C’deki sertlik değerleri yapının ferrit oranının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. 800°C’de izotermal yaşlandırılan numunede ise; ikincil faz oranının 650°C’deki, ferrit oranının ise 950°C’deki numuneden daha az olması sebebiyle yapının sertlik değerlerinin en düşük olduğu görülmektedir.

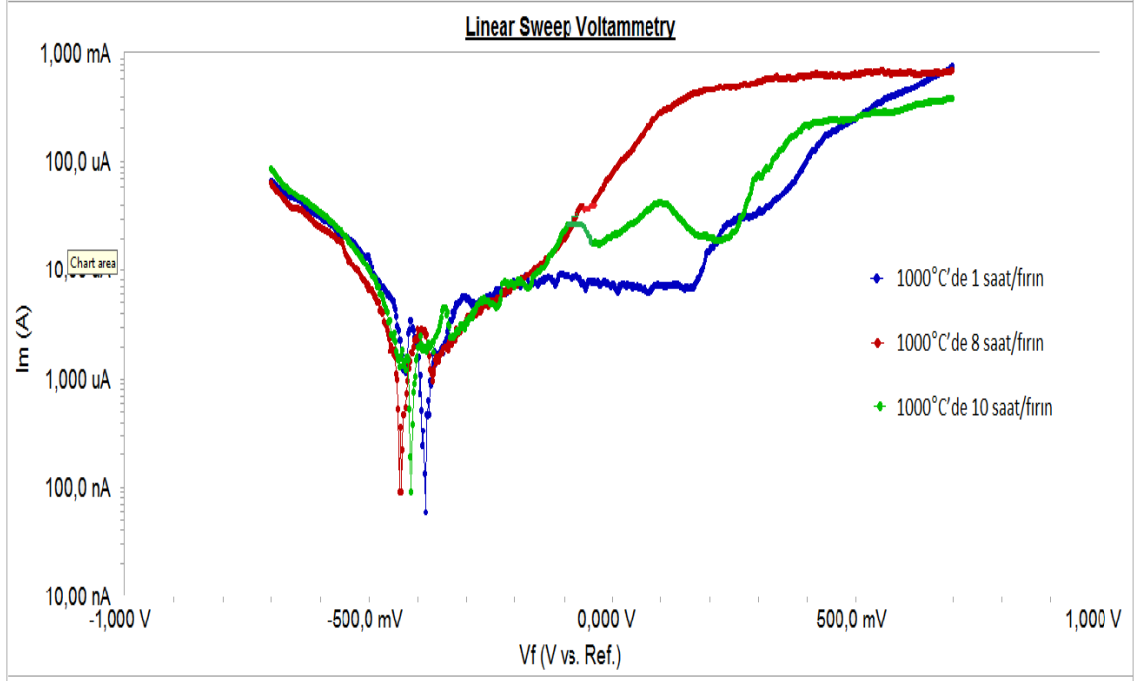
5.5 Yapının Isıl İşlem Parametrelerine Bağlı Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi

Bu bölümde, EDS analizi yapılan numunelere uygulanan korozyon testinin grafiksel sonuçları bulunmaktadır. İlk olarak; 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat uygulanan çözme tavlı uygulanıp suda ve fırında soğutulan numunelere ait grafikler ele alınacaktır. Bilindiği gibi, suda soğutulan numunelerde ikincil fazlar hızlı soğumadan dolayı yapıda çekirdeklenmeye fırsat bulamamıştır. Bu nedenle, bu numunelerin sergilediği korozyon davranışı çözme tavlı sonrasında içerdiği birincil fazlara göre yorumlanacaktır. Çizelge 5. 1'de çözme tavlı parametrelerine bağlı olarak yapının ferrit oranları yer almaktadır. Dupleks paslanmaz çeliklerde δ -ferrit fazının oyuklanma korozyon dayanımı γ fazından daha azdır. Bu nedenle yapıda δ -ferrit oranının artması E_{kor} değerini düşürmekte; yani yapı daha fazla korozyona uğramaktadır. Şekil 5. 79'da 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat uygulanan çözme tavlının ardından suda soğutulan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. Şekil 5. 79'da ve bu çalışmada yer alan tüm korozyon grafikleri, x eksenini potansiyeli; y eksenini ise sistemden geçen akımı gösteren yarı logaritmik olarak çizilmiştir. Uygulanan korozyon deneylerinde sonucunda elde edilen verilerde korozyon dayanımının yorumlanması I_{cor} veya E_{cor} değerleri üzerinden yapılmaktadır. Bu çalışmada E_{cor} değerleri baz alınacaktır. Numuneye ait E_{cor} değerini x eksenindeki potansiyel değeri göstermektedir. Genel olarak, bu değer 0'a ne kadar yakınsa numunenin korozyon dayanımı o derece yüksektir, yorumu yapılır. 1000°C'de 1 saat çözme tavlı uygulanan numunenin verdiği pik, 8 ve 10 saatlik numunelerden daha sağdadır, yani E_{cor} değeri daha yüksektir. Bu durum, bu numunenin daha az korozyona uğradığını göstermektedir. Nitekim 1000°C'de 1 saat çözme tavlı uygulanan numunenin δ -ferrit oranı diğer iki numuneden daha az olduğu için beklenen durum da bu yöndedir. 8 ve 10 saat çözme tavlı uygulanan numuneler arasında ise belirgin bir fark bulunmamaktadır. Çözme tavlı süresince yapının δ -ferrit oranı arttığı için bu numunelerin verdiği piklerin voltaj değeri daha düşüktür. Yani bu numuneler daha fazla korozyona uğramıştır.



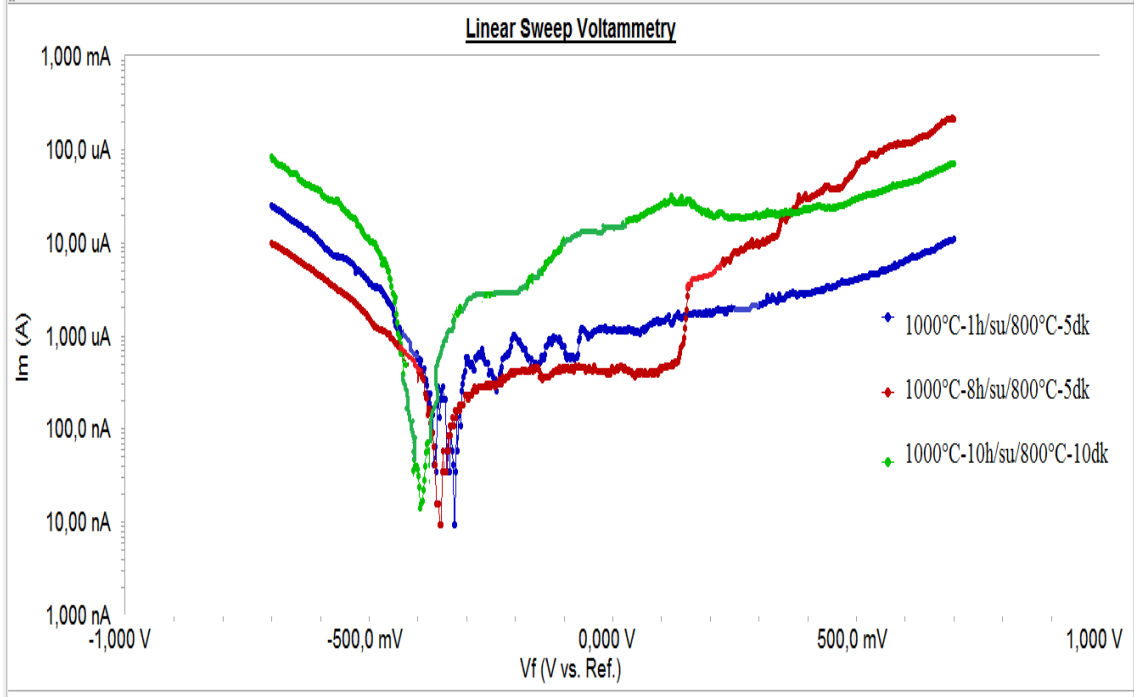
Şekil 5. 79 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavı uygulanan ve suda soğutulan numunelere ait korozyon eğrileri

1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavı uygulanıp fırında soğutulan numunelerde, suda soğutulan numunelerden farklı olarak yapıda birincil fazların yanı sıra ikincil fazlarda çekirdeklenmiştir. Yapıda ikincil fazların çekirdeklenmesi korozyon özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Yavaş soğutma esnasında ötektoid dönüşümün östenit yönünde meydana gelmesine rağmen, yapıda ikincil fazların çekirdeklenmesi korozyon için hassas bölgeler oluşturmakta ve yapı korozyona uğramaktadır. Şekil 5. 80'de 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavı uygulandıktan sonra fırında soğutulan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. 1000°C'de 1 saat çözme tavı uygulanan numunenin içerdiği ikincil faz oranı en az olduğundan verdiği pik 0'a en yakındır; bu yapı diğer iki yapıdan daha az korozyona uğramıştır. Çözme tavının 8 saat olduğu durumdaki numune E_{cor} değerinin en düşük olduğu numunedir. Bu durumun sebebi; malzemenin bu şartlarda yeniden kristalleşmesi ve oluşan ikincil fazların oran olarak diğer iki numuneden daha fazla olmasıdır.



