



**FARKLI MALZEME KATMANLI ÜRÜNLERİN TEL
ARK EKLEMELİ İMALATI**

Yusuf AYAN

**2022
DOKTORA TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**FARKLI MALZEME KATMANLI ÜRÜNLERİN TEL ARK EKLEMELİ
İMALATI**

Yusuf AYAN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN**

**KARABÜK
Mart 2022**

Yusuf AYAN tarafından hazırlanan “FARKLI MALZEME KATMANLI ÜRÜNLERİN TEL ARK EKLEMELİ İMALATI” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN
Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 24/03/2022

<u>Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)</u>	<u>İmzası</u>
Başkan : Prof. Dr. Serdar SALMAN (MÜ)
Üye : Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN (KBÜ)
Üye : Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU (GÜ)
Üye : Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ (KBÜ)
Üye : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Yusuf AYAN

ÖZET

Doktora Tezi

FARKLI MALZEME KATMANLI ÜRÜNLERİN TEL ARK EKLEMELİ İMALATI

Yusuf AYAN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Mart 2022, 191 sayfa

Fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) farklı malzeme özelliklerini tek bir yapıda sağlayabilen üretimlerdir. Endüstride farklı amaçlar için kullanılan parçalardan kimi zaman bölgesel olarak farklı malzeme davranışlarını sergilemesi istenebilmektedir. Bu tür ihtiyaçlarda FDM yapılarının kullanılması bir çözüm olarak ortaya çıkmaktadır. FDM yapılarının geleneksel imalat yöntemleriyle üretilmesi ise genel olarak zor olup, bazen mümkün olamamaktadır. Ancak günümüzde birçok kullanıma ve araştırmalara konu olan eklemeli imalat (Eİ) tekniği, sunduğu avantajlar sayesinde FDM yapılarının üretimi noktasında geleneksel yöntemlere göre üstün bir imalat yöntemi olmuştur. Eİ yöntemiyle katman şeklinde üretim yapılabilmesi, katman özellikleri değiştirilebilen yapıların imalatına izin vermektedir.

Bu çalışma metal Eİ tekniklerinden biri olan tel ark eklemeli imalat (TAEİ) yöntemiyle FDM yapılarının üretilmesi üzerine gerçekleşmiştir. FDM yapılarında iki farklı kimyasal bileşime sahip düşük alaşımlı çelik (SG2) ile östenitik paslanmaz çelik (308LSi) metal teller kullanılmıştır. TAEİ işlemleri çalışmalar kapsamında özel olarak tasarlanan ve gelişmiş özellikler kazandırılan bir tezgahın üretilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Malzeme yığıma işlemlerinde MIG/MAG kaynak yöntemi tercih edilmiştir. Üretim işlemleri temel olarak iki farklı düzende uygulanmıştır. Bunlardan ilki sadece tek besleyici tel ile üretilen tek malzemeli yapıları diğeri ise farklı iki tel kullanımıyla FDM yapıları üretilmektedir. Toplamda 4 farklı üretim gerçekleştirilmiş, bunlardan 1'incisi tamamı sadece SG2, 2'ncisi ise tamamı sadece 308LSi tel malzemesinden oluşacak şekilde üretilmiştir. 3'üncüsü yarısı SG2 diğeri yarısı 308LSi malzemesinden oluşacak şekilde üretilmiştir. 4'üncüsü SG2 ve 308LSi malzemelerinin her katmanda sırasıyla değiştirilmesi şeklinde üretilmiştir.

4 farklı üretim grubunun elde edilmesinden sonra tek malzemeli ve FDM yapılarının özelliklerini belirlemek için birçok mekanik ve metalürjik testler uygulanmıştır. Mekanik özellikleri belirlemede, sertlik, çekme, yorulma, eğme ve çentik darbe testleri, metalürjik özellikler için ise makro/mikro yapı çalışmaları yapılmıştır. Tüm üretim gruplarına uygulanan deneysel çalışmalarda elde edilen bulgular birbiriyle mukayese edilmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda FDM üretimlerinin hiçbirinde üretim hatasıyla karşılaşılma ve FDM yapılarında bulunan iki farklı malzemenin dolaylı meydana gelen ara yüzeyler tüm testlerden başarılı olmuştur. FDM üretilmesiyle tek malzemeli üretilmelere göre üstün mekanik özellikler sağlanmıştır. FDM yapılarında tek malzemeli üretimlerle kıyaslandığında; çekme dayanımında % 50'ye, yorulma dayanımında ise % 34'e varan artış tespit edilmiştir. Çalışmalar sonucunda TAEİ yöntemiyle özellikleri üstün FDM yapılarının üretilebileceği görülmüştür.

Anahtar Sözcükler : Eklemeli imalat, tel ark eklemeli imalat, fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler, MIG/MAG kaynağı, nitelikli ürünler.

Bilim Kodu : 91511

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

WIRE ARC ADDITIVE MANUFACTURING OF DIFFERENT LAYERED MATERIAL PRODUCTS

Yusuf AYAN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

March 2022, 191 pages

Functionally graded materials (FGM) are components that can provide different material properties in a single structure. It is sometimes required to exhibit locally different material behaviors from parts used for various purposes in the industry. In such requirements, the use of FGM structures emerges as a solution. The production of FGM structures with traditional manufacturing methods is generally difficult and sometimes not possible. However, the additive manufacturing (AM) technique, which is the topic of many applications and research today, has emerged as a superior manufacturing method compared to traditional methods in producing FGM structures, thanks to its advantages. Fabrication in the form of layers with the AM method allows the manufacture of components whose layer properties can be changed.

This study was carried out on the fabrication of FGM structures by the wire arc additive manufacturing (WAAM) method, which is one of the metal AM techniques. Low alloy steel (SG2: ER70S-6) and austenitic stainless steel (308LSi) metal wires with two different chemical compositions are used in FGM structures. WAAM process was carried out by producing a specially designed machine with advanced features within the studies. MIG/MAG welding method was chosen for material deposition processes. The fabrication procedures were carried out in two different orders. The first of these contains single-material structures produced with only one metal wire, and the other includes FGM-structured fabrications using two different wires. In total, four different fabrications were carried out, the first of which was made entirely of only SG2, and the second was made completely of only 308LSi wire material. The third half is made of SG2, and the other half is made of 308LSi material. The fourth is manufactured by replacing the SG2 and 308LSi materials in each layer.

After obtaining four different fabrications, mechanical and metallurgical tests were applied to determine the properties of single-material and FGM structures. Hardness, tensile, fatigue, bending and notch impact tests were applied to determine the mechanical properties. Macrostructure and microstructure studies were carried out to assess metallurgical properties. After completing the experimental studies, the results of all fabrications were compared with each other. As a result of the tests applied, no manufacturing defect was encountered in any of the FGM parts, and the interfaces of two different materials in the FGM parts were successful in all tests. With FGM fabrication, superior mechanical properties are provided compared to single-material constructions. Compared to single-material productions in FGM structures, an increase of 50% in tensile strength and up to 34% in fatigue strength was detected. At the end of the study, it was seen that FGM structures with superior properties could be fabricated with the WAAM method.

Key Word : Additive manufacturing, wire arc additive manufacturing, functionally graded materials, MIG/MAG welding, functional products.

Science Code : 91511

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın planlanmasında, yürütülmesinde ve tüm aşamasında ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyen, kıymetli vaktini her zaman ayıran, bilgi ve tecrübesini sürekli olarak paylaşan, olumlu düşünce ve görüşleriyle her daim motive eden ve başarıya teşvik eden çok değerli Hocam Sayın Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımın işleyişinde ve yürütülmesinde öneri ve görüşleriyle yardım ve desteklerini esirgemeyen Sn. Prof. Dr. Ahmet DURGUTLU ve Doç. Dr. Yakup KAYA hocalarıma teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince yardım ve desteklerini esirgemeyen mesai arkadaşlarım Arş. Gör. Dr. Talha SUNAR'a, Arş. Gör. Abdurrahim TEMİZ'e ve atölye çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Sn. Tekniker Mustafa ÜLKÜ'ye teşekkür ederim.

Bu doktora tez çalışmasını FDK-2019-2130 numaralı proje ile destekleyen Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne ve çalışmalarda kullanılan üretim sisteminin imalatı için 219M111 numaralı proje ile destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim. Ayrıca Üniversite atölye ve laboratuvarlarını her daim kullanmamıza imkan tanıyan Karabük Üniversitesi ve Teknoloji Fakültesi ailesine teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca sürekli yanımda olan maddi manevi desteklerini esirgemeyen eşime ve hayatımıza renk katan biricik kızıma sonsuz teşekkür ederim. Ve son olarak bugünlere gelmemde en büyük pay sahibi olan sevgili anneme ve babama sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	5
GENEL BİLGİLER	5
2.1. EKLEMELİ İMALAT (Eİ)	5
2.1.1. Metal Eklemeli İmalat	6
2.1.1.1. Toz Yataklı Ergitme (TYE)	8
2.1.1.2. Levha Laminasyon Yöntemi.....	10
2.1.1.3. Direkt Enerji Biriktirme (DEB)	10
2.2. TEL ARK EKLEMELİ İMALAT (TAEİ).....	12
2.2.1. TAEİ Yönteminin Üstünlükleri Ve Sınırlamaları.....	14
2.2.2. TAEİ Temel İşlem Parametreleri.....	15
2.2.2.1. Kaynak Teknolojisi	16
2.2.2.2. Kaynak Parametreleri.....	19
2.2.2.3. Koruyucu Gaz	21
2.2.2.4. Besleyici Tel	23
2.2.2.5. Hareket Sistemi	24
2.2.2.6. Altlık	25

	<u>Sayfa</u>
2.2.2.7. Diğer Parametreler	25
2.3. NİTELİKLİ/FONKSİYONEL PARÇALAR VE ÜRETİMİ	26
2.4. YORULMA	28
2.4.1. Yorulma Testleriyle İlgili Bazı Kavramlar	29
BÖLÜM 3	32
LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	32
3.1. TAEİ ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	32
3.1.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler	35
3.1.2. Malzeme Karakterizasyon Ve Üretim İşlemleri	36
3.1.3. Proses Geliştirme Ve İyileştirme	40
3.1.4. Nitelikli Üretimler Ve Çoklu Malzeme Kullanımı	44
3.1.5. Hibrit Üretim Yaklaşımları	49
3.1.6. TAEİ Ve Yorulma	52
BÖLÜM 4	55
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	55
4.1. EKLEMELİ ÜRETİM SİSTEMİ TASARIMI VE İMALATI	55
4.2. MALZEMELER	57
4.3. YÖNTEM VE İŞLEM PARAMETRELERİ	59
4.4. NUMUNE HAZIRLAMA	61
4.5. KİMYASAL İÇERİK BELİRLEME	63
4.6. MAKRO YAPI ÇALIŞMALARI	64
4.7. XRD VE MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	64
4.8. SERTLİK TESTİ	65
4.9. ÇEKME TESTİ	67
4.10. EĞME TESTİ	70
4.11. ÇENTİK DARBE TESTİ	71
4.12. YORULMA TESTİ	74
BÖLÜM 5	80
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	80

5.1. ÜRETİLEN PARÇALAR VE MAKRO YAPI.....	80
5.1.1. 1. Grup (SG2) Parça Makro Yapısı	80
5.1.2. 2. Grup (308LSi) Parça Makro Yapısı.....	81
5.1.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Parça Makro Yapısı.....	82
5.1.4. 4. Grup (Sıralı) Parça Makro Yapısı.....	83
5.2. KİMYASAL İÇERİK BELİRLEME ÇALIŞMALARI.....	84
5.3. XRD VE MİKROYAPI ÇALIŞMALARI	87
5.3.1. 1. Grup (SG2) XRD Ve Mikroyapı Çalışmaları.....	88
5.3.2. 2. Grup (308LSi) XRD Ve Mikroyapı Çalışmaları	91
5.3.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) XRD Ve Mikroyapı Çalışmaları	94
5.3.4. 4. Grup (Sıralı) XRD Ve Mikroyapı Çalışmaları	97
5.4. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI	100
5.4.1. 1. Grup (SG2) Sertlik Ölçümleri	100
5.4.2. 2. Grup (308LSi) Sertlik Ölçümleri.....	102
5.4.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Sertlik Ölçümleri.....	104
5.4.4. 4. Grup (Sıralı) Sertlik Ölçümleri.....	106
5.4.5. Sertlik Ölçümleri Genel Değerlendirme	110
5.5. ÇEKME DENEYİ	111
5.5.1. 1. Grup (SG2) Çekme Deneyi Sonuçları	112
5.5.2. 2. Grup (308LSi) Çekme Deneyi Sonuçları	118
5.5.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Çekme Deneyi Sonuçları	124
5.5.4. 4. Grup (Sıralı) Çekme Deneyi Sonuçları.....	129
5.5.5. Çekme Deneyi Genel Değerlendirme	135
5.6. YORULMA DENEYİ.....	137
5.6.1. 1. Grup (SG2) Yorulma Deneyi Sonuçları	137
5.6.2. 2. Grup (308LSi) Yorulma Deneyi Sonuçları.....	142
5.6.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Yorulma Deneyi Sonuçları	148
5.6.4. 4. Grup (Sıralı) Yorulma Deneyi Sonuçları.....	151
5.6.5. Yorulma Deneyleri Genel Değerlendirme	156
5.7. EĞME DENEYİ.....	158
5.8. ÇENTİK DARBE DENEYİ.....	159

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 6	163
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	163
KAYNAKLAR	167
ÖZGEÇMİŞ	191

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1.	Çalışma akış şeması.	3
Şekil 2.1.	Geleneksel ve eklemeli imalat.....	6
Şekil 2.2.	Eklemeli imalat işleminin aşamaları.	6
Şekil 2.3.	Metal eklemeli imalat teknikleri.	7
Şekil 2.4.	Eİ işlemlerinde kullanılan tel ve toz malzemeleri.	8
Şekil 2.5.	TYE yöntemi prensibi.	9
Şekil 2.6.	TYE yöntemiyle üretilmiş örnek parça.	9
Şekil 2.7.	Levha laminasyon yöntemi.	10
Şekil 2.8.	DEB yöntemi prensibi.	11
Şekil 2.9.	TAEİ işlemleri.	12
Şekil 2.10.	TAEİ işleminde kullanılan makineler.	13
Şekil 2.11.	TAEİ yöntemiyle üretilmiş örnek parçalar.....	14
Şekil 2.12.	TAEİ temel işlem parametreleri.	16
Şekil 2.13.	MIG/MAG kaynağı prensibi.	17
Şekil 2.14.	TIG kaynağı prensibi.....	18
Şekil 2.15.	Plazma ark kaynağı prensibi.	18
Şekil 2.16.	TAEİ işlemleriyle gerçekleştirilen FDM üretimi.	26
Şekil 2.17.	S-N diyagramı.	31
Şekil 3.1.	Yıllara göre TAEİ konusunda yapılmış çalışmalar.	33
Şekil 3.2.	Ülkelere göre TAEİ konusunda gerçekleştirilen yayın sayıları.	33
Şekil 3.3.	TAEİ yöntemiyle üretilen bal peteği biçimli iskelet yapı.	39
Şekil 3.4.	Aktif soğutma sistemi.....	44
Şekil 3.5.	Plazma TAEİ yöntemi ve çoklu malzeme kullanımı.	48
Şekil 3.6.	TAEİ ve haddelene hibrit üretim işlemi.	51
Şekil 4.1.	TAEİ tezgahının tasarım resmi ve dış ölçüleri.....	56
Şekil 4.2.	TAEİ tezgahı imalat aşamalarından resimler.	56
Şekil 4.3.	TAEİ üretim sistemi.	57
Şekil 4.4.	TAEİ işlemlerinde uygulanan üretim biçimleri.	59

Şekil 4.5. Üretim işlemlerinde izlenen prosedür	61
Şekil 4.6. Çekme ve yorulma numunelerinin üretilen parçalar üzerinden çıkarımı.62	
Şekil 4.7. Çekme ve yorulma numunelerini isimlendirme prensibi.	63
Şekil 4.8. OE test cihazı.	63
Şekil 4.9. Optik mikroskop.....	65
Şekil 4.10. Sertlik ölçüm bölgeleri ve ölçüm alınan yüzeyler.....	66
Şekil 4.11. Sertlik ölçümünde kullanılan cihaz.	67
Şekil 4.12. Çekme numunesi boyutları.....	67
Şekil 4.13. Grup (1 ve 2) çekme test numuneleri.	68
Şekil 4.14. Grup (3) çekme testi numuneleri.....	68
Şekil 4.15. Grup (4) çekme testi numuneleri.....	69
Şekil 4.16. Çekme test makinesi.....	69
Şekil 4.17. Eğme test numune boyutları.....	70
Şekil 4.18. Eğme test numuneleri.....	71
Şekil 4.19. Eğme testinde kullanılan kalıp ve ölçüleri.	71
Şekil 4.20. Çentik darbe numune boyutları.	72
Şekil 4.21. Çentik darbe numune tipleri.	72
Şekil 4.22. Çentik darbe test numuneleri.....	73
Şekil 4.23. Çentik darbe test cihazı.	73
Şekil 4.24. Yorulma test numune ölçüleri.	74
Şekil 4.25. Grup (1 ve 2) yorulma test numuneleri	75
Şekil 4.26. Grup (3) yorulma test numuneleri.....	76
Şekil 4.27. Grup (4) yorulma test numuneleri.....	76
Şekil 4.28. Yorulma test makinesi ve kısımları.....	77
Şekil 4.29. Yorulma test numunesinin bağlanması izlenen prosedür.....	78
Şekil 5.1. Grup (1) üretilen parça (SG2).	81
Şekil 5.2. Grup (2) üretilen parça (308LSi).....	82
Şekil 5.3. Grup (3) üretilen parça (% 50 SG2-% 50 308LSi).....	83
Şekil 5.4. Grup (4) üretilen parça (Sıralı).....	84
Şekil 5.5. Grup (1) OE sonuçları.	85
Şekil 5.6. Grup (2) OE sonuçları.	86
Şekil 5.7. Grup (3) OE sonuçları.	86

Sayfa

Şekil 5.8. Grup (1) XRD analiz sonucu.....	88
Şekil 5.9. Grup (1) mikroyapı resimleri.	89
Şekil 5.10. Grup (2) XRD analiz sonucu.....	91
Şekil 5.11. Grup (2) mikroyapı resimleri.	92
Şekil 5.12. Grup (3) XRD analiz sonucu.....	95
Şekil 5.13. Grup (3) mikroyapı resimleri.	96
Şekil 5.14. Grup (4) XRD analiz sonucu.....	97
Şekil 5.15. Grup (4) mikroyapı resimleri.	99
Şekil 5.16. Grup (1) kesit sertlik değerleri.	101
Şekil 5.17. Grup (1) orta kısım sertlik değerleri.....	102
Şekil 5.18. Grup (2) kesit sertlik değerleri.	103
Şekil 5.19. Grup (2) orta kısım sertlik değerleri.....	103
Şekil 5.20. Grup (3) kesit sertlik değerleri.	105
Şekil 5.21. Grup (3) orta kısım sertlik değerleri.....	106
Şekil 5.22. Grup (4) kesit sertlik değerleri.	107
Şekil 5.23. Grup (4) orta kısım sertlik değerleri.....	109
Şekil 5.24. Sertlik sonuçları karşılaştırma grafiği.	111
Şekil 5.25. Grup (1) gerilme-uzama grafikleri.	113
Şekil 5.26. Grup (1) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.	114
Şekil 5.27. Kaynak dikişi oluşturma şekline göre malzeme biriktirme türleri.	115
Şekil 5.28. Grup (1) çekme testi kırık yüzey resimleri.....	117
Şekil 5.29. Grup (2) gerilme-uzama grafikleri.	120
Şekil 5.30. Grup (2) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.	121
Şekil 5.31. Grup (2) numunelerin test bölgesinde görülen şekil değişimleri.	122
Şekil 5.32. Grup (2) çekme testi kırık yüzey resimleri.....	123
Şekil 5.33. Grup (3) gerilme-uzama grafikleri.	124
Şekil 5.34. Grup (3) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.	125
Şekil 5.35. Grup (2) ve grup (3) dikey çekme sonuçlarının kıyaslanması.	126
Şekil 5.36. Grup (3) yatay numunelerinin karşılaştırmalı grafiği.	128
Şekil 5.37. Grup (3) çekme testi kırık yüzey resimleri.....	129
Şekil 5.38. Grup (4) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.	130
Şekil 5.39. Grup (4) gerilme-uzama grafikleri.	131

Sayfa

Şekil 5.40. Grup (4) sıralı dikey numunenin çekme sonrası makro görünümü.....	132
Şekil 5.41. Grup (4) üretimde frezeleme işlemi uygulanmış örnek bir parça.	132
Şekil 5.42. Grup (4) çekme testi kırık yüzey resimleri.....	134
Şekil 5.43. Çekme deneyi sonuçları karşılaştırma grafiği.	136
Şekil 5.44. Grup (1) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örnekleri.	137
Şekil 5.45. Grup (1) yorulma sonuç grafikleri.	139
Şekil 5.46. Grup (1) yorulma numunelerinin test sonrası görünümü.....	140
Şekil 5.47. Grup (1) yorulma testi kırık yüzey resimleri.....	141
Şekil 5.48. Grup (2) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örnekleri.	142
Şekil 5.49. Grup (2) yorulma sonuç grafikleri.	145
Şekil 5.50. Grup (2) yorulma numunelerinin yorulma testi sonrası görünümü.....	146
Şekil 5.51. Grup (2) yorulma testi kırık yüzey resimleri.....	147
Şekil 5.52. Grup (3) yorulma numunelerinin yorulma testi sonrası görünümü.....	148
Şekil 5.53. Grup (3) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örneği.	149
Şekil 5.54. Grup (3) yorulma sonuç grafiği ve kıyaslama.....	150
Şekil 5.55. Grup (3) yorulma testi kırık yüzey resimleri.....	151
Şekil 5.56. Grup (4) yorulma numunelerinin test sonrası görünümü.....	151
Şekil 5.57. Grup (4) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örnekleri.	152
Şekil 5.58. Grup (4) yorulma sonuç grafikleri.	153
Şekil 5.59. Grup (4) yorulma testi kırık yüzey resimleri.....	156
Şekil 5.60. Yorulma sonuç grafiklerinin birlikte gösterimi.....	157
Şekil 5.61. Eğme deneyi sonrası numuneler.	158
Şekil 5.62. Çentik darbe deneyi sonuçları.	160
Şekil 5.63. Çentik darbe deneyi sonrası numuneler.	161

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 3.1. TAEİ yönteminde kullanılan malzemeler.	35
Çizelge 4.1. SG2 ve 308LSi telin kimyasal bileşenleri (ağırlıkça %).	58
Çizelge 4.2. St37 altlık malzemesinin kimyasal bileşenleri (ağırlıkça %).	58
Çizelge 4.3. Üretim işlemlerinde uygulanan kaynak parametreleri.	60
Çizelge 5.1. Grup (1) çekme deneyi sonuçları.	112
Çizelge 5.2. Grup (2) çekme deneyi sonuçları.	118
Çizelge 5.3. Grup (3) dikey çekme deneyi sonuçları.....	124
Çizelge 5.4. Grup (3) yatay çekme deneyi sonuçları.....	127
Çizelge 5.5. Grup (4) çekme deneyi sonuçları.	131
Çizelge 5.6. Grup (1) dikey yorulma deneyi sonuçları.....	138
Çizelge 5.7. Grup (1) yatay yorulma deneyi sonuçları.....	139
Çizelge 5.8. Grup (2) dikey yorulma deneyi sonuçları.....	143
Çizelge 5.9. Grup (2) yatay yorulma deneyi sonuçları.....	144
Çizelge 5.10. Grup (3) dikey yorulma deneyi sonuçları.....	150
Çizelge 5.11. Grup (4) dikey yorulma deneyi sonuçları.....	153
Çizelge 5.12. Grup (4) yatay yorulma deneyi sonuçları.....	154

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: alüminyum
C	: karbon
Mn	: mangan
Si	: silisyum
Mo	: molibden
Ni	: nikel
Cr	: krom
Fe	: demir
P	: fosfor
S	: kükürt
Ti	: titanyum
Nb	: niobyum
W	: tungsten
Ta	: tantalyum
Ar	: argon
CO ₂	: karbondioksit
O ₂	: oksijen
MnO	: manganoksit
α	: alfa ferrit
γ	: östenit
δ	: delta ferrit

KISALTMALAR

Eİ	: Eklemeli İmalat
AM	: Additive Manufacturing
TAEİ	: Tel Ark Eklemeli İmalat
WAAM	: Wire Arc Additive Manufacturing
FDM	: Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler
FGM	: Functionally Graded Materials
SMD	: Shaped Metal Deposition (Şekilli Metal Yığıma)
DEB	: Direkt Enerji Biriktirme
TYE	: Toz Yataklı Ergitme
SLE	: Seçici Lazer Ergitme
SLS	: Seçici Lazer Sinterleme
DMLS	: Direkt Metal Lazer Sinterleme
OE	: Optik Emisyon
XRD	: X-Ray Diffraction (X Işını Kırınımı)
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS	: Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
AWS	: American Welding Society (Amerikan Kaynakçılık Derneği)
ASTM	: American Society for Testing and Materials (Amerikan Test ve Materyalleri Topluluğu)
MIG/MAG	: Metal Inert Gas/Metal Active Gas (Metal Asal Gaz/Metal Aktif Gaz)
TIG	: Tungsten Inert Gas (Tungsten Asal Gaz)
CMT	: Cold Metal Transfer (Soğuk Metal Transfer)
ITAB	: Isı Tesiri Altında Kalan Bölge
CNC	: Computer Numerical Control (Bilgisayarlı Sayısal Kontrol)
HV	: Vickers Hardness (Vickers Sertliği)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

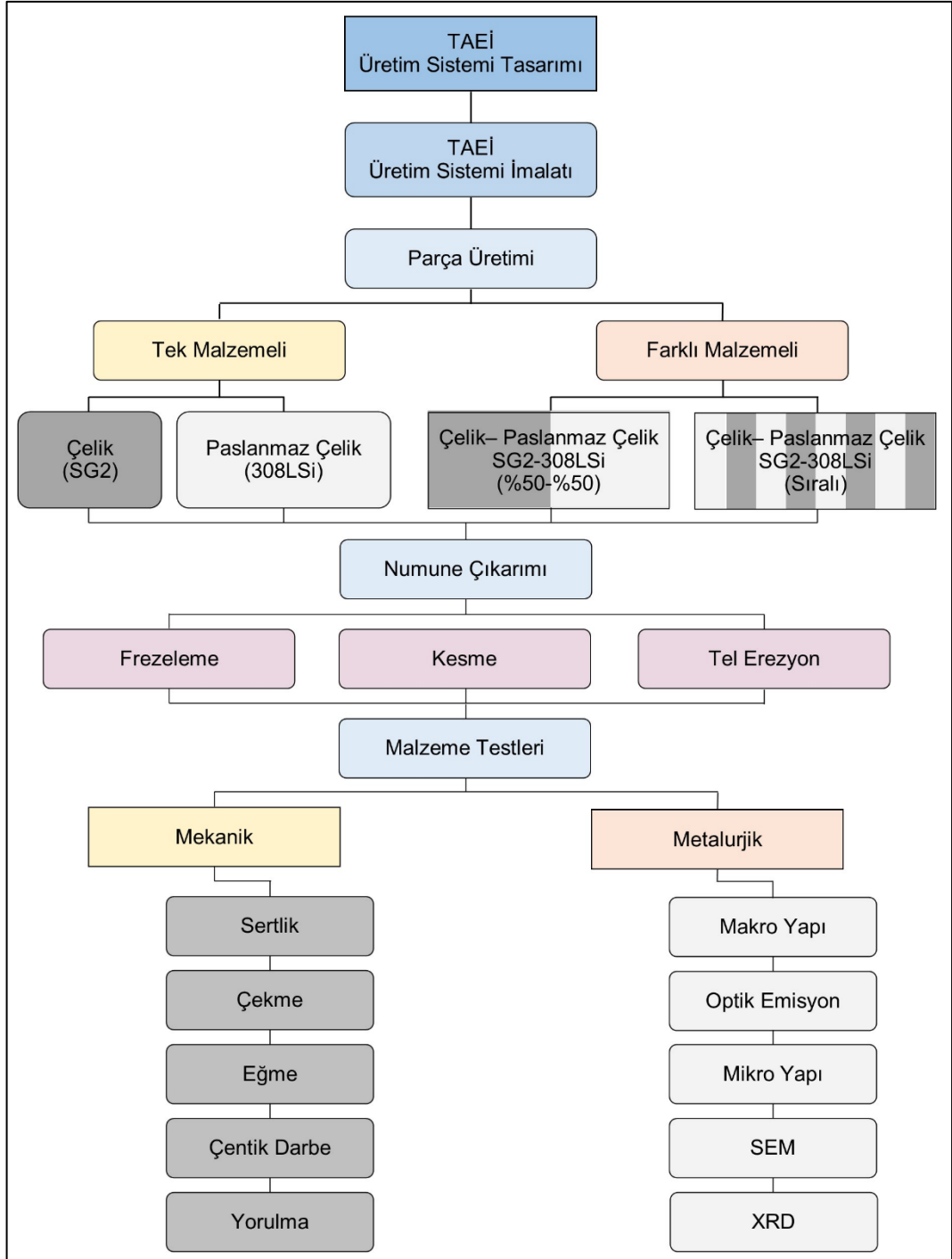
İnsan ihtiyaçlarının artması ile teknolojiye duyulan gereksinim de artmış, buna bağlı olarak üretim yöntemleri değişim ve ilerleme göstermiştir. Eklemeli imalat (Eİ) bu bağlamda günümüzün önemli üretim yöntemlerinden birisi olmuştur. Her ne kadar geleneksel üretim yöntemlerinin kullanımı devam etse de Eİ, bu yöntemlere gelişmiş ve yeni bir alternatif üretim tekniği olarak ortaya çıkmıştır. Eİ ev ortamında hobi amaçlı plastik nesnelerin üretiminden, canlı vücudunda görev alan implant üretimine kadar birçok sektörde kullanım alanı bulmuştur. İnşaat sanayinde yapı üretiminden, gıda sektöründe pastacılık gibi alanlarda kullanımı yer edinmiştir. Özellikle makine-metal imalat sanayisi için Eİ işlemleri önemli bir üretim tekniği olmuştur.

Eİ bir nesnenin son ürün şeklinde üretilmesi konusunda geleneksel yöntemlere göre önemli avantajlar sağlayabilmektedir. Üretim işlemi daha kısa sürelerde tamamlanabilmekte ve malzeme sarfiyatı önemli derecede daha az olmaktadır. Bu durum özellikle maliyeti yüksek, temini zor veya az bulunan malzemelerin (Örneğin titanyum) üretilmesi konusunda daha da önemli hale gelmektedir. Ayrıca geleneksel yöntemlere göre üretimi zor olan, isteğe özel ve karmaşık şekilli parçaların üretiminin yapılabilirliği de düşünüldüğünde Eİ gelişmiş bir üretim yöntemi olarak öne çıkmaktadır. Günümüzde metalik parçaların Eİ yöntemiyle üretimi çeşitli sektörlerde yer edinmiş ancak yöntemin yeni ve güncel olması sebebiyle kullanımı ve geliştirilmesine olan ihtiyaç devam etmiştir. Bu nedenle Eİ konusunda birçok çalışma sürdürülmekte ve yeni araştırmalar yapılmaktadır.

Metalik malzeme kullanımı makine imalat sanayisi için önemli olduğu kadar hemen hemen diğer tüm sektörler içinde önem arz etmektedir. Metalik parçaların Eİ ile üretilmesi üzerine farklı yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerden birisi tel ark eklemeli imalattır (TAEİ). Yöntem yabancı kaynaklarda genel olarak “wire arc

additive manufacturing” (WAAM) olarak tanımlanmaktadır. Kaynaklı imalat esasına direkt olarak bağı olan bu üretim yönteminde kaynak arkı kullanılarak metalik telin ergitilmesi sağlanır. Üretilen olan parça düzenli geometride ergiyen ve sonrası katılaştan metallerin üst üste birikimi şeklinde sağlanır. TAEİ özellikle büyük ölçekli metalik parçaların kısa sürede üretimi konusunda diğeri metal Eİ yöntemlerine göre daha avantajlıdır. Örneğinin bu yöntemle metre boyutlarında ve 20 kg veya daha fazla kütleyle sahip parçaların tek seferde bir bütün olarak üretimi mümkün olabilmektedir.

Bu çalışma, TAEİ yöntemiyle nitelikli parçaların üretimi üzerine gerçekleştirilmiştir. Nitelikli veya fonksiyonel olarak tanımlanabilecek bu parçalar farklı katman farklı malzeme içeriğine sahip olacak şekilde üretilmişlerdir. Bu sayede tek bir malzeme ile sağlanamayan mekanik veya fiziksel özellikler diğeri malzemeyle sağlanabilecektir. Üretilen olan metal parçanın istenilen kısımları üretime ve malzeme uygunluk şartları kapsamında farklı malzeme özellikleri sergileyebilecektir. Üretim yönteminde Eİ tekniği kullanıldığı da düşünüldüğünde; üç boyutlu, karmaşık şekilli ve isteğe özel parçaların farklı malzeme özellikleri sergileyebilecek şekilde üretilmesi, çalışma konusunu farklı kılmaktadır. Çalışmalar için öncelikle bir TAEİ sistemi tasarlanmış ve üretilmiştir. TAEİ işlemleri için gaz altı metal ark kaynak (MIG/MAG) yöntemi kullanılmıştır. Farklı malzeme özelliklerini sağlayabilecek parçaların üretimi için sanayide yoğun olarak kullanılan düşük karbonlu yumuşak çelik (SG2) ve paslanmaz çelik (308LSi) teller seçilmiştir. Üretimler tek malzemeli ve bu iki malzemenin farklı üretim kombinasyonlarıyla olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Üretim işlemlerinin tamamlanmasının ardından numune alma işlemine geçilmiş ve ardından deneysel çalışmalar uygulanmıştır. Numunelere mekanik test olarak sertlik, çekme, eğme, çentik darbe ve yorulma testleri uygulanmıştır. Metalurjik testler için ise makro/mikroyapı inceleme testleri uygulanmıştır. Şekil 1.1’de çalışmanın akış şeması gösterilmektedir. Çalışma kapsamı ve içeriği tezin devam eden kısımları için bölümlere göre aşağıda özetlenmiştir.



Şekil 1.1. Çalışma akış şeması.

Giriş bölümünde yukarıda açıklandığı gibi çalışma konu kapsamı ve yapılanlar kısaca açıklanmıştır. Tezin devam eden 2. bölümünde Eİ işleminin tanımı yapılmış ve metal Eİ işlemleri hakkında genel bilgiler verilmiştir. TAEİ çalışma konusu olması sebebiyle bu kısımda konu üzerinde durulmuş ve geniş olarak anlatılmıştır. TAEİ işlemini etkileyen parametreler bu bölümde sınıflara ayrılarak ayrıntılı olarak açıklanmıştır. 2.

bölümde ayrıca nitelikli ve fonksiyonel parçaların üretimi konusuna da değinilmiş farklı malzemelerin bir arada kullanıldığı üretim durumlarından bahsedilmiştir. 3. bölüm literatür araştırmalarını kapsamaktadır. Bu bölümde öncelikle çalışma konusunun literatürdeki önemi değeriendirilmiş ve bazı sayısal veriler paylaşılmıştır. Bölümün devam eden kısmında TAEİ konusunda önceden yapılmış çalışmalar konusuna göre alt başlıklarda açıklanmıştır. Yorulma testleri tez çalışması için farklılık oluşturduğundan TAEİ ve yorulma konusunda yapılmış çalışmalar da ayrı başlık altında incelenmiştir. 4. bölümde öncelikle tez çalışmaları kapsamında tasarımı ve üretimi gerçekleştirilen TAEİ sistemi anlatılmış ve özellikleri hakkında bilgiler verilmiştir. Bu bölüm malzeme ve yöntem konusunu oluşturduğundan, kullanılan malzeme ve yöntemler anlatılmış deneysel çalışmalar hakkında detaylı bilgiler verilmiştir. 5. bölümde çalışma da elde edilen bulgu ve sonuçlar açıklanıp literatürle ilişkilendirilmiştir. Uygulanan testler genel olarak her bir üretim grubu için ayrı başlıklarda irdelenmiştir. 6. bölümde genel sonuçlar özetlenmiş ve ileride yapılacak olan yeni çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2

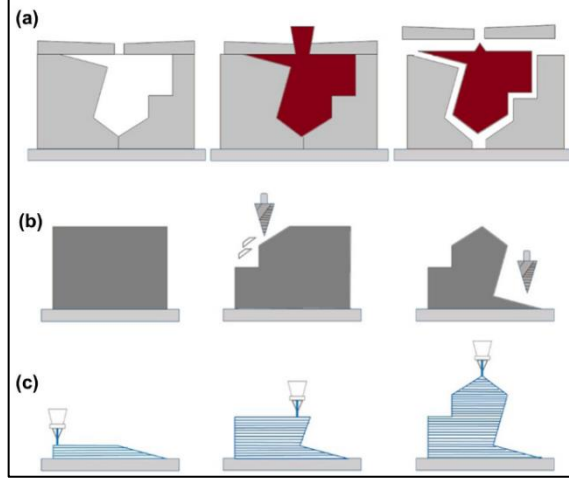
GENEL BİLGİLER

2.1. EKLEMELİ İMALAT (Eİ)

İleri üretim tekniklerinden biri olan eklemeli imalat (Eİ) yöntemi [1], bir nesnenin katmansal bir biçimde birbiri üzerine eklenerek üretilmesi prensibine dayanmaktadır [2]. Bu yöntem aynı zamanda katmanlı imalat, hızlı prototipleme, 3B (Üç boyutlu) baskı, serbest formlu katı üretim terimleri ile de bahsedilmektedir [3]. 1980'lerin sonlarında geliştirilen [4] bu yöntemle olan ilgi, son zamanlarda araştırma ve endüstriyel uygulamalarda oldukça artmıştır [5]. Geçmişte prototip üretimler için kullanılan bu yöntemle [6], günümüzde esas olarak kullanılan son boyutlarına sahip parçalar üretebilmek mümkündür [7]. Eİ ile yeni bir parçanın üretilbildiği gibi bu yöntemle aşınmış ve hasar görmüş parçaların tamir-onarım işlemi de yapılabilmektedir [8]. Eİ havacılık, otomotiv, medikal, makine imalat, denizcilik, petrol ve gaz, elektronik, tüketici uygulamaları (mücevher, moda gibi) inşaat ve gıda endüstrisi gibi birçok alanda kullanım alanı bulmuştur [9].