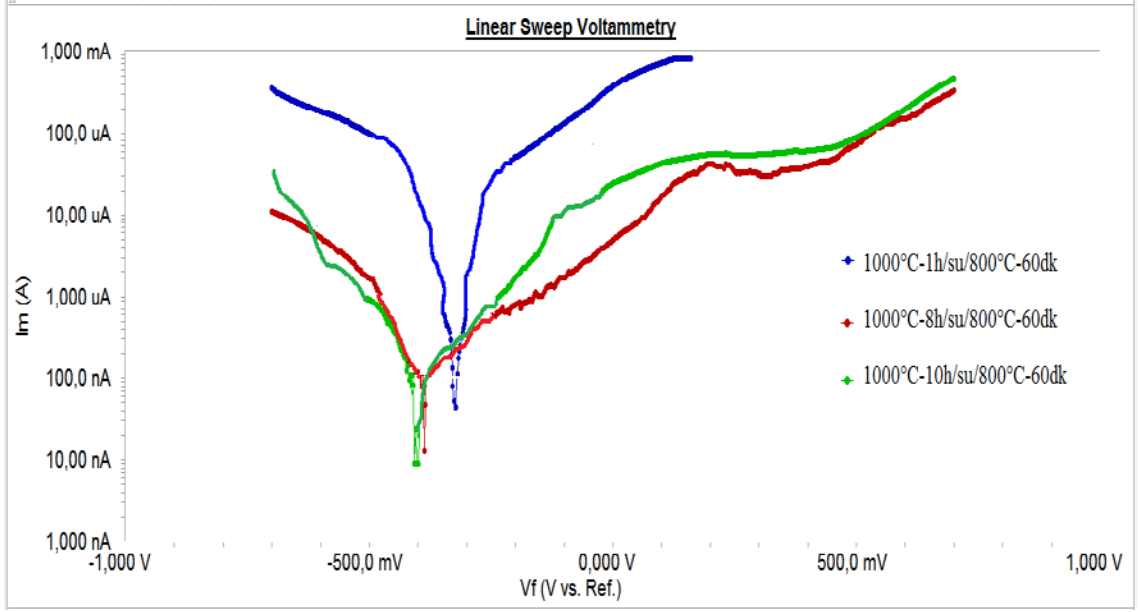
Şekil 5. 80 1000°C’de 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulanan ve fırında soğutulan numunelere ait korozyon eğrileri

Çözme tav numunelerinin ardından yaşlandırma tav numunelerinin korozyon eğrileri yorumlanacaktır. İlk olarak, çözme tav süresinin yaşlandırma tavi üzerindeki etkisini görmek amacıyla, ikincil fazların 800°C’de ilk çekirdeklenmeye başladığı süreler incelenecektir. Şekil 5. 81’de 1000°C’de 1, 8 ve 10 saat çözme tavidan sonra 800°C’de 5 dakika uygulanan yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri verilmiştir. Çizelge 5. 3’te verilen ferrit oranları ve Çizelge 5. 4’te verilen ikincil faz oranları karşılaştırıldığında çözme tav süresi arttıkça yaşlandırma işleminde oluşan ikincil faz miktarının da, ferrit oranının da arttığı görülmektedir. Buna bağlı olarak, bu iki faktörün korozyon dayanımını düşürmesi sebebiyle Şekil 5. 81’de görüldüğü gibi 1000°C’de 10 saat çözme tavi uygulanıp yaşlandırılan numune E_{cor} değeri en düşüktür. Bu gruptaki numuneler arasında en çok korozyona uğrayan numune 1000°C’de 10 saat çözme tavi uygulanıp suda soğutulan ardından 800°C’de 10 dakika yaşlandırılan numunedir. Daha sonra 1000°C’de 8 saat çözme tavi uygulanıp yaşlandırılan numune ve son olarak da 1000°C’de 1 saat çözme tavi uygulanıp yaşlandırılan numune yer almaktadır.



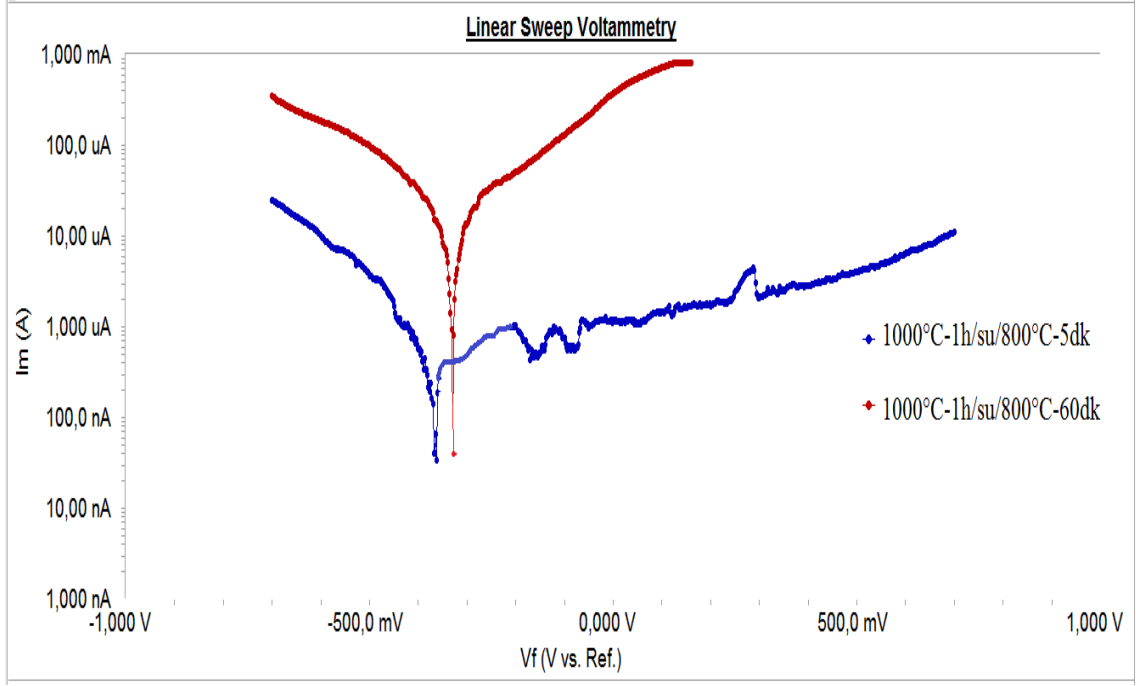
Şekil 5. 81 SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin 800°C'de 5 dakika uygulanan yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri

Korozyon değerlerinin karşılaştırıldığı diğer gruptaki numuneler, 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulandıktan sonra suda soğutulan ve 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan numunelerdir. Numuneleri ısıtma sırasında ikincil fazların çekirdeklenmesi ve çözme tavi süresince de hem ferrit oranının artması, hem de çekirdeklenen ikincil fazların büyümesi nedeniyle yapının korozyon dayanımı önemli ölçüde azalmaktadır. Şekil 5. 82'de verilen eğriler incelendiğinde 1000°C'de 8 saat çözme tavi uygulanıp suda soğutulan ardından 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan numunenin E_{cor} değerinin diğer iki numuneden daha düşük olduğu ve bu sebeple yapının daha fazla korozyona uğradığı görülmektedir. Bu durumun sebebi; yeniden kristalleşme mekanizmasının korozyon dayanımını olumsuz etkilemesi olarak yorumlanabilir. Bilindiği üzere, büyük kristalli yapılar korozyon özellikleri bakımından küçük kristalli yapılara göre daha stabildir. Bu nedenle, yeniden kristalleşmenin gerçekleştiği yapılar daha kolay korozyona uğramaktadır. Bu yoruma paralel olarak, Şekil 5. 82'deki eğrilerde görüldüğü gibi, 800°C'de 60 dakika yaşlandırmanın öncesinde 8 saat çözme tavi uygulanan numune 10 saatlik numuneden; 10 saat çözme tavi uygulanan numune ise 1 saatlik numuneden daha fazla korozyona uğramıştır.



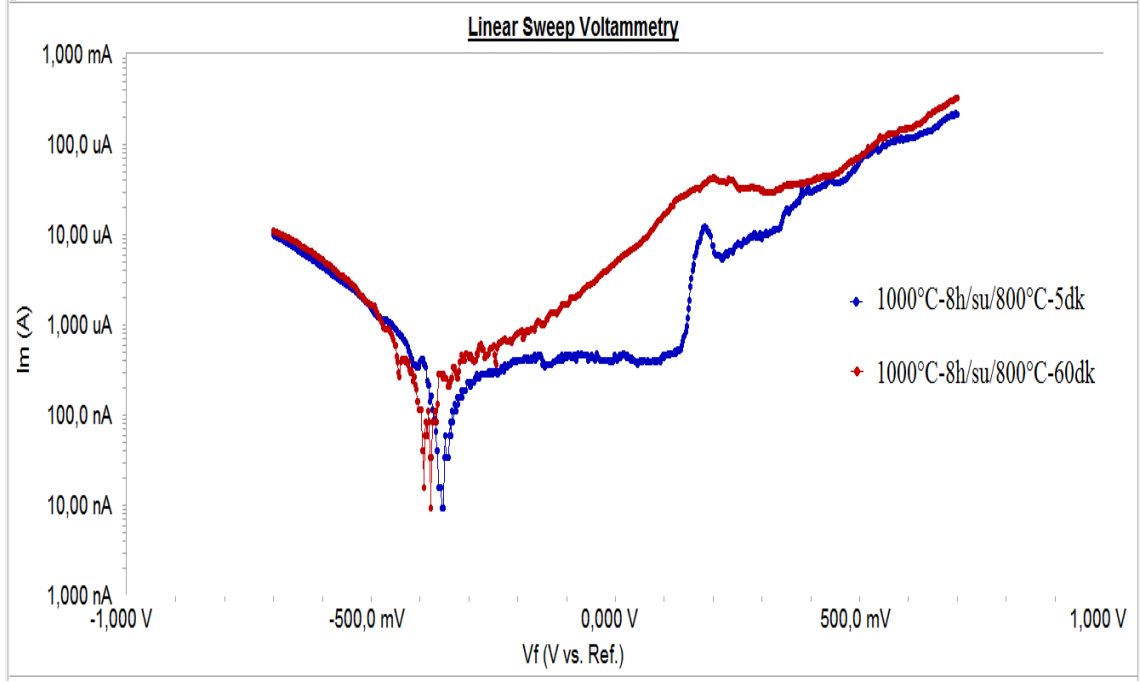
Şekil 5. 82 SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin 800°C'de 60 dakika uygulanan yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri

800°C'de uygulanan yaşlandırma tav süresinin de korozyon özelliklerine etkisi vardır. Şekil 5. 83'te 1000°C'de 1 saat çözme tavi uygulanan ve 800°C'de 5 ve 60 dakika yaşlandırılan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. 60 dakika yaşlandırılan malzemede hem ferrit hem de ikincil faz oranının daha fazla olması nedeniyle E_{kor} değeri daha düşük değerdedir; yani yapı daha fazla korozyona uğramıştır.