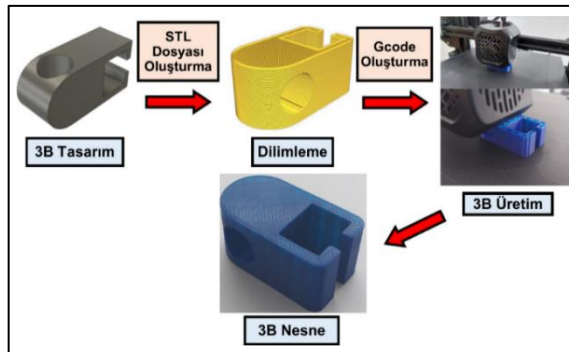
Eİ yönteminin en önemli avantajı geleneksel yöntemlerle elde edilmesi imkansız veya zor olan ürünün tasarımı ve ürünlerin performansında iyileştirmelere izin veren mükemmel tasarım esnekliğidir [10]. Geleneksel imalat yöntemleriyle (döküm, sıcak-soğuk şekil verme, metal işleme) kıyaslandığında Eİ minimum malzeme israfı, karmaşık tasarımlara imkan verme ve son şekilde üretim sağlama konusunda avantajlıdır [11]. Ayrıca Eİ yöntemi enerji tasarrufu, hızlı tasarım ve üretim, imalat işlem aşamalarını azaltma gibi faydalar da sağlamaktadır [12]. Üretim işleminde kalıp ve karmaşık takımlara ihtiyaç duyulmamaktadır [4]. Bu yöntem ile parçalar esasen herhangi bir yerde tam zamanında gerekirse aynı işlem parametreleriyle eksiksiz bir biçimde üretilir [8]. Eİ ve geleneksel imalat yöntemleriyle parça üretim prensipleri

şematik olarak Şekil 2.1’de gösterilmiştir. Şekil 2.1 a’da döküm, b’de eksiltmeli ve c’de eklemeli imalat yöntemi tasvir edilmiştir.



Şekil 2.1. Geleneksel ve eklemeli imalat [13].

Eİ işleminde polimer malzemelerin yaygın kullanımının yanı sıra [14], metal ve seramik gibi malzemeler de kullanılabilir [15]. Kompozit malzemelerin üretimi konusunda yapılan çalışmalar da bulunmaktadır [16,17]. Şekil 2.2’de polimer malzeme ile gerçekleştirilen bir Eİ işleminin aşamaları gösterilmektedir.

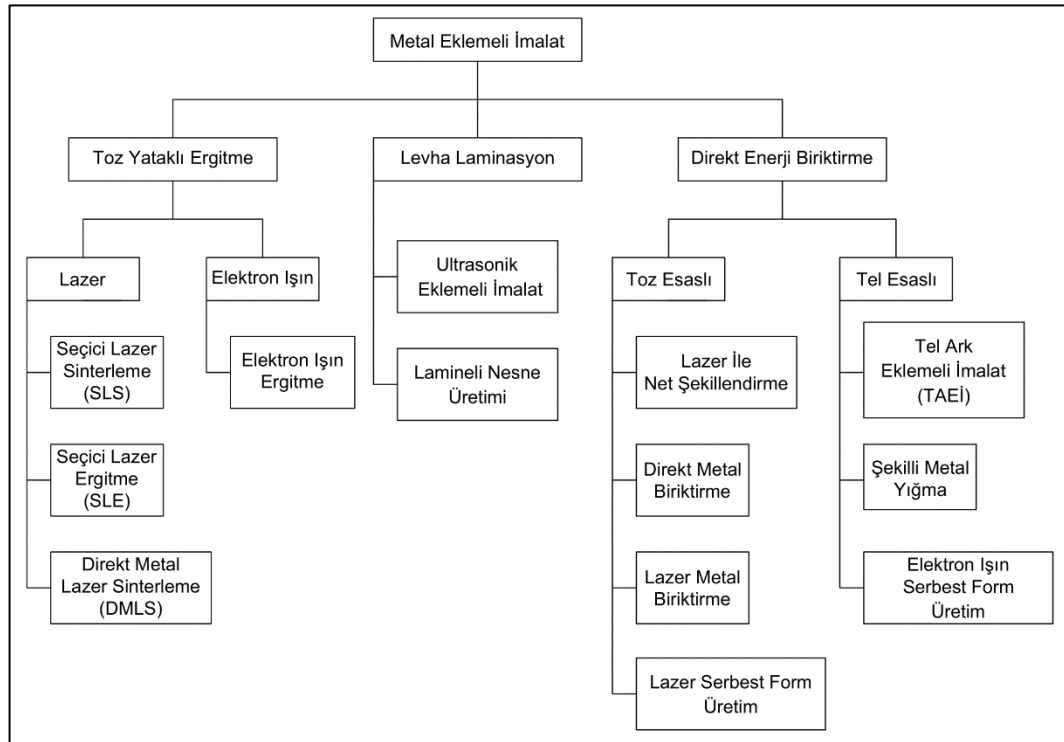


Şekil 2.2. Eklemeli imalat işleminin aşamaları.

2.1.1. Metal Eklemeli İmalat

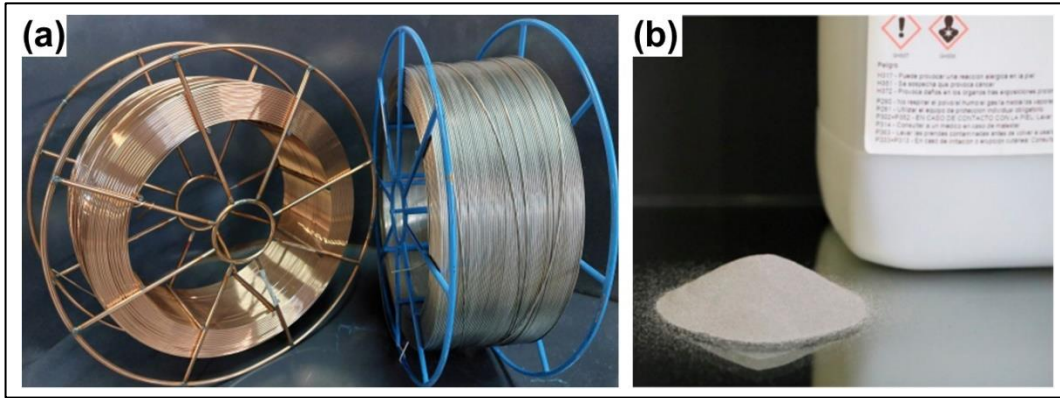
Günümüzde polimer malzemelerin Eİ işlemleri için düşük bütçeli birçok makine ve ekipmanları yaygın olarak bulunmaktadır. Bu makinelerle üretilen polimer nesnelere

hobi amaçlı kullanımın yanı sıra, belirli bir işlevi olan parça olarak da kullanılabilir. Örneğin Şekil 2.2’de üretim aşaması gösterilen polimer parça Bölüm 4’te anlatımı gerçekleştirilen tezgahta gaz hortumu tutan parça olarak kullanılmıştır. Bunun yanı sıra polimer nesnelerin üretiminin basitliği sayesinde, bazı durumlarda hasara uğrayan parçalar üzerinden alınan ölçülerle tekrar üretilebilmekte ve bu şekilde acil ihtiyaçlar da giderilebilmektedir. Metallerin Eİ işlemine gelindiğinde ise polimerler kadar kolay olmadığı bir gerçektir. Metaller sürekli beslemeyi zorlaştıran akışkanlık, ergime sıcaklığı ve yüzey gerilimi açısından plastiklerden oldukça farklıdır [4]. Mühendislik çalışmalarında başta makine-imalat sektörü olmak üzere diğer birçok alanda çoğu zaman metalik parçalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum metallerin Eİ ile olan ilgisini daha da önemli hale getirmektedir Eİ alanında son 20 yılda plastik parçaların prototipinden fonksiyonel metalik parçalara dönüşüm konusunda önemli çalışmalar yapılmaktadır [18]. Metallerin Eİ işlemi için araştırmalar çoğunlukla üretimi zor olan ya da yüksek maliyet gerektiren parçalara ve malzemelere odaklanmıştır [19]. Metal yapıların Eİ işlemi için birçok farklı üretim teknikleri geliştirilmiştir. Bu teknikler Şekil 2.3’te verilen şemada gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Metal eklemeli imalat teknikleri [20].

Metal Eİ işlemlerinin farklı kaynaklarda farklı şekillerde sınıflandırıldığı görülmüştür. Bu sınıflandırmalar genel olarak metal ergitmede ihtiyaç duyulan enerji (ısı) ve kullanılan hammaddeye göre ayrılabilir. Kullanılan ısı türüne göre metal Eİ ışın ve elektrik arkı şeklinde ayrılabilir [21]. Işın türü lazer ve elektron ışını olarak değişmektedir. Elektrik arkı ise kaynaklı imalatla birleştirme işlemleri için kullanılan ve metallerin ergitilmesini sağlayan kaynak arkıdır. Hammadde kullanımına göre ise metal Eİ tel ve toz kullanan yöntemler şeklinde sınıflandırılabilir [22]. Tel ile gerçekleştirilen Eİ işlemleri toza kullanılanlara göre, düşük maliyet, yüksek malzeme kullanımı, yüksek malzeme biriktirme verimliliği ve çevre dostu üretime sahip olma gibi avantajlara sahiptir [23]. Şekil 2.4'te Eİ işlemlerinde kullanılan a) tel ve b) toz malzemeleri [24] gösterilmektedir.

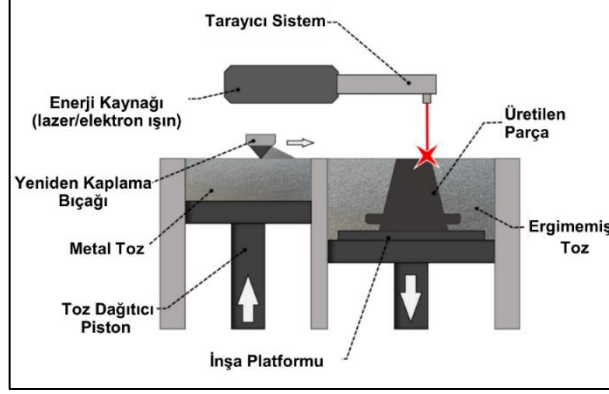


Şekil 2.4. Eİ işlemlerinde kullanılan tel ve toz malzemeleri [24].

2.1.1.1. Toz Yataklı Ergitme (TYE)

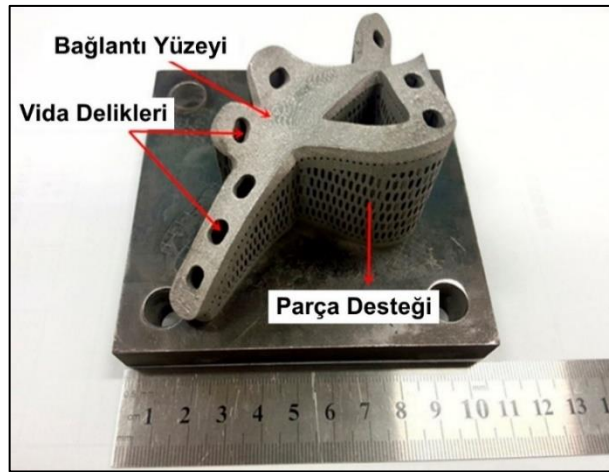
Toz Yataklı Ergitme (TYE) yöntemi metal Eİ tekniğinde yoğun kullanılan bir tekniktir [25]. Kullanılan enerji kaynağına göre TYE tekniği, lazer ve elektron ışını olarak iki farklı biçimde uygulanmaktadır. Bu yöntemde yüksek güçte enerji kaynağı kullanılır ve metal toz yatağında ergitme veya sinterleme işlemi yapılır. Lazer esaslı TYE, seçici lazer ergitme (SLE), seçici lazer sinterleme (SLS) ve direkt metal lazer sinterleme (DMLS) olmak üzere üç farklı yöntemde uygulanır. Bu yöntemlerde genellikle üreticiye bağlı olarak 100 W-1000 W aralığında lazer gücü kullanılır. Diğer Eİ yöntemlerine göre çözünürlük konusunda avantaj sağlar ve örneğin 20 µm kadar küçük

katman kalınlıklarına ulaşılabilir [26]. TYE yönteminin uygulama prensibi şematik olarak Şekil 2.5'te gösterilmiştir.



Şekil 2.5. TYE yöntemi prensibi [27].

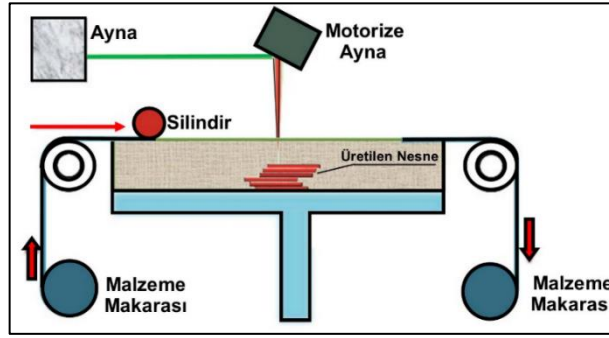
SLE ve elektron ışın TYE yöntemi en yaygın kullanılan iki yöntemdir. SLE bir lazerin soygaz ortamında ince toz yatağının yüzeyi üzerinde seçilen alanların ergimesi ve kaynaşması biçiminde uygulanır. Ardışık katmanlar ergitilerek 3B parçalar oluşturulur. Elektron ışın TYE yöntemi SLE prensibine dayanmaktadır ancak kullanılan enerji kaynağının elektron ışını olması ve vakum ortamında yapılması bakımından farklıdır. Elektron ışın TYE yönteminde her katman dumanı önlemek ve tam yoğunluğa yakın parçalar elde etmek için odaksız bir ışınla sinterlenir [28]. Şekil 2.6'da TYE yöntemiyle Ti6Al4V malzemesi kullanılarak üretilmiş bir parça gösterilmektedir.



Şekil 2.6. TYE yöntemiyle üretilmiş örnek parça [29].

2.1.1.2. Levha Laminasyon Yöntemi

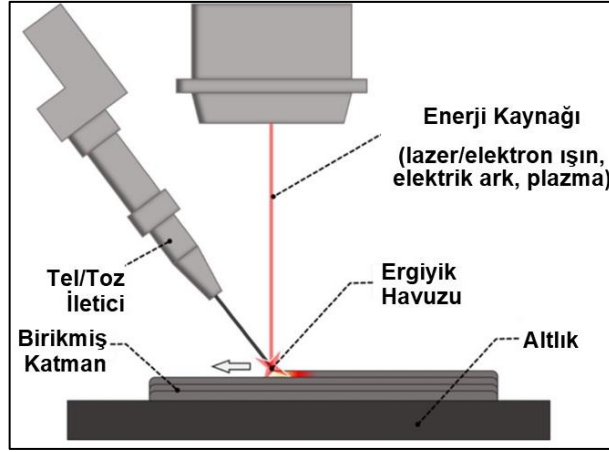
Levha laminasyonu, ince malzeme tabakalarının bir 3B nesneye dilimlenebilen tek bir parça oluşturmak için katman katman birbiri üzerine yapıştırıldığı/bağlandığı bir Eİ tekniğidir [30]. Lamineli nesne üretimi olarak da adlandırılabilen bu teknikte hammadde olarak metal saclar kullanılır. Metalik levha yığınlarını birleştirmek için genellikle sınırlanmış ultrasonik veya lazer enerji kaynağı kullanılır. Sac yığınlarına oda sıcaklığında ultrasonik dalga ve mekanik basınç uygulanarak, yığın haldeki levhaların ara yüzeyleri erime yerine difüzyonla bağlanması sağlanır. Yığılmış saclar 3B nesne oluşturmak için herhangi bir ısı kaynağı olmadan katman katman bağlanır [26]. Şekil 2.7’de levha laminasyon yönteminin uygulaması gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Levha laminasyon yöntemi [31].

2.1.1.3. Direkt Enerji Biriktirme (DEB)

Direkt Enerji Biriktirme (DEB) enerji kaynağı olarak elektron ışını, lazer veya kaynak arkını, besleme malzemesi olarak tel veya toz kullanan bir metal Eİ tekniğidir. Bu yöntemde malzeme direkt olarak plaka veya bir parça üzerinde ergiyerek yığılır. Yönlendirilen enerji kaynağı ve malzeme akışı genellikle birlikte hareket eder ve katman üstüne katman şeklinde sonlu genişlik ve kalınlıkta metal üretilir [32]. Şekil 2.8’de DEB yönteminin uygulama prensibi gösterilmiştir.



Şekil 2.8. DEB yöntemi prensibi [27].

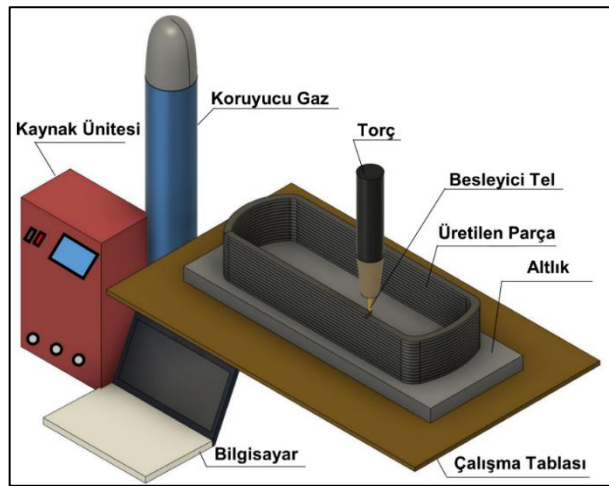
DEB yöntemi ile malzeme üzerine kaplama yapılarak koruyucu ya da yorulma ömrünü artırıcı özellikler kazandırılabilir. Isı iletimi toz TYE yöntemiyle kıyaslandığında daha verimlidir. Çünkü ısı, malzeme ve koruyucu gaz direkt olarak nozul tarafından yapım bölgesine gönderilirken TYE sistemindeki toz yatağı ısı yalıtkanı gibi davranır. Isı yalıtımından kaynaklanan bu eksiklik, tamamlanmamış toz ergimesine sebep olarak parçaların mekanik özelliklerinde ve yapısal bütünlüğünde zararlı olabilecek boşluklu yapı (porozite) ve başka katılma hatalarına sebep olur. TYE sisteminde ısı kaynağı hareketi (lazer veya elektron ışını) DEB yöntemine göre çok hızlı olduğundan keskin termal döngüler meydana gelir ve bu katılma esnasında hataların ve boşluklu yapının oluşumunu artırır. Bu sorunlar DEB yönteminde daha verimli ısı iletimi ve düşük keskin termal döngüler sağlanmasından dolayı daha az görüldüğü için DEB işlemi genellikle uygun yapılar sağlar ve bu durum verimliliği artırır. Malzeme biriktirme oranı DEB yönteminde TYE yöntemine göre 10 kat daha fazladır. Ancak bu durum daha geniş kalın katmanlı yapıların üretimiyle sonuçlanıp yüzey pürüzlüğünün ve parça doğruluğunun (DEB için ± 1 mm ve TYE için $\pm 0,5$ mm) TYE yöntemine göre daha az olmasına sebep olur [20].

Tel ark eklemeli imalat (TAEİ) uygulama biçimi bakımından DEB teknikleri arasında yer almaktadır. Çalışma konusu TAEİ kullanımını kapsadığından bu teknik yeni bir başlık altında etraflıca açıklanacaktır.

2.2. TEL ARK EKLEMELİ İMALAT (TAEİ)

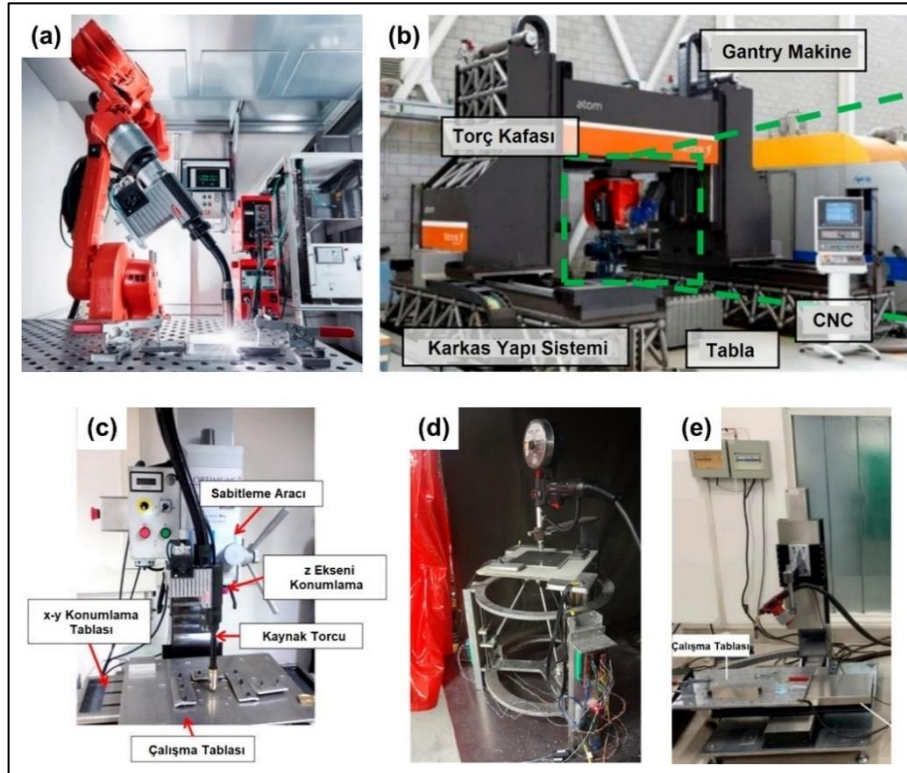
TAEİ, kaynaklı imalat işleminde metal parçaların birleştirilmesinde yaygın olarak kullanılan ark kaynak tekniğine dayalı gerçekleştirilen bir metal Eİ yöntemidir. Bu yöntemde malzeme birikiminde enerji/ısı kaynağı olarak elektrik arkı, hammadde için ise metalik teller kullanılır [33]. Kaynak arkında besleyici tel oransal ve kontrollü bir şekilde ergitilerek malzeme üzerinde birikimi sağlanır [34]. Bu bakımdan TAEİ işlemi kaynak yöntemlerinin uygulama prensiplerine sıkıca bağlıdır. Ancak, işlem var olan parçaları birleştirmenin aksine yeni bir parça üretimi veya onarımı olduğundan uygulama esnasında üretime yönelik ek düzenlemeler yapmak ve ekipmanlar kullanmak gereklidir.

TAEİ işlemi farklı kaynak yöntemleriyle uygulanabilmektedir. Gazaltı metal ark (MIG/MAG) [35], gaz tungsten ark (TIG) [36], plazma ark [37] ve MIG/MAG yönteminin gelişmiş bir türü olan soğuk metal transfer (CMT) [38] yöntemleriyle TAEİ işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Yakın zamanda gerçekleştirilen bir çalışmada bu yöntemlerin dışında tozaltı ark yöntemiyle de TAEİ işleminin uygulandığı görülmüştür [39]. Ancak bu yöntemdeki toz (fluks) konumlandırılması üretim esnekliğini sınırlandırmaktadır [40]. Şekil 2.9'da MIG/MAG yöntemiyle TAEİ işlemi uygulaması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9. TAEİ işlemi.

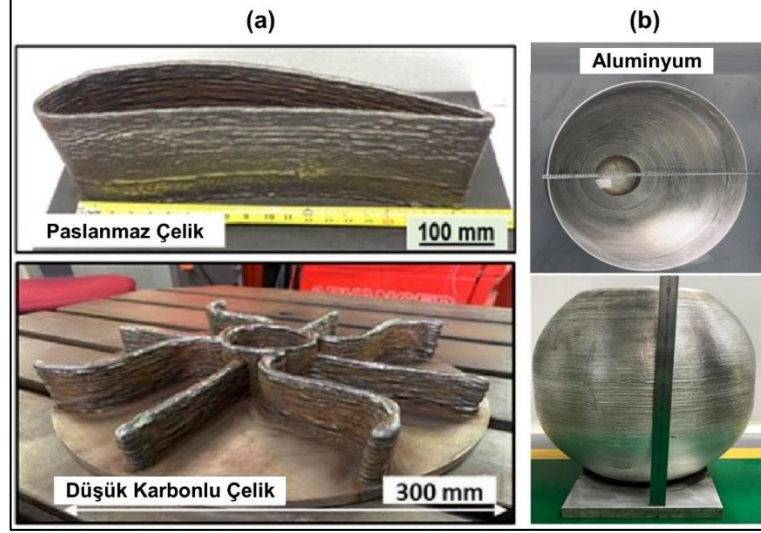
TAEİ işlemi temelde uygulanan kaynak türlerine göre değişen kaynak ekipmanları ve kaynak torcunun hareket etmesini sağlayan sistemlerin birlikte çalışmasıyla gerçekleşir. Torç hareketi bir CNC tezgahı [41], 3B yazıcı [42,43], robot kol [44] veya özel tasarlanan farklı bir makine tarafından sağlanabilmektedir. Şekil 2.10'da TAEİ işleminde kullanılan makineler gösterilmektedir (a) Robot kol [45], b) Kızaklı CNC (CNC Gantry) [37], c) CNC freze [46], d) 3B yazıcı [47] ve e) Özel bir makine [48]). Torç hareketinin ihtiyaca göre çeşitli ve birbirinden farklı makinelerle sağlanabilmesi TAEİ işlemini diğer yöntemlere göre üstün kılmaktadır. Ayrıca kaynak ünitelerinin genel olarak kolay temin edilebilmesi ve diğer metal Eİ yöntemlerinde kullanılan sistemlere göre daha ekonomik ve basit yapılı olması yöntemin uygulanabilirliğini de kolaylaştırmaktadır.



Şekil 2.10. TAEİ işleminde kullanılan makineler [37,45-48].

TAEİ işleminin en belirgin özelliği büyük ölçekli metal yapıları üretebilme kabiliyetidir. Metre boyutlarında ve yüksek kütleyle sahip parçaların 3B üretimi bu yöntemle mümkün olabilmektedir. Ayrıca malzeme biriktirme hızı diğer yöntemlere göre daha yüksektir. Bu bağlamda büyük ölçekli ve karmaşık şekilli metal parçalar

TAEİ yöntemiyle kısa süre içerisinde üretilebilir. Şekil 2.11’de bu yöntemle üretilmiş parçalar gösterilmektedir. TAEİ yöntemi yeni bir parça üretiminin yanı sıra bakım ve onarım işlemleri içinde kullanılabilir [49]. Bununla beraber yöntem var olan bir tasarımı güçlendirmek ve performansını artırmak amacıyla da tercih edilebilir [50].



Şekil 2.11. TAEİ yöntemiyle üretilmiş örnek parçalar a) [51] ve b) [52].

Diğer tel şeklinde hammaddeyle üretim yapılan yani lazer ve elektron ışını kullanılan metal Eİ yöntemleriyle kıyaslandığında TAEİ işlemi % 90’a yakın enerji verimliliği sağlar. Ayrıca malzeme kullanım verimliliği, parça üzerinde biriktirilen tel malzeme bakımından % 100 kadardır. Toz esaslı Eİ yöntemlerinde malzeme biriktirme oranı 10 g/dk civarında iken TAEİ yönteminde 10 kg/s oranlarına ulaşabilir. Bu bakımdan TAEİ yöntemiyle, metre ölçekli metalik parçalar yüksek biriktirme oranlarıyla nispeten ucuz, düşük malzeme ve ekipman maliyetiyle birlikte iyi yapısal bütünlüğe sahip bir şekilde üretilebilir [33].

2.2.1. TAEİ Yönteminin Üstünlükleri ve Sınırlamaları

TAEİ yönteminin diğer metal Eİ yöntemlerine göre belirgin üstünlükleri bulunmaktadır. Öncelikle, TAEİ işlemi ile diğer toz esaslı Eİ yöntemlerinde mümkün olmayan büyük ölçekli parçalar üretilebilir. TAEİ ile daha fazla hareket serbestliğine sahip ve daha uzaklara ulaşabilen üretim sistemleri kullanılarak bu durum sağlanabilir. TAEİ yönteminde kullanılan metal teller hammaddesi toz olan Eİ yöntemlerine göre

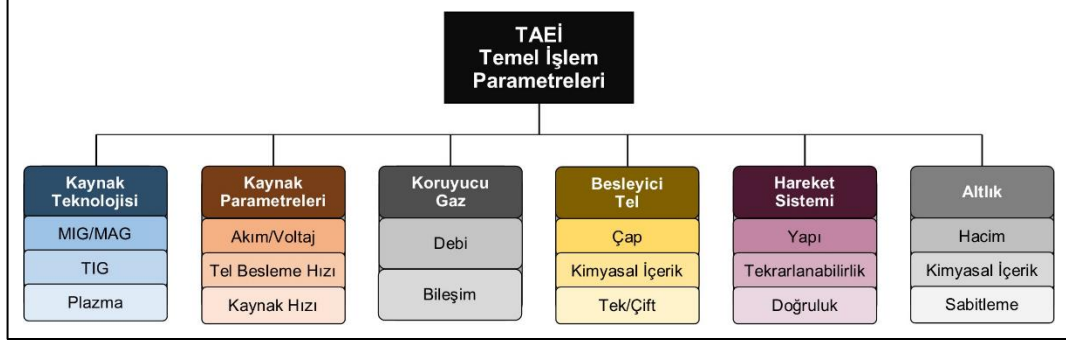
çok daha ucuzdur. Ayrıca metal tellerin saklanması ve bulundurulması özel koruyucu önlemler gerektiren tozlara göre daha kolaydır. Yöntemin kaynak esasına dayanması sebebiyle, piyasada daha kolay bulunan ve maliyeti az olan kaynak ekipmanlarıyla uygulanması da bir avantajdır. Geleneksel metal eksiltme yöntemlerinin aksine, TAEİ yönteminde malzemenin istenilen yerde katman üzeri katman şeklinde biriktirilmesi hem malzeme maliyetini azaltır hem de malzeme tasarrufu sağlar. Yöntemin tamir onarım amacıyla uygulanabilmesi hasarlı veya eskimiş bir parçanın tekrar kullanımına olanak sağlayarak yeni bir parça üretiminin önüne geçilir ve böylece ekonomiklik sağlanmış olur. Ayrıca TAEİ yöntemiyle üretilen parçalar geleneksel yöntemlerle üretilenlere göre kayda değer yüksek mekanik özellikler gösterebilmektedir [53].

TAEİ işleminin birçok avantajı olmasına rağmen bazı sınırlamaları da bulunmaktadır. Diğer metal Eİ yöntemleriyle kıyaslandığında temel dezavantajı boyutsal doğruluğunun az olması ve zayıf yüzey bitimidir. Bu yüzden fonksiyonel gereklilikleri sağlamak için üretim sonrası talaşlı imalat işlemi zorunludur [54]. Bununla beraber diğer metal Eİ tekniklerine göre TAEİ yüksek ısı girdisi ve düşük soğuma oranlarıyla gerçekleşir [40]. TAEİ işleminde uygun ısı yönetimi stratejisi uygulanmadığı zaman yüksek ısı girdisinden dolayı parçalarda boyutsal sorunlar, mikroyapı sorunları, distorsiyon ve kalıntı gerilme gibi istenmeyen hatalar meydana gelebilir [55]. Çok yüksek ısı girdisinin bir başka olumsuz yanı; malzeme yığılma işleminde pasolar arası bekleme zamanını arttırması ve bunun da üretim süresini uzatmasıdır [56]. Ayrıca bazı durumlarda TAEİ işlemi esnasında tekrarlı biriktirme işlemlerinden dolayı karmaşık termal gerilme dağılımları oluşarak parça bünyesinde yüksek kalıntı gerilmeler ve sonrasında çatlak oluşumu görülebilir [57]. Bunların yanı sıra malzeme biriktirme işlemi esnasında entegre olarak işlem sürecini izleme ve kontrolü zordur [58]. Bahsedilen bu durumlar üretim esnasında veya sonrasında farklı işlemler uygulanarak azaltılmakta veya giderilebilmektedir.

2.2.2. TAEİ Temel İşlem Parametreleri

TAEİ üretim sistemi temel olarak kaynak ünitesi ve ekipmanlarıyla beraber kaynak torcunun hareket etmesini sağlayan makine donanımlarından oluşmaktadır. Dolayısıyla işlem parametreleri öncelikle direkt olarak kaynak işleminde uygulanan

tüm parametrelere bağlıdır. Uygulanan kaynak yöntemine göre bu parametreler de değişiklik göstermektedir. TAEİ işlemi için diğer önemli parametre ise torç hareketinin gerçekleştiği makinelerin hareket sistemidir. Şekil 2.12’de TAEİ işlem parametreleri şematik olarak gösterilmiştir [59].



Şekil 2.12. TAEİ temel işlem parametreleri [59].

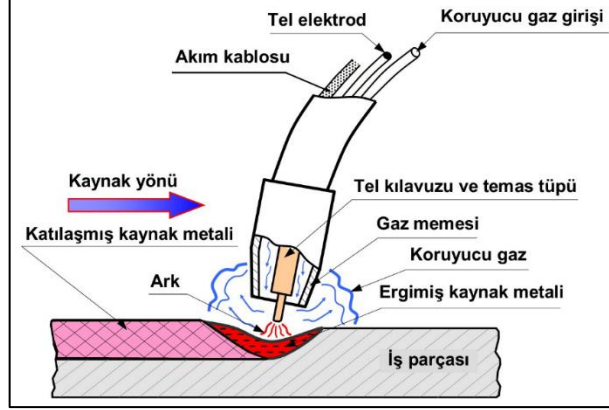
2.2.2.1. Kaynak Teknolojisi

TAEİ işlemi için uygulanan kaynak teknolojileri genel olarak MIG/MAG, TIG ve plazma ark olarak sıralanmaktadır. Yöntem seçimi kullanıcı uygulamalarına göre farklılık göstermektedir. Yüksek birikim oranları istendiği zaman TIG yerine MIG/MAG yöntemi tercih edilmektedir. Ancak kalite ve işlem kararlılığında düşüş görülebilir [59]. TIG yöntemi MIG/MAG yöntemine göre kaliteli, daha az sıçrıntı ve kirlilik içeren üretimler gerçekleştirilebilir. Ancak bu yöntemde ark uzunluğunun stabilitesini sağlamak zordur. Ark uzunluğunda meydana gelen birkaç mm boyutunda değişimler kaynak kalitesini düşürür ve bazı hatalara yol açabilir [60]. Plazma ark kaynağı yüksek kalite, daha az distorsiyon ve yüksek hızlara imkan veren yüksek enerjili elektrik yoğunluğuna sahiptir. Ancak bu yöntem daha fazla kurulum maliyeti gerektirir [59].

MIG/MAG Yöntemi

Bu yöntem arkın sürekli tüketilen bir elektrod tel ile kaynak yapılan metalin arasında oluşturulduğu bir birleştirme işlemidir. TAEİ işleminde en fazla kullanılan yöntemdir [61]. Yüksek birikim oranları, kolay otomatikleştirme ve diğer kaynak yöntemlerine

göre düşük maliyette daha iyi kaynak kalitesi sağlaması önemli avantajlarındandır [62]. Yöntemin uygulama prensibi Şekil 2.13'te şematik olarak gösterilmektedir.



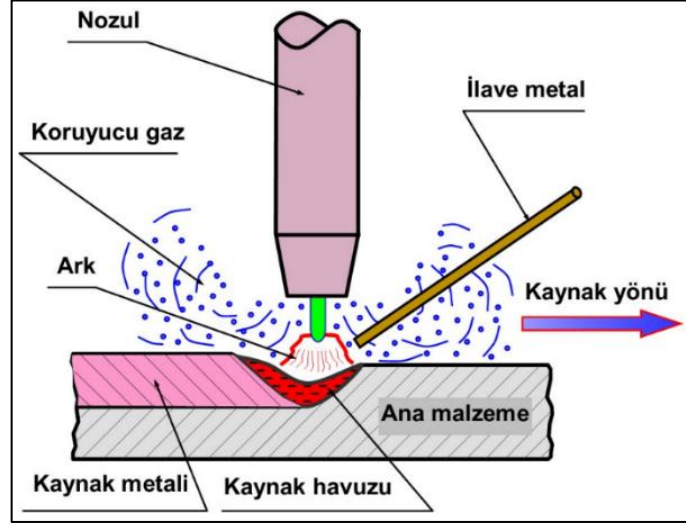
Şekil 2.13. MIG/MAG kaynağı prensibi [63].

Soğuk metal transfer (CMT) yöntemi MIG/MAG yönteminin modifiye edilmiş bir biçimidir. Bu yöntemde tel geri çekme mekanizması bulunmaktadır. Bu şekilde kullanımla tam yüzey gerilimi damlacık transferi ve temas ucu çalışma mesafesi geniş dinamik aralıkta çalışır. Böylece düşük ısı girdisini sağlanmış olur [44]. MIG/MAG yöntemine kıyasla CMT tekniğinde damlacık ayırımında neredeyse sıfır çıkış akımı sağlanır ve böylelikle ısı girdisi önemli derecede azaltılır [64]. CMT yönteminin sunduğu avantajlar sayesinde son zamanlarda TAEİ işleminde kullanımının yaygınlaştığı görülmektedir. Özellikle alüminyum alaşımlarının Eİ işlemi için tercih edilen bir yöntem durumundadır.

TIG Yöntemi

Bu yöntem ergimeyen elektrod olarak tanımlanan tungsten tarafından oluşturulan ark ile gerçekleşir. Şekil 2.14'te yöntemin uygulama prensibi gösterilmektedir. TIG yöntemi yüksek ark kararlılığı ve göz ardı edilebilir bir sıçrama gösterir [65]. TAEİ işleminde TIG yöntemi kullanıldığı zaman ekstra tel ile besleme yapılması gerekir. Çünkü bu yöntemde MIG/MAG tekniğinde olduğu gibi sürekli tel besleme bulunmamaktadır. Harici olarak tel besleme işleminin yapılması ekstra sistem kurulumu ve tasarım işlemleri gerektirmektedir. Besleyici telin harici olarak verilmesi TAEİ işleminde göz önüne alınması gereken işlem parametrelerini artırmaktadır.

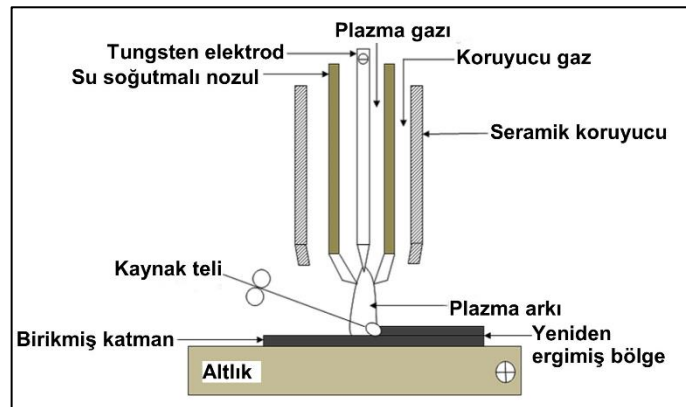
Örneğin tel besleme açısı ve tel-elektrod mesafesi gibi etkenler üretim işlemlerini direkt olarak etkilemektedir.



Şekil 2.14. TIG kaynağı prensibi [63].

Plazma Ark Kaynak Yöntemi

Plazma ark kaynak yöntemi geleneksel TIG kaynak yöntemine dayalı olarak geliştirilmiş bir kaynak tekniğidir. Metal ergitme işlemi özel olarak tasarlanan torç tarafından plazma arkının oluşturulmasıyla gerçekleştirilir [66]. Şekil 2.15'te plazma ark kaynağı işlemi şematik olarak gösterilmektedir [67].



Şekil 2.15. Plazma ark kaynağı prensibi [67].

2.2.2.2. Kaynak Parametreleri

Kaynak Akımı/Voltajı

Akım/voltaj ark gücünün kontrol edildiği parametrelerdir. Ark kaynak işleminde arkin dinamik davranışından dolayı akım/voltaj sürekli değişmektedir. Akım, dolgu ve altlık malzemesinin ergime oranını mutlak olarak etkilemektedir. Voltaj ise ark boyunu ve kaynak akımını etkiler. Genellikle, TIG ve plazma kaynağında sabit akımlı güç kullanılırken, MIG/MAG kaynağında ise sabit voltajlı güç kullanılmaktadır [68].

Ark kaynak işleminde oluşan ısı miktarı kaynak kesit alanı, nüfuziyet, soğuma hızı kaynak yapısı ve özellikleri ve kusur oluşum eğilimi gibi kaynak sonucunu etkileyen ana parametredir. Isı miktarı ise kaynak akımı ile doğrudan ilişkilidir [69]. Kaynak işleminde verimliliği artırmak için yüksek akım seçilebilir. Ancak yüksek kaynak akımı, yükselti (weld hump), yanma oluşu, dikiş ayrılması, paralel yükselti, tünel gözenekliliği gibi kaynak kusurlarının oluşma ihtimalini artırır [70]. Bu sebeple akım/voltajın yapılacak işlem türüne göre uygun değerde seçilmesi üretim işlemleri için daha doğru olacaktır. Bu parametre değerleri genellikle belirli parametre aralıklarında ön çalışmalar yapılarak seçilmektedir.

Tel Besleme Hızı

Tel besleme hızı veya oranı olarak ifade edilen bu parametre birim zamanda kaynak bölgesine gönderilen tel miktarını ifade etmektedir. Tel miktarı uzunluk birimiyle ifade edilmektedir. Örneğin MIG/MAG kaynak ünitesinde tel besleme hızı genellikle 2-18 m/dk arasında değişmektedir. MIG/MAG yönteminde kaynak akımı tel besleme hızına bağlı olan bir değişkendir. Bu yöntemde kaynak akımı genel olarak tel besleme hızı ile ayarlanır. Tel besleme hızı arttıkça kaynak akımı da artar. Günümüzde yeni tip üretilen MIG/MAG makinelerinde akım ayarlanabilen sistemler de bulunabilmektedir. TIG yönteminde ise tel besleme işlemi harici yapıldığından, tel besleme hızı kaynak ünitesinden bağımsız olarak ayarlanır ve akım/voltaj değerleriyle direkt olarak MIG/MAG yöntemindeki gibi bir ilişkisi yoktur.

Tel besleme hızının artmasıyla nüfuziyet derinliğinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca dikiş yüksekliği de birim zamanda biriktirilen tel miktarı arttığı için artmaktadır [71]. Yüksek tel besleme hızlarında daha düşük seyrelme görülür [72]. Dolayısıyla bu parametre kaynak boyutunu ve morfolojisini etkilemektedir [73]. İyi ark kararlılığı, iyi metal transfer koşulları altında özellikle tel besleme ve hızı tel erime hızı ile tam olarak eşleştiğinde elde edilir [74].

Kaynak Hızı

TAEİ işleminde genellikle hareket hızı [75-77] olarak tanımlanan bu kavram kaynak ilerleme hızı [78], kaynak hızı [79] ve malzeme biriktirme hızı [80] terimleriyle de ifade edilmektedir. Kaynak hızı, kaynak torcunun üzerinde bağlandığı aparatla birlikte üretim işlemi esnasında hareket ettiği önceden belirlenmiş ortalama hızdır. Bu kavram benzer şekilde torç hızı [81] olarak da kullanılabilir.

Kaynak hızı kaynak dikişinin birim uzunluğu başına düşen toplam ısı girdisini ve bu yüzden dikiş geometrisini önemli derecede etkilemektedir. Örneğin, kaynak hızının artmasıyla birim uzunluk başına düşen ısı girdisi azaldığından kaynak havuzunun kesit alanı da azalır ve böylelikle kaynak havuzu geometrisi etkilenmiş olur [69]. Kaynak hızı dikiş genişliği ve nüfuziyet derinliğini etkilemektedir [82]. Ayrıca mikroyapıdaki tane dizilimini ve boyutları da kaynak hızına göre değişebilmektedir [76]. Bu durumun kaynak hızına bağlı olarak değişen ısı girdisi ve soğuma hızından kaynaklandığı düşünülebilir.

Kaynak akım ve voltajının da dikiş geometrisinin oluşumunda payı bulunmaktadır. Ancak düzenli dikiş yüksekliği ve genişliği elde etmede en etkili parametre kaynak hızıdır [83]. Kaynak hızının yükselmesiyle TAEİ işleminde parça üretiminin daha hızlı gerçekleşmesi muhtemeldir. Ancak beklenen dikiş geometrisi boyutlarını (yükseklik, genişlik) metalürjik ve mekanik özelliklerini sağlamak için kaynak hızı, diğer kaynak parametreleriyle uygun bir değer aralığında seçilmesi gerekir. Bu işlem çoğu zaman pilot çalışmalarla belirlenir. Uygun ön çalışma değerlerinin belirlenmesinin ardından esas üretim işlemlerine geçilir.

Isı Girdisi

Nominal akım, tel besleme hızı ve kaynak hızı parametreleri, TAEİ işleminde termal profili ve dolayısıyla malzeme özelliklerini, boyutsal durumu ve altlığın ıslatılabilirliğini etkileyen unsurlardır. Isı girdisi: (kaynak gerilimi x kaynak akımı / kaynak hızı) olarak hesaplanmaktadır [59]. Optimum ısı girdisi TAEİ işlemi ile üretilen parçada daha iyi mikroyapı ve mekanik özelliklerin oluşmasını sağlar. Isı girdisindeki azalma ile üretilen parçanın geometrik doğruluğu ve malzeme yığılma oranı iyileşmektedir. Bu durumda kaynak havuzunun yayılması daha kısa sürede gerçekleşir ve böylece kaynak dikişi genişliğinin yüksekliğe oranı düşük ısı girdisinde daha küçük olur. Bu nedenle TAEİ ürünlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için işlem parametrelerinin ve malzeme bileşiminin etkisini göz önünde bulundurarak optimum ısı girdisini bulmak faydalı olacaktır [84].

2.2.2.3. Koruyucu Gaz

TAEİ işlemi genellikle gazaltı kaynak yöntemleriyle ya da gaz kullanan diğer yöntemlerle gerçekleştirildiği için koruyucu gaz kullanımı yüksek önem arz eder. Koruyucu gazlar kaynak işlemi süresince ergiyen metali kaynak hatalarına da sebep olan atmosferik kirliliklerden korumada büyük bir öneme sahiptirler [85]. Koruyucu gaz, ark kararlılığı ve elektrod ergime oranını etkiler [86]. Bunun yanı sıra bu gazlar kaynak şeklini, geometrisini, dikiş görünümünü, metalurjik ve mekanik özelliklerini, kaynak hızını, metal transferini ve ark stabilitesini etkiler [87]. Özellikle titanyum ve alaşımları gibi oksijene duyarlılığı yüksek olan metallerin kaynak işlemi sırasında standart uygulamanın dışında ekstra koruyucu gaz ile korunması gereklidir. Ekstra koruyucu gaz kullanımı bazı durumlarda zorunlu olduğu gibi, zorunlu olmayan kullanımlarda ise önemli faydalar sağlamaktadır. Örneğin, yapılan bir çalışmada ekstra koruyucu gaz kullanımının kaynaklı bağlantının çekme, sertlik ve tokluk gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği ve kararlı yapı oluşturduğu sonucuna varılmıştır [88].

Koruyucu Gaz Debisi

Koruyucu gaz debisi birim zamanda kaynak bölgesine gönderilen gaz hacmi (L/dk) olarak ifade edilir. İstenilen kaynak kalitesini elde etmek için koruyucu gaz debisi yeterli miktarda ayarlanmalıdır. MIG/MAG kaynağında genellikle 15-20 L/dk aralığında bir koruyucu gaz debisi kullanılır. Kaynakçılar bazen bu değeri 36 L/dk'ya çıkarabilmektedir. Koruyucu gazın bu şekilde kullanımı aşırı israfa, çevreyi kirletmeye ve kaynakta türbülans oluşturduğu için gözenekli bir yapının oluşmasına neden olur [89]. Ayrıca yüksek gaz debileri zayıf bir nüfuziyete sebebiyet verir [59]. Düşük değerlerde ise yetersiz ergimeden kaynaklı hatalar görülebilmektedir [90].

TAEİ işleminde bir parçanın üretilme süresince koruyucu gaz sürekli olarak kullanılmaktadır. Bu durum üretim maliyetlerinde önemli bir etkiye sahiptir [91]. Ekonomik bir üretim işlemi gerçekleştirmek için gaz sarfiyatının uygun seviyede tutulması gerekmektedir.

Koruyucu Gaz Kimyasal Bileşimi

Koruyucu gazın kimyasal içeriği kaynak işleminde önemli bir rol oynamaktadır [92]. Kullanılan kaynak yöntemine ve üretim işlemi yapılacak malzemeye koruyucu gaz içerikleri değişebilmektedir. Seçilen koruyucu gazın tamamı tek tip elementten olabileceği gibi birden fazla element içerip karışım gazları olarak da kullanılabilir. Örnek vermek gerekirse; paslanmaz çeliğin TIG kaynağında % 99,99 Ar, düşük karbonlu çeliğin MAG kaynağında % 90 Ar ve % 10 CO₂ içeren karışım gazı kullanılabilir. Koruyucu gazın kimyasal bileşimi kullanılacak tel malzemesinin türüne göre uygun seçilmezse (uygun kimyasal gaz bileşimi genellikle tel üreticilerin kataloglarında yer almaktadır) doğru kaynak işlemi olmaz ya da hatalı üretim gerçekleşmiş olur.

Kaynak işlemi esnasında koruyucu gazın kimyasal bileşimi damlacık transferini ve kaynak oluşumunu son derece etkilemektedir [93]. Ayrıca kaynak işlemi esnasında soğuma hızını etkilemekte ve bu yüzden mikroyapıyı değiştirebilmektedir [94].

Mikroyapının değişmesi mekanik özellikleri de doğrudan etkileyeceğinden koruyucu gazın kimyasal bileşimi TAEİ işlemi için önemli bir unsurdur.

2.2.2.4. Besleyici Tel

TAEİ işleminde kullanılan besleyici teller genel olarak piyasada kaynaklı birleştirme işlemlerinde kullanılan tellerden oluşmaktadır. Üretim işlemi sonrası elde edilen parçanın özellikleri direkt olarak kullanılan telin malzemesine bağlıdır. Tel çapı, kimyasal bileşimi ve üretimde kullanılma biçimi (tek/çift) üretim sürecini ve son ürünü etkileyen parametreler arasında yer almaktadır.

Tel Çapı

Genellikle büyük çaplı teller ergimenin sağlanması için daha yüksek akıma ihtiyaç duyarlar. Aynı akım değeri için daha küçük çaplı tel kullanılması akım yoğunluğunu artırır ve erime katsayısı daha fazladır. Küçük çaplı teller hem kısa hem de uzun elektrik arkı için arkta daha fazla sayıda damlacık iletimini sağlar. Artan damla sayısı ile daha fazla yüzey düzgünlüğü elde edilir. Uygun tel çapının seçimi nihai ürüne ve boyutlarına bağlıdır. Bunun yanı sıra çevre koşulları ve iş yükünün seviyesi de önemlidir [95]. TAEİ işleminde genellikle 0,8, 1,0 ve 1,2 mm'lik tellerin kullanıldığı görülmektedir.

Kullanılan tel çapının büyük olması TAEİ süresince yığılan malzeme miktarının artmasını sağlamaktadır. Biriktirilen malzeme oranının artması kaynak dikişlerinin genişliğinin ve yüksekliğinin artması anlamına gelmektedir. Büyük yapıların Eİ işlemi için büyük çaplı tel kullanımı bu bakımdan avantaj sağlamaktadır.

Tel Kimyasal İçeriği

TAEİ işleminde üretilecek olan parçaların malzeme türünü ve özelliklerini etkileyen en önemli unsur kullanılan besleyici tellerin kimyasal bileşimidir. Kimyasal içerik sadece son ürünün fiziksel, kimyasal, mekanik ve metalürjik özelliklerini etkilemekle

kalmaz aynı zamanda kaynak prosesini, kaynak havuzu oluşumu gibi temel üretim unsurlarını da direkt olarak etkilemektedir.

Tel hammaddesinin sahip olduğu kimyasal içerik bünyesinde barındırdığı % element miktarları tarafından tanımlanmaktadır. Piyasada bulunan kaynak teli üreticileri bu içerikleri katalog halinde sunmaktadırlar. Ayrıca satın alınan tel kutularının üzerinde veya tel makaralarının üzerinde bulunan etikette içerik hakkında bilgiler verilebilir. Bu teller genellikle standartlar kapsamında üretilmektedirler. Bu bakımdan farklı üreticilerden alınan aynı tür besleyici tellerin içerdikleri % element miktarları birbirine çok yakındır.

Tel Besleme Biçimi Tek/Çift

Kaynak işleminde yüksek enerjide ark oluşumunun sağlanabilmesi sayesinde üretim işlemlerinde tek telin yanı sıra ikili telin ergitilmesi mümkün olabilmektedir. Birden fazla telin ergitilmesi malzeme yığılma oranının artmasını sağlamaktadır. Farklı malzemeli iki tel kullanımı ise alaşım içeriği farklı olan üretime olanak vermektedir.

2.2.2.5. Hareket Sistemi

TAEİ işlemlerinde kaynak torcu ve altlık arasında gerekli bağıl hareketi sağlamak için kartezyen (doğrusal XYZ), 5 eksenli/eklemlili robotik kol ve paralel kinematik makineler kullanılmaktadır. Ark uzunluğunun ve telin görece konumunun ısı girdisi ve kaynak dikişi dinamikleri üzerindeki önemi nedeniyle, konumsal tekrarlanabilirlik ve doğruluk, kaynağın geometrik, fiziksel ve malzeme özelliklerini etkiler. Hareket sistemindeki daha az doğruluk TAEİ ile üretilmiş parçada daha fazla son işlem gerektireceği için üretimin uygun maliyetle gerçekleşmesini olumsuz etkiler. Kartezyen sistemler tipik olarak eklemlili robot kol sistemlerinden daha sağlam ve doğrudur. Ancak, robotik sistemler malzemenin düzenli bir şekilde yığılması şeklinde birikmesine sebep olabilecek keskin köşelerde hız düşürmeye daha yatkındır. Bununla birlikte, eklemlili robotik sistemler, manevra kabiliyetleri ve isteğe bağlı paralel çalışmaları nedeniyle çok büyük yapıları üretebilme potansiyeline sahiptir.

Ayrıca, robotik sistemlerle düşük doğruluğa rağmen yüksek tekrarlanabilirlik elde edilebilir [59].

Robotik sistemlerinin bahsedilen avantajlarına karşın ekipman ve parçalarıyla beraber kendisinin maliyetli olması ve kullanımının daha fazla kalifiyeli iş gerektirmesi bir olumsuz durum oluşturabilmektedir. Buna karşın ekonomiklik ve yapılacak işin büyüklüğü düşünüldüğünde, TAEİ işlemleri için kartezyen çalışan 3B yazıcı veya CNC tezgahı gibi daha az maliyetli makinelerin tercih edilmesi faydalı olabilmektedir.

2.2.2.6. Altlık

TAEİ işleminde malzeme yığıma altlık olarak tanımlanan metal plaka üzerinde gerçekleşir. Altlık malzemesinin kimyasal bileşiminde esas olarak bulunan en yüksek yüzde içeriğe sahip element ile üretimde kullanılan metal telin içerdiği esas element genellikle aynıdır. Bu durumda üretilen parçanın kimyasal bileşimi ile metal telin içeriğinin yakın olması sağlanır. TAEİ işlemi süresince sürekli olarak ısı girdisi olduğu için altlık olarak kullanılan plaka çarpılma ve distorsiyonlardan en az etkilenecek şekilde üretimde bulunmalıdır. Bu durumu sağlamak için genellikle büyük boyutlarda kalınlığı yüksek plakalar kullanılmaktadır. Ayrıca üretime başlamadan önce altlığın hareket esnasında yerinden oynamaması ve ısıl genleşmelerden dolayı konumunun bozulmaması için çalışma tablasına sıkıca sabitlenmesi gereklidir. Eğer üretim esnasında altlıkta şekil değişimi meydana gelirse bu durum zincirleme olarak malzeme yığılan katmanlara da yansıtacak ve son ürünün geometrisi istenilen özellikleri karşılamayacaktır.

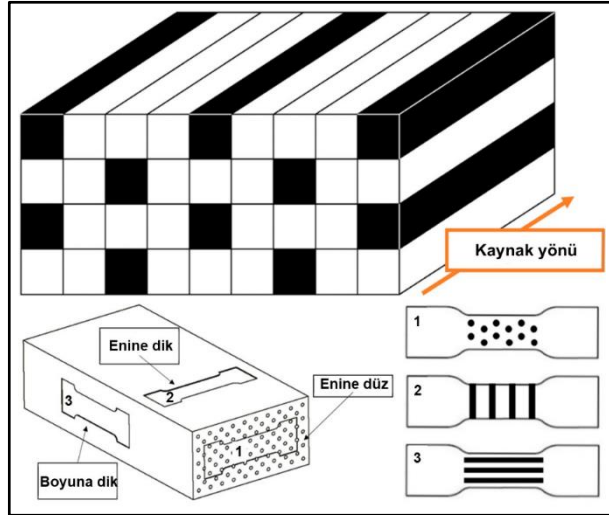
2.2.2.7. Diğer Parametreler

Yukarıda bahsedilen parametreler bir TAEİ işleminde önemli olan, üretim süresince ve son ürünün sonuçlarını direkt olarak etkileyen temel parametrelerdir. Bunların yanı sıra torç açısı, ark uzunluğu ve ark mesafesi gibi üretimi etkileyecek diğer parametrelerde bulunmaktadır. Özellikle harici olarak tel besleme işleminin gerçekleştiği TIG kaynak esaslı Eİ işleminde kullanılan elektrod tipi ve çapı, elektrod bileme açısı, elektrod-altlık açısı, elektrod-tel açısı, elektrod-tel mesafesi, elektrod-

parça mesafesi, tel-altlık mesafesi ve kaynak yönü yukarıdaki parametreler gibi üretimi direkt olarak etkilemektedir. Bunlara ek olarak ark modu; tek, pulse ve double pulse gibi parametrelerde TAEİ işlemini etkileyen ikincil parametreler olarak sıralanabilir.

2.3. NİTELİKLİ/FONKSİYONEL PARÇALAR VE ÜRETİMİ

Nitelikli parça terimi; farklı malzeme özelliklerini sağlayabilen ve bu şekilde işlevselliği artırılan parça anlamını taşımaktadır. Bu parçalar genellikle farklı özelliklere sahip birden fazla hammaddenin çeşitli üretim işlemlerinde bir arada kullanılıp üretimiyle elde edilmektedir. Çalışma ortamlarına göre mühendislik parçalarının, değişen kısımlarında farklı malzeme özelliklerine sahip olması gereken durumlar bulunabilmektedir. TAEİ işleminde nitelikli parça üretiminde; bimetal (iki metalli) [96,97], fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler (FDM) [98], (functionally graded materials) [99-101] ve çoklu malzemeler (multi materials) [102] terimlerinin kullanıldığı görülmektedir. Şekil 2.16'da TAEİ işleminde yapılan FDM üretimi örneği gösterilmiştir.



Şekil 2.16. TAEİ işleminde gerçekleştirilen FDM üretimi [102].

FDM terimi ilk olarak 1984 yılında Japonya'da ısı bariyer kaplaması çalışmalarından ortaya çıkmıştır [103]. Yakın yıllarda yapılan çalışmalara bakıldığında [104-106], Eİ teknolojisinin kullanımının artması, araştırılması ve farklı yönlerinin benimsenmesiyle

FDM'nin Eİ işlemleri kapsamına girdiği görülmektedir. Eİ yönteminin sunduğu avantajlar, FDM yapıları parça üretimine olanak tanıdığı görülmüştür [107]. Farklı tür üretim yöntemleriyle örneğin; farklı malzemelerin geleneksel kaynak teknikleriyle kaynağı, patlamalı kaynak ve santrifüj döküm gibi imalat yöntemleriyle çoklu malzeme özelliğine sahip basit geometrilik parçalar üretilebilmektedir. Ancak bu yöntemler karmaşık geometrilik ve çoklu işlevsel özelliğe sahip parçalar üretimi konusunda yetersizdir [108]. Ayrıca, geleneksel imalat yöntemleriyle FDM üretimi birçok araç-gereç ve montaj işlemlerine ihtiyaç duyduğundan zaman alıcıdır. Eİ işlemi bu bakımlardan yığın FDM parçalarının üretimi konusunda yeni bir teknik olmaya başlamıştır [109]. FDM'ler havacılık sanayisinde, nükleer güç istasyonunda ve değişen malzeme özelliklerinin istendiği aşırı koşullarda çokça tercih edilirler [110].

Eİ yönteminin sunduğu avantajlar sayesinde tek bir malzeme kullanarak fakat üretim esnasında değiştirilen işlem parametreleriyle katmanlar arasında farklı mikroyapıları oluşturma şeklinde yapılan nitelikli üretimlerde bulunmaktadır [111]. Buna ek olarak boşluklu yapılar ve katmanlara göre boşluk oranının değişiminin sağlandığı üretimlerde, tek malzeme ile yapılan nitelikli üretimlere bir örnektir [112].

FDM hacim boyunca bölgesel çeşitlilik ile karakterize edilen ve işlevsel gereksinimler doğrultusunda malzeme özelliklerinde karşılık gelen değişikliklere katkıda bulunan gelişmiş bir malzeme sınıfıdır. Bir parçanın çok işlevsel durumu, istenilen performans gereksinimleri karşılamak için mikroyapıdaki malzeme yerleşiminin düzenlenmesi yoluyla uygulanır. Mikroyapısal derecelendirme malzemenin özellikleri arasında yumuşak bir geçiş katkıda bulunur [112]. FDM'lerin hacim fraksiyonundaki ve homojen olmayan yapısındaki kompozisyonların kademeli değişimi; sertlik, korozyon direnci, termal iletkenlik ve spesifik ısı gibi özelliklerinin değişmesini sağlar [99]. Yeni üretilecek veya var olan parçalara ikincil metalik faz eklenerek ve bu fazların miktarları kontrol edilerek metal malzeme özellikleri değiştirilebilir [113]. Fiber ve matris malzeme sınırı özellik geçişini kesin bir şekilde sürdüren geleneksel fiber takviyeli termoplastik kompozit malzemelerle kıyaslandığında FDM, malzeme özellikleri bakımından yumuşak geçiş sunmaktadır. Bu durum deliminasyon (tabakaların ayrılması) gibi bölgesel hataların azalmasına katkıda bulunur [25].

Geleneksel FDM üretim teknikleri 4 grup altında incelenebilir. Bunlar, Gaz esaslı yöntemler (kimyasal buhar biriktirme/emdirme), sıvı faz işlemleri (santrifüj döküm, lazer biriktirme, yönlü katılaştırma), katı faz yöntemleri (kıvılcım plazma sinterleme, sıcak presleme, toz metalürjisi) ve biyopolimetrik esaslı yöntemler (dondurarak kurutma, basınçla kalıplama, elektro lif çekme) olarak sıralanabilir [114].

2.4. YORULMA

Yorulma, bir makine elemanının tekrarlı veya değişken yüklere maruz kalıp, üzerine akma sınırının altında dahi meydana gelen gerilmeler altında hasara uğrayarak kırılması olarak tanımlanabilir [115]. Yorulma kavramı, hasarın genellikle uzun süreli tekrarlanan gerilme veya şekil değişimi sonucunda oluşmasını ifade etmektedir. Metallerde meydana gelen hasarların yaklaşık % 90'ı yorulmayla gerçekleşmektedir. Yorulmada hasar gevrek kırılmaya benzer bir şekilde meydana gelir. Sünek malzemelerde bile plastik deformasyon oluşmaz veya çok az miktarda oluşur [116]. Yorulma hasarı tamamen aniden gerçekleşir ve birçok statik hatalar gibi önceden görünür bir uyarı vermez. Hasar, sırasıyla çatlak başlangıcı, çatlağın ilerlemesi ve malzemenin kopma/kırılması şeklinde oluşur [115].

Malzemelerin yorulma davranışlarını belirlemek için uygulanan gerilme biçimine göre farklı yorulma deneyleri yapılmaktadır. Bu biçimlere göre de test makinaları ve deneyin yapılışı değişebilmektedir. Deney numunesine uygulanan yükleme türleri aksenal çekme-basma, eğilme ya da burulma şeklinde olabilmektedir [117]. Bu yüklemelerin her ikisinin birlikte uygulandığı bileşik gerilmeli yorulma testleri de mevcuttur [118].

Yorulma dayanımını belirlemek için genel olarak Wöhler yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde, boyutsal ve yüzey kalitesi olarak aynı olan numuneler, aralıksız olarak belirlenen farklı şiddetlerde zorlanarak kırılmanın gerçekleştiği çevrim sayıları hesaplanır. Yorulma dayanımını bulmak için deneysel çalışmalarda genellikle 6-10 adet numune kullanılmaktadır [119]. Bazı kaynaklarda bu sayının 8-12 olduğundan bahsedilmiştir [120]. Yorulma testlerinde amaç, uygulanan gerilme sonucunda malzemenin kırıldığı çevrim sayısına ulaşmaktır. Genellikle ilk test numunesi

malzemenin akma dayanımına yakın bir değere yaklaşan gerilmeye maruz bırakılır, daha sonra giderek azalan gerilme genliği uygulanarak malzemenin dayanım sınırı bulanana kadar deneyler devam ettirilir. Testler sonucunda y ekseninin gerilme genliğinden, x ekseninin ise çevrim (döngü) sayısından oluştuğu Wöhler adı verilen grafik elde edilir [119].

2.4.1. Yorulma Testleriyle İlgili Bazı Kavramlar

Yorulma konusunda yapılan çalışmalar ve deneylerde genellikle bahsedilen kavramlar aşağıda açıklanmıştır.

Maksimum Gerilme (σ_{max}): Yorulma testinde malzemeye uygulanan en yüksek gerilme değeridir.

Minimum Gerilme (σ_{min}): Yorulma testinde malzemeye uygulanan en düşük gerilme değeridir.

Ortalama Gerilme (σ_m): En yüksek gerilme değeri ile en düşük gerilme değeri toplamının yarısıdır.

Gerilme Aralığı (σ_r): Maksimum gerilme ile minimum gerilme arası farktır.

Gerilme Genliği (σ_a): Maksimum gerilme ile minimum gerilme arası farkın yarısına eşittir. Diğer bir tanımla gerilme aralığının yarısıdır.

Gerilme Oranı (R): Minimum gerilme değerinin maksimum gerilme değerine bölümüdür.

Çevrim: Gerilme-zaman diyagramında periyodik bir şekilde tekrarlanan en küçük parçadır [118].

Düşük Çevrimli Yorulma: Akma sınırının üstünde, 10^5 'ten daha düşük çevrim sayılarında gerçekleşen yorulmadır. Düşük çevrimli yorulma testi numunenin uzama büyüklüğünün kontrol edilmesi şeklinde uygulanmaktadır [121].

Yüksek Çevrimli Yorulma: Akma sınırının altındaki değerde gerilme büyüklüğünün kontrolüyle uygulandığı 10^5 'ten daha büyük çevrim sayılarında gerçekleşen yorulmadır. Düşük çevrimli yorulma testine kıyasla daha uzun sürelerde gerçekleşir [121].

Yukarıda bahsedilen kavramlar genel olarak yorulma testleri için girdiği niteliği taşımaktadır. Bunların dışında yorulma testi sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılan diğer kavramlar ise aşağıda açıklanmıştır.

Yorulma Ömrü:

Malzemeye uygulanan tekrarlı belirli yük altında hasara maruz kalmadan dayanabileceği en yüksek çevrim sayısını ifade etmektedir [120].

Yorulma Sınırı:

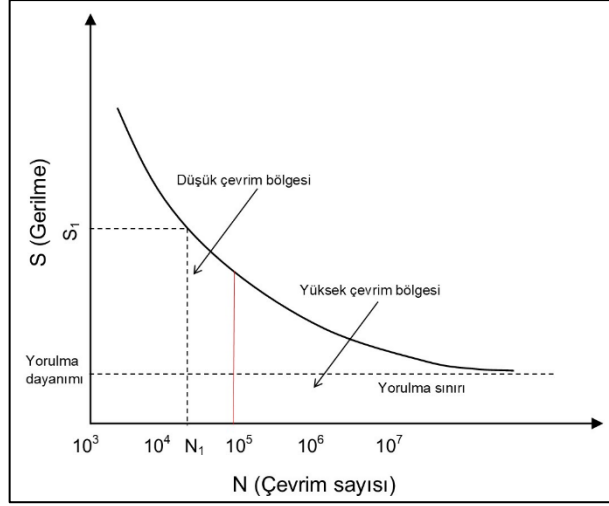
Wöhler grafiğinde sonsuz çevrimde kırılmanın olmadığı en yüksek gerilme genliğidir. Birtakım çelik grubunda $10 \cdot 10^6$, ağır ve hafif metallerde $100 \cdot 10^6$ döngü sayısı sınır olarak kabul edilebilmektedir. Yorulma deneylerinin daha kısa sürelerde tamamlanması istenilen durumlarda çeliklerde $2 \cdot 10^6$ ve hafif metallerde ise $10 \cdot 10^6$ - $50 \cdot 10^6$ arasında değişen sınır çevrim sayıları kullanılabilir [122].

Yorulma Dayanımı:

Belirli çevrim sayısına kadar bir malzemenin hasara uğramadan çalışabileceği en yüksek gerilme değeridir [120].

S-N diyagramı (Wöhler eğrisi):

Yorulma testleri sonucu malzemeye uygulanan gerilme değerleri ile buna karşın ölçülen çevrim sayıları kullanılarak çizilen grafikdir. Tipik bir S-N eğrisi ve yorulmada kullanılan bazı terimler Şekil 2.17’de gösterilmiştir.



Şekil 2.17. S-N diyagramı.

BÖLÜM 3

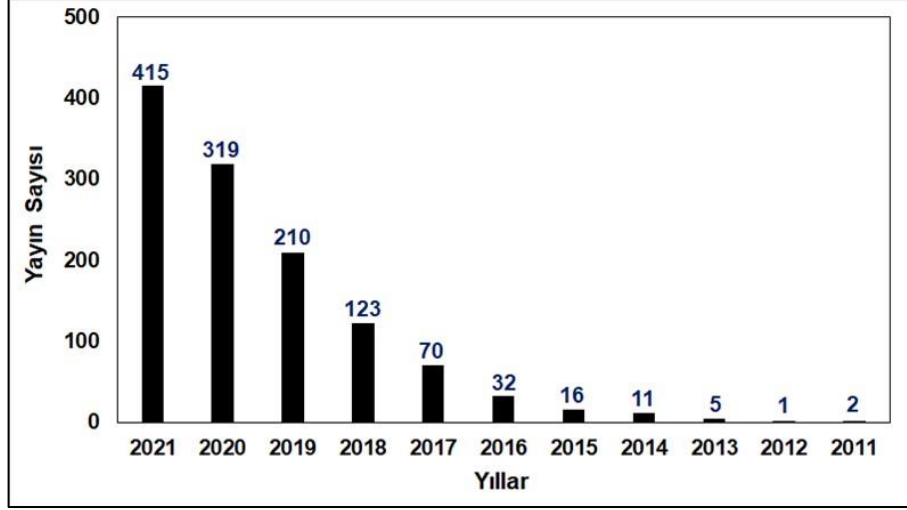
LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Bu bölümde TAEİ konusunda edinilen bazı sayısal verilerle genel durum değerlendirilmesi yapılmış ardından konulara göre incelenen çalışmalar alt başlıklarda açıklanmıştır. TAEİ konusunun güncel olması ve bu alanda Ülkemizde sınırlı çalışmaların gerçekleştirilmiş olması sebebiyle, konu hakkında yapılmış Ulusal çalışmalar ayrı paragraf altında anlatılmıştır. Önceki çalışmalar içeriklerine göre TAEİ yönteminin uygulandığı malzemeler, karakterizasyon işlemleri, proses geliştirme ve iyileştirme, hibrit üretim yaklaşımları ve nitelikli üretimler olmak üzere ayrılmıştır. Bunlara ek olarak yorulma konusu bu çalışmanın farklı bir yönünü oluşturduğu için TAEİ ve yorulma üzerine yapılmış çalışmalar da ayrı başlık altında incelenmiştir.

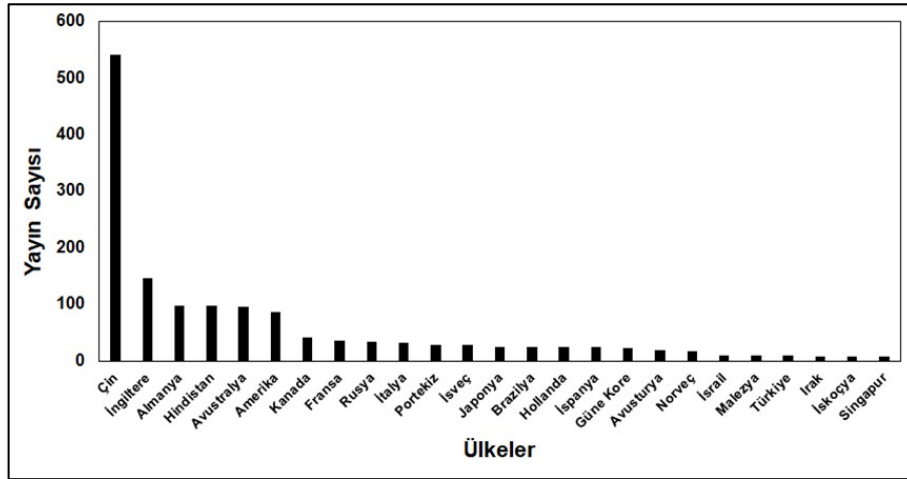
3.1. TAEİ ÜZERİNE YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Literatür çalışmaları kapsamında TAEİ konusunda gerçekleştirilmiş Ulusal/Uluslararası birçok yayın araştırılmıştır. Web of Science veri tabanında “Wire arc additive manufacturing” terimi aratılmış, sonuç olarak karşılaşılan ve tez konusuna yardımcı olacak çalışmalar incelenmiştir. Arama sonuçlarında 08.12.2021 tarihi baz alınmış, ilgili terimle bu tarihe kadar 1204 adet yayına rastlanılmıştır. İlk olarak 2011 yılında gerçekleştirildiği görülen 2 adet yayın sayısı 2021’de 415’lere ulaşmıştır. Ayrıca Şekil 3.1’de Web of Science’den edinilen verilere göre bu çalışmaların yayımlanma tarihlerine bakıldığında, % 60’tan fazlasının son iki sene içerisinde yaklaşık % 88’inin ise son 4 senede gerçekleştiği görülmektedir. Buradan TAEİ konusunun son derece güncel olduğu açıkça anlaşılmaktadır. Web of Science arama verilerine göre ayrıca ülkelere göre gerçekleştirilen yayın sayıları da değerlendirilmiş ve edinilen bilgiler Şekil 3.2’de verilmiştir. Ülkeler bazında yayın sayılarının değerlendirilmesi sonucunda Ülkemizde 10 adet yayın gerçekleştiği görülmektedir. Bu rakam tüm sayısının yaklaşık % 0,83’ünü oluşturmaktadır. Nispeten düşük seviyelerde

olan bu oran göz önüne alınacak olursa, TAEİ konusunda yapılacak Ulusal her bir çalışmanın Ülkemize ve literatüre yüksek fayda sağlayacağı ve tüm bu istatistiksel veriler ışığında tez konusunun güncelliğiyle beraber literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.



Şekil 3.1. Yıllara göre TAEİ konusunda yapılmış çalışmalar.



Şekil 3.2. Ülkelere göre TAEİ konusunda gerçekleştirilen yayın sayıları.

Yukarıda bahsedilen makale ve bildirimler dışında gerçekleştirilmiş tez çalışmalarını da incelenmiştir. Özellikle Ülkemizde yapılmış tez çalışmaları “eklemeli imalat”, “eklemeli üretim”, “katmanlı imalat” ve “katmanlı üretim” terimleri kullanılarak araştırılmıştır. Ayrıca bahsedilen her bir terimin başına ayrıca “tel ark” ifadesi de eklenerek TAEİ konusunda Ülkemizde gerçekleştirilen tüm çalışmalara ulaşılmak

istenmiştir. Bu kapsamda TAEİ ile ilgili Ülkemizde gerçekleştirilen 6 adet tez çalışmasına rastlanılmış ve bunlar devam eden sonraki 2 paragrafta anlatılmıştır.

TAEİ işlemi başka bir ifadeyle SMD (shaped metal deposition: şekilli metal yığıma) olarak bilinmektedir [123]. Ülkemizde SMD kavramıyla isimlendirilerek yapılmış çalışmalar mevcuttur. Ayrıca incelenen yerli kaynaklara bakıldığında TAEİ işlemiyle ilgili ilk çalışmalar SMD başlığı altında Uğla ve Keskin tarafından sırasıyla doktora ve yüksek lisans tezleri olarak 2016 yılında gerçekleştirilmiştir [124,125]. Uğla darbeli TIG kaynak yöntemi kullanımının SMD işlemi uygulanabilme kabiliyeti üzerine kapsamlı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Özellikle farklı TIG kaynak modlarıyla uygulanan kaynak parametrelerinin 308LSi malzemeli yapı üretimine ve üretim sürecine olan etkileri incelenmiş ve çalışmalar bir takım mekanik ve metalürjik testlerle desteklenmiştir [124]. Keskin tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans çalışmasında ise SMD yöntemiyle silindirik malzemelerin üretilebilme durumu ve işlem parametrelerinin geometrik özelliklere, makro ve mikroyapı durumuna etkisi araştırılmıştır [125]. Bunların dışında TAEİ işlemi yine SMD terimiyle nitelendirilerek 2020 yılında Atalay tarafından hibrit TAEİ çalışması gerçekleştirilmiştir. Üç eksen tezgah hareketinin sağlandığı üretim sistemine, boru profiline sahip parçaları döndüren bir aparat eklenmiş ve bu tip malzemelerin üzerine metal yığıma işleminin yapılabilirliği araştırılmıştır [126].