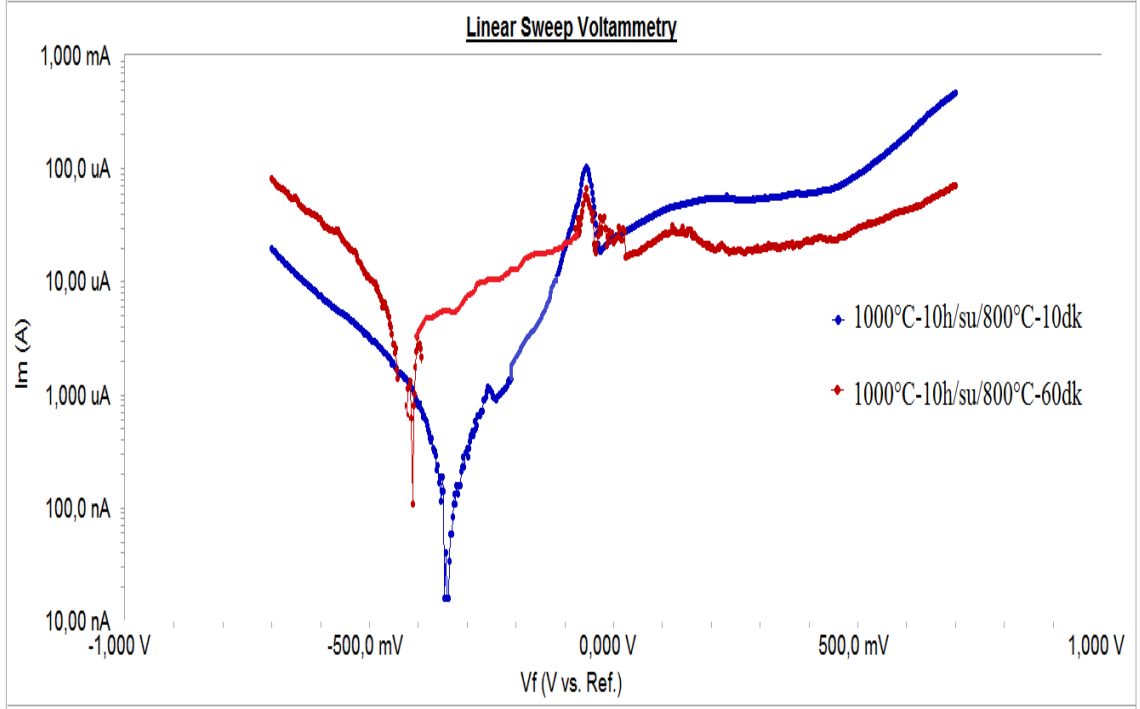
Şekil 5. 83 1000°C'de 1 saat çözme tavlı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikle 800°C'de uygulanan yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi

Şekil 5. 84'te 1000°C'de 8 saat çözme tavlı uygulanan ve 800°C'de 5 ve 60 dakika yaşlandırılan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. 1 saat çözme tavlı uygulanan numunelerde olduğu gibi burada da 60 dakika yaşlandırılan malzemede hem ferrit hem de ikincil faz oranının daha fazla olması sebebiyle yapı daha fazla korozyona uğramıştır.



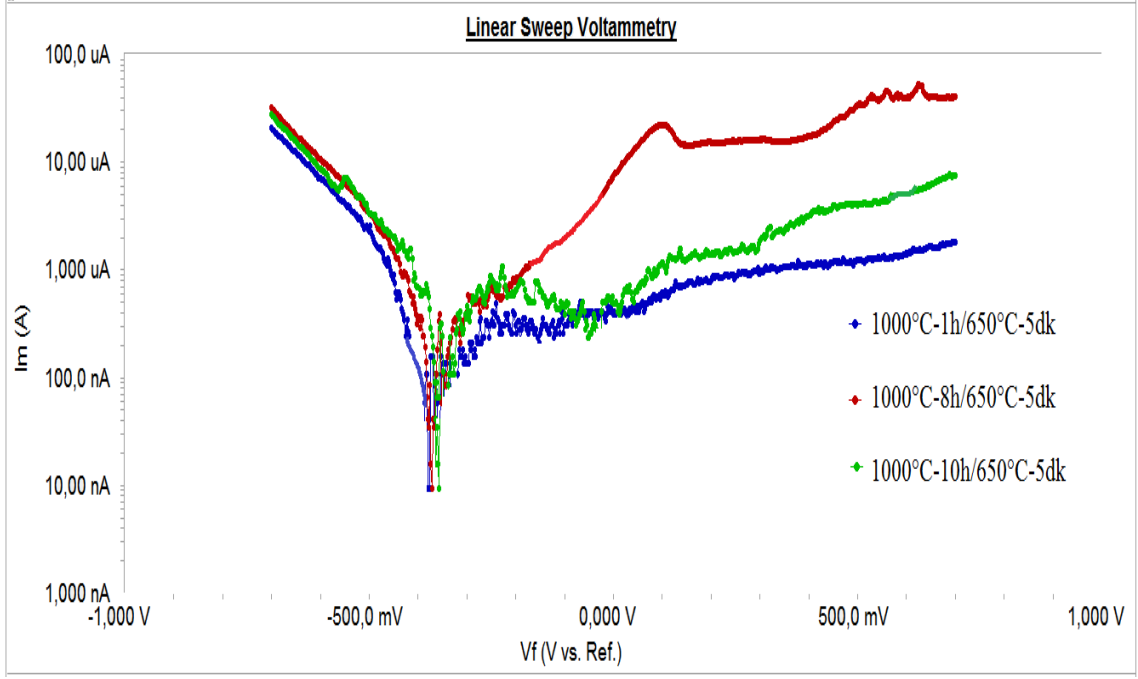
Şekil 5. 84 1000°C'de 8 saat çözme tavi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 800°C'de uygulanan yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi

Son olarak; 1000°C'de 10 saat çözme tavi uygulanan ve 800°C'de 10 ve 60 dakika yaşlandırılan numunelere ait korozyon eğrileri incelenecektir. Bu şartlarda yaşlandırılan numunede ikincil faz çekirdeklenmesi 10 dakikadan sonra gözlemlendiği için alt süre olarak 5 değil 10 dakika alınmıştır. Bu gruptaki numunelere ait korozyon eğrileri Şekil 5. 85'te yer almaktadır. 1 ve 8 saatte olduğu gibi, 10 saat çözme tavi uygulanıp 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan numunenin verdiği pik 10 dakika yaşlandırılan numunenin verdiği pike göre daha soldadır. Bu da yapının E_{cor} değerinin daha düşük olduğunu ve daha fazla korozyona uğradığını göstermektedir.



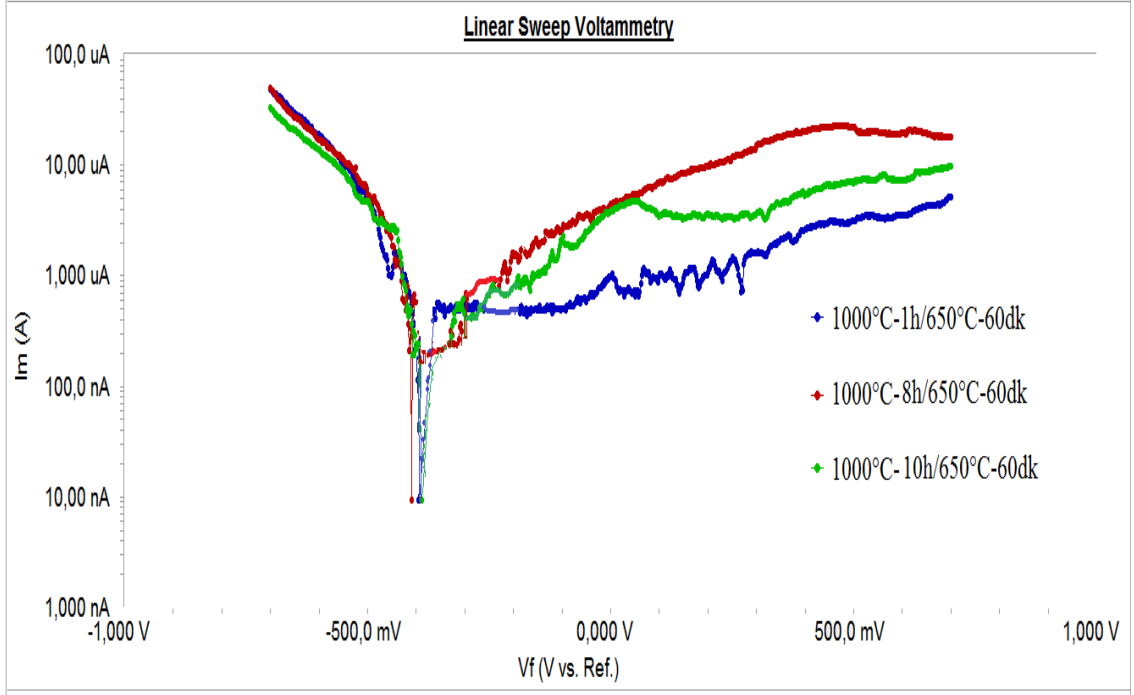
Şekil 5. 85 1000°C’de 10 saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 800°C’de uygulanan yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi

İzotermal yaşlandırma tav numunelerinin korozyon eğrilerine gelindiğinde; öncelikle çözme tav süresinin izotermal yaşlandırma tavı üzerindeki etkisini görmek amacıyla, ikincil fazların en yoğun çekirdeklendiği sıcaklık olan 650°C’de 5 dakika izotermal yaşlandırılan numuneler incelenecektir. Şekil 5. 86’da 1000°C’de 1, 8 ve 10 saat çözme tavı uygulanan ardından 650°C’ye yavaş soğutularak 5 dakika izotermal yaşlandırılan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. Bu üç numunenin Çizelge 5. 3 ve Çizelge 5. 4’te verilen ferrit ve ikincil faz oranları karşılaştırıldığında; çözme tav süresine bağlı olarak ferrit oranının arttığı, ikincil faz oranının ise azaldığı görülmektedir. Ferrit oranının artması yapının korozyon özelliklerini olumsuz etkilemekte; ikincil faz oranının azalması ise yapının korozyon özelliklerini olumlu etkilemektedir. Bu iki durumun çözme tav süresinin artması ile yapıda aynı anda gerçekleşmesi sonucunda ise, Şekil 5. 86’da görüldüğü gibi, üç numunenin korozyon özellikleri arasında belirgin bir fark meydana gelmemesine sebep olmuştur. Üç numunenin de verdiği pikler birbirine yakın E_{kor} değerini gösterdiği için korozyon davranışları da benzerdir.



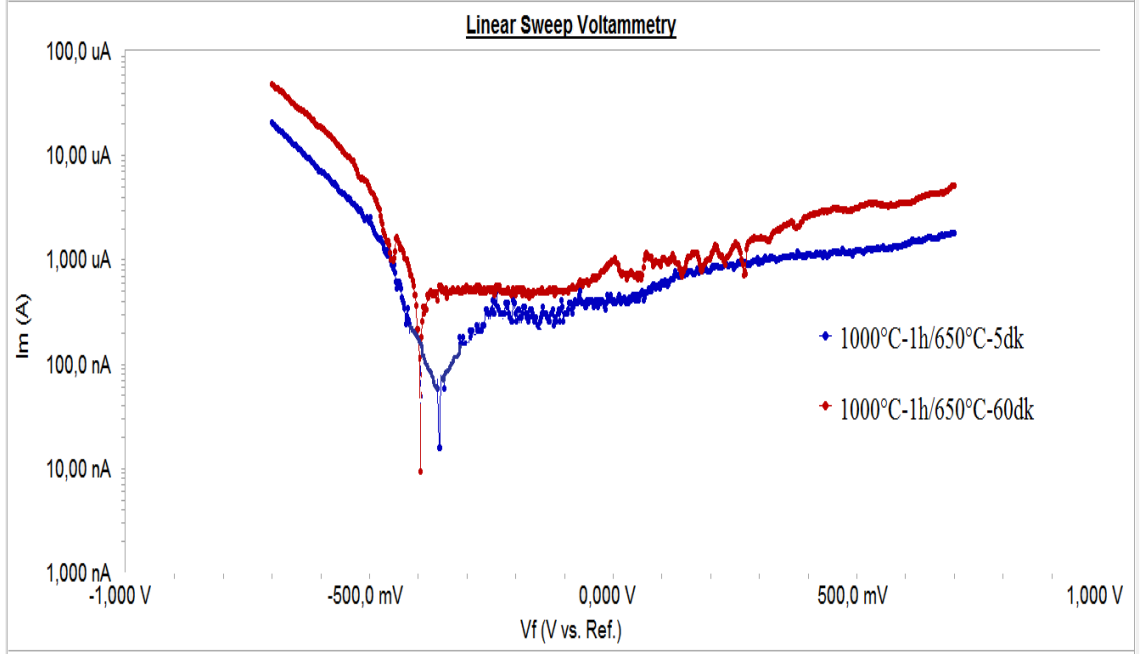
Şekil 5. 86 SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin 650°C'de 5 dakika uygulanan izotermal yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri

Değişen çözme tav sürelerinde 650°C'ye yavaş soğutularak 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunelere gelindiğinde; Çizelge 5. 3'te çözme tav süresi arttıkça yapının ferrit oranının arttığı görülmektedir. Öte yandan Çizelge 5. 4'te yapıdaki ikincil faz oranının ise çözme tav süresiyle azaldığı görülmektedir. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulanan ve yavaş soğutularak 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunelere ait korozyon eğrileri Şekil 5. 87'de verilmiştir. Çözme tav süresiyle korozyon özelliklerini ters yönde etkileyen ferrit artışı ve ikincil faz miktarının azalması yapıda aynı anda meydana geldiğinden bu üç numunenin korozyon davranışının çok farklı olmadığı görülmektedir.



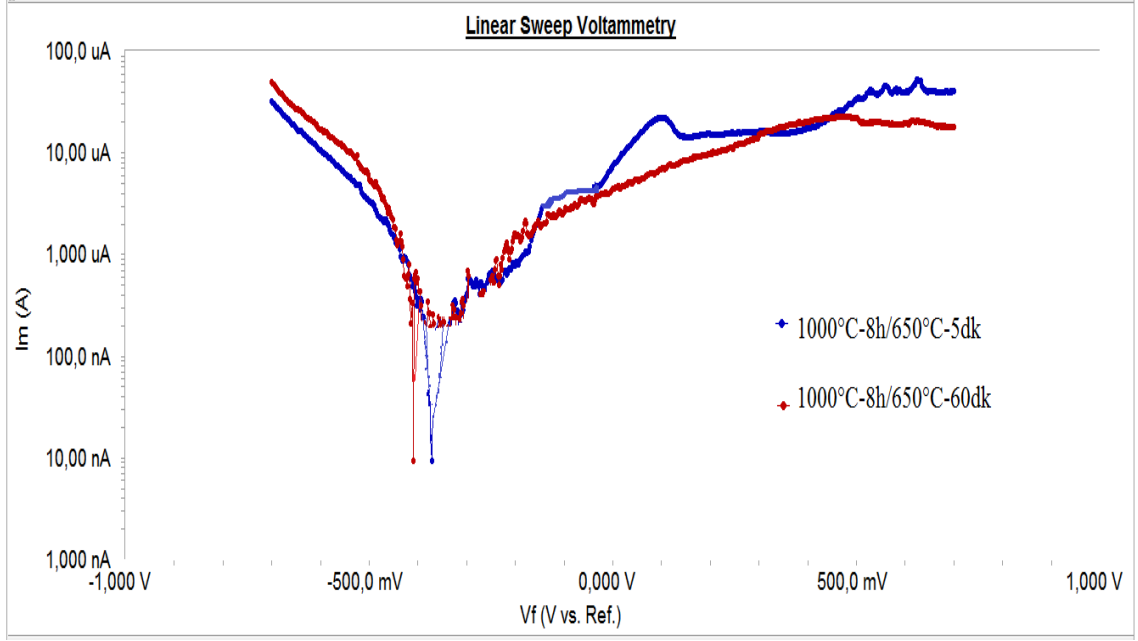
Şekil 5. 87 SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik numunelerin 650°C'de 60 dakika uygulanan izotermal yaşlandırma tav işlem parametrelerine bağlı korozyon eğrileri

İzotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon özelliklerine etkisini incelemek amacıyla; her bir çözme tav sıcaklığı için 650°C'de 5 dakika ve 60 dakika uygulanan izotermal yaşlandırma numunelerinin korozyon eğrileri bir arada ele alınmıştır. İlk olarak; Şekil 5. 88'de 1000°C'de 1 saat çözme tavinin ardından yavaş soğutulularak 650°C'de 5 dakika ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. İzotermal yaşlandırma tav süresinin artmasının malzemenin korozyon özelliklerini olumsuz etkilediği görülmektedir. 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunenin korozyon pikinin 5 dakika izotermal yaşlandırılan numunenin korozyon pikinden daha solda olduğu ve E_{kor} değerinin daha düşük olduğunu, yani bu numunenin daha fazla korozyona uğradığı görülmektedir. Bunun nedeni; izotermal yaşlandırma süresince yapıda çekirdeklenecek büyümesini sürdüren ikincil fazlardır.