Yıldız [127], tarafından gerçekleştirilen doktora tez çalışmasında, TAEİ işlemiyle üretim esnasında ER120S-G metal tel ile üretilen parça üzerinde meydana gelen termal davranış etkileriyle, üretimlerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini inceleyen bir araştırma yapılmıştır. Bir başka yüksek lisans çalışmasında Yeşildağ [128], düşük alaşımlı çelikle (SG2) TAEİ işlemi uygulamış ve üretilen 30 katmanlı yapıda mekanik özellikleri ve mikroyapıyı incelemiştir. Bayar [129], doktora tez çalışmasında plazma ark kaynak yöntemi ile TAEİ işlemi uygulamıştır. Malzeme yığıma işleminde 304 paslanmaz çelik boru ve içi boş olan boruya SiC, FeCrC ve B₄C tozları ilave ederek oluşturduğu 4 farklı malzeme grubu kullanmıştır. Çalışma sonucunda toz takviyesinin gerçekleştiği numunelerde genel olarak olumlu sonuçlar elde etmiştir. Örneğin; FeCrC ilavesi ile en yüksek çekme dayanımı, SiC ilavesi ile sadece 304 çeliği ile yapılan üretime göre yaklaşık 25 kat daha iyi aşınma direnci elde etmiştir.

Bir önceki iki paragrafta 08.12.2021 tarihine kadar literatür araştırmaları kapsamında ulaşılan ve Ülkemizde gerçekleştirilen tez çalışmaları konu içerikleriyle beraber açıklanmıştır. Yüksek lisans ve doktora tez çalışmaları olmak üzere belirtilen tarihe kadar toplamda 6 adet tez çalışmasına rastlanılmıştır. Görüleceği üzere Ülkemizde TAEİ konusunda yapılmış çalışmalar oldukça sınırlıdır. TAEİ konusunda gerçekleştirilmiş ve incelenen uluslararası çalışmalar ise alt başlıklarla devam eden kısımlarda anlatılmıştır.

3.1.1. Üretimde Kullanılan Malzemeler

TAEİ işleminin farklı kaynak yöntemleri aracılığıyla uygulanabilmesi ve bu yöntemlerin türüne göre yüksek seviyelerde ısı enerjisine ulaşılabilmesi sayesinde, yöntem ergime dereceleri farklı olan birçok farklı metal malzemelerin üretimine olanak sağlamaktadır. Literatür çalışmaları kapsamında üretimde yer alan malzemeler ve/veya üretimlerde kullanılan ticari tel malzemeleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Birden fazla malzeme kullanımıyla gerçekleştirilen FDM yapılarında kullanılan malzemeler ise ileride yer alan 3.1.4 başlığı altında açıklanmıştır.

Çizelge 3.1. TAEİ yönteminde kullanılan malzemeler.

Malzemeler							
Titanyum ve Alaşımları	Ti6Al4V [130]	TC11 [131]	Saf Titanyum [132]	TC17 [133]	Ti3Al2V [134]		
Paslanmaz Çelik	316LSi [135]	308LSi [136]	309L [137]	ER420 [138]	ER347 [139]	ER2594 [140]	ER410 [141]
	ER2209 [142]	2Cr13 [143]					
Çelik	ER110S-G [144]	18Ni (350) [145]		ER50-6 [146]	H13 [147]	ER70S-6 [148]	
Alüminyum ve Alaşımları	AA5183 [149]	AA5356 [150]	AA4046 [151]	AA2319 [152]	AA4043 [153]		
Magnezyum ve Alaşımları	AZ61 [154]	AZ91 [155]	AZ31 [156]	AZ80M [157]			
Tungsten	Alaşımsız Tungsten [158]						
Süper Alaşımlar	Inconel 718 [159]	ATI 718Plus [160]	Hastelloy C276 [161]	Inconel 625 [162]	Inconel 825 [163]		
Diğer	Stellite 6 (Co alaşımı) [164]	Tantalyum [165]					

Çizelge 3.1’de görüleceği gibi TAEİ işleminde birçok farklı mühendislik malzemesi kullanılmaktadır. Literatürde özellikle Ti6Al4V titanyum alaşımı ve 316L paslanmaz çelik malzemeleri yoğun olarak çalışılmıştır. Piyasada yaygın olması sebebiyle düşük karbonlu ER70S-6 (SG2) çelik teli de en çok kullanılan malzemeler arasında yer almıştır.

Bunların dışında farklı malzeme türleri veya özel amaçlar için üretilen metal tellerle gerçekleştirilen çalışmalar da bulunmaktadır. Örneğin; Yu vd. [166], CMT yöntemiyle 5 katmanlı NiTi şekil hafızalı alaşımını TAEİ yöntemiyle üretmişlerdir. Çalışmaları sonucunda üretilen katmanlarda gözenek ve çatlak gibi makro hatalarla karşılaşmamışlar ancak malzeme yığıma esnasında termal sıcaklık gradyanlarının değişiminden dolayı mikroyapı ve mekanik özelliklerde homojen olmayan yapı meydana geldiğini belirtmişlerdir. Bir başka çalışmada A-Fe-W-86 olarak isimlendirilen spesifik proje için geliştirilmiş düşük karbonlu yüksek dayanımlı çelik tel kullanılmıştır [167]. Wang vd. [168], Mo malzemesinin TAEİ yöntemiyle üretilmesi üzerine çalışmışlar ancak bu işlemin çok zor olduğu ve ilgili çalışmaların çok sınırlı olduğundan bahsetmişlerdir. Gerçekleştirdikleri üretimin iç yapısında önemli sayılabilecek malzeme hataları görmüşler ve bunları sınıflandırmışlardır. Uyguladıkları farklı kaynak parametreleriyle bu hataların oluşum biçimini anlamaya yönelik çalışmışlardır.

3.1.2. Malzeme Karakterizasyon ve Üretim İşlemleri

TAEİ konusunda yapılan çalışmaların çoğu malzeme üretimi ve karakterize edilmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Üretilen parçalar genel olarak mekanik ve metalürjik testlere tabi tutulmuş özellikleri bakımından benzer kimyasal içeriğe sahip hadde/döküm ürünleriyle sıkça karşılaştırılmıştır. Bunların yanı sıra üretim parametrelerin etkisini inceleyen çalışmalarda gerçekleştirilmiştir.

Koruyucu gaz kullanımı bir önceki kısımda anlatıldığı gibi TAEİ üretim işlemini etkileyen temel parametrelerdendir. Juric vd. [169], TAEİ ile Inconel 625 malzemesinin üretiminde koruyucu gaz içeriğinin etkisini araştıran bir çalışma yürütmüşlerdir. 4 farklı gaz içeriğine sahip üretim işlemi uygulamışlardır. 1. üretim %

97,5 Ar ve % 2,5 CO₂, 2. üretim % 95,5 Ar, % 3 He ve % 1,5 H₂, 3. üretim % 95 Ar ve % 5 H₂ ve son olarak 4. üretim % 99,999 Ar gazı kullanarak gerçekleştirilmiştir. 1. üretim oksijen içerikli gaz karışımından kaynaklı en zayıf malzeme yığılma özelliği göstermiştir. 3. üretimde yüzey dalgalanmaları daha az olmuştur. 1. üretimde diğerlerine göre % 10 daha fazla sertlik değeri ölçülmüştür. En yüksek çekme dayanımı yaklaşık 752 MPa ile 1. üretimde, diğerlerinde ise yaklaşık 700 MPa civarlarında hesaplanmıştır. Çalışma sonunda 1. üretimin en yüksek sertlik değeri ve çekme dayanımı gösterdiğini ancak yüzey dalgalanmalarının fazlalığından dolayı son ürünün eldesi için daha çok malzeme kaldırma işleminin yapılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Önceki kısımlarda belirtildiği gibi temel üretim parametrelerin dışında üretimi etkileyen ve malzeme türüne göre daha fazla önem arz edebilen parametrelerde bulunmaktadır. Buna örnek olarak torç açısı verilebilmektedir. Su ve Chen [170], CMT yöntemiyle torç açısının malzeme yığılma üzerine olan etkisini araştıran bir çalışma gerçekleştirmiştir. Torç açısının alüminyum malzeme biriktirme işleminde önemli bir parametre olduğunu belirterek, farklı torç açılarının kaynak morfolojisini, porozite oluşumunu ve kaynak havuzu akışını etkilediğini vurgulamışlardır. Ayrıca farklı torç açılarında biriktirilen kaynak dikişinin farklı hatalar meydana getirebileceğinden bahsetmişlerdir. Çalışmaları sonucunda torcun biriktirme yönüne dik konumundan 10°-20° uzakta tutulduğu durumda, daha iyi şekle sahip, daha az gözenekli ve daha az hatalar içeren kaynak dikişi üretebilmişlerdir.

TAEİ yöntemiyle üretilen parçalardaki gözenekli yapının olması durumu, uygun işlem parametrelerinin kullanılması halinde çeliklerde nispeten daha az görünmesine karşın alüminyum gibi malzemelerin üretiminde bir zorluk olarak ortaya çıkabilmektedir. Fu vd. [171], alüminyum alaşımlarının TAEİ işleminde porozite ve düşük biriktirme oranının baskın iki teknik zorluk olduğundan bahsederek, sıcak tel besleme ile bu zorlukları iyileştirmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında değişen parametrelerde 4 farklı AA2024 alaşımı TIG yöntemiyle üretilerek makroyapı, mikroyapı, porozite ve mekanik özellikler değerlendirilmiştir. Sıcak tel akımı artışında malzeme yığılma oranı artmış ancak zayıf makroyapı ve yüzey kalitesi elde edilmiştir. Belirli akım değerlerinde gerçekleştirilen sıcak tel ile besleme yapılan

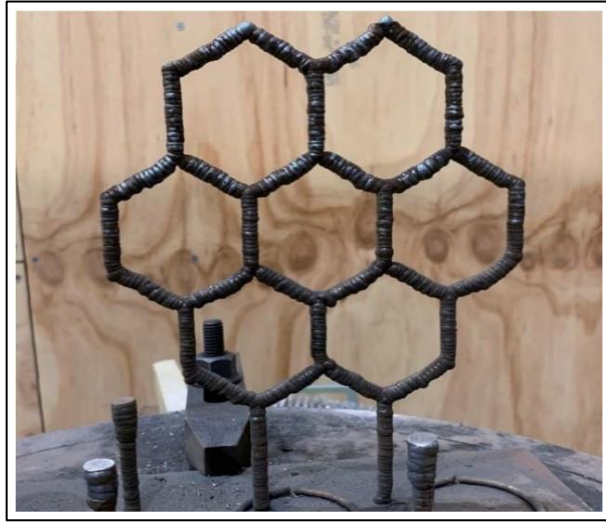
üretimde porozite önemli bir şekilde azaltılmış ve % 99,646 doluluk elde edilmiştir. Porozitenin azaltılması sayesinde çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama gibi mekanik özelliklerde iyileşme görülmüştür.

TAEİ yöntemi uygulama kolaylığı sayesinde birden fazla ark ile çalışmayı mümkün kılmaktadır. Bu şekilde malzeme biriktirme oranı artabilir, mekanik özellikler ve dikiş formu iyileştirilebilir. Wu vd. [172], MIG/MAG yöntemiyle 316L malzemesiyle tek ve çift ark uygulayarak TAEİ yöntemiyle üretim gerçekleştirmişlerdir. Aynı güç kullanılarak gerçekleştirilen çift tel arkında tek olana göre % 24,7 daha fazla yükseklik ve % 13,6 daha fazla genişlik elde edilmiş ve malzeme yığılma oranı 1,25 katı kadar hesaplanmıştır. Çift arkın uygulandığı numunelerin orta ve üst kısmında çift besleyici telin karıştırıcı etkiyle daha ince taneli mikroyapı elde edilmiş ve bu durum mekanik özelliklere olumlu olarak yansımıştır. Çift tel ile beslenen numunelerde tek tele göre çekme ve akma dayanımı % 3,5 daha fazla çıkmış ve % uzama miktarı ise % 0,34 daha az hesaplanmıştır.

Isı girdisi ve soğuma hızı TAEİ işlemini ve üretilen parçaların boyutsal özelliklerini direkt olarak etkileyen önemli bir durumdur. Gudur vd. [173], TAEİ işleminde kullanılan altlık malzemesine ısıtma ve soğutma işlemi uygulamasının üretilen kaynak dikişinin soğuma hızlarına etkisini araştıran bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Malzeme olarak Inconel 625 süper alaşımı kullanmışlar CMT yöntemiyle, 3 farklı kaynak akımı, 3 farklı ilerleme hızı ve soğutma, ısıtma uygulanan ve normal koşullarda olmak üzere 3 farklı yöntemle toplam 27 kaynak dikişi üretmişlerdir. Dikişlerin soğuma hızlarını, kaynak dikişinin genişliğini, yüksekliğini ve nüfuziyet derinliğini hesaplamışlardır. Çalışmaları şu şekilde özetlenebilmektedir: Kaynak hızı arttığı ve altlık soğutmasının uygulandığı durumda soğuma hızı artmış buna karşın altlık ısıtması durumunda ısı girdisindeki artmadan dolayı soğuma hızı azalmıştır. Altlıkta yapılan ön ısıtmada dikiş yüksekliği azalırken dikiş genişliğinde ve nüfuziyet derinliğinde artış görülmüştür. Altlık soğutmanın uygulandığı işlemde ise bu durumun tam tersi etki oluşmuştur.

Üç boyutlu üretime olanak tanınması TAEİ işleminde gelenekselin dışında farklı tür yapıların üretilme durumuna konu olmuştur. Buna örnek olarak Yu vd. [174], TAEİ

yöntemiyle serbest biçimli özellikle yapı iskeleti gibi parçaların imalat işlemine uyarlanmış bir üretim stratejisi geliştirmeye yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu yöntemle, tüm işlemi kontrol eden yükseklik kontrol sistemi ve uyarlanmış dilimleme metodolojisini barındıran bir yaklaşım kullanılmaktadır. Böylelikle optimum kaynak parametreleri ve malzeme yığıma stratejisinin belirlendiği dikiş modeli oluşturulmaktadır. Çalışma sonucunda geliştirilen yaklaşımı Şekil 3.3'te gösterilen karmaşık şekilli bal peteği biçimli iskelet yapıyı üreterek doğrulamışlardır.



Şekil 3.3. TAEİ yöntemiyle üretilen bal peteği biçimli iskelet yapı.

TAEİ tekniğinin en önemli avantajları arasında yer alan büyük ölçekli parçaları üretebilmesi veya bu parçalar üzerine işlem yapılabilmesi konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Li vd. [175], büyük boyutlarda zincir dişlinin TAEİ yöntemiyle onarımı üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Zincir dişlilerin çapının yaklaşık 0,6-1,0 m ve kütesinin 200-600 kg olduğunu belirterek kömür madenciliğinde kazıyıcı konveyörün temel bileşeni olarak kullanıldığına değinmişlerdir. Uzun çalışma süresi, zorlu servis şartları ve karmaşık yüklenme durumları sebebiyle, büyük boyutlu olan bu dişlilerin genellikle ciddi şekilde aşınmaya maruz kaldığını ve bu durumun büyük ekonomik kayıplara sebebiyet verebileceğini vurgulamışlardır. Hasara uğrayan örnek bir dişliyi entegre 3B tarama, nokta bulut kaydı, çok stratejili torç yolu planlama, parametre planlama ve 3B animasyon tekniklerini kullanarak robotik TAEİ ile tamir işlemi yapabilen bir yöntem kullanmışlardır. Bu yöntem yüksek uyarlanabilirlik ve uygulanabilirlik göstermektedir. Yazarlar örnek parça üzerinde gerçekleştirilen tamir

işlemi sonucu tamir yüzeyinin % 95'inde 1 mm'lik sapma sağlamışlardır. Sonuç olarak onarılan dişlinin gereksinimleri karşılayabildiğini bildirmişlerdir.

TAEİ yönteminin tamir-onarım işlemlerinde kullanılabileceğine yönelik yapılan bir başka çalışmada kırılmış varsayılan bir dişli parçası kullanılmıştır. Bu dişli birbirinden kırılmış vaziyette iki parçadan oluşmaktadır. Çalışmada bu parçalar yana yana getirilmiş ve kırılan dişli bölgesinin formuna uygun torç yolu oluşturularak birleştirme işlemi yapılmıştır. Yazarlar sonuç olarak kırılan parçaları birleştirebilmiş ancak başka çalışmaları için torç yolunun doğru bir şekilde belirlenmesi ve uygun kaynak parametrelerinin seçilmesi gerektiğini belirtmişlerdir [176].

3.1.3. Proses Geliştirme ve İyileştirme

TAEİ yöntemi üzerine yapılan çalışmaların bir kısmı son ürünlerin kalitesini geliştirmeye ve yöntemin uygulanabilirliğini kolaylaştırmaya yönelik gerçekleştirilmiştir. Üretilen parçaların daha iyi mekanik özellikler sergileyebilmesi için literatürde yer alan ve farklı üretim yöntemleri için uygulanan prosesler TAEİ işlemine uyarlanmıştır. Mikroyapının iyileştirilmesine yönelik gerçekleştirilen bir çalışmada Xiaolong vd. [177], TAEİ yöntemiyle üretilen Ti6Al4V malzemesine hidrojenleştirme işlemi uygulamış ve mikroyapıda dikkate değer değişiklik gözlemlemişlerdir. Hidrojenleştirme işlemi, titanyum alaşımlarının mikroyapısını iyileştirme ve fazları değiştirmede geçici olarak hidrojen alaşım elementinin kullanıldığı etkili bir tekniktir.

TIG yöntemiyle eklemeli imalatta besleyici tel harici olarak işlem esnasında verildiği için birtakım zorluklar yaşanmaktadır. Bunların başında ark salınımı gelmektedir. Ark salınımı üretilen dikişte meydana gelen yükselti farklılıklarından kaynaklanmaktadır. Yükselti farkından dolayı tungsten elektrot ile dikiş arasındaki mesafe değişmekte ve torç hareketi esnasında arkın mesafesi de değişerek salınımı kaçınılmaz olur. Manuel olarak uygulanan TIG kaynağında ark salınımı hissedilmezken, otomatik olarak gerçekleştirilen kaynak işlemlerinde görülebilmektedir [178]. Corradi vd. [179], TIG yöntemiyle gerçekleştirdikleri TAEİ işleminde elektromanyetik bobin kullanarak ark salınımını düzeltme işlemi uygulamışlar ve kaynak dikişinin boyutsal değişimlerine

olan etkilerini incelemiştir. Manyetik ark salınımı uygulandığı zaman daha ince dikiş elde etmişler ve dikiş genişliklerindeki değişim kullanılmayana göre daha az olmuştur. Malzeme biriktirme esnasında manyetik ark salınımı uygulanması nüfuziyet derinliğinde azalma meydana getirmiştir.

Bir başka çalışma Tang vd. [180] tarafından, TIG tekniğine dayalı TAEİ işlemi için ses sinyalleriyle ark boyunun belirlenmesine yönelik gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında torç hareketinin sabit yükseklikte ve belirli seviyelerde yükselerek ilerlediği durumlarda ölçümler yapılmıştır. Ark boyu ve ses sinyal seviyesi arasında basit bir matematiksel ilişki kurulmuş ve yapılan hesaplamalarda her iki test durumu için sırasıyla ortalama % 5,76 ve % 4,83 doğrulama hatası bulmuşlardır. Maksimum hata değeri ise sırasıyla % 15,85 ve % 7,12 olarak hesaplanmıştır. Yazarlar bu değerlerin ark uzunluğunun belirlenmesinde kullanılabileceğini vurgulayarak ileriki çalışmalarda bu teknolojinin kontrol döngüsüne katılarak kaynak işleminin stabilitesi için büyük katkılar sağlayacağını belirtmişlerdir.

Daha önceden de belirtildiği gibi TIG kaynak yöntemiyle gerçekleştirilen TAEİ işleminde tungsten elektrod ile altlık arasındaki mesafe işlem düzeni ve üretilen katman boyutları açısından önemlidir. Malzeme yığılma esnasında üretilen katmanın katılaşması esnasında meydana gelen yükseklik ve torç hareketi esnasındaki mesafe değişimleri ark boyunu etkilemektedir. Ark boyunda meydana gelen yaklaşık 2 mm'lik değişim kaynak akımının 150 A'den 100 A'ye düşmesi kadar bir etki yapabilmektedir [60]. Bu yüzden ark mesafesi sabit olmalı veya akım dinamik olarak değişebilmelidir. Bu duruma katkı sağlamak amacıyla farklı yaklaşımlar çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Örneğin, Wang vd. [60], kaynak akımı-voltajı ve ark uzunluğunu kontrol eden bir sistem kurmuşlardır. Bir başka çalışmada Xiong vd. [181], önceki katmanı ve üretilen katmanı görsel olarak izleyen ve dikiş yüksekliğindeki değişimi tel besleme hızı ile düzenleyen bir sistem geliştirerek, işlem stabilitesini ve doğru yükseklik kontrolünü geliştirmişlerdir.

TAEİ ile üretilen parçalar metalin ergitilmesi ve katılaşması biçiminde elde edilirler. Ergitme işlemi çok yüksek sıcaklıklarda gerçekleştiği ve katılaşmanın ise daha kısa sürelerde olduğu düşünüldüğünde prosesin kontrolünün zor olduğu bir gerçektir.

Wang vd. [182], TAEİ işleminde boyutsal doğruluğu arttırmak, dikiş genişliğinin düzgünlüğünü sağlamak ve katman yığıma işlemini güçlendirmek amacıyla TAEİ işlemini koordineli bir şekilde izleyen ve kontrol eden bir sistem kurmuşlardır. Bu sistem kaynak havuzu oluşumunu izlemekte ve istenilen dikiş boyutları için kaynak akımını geri besleme yoluyla değiştirebilmektedir. Yazarlar bu sistem ile başarılı sonuçlara ulaşmışlar ancak çok dikişli ve çok katmanlı yapılar için bu sistemin uygun olmadığını ve çok süreçli parametre testlerinin genişletilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

İşlem kontrolüne yönelik bir başka çalışmada Halisch vd. [183], daha iyi homojen malzeme özellikleri sağlamak için TAEİ işleminde ergiyik havuzunun boyutlarının kontrolünün gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumu izlemek amacıyla çalışmalarında yüksek hızlı kamera ve yüksek dinamik aralığa sahip iki-renkli pirometri kamera kullanmışlardır. Titanyum alaşımının CMT yöntemiyle üretildiğini yapının ilk katmanında, eriyik havuzu boyutu bir plato üzerinde düzleşene kadar sürekli olarak artarken, sonraki katmanlarda eriyik havuzu boyutu yavaş yavaş azalıyor gibi görünmüştür. Mikroyapı, başlangıç noktasında ve numunenin kenarlarında hafif sapmalar ile homojendir. Tane boyutu kaynak yönünde daha küçüktür, ancak birikme yönünde taneler epitaksiyel olarak çoklu katmanlar üzerinde büyümüş ve bu nedenle büyük bir boyut sergilemiştir. Yazarlar eriyik havuzu boyutu ile tane boyutu arasında bir ilişkinin olmadığını vurgulamışlardır.

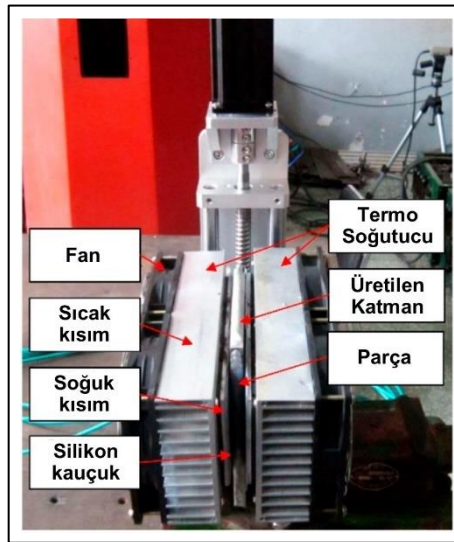
Kaynak dikişi, arkın başladığı ve bittiği bölgelerde farklı boyutsal değişimler içerebilmektedir. Bu durumdan dolayı dikiş formunda düzensizlikler oluşmakta ve birbiri üzerine eklenen katmanlarda boyutsal düzensizlik artarak devam etmektedir. Bu durumu iyileştirmeye yönelik çalışmalarda yapılmıştır. Xiong vd. [184], TAEİ işleminde üretilen kaynak dikişinde ark başlangıcı ve arkın sonlandırıldığı bölgelerde meydana gelen boyutsal değişimlerin düzeltilmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Ark başlangıcında meydana gelen geniş ölçülerin, kaynak havuzuna ilerleyen metal damlacıklarının yayılması için yeterli vakit olmamasından ve kısmi ergiyen metalin katılmış metale doğru akmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Arkın sonlandığı bölgede eğimli bölge meydana gelmesini ise ark kuvvetinin ve ısı girdisinin ani bir şekilde azaltılmasına dayandırmışlardır. Ark

başlangıç ve bitiş bölgelerinde yükseklik farkı meydana gelebilmekte ve tekrarlanan katman üretimleriyle bu fark daha da fazla artabilmektedir. Kaynak parametrelerinin bölgesel olarak değiştirilmesiyle bu durumun düzeltilebileceğine değinmişlerdir. Yazarlar çalışmalarında gerçekleştirdiği çelik malzemeli örnek üretimlerde; kapalı yol ile gerçekleştirilen işlemlerde, yükseklik farkının kaynak akımının sabit, kaynak hızının ve ark voltajının artırılmasıyla düzeltilebileceği sonucuna varmışlardır. Açık yollu üretimler için malzeme yığılma işleminin karşılıklı yönlü olarak gerçekleşmesinin fayda sağlayacağını belirtmişlerdir. Bununla beraber ark başlangıç bölgesinde kaynak akımı değiştirilmeli, kaynak hızı ve ark gerilimi artırılmalıdır. Arkın sonlandığı kısımda ise kaynak akımı, hızı ve gerilimi azaltılmalıdır.

TAEİ üretilen parçaların mikroyapısını iyileştirmek amacıyla farklı yaklaşımlar kullanılmıştır. Zhang vd. [185], CMT yöntemiyle gerçekleştirdikleri TAEİ işleminde alüminyum üretimi için altlık malzemesine titreşim uygulamışlardır. Artan ivmeli titreşim tane inceltmesine ve homojen dağılımlı tane oluşumuna katkı sağlamıştır. Tane boyutu titreşim uygulanmayana göre % 22,5 kadar azalmıştır. Titreşim uygulaması ayrıca porozite boyutunu ve miktarını azaltıcı rol oynamıştır. Çekme dayanımı titreşim uygulanan numunede uygulanmayana göre yaklaşık 30 MPa daha fazla olduğu görülmüştür. Ancak titreşim uygulaması anizotropik davranışa önemli bir gelişme sağlamamıştır.

Mikroyapı iyileştirmesinin uygulandığı bir başka farklı yaklaşımda Wang vd. [186], CMT yöntemiyle Inconel 625 malzemesinin TAEİ üretiminde manyetik alan oluşturan sistem kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Manyetik alan sistemi üretimde torç ortada kalacak şekilde iki temel parçadan oluşmaktadır. Bu sistemin kullanıldığı üretimlerde malzeme üzerinde dendrit oluşumu kullanılmayana göre 1/3 oranında azalmıştır. Manyetik alan tarafından üretilen konveksiyon, Nb ve Mo gibi güçlendirici elementlerin dendritler arasında ayrılmasını azaltmış, Inconel alaşım numunelerinin mekanik özelliklerini iyileştirmiştir. Manyetik alan kullanılan numunelerin mikro sertlik değerleri ve çekme dayanımı kullanılmayana göre daha yüksek hesaplanmıştır. Bu durum mikroyapıdaki dendritik düzelme, dendritlerin tek tip oryantasyonu ve alaşım elementlerinin ayrılmasının engellenmesine bağlanmıştır.

TAEİ işleminde üretilen katmanların ısınma ve soğuma süreçleri birbirinden farklı bir şekilde gerçekleşmektedir. Daha önce üretilen katman bir sonrakine göre daha çok ısıya maruz kalarak daha çok soğuma sürecinden geçecektir. Bu durumun düzeltilmesine katkı sağlamak amacıyla yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. Li vd. [187], TAEİ işleminde alt ve üst katmanlar arasında ısının eşit dağılımını sağlamak için termoelektrik soğutucu (Şekil 3.4) ile aktif soğutmanın etkileri üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Aktif soğutma ile dikiş geometrisi, ergimiş havuz şekli ve termal döngülerin katmanlar için benzer kalması sağlanmıştır. Bu şekilde gerçekleştirilen üretimde kaynak dikişi genişliğindeki hatalar % 56,8 azaltılmış ve malzeme kullanımı % 16,3 artmıştır. Aktif soğutma aynı zamanda katmanlar arası bekleme süresini de azaltmış % 60,9 oranında üretim süresi kısalmıştır. Hızlı soğuma oranı ile üretilen parçanın orta kısmında daha ince taneli yapı oluşmuştur.



Şekil 3.4. Aktif soğutma sistemi [187].

3.1.4. Nitelikli Üretimler ve Çoklu Malzeme Kullanımı

Farklı malzemelerin birlikte üretime dahil olmasıyla nitelikli yapıların (FDM) üretimi TAEİ yöntemini geleneksel yöntemlere ve diğer metal Eİ yöntemlerine göre üstün kılmaktadır. Literatürde tıpkı TAEİ konusunda yapılmış diğer çalışmalar gibi nitelikli üretimler konusunda yapılanlar da yakın zamanlarda gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda

genel olarak farklı iki malzeme kullanılmış ve bu iki malzeme birlikteliğiyle üretimler yapılmıştır. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Kannan vd. [110], TAEİ yöntemiyle çeşitli parçaların üretildiğini vurgulamış ancak yöntemle FDM çalışmalarının sınırlı olduğunu belirtmişlerdir. Buna karşılık SS904L süper östenitik paslanmaz çeliği ve Hastelloy C-276 çeliğini kullanarak MIG/MAG yöntemiyle bir TAEİ işlemi gerçekleştirmişlerdir. Bu iki malzemedan yarı yarıya 44 katmanlı yaklaşık 150 mm uzunluğunda duvar şeklinde bir parça üretmişler, ardından çekme, yorulma ve mikroyapı çalışmaları uygulamışlardır. Mikroyapının ağırlıklı olarak sütunsal ve eş eksenli dendritlerden oluştuğunu ve inşa yönünde homojen olmayan özellikler gösterdiğini bulmuşlardır. İki malzemenin birleşme bölgesindeki ara yüzeyinin katılma sırasında çatlak içermediğini SEM (scanning elctron microscope: taramalı elektron mikroskopu) çalışmalarıyla göstermişlerdir. Çekme testinde kopmaların SS904L tarafından meydana geldiğini ve yaklaşık 680 MPa çekme dayanımı sergileyerek işlenmiş alaşım dayanımını (490 MPa) geçtiğini vurgulamışlardır. Yorulma testi sonucunda SS904L malzemesi için işlenmiş alaşıma göre % 28-35 kadar düşen bir sonuç elde etmişlerdir.

Chen vd. [101], TC4 (Ti6Al4V) ve 316L paslanmaz çelik malzemesinin aynı anda birlikte sağladığı mükemmel korozyon direnci, yüksek dayanım-ağırlık oranı ve düşük maliyet gibi avantajlara değinmiş ve bu malzemeleri kullanarak TAEİ işlemiyle FDM çalışması gerçekleştirmişlerdir. Üretim işlemlerinde TIG kaynak yöntemini kullanmışlar. Tel besleme işlemini aynı anda gerçekleştirmişler, inşa yönü boyunca her katman için farklı Fe yüzdesi oluşturacak şekilde tel besleme hızını ayarlamışlardır. Titanyum esaslı kullandıkları altlıktan başlayarak sırasıyla % 5 ile % 65 arası değişen Fe içeriklerinde bir parça üretmişlerdir. % 50 Fe seviyelerinde Fe₂Ti yapısından dolayı çatlak görülmüş ve bu çatlak % 35 Fe içeren katmana kadar ulaşmıştır. Artan Fe içeriğine göre mikroyapı sırasıyla α -Ti + FeTi \rightarrow Fe₂Ti + FeTi + Cr₂Ti \rightarrow Fe₂Ti + Cr₂Ti şeklinde değişmiştir. En yüksek sertlik değeri % 60 Fe oranında 945 HV olarak ölçülmüştür.

Wang vd. [99], TiAl alaşımlarının güçlü mekanik özelliklerini vurgulayarak saf titanyum ve saf alüminyum telleri kullanıp TIG kaynak yöntemiyle bir TAEİ işlemi

gerçekleştirmiş ve titanyum alüminid FDM'sini üretmişlerdir. İki farklı tel birbirlerinden bağımsız olarak farklı hızlarda üretim bölgesine gönderilmiş ve bu şekilde farklı alaşım değerlerine sahip katmanlar elde edilmiştir. İnşa yönüne göre her 3 katmanda % 5 Al oranı arttırılmış; ilk 3 katman (1-3) % 20 Al ve son 3 katman (19-24) % 50 Al içerecek şekilde üretim gerçekleştirmişlerdir. Üretimin ardından mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş üretimin farklı noktaları için oksidasyon durumunu araştırmışlardır. İnşa yönüne göre aşağıdan yukarıya fazlar sırasıyla $\alpha + \beta \rightarrow \alpha + \alpha_2 \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \alpha_2 + \gamma \rightarrow \gamma$ şeklinde değişmiştir. Al içeriğini artmasıyla mikro sertlik ve çekme dayanımı belirli bir yere kadar artmış sonra düşüş görülmüştür. Maksimum değerler α_2 fazında görülürken en yüksek süneklik inşa yönünü en üst noktalarında γ fazında görülmüştür. Oksidasyon durumunun faz yapısı ile güçlü bir şekilde ilişkili ve en yüksek direncin γ fazının bulunduğu kısımda oluştuğunu bulmuşlardır.

Chandrasekaran vd. [100], denizcilikte ham petrol ve gaz çıkarmada kullanılan boru şeklinde "riser" adı verilen parçanın bir FDM olduğuna değinmişler ve bu parçanın TAEİ yöntemiyle üretilebilme uygunluğunu araştırmışlardır. ER70S-6 karbon mangan ve ER2209 dubleks paslanmaz çelik telleri kullanarak CMT yöntemiyle bir FDM parçası üretmişlerdir. Üretimleri inşa yönünde sırasıyla 10 katman dubleks paslanmaz çelik ve diğer 13 katman karbon mangan çeliği olacak şekilde uygulamışlardır. Yapılan testler sonucunda en yüksek sertlik değerini iki çeliğin birleşme ara yüzeyinde yaklaşık 307-320 HV değerinde bulmuşlardır. Ürettikleri FDM malzemesinin ticari olarak bulunan X52 malzemesi ile karşılaştırmışlar, akma dayanımlarını yaklaşık aynı değerlerde, çekme dayanımını ise % 6 kadar daha yüksek hesaplamışlardır. Bu durumu katılaşmada ince taneli mikroyapı oluşumuna dayandırmışlardır. TAEİ yöntemiyle ürettikleri FDM yapılı malzemeye uyguladıkları korozyon testi sonucunda, ana malzeme olarak kullanılan X52 çeliğine göre yaklaşık 12 katı kadar iyileşme olduğunu bulmuşlardır.

Marinelli vd. [103], molibden (Mo) ve tungsten (W) refrakter malzemelerini tantalyum (Ta) plaka üzerinde biriktirerek TIG kaynak yöntemiyle TAEİ işlemi uygulamış ve bu malzemelerden oluşan FDM parçası oluşturmuşlardır. FDM parçasını sırasıyla Ta altlık en alt kısımda olacak şekilde sırasıyla Mo üstüne W ekleyerek üretmişlerdir. Ta ve Mo malzemesinin ara yüzeyinde termal genleşme katsayısı uyumsuzluğundan

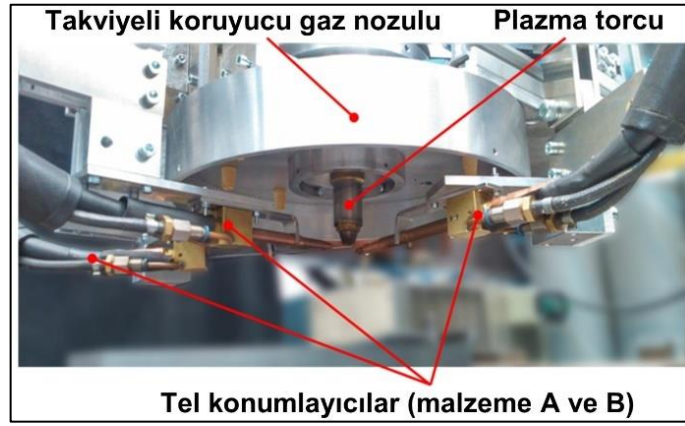
dolayı ağ yapılı çatlaklar oluşmuştur. Mo üzerine W eklenirken homojen olmayan katılma sebebiyle keskin mikroyapı değişimi gözlemlenmiştir. Mo ve W malzemesinin ergime sıcaklıklarının ve soğuma karakteristiklerinin büyük farklılık göstermesi sertlik değerlerinde farklılıklara neden olmuştur. Mo ve W arasında çatlak bulunmamış bunun sebebinin ise iki malzemenin benzer termal genleşme katsayısına sahip olduğundan kaynaklandığını belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda FDM parçasını oluşturan malzemelerin termal özelliklerinden kaynaklı uyumsuzluklar soğuma rejimini aniden değiştirmekte ve bu yüzden mikroyapının etkilendiğini belirtmişlerdir.

Singh vd. [188], NiTi ve 316L metalik teller ile bimetal yapı üretimi üzerine çalışmışlardır. Mikroyapı çalışmaları sonucunda her iki malzemenin genel olarak dendritik yapıda olduğu ve birleşme ara yüzeyinde $TiCr_2$, $FeNi$, $NiTi$, $TiNi_3$ ve $TiNi_2$ intermetaliklerinin oluştuğunu belirtmişlerdir. Ara yüzeyin yüksek sertlik değerine sahip olduğunu ve kırılma davranış sergilediğini belirtmişlerdir.

Zhang vd. [189], MIG/MAG yöntemiyle bakır-çelik bimetal yapı üretimi üzerine çalışmışlardır. Çalışmalarında iki farklı tür üretim uygulamışlar, birinci üretimi toplam katmanın yarısı çelik yarısı bakır alaşımı olacak şekilde gerçekleştirmişlerdir. İkincisini ise benzer şekilde üretmişler ancak diğerinden farklı olarak bu iki malzemenin geçiş bölgesinde ara katman niteliğinde başka bir malzeme kullanmışlardır. Bu malzeme Cu-Ni metal-fluks örtülü telden oluşmaktadır. Toplamda yaklaşık 60 mm uzunluğunda ve 10 mm genişliğinde 12 katman çelik üzeri 12 katman bakır alaşımına sahip 2 farklı yapı üretmişlerdir. Üretilen yapılarda makro boyutta kaynak hatası gözlemlenmemiş ancak 1. parçanın ara yüzeyinde eriyen karışmamış olarak tanımladıkları bir bölge meydana gelmiş ve burada ikincil faz oluşumundan kaynaklı mikro çatlaklar oluşmuştur. Geçiş malzemesinin kullanıldığı 2. parçada ise bu bölgenin oluşumu elimine edilmiş, ara yüzeyde düzgün bir geçiş olmuştur. Bu parçada daha düzgün dağılımlı mikro sertlik dağılımına sahip olmuş ve çekme dayanımında ilk parçaya göre yaklaşık % 66 artış bulunmuştur.