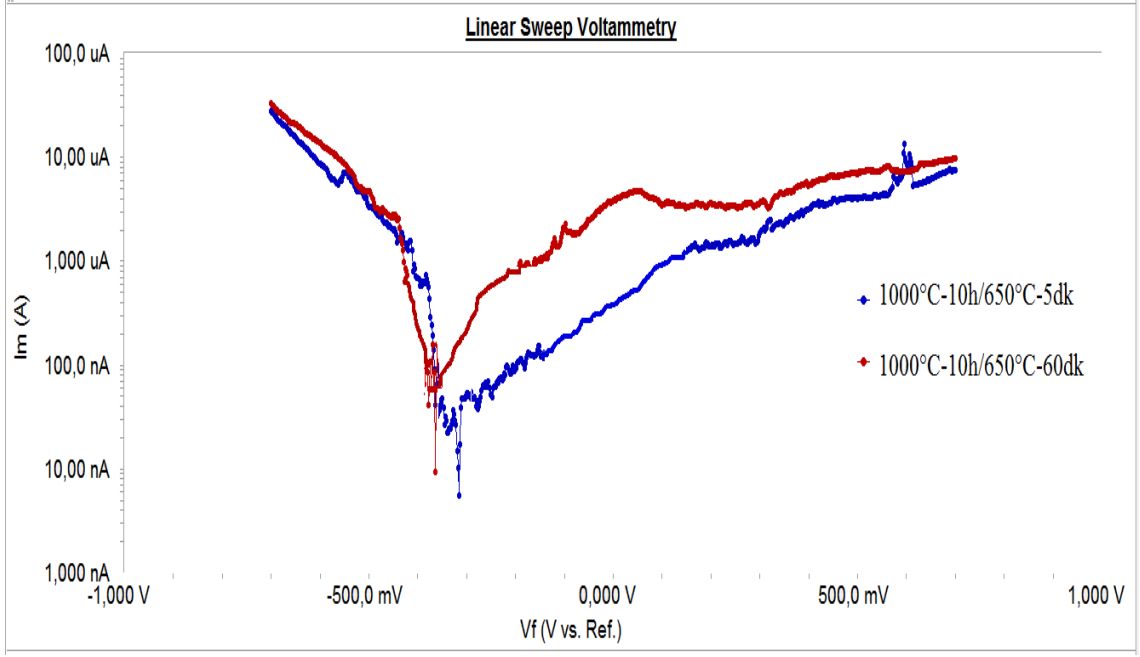
Şekil 5. 88 1000°C'de 1 saat çözme tavi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 650°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi

Şekil 5. 89'da 1000°C'de 8 saat çözme tavi ardından yavaş soğutulularak 650°C'de 5dakika ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavi uygulanan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. Çözme tavinin 1 saat olduğu durumdaki numuneye benzer şekilde burada da 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunenin, ikincil faz içeriğinin daha fazla olması sebebiyle, daha fazla korozyona uğradığı görülmektedir.



Şekil 5. 89 1000°C'de 8 saat çözme tavı uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 650°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi

Son olarak; Şekil 5. 90'da 1000°C'de 10 saat çözme tavı ardından yavaş soğutulularak 650°C'de 5 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma tavı uygulanan numunelere ait korozyon eğrileri yer almaktadır. Diğer iki grupta olduğu gibi, yapıdaki ikincil faz oranının izotermal yaşlandırma tav süresince artması sebebiyle 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numune 5 dakika izotermal yaşlandırılan numuneden daha fazla korozyona uğramıştır.



Şekil 5. 90 1000°C'de 10saat çözme tavi uygulanan SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte 650°C'de uygulanan izotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon eğrilerine etkisi

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının amacı; değişik çözme, yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma ısı işlem parametreleri kullanarak, bu ısıl girdilerin SAF 2205 dubleks paslanmaz çelikte oluşan birincil fazların oranları ve ikincil fazların doku içerisine dağılımı, bu faz değişimlerinin malzemenin sertlik ve korozyon özelliklerine etkisini saptamaktır. Malzemenin ısıl davranışının ortaya konulması sayesinde son yıllarda kullanımı yaygınlaşan 2205 dubleks paslanmaz çeliğin kullanımında ortaya çıkabilecek olumsuzlar öngörülebilecektir.

İlk olarak, çözme tavlama ısı işlemi 1000°C'de 1, 2, 4, 6, 8 ve 10 saat uygulanarak malzemeler fırında ve suda soğutulmuştur. Çözme tavlama işlemi deneyleri sonucunda;

- Suda soğutulan malzemelerde, hızlı soğumadan dolayı yapıda ikincil faz çekirdeklenmediği; yapının ferrit miktarının ise ötektoid dönüşümün etkisiyle çözme tavlama süresince %52,72'den %57,54'e yükseldiği ölçülmüştür.
- Fırında soğutulan malzemelerde ise, yavaş soğumanın etkisiyle δ/γ tane sınırlarında ikincil fazların çekirdeklendiği ve bu fazların δ -ferrit fazının içerisine doğru büyüdüğü saptanmıştır. Yapının ferrit oranının ise; soğuma esnasında ötektoid dönüşümün östenit faz oluşturması sebebiyle çözme tavlama süresince %47,93'ten %39,12'ye düştüğü saptanmıştır. Fırında soğutma sırasında yapıda çekirdeklenen ikincil faz miktarının çözme tavlama süresince %1,66'dan %2,27'ye yükseldiği belirlenmiştir. İkincil fazların ortalama tane boyutunun ise 8. saatte kadar sürekli artış gösterdiği; 8. saatte ortalama tane boyutlarının azaldığı, 10. saatte ise tekrar artışa geçtiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin termomekanik

işlem görmüş malzemede bu koşullarda ferrit fazında meydana gelen yeniden kristalleşme olduğu saptanmıştır.

1000°C'de uygulanan çözme tav işleminde, yeniden kristalleşme durumu göz önünde bulundurularak 1, 8 ve 10 saat olmak üzere üç farklı çözme tav süresi seçilmiştir. İkincil fazların yapıda çekideklendiği sıcaklık aralığı olan 450-1000°C aralığından üç farklı sıcaklık seçilerek yaşlandırma tavi ısılişlemi uygulanmıştır. Malzemeye; 650°C, 800°C ve 950°C olarak seçilen tav sıcaklıklarında, ikincil fazların ısıtma koşullarındaki çekirdeklenmesini gözlemlemek amacıyla, 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika yaşlandırma ısılişlemi uygulanmıştır. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavının ardından suda soğutulan ve sonrasında uygulanan yaşlandırma tav işlemleri sonucunda;

- Her bir çözme tav süresinde yer alan numune grubunda, her bir yaşlandırma tav sıcaklığı için, yaşlandırma tav süresi arttıkça yapının ferrit oranının arttığı gözlemlenmiştir.
- Oda sıcaklığından yaşlandırma tav sıcaklığına ısıtılan bu numune gruplarında, yaşlandırma tav sıcaklığı arttıkça, ısıtma sırasında δ -ferrit yönünde gerçekleşen ötektoid dönüşümün etkisiyle, yapının ferrit oranının arttığı gözlemlenmiştir.
- Çözme tav süresince ötektoid dönüşüm δ -ferrit yönüne doğru gerçekleştiği için, çözme tav süresi artan yaşlandırma tav numunelerinde yapıdaki δ -ferrit miktarının arttığı saptanmıştır.
- Yaşlandırma tav sıcaklığının ikincil fazların çekirdeklenmesini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Her bir çözme tav süresindeki numune grubu için 650°C'nin ikincil fazların çökmesi için yeterli bir sıcaklık olmadığı saptanmıştır. 800°C'de yaşlandırılan numunelerde ikincil fazların çökmesinin en yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Çözme tav süresinin artması ile yapıda miktarı artan ferrit fazı, ikincil fazlar için potansiyel çekirdeklenme noktası oluşturmaktadır. Bu sayede; çözme tav süresi arttıkça 800°C'de yaşlandırma tavi sırasında çekirdeklenen ikincil faz miktarının da arttığı görülmektedir. Ayrıca çözme tavının 8 saat olduğu durumda yapıda yeniden kristalleşmenin meydana gelmesi yapıdaki tane sınırı sayısını arttırmış, tane sınırı sayısının artması ile daha küçük fakat daha fazla sayıda ikincil faz çekirdeklenmesi gözlemlenmiştir.

Metastabil faz olarak tanımlanan sigma fazının 950°C'de uygulanan yaşlandırma işleminde de az miktarda da olsa çekirdeklendiği saptanmıştır. Ayrıca yaşlandırma tav süresinin ikincil fazların miktarına ve ortalama tane boyutuna olumlu etkisi söz konusudur.

1000°C'de 1, 8 ve 10 saat uygulanan çözme tav işleminin ardından ikincil fazların soğutma koşullarındaki çekirdeklenmesini gözlemlemek amacıyla, malzemeye 650°C, 800°C ve 950°C olarak seçilen tav sıcaklıklarında, 5, 10, 20, 30 ve 60 dakika izotermal yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavının ardından 650°C, 800°C ve 950°C'ye yavaş soğutulan ve sonrasında uygulanan izotermal yaşlandırma tav ısıl işlem deneyleri sonucunda;

- Her bir çözme tav süresinde yer alan numune grubunda, her bir izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı için yaşlandırma tav süresi arttıkça yapının ferrit oranının azaldığı gözlemlenmiştir.
- Çözme sıcaklığından izotermal yaşlandırma tav sıcaklığına kadar yavaş soğutulan bu numune gruplarında; izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı arttıkça, soğutma sırasında γ yönünde gerçekleşen ötektoid dönüşümün etkisiyle, yapının ferrit oranının arttığı gözlemlenmiştir.
- Çözme tav süresince ötektoid dönüşüm δ -ferrit yönüne doğru gerçekleştiği için, çözme tav süresi artan izotermal yaşlandırma tav numunelerindeki δ -ferrit miktarının arttığı saptanmıştır.
- 1000°C'den itibaren soğutulmaya bırakan yapıda 950°C'nin ikincil fazların çekirdeklenmesi için yüksek bir sıcaklık olduğu saptanmıştır. 800°C'ye soğutulan yapıda ise, çekirdeklenen ikincil fazların miktarının izotermal yaşlandırma tav süresi arttıkça arttığı görülmüştür. İkincil fazların en yoğun çökeldiği izotermal yaşlandırma tav sıcaklığının 650°C olduğu saptanmıştır. İzotermal yaşlandırma tav işleminde çekirdeklenen ikincil fazların ortalama tane boyunun izotermal yaşlandırma tav süresi arttıkça arttığı ve izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı arttıkça ise azaldığı gözlemlenmiştir.