Reisgen vd. [190], plazma ark kaynak yöntemiyle Şekil 3.5'te gösterilen sistemle çoklu tel kullanılan üretime yönelik bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında

3 farklı telin besleme hızlarının değişmesiyle farklı kimyasal bileşime sahip üretim yapılabileceği ve bu şekilde karmaşık yapıları parçaların istenilen bölgelerinde ayarlanabilen mekanik özellikler sağlanabileceğini belirtilmiştir. Yazarlar kimyasal bileşiminde büyük farklılıklar olan besleyici malzemeler için üretimde düşük süneklığe sahip fazların oluşabileceğine değinmiş ve bu durumun üretim esnasında uygulanan akıllı yol planlaması ile giderilebileceğinden bahsetmiştir. Akıllı yol planlaması fazların süneklik durumlarının kontrolünün sağlanmasına yardımcı olmaktadır.



Şekil 3.5. Plazma TAEİ yöntemi ve çoklu malzeme kullanımı [190].

Kumar vd. [191], SS321 paslanmaz çelik ile Inconel 625 malzemesini içeren bir FDM üretimi gerçekleştirmişlerdir. Toplamda 60 katmanlı üretilen yapının ilk 30 katmanını paslanmaz çelik oluşturmaktadır. FDM yapısında çatlak gibi hatalar gözlemlenmemiş, inşa yönü boyunca paslanmaz çelik tarafında mikroyapıda eş eksenli ve sütünsal dendritlerin oluştuğunu bulmuşlardır. Inconel tarafı ise ince taneli, sütünsal ve hücre formunda dendritler içermektedir. Paslanmaz tarafı çoğunlukla östenit yapısı içermekte olup östenit matrisinde δ -ferrit fraksiyonu bulunmaktadır. Inconel kısmı tamamen östenitik yapıdadır. Çekme testlerinde FDM yapısında paslanmaz çelikten daha iyi sonuçlar elde edilmiş sonuçlar dövme Inconel alaşımıyla mukayese edilebilir. Çekme testlerinde kırılma paslanmaz çelik tarafında gerçekleşmiştir. Böylelikle ara yüzey paslanmaz çelikten daha iyi dayanıma sahip olmuştur.

Sridar vd. [192], P91 ve Inconel 740H çeliğini kullanarak TAEİ yöntemiyle bimetel yapının üretimi üzerine çalışmışlardır. Her iki malzemedden 15'er katman olmak üzere

30 katmanlı ürettikleri yapının birleşme kısmında, yaklaşık 2,2 mm genişliğinde iri taneli gradyan bölgesi meydana geldiğini bulmuşlardır. Gradyan bölgesinde zararlı ikinci fazlar görülmemiş, ancak iki farklı malzemenin termal özelliklerinin farklılığından dolayı taneler arası çatlak meydana geldiğini belirtmişlerdir.

Literatürde TAEİ konusunda gerçekleştirilmiş FDM çalışmaları yukarıda özetlenmiştir. Belirtildiği gibi bu çalışmalar genel olarak farklı iki malzemenin kullanımıyla güçlü özelliklerini tek malzemede sergilemeye yönelik olmuştur. Bu çalışmalardan özetle şu sonuçlar çıkarılmıştır:

- Farklı iki malzemenin üretime dahil olmasıyla FDM parçasında ikincil faz yapılar oluşmaktadır. Bu fazlar genel olarak sertlik değerlerini artırmaktadır.
- FDM yapısını oluşturmak için kullanılan farklı malzemelerin tel besleme oranı değiştirilerek, son üründe farklı mikroyapılar elde edilebilmektedir.
- Malzeme türüne göre FDM yapılarında farklı ara yüzey oluşumları meydana gelmektedir.
- Ara yüzey ve ara yüzey yakınları farklı mikroyapılar içermektedir. Bu durum kullanılan malzemelerin farklı kimyasal bileşiminden ve farklı termal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.
- FDM şeklinde üretilen parçalarda ara yüzey dayanımı yüksek olabilmektedir.

3.1.5. Hibrit Üretim Yaklaşımları

Hibrit yaklaşımlar genel olarak TAEİ işlemiyle üretilen parçaların kalitesini arttırmak için geliştirilmiştir. Uygulama biçimleri bakımından ikincil başka prosesler içerdiği için hibrit yöntem ile yapılanlar ayrı başlıkta açıklanmıştır.

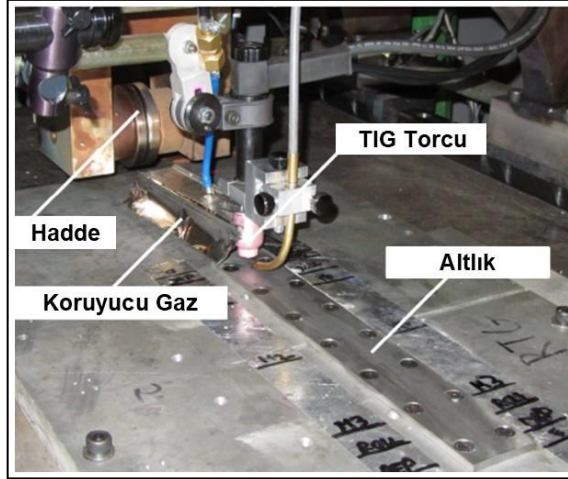
Xiong vd. [193], TAEİ ürünlerinin tane yapılarını ve mekanik özelliklerini iyileştirmek amaçlı üretim işlemi esnasında kaynak torcuna yakın bir mesafede hareket

eden çekiç ile dövme işlemini (hammer peening) yumuşak çelik malzeme üzerine uygulamışlardır. Bu şekilde üretilen katmanın mekanik özelliklerinin iyileştiğini ve mukavemetinde artış meydana geldiğini bulmuşlardır. Dövme yüksekliği, dövme zamanı ve dövme işlemini gerçekleştiren çekiç kafası şeklinin plastik deformasyon miktarını değiştirdiğini ve böylelikle mekanik özellikleri etkilediğini belirtmişlerdir. Bu parametrelerden en büyük etkiyi dövme yüksekliği en az etkiyi ise dövme zamanı sağlamaktadır.

Yang vd. [194], ultrasonik darbe işlemi ile TIG TAEİ yöntemini birlikte uygulayarak Ti6Al4V malzemesinde kalıntı gerilmeleri azaltmaya yönelik hibrit bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Hibrit yöntem ile kalıntı gerilmeler tek katmanlı yapıda % 43,7 katmanlı yapıda ise % 77,3 oranında azalmıştır. Bununla birlikte tane boyutlarında küçülme sağlanmıştır. Bu yöntem ayrıca mekanik özellikleri iyileştirmiş çekme dayanımını, ultrasonik işlem uygulanmayana göre yaklaşık % 7,4 oranında artırmıştır. Ancak süneklikte azalma görülmüş % uzama değeri % 11,95'ten % 10,92'ye düşmüştür.

Zhang vd. [195], Inconel 718 malzemesinin haddeleme ve TAEİ yöntemiyle hibrit olarak üretilmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Haddeleme işleminin soğuk ve sıcak olarak uygulandığı ve haddelemenin uygulanmadığı 3 farklı numune grubuna mekanik ve metalurjik testler uygulamışlardır. Buna ek olarak bu 3 gruba ısı işlem de uygulamışlar toplamda 6 farklı test örneği oluşturmuşlardır. Isıl işlem uygulanan ve sıcak haddelemeyle hibrit üretilen malzemede Inconel 718'in dövme metaliyle kıyaslanabilecek üstün mekanik özellikler elde etmişlerdir. TAEİ ile üretilmiş parçalara ısı işlem uygulanmasının anizotropik yapı oluşumunu azalttığı sonucunu çıkarmışlardır.

Haddeleme ile TAEİ yönteminin birlikte uygulandığı bir başka hibrit üretimde; Colegrove vd. [196], Ti6Al4V malzemesiyle üretilen katmanlara uygulanan haddeleme işleminin, çarpılmaları azalttığı, mikroyapıyı düzenlediği ve kalıntı gerilmeleri önemli derecede iyileştirdiği sonucunu bulmuşlardır. Yazarların uyguladığı hibrit yaklaşım Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. TAEİ ve haddeleme hibrit üretim işlemi [196].

Ma vd. [197], titreşim darbesi ile dövme-yi haddelemeyle birlikte uygulayan bir sistemi TAEİ işleminde ER70S-6 malzemesinin üretimi için uygulamışlardır. Bu şekilde yapılan üretimle ortalama 9,6 µm hesaplanan tane boyutu 6,4 µm seviyelerine kadar inebilmiştir. Kaynak havuzunda uygulanan sabit yüklerle haddeleme, titreşim darbeleri dövme ve mikro self-dövme işlemlerinin hepsi tane küçültücü etki yapabilmektedir. Titreşim darbesi ile dövme-haddeleme işleminin uygun parametrelerde uygulandığı numunelerin çekme dayanımı, akma dayanımı ve % uzama değerlerinde artma görülmüştür.

Literatüre bakıldığında farklı biçimde uygulanmış hibrit üretimler bulunmaktadır. Hibrit üretim yaklaşımları genel olarak değerlendirildiğinde TAEİ ile üretilen yapıların mekanik ve metalürjik özelliklerinin iyileştiği görülmüştür. Bununla beraber son işlem uygulama gerekliliğini azaltmıştır. Hibrit üretimlerin gerçekleştirilmesi için TAEİ üretim sisteminde önemli tasarımlar, düzenlemeler yapılması gerektiği ve hibrit sistemin hacim olarak daha büyük bileşenlerden oluştuğu anlaşılmaktadır. Üretim sisteminde yapılacak ekstra düzenlemelerin kurulum maliyetini arttırıcı etki yapacağı bir gerçektir. Bu durumlar göz önüne alındığında TAEİ sistemlerinin hibrit yaklaşımla birlikte uygulansa bile toz esaslı gibi diğer metal Eİ yöntemlere göre daha az maliyet oluşturacağı düşünülmektedir.

3.1.6. TAEİ ve Yorulma

TAEİ konusu üzerinde önceden yapılmış çalışmalarda, üretilen parçaların mekanik ve metalurjik özelliklerinin belirlenmesi için birçok farklı testler uygulanmıştır. Yorulma testleri de oransal olarak az olmasına karşın bu testler arasında yer edinmiştir. Bu çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Duraisamy vd. [139], çalışmalarında TAEİ ile üretilmiş çelik yapıların dinamik yüklemelere maruz kalabileceğini vurgulayarak, yorulma performanslarının ve kırılma karakteristiklerinin değerlendirilmesi gerektiğine değinmişlerdir. TAEİ yöntemiyle ürettikleri 347 östenitik paslanmaz çeliğin yatay ve dikey yöndeki numunelerine yorulma deneyi uygulamışlar ve her iki yönlenmedeki yorulma dayanımını yakın değerlerde bulmuşlardır. Yorulma kırık yüzey incelemelerinde yüksek gerilme değerlerinde kaba, düşük gerilme değerlerinde ise daha düzgün bir kırılma yüzeyi gözlemlemişlerdir. Yatay ve dikey her iki numune sünek olarak hasar görmüş ve yorulma hasarının çatlak yayılma bölgesindeki çizgilerle mikro boşlukların birleşmesi sonucunda meydana geldiğine değinmişlerdir.

Ermakova vd. [198], TAEİ yöntemiyle ER70S-6 düşük alaşımlı çelik malzeme ile gerçekleştirdikleri üretimde yatay ve dikey yöndeki numuneler için iki farklı yüklem altında yorulma çatlağının ilerleme davranışının incelenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışmaları sonucunda numune çıkarım bölgesinin çatlak ilerlemesinde büyük bir değişime sebep olmadığını, düşük yüklemde çatlak ilerleme hızının düşük olduğunu, kırık yüzey incelemelerinde ise numune yönlenmesinin mikroyapısal deformasyon mekanizmasında etkili olduğunu bulmuşlardır. 10 kN'luk yüklemde yatay numuneler sünek, dikeyler ise gevrek kırılma tipi sergilemişlerdir.

Ron vd. [199], TAEİ ile üretilmiş ER70S-6 malzemesine hava ve tuzlu su çözeltisinde yorulma testi uygulamışlar ve sonuçları kimyasal bileşimi benzer olan St37 malzemesine uyguladıkları aynı testlerle karşılaştırmışlardır. Hava ortamında uyguladıkları testlerde her iki malzeme için oldukça yakın sonuçlar elde etmişlerdir. Tuzlu su ortamında ise sonuçlar oldukça farklıdır. St37 malzemesinin yorulma dayanımını TAEİ ile üretilen parçadan yaklaşık olarak % 70 daha fazla bulmuşlardır.

Bu durumu ise TAEİ ile üretilen parçada kalıtsal olarak bulunan gözenek, ergime eksikliği ve impurite gibi etkenlerin bölgesel korozyonu hızlandırmasına ve yorulma çatlaklarının oluşumunu tetiklemesine bağlamışlardır.

Syed vd. [200], TAEİ yönteminde malzeme yığılma stratejisinin yorulma dayanımı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Salınım ve paralel üretim stratejisi kullanarak Ti6Al4V malzemesiyle üretim gerçekleştirmişlerdir. Her iki üretimde yatay ve dikey elde edilen numunelere yorulma testi uygulamışlar salınım stratejisi ile üretilen yatay numunelerde paralel olana göre daha düşük yorulma dayanımı bulmuşlardır. Paralel stratejiyle üretimde daha küçük taneli yapı elde edildiği için bu durum çatlak başlangıcına daha fazla direnç göstermiş ve böylelikle daha yüksek yorulma dayanımı elde etmişlerdir.

Wang vd. [201], TAEİ ile üretilen Ti6Al4V malzemesine SEM çemberi altında küçük çatlak büyüme davranışını inceleyen yorulma testi uygulamışlardır. Çalışmalarında yorulma testini SEM ile yerinde izlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, birçok yüklenme döngüsü boyunca mikroyapısal olarak küçük çatlakların büyüme hızının birtakım faktörlerin sinerjisine ve rekabetine bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Mikroyapı çatlakların başlamasını ve yayılmasını etkilemektedir. Kalıcı kayma bantları çatlakların başlamasını ve kayma çizgileri boyunca ilerlemesini desteklemektedir. Tane sınırları dislokasyon kayması üzerindeki bariyer etkisinden dolayı çatlak yayılmasını engellemektedir. Çatlakların dallanması ve ikincil çatlaklar, esas çatlakların büyümesini sağlayan enerjiyi dağıtmakta ve esas çatlakların büyüme hızını azaltmaktadır.

Wang vd. [202], TAEİ ile üretilmiş Ti6Al4V alaşımına uyguladıkları yorulma testinde çoğu numune için, dövme alaşımlı ana malzemeye göre daha yüksek yorulma ömrü elde etmişlerdir. Bazı numuneler ise düşük döngüde hasara uğramıştır. Bunun nedenini biriktirme sırasında besleyici telin kirliliğinden kaynaklı tutulan gaz gözeneklerine bağlamışlardır. Bu hataların görülmediği numunelerde mükemmel yorulma performansını tamamı lamelli mikroyapının oluşumuna bağlamışlardır.

Dirisu vd. [203], ER70S-6 malzemesini kullanarak TAEİ ve haddeleme ile hibrit üretim gerçekleştirmişlerdir. Haddeleme ile üretilen, sadece TAEİ ile üretilen numunelere üretildiği şekliyle yorulma testi uygulamışlardır. Haddeleme ile yorulma ömrünün iyileştiğini bu durumun haddelenmiş numunenin basma gerilmesiyle indüklenmesi sonucu yüzey dalgalanmalarının azaldığını, makro ve mikroyapının iyileşmesine bağlı olarak gerçekleştiğini belirtmişlerdir. Çalışmaları sonucunda elde ettikleri mekanik ve metalurjik sonuçlara dayanarak, haddeleme uygulaması ile imal edilen malzemenin üretilmiş haliyle mühendislik uygulamalarında kullanılabileceğine değinmişlerdir.

Literatürde TAEİ konusunda yapılan yorulma çalışmaları incelendiğinde nispeten sınırlı sayıda olduğu görülmektedir. Bu çalışmalar arasında FDM yapıların yorulma özelliklerinin araştırılması konusu da oldukça sınırlıdır. Ayrıca çalışmalarda genel olarak çekme-basma gerilme tipi yorulma testleri uygulanmıştır. Bu tez çalışmasında farklı FDM yapıların üretileceği, bu yapılara eğme gerilmeli yorulma testlerinin uygulanması ve bu testlerin ana malzeme üretimlerinin sonuçlarıyla kıyaslanması durumları çalışmayı öncekilerden farklı kılmaktadır. Çalışma sonuçlarının literatüre önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

BÖLÜM 4

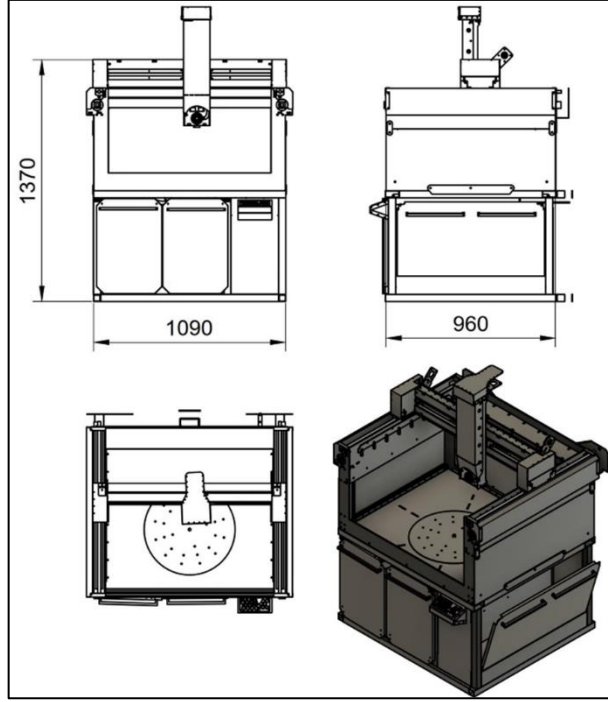
DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde öncelikle çalışmalarda kullanılan TAEİ tezgahının tasarımı ve imalatı hakkında kısaca bilgiler verilerek tezgah özellikleri anlatılmıştır. İlerleyen kısımlarda ise üretim işlemlerinde kullanılan malzemeler, kaynak parametreleri, üretim şekli, ürün grupları ve uygulanan mekanik ve metalurjik testler hakkında detaylı açıklamalar yapılmıştır.

4.1. EKLEMELİ ÜRETİM SİSTEMİ TASARIMI VE İMALATI

Bölüm 2’de anlatıldığı gibi TAEİ işlemlerinin gerçekleştirilmesi için Şekil 2.10’da örnek olarak gösterilen, kaynak torcunu hareket ettirecek makineler gereklidir. Bu çalışmada üretim işlemlerinde 219M111 numaralı TÜBİTAK 1002 projesi kapsamında tasarlanan ve üretilen TAEİ üretim sistemi kullanılmıştır. Proje konusu direkt olarak tez konusuna bağlı olmamış ancak üretim sisteminin imalatı konusunda ortak bir çalışma durumunu oluşturmuştur. Bu sebeple tezgahın imalatında yapılanlar ve tezgah özellikleri bu kısımda özet bir şekilde verilmek istenmiştir.

TAEİ konusunda ilk çalışmalara 2017-2018 yılında başlanılmıştır. İlk başlarda üretim işlemlerinde çeşitli 3B yazıcılar kullanılmıştır. Ancak bunlar daha küçük boyutlarda üretimlere izin vermekte ve hareket kabiliyeti sınırlı olarak gerçekleştirilmektedir. Büyük ölçekli üretimlerin yapılmak istenmesi ve gelişmiş bir üretim makinasına ihtiyaç duyulması sebebiyle yeni bir TAEİ tezgahı tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Tasarımı yapılan ve dış ölçüleri verilen tezgah Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. TAEİ tezgahının tasarım resmi ve dış ölçüleri.

TAEİ tezgahının üretimi tamamen Karabük Üniversitesi atölye ve laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.2’de tezgahın imalatı esnasında çekilmiş bazı resimler gösterilmektedir.



Şekil 4.2. TAEİ tezgahı imalat aşamalarından resimler.

Üretilen tezgah kaynak torcunu temelde X, Y ve Z olmak üzere 3 eksende hareket ettirebilmektedir. Torç kendi ekseninde $\pm 45^\circ$, çalışma tablası ise ekseninde 360° dönebilmektedir. Bu şekilde üretim tezgahının 5 eksende hareketi söz konusudur. Bu tezgahta ayrıca TIG eklemeli imalat için geliştirilmiş sistemler ve titanyum gibi ekstra koruyucu gaz kullanımı gerektiren malzemeler için tasarlanmış koruyucu gaz tertibatı da bulunmaktadır. Bütün eksenlerin hareketi ve diğer tüm ekipmanların çalışması bilgisayar destekli olarak gerçekleşmektedir. Üretimi tamamlanmış ve geliştirilmiş özellikler kazandırılmış tezgah kaynak ünitesi ile birlikte Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4.3. TAEİ üretim sistemi.

4.2. MALZEMELER

Çalışma konusu farklı malzeme katmanlı ürünlerin TAEİ işlemini kapsadığı için üretim işlemlerinde iki farklı kaynak teli kullanılmıştır. Bunlardan birincisi AWS standardına göre ER70S-6, çeşitli yerli üreticilere göre ise SG2 veya MG2 olarak tanımlanan düşük alaşımlı yumuşak çeliktir. Çalışmalarda kullanılan ikinci malzeme ise AWS standardına göre ER308LSi olarak tanımlanan östenitik paslanmaz çeliktir.

Bu iki tel çalışmanın devam eden kısımlarında kısaca SG2 ve 308LSi olarak ifade edilmiştir. Her iki telin çapı 1,2 mm olarak seçilmiştir. Teller Magmaweld firmasından temin edilmiştir. Tellerin temin edilen firma kataloglarından edinilen kimyasal bileşenleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. SG2 ve 308LSi telin kimyasal bileşenleri (ağırlıkça %) [204,205].

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Fe
SG2	0,07	0,9	1,45	-	-	Kalan
308LSi	0,01	0,7	1,9	20	9,5	Kalan

SG2 tel ile St37 çeliğinin benzer kimyasal içeriğe sahip olduğu ve SG2 tel ile gerçekleştirilen TAEİ ürünlerinin St37 malzemesi ile kıyaslanabileceğine gerçekleştirilen bir çalışmada değinilmiştir [206]. Benzer şekilde başka bir çalışmada SG2 tel malzemesi ile yapılan üretim yine St37 malzemesi ile kıyaslanmıştır [199]. 308L kaynak teli ile yapılan bir çalışmada ise tel malzemesinin 304L çeliğine eşdeğer olduğu ve bu tel ile yapılan TAEİ parça özelliklerinin 304L çeliği ile kıyaslanabileceği belirtilmiştir [207]. Tonelli vd. [208], 308LSi tel ile TAEİ işlemi gerçekleştirmişler ve üretilen malzemeyi 304L olarak tanımlamışlardır. Benzer yaklaşımlar referans alınarak bu çalışmada gerçekleştirilen üretimlerin mekanik özellikleri St37 ve 304L malzeme özelliklerinin literatür değerleriyle mukayese edilmiştir.

Altlık malzemesi olarak tüm üretim işlemlerinde yaklaşık 20 mm x 150 mm x 400 mm boyutlarında St37 çeliği kullanılmıştır. Bu malzemenin kimyasal içeriği Çizelge 4.2’de verilmiştir. Üretim işlemlerinden önce her bir plakanın yüzeyi zımparalanmış daha sonra kir, pas, yağ gibi olumsuz tüm içeriklerden aseton ve alkolle temizlenmiştir. Bazı plakalar yüzey düzgünlüğü açısından frezelenmiştir. Bu şekilde ilk kaynak dikişinin başarılı ve hatasız bir biçimde üretilmesi sağlanmıştır.

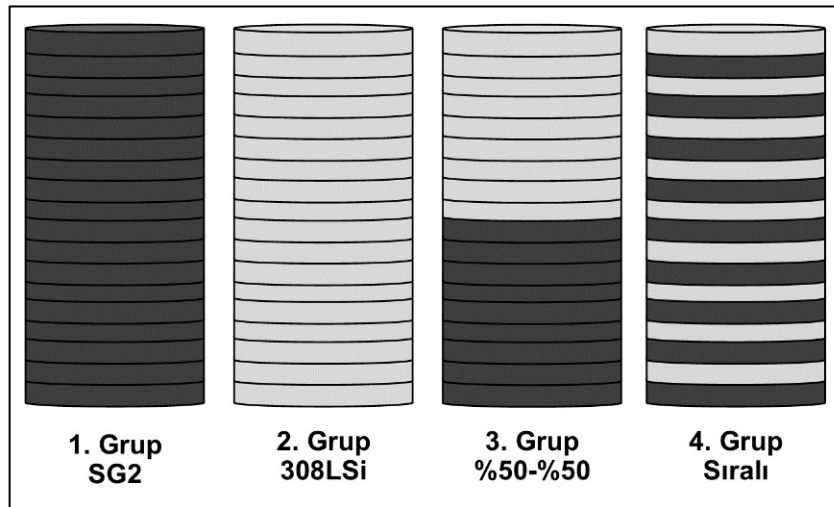
Çizelge 4.2. St37 altlık malzemesinin kimyasal bileşenleri (ağırlıkça %).

	C	Mn	Si	P	S	N	Fe
St37	0,17	1,40	0,30	0,045	0,045	0,009	Kalan

4.3. YÖNTEM VE İŞLEM PARAMETRELERİ

TAEİ işlemlerinde MIG/MAG kaynak yöntemi kullanılmıştır. Üretim işlemleri Magmaweld firmasının ID 500 MW Pulse Expert model kaynak makinasıyla yapılmıştır. Kaynak torcu için IK-501 düz boyunlu su soğutmalı otomasyon torç kullanılmıştır. Koruyucu gaz, içeriği üretimde kullanılan malzemelere göre değişkenlik gösterdiğinden iki farklı gaz olarak uygulanmıştır. SG2 tel için % 86 Ar, % 12 CO₂, % 2 O₂ karışım gazı, 308LSi teli için ise % 98 Ar ve % 2 CO₂ içeren karışım gazı kullanılmıştır. Bütün üretim işlemlerinde koruyucu gaz debisi 15 L/dk olarak ayarlanmıştır.

Üretimler 4 farklı grupta yapılmıştır. 1. grup sadece SG2, 2. grup ise sadece 308LSi tel kullanılarak üretilmiştir. 3. grup % 50 SG2-% 50 308LSi olarak tanımlanmış, bu üretim toplam katmanların ilk yarısı sırasıyla SG2 telden, diğer yarısı ise 308LSi telden üretilmiştir. 3. grup üretim çalışmalarında kısaca “% 50-% 50” olarak ifade edilecektir. 4. grup ise “sıralı” üretim olarak adlandırılmıştır. Burada üretilen katmandan sonra üretilecek diğer katmanın malzemesi değişmektedir. Örneğin ilk katman SG2, 2. katman 308LSi, 3. katman SG2, 4. katman 308LSi ... olarak devam edecek şekilde üretilmiştir. 3. ve 4. gruplar çalışma konusunu oluşturan nitelikli üretimler yani FDM kapsamına girmektedir. 4 farklı ürün grubunun imalat biçimleri Şekil 4.4’te şematik olarak gösterilmiştir.



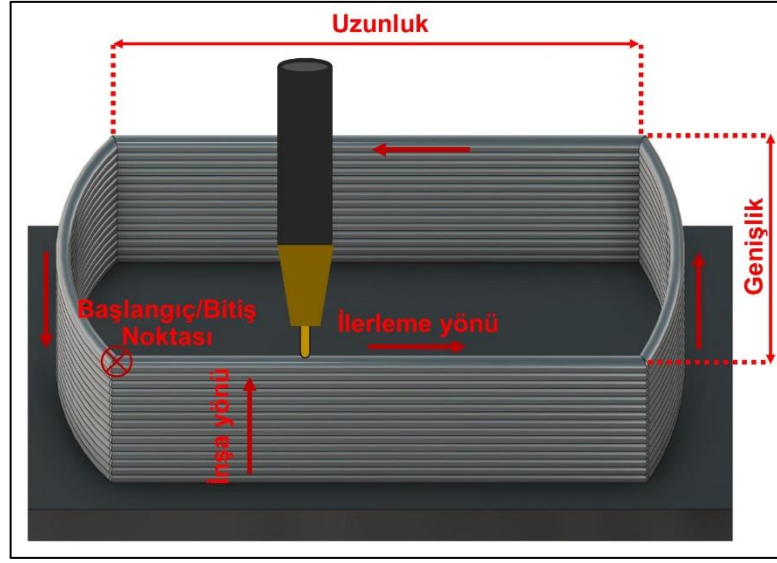
Şekil 4.4. TAEİ işlemlerinde uygulanan üretim biçimleri.

Bütün üretim gruplarında aynı tel malzemeleri için aynı kaynak parametreleri kullanılmıştır. Kaynak parametreleri seçilirken birçok ön çalışma yapılmıştır. Farklı malzemelerin birlikte kullanıldığı üretimlerde iki malzemenin yaklaşık olarak aynı dikiş genişliğine sahip olduğu parametreler seçilmiştir. Çizelge 4.3'te üretim işlemlerinde uygulanan kaynak parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Üretim işlemlerinde uygulanan kaynak parametreleri.

	SG2	308LSi
Akım (A)	105-120	100-125
Voltaj (V)	17-19	18-20
Tel Besleme Hızı (m/dk)	2	3
Kaynak Hızı (mm/dk)	150	150
Koruyucu Gaz	% 86 Ar % 12 CO ₂ % 2 O ₂	% 98 Ar % 2 CO ₂
Koruyucu Gaz Debisi (L/dk)	15	15

Üretim işlemlerinde izlenen prosedür Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Üretimler torç hareketinin başladığı ve bittiği yer aynı noktaya gelecek şekilde ayarlanmış, tüm katmanların üretimi aynı yönde devam edecek şekilde tekrarlanmıştır. İlerleme ve inşa yönü Şekil 4.5'teki gibidir. Üretilen parçalardan yapılacak testler için çıkarılan numuneler inşa yönü için dikey numune, ilerleme yönü için yatay numune olarak tanımlanmıştır. Dış ölçüleri yaklaşık 300 mm x 120 mm x 130 mm'lik boyutlara sahip olacak şekilde üretilen parçalara “stadyum şekilli” parça tanımlaması yapılmıştır.

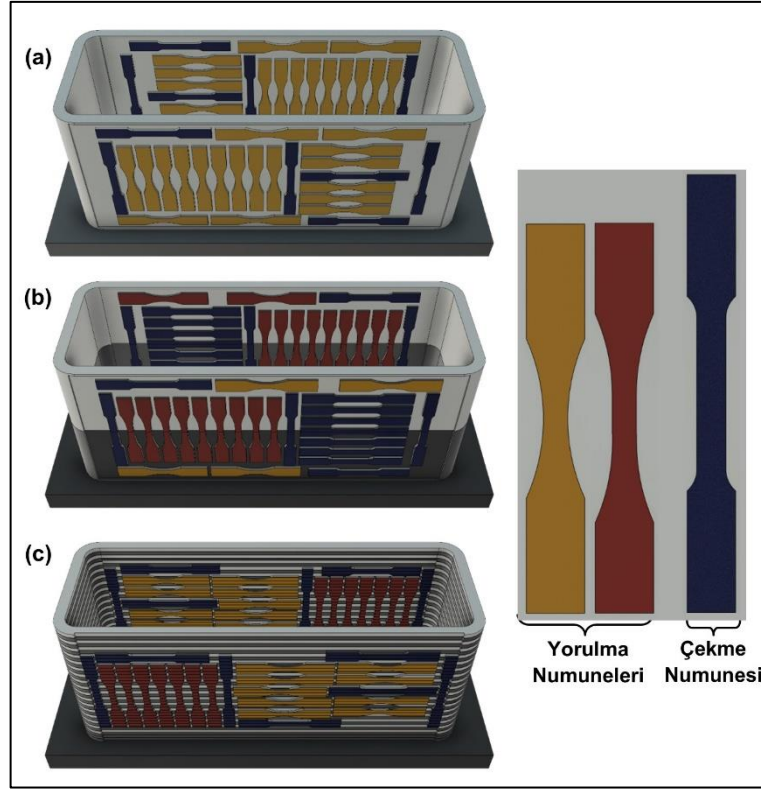


Şekil 4.5. Üretim işlemlerinde izlenen prosedür.

TAEİ işleminde katmanlar arası geçiş sıcaklığı malzeme özellikleri bakımından üretimde çok önemli bir etkidir. Tüm üretim işlemlerinde aynı şartları sağlamak için bir katman üretildikten sonra ikinci katmanın üretilmesi için, üretilmiş en son katmanın başlangıç noktasındaki sıcaklığın 90 °C-100 °C arasında bir sıcaklığa soğuması beklenmiştir. Katman sıcaklıkları başlangıç/bitiş noktasından kızılötesi termometre kullanılarak ölçülmüştür.

4.4. NUMUNE HAZIRLAMA

Üretim işlemleri tamamlandıktan sonra stadyum şekilli 4 farklı parçanın öncelikle yüzeylerinde oluşan cüruf tabakaları tel fırça kullanılarak temizlenmiştir. Bu parçalardan daha sonra deney numunesi çıkarılabilmesi için ön ve arka kısımlarında yer alan geniş bölgeler frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra numune sayılarının diğer testlere göre çok daha fazla olması sebebiyle çekme ve yorulma numuneleri tel erozyon kesim işlemi ile elde edilmiştir. Bu deney numunelerinin üretilen parçalar üzerinden çıkarılan kısımları ve kesim işlemlerinde izlenen prosedür Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Şekil 4.6'da; a) 1. ve 2. grup, b) 3. grup ve c) 4. grup üretilen parçadan çıkarılan numuneleri göstermektedir.



Şekil 4.6. Çekme ve yorulma numunelerinin üretilen parçalar üzerinden çıkarımı.

Çentik darbe ve eğme numuneleri tel erozyon ile kesilen parçadan kalan boşluklardan ve stadyum şekilli esas parçanın yan kısımlarından çıkarılmıştır. Bu numuneler sulu hassas numune kesme makinesiyle kesilip frezeleme ile son ölçülerini almıştır.

Tüm numuneler elde edildikten sonra üzerinde sonradan meydana gelen kir, pas gibi olumsuz etkenlerin giderilmesi ve deneylere uygun numune yüzeylerinin elde edilmesi için zımparalama ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Tüm işlemlerin sonucunda numunelerin yaklaşık 2,5 mm kalınlığında olması sağlanmıştır. Çekme ve yorulma numunelerinin sayısının fazla olması sebebiyle Şekil 4.7’de gösterilen isimlendirme prensibi uygulanmıştır. Buna göre örneğin “2YD-8” olarak tanımlanan numune: 308LSi malzemesiyle üretilen parçadan dikey yönde çıkarılan 8. yorulma numunesini ifade etmektedir.

Grup No	Test Türü	Yönlenme	Numune No
1: SG2 2: 308LSi 3: %50-%50 4: Sıralı	C: Çekme Y: Yorulma	D: Dikey Y: Yatay	C: 1...6 Y: 1...18

Şekil 4.7. Çekme ve yorulma numunelerini isimlendirme prensibi.

Metalografi çalışmalarında kullanılan numunelerin elde edilmesi için şerit testere ve hassas numune kesme makineleri kullanılmıştır. Numuneler üretilen parçaların karakteristik özelliğini yansıtacak bölgelerden çıkartılmıştır.

4.5. KİMYASAL İÇERİK BELİRLEME

4 farklı grup olarak üretilen parçalar ve altlık olarak kullanılan parça üretim işlemi sonrası sahip oldukları kimyasal içeriklerinin belirlenebilmesi için alt, orta ve üst bölgelerinden optik emisyon (OE) testine tabi tutulmuşlardır. Bu şekilde malzeme içerikleri belirlenmiş ve esas tel ile mukayese edilerek ağırlıkça (%) element içerikleri değerlendirilmiştir. OE testi ilk 3 üretim grubunda esas malzemeler için uygulanmıştır. 4. grupta ise çok fazla ara yüzey olması ve ölçümün istenilen bölgeden yapılamayacağı sebebiyle, bu grup üretim için OE çalışması yapılmamıştır. OE çalışmalarında kullanılan cihaz Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. OE test cihazı.

4.6. MAKRO YAPI ÇALIŞMALARI

Stadyum şekilli üretilen parçaların katman dizilimleri, düzgünlüğü ve biçimi gibi durumlar değerlendirilmiştir. Sonrasında üretilen her bir parça en üst kısmından altlığa kadar inşa yönü boyunca kesilerek dikiş formları incelenmiş, genişlikleri, yükseklikleri ve kalınlıkları ölçülmüştür. 3. ve 4. grup farklı malzeme katmanlı ürünlerde meydana gelen ara yüzey katman oluşumları da değerlendirilmiştir.

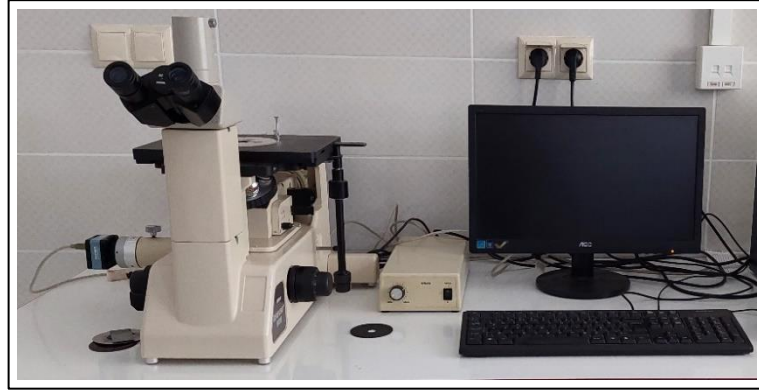
4.7. XRD VE MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

Üretilen parçaların faz durumlarının değerlendirilmesi için XRD (X-ray diffraction: X ışını kırınımı) çalışmaları gerçekleştirilmiştir. XRD analizi için tamamı tek malzeme içeren 1. ve 2. grup parçaların orta bölgelerinden 1'er adet numune alınmıştır. 3. grup üretimde numuneler ara yüzeyi içeren bölgeden ve iki esas malzemeden olmak üzere 3 farklı kısımdan alınmıştır. 4. grup için alınan numuneler de benzer şekilde üretilen parçanın orta kısmından alınmıştır. Bu kısımda ise ara yüzey ve ara yüzeye yakın olan esas malzemelerin orta noktalarından ölçüm yapılmıştır. XRD çalışmalarında toplamda 8 ölçüm sonucu elde edilmiş ve gerekli görünenler birbirleriyle kıyaslanabilmesi için farklı sonuç grafikleri oluşturulmuştur. XRD çalışmalarında Rigaku Ultima IV cihazı kullanılmıştır.