Farklı parametreler seçilerek uygulanan çözme, yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav işlemi numunelerinden en karakteristik olanlara EDS analizleri yapılmıştır. Çözme

tav numunelerinden 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat ısıl işlem uygulanıp suda ve fırında soğutulan 6 numune seçilmiştir. Yaşlandırma tav numunelerinden ise; ikincil fazların en yoğun olduğu sıcaklık olan 800°C'de 5 dakika ve 60 dakika yaşlandırılan numuneler seçilmiştir. Burada her bir çözme tav sıcaklığı için 2 adet olmak üzere 6 numune seçilmiştir. İzotermal yaşlandırma tav numunelerinden ise; ikincil fazların en yoğun olduğu sıcaklık olan 650°C'de 5 dakika ve 60 dakika izotermal yaşlandırılan numuneler seçilmiştir. Burada da her bir çözme tav sıcaklığı için 2 adet olmak üzere 6 numune seçilmiştir. Seçilen işlem numunelerinin EDS analizleri sonucunda;

- Her bir çözme tav numunesi için, yapıda yer alan ferrit fazının Cr ve Mo içeriğinin östenit faza kıyasla daha fazla olduğu; östenit fazının ise Ni içeriğinin ferrit fazına kıyasla daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun sebebi; Cr ve Mo'nun ferrit kararlaştırıcı; Ni'nin ise östenit kararlaştırıcı elementler olmasıdır. Fırında soğutulan numunelerde çekirdeklenen ikincil fazın Cr, Ni ve Mo içeriği göz önünde bulundurarak bu fazın sigma fazı olduğu saptanmıştır. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygunlandıktan sonra fırında soğutulan numunelerde çekirdeklenen ikincil fazın kimyasal bileşiminde belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir.
- Her bir yaşlandırma tav numunesi için de, yapıda yer alan ferrit fazının Cr ve Mo içeriğinin östenit faza kıyasla daha fazla olduğu; östenit fazının ise Ni içeriğinin ferrit fazına kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca yaşlandırma ısıl işlemi süresince ötektoid dönüşüm ile östenit fazının δ -ferrit fazına dönüşmesinden dolayı δ -ferrit fazının içerdiği Cr miktarının zamanla arttığı saptanmıştır. Çözme tav süresinin artması da δ -ferrit fazının oluşumunu olumlu etkilediğinden çözme tav süresi arttıkça δ -ferrit fazının içerdiği Cr miktarı artmasını sağlamıştır. Yaşlandırma tav işleminde oluşan ikincil fazların kimyasal bileşimindeki Cr miktarının çözme tav numunelerinden daha fazla olduğu ve çözme tav süresi ve yaşlandırma tav süresinin artması ile de oluşan ikincil fazların Cr içeriğinin arttığı saptanmıştır.
- Her bir izotermal yaşlandırma tav numunesi için, yapıda yer alan ferrit fazının Cr ve Mo içeriğinin östenit faza kıyasla daha fazla olduğu; östenit fazının ise Ni içeriğinin ferrit fazına kıyasla daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca izotermal

yaşlandırma ısı işlemi süresince ötektoid dönüşüm ile δ -ferrit fazının östenit faza dönüşmesinden ve ayrıca çekirdeklenen ikincil fazın δ -ferrit fazındaki Cr'yi yapısına alarak büyümesinden dolayı δ -ferrit fazının içerdiği Cr miktarının zamanla azaldığı saptanmıştır. Çözme tav süresinin artması da δ -ferrit fazının oluşumunu olumlu etkilediğinden çözme tav süresi arttıkça δ -ferrit fazının içerdiği Cr miktarı da artmıştır.

Çözme, yaşlandırma ve izotermal yaşlandırma tav numunelerinin her birinin Vickers sertlik değerleri ölçülerek bu değerlerin birincil ve ikincil fazlara bağlı yorumlaması yapılmıştır. Ölçülen sertlik değerleri sonucunda;

- 1000°C'de 1, 2, 4, 6, 8 ve 10 saat uygulanan çözme tav numunelerinden suda soğutulan numunelerde de, fırında soğutulan numunelerde de sertlik değerlerinin çözme tav süresince arttığı gözlemlenmiştir. Suda soğutulan malzemelerde sertlik artışının sebebi; çözme tav süresince meydana gelen δ -ferrit fazının miktarındaki artıştır. Fırında soğutulan malzemelerde sertlik artışının sebebi ise; soğutma süresince meydana gelen ikincil fazların miktarındaki artıştır. İkincil fazların δ -ferrit fazından daha sert olması sebebiyle fırında soğutulan malzemelerin sertlik değerlerinin suda soğutulanlardan daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca; çözme tavının 8. saatinde meydana gelen yeniden kristalleşme mekanizmasının etkisiyle tane sınırlarının sayısı artmış ve bu sayede bu noktada ölçülen sertlik değerleri de artmıştır.
- 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavının ardından yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerde her bir yaşlandırma tav sıcaklığı için çözme tav süresi arttıkça sertlik artışı meydana gelmiştir. Bunun nedeni; çözme tav süresi arttıkça, Fe-C sistemindeki en sert faz olan δ -ferrit oranının artmasıdır. Yaşlandırma tav süresinin artmasının, ötektoid dönüşüm ile hem yapıdaki δ -ferrit oranını arttırması, hem de ikincil fazların çekirdeklendiği sıcaklıklarda bu fazların büyümesine imkan vermesi sebebiyle sertlik artışı üzerinde olumlu bir etkisi söz konusudur. Yaşlandırma tav işlemlerinde, öncesinde 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulanan üç grupta da Vickers sertlik değerinin en yüksek olduğu yaşlandırma tav sıcaklığı 800°C'dir. Bu durumun sebebi; 800°C'de çekirdeklenen ikincil faz miktarının en fazla olmasıdır. 800°C'den sonra sertlik değerinin en yüksek

olduğu sıcaklık 950°C'dir. Bu sıcaklıktaki sertlik değerlerinin yüksek olması, hem yapıdaki δ -ferrit miktarının en fazla olmasından, hem de yapıda az da olsa ikincil fazların da çekirdeklenmesinden kaynaklanmaktadır. 650°C'de ise sertlik değerleri en düşük seviyededir. Çünkü bu sıcaklıkta hem yapıdaki δ -ferrit miktarı en azdır, hem de herhangi bir ikincil faz çekirdeklenmesi mevcut değildir.

- 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavinin ardından izotermal yaşlandırma işlemi uygulanan numunelere gelindiğinde; bu gruptaki numunelerde de her bir yaşlandırma tav sıcaklığı için, çözme tav süresi arttıkça genel olarak yapıda sertlik artışının meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu sertlik artışını; çözme tav süresi arttıkça yapıdaki oranı artan δ -ferrit fazı sağlamaktadır. İzotermal yaşlandırma tav süresinin artmasının ikincil fazların çekirdeklendiği sıcaklıklar olan 650°C ve 800°C'de bu fazların büyümesine imkan vermesi sebebiyle sertlik artışı üzerinde olumlu bir etkisi söz konusudur. 950°C'de ise yapıda henüz ikincil fazların çekirdeklenmemiş olması ve ötektoid dönüşümün östenit fazına doğru gerçekleşmesi sebebiyle; artan izotermal yaşlandırma tav süresinin sertlik değerlerini düşürdüğü saptanmıştır. İzotermal yaşlandırma tav işlemlerinde; öncesinde 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulanan üç grupta da Vickers sertlik değerinin en yüksek olduğu izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı 650°C'dir. Bu durumun sebebi; 650°C'de yapıda çekirdeklenen ikincil faz miktarının en fazla olmasıdır. 650°C'den sonra sertlik değerinin en yüksek olduğu numuneye uygulanan izotermal yaşlandırma tav sıcaklığı ise 800°C'dir. Bu sıcaklıktaki sertlik değerlerinin yüksek olması, yapıda ikincil fazların çekirdeklenmesinden kaynaklanmaktadır. 950°C'de ise sertlik değerleri en düşük seviyededir. Çünkü bu sıcaklıkta herhangi bir ikincil faz çekirdeklenmesi söz konusu değildir.

Son olarak, EDS analizi yapılan numunelere üç elektrodlu sistemde korozyon testi uygulanmıştır. Uygulanan korozyon deneyleri sonucunda;

- 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavinin ardından suda soğutulan numunelerde çözme tav süresi arttıkça malzemenin daha fazla korozyona uğradığı saptanmıştır. Bu durumun nedeni; oyuklanma korozyonunda aktif rol oynayan δ -ferrit fazının yapıdaki artışıdır. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavinin ardından fırında soğutulan numunelerde de çözme tav süresi arttıkça malzemenin daha fazla korozyona uğradığı gözlemlenmiştir. Bu gruptaki numuneler; fırında soğutulan malzemelerde soğuma esnasında yapıda çekirdeklenen ikincil fazların çekirdeklenmesi sebebiyle korozyona uğramıştır.
- Yaşlandırma tav işlemi numunelerinde; ilk olarak, çözme tav süresinin yaşlandırma tavi üzerindeki etkisini görmek amacıyla, ikincil fazların 800°C'de ilk çekirdeklenmeye başladığı süreler incelenmiştir. Çözme tav süresi arttıkça yaşlandırma işleminde ferrit oranının artması sebebiyle, yapının korozyon dayanımının düştüğü saptanmıştır. Bu numunelerde korozyon özelliklerini düşüren bir diğer faktör ise, yapıda çekirdeklenmeye başlayan ikincil fazlardır. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavinin ardından 800°C'de 60 dakika yaşlandırılan numunelerde, ısıtma sırasında yapıda ikincil fazların çekirdeklenmesi ve çözme tavi süresince ferrit oranının artması sebebiyle artan çözme tav süresinin korozyon özelliklerini olumsuz etkilediği görülmüştür. Yaşlandırma tav süresinin korozyon özellikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla; 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulanan ve 800°C'de 5 (veya 10) ve 60 dakika yaşlandırılan numunelerin korozyon eğrileri ikiyeşerli olarak ele alınmıştır. Artan yaşlandırma tav süresi ile malzemede, hem ferrit hem de ikincil faz oranının artması sebebiyle yapının daha fazla korozyona uğradığı saptanmıştır.
- İzotermal yaşlandırma tav işlemi numunelerinde; çözme tav süresinin yaşlandırma tavi üzerindeki etkisini görmek amacıyla, ikincil fazların en yoğun çekirdeklendiği sıcaklık olan 650°C'de 5 dakika izotermal yaşlandırılan numunelerin korozyon eğrileri incelenmiştir. Bu üç numunede; artan çözme tav süresi ile ferrit oranının arttığı; ikincil faz oranının ise azaldığı saptanmıştır. Bu iki

durumun yapıda aynı anda gerçekleşmesi sonucunda numunelerin korozyon özellikleri arasında belirgin bir fark olmadığı gözlemlenmemiştir. 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavinin ardından, 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunelerde, 5 dakika izotermal yaşlandırılan numunelerde olduğu gibi, korozyon özelliklerini ters yönde etkileyen ferrit artışı ve ikincil faz miktarının azalması yapıda aynı anda meydana geldiğinden bu üç numunenin korozyon davranışının benzer olduğu saptanmıştır. İzotermal yaşlandırma tav süresinin korozyon özellikleri üzerine etkisini incelemek amacıyla; 1000°C'de 1, 8 ve 10 saat çözme tavi uygulanan ve 650°C'de 5 ve 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunelerin korozyon eğrileri ikişerli olarak ele alınmıştır. İzotermal yaşlandırma tav süresince yapıda çekirdeklenen ikincil faz miktarının artması sebebiyle, her bir çözme tav süresinde 650°C'de 60 dakika izotermal yaşlandırılan numunenin, 5 dakika izotermal yaşlandırılan numuneden daha fazla korozyona uğradığı saptanmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar neticesinde, SAF 2205 dubleks paslanmaz çelik malzemelerin çeşitli ısıl girdiler ile faz haritasının ne şekilde değiştiği ortaya konulmuştur. Bu sayede özellikle kaynaklı yapılarda kullanımında ortaya çıkacak sorunların öngörülmesi ve bu sayede meydana gelecek sınırlamaların azaltılacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Ferro, P., Tiziani, A. ve Bonollo, F., (2008). "Influence of Induction and Furnace Postweld Heat Treatment on Corrosion Properties of SAF 2205 (UNS 31803)", *Welding Journal*, 87(12): 298-306.
- [2] Ferro, P., Bonollo F., (2011). "A Semiempirical Model for Sigma-Phase Precipitation in Duplex and Superduplex Stainless Steels", *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International*, Volume 43A: 1109-1116
- [3] Herbsleb, G., Poepperling, R. K. ve Schwenk, W., (1981). "Occurrence And Prevention of Hydrogen Induced Stepwise Cracking and Stress Corrosion Cracking of Low Alloy Pipeline Steels", *Corrosion Science*, 37(5): 247-256.
- [4] Chen, T. H. ve Yang, J. R., (2001). "Effects of Solution Treatment and Continuous Cooling on σ -phase Precipitation in a 2205 Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*, 311(1): 28-41.
- [5] Solomon, H. D. ve Devine Jr, T. M., (1979). "Optimization of Processing, Properties, and Service Performance Through Microstructural Control", *ASTM STP*, 672: 430-461.
- [6] Zucato, I., Moreira, M. C., Machado, I. F. ve Lebrão, S. M. G., (2002). "Microstructural Characterization and The Effect of Phase Transformations on Toughness of The UNS S31803 Duplex Stainless Steel Aged Treated at 850", *C. Materials Research*, 5(3): 385-389.
- [7] Lee, K. M., Cho, H. S. ve Choi, D. C., (1999). "Effect of Isothermal Treatment of SAF 2205 Duplex Stainless Steel on Migration of δ/γ Interface Boundary and Growth of Austenite", *Journal of Alloys and Compounds*, 285(1): 156-161.
- [8] Li, J., Wu, T. ve Riquier, Y., (1994). " δ Phase Precipitation and Its Effect on the Mechanical Properties of A Super Duplex Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*, 174(2): 149-156.
- [9] Shek, C. H., Wong, K. W., Lai, J. K. L. ve Li, D. J., (1997). "Hot Tensile Properties of 25Cr-8Ni Duplex Stainless Steel Containing Cellular ($\sigma + \gamma$ sub/sub) Structure After Various Thermal Treatments", *Materials Science and Engineering*, 231(1): 42-47.

- [10] Wilms, M. E., Gadgil, V. J., Krougman, J. M. ve Ijsseling, F. P., (1994). "The Effect of σ -phase Precipitation at 800 C on The Corrosion Resistance in sea-Water of A High Alloyed Duplex Stainless Steel", Corrosion Science, 36(5): 871-881.
- [11] Liu, H., Johansson, P. ve Liljas, M., (2008). "Structural Evolution of LDX 2101 During Isothermal Ageing at 600-850°C", Proceeding of 6th European Stainless Steel Conference and Market, 2008, Helsinki.
- [12] Cervo, R., Ferro, P., Tiziani, A. ve Zucchi, F., (2010). "Annealing Temperature Effects on Superduplex Stainless Steel UNS S32750 Welded Joints. II: Pitting Corrosion Resistance Evaluation", Journal of Materials Science, 45(16): 4378-4389.
- [13] Sieurin, H. ve Sandström, R., (2007). "Sigma Phase Precipitation in Duplex Stainless Steel 2205", Materials Science and Engineering, 444(1): 271-276.
- [15] Duprez, L., Cooman, B. D. ve Akudt, N., (2000). " Microstructure Evolution During Isothermal Annealing of a Standart Duplex Stainless Steel Type 1,4462", Steel Research, 10: 417-422.
- [16] Charles, J., (1991)., "Super Duplex Stainless Steels: Structure and Properties", Proceeding of Duplex Stainless Steels '91, 1991, Fransa.
- [17] Aran, A. ve Temel, M. A., (2004). Paslanmaz Çelik Yassı Mamüller, 1(2), Acar Matbaacılık A.Ş., İstanbul.
- [18] Türkyılmazoğlu, A., (2006). Dupleks, Martenzitik ve Ferritik Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [19] Karaaslan, A. ve Kısasöz, A., (2012). "Dupleks Paslanmaz Çeliklerde Oluşan Yüksek Sıcaklık Fazlarına Genel Bir Bakış", Metalurji Dergisi, 162: 57-61.
- [20] Paslanmaz.org, Paslanmaz Çelik Nedir, <http://www.paslanmaz.org/ana-sayfa>, 15 Nisan 2014.
- [21] Odabaş, C., (2007). Paslanmaz Çeliklerin Kaynağı, 1, Eczacıbaşı, İstanbul.
- [22] Industrial Heating, Microstructure of Ferrous Alloys, www.industrialheating.com, 13 Mayıs 2014.
- [23] Aydoğdu, G. H. ve Aydınol, M. K., AISI 316L Tipi Östenitik Paslanmaz Çeliklerin Tanelerarası Korozyona Duyarlılığının Elektrokimyasal Polarizasyon Yöntemiyle Belirlenmesi, http://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi140/d140_5061.pdf, 6 Haziran 2014
- [24] Consonni, M. ve Abson, D. J., (2012). "Investigation of Weld Repair Without Post-Weld Heat Treatment for P91", 10th International EPRI Conference on Welding and Repair Technology for Power Plants, 26-29 Haziran 2012, Florida.
- [25] Gözdem Paslanmaz Merkezi San. ve Tic. A.Ş., Paslanmaz Çelik Çeşitleri, <http://www.gozdempaslanmaz.com/paslanmaz-celik.asp?ha=1#pcc>, 6 Haziran 2014

- [26] Handbook, A.S.M., (1992). Vol. 3. Alloy phase diagrams, 2, 44. ASM Handbook, 9. Baskı, Cilt 3.
- [27] Nippon Yakin Co. Ltd.,NAS High Corrosion Resistant Duplex Stainless Steel, http://www.nyk.co.jp/en/pdf/products/alloys/NAS_329J3L_E.pdf, 6 Haziran 2012.
- [28] Johansson, P. ve Liljas, M., (2002). “ A New Lean Duplex Stainless Steel for Construction Purposes”, Proceeding of 4th European Stainless Steel Conference and Market, 2002, Paris.
- [29] Charles, J., (1997). “Why and Where Duplex Stainless Steels, Proceeding of 5th World Conference on Duplex Stainless Steels, 1997, Netherlands.
- [30] Dupouiron, F., Faucheur, S. ve Varvat, G., (1991). “Fabrications of Duplex Stainless Steels, Proceeding of Duplex Stainless Steels '91, 1991, France.
- [31] Stainless, T. M. R., 2009. Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel, International Molybdenum Association (IMOA), London.
- [32] Davison, R. M. ve Redmond, J. D., (1990). “Practical Guide To Using Duplex Stainless Steels”, Materials performance, 29(1): 57-62.
- [33] Arıkan, M. E., (2008). Determination of Susceptibility To Intergranular Corrosion of Uns 31803 Type Duplex Stainless Steel By Electrochemical Reactivation Technique, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ankara.
- [34] Pohl, M., Storz, O. ve Glogowski, T., (2007). “Effect of Intermetallic Precipitations on The Properties of Duplex Stainless Steel”, Materials Characterization, 58(1): 65-71.
- [35] Treitschke, W. ve Tammann, G., (1907). “Enthalpy of Formation for σ -phase Solid Solutions At 1060 K”, Anorganische Chemie, 55: 707.
- [36] Bain, E. C. ve Griffiths, W. E., “An introduction to the Iron-Chromium Nickel alloys”, (1927). Transactions American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, 75: 166–213.
- [37] Jett, E. R. ve Foote, F., (1936), “The Fe-Cr Alloy System”, Metals and Alloys, 7: 207–210.
- [38] Yano, K. ve Abiko, K., (2000). “Role of Carbon and Nitrogen on The Transformation of the σ -phase in Highly Purified Fe-50 Mass% Cr Alloys”, Materials Transactions, 41(1): 122–129.
- [39] Hattersley, B. ve Hume-Rothery, W., (1966). “Constitution of Certain Austenitic Steels”, The Journal of the Iron and Steel Institute, 204: 683–701.
- [40] Hall, E. O. ve Algie, S. H., (1966). “The sigma phase”, International Materials Reviews, 11: 61–88.
- [41] Herbsleb, G. ve Schwaab, P., (1983). “Precipitation of Intermetallic Compounds, Nitrides and Carbides in AF 22 Duplex Steel and Their Influence on Corrosion Behavior in Acids”, Mannesmann Forschungsber, 957: 26.