TAEİ yöntemiyle üretilmiş 4 farklı ürün grubunun önemli bölgeleri belirlenerek numuneler alınmış ve mikroyapı çalışmaları için kullanılmıştır. Özellikle iki farklı tel malzemesiyle gerçekleştirilen üretimlerde ara yüzey incelemeleri için hassas bir şekilde çalışılmıştır. 1. ve 2. grup üretimlerin inşa yönünün alt, orta ve üst kısmı genel olarak incelenmiştir. 3. ve 4. grup üretimlerde ise farklı iki malzemenin ara yüzeyleri için önemli görünen kısımlar çalışmalara dahil edilmiştir.

Mikroyapı incelemeleri için kullanılan numuneler öncelikle standart zımparalama, parlatma ve dağlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Numuneler sırasıyla 120, 200, 400, 800, 1200, 1500 ve 2000 sulu kum zımpara kağıtlarıyla zımparalanmıştır. Parlatma işlemleri için parlatma keçesiyle birlikte sırasıyla 6 µ ve 1 µ boyutunda elmas pastalar kullanılmıştır. Dağlama işlemleri farklı süreçlerde gerçekleştirilmiştir. 1.

gruptan alınan düşük karbonlu çelik numuneler % 2 nital çözeltisiyle 10 sn boyunca, 2. gruptan alınan paslanmaz çelik numuneler ise % 10 oksalik asit çözeltisinde 15 sn'lik periyotlarda yaklaşık 60 sn elektrolitik dağlama işlemlerine tabi tutulmuştur. Her iki farklı malzemenin birlikte kullanıldığı 3. ve 4. grup numuneler birleşme ara yüzeyi içerdiğinden ara yüzeye yakın kısımlar dağlama işlemleri için farklı davranış sergilemişlerdir. Bu kısımlar % 2 nital çözeltisi ile dağlanamamıştır. Özellikle 4. grup sıralı üretimde dağlama işlemleri kolay olmamış tekrarlı birçok çalışma yapılmıştır. Ara yüzeye yakın kısımlar % 4-5 arasında nital çözeltisiyle bölgesel olarak dağlanmıştır. Dağlama işlemlerinden sonra mikroyapı incelemeleri Şekil 4.9'da gösterilen Nikon Epiphot 200 marka ve model optik mikroskopla yapılmıştır.

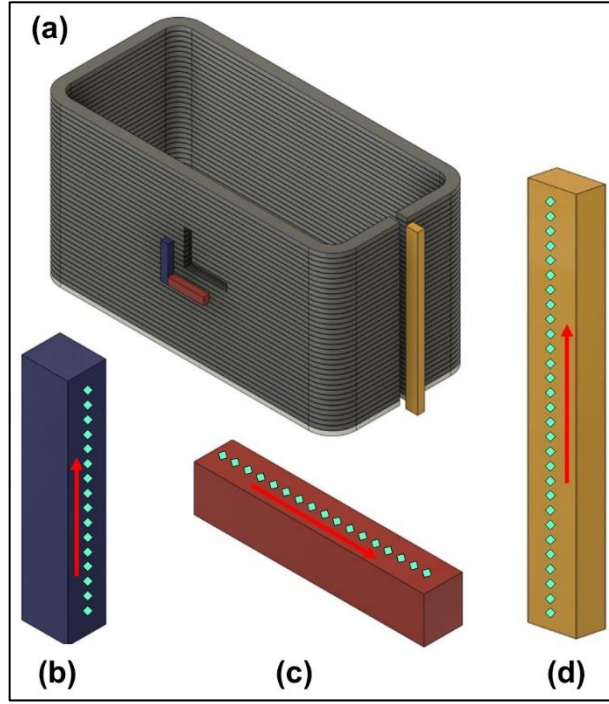


Şekil 4.9. Optik mikroskop.

4.8. SERTLİK TESTİ

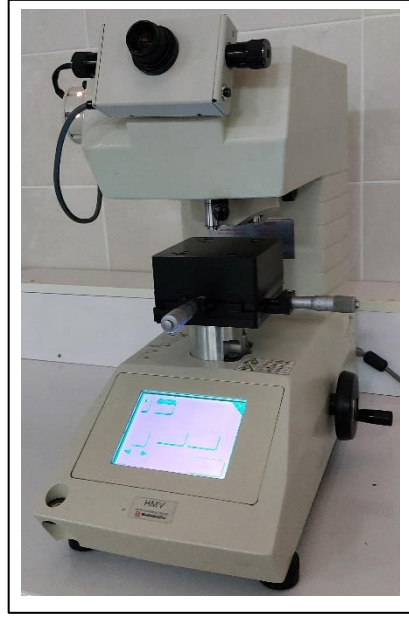
Sertlik ölçümlerinde öncelikle her bir üretilen parçanın inşa yönünden bir bütün olarak alınan kesit numuneleri kullanılmıştır. Altlık kısmından başlanılarak inşa yönü boyunca üretilen parçanın üst noktasına kadar neredeyse tüm katmanları kapsayacak şekilde sertlik ölçümleri yapılmıştır. 4. grup farklı malzemeli üretimin bulunduğu numunede tüm katmanların merkezi ile ara yüzeye yakın kısımların ölçümleri alınmıştır. Yapılan kesit sertlik ölçümleri ayrıca üretilen parçaların frezelenen orta kısımlarından alınan numunelere uygulanan sertlik ölçümleriyle kıyaslanarak desteklenmiştir. Orta noktadan alınan ölçümlerde 1. ve 2. grup üretimlerin yatay ve dikey numuneleri 3. ve 4. grupların ise sadece dikey yönde olanları kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri alınan noktalar Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Şekil 4.10 a) sertlik

numunelerinin parça üzerindeki konumlarını, b) dikey yönde çıkarılan numune ve ölçüm yüzeyini, c) yatay numune ve ölçüm yüzeyini ve d) ise tamamı parçanın kaynak pasolarından oluşan kesiti numune ve ölçüm yüzeyini temsil etmektedir. Tüm üretim gruplarında dikey ve kesit kısımlarının sertlik ölçümleri alınmıştır. Yatay ölçümler ise sadece 1. ve 2. grup üretilere uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri kesitlerin orta noktalarında bir çizgi şeklinde devam edilerek alınmıştır.



Şekil 4.10. Sertlik ölçüm bölgeleri ve ölçüm alınan yüzeyler.

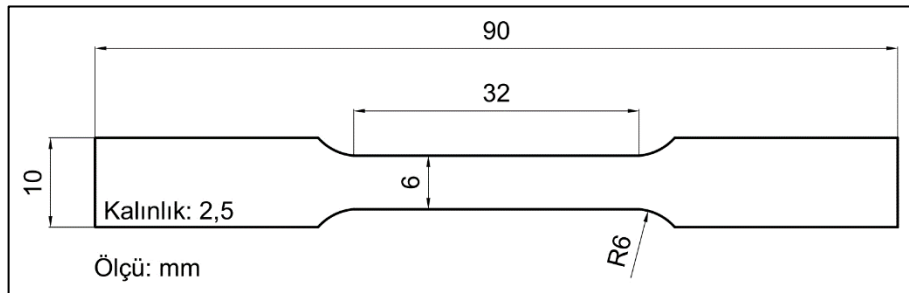
Mikro sertlik ölçümleri Şekil 4.11’de gösterilen Shimadzu HV 200 cihaz ile Vickers yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde 500 g yük uygulanmış, bekleme süresi 10 sn seçilmiştir.



Şekil 4.11. Sertlik ölçümünde kullanılan cihaz.

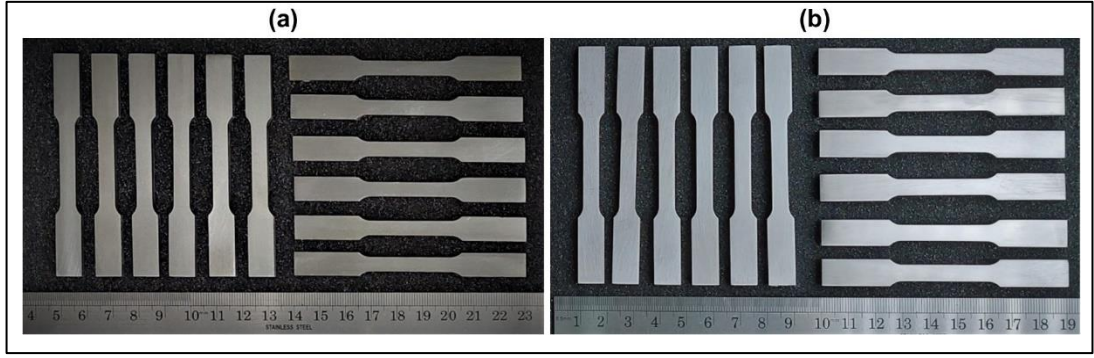
4.9. ÇEKME TESTİ

Çekme numunelerinin uygulandığı parça bölgeleri Şekil 4.6'da gösterilmektedir. Çekme test numuneleri ASTM E8M standardında belirlenen ölçülere göre hazırlanmıştır. Çekme numunelerinin boyutları Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



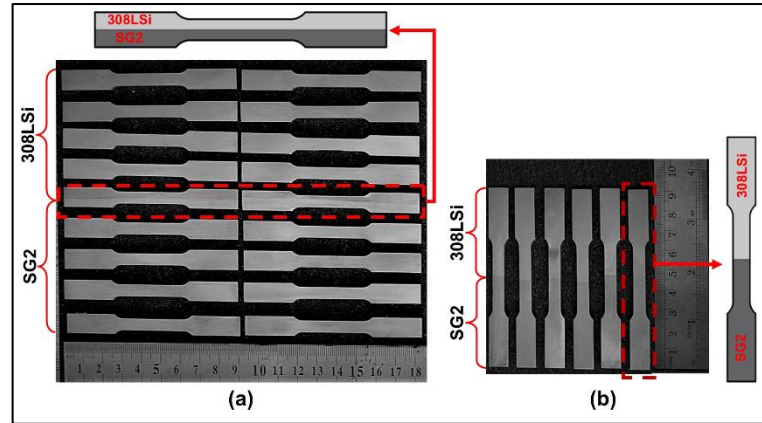
Şekil 4.12. Çekme numunesi boyutları.

1. ve 2. grup tamamı aynı malzeme içeriğine sahip parçalar için yatay ve dikey konumlarda 6 şar adet çekme numunesi çıkarılmıştır. Şekil 4.13'te a, 1. grup ve b, 2. grup çekme numuneleri gösterilmiştir.



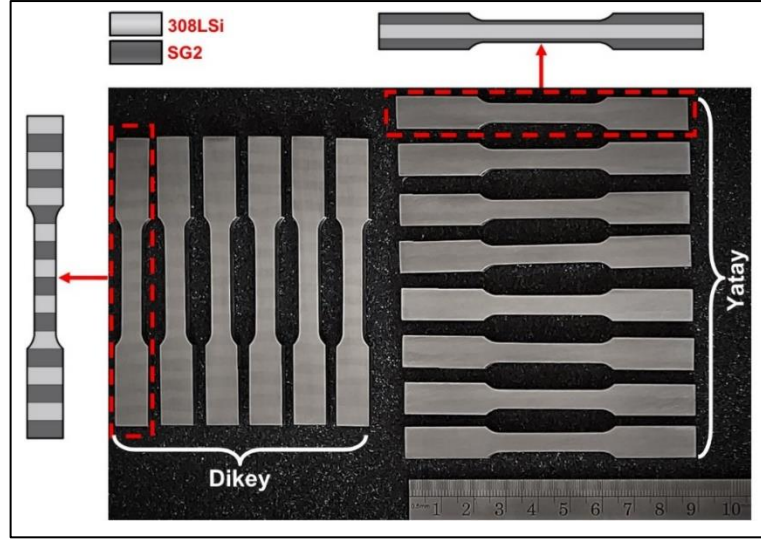
Şekil 4.13. Grup (1 ve 2) çekme test numuneleri.

İlk yarı kısmına kadar SG2 ve diğer yarısı 308LSi tel içeren 3. grup üretilen parçadan çıkarılan numuneler Şekil 4.14'te gösterilmektedir. Şekil 4.14 a) yatay ve b) ise dikey numunelerdir. 3. grup üretimden 6 adet dikey, 18 adet yatay çekme numunesi çıkarılmıştır. Yatay numuneler orta kısım hariç ilk katmandan son katmana kadar inşa yönünde sırasıyla aynı malzeme içerikli olacak şekilde çıkartılmıştır. Orta kısımda ise iki malzemenin birleşme ara yüzeyi bulunmaktadır. Bu kısımdan çıkarılan numunelerde ara yüzeyin, çekme numunesinin boyunca uzanan eksen üzerinde kalacak şekilde olması sağlanmıştır.



Şekil 4.14. Grup (3) çekme testi numuneleri.

Şekil 4.15'te iki farklı tel ile sıralı katman şeklinde üretilen 4. grup üretimden çıkarılan numuneler gösterilmektedir. Bu gruptan 6 adet dikey 8 adet yatay çekme numunesi hazırlanmıştır. Dikey numuneler Şekil 4.15'te gösterildiği gibi birçok ara yüzeyden yataylar ise genel olarak numune boyunca uzanan birden fazla ara yüzeyden oluşmaktadır.



Şekil 4.15. Grup (4) çekme testi numuneleri.

Çekme testleri 50 kN kapasiteli Shimadzu marka cihazla gerçekleştirilmiştir. Çekme testinin uygulandığı makine Şekil 4.16’da gösterilmektedir. Çekme hızı sabit olarak 2 mm/dk uygulanmış testler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.



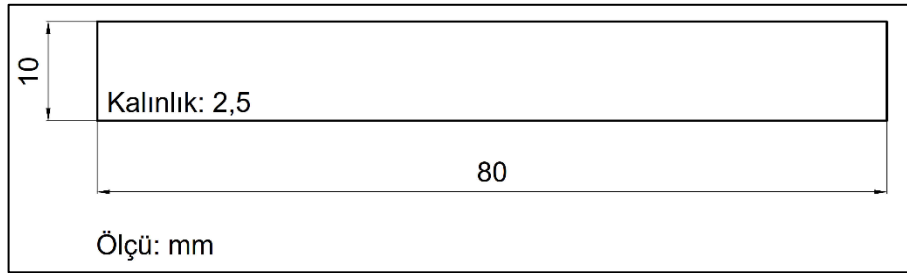
Şekil 4.16. Çekme test makinesi.

Çekme testi sonrası her gruptan genel karakteristik özellikleri yansıtabilecek olan kırık yüzeyler SEM ile incelenmiştir. Bu işlem için her bir grupta bulunan dikey ve yatay

numunelerden birer adet seçilmiştir. Kırık yüzeyin detaylı analizini yapabilmek için EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy) çalışmaları da yapılmıştır.

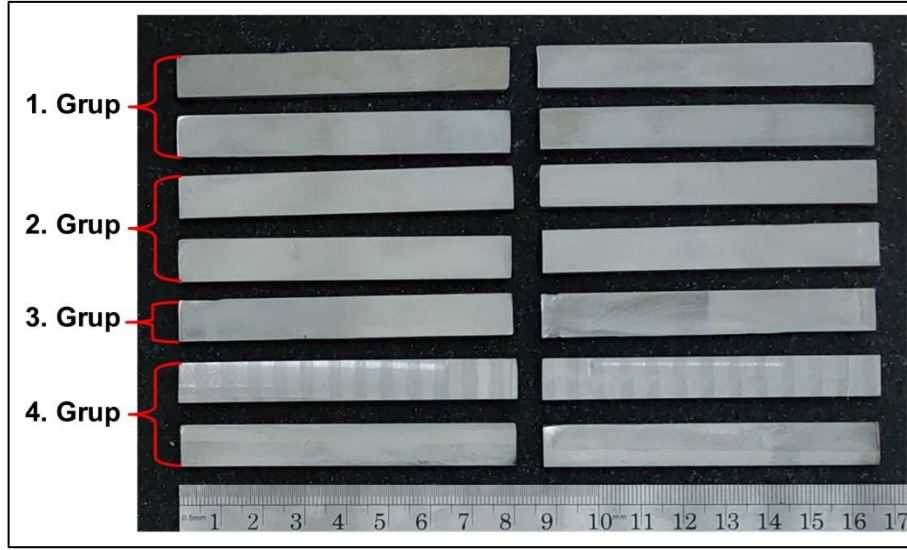
4.10. EĞME TESTİ

TAEİ yöntemi ile üretilmiş 4 farklı grup parçanın eğilme karşısındaki tutumlarını belirlemek için, kaynaklı imalat ile üretilmiş bağlantılara uygulanan eğme testine benzer test uygulanmıştır. Burada amaç 180° eğme karşısında yatay ve dikey olarak çıkarılan numunelerde herhangi bir hasarın olup olmayacağını belirlemektir. Eğme testleri 1. ve 2. grup parçalardan yatay ve dikey yönde 2 şer adet, 3. grup parçadan dikey yönde 2 adet ve 4. grup parçadan yatay ve dikey yönde 2 şer adet olmak üzere toplam 14 adet numuneye uygulanmıştır. Eğme testinde kullanılan numune boyutları Şekil 4.17’de verilmiştir.



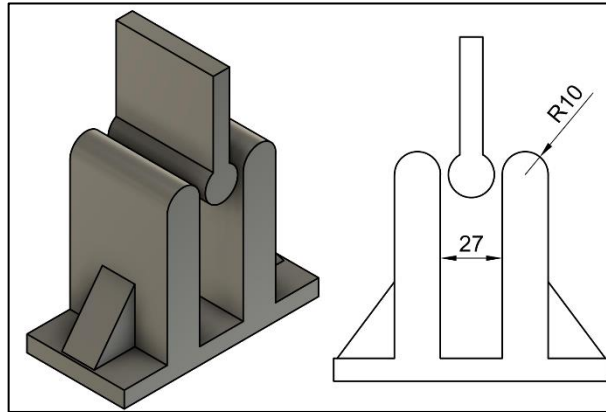
Şekil 4.17. Eğme test numune boyutları.

4 farklı üretim grubu için elde edilen eğme test numuneleri ise Şekil 4.18’de gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Eğme test numuneleri.

Eğme testleri 100 ton kapasiteli hidrolik presle Şekil 4.19’da tasarımı ve bazı ölçüleri gösterilen kalıp kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kalıp tasarlanan ölçülerde çalışmalar için özel olarak üretilmiştir. Eğme esnasında herhangi bir yük büyüklüğü belirlenmeksizin, kalıp arasına sıkıştırılan test parçası 180° eğilene kadar pistonun düşey yönde hareketiyle eğme işlemine tabi tutulmuştur.

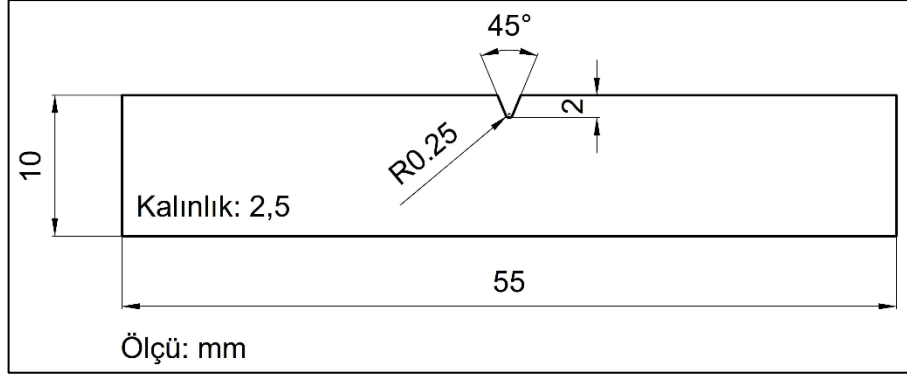


Şekil 4.19. Eğme testinde kullanılan kalıp ve ölçüleri.

4.11. ÇENTİK DARBE TESTİ

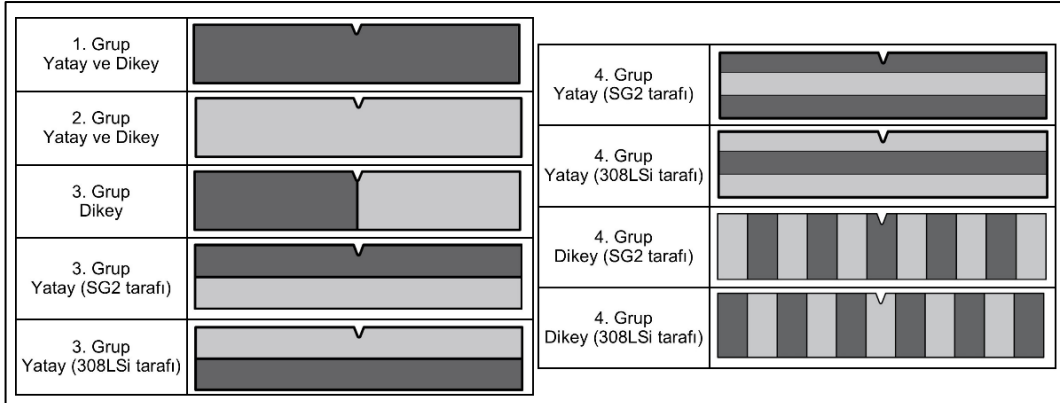
Üretim işlemleri gerçekleştirilmiş 4 farklı TAEİ parçasının darbeli yüklenmeler altındaki davranışlarını ve kırılma enerjisini belirlemek için edinilen numunelere

çentik darbe testleri uygulanmıştır. Diğer mekanik testlerde olduğu gibi yatay ve dikey yönde numune çıkarımı bu testte de uygulanmıştır. 1. ve 2. grup üretimlerden yatay ve dikey yönde 2 şer adet, 3. grup parçadan yatayda 4 dikeyde 2 adet ve 4. grup üretimden yatayda 4 dikey de 4 adet olmak üzere toplam 22 adet çentik darbe numunesi çıkarılmıştır. Numune boyutları Şekil 4.20’de verilmiştir.



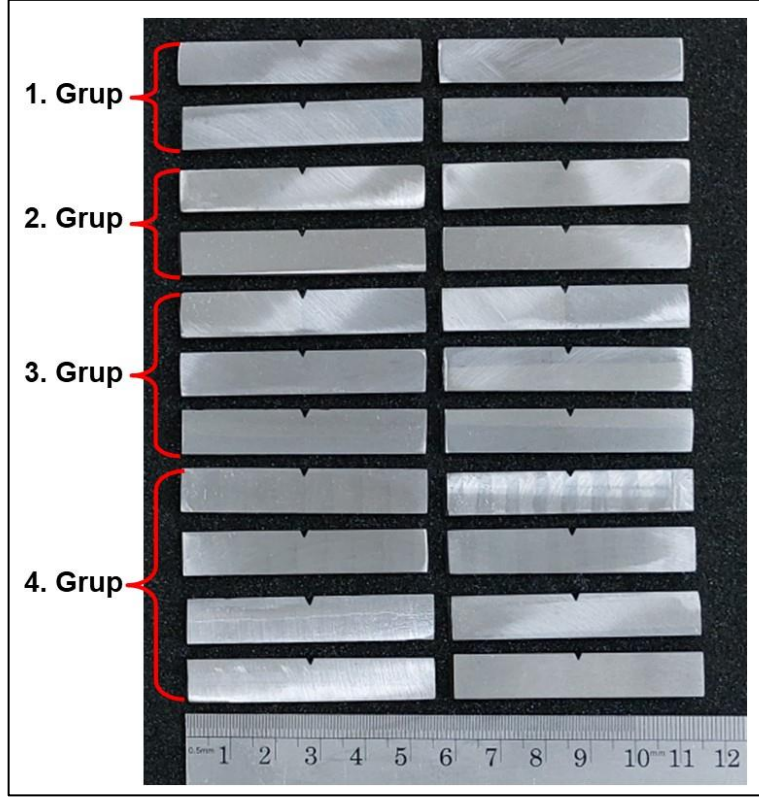
Şekil 4.20. Çentik darbe numune boyutları.

Tüm üretim gruplarının çentik darbe numune tipleri daha iyi anlaşılması için Şekil 4.21’de örneklendirilmiştir.



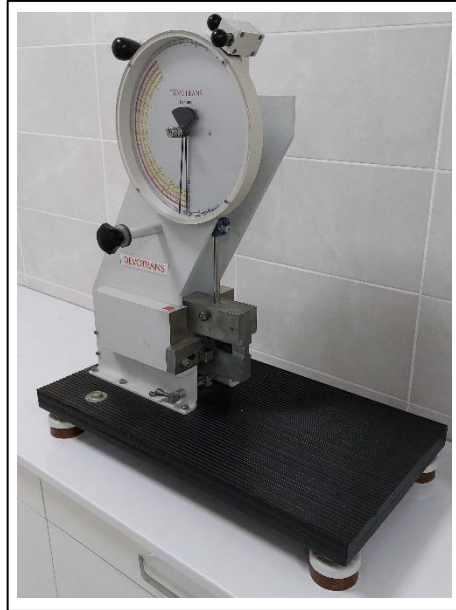
Şekil 4.21. Çentik darbe numune tipleri.

TAEİ yöntemiyle üretilen 4 farklı grup parçadan çıkarılan çentik darbe test numuneleri Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Çentik darbe test numuneleri.

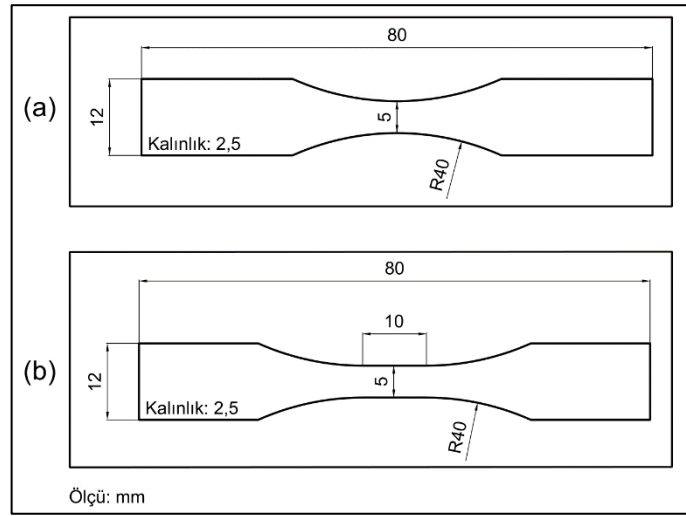
Çentik darbe deneylerinde 48 J kapasiteli Şekil 4.23'te gösterilen Devotrans marka cihaz kullanılmış tüm testler oda sıcaklığında yapılmıştır.



Şekil 4.23. Çentik darbe test cihazı.

4.12. YORULMA TESTİ

TAEİ yöntemiyle üretilmiş 4 farklı gruptaki parçalardan edinilen numuneler yorulma testlerine tabi tutulmuştur. Yorulma test numuneleri ASTM E466-15 standardında belirlenen boyutlara göre hazırlanmıştır. Çalışmalarda iki farklı tip yorulma numunesi kullanılmıştır. Bunlardan birincisi ve testlerde en çok kullanılanı Şekil 4.24 a'da gösterilen test bölgesi sürekli olarak yuvarlatılmış numunedir. Bu numunede test esnasında yükleme tek bir çizgi üzerine yoğunlaşmaktadır. Diğeri ise test bölgesi içerisinde tek biçimli düz alan içeren Şekil 4.24 b'de gösterilen numune tipidir. Burada ise yükleme test bölgesinde dağıtılmış bir çizgi üzerinde olacaktır. Bu şekilde numunelerle iki malzemenin birlikte kullanıldığı üretimde bir ve birden fazla ara yüzey içeren bölgelerin yorulma yükü altındaki davranışları tespit edilebilecektir. Yorulmayla meydana gelecek kırılmanın hangi malzeme tarafında gerçekleşeceği ikinci tip numuneyle daha kolay anlaşılacaktır. İkinci tip düz alan içeren numuneler, birleşme ara yüzeyi içeren 3. ve 4. grup dikey numunelere uygulanmıştır.

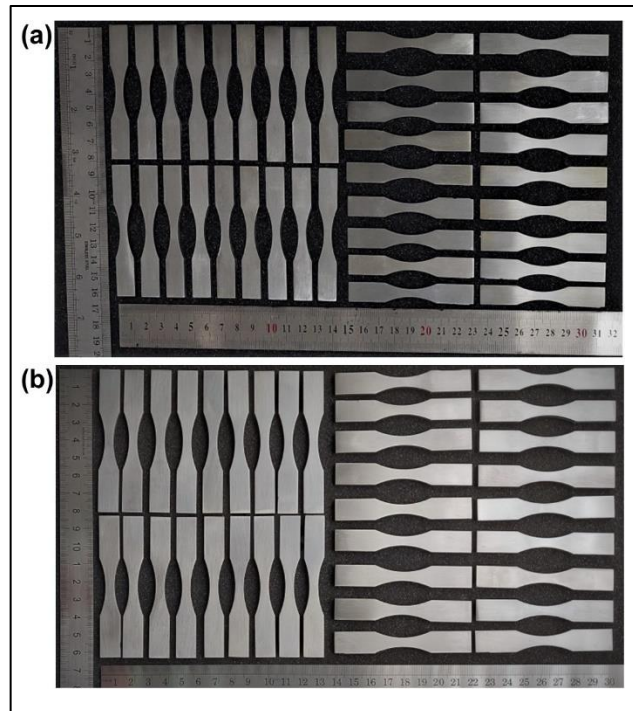


Şekil 4.24. Yorulma test numune ölçüleri.

1., 2. ve 4. grup parçalardan Şekil 4.6'da gösterildiği gibi hem dikey hem de yatay kısımlardan yorulma numuneleri çıkarılmıştır. 3. grupta yer alan % 50-% 50 nitelikli üretim için sadece dikey kısımdan yorulma numunesi çıkarılmıştır. Bunun sebebi yataydan çıkarılacak numunelerin çoğunun tek malzeme tipli olacağı içindir. Ara yüzeyli yatay numuneler için çok sayıda parça veya farklı şekilde üretilmiş parçalar

gerektiğinden 3. grup üretimlerde ara yüzeyi kapsayan yatay yönde yorulma numunesi çıkarılmamıştır. Ancak düşük karbonlu çelik ve paslanmaz çeliğin yer aldığı en üst ve en alt bölgedeki uç kısımlar tek malzemeli yapılar oldukları için 1. ve 2. gruptaki yorulma numunelerine yedek olması açısından, bu kısımlardan 4'er adet ek yorulma numunesi çıkarılmıştır. Özetlemek gerekirse; 1., 2., ve 4., gruptan yatay ve dikey olmak üzere 6 farklı yorulma test grubu, 3. gruptan sadece dikey olmak üzere toplamda 7 farklı numune grubu oluşturulmuştur. 4. grup üretimden dikey yönde 14 adet numune alınmıştır. Bunun dışında kalan diğer tüm test gruplarından 18 adet deney numunesi elde edilmiştir. Toplamda $18 \times 6 + 14$ olmak üzere 122 adet yorulma numunesi teste tabi tutulmuştur.

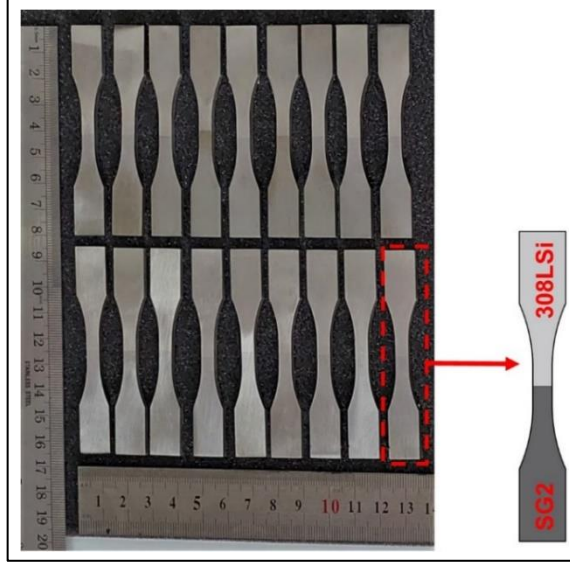
Şekil 4.25'te a) 1. grup ve b) 2. grup yatay ve dikey yönden çıkartılmış yorulma numuneleri gösterilmiştir. Bu grup parçalar tamamen tek tür malzemeden oluştuğu için yorulma numuneleri Şekil 4.24 a'da gösterilen tipte çıkarılmıştır.



Şekil 4.25. Grup (1 ve 2) yorulma test numuneleri

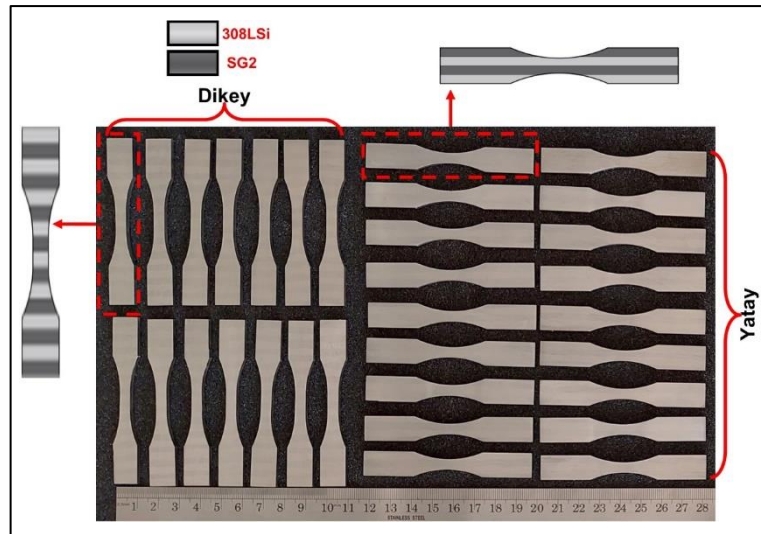
Şekil 4.26'da 3. grup üretimden çıkartılan yorulma numuneleri gösterilmektedir. Daha önceden belirtildiği gibi bu grup için sadece dikey yönde çıkartılmış numuneler test

edilecektir. Yorulma sonucu hasarın hangi parça tarafından veya ara yüzeyden gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirlemek için bu numuneler düz alan içeren tipte çıkarılmıştır.



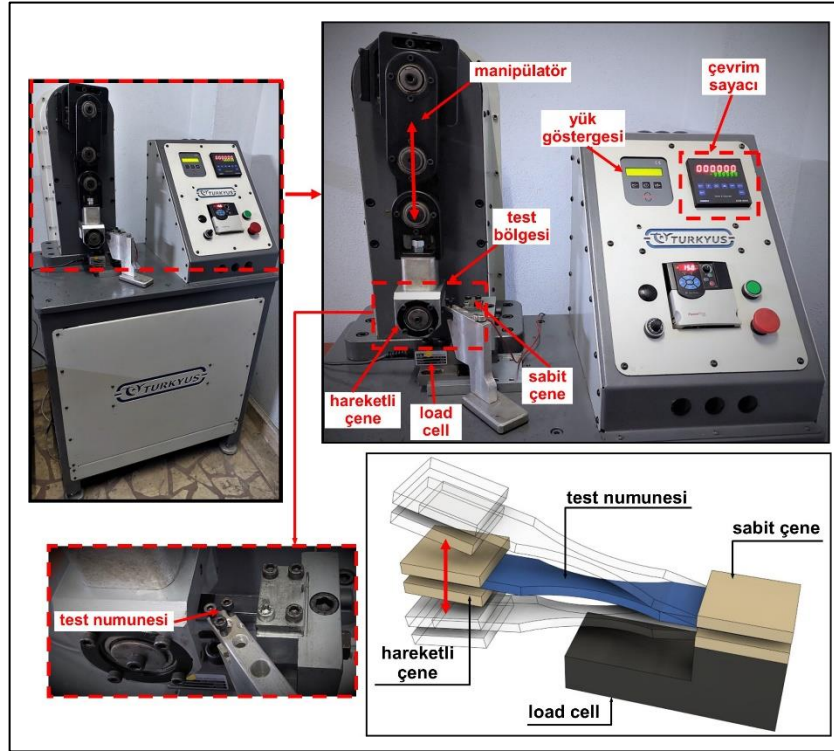
Şekil 4.26. Grup (3) yorulma test numuneleri.

4. grup parçadan çıkarılan yorulma numuneleri Şekil 4.27’de gösterilmektedir. Dikey numuneler görüldüğü gibi numune boyunca enine birçok ara yüzey içermektedir. Yatay numuneler de dikeye göre daha az sayıda olmakla beraber numune boyunca uzanan birkaç ara yüzeyden meydana gelmektedir.



Şekil 4.27. Grup (4) yorulma test numuneleri.

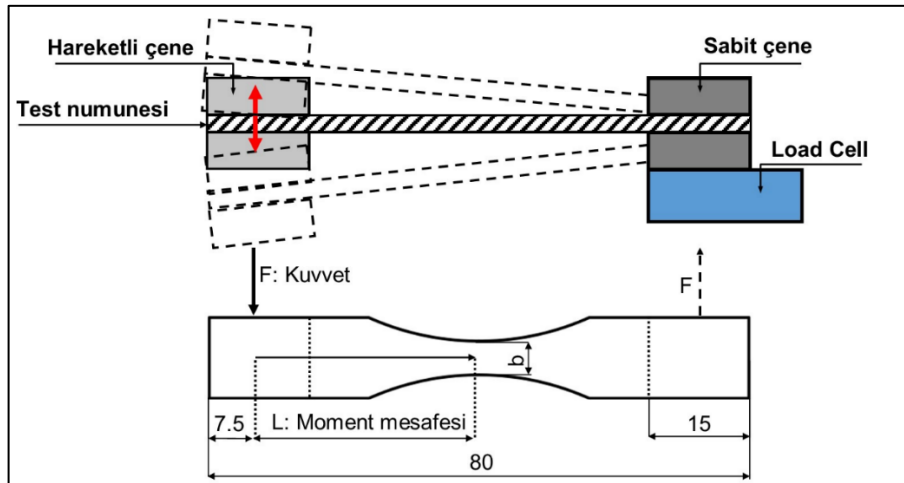
Yorulma deneyleri daha önceden özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş bir makineyle gerçekleştirilmiştir. Bu makineyle sac/levha şeklinde numuneler değişen genlik değerlerinde eğilmeli yorulma işlemine tabi tutulabilmektedir. Makinede yer alan yük hücresi (load cell) ile parçaya yorulma esnasında tesir eden yük ve makine üzerinde bulunan sayaç ile yorulma çevrim sayısı hesaplanabilmektedir. Yük hücresi tarafından okunan değerler, zamana bağlı olarak makine yazılımıyla bilgisayar üzerinden görülebilmekte ve kuvvet-zaman verileri kaydedilebilmektedir. Ayrıca test sonunda yazılım tarafından test boyunca kaydedilen kuvvet-zaman grafiği edinilebilmektedir. Yorulma deneylerinde yük hücresinden okunan değer ile numune üzerine gelen yorulma gerilmesi hesaplanmıştır. Döngü sayısı direkt olarak uygulanan gerilme değerine tekabül eden yorulma ömrü olarak kullanılmıştır. Şekil 4.28’de yorulma testlerinin yapıldığı makine ve kısımları gösterilmektedir.



Şekil 4.28. Yorulma test makinesi ve kısımları.

Yorulma deneyleri 4. grup dikey hariç bütün üretim gruplarında 6 farklı gerilme genliği değerinde uygulanmış ve her bir gerilme genlik değeri test edilirken 3'er adet numune kullanılmıştır. İstisna olarak 4. grup üretimin dikey kısmında 7 farklı genlik değerinde 2 şer adet numune test edilmiştir. Deneylerde uygulanacak gerilme genlik

değeri seviyelerini belirlemek için bir takım ön çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda ticari olarak temin edilen St37 sacdan, aynı koşullarda yorulma test numuneleri oluşturulmuştur. Bu numunelere uygulanan birkaç testle TAEİ ile üretilmiş parçalara yorulma testlerinde uygulanması gereken gerilme genliği seviyesinin aralığı belirlenmiştir. Yorulma genel olarak bir malzemenin σ_{ak} değerinin altında tekrarlı yüklemeye maruz bırakılması sonucu meydana geldiği için uygulanması gereken genlik değerlerinin σ_{ak} değerinin altında olması gerekir. St37 malzemeli ön çalışma numunelerine σ_{ak} değerinin altında uygulanan yüklemelerde yorulma ömürlerinin genellikle 10^5 mertebeleri ve üzerinde olduğu görülmüştür. TAEİ ile üretilmiş parçalarda ise 10^4 seviyelerine tekabül eden gerilme genliği ve ömür değerlerini değerlendirebilmek için testlerde uygulanan gerilme değerlerinde değişen test gruplarına göre akma sınırının üzerine çıkıldığı durumlar olmuştur. Akma değerinin belirlenmesinde ise tüm testler için SG2 tel ile üretilen 1. grup parçanın çekme deneyinden elde edilen veriler referans alınmıştır (≈ 360 MPa). Tüm deneylerde yorulma hızı 10 Hz olarak belirlenmiştir. Numunelerin yorulma testi sonucu gerilme hesaplamalarında makine verisinden alınan kuvvet değerleri kullanılmıştır. Şekil 4.29'da yorulma numunesinin test makinasına bağlanmasında izlenen prosedür ve önemli mesafeler gösterilmektedir.



Şekil 4.29. Yorulma test numunesinin bağlanmasında izlenen prosedür.

Gerilme hesaplamalarında; tek taraftan sabitlenmiş dikdörtgen kesitli bir kirişe tesir eden kuvvetin meydana getirdiği eğme gerilmesi prensibi kullanılmıştır. Buna göre eğme gerilmesi aşağıdaki formülle hesaplanmıştır [209,210].

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot L}{\frac{b \cdot h^2}{6}} = \frac{6 \cdot F \cdot L}{b \cdot h^2} \quad (4.1)$$

Burada;

σ : Gerilme (MPa)

M: Eğilme momenti

W: Mukavemet momenti

F: Kuvvet (N)

L: Maksimum gerilmenin olduğu mesafe (mm)

b: Numune genişliği (mm)

h: Numune kalınlığı (mm)'dir.

Örnek gerilme hesabı: Numune kalınlığının 2,5 mm, genişliğinin 5 mm, load cell'den okunan kuvvet değerinin 52 N, olduğu durumda Şekil 4.29'da gösterilen numune ve bu numunenin bağlama şartlarında orta bölgesine gelen gerilme değeri eşitlik 4.1'den:

$$\sigma = \frac{6 \cdot 52 \cdot (40 - 7,5)}{5 \cdot 2,5^2} \cong 324,5 \text{ MPa}$$

olarak hesaplanmıştır.

Bu hesaptan yola çıkarak yorulma testine tabi tutulan tüm numunelerin uygulanan kuvvet değerine göre maksimum gerilme değerleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda kullanılan değerler sonuçlar kısmında çizelge halinde verilmiştir. Yorulma deneyi sonuçlarının değerlendirilmesinde her bir numunenin S-N sonucunun grafik üzerinde gösterilmesinin yanı sıra, birbirine çok yakın yükleme seviyesinde tekrarlanan numune sonuçlarının ortalama değerleri göz önüne alınmıştır. Grafikler değer olarak yakınlık arz eden farklı test gruplarıyla tekrar çizilerek kıyaslanmıştır.

Çekme testinde olduğu gibi yorulma deneyi sonrası her gruptan genel karakteristik özellikleri yansıtabilecek olan kırık yüzeyler SEM ile incelenmiştir. Bu işlem için her bir grupta bulunan dikey ve yatay numunelerden birer adet seçilmiştir. Kırık yüzeyin detaylı analizini yapabilmek için EDS çalışmaları yapılmıştır.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde çalışma kapsamında öncelikle üretilen parçalar ve boyutları hakkında bilgiler verilmiş, daha sonra her bir parçadan elde edilen numunelere uygulanan testlerin sonuçları anlatılmıştır. Sonuçlar, uygulanan deneylere göre genel olarak her bir üretim grubu için ayrı alt başlıklar altında açıklanmıştır. Gerekli durumlarda son alt başlık oluşturulmuş, bu başlık altında tüm üretim grupları için elde edilen sonuçların birlikte değerlendirilmesi yapılmıştır.

5.1. ÜRETİLEN PARÇALAR VE MAKRO YAPI

5.1.1. 1. Grup (SG2) Parça Makro Yapısı

Şekil 5.1’de üretim işlemi tamamlanmış ve yüzeyleri temizlenmiş tamamı düşük alaşımlı SG2 tel ile üretilen 1. grup parçanın farklı açılardan resmi gösterilmektedir. Parça 49 katmandan oluşmakta, genişliği yaklaşık 315 mm ve toplam yüksekliği yaklaşık 130 mm’dir. Her bir katmanın ortalama yüksekliği yaklaşık 2,7 mm olarak hesaplanmıştır. Parçanın çeşitli noktalarından alınan ölçümlerle ortalama kalınlığı 7,5 mm’dir.

1. grup parçanın makro yapısı bir bütün olarak değerlendirildiğinde, kaynak dikişlerinin genel olarak üst üste düzgün bir şekilde sıralandığı görülmektedir. Parçanın bazı bölgelerinde küçük miktarlarda kaynak dikişinin kısmi olarak yan taraflara taşıdığı görülmüş ancak bu durum bir sonraki üretilen dikişi etkilememiştir. TAEİ yöntemiyle üretilen birçok yapıda genel olarak bu şekilde bir oluşum meydana gelmektedir. Üretilen parçanın genel yapısını olumsuz olarak etkilemeyen bu durum oldukça göz ardı edilebilir niteliktedir.

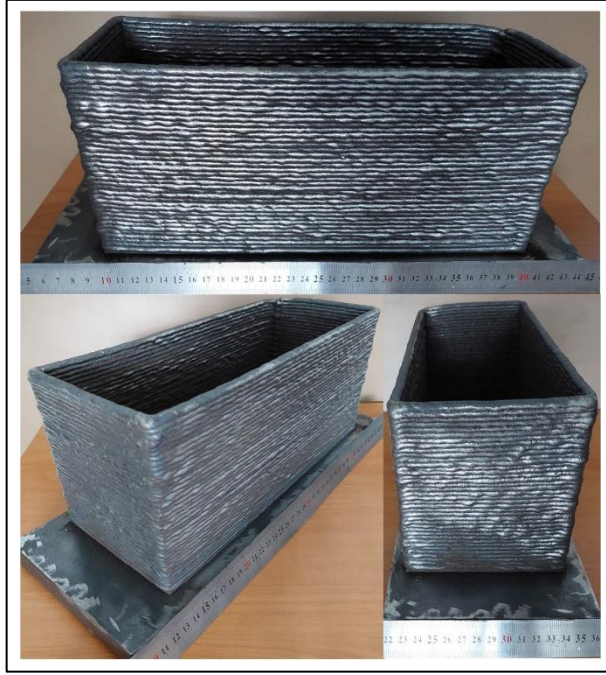


Şekil 5.1. Grup (1) üretilen parça (SG2).

5.1.2. 2. Grup (308LSi) Parça Makro Yapısı

Şekil 5.2’de üretim işlemi tamamlanmış ve yüzeyleri temizlenmiş tamamı 308LSi paslanmaz çelik tel kullanılarak üretilen 2. grup parçanın farklı açılardan resmi gösterilmektedir. Parça 39 katmandan oluşmakta, genişliği yaklaşık 310 mm toplam yüksekliği ise yaklaşık 144 mm’dir. Her bir katmanın ortalama yüksekliği yaklaşık 3,7 mm olarak hesaplanmıştır. Parçanın çeşitli noktalarından alınan ölçümlerle ortalama kalınlığı 8 mm’dir.

2. grup parçanın makro yapısı bir bütün olarak değerlendirildiğinde, kaynak dikişlerinin genel olarak üst üste düzgün bir şekilde sıralandığı görülmektedir. İnşa yönü boyunca bazı katmanlarda dikişin içeri ve dışarı doğru kısmi olarak taşıdığı görülmüştür. Ancak bu durumdan kaynaklı önemli bir boyutsal değişim olmamış, dikiş yükseltilerinde kısmi olarak alçalma görülmemiştir. Bu bakımdan parça bütün olarak değerlendirildiğinde olumsuz bir durum meydana gelmemiştir.



Şekil 5.2. Grup (2) üretilen parça (308LSi).

5.1.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Parça Makro Yapısı

Şekil 5.3'te üretim işlemi tamamlanmış ve yüzeyleri temizlenmiş yarısı SG2 düşük alaşımlı çelik tel ile diğer yarısı 308LSi paslanmaz çelik tel kullanılarak üretilen 3. grup nitelikli parçanın farklı açılardan resmi gösterilmektedir. Parça 24 SG2 ve 18 308LSi den olmak üzere toplamda 42 katmandan oluşmaktadır. Başlangıçta ayarlanan kaynak parametrelerinde dikiş yüksekliklerinden ziyade genişlikleri eşit tutulmak istendiği için her iki malzemenin katman sayısında bir miktar fark olmuştur. Parça genişliği yaklaşık 315 mm, yüksekliği ise yaklaşık 132 mm'dir. SG2 içeren katmanların ortalama yüksekliği 2,7 mm ve 308LSi tel içerenlerin ise 3,75 mm'dir. Parçanın çeşitli noktalarından alınan ölçümlerle ortalama kalınlığı 8 mm'dir.

2. grup parçanın makro yapısı bir bütün olarak değerlendirildiğinde, kaynak dikişlerinin genel olarak üst üste düzgün bir şekilde sıralandığı görülmektedir. Dikiş formunda bozulmalar oldukça azdır. SG2 tel içeren son katman ile 308LSi'nin ilk katmanı arasında belirgin bir geçiş durumu oluşmuştur. Bu iki telin birleşmesinden meydana gelen ara yüzey bir hat boyunca çizgi olarak görülebilmektedir. Deneysel çalışmalara geçilmeden önce, başlangıçta bu durumun olumsuz etkileri olabileceği

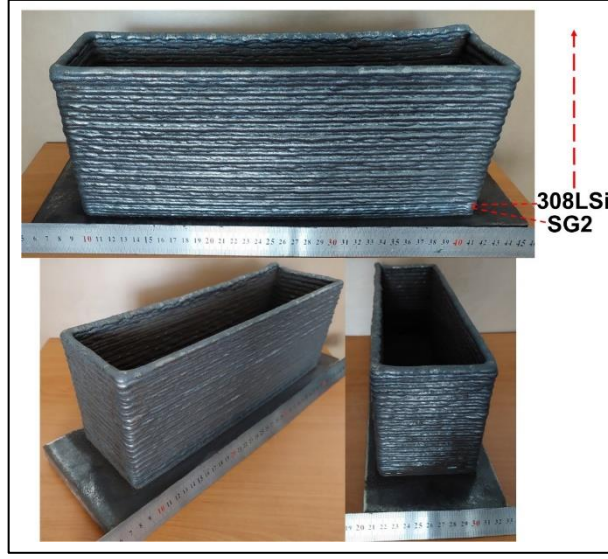
düşünülmüştür. Uygulanan testler ile numune ara yüzeylerinde hasarların meydana gelebileceği endişesi duyulmuştur. Ancak bu durum ileride de anlatılacağı ve görüleceği gibi meydana gelmemiş başarılı bir birleşme bölgesi elde edilmiştir. SG2 kısmının son katmanı ile 308LSi'nin ilk katmanı arasında başlayan dikiş yayılma biçimindeki değişim yüksek oranda her iki malzemenin termal özellikleri arasındaki farka dayandırılmıştır.



Şekil 5.3. Grup (3) üretilen parça (% 50 SG2-% 50 308LSi).

5.1.4. 4. Grup (Sıralı) Parça Makro Yapısı

Sıralı üretim olarak adlandırılan 4. grup üretim bu çalışmanın farklı yönünü oluşturmaktadır. Şekil 5.4'te bu parçanın üretilmiş durumu görülmektedir. Üretim işlemleri ilk 5 katman için SG2 tel ile başlamış daha sonra her bir katmanda tel malzemesi değişmiştir. Örneğin 6. katman 308LSi, 7. katman SG2, 8. katman 308LSi, 9. katman SG2 ... olacak şekilde üretimler devam etmiş, toplamda 38 katmanlı bir yapı elde edilmiştir. Parça genişliği yaklaşık 310 mm yüksekliği ise yaklaşık 122 mm olarak ölçülmüştür. Kalınlığı ise ortalama 8,5 mm'dir. Ortalama katman yüksekliği 3,21 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.4. Grup (4) üretilen parça (Sıralı).


Şekil 5.4 incelendiğinde üretilen katmanlardaki dikiş formunun malzemelerin kendi içerisinde düzenli bir şekilde olduğu görülmektedir. Her iki malzemenin termal özelliklerinden kaynaklı farklılıklar kendinden önce üretilmiş veya sonra üretilen kaynak dikişi üzerinde yayılımını değiştirmiştir. Paslanmaz çelik telin ısı iletim katsayısı düşük olduğundan kaynak esnasındaki ısının çoğu bu malzeme üzerinde kalmış ve bir alt katmanda bulunan düşük karbonlu çeliği daha az eritmiştir. Paslanmaz çelik üzeri düşük karbonlu çelik üretilirken ise ısı paslanmaz çeliğe göre daha hızlı yayılmış ve kaynak dikişinde bir miktar genişlemeler olmuştur. 4. grup üretilen parçanın ardışık katmanları arasında meydana gelen dikiş formundaki değişimlerin kaynak parametrelerindeki farklılıklarla beraber temel sebebinin her iki malzemenin termal özelliklerinin farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5.2. KİMYASAL İÇERİK BELİRLEME ÇALIŞMALARI

Kimyasal içerik belirleme işlemi esas olarak optik emisyon (OE) analizlerini kapsamaktadır. OE yöntemiyle üretilen ilk 3 grup parçanın içerdikleri alaşım elementleri belirlenmiştir. OE testlerinde analiz edilecek üretim grupları için numuneler, frezemeleme işlemine tabi tutulmuş parçalardan elde edilmiştir. Bu parçalar kenar kısımlarından inşa yönü boyunca bir bütün halinde kesilmiş ve

numuneler bu şekilde çıkarılmıştır. Tüm gruplar için elde edilen ölçüm sonuçlarında, içerilen alaşım elementine göre ağırlıkça % miktarı gösterilmiştir.

Şekil 5.5'te 1. grup üretimin OE sonuçları ölçüm alınan bölgelerle birlikte gösterilmiştir. SG2 telin Çizelge 4.1'de gösterilen katalog verilerine bakıldığında temel alaşım elementleri % ağırlıkça C=0,07, Si=0,90 ve Mn=1,45 olarak verilmiştir. Bu miktarlarla Şekil 5.5'te gösterilen sonuçlar kıyaslandığında yüksek oranda örtüştüğü görülmektedir. C oranı 0,07 ile birebir katalog verisiyle aynı bulunmuştur. Diğer element değerlerinde ise göz ardı edilebilir küçük bir fark bulunmaktadır.

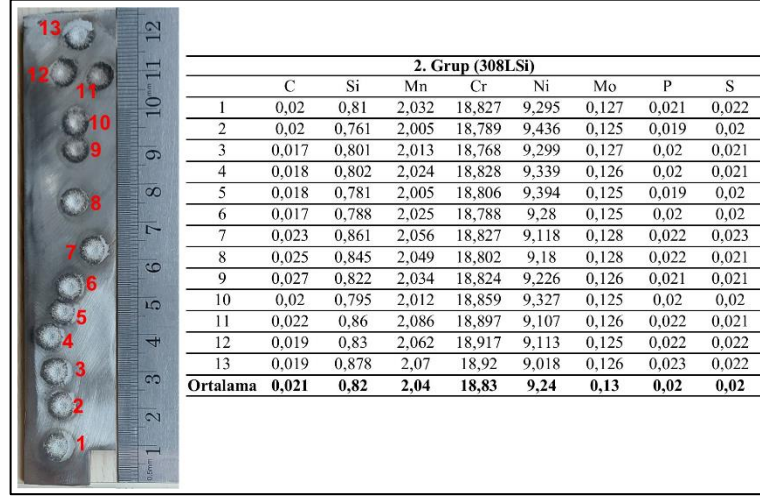


1. Grup (SG2)					
	C	Si	Mn	P	S
1	0,071	0,747	1,317	0,015	0,014
2	0,069	0,747	1,314	0,014	0,013
3	0,065	0,737	1,299	0,014	0,013
4	0,064	0,743	1,303	0,014	0,013
5	0,073	0,784	1,322	0,014	0,012
6	0,074	0,768	1,313	0,013	0,012
7	0,071	0,751	1,302	0,013	0,011
Ortalama	0,07	0,75	1,31	0,01	0,01

Şekil 5.5. Grup (1) OE sonuçları.

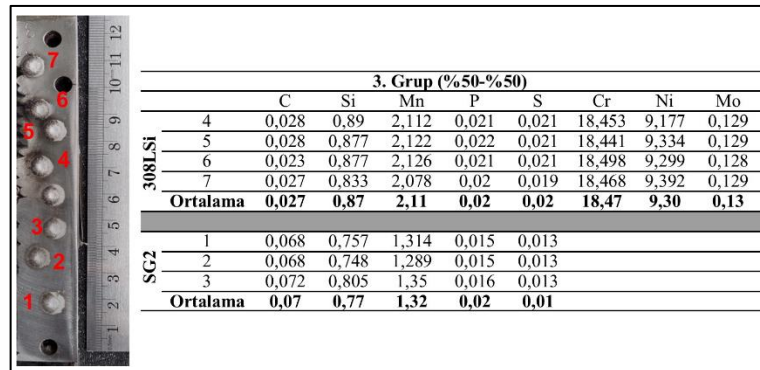
Şekil 5.6'da 2. grup OE sonuçlarında elde edilen % element miktarları gösterilmektedir. Çizelge 4.1'de verilen 308LSi kaynak telinin katalog verilerine bakıldığında temel alaşım elementleri % ağırlıkça C=0,01, Si=0,7, Mn=1,9, Cr=20 ve Ni=9,5 olarak belirtilmiştir. Bu değerler ile Şekil 5.6'da verilen OE çalışmalarında bulunanlar karşılaştırıldığında, çoğu element için bir miktar farklılık olduğu görülmektedir. Ancak bu farklılığın mekanik özellikleri ciddi oranda etkilemeyeceği düşünülmektedir. Ticari olarak temin edilen bir malzemenin katalog verilerinde belirtilen alaşım element yüzdeleri genel olarak yaklaşık değerleri ifade etmektedir. Bazı üreticiler bu değerleri kesin değer olarak vermeyip, belirli aralıklarda göstererek paylaşmaktadır. Bir proseste yığın olarak üretilmiş malzemelerden aynı süreçte üretime tabi tutulmamış rastgele seçilen malzemenin kimyasal içerikleri test edildiğinde arada farkların olacağı kaçınılmazdır. Ayrıca OE analizinde ortam şartları, test koşulları ve kalibrasyon gibi nedenlerle çoğu zaman bire bir sonuçlar

alınmayabilir. Ancak yaklaşık değerler arada çok fazla fark olmamakla beraber tespit edilebilir. Bu bakımdan 2. grup üretimin OE sonuçlarıyla katalog değerleri kıyaslandığında arada kayda değer bir fark olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.6. Grup (2) OE sonuçları.

Şekil 5.7’de SG2 ve 308LSi tel malzemelerinden oluşan 3. grup üretimin OE sonuçları gösterilmektedir. Burada değerlendirme yapılırken SG2 kısmı 1. grup OE sonuçlarıyla, 308LSi kısmı ise 2. grup üretimin OE sonuçlarıyla kıyaslanacaktır. Ölçüm yapılırken her iki bölgeyi eşit bir şekilde alan ve ara yüzeyi ortalayan bir bölgeyi denk getirmek oldukça zor olduğundan ara yüzey ile ilgili bir değerlendirmede bulunulmamıştır. Bu işlem Şekil 5.7’de 3 ve 4 noktası ölçümleri arasında gösterilen noktadan ölçüm alınarak yapılmak istenmiş ancak ara yüzey ortalanamadığı için beklenen sonuç alınamamıştır.



Şekil 5.7. Grup (3) OE sonuçları.

Şekil 5.7’de gösterilen OE sonuçlarının 308 LSi kısmı ve 2. grup üretimin sonuçlarına bakıldığında çoğu elementin benzer değerde olduğu görülmektedir. Test koşulları, üretilen tel malzemesinin aynı proseste imal edilmesi gibi tüm şartlar aynı tutularsa, 3. grup üretimin 308LSi kısmındaki C oranının (% ağırlıkça 0,006 kadar) bir miktar yüksek olduğu görülmektedir. Bu durumda bir ihtimal olarak SG2 kısmından 308LSi kısmına C elementi transfer olduğundan söz edilebilir. Ancak 308 LSi kısmının SG2’den hemen sonra ölçüm alınan 4. nokta ile son katmanlara yakın bulunan 7. noktanın C oranı değerleri aynı bulunmuştur. Bu durumda bir önceki cümlede bahsedilen durumun geçersiz olabileceği düşünülmektedir. SG2 kısmının değerleri Şekil 5.5’te gösterilen 1. grup üretimle karşılaştırıldığında neredeyse aynı sonuçların elde edildiği görülmüştür.

OE çalışmaları sonucunda esas tel malzemesi ile TAEİ yöntemiyle üretilmiş malzemeler arasında kimyasal içerik bakımından önemli farklılıklar görülmemiştir. 3. grup üretilen parçadan SG2’den 308LSi tarafına yapılan testler dahilinde kimyasal bileşimi değiştirecek element transferinin olmadığı ve esas malzemelerin çok yüksek oranda kendi bileşimlerini koruduğu sonucuna varılmıştır.

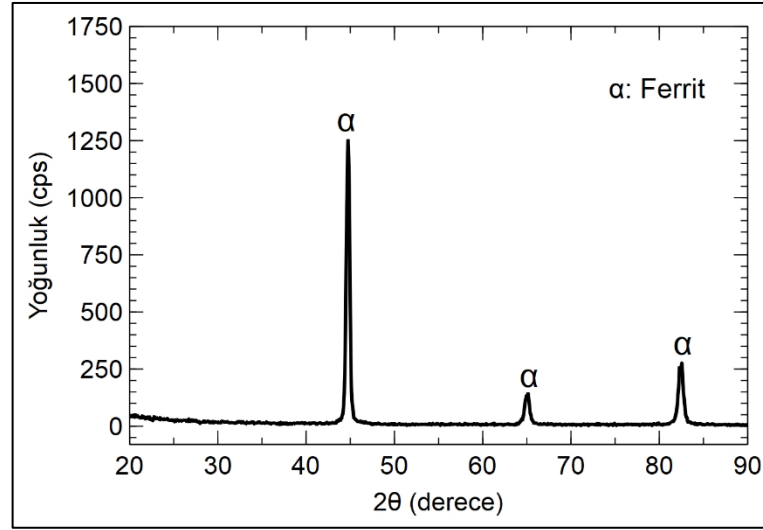
5.3. XRD VE MİKROYAPI ÇALIŞMALARI

Bu bölümde öncelikler her bir üretimi grubu için gerçekleştirilen XRD çalışmalarının sonucu verilmiş, daha sonra mikroyapı çalışmalarına geçilmiştir. Mikroyapı çalışmalarında tüm değerlendirmeler parçayı kesit boyunca enine ortalayan dikey bir çizgi üzerinde bulunan noktalar baz alınarak yapılmıştır. Bunun sebebi üretilen parçanın iç ve dış kısımlarının eşit miktarda paso derinliğiyle frezeleme işlemine tabi tutulması ve böylelikle test parçalarının orta bölgelerden çıkarıldığı içindir. Ayrıca mekanik testler uygulanan numuneler üretilen parçanın farklı bölgelerinden çıkarılmış ve deney sonuçlarında ortalama değerler alınarak parça karakteristiğini bir bütün olarak yansıtacak genel değerlendirmelerde bulunulmuştur. Örneğin çekme deneylerinde parçanın üst kısmından veya alt kısmından alınan yatay numuneler gibi, üretilen parçanın spesifik kısımlarına göre kendi içlerindeki sonuçların irdelendiği bir değerlendirme yapılmamıştır. Bu bakımdan mikroyapı çalışmaları genel bir çıkarım sağlamak üzere, parça üzerinde önemli olduğu düşünülen bölgeler üzerinde

gerçekleştirilmiştir. XRD ve mikroyapı çalışmalarındaki amaç TAEİ yöntemiyle üretilen 4 farklı parçanın metalürjik yapısını belirlemektir.

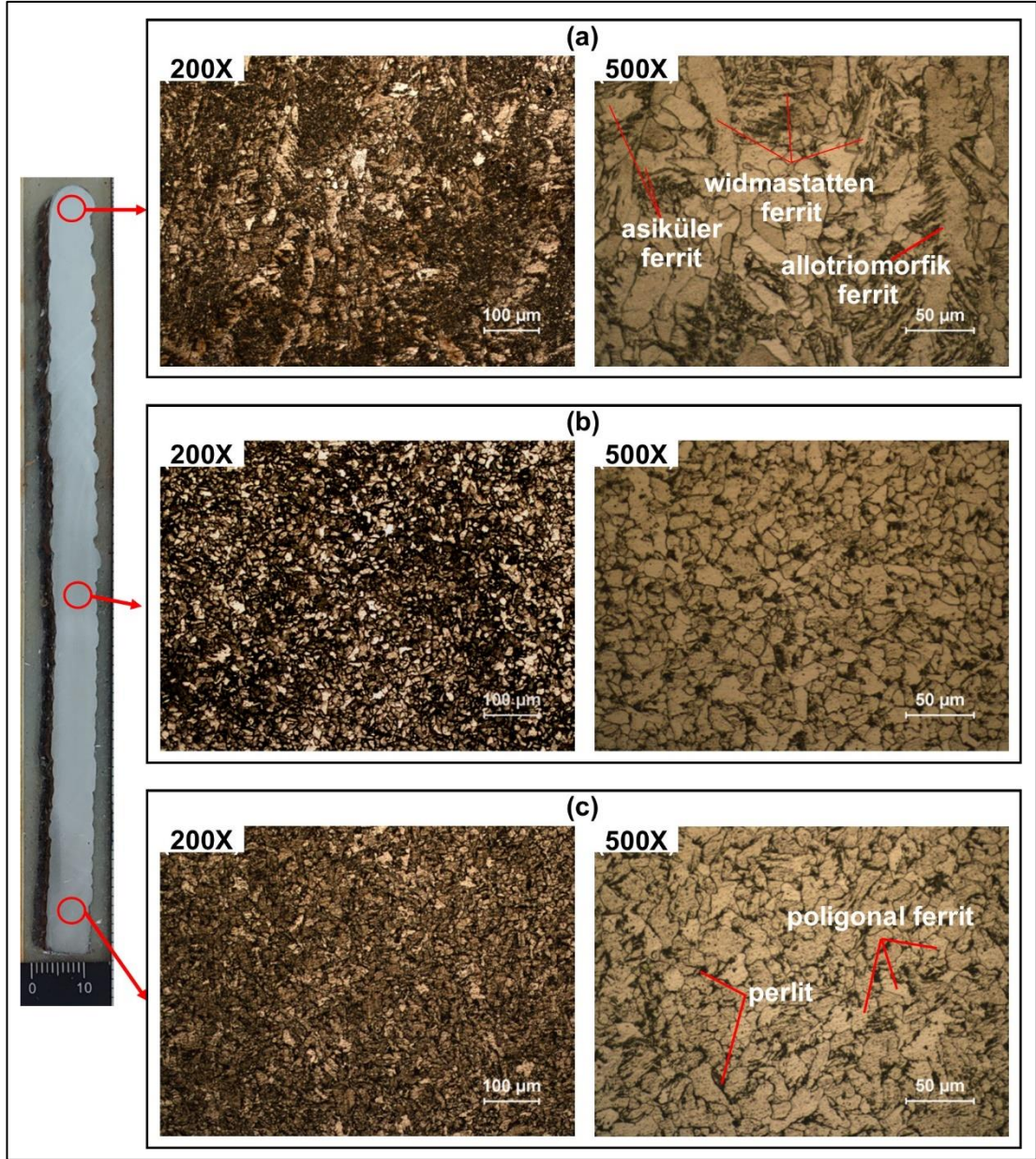
5.3.1. 1. Grup (SG2) XRD ve Mikroyapı Çalışmaları

Sadece SG2 tel kullanılarak gerçekleştirilen 1. grup üretime yapılan XRD testi analiz sonuçları Şekil 5.8’de gösterilmektedir. Elde edilen sonuçların literatürle uyum sağladığı görülmüştür [211,212]. XRD analiz sonuçları 1. grup üretimden alınan örneğin yapısının α ferritten oluştuğunu göstermektedir.



Şekil 5.8. Grup (1) XRD analiz sonucu.

Şekil 5.9’da 1. grup üretimin mikroyapı çalışmalarında üst (a), orta (b) ve alt (c) kısımlarından alınan resimler gösterilmektedir. Alt ve orta kısımdan alınan resimlere bakıldığında poligonal ferrit fazının yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Şekil 5.9 b’ye bakıldığında, üretimin orta bölgesinin tane boyutunun alttakilere göre kısmen daha küçük olduğu görülmektedir. Ancak her iki kısımda yapılar genel olarak benzemekte ve poligonal ferrit yapısı baskın olarak bulunmaktadır. Ferrit tanelerini çevreleyen perlit fazları da bu yapılarda görülmektedir. Benzer şekilde Ayan ve Kahraman tarafından SG2 tel ile gerçekleştirilen TAEİ üretiminin mikroyapısında poligonal ferrit fazı baskın olarak bulunmuştur [213].



Şekil 5.9. Grup (1) mikroyapı resimleri.

TAEİ işlemi süresince üretilen katmanlar bir üst katmanın ergitilmesinden dolayı sürekli olarak ısıya maruz kalırlar. Bu nedenle ilk üretilen katmanlar orta ve üst kısımlara göre daha fazla sıcaklık gradyanlarında bulunmaktadır. Ergiyik havuzunun dışında ısı tesiri altında kalan bölgeler (ITAB) sürekli olarak termal döngü içerisinde. Bu nedenle üretilen parçanın bölgesel olarak farklı mikroyapılar içermesi kaçınılmazdır. Bu durumlar değerlendirildiği zaman alt ve orta kısımdaki yapının benzer çıkması 1. grup üretim işlemlerinde uygulanan prosedür ve üretim parametrelerine yakından bağlıdır. Üretim kapalı bir yol şeklinde uygulanarak, aynı

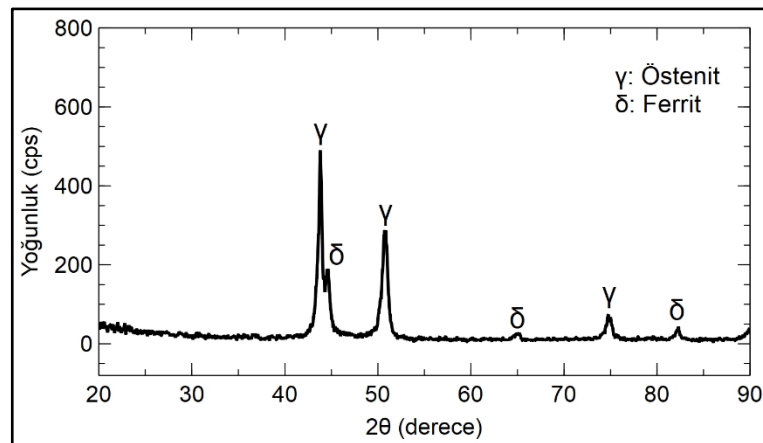
katmanda bulunan kaynak dikişi üzerindeki her bir noktanın yüksek ölçüde eşit derecede ısınma ve soğuma evrelerinden geçmesi sağlanmıştır. Bununla beraber her bir katman üretildikten sonra yaklaşık 90-100 °C'ye kadar soğuması beklenmiştir. Bu durumlar 1. grup üretilen parçanın benzer mikroyapıya sahip olmasına katkı sağlamıştır. Orta kısımdaki yapının nispeten küçük olan tane boyutu ise alt katmanların daha fazla ısı görmesine ve daha fazla ITAB olma eğilimi taşımasına dayandırılmıştır. ITAB olan bir bölgede daha büyük taneli yapıların görülmesi kaçınılmazdır. Dirisu vd. [214], tek pasolu ve salınım ile uyguladıkları TAEİ işleminde, salınım ile uygulanan üretimdeki tane boyutlarını daha yüksek ısı birikiminden dolayı daha büyük görmüşlerdir. Bunlara rağmen mikroyapı çalışmaları neticesinde 1. grup üretimin alt ve orta kısmındaki yapılar yüksek ölçüde benzerlik içermektedir.

Şekil 5.9 a'da gösterilen üst bölgedeki yapı incelendiğinde alt ve orta kısımlardan çok farklı olduğu görülmektedir. En üst katmanın bulunduğu kısım üretimde tekrarlı ısı girdisinin olmadığı son bölgedir. Burada üretimden sonra alt katmanlarda olduğu gibi sonradan ısı işlem etkisinin olduğu bir durum bulunmamaktadır. Bu bakımdan üst kısımda yer alan bölge önceki katmanlara göre temperleme işlemi görmeyeceği için tane boyutlarının daha büyük olması beklenir. Şekil 5.9 a'da en üst katmanın bulunduğu kısma ait resimler incelendiğinde tane boyutlarının diğer bölgelere göre daha büyük olduğu görülmektedir. Ayrıca yapıda poligonal ferrit tanelerinin daha az bulunması da diğer incelenen bölgelere ayırt edici bir durum oluşturmaktadır. En üst katmanın yapısında az sayıda poligonal ferritin yanı sıra başlıca, asiküler ferrit, widmstätten ferrit ve allotriomorfik ferrit fazları bulunmaktadır. Üst katmandaki yapılar benzer şekilde Le ve Paris tarafından gerçekleştirilen çalışmada da görülmüştür [215]. Liberini vd. [216], tarafından gerçekleştirilen SG2 malzemeli üretimin alt ve orta kısımlarının mikroyapısının hemen hemen eş eksenli, üst kısmının ise lamelli yapıdan oluştuğu belirtilmiştir. Başka bir çalışmada üretim parametrelerinin kontrolüyle TAEİ yapılarında homojen mikroyapının sağlanabileceğine değinilmiştir [217].

5.3.2. 2. Grup (308LSi) XRD ve Mikroyapı Çalışmaları

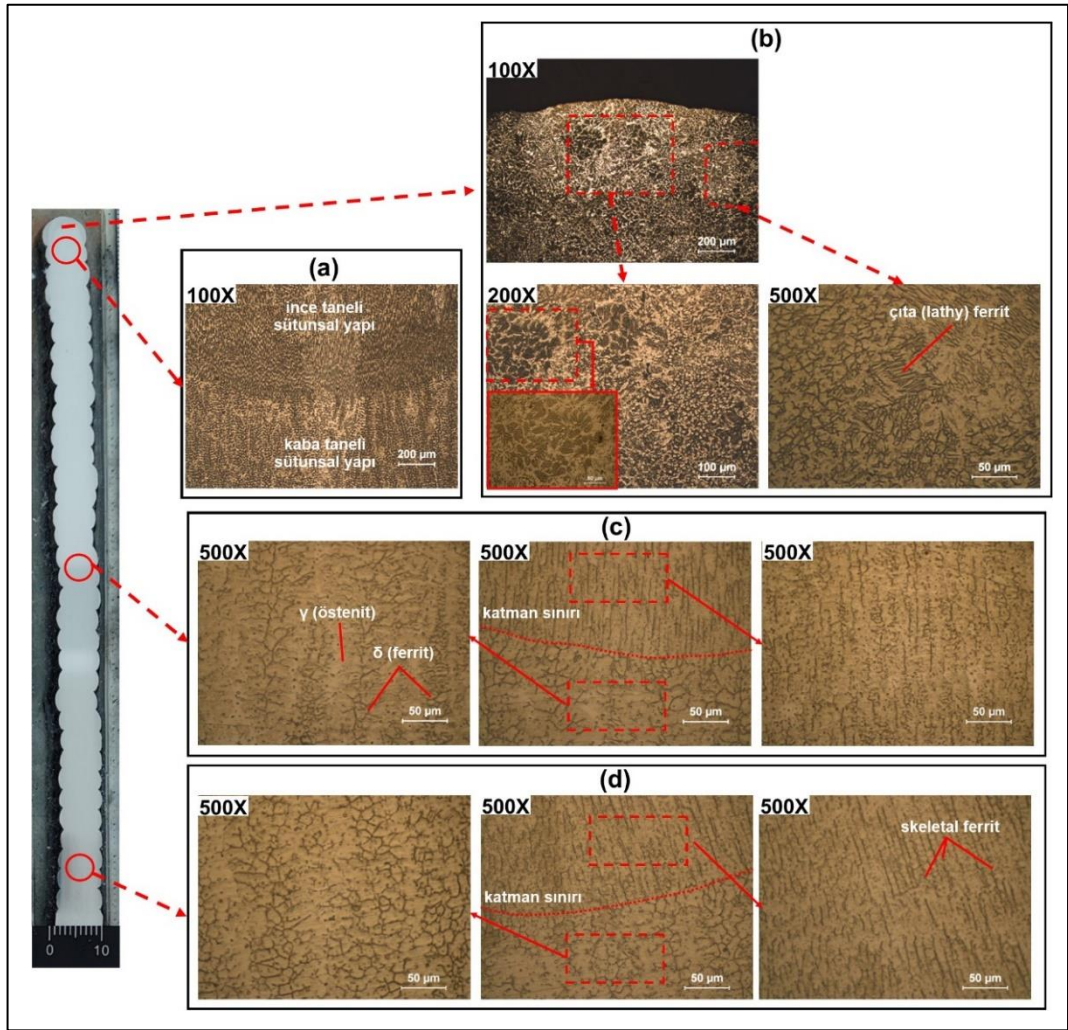
308LSi östenitik paslanmaz çelik telin katalog verilerinden alınan ağırlıkça (%) element değerleri göz önüne alınarak Ni ve Cr eşdeğerliği hesaplanmıştır. Buna göre Schaeffler diyagramından TAEİ ile üretilen yapıda % 10 kadar delta ferrit (δ) fazının oluşabileceği belirlenmiştir. Bu durumda mikroyapı çalışmalarında incelenen numunelerde δ ferrit fazına rastlanması beklenmektedir. δ ferrit fazı ergime esnasında öncelikle sıvı metalden birincil faz olarak oluşmaktadır. Daha sonra hızlı soğuma nedeniyle östenit (γ) fazı birincil δ fazını kademeli bir şekilde değiştirerek büyümektedir. Bu dönüşüm sonrası γ tane sınırlarında skeletal ve lathy yapısında kalıntı ferrit meydana gelmektedir [218].

2. grup üretime yapılan XRD analizi sonucu Şekil 5.10'da verilmiştir. Kırınım açlarına denk gelen yapıların belirlenmesinde; öncelikle referans olarak verilen kartlar kullanılmış, daha sonra literatürde yakın malzemelerle yapılmış analiz sonuçlarına bakılmıştır. Analiz sonuçlarının incelenen bazı çalışmalarda XRD grafiğinde gösterilen yapılarla bir bütünlük sağladığı görülmüştür [219,220]. Buna göre XRD çalışmaları sonucunda Şekil 5.10'da gösterilen grafiğe bakılarak, sadece 308LSi tel kullanılarak yapılan 2. grup üretimin mikroyapısında östenit ve δ ferrit fazlarının mevcut olduğu belirlenmiştir.



Şekil 5.10. Grup (2) XRD analiz sonucu.

2. grup üretim için gerçekleştirilen mikroyapı çalışmalarında optik mikroskoptan alınan görüntüler Şekil 5.11’de verilmiştir. Bu görüntüler TAEİ üretilen parçadan kesit boyunca alt, orta ve üst bölgelerinden elde edilmiştir. Mikroyapı resimlerine ilk bakışta 1. grup üretimden farklı olarak, katmanlar arası geçiş durumu göze çarpmaktadır. Katmanlar arası geçiş belirgin bir şekilde ayrılan sınır çizgisiyle görülmektedir. Bu durum inşa yönü boyunca üretilen tüm katmanlar için aynı gidişatı sergilemiştir. Katman sınırına yakın ve hemen üstünde bulunan bölge ince taneli yapı alt kısmında bulunan ise kaba taneli olarak tanımlanmıştır [219].



Şekil 5.11. Grup (2) mikroyapı resimleri.

Şekil 5.11’de gösterilen mikroyapı resimlerine bakıldığında genel olarak östenit dendritlerin ve δ ferrit yapısının baskın olarak bulunduğu görülmektedir. Katman sınırı olarak gösterilen ara yüzeyin üst kısmında kalan bölgelere bakıldığında, bir üst

katmanın üretimi sırasında dendrit tipi büyümeler görünmektedir. Büyüme işlemi belirli bir yöne doğru gerçekleşmiştir. Katman sınırı çizgilerinin konumu ve dendritlerin biçimi birlikte değerlendirildiğinde büyümenin sıcaklık gradyanlarının meydana geldiği tarafa doğru yönlendiği görülmektedir. Katman sınırının alt kısmına bakıldığında ise tanelerin dendritten ayrılan kaba yapıda olduğu görülmektedir. Benzer duruma 1. grup üretimde belirgin bir şekilde rastlanılmaması paslanmaz çeliğin termal özelliklerine dayandırılabilir. Paslanmaz çeliğin ısı iletim katsayısı düşük alaşımli çeliğin yaklaşık olarak 1/3'ü olduğu için, ergime esnasında ısının büyük bir kısmı kaynak havuzunda kalmakta, bir alt katmanın ergimesi daha dar bir alanda gerçekleşmektedir. Bu durumda belirgin bir şekilde görülen katman çizgisinin meydana geldiği düşünülmektedir.

Kaynak işlemi sırasında, ergime bölgesinin dışında meydana gelen ITAB yaklaşık 80 °C ile 1536 °C arasında değişen sıcaklık gradyanlarında bulunmaktadır. Bu bakımdan TAEİ işlemiyle üretilen bir yapının ilk katmanından son katmanına kadar birçok değişen sıcaklık gradyanlarına maruz kalmaları beklenmektedir. Bununla beraber yapıda birçok ITAB'ın meydana gelmesi ve bu ITAB bölgelerinin ısıya maruz kalma durumları değişeceğinden her katman için farklı karakteristiğe sahip özelliklerin olması söz konusudur. Ayrıca ITAB oluşum sıcaklık aralığı geniş olduğundan üretilen katmanın bir kısmı birden fazla ITAB olma özelliğini taşıyabilmektedir. Bunlardan dolayı TAEİ ile üretilen parçalarda mikroyapı çalışmalarında incelenen bölgelerinin farklı yapılarda olabileceği, tane boyutu, tane biçimi ve tane dizilimi gibi unsurların değişiklik göstereceği kaçınılmazdır. Ancak üretilen parçanın mikroyapısının bölgesel olarak incelenmesi durumunda genel çıkarımlar yapılabilmektedir.

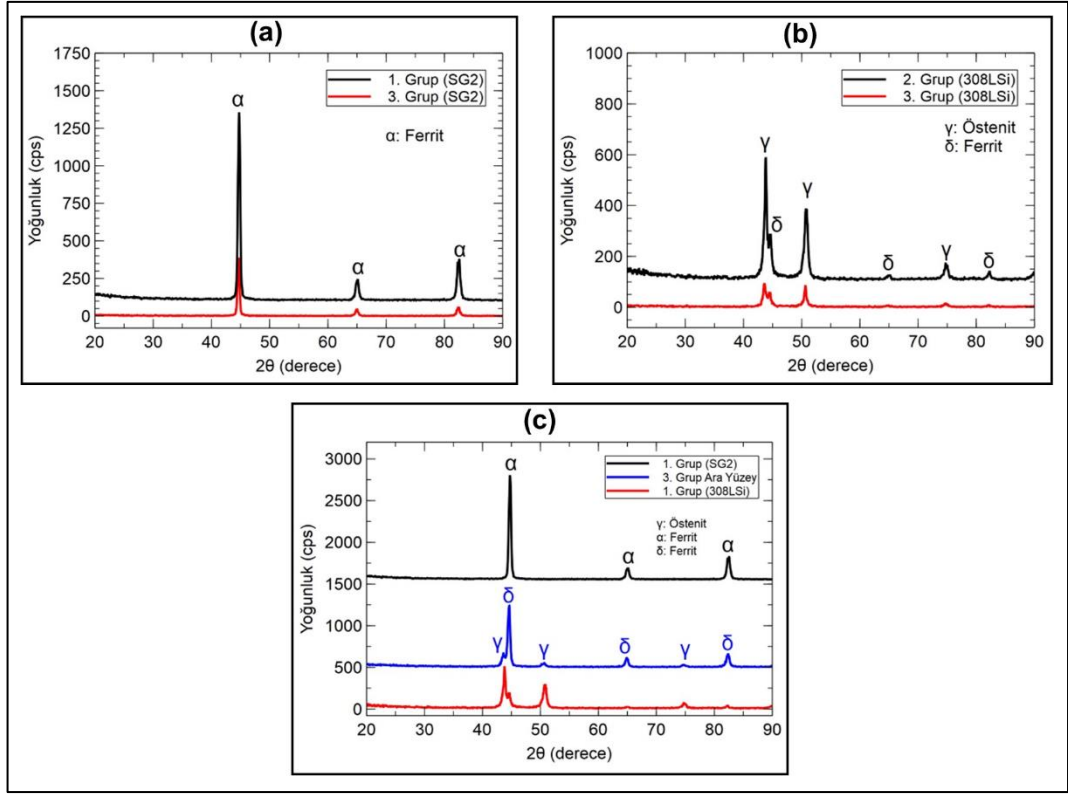
Li vd. [221], tarafından TAEİ ile üretilmiş 308L malzemesinin mikroyapı çalışmalarında, incelenen bölgelere göre skeletal, çita (lathy) ve granül ferrit olmak üzere 3 farklı yapı durumu gözlemlenmiştir. Alt kısmın, çoğunlukla lathy ve granül ferritten, orta kısmın üç farklı yapının hepsinden ve üst kısmın baskın olarak skeletal ferritten oluştuğunu ve düşük miktarlarda çita ile granül ferrit içerdiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Le ve Mai [222], tarafından yürütülen bir çalışmada farklı koşulların ve termal döngülerin TAEİ işlemiyle üretim uygulanmış 308L malzemeli üretimin mikroyapısının inşa yönü boyunca değiştiğinden söz edilmiştir.

2. grup üretimlerde gerçekleştirilen mikroyapı çalışmalarında alt ve orta kısımlarından alınan resimlerde ağırlık olarak skeletal ferrit yapı oluşumu görülmüştür. En üst katman bölgelerinde ise ağırlık olarak çıta ferrit oluşumunun yanı sıra skeletal ferrit yapısı da bulunmaktadır. Çıta ferrit hızlı soğumada, skletal ferrit ise orta soğuma hızlarında meydana gelmektedir [223]. Alt ve orta kısımlarda tekrarlı ısı girdisinden dolayı soğuma hızı oranın düşük, üst kısmın ise tekrarlı ısıya maruz kalmayacağı ve açık havayla direkt temas edeceği için soğuma hızı oranının yüksek olması beklenmektedir. Bu bakımdan 2. grup üretimde karşılaşılan mikroyapı oluşumlarının, literatür değerlendirmeleriyle birlikte uyumluluk sağladığı görülmüştür.

5.3.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) XRD ve Mikroyapı Çalışmaları

FDM yapıları parçanın ilki olan 3. grup üretim SG2 ile 308LSi tel malzemelerinden meydana gelen birleşme ara yüzeyi içermektedir. Bu parçanın alt kısmı SG2 malzemesinden, üst kısmı ise 308LSi malzemesinden oluşmaktadır. Dolayısıyla alt ve üst bölgelerin 1. ve 2. grup üretimlerle yüksek oranda benzer yapısal özelliklere sahip olması beklenmektedir. Bu bakımdan 3. grup üretimin mikroyapısı değerlendirilirken inşa yönündeki kesit kısmının orta bölgesi göz önüne alınmıştır. Çalışmalarda, birleşme ara yüzeyi ve ara yüzeye yakın esas malzemelerin mikroyapısal durumları değerlendirilmiştir.

İlk 2 grup üretimde olduğu gibi 3. grup üretimin mikroyapı incelemelerine geçilmeden önce 3. grup üretimin XRD test sonuçları değerlendirilmiştir. Şekil 5.12'de 3. grup üretim için elde edilen XRD analiz sonuçları kıyaslama grafikleriyle beraber gösterilmektedir. Şekil 5.12 a) 1. grup (SG2) üretimle 3. grup üretimin SG2 kısmının, b) 2. grup (308LSi) üretimle 3. grup üretimin 308LSi kısmının ve c) ise 1. grup, 2. grup üretimlerle 3. grup ara yüzeyin XRD sonuçlarının kıyaslandığı grafiklerdir. Görüldüğü gibi Şekil 5.12 a ve b'deki sonuçlar 1. ve 2. grup üretimlerle oldukça benzerdir. Her iki grafikte yer alan esas malzemenin pikleri aynı kırınım derecesinde yer almaktadır. Bu bakımdan 3. grup üretimin esas malzeme içeren kısımları, bölgesel olarak kendi faz yapısı karakteristiğini yansıtmaktadır.

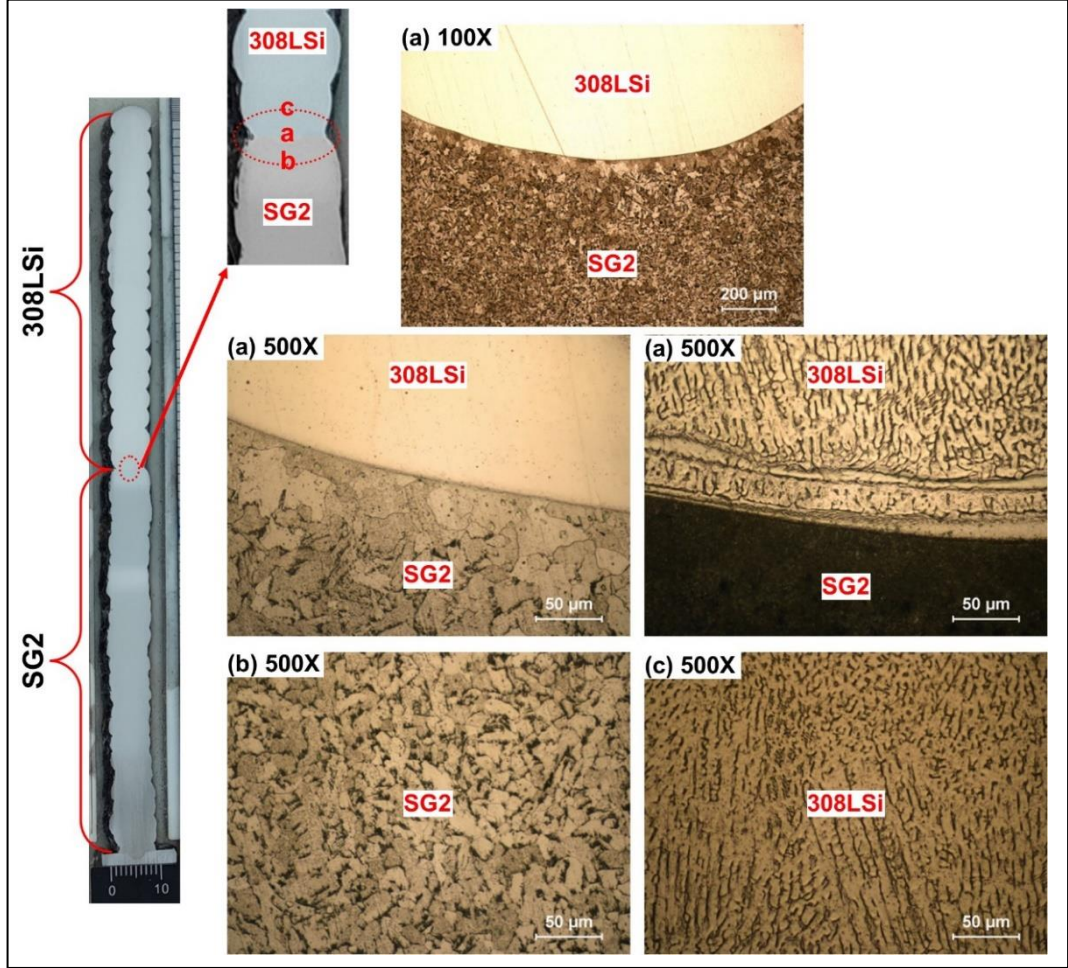


Şekil 5.12. Grup (3) XRD analiz sonucu.

3. grup üretimin XRD testinde ölçüm bölgesi ara yüzeyi ve ara yüzeye yakın noktaları içine alan yaklaşık 2 mm²'lik bir yüzeyi kapsamaktadır. Şekil 5.12 c'de yer alan grafiğe bakıldığında, mavi ile gösterilen ara yüzey XRD sonuçlarının esas malzemelerden farklı olduğu görülmektedir. Sonuçlara göre ara yüzey ve yakın kısımlarda δ ferrit yoğunluğunun γ'e göre daha fazla olduğu görülmektedir. Kırmızı çizgi ile gösterilen 308LSi malzemesinde pikler γ fazını daha yoğun gösterirken, ara yüzey sonucunda bu durum değişmiş ve pikler δ ferrit fazında daha yüksek çıkmıştır. Bu durumdan şu sonuç çıkarılmıştır: 3. grup üretimin ara yüzeyi içine alan bölgesi, içinde östenit yapısını barındıran ancak yüksek oranda ferrit içeren bir yapıya sahiptir.

Şekil 5.13'te 3. grup üretimin ara yüzeyi ve ara yüzeyine yakın esas malzeme bölgelerinden alınan mikroyapı resimleri verilmiştir. Şekil 5.13 a, ara yüzeyin dahil olduğu bölgeyi, b, ara yüzeye yakın SG2 içeren kısmı ve c, ara yüzeye yakın 308LSi kısmını kapsamaktadır. Ara yüzeyi içeren kısım farklı büyütme oranlarında, 308LSi malzemesi dağlanmadan ve dağlandıktan sonraki durumlarıyla gösterilmiştir. Burada ara yüzey bir çizgi halinde belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Ara yüzeye yakın SG2

kısımında büyük taneli yapı meydana gelmiştir. 308LSi paslanmaz çelik kısmı ise inşa yönü boyunca, sıcaklık gradyanlarına doğru yönelmiş dendritik yapıdan oluşmaktadır. Bu yapıda skeletal ve çita ferrit fazlarının bulunduğu da görülmektedir.



Şekil 5.13. Grup (3) mikroyapı resimleri.

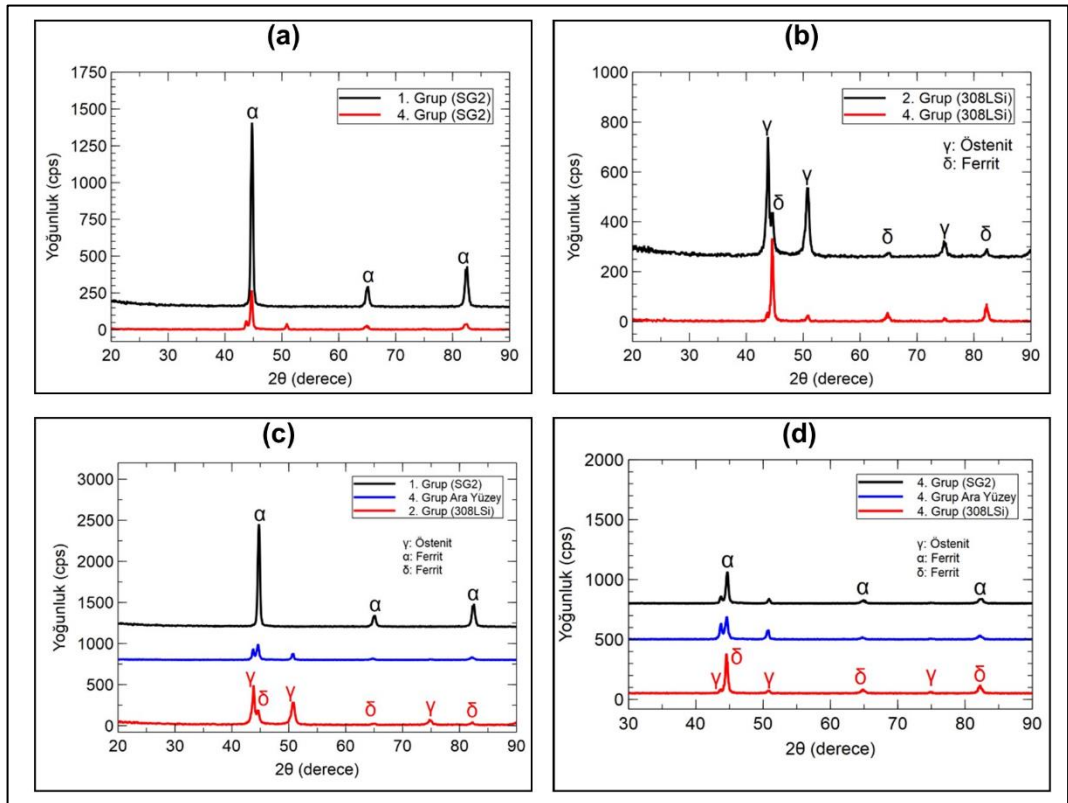
Şekil 5.13 b’de ara yüzeye yakın olan SG2 kısmının mikroyapısı incelendiğinde tane sınırlarında perlit bulunan yüksek oranda poligonal ferrit içeren bir yapı görülmektedir. Yapıda ayrıca nispeten düşük oranda asiküler ferrit bulunmaktadır. 3. grup üretimde ara yüzeyin dahil olmadığı SG2 tarafı incelendiğinde genel olarak 1. grup üretimin orta kısmındaki mikroyapıya yüksek ölçüde benzediği görülmüştür.

Şekil 5.13 c’ye bakıldığında ara yüzeyin dahil olmadığı 308LSi tarafının mikroyapısı görülmektedir. 3. grup üretimin 308LSi kısmı da benzer bölgelerde bulunan 2. grup üretimin yapısına yüksek oranda benzemektedir. Yapı genel olarak γ matrisinde

yüksek oranda skeletal ferrit içeren fazdan oluşmaktadır. Dendritler 2. grup üretimde olduğu gibi sıcaklık gradyanlarının bulunduğu inşa yönüne doğru yönlendirilmiştir.

5.3.4. 4. Grup (Sıralı) XRD ve Mikroyapı Çalışmaları

Şekil 5.14'te 4. grup üretime uygulanan XRD çalışmalarının sonuçları kıyaslama sonuçlarıyla birlikte gösterilmektedir. Şekil 5.14 a, 1. grup üretimdeki esas SG2 malzemesi ile 4. grup SG2 kısmını, b, 2. grup üretimdeki 308LSi malzemesi ile 4. grup 308LSi kısmını, c, 4. grup ara yüzeyi ile 1. ve 2. gruptaki esas malzemeleri ve d, 4. grup esas malzemeler kısmı ile ara yüzey sonuçlarının grafiğini göstermektedir. Bu şekilde farklı karşılaştırma grafikleri oluşturularak sıralı üretimin faz durumu hakkında çıkarım yapılmak istenmiştir.



Şekil 5.14. Grup (4) XRD analiz sonucu.

Şekil 5.14 a'da gösterilen grafiğe bakıldığında sıralı üretimin pik yaptığı açılar ile esas malzeme ile üretilen yapının pikleri arasında belirgin bir fark olduğu görülmektedir. Esas malzemedeki ferrit fazı pikleri sıralı üretimde benzer şekilde görülmektedir.

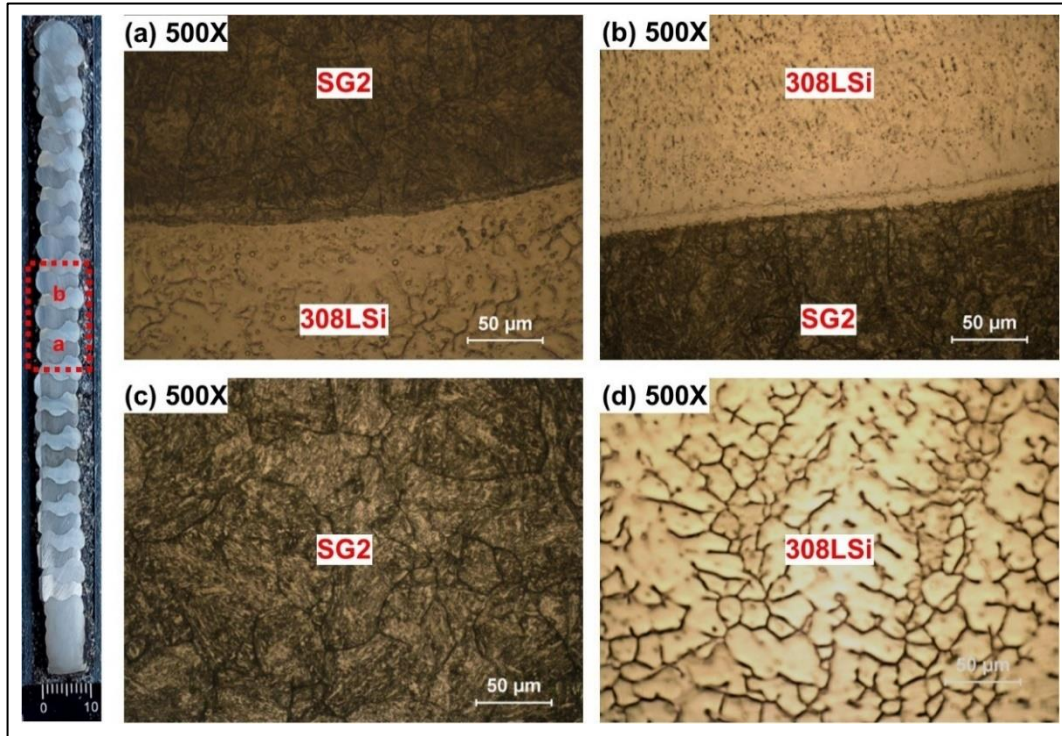
Ancak sıralı üretimin SG2 kısmında esas malzemenin dışında iki farklı pik görülmüştür. Bu pikler Şekil 5.14 b’de gösterilen 2. grup 308LSi esas malzemesiyle aynı kırımın değerlerinde oluşmuştur. Buradan 308LSi malzemesinden SG2 tarafına geçen elementlerle SG2 kısmında bileşik/bileşiklerin meydana geldiği düşünülmüştür. Şekil 5.14 a’da 4. grup üretimin yaklaşık 43°-44° kırımın açısına tekabül eden pik, literatürde (Cr,Fe)₇C₃, ve Cr₇C₃ bileşikleri olarak yaklaşık 51°-52°’deki pik ise (Cr,Fe)₇C₃, Cr₂₃C₇, Cr₇C₃ ve östenit fazı olarak yer almıştır [224]. Bahsedilen pik değerlerindeki bileşiklere ferritik çelik ile ve östenitik paslanmaz çeliğin kaynak işlemine tabi tutulduğu bir başka çalışmada daha rastlanılmıştır [225]. Bu durumlara göre sıralı üretimin SG2 kısmının yapısında bileşik bulunma potansiyelinin yüksek olduğu sonucu çıkarılmıştır.

Şekil 5.14 b’de gösterilen grafik incelendiğinde ise sıralı üretimin 308LSi tarafı ile tek malzemeli 308LSi üretimin arasında ciddi farkların olduğu görülmektedir. Şekil 5.14 b’deki piklere bakıldığında en yüksek yoğunluk değerlerinin ferrit fazına tekabül eden değerlerde olduğu görülmüştür. Bu durumda sıralı üretimin 308LSi kısmının ferrit faz oranı yüksek bir yapıya sahip olduğu söylenebilmektedir. Bu kısımda ayrıca ferrit dışındaki piklerin östenit fazının olduğu noktalarda oluştuğu görülmektedir. Bir önceki paragrafta bahsedilen bileşikler benzer kırımın derecelerinde rastlanıldığından, aynı bileşiklerin 308LSi tarafında olma ihtimali de göz önüne alınmalıdır.

Şekil 5.14 c’de gösterilen sıralı üretimin ara yüzeyinin bulunduğu grafik incelendiğinde esas malzemeli üretimlerden oldukça farklı faz karakteristiği gösterdiği açıktır. Burada ara yüzeyin sonuçları değerlendirilirken, ölçüm bölgesinin ara yüzeye yakın SG2 ve 308LSi malzemeli bölgelerine denk geldiği unutulmamalıdır. Şekil 5.14 d’de gösterilen grafik önceki yapılan değerlendirmelerle birlikte sıralı üretimin faz karakteristiğinin anlaşılmasını sağlamıştır. Her üç kısımda üretilen pikler neredeyse aynı kırımın derecelerinde oluşmuştur. Bu grafiğe göre sıralı üretimin ferrit fazının baskın olduğu yapıdan meydana geldiği belirlenmiştir.

Şekil 5.15 a’da 4. grup üretimin 308LSi-SG2 ara yüzeyinin, b’de SG2-308LSi ara yüzeyinin, c’de ara yüzeye yakın SG2 kısmının ve d’de ara yüzeye yakın 308LSi kısmının mikroyapı resimleri gösterilmiştir. Şekil 5.15 a’da gösterilen mikroyapı resmi

incelendiğinde 308LSi kısmında östenit matrisinde skeletal ferrit oluşumu görülmektedir. SG2 kısmının birleşme ara yüzeyine yakın noktalarında içerisinde beynit barındıran ağırlıklı olarak martenzitik yapısının yer aldığı görülmüştür. Şekil 5.15 c’de ara yüzeyin dahil olmadığı SG2 kısmının mikroyapısı incelendiğinde benzer şekilde beynit ağırlıklı martenzitik yapının varlığından söz edilebilmektedir. Birleşme ara yüzeyinde martenzit yoğunluğunun fazla olduğu ara yüzeyden uzaklaştıkça martenzitik yapının azalıp beynitik yapının yoğunlaştığı görülmüştür.



Şekil 5.15. Grup (4) mikroyapı resimleri.

Şekil 5.15 b’de gösterilen SG2 kısmından 308LSi kısmına geçiş ara yüzeyi incelendiğinde, Şekil 5.15 a’da bulunan 308LSi-SG2 geçiş ara yüzeyine göre farklılık sergilediği görülmüştür. SG2-308LSi ara yüzeyine yakın SG2 kısmında tane boyutlarının diğer ara yüzeye yakın SG2 kısmına göre bir miktar daha küçük olduğu söylenebilmektedir. Bu durum 308LSi malzemesinin termal iletkenliğinin az olmasına bağlanabilir. Isı 308LSi malzemesi üzerinde daha fazla durduğundan bir alt katmanda bulunan SG2 kısmının katılma süreci gecikecektir. Bu nedenle tane boyutunda küçülme olması beklenebilir.

Şekil 5.15'te SG2 tarafında martenzit oluşumunun soğuma hızından ziyade daha çok 308LSi tarafından transfer olan alaşım elementlerinden kaynaklandığı düşünülmüştür. 308LSi de yüksek oranda bulunan Cr ve Ni elementinin martenzit oluşumuna katkı sağladığı bilinmektedir. Bu nedenle ferritik yapının yoğun olarak hakim olduğu SG2 kısmında bu elementler östenit oluşturamayacağından, yapının martenzit oluşumuna sebep olmaktadır.

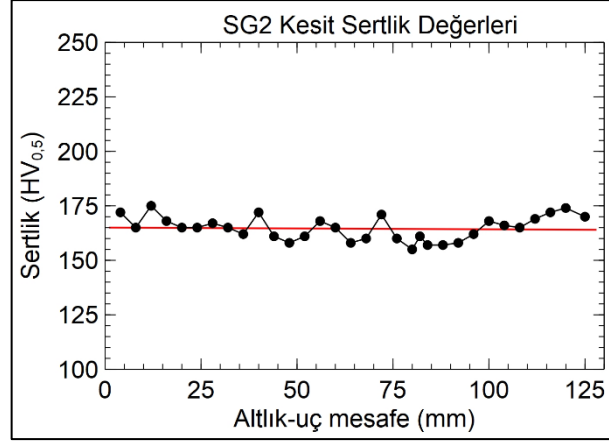
Şekil 5.15 d'de gösterilen ara yüzeyin dahil olmadığı 308LSi kısmı incelendiğinde yapıda δ ferrit fazının yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Bu durum ayrıca XRD sonuçlarıyla da örtüşmektedir. Ferrit fazının östenit matrisinde yoğun olarak bulunması kaynak işlemi sonrası soğuma hızına bağlı olarak delta ferrit-östenit dönüşümünün tam anlamıyla gerçekleşmemesine bağlanabilmektedir. Ferrit kalıntısı özellikle Cr/Ni eşdeğer oranı ve kaynak dikişinin soğuma hızıyla ilişkilidir. Yüksek Cr/Ni eşdeğerlik oranı yüksek δ ferrit içeriğinin katılaşmasına sebep olur. Soğuma hızının yüksek olması da δ ferrit yapısını daha fazla tutma eğilimi gösterir. Çünkü kaynak dikişi oda sıcaklığına kadar soğudukça ferritin östenite katı hal dönüşümü için daha az zaman bulunmaktadır [226]. Bu durumların mikroyapıda δ ferrit fazının oluşumuna katkı sağladığı düşünülmektedir.

5.4. SERTLİK ÖLÇÜM SONUÇLARI

5.4.1. 1. Grup (SG2) Sertlik Ölçümleri

Şekil 5.16'da 1. grup üretimin kesiti boyunca ölçülen sertlik değerleriyle oluşturulan grafik gösterilmektedir. Ortalama sertlik değeri yaklaşık olarak 165 HV hesaplanmıştır. Kesit boyunca ölçülen sertlik değerlerinin küçük değişimlerle devam ettiği, sertlik değerlerinde anormal bir değişimin olmadığı görülmektedir. Bu durumun üretilen katmanlardaki mikroyapının ve katmanlar arasındaki mikroyapı değişiminin benzer olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 5.17'de verilen 1. grup üretimin orta kısmının yatay ve dikey yönünden alınan sertlik değerlerine bakıldığında ise birbirine yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Ortalama sertlik değerleri orta kısımda her iki yönlenme için 166 HV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler kesit kısmından alınanlarla kıyaslandığında yaklaşık olarak aynı olduğu görülmektedir.

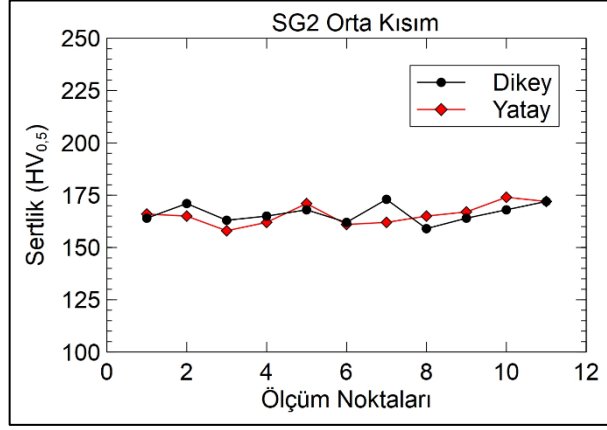
Kesit ve orta kısımdaki sertlik ortalama değerlerinin birbirine çok yakın olması stadyum şekilli üretilen parçanın sertlik dağılımında çok büyük farklar olmadığını göstermektedir. Bu değerlendirmeler neticesinde çıkarım yapılırken orta kısımdaki numunenin tüm üretim grupları için yaklaşık 30 mm uzunluğunda olduğu göz önüne alınmalıdır.



Şekil 5.16. Grup (1) kesit sertlik değerleri.

Rafieazad vd. [211], 1. grup üretimdeki aynı malzemeyle gerçekleştirdikleri TAEİ işleminde ortalama sertlik değerini 160 ± 7 HV olarak bulmuşlardır. Sertlik değerinde büyük değişimlerin meydana gelmeyişini dikey yöndeki mikroyapının tutarlılığına dayandırmışlardır. Benzer ekilde Wağas vd. [83], ortalama sertlik değerini 170 HV olarak hesaplamış bu değerin benzer C içeriğine sahip elik malzemeden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Sertlik değerindeki yksekligi TAEİ işlemi esnasındaki termal döngüler dolayısıyla tane küçülmesine bağlamışlardır. Nemani vd. [227], TAEİ işlemiyle üretilen parçalara normalleştirme ve sertleştirme ısıl işlemleri uygulamışlar, işlem uygulanan numunelerin sertlik değerlerini, herhangi bir işlem uygulanılmayan üretimde sertlik değerleriyle kıyaslamışlardır. İşlem uygulanılmayan üretimde sertlik değerini 160 ± 7 HV, normalleştirme uygulanmış numunenin 154 ± 1 HV ve sertleştirme yapılan numunenin sertlik değerini 260 ± 3 HV olarak ölçmüşlerdir. Normalleştirme işlemi sertlik değerini bir miktar azaltmış, ancak sertleştirme ısıl işlemi buna nazaran daha yüksek farklarda sertlik değerini artırmıştır. Aldalur vd. [228], salınım ve bindirme şeklinde gerçekleştirdikleri iki farklı üretimde, bindirme ile

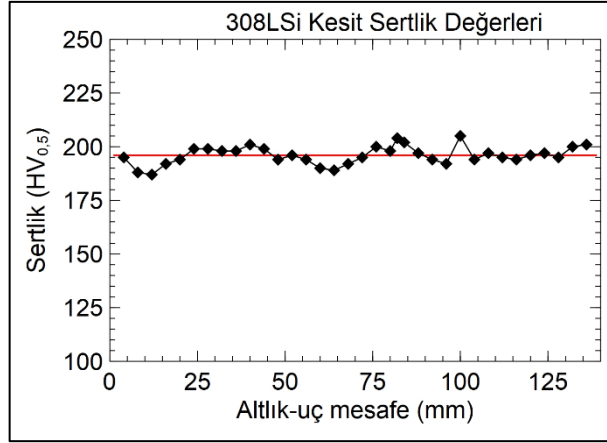
üretilende daha fazla sertlik değeri bulmuşlar ve bu durumun mikroyapının homojen olmadığından kaynaklandığını belirtmişlerdir.



Şekil 5.17. Grup (1) orta kısım sertlik değerleri.

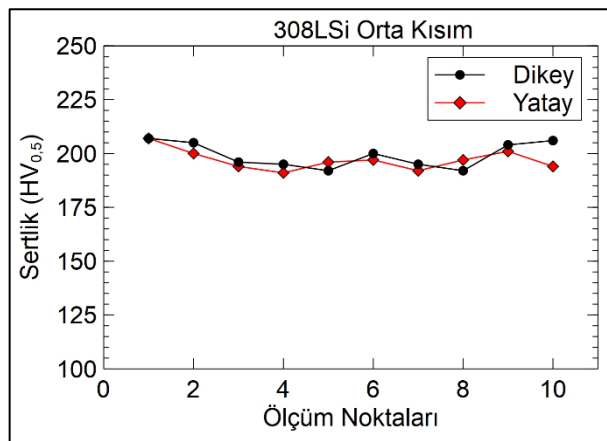
5.4.2. 2. Grup (308LSi) Sertlik Ölçümleri

2. grup üretimin kesit kısmından ölçülen sertlik değerleriyle elde edilen grafik Şekil 5.18'de gösterilmektedir. 1. grup üretimde olduğu gibi, 308LSi paslanmaz çelik malzemeli 2. grup üretimin kesit kısmındaki sertlik değerleri değişiminin normal bir düzen şeklinde gerçekleştiği görülmektedir. Ortalama sertlik değeri yaklaşık 196 HV olarak hesaplanmıştır. Sertlik değerinde fazla miktarda değişim olmamasının ve değerlerin genel olarak birbirine çok yakın olmasının mikroyapının benzer olmasından kaynaklandığı söylenebilmektedir. Üretimin kapalı bir yol şeklinde gerçekleşmesi ve her katmanın benzer soğuma düzeninde olması bu duruma katkı sağlamıştır. Ayrıca östenit yapı düzeninin tekrarlı termal döngülere rağmen korunması, mikroyapının XRD sonuçlarına göre sertlik değişimine neden olabilecek yoğun miktarda ikincil fazlardan yoksun olması ve tek malzeme türünden oluşan üretim gerçekleşmesi mikroyapının kesit boyunca benzer olmasına fayda sağlamıştır. Bu sebeplerden dolayı sertlik değerlerindeki değişim küçük miktarlarda olmuş