- [42] Duhaj, P., Ivan, J. ve Makovicky, E., (1968), "Sigma-Phase Precipitation in Austenitic Steels", *Journal of Iron and Steel Institute*, 206(12): 1245-1251
- [43] Wilms, M. E., Gadgil, V. J., Krougman, J. M. ve Ijsseling, F. P., (1994). "The Effect of σ -phase Precipitation at 800 C on The Corrosion Resistance in Sea-Water of A High Alloyed Duplex Stainless Steel", *Corrosion Science*, 36(5): 871-881.
- [44] Souza Jr, C. M., Abreu, H. F. G., Tavares, S. S. M. ve Rebello, J. M. A., (2008). "The σ -phase Formation in Annealed UNS S31803 Duplex Stainless Steel Texture Aspects", *Materials Characterization*, 59(9): 1301-1306.
- [45] Hsieh, C. C. ve Wu, W., (2011). "Overview of Intermetallic Sigma (σ) Phase Precipitation in Stainless Steels", *ISRN Metallurgy*, V 2012(732471): 1-16.
- [46] Waanders, F. B., Vorster, S. W. ve Pollak H., (1999). "The Influence of Temperature on σ -phase Formation and The Resulting Hardening of Fe-Cr-Mo-Alloys", *Hyperfine Interactions*, 120-121(1-8): 751-755.
- [47] Weiss, B. ve Stickler R., (1972). "Phase Instabilities During High Temperature Exposure of 316 Austenitic Stainless Steel". *Acta Metallurgica*, 3(4): 851-866.
- [48] Na, Y. S., Park, N. K. ve Reed, R. C., (2000). "Sigma Morphology and Precipitation Mechanism in Udimet 720 Li", *Scripta Materialia*, 43(7): 585-590.
- [49] Escriba, D. M., Materna-Morris, E., Plaut, R. L. ve Padilha, A. F., (2009). "Chi-Phase Precipitation in A Duplex Stainless Steel", *Materials Characterization*, 60(11): 1214-1219.
- [50] Kasper, J. S., (1954). "The Ordering of Atoms in The Chi-Phase of The Iron-Chromium-Molybdenum System", *Acta Metallurgica*, 2: 456-461.
- [51] Hughes, H. ve Llewelyn, D. T., (1959). " χ Phase in the Fe-Cr-Ni-Ti System", *Journal of Iron and Steel Institute*, 192: 170.
- [52] Okafor, I. C. I. ve Carlson, O. N., (1978). "Equilibrium Studies on A Chi Phase Strengthened Ferritic Alloy", *Metallurgical and Materials Transactions*, 9: 1651-1657.
- [53] Andrews, K. W., (1949). "A New Intermetallic Phase in Alloy Steels", *Nature*, 164: 1015.
- [54] Goldschmidt, H. J., (1967). *Carbides*, Springer Science and Business Media, New York.
- [55] Padilha, A. F., Plaut, R. L. ve Rios, P. R., (2007). *Stainless Steels Heat Treatment (Chapter 12)*, 2, Boca Raton, FL USA.
- [56] Calliari, I., Zanesco, M. ve Ramous, E., (2006). "Influence of Isothermal Aging on Secondary Phases Precipitation and Toughness of A Duplex Stainless Steel SAF 2205", *Journal of Materials Science*, 41: 7643-7649.
- [57] Michalska, J. ve Sozanska, M., (2005). "Qualitative and Quantitative Analysis of σ and χ Phases in 2205 Duplex Stainless Steel", *Materials Characteristic*, 56: 355-362.

- [58] Ghosh, S. K. ve Mondal, S., (2008). "High Temperature Ageing Behaviour of A Duplex Stainless Steel", *Materials Characteristic*, 59: 1776–1783.
- [59] Pohl, M., Storz, O. ve Glogowski, T., (2008). " σ -phase Morphologies and Their Effect on Mechanical Properties of Duplex Stainless Steels", *Int J Mater Res*, 99: 1163–1170.
- [60] Solomon, H. D. ve Devine, T. M., (1982). "General Electric Company Report No. 82CRD276", General Electric Conference, Kasım 1982, New York.
- [61] Devine, T. M., (1980). "Influence of Carbon Content and Ferrite Morphology on The Sensitization of Duplex Stainless Steel", *Metallurgical Transactions A*, 11(5): 791-800.
- [62] Kondo , K., (1993). "Proceedings of the Conference on Processes and Materials: Innovation Stainless Steel", *Associazione Italiana di Metallurgia*, 2: 2.191.
- [63] Lai, J. K. L., (1983). "A study of Precipitation in AISI Type 316 Stainless Steel", *Materials Science and Engineering*, 58(2): 195-209.
- [65] Nilsson, J. O., Kangas, P., Wilson, A. ve Karlsson, T., (2000). "Mechanical Properties, Microstructural Stability and Kinetics of σ -phase Formation in 29Cr-6Ni-2Mo-0.38 N Superduplex Stainless Steel", *Metallurgical and Materials Transactions A*, 31(1): 35-45.
- [66] Badji, R., Bouabdallah, M., Bacroix, B., Kahloun, C., Bettahar, K. ve Kherrouba, N., (2008). "Effect of Solution Treatment Temperature on The Precipitation Kinetic of σ -phase in 2205 Duplex Stainless Steel Welds", *Materials Science and Engineering A*, 496(1): 447-454.
- [67] Reick, W., Pohl, M. ve Padilha A. F., (1998). "Recrystallization-Transformation Combined Reactions During Annealing of A Cold Rolled Ferritic-Austenitic Duplex Stainless Steel", *ISIJ International*, 38(6): 567-571.
- [68] Shinohara, K., Seo, T. ve Kumada K., (1979). "Recrystallization and Sigma Phase Formation As Concurrent And Interacting Phenomena in %25 Cr-%20Ni Steel", *Metallurgical Transactions*, 20: 715-721.
- [69] Folkhard, E. ve Rabensteiner, G., (1988). "Welding Metallurgy of Stainless Steels", Springer, New York.
- [70] Sathirachinda, N., Pettersson, R. ve Pan, J., (2009). "Depletion Effects at Phase Boundaries in 2205 Duplex Stainless Steel Characterized with SKPFM and TEM/EDS", *Corrosion Science*, 51(8): 1850-1860.
- [71] Sathirachinda, N., Gubner, R., Pan, J. ve Kivisäkk, U., (2008). "Characterization of Phases in Duplex Stainless Steel by Magnetic Force Microscopy/Scanning Kelvin Probe Force Microscopy", *Electrochemical and Solid-State Letters*, 11(7): 41-45.
- [72] Badji, R., Bouabdallah, M., Bacroix, B., Kahloun, C., Belkessa, B. ve Maza, H., (2008). "Phase transformation and Mechanical Behavior in Annealed 2205 Duplex Stainless Steel Welds", *Materials Characterization*, 59(4): 447-453.

- [73] Chen, H., Ding, T. S., Li, J., Xiao, X. S., Zhao, J. L. ve Jiang, L. Z., (2011). "A New Economical Sigma-Free Duplex Stainless Steel 19Cr-6Mn-1.0Mo-0.5Ni-0.5W-0.5Cu-0.2N", *Journal of Iron and Steel Research*, 18(4): 52-57.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı :Sevilay AKPINAR
Doğum Tarihi ve Yeri :08.07.1989
Yabancı Dili :İngilizce
E-posta :sevilay-akpinar@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Lisans	Metalurji ve Malzeme Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2012
Lise	Sayısal	Şanlıurfa ÇEAŞ Anadolu Lisesi	2007

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2011	ERTAŞ Metal Sanayi ve Ticaret A.Ş.	Stajyer
2010	Birinci Ana Bakım Merkez Komutanlığı Tank Palet Fabrikası	Stajyer

YAYINLAR

Bildiri

1. Akpınar, S., Kısasöz, A. ve Karaaslan, A., (2014), "Investigation Of Recrystallization Conditions In 2205 Duplex Stainless Steel", 17th International Metallurgical and Materials Congress, Eylül 2014, İstanbul.

Proje

1. Akpınar, S. ve Karaaslan, A., (2014), "Dubleks Paslanmaz Çelikte Oluşan Sigma ve Chi Fazlarının Oluşum Mekanizmalarının Farklı Isıl İşlem Parametreleriyle Saptanması", Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü 2014-07-02-YL02, 2014, İstanbul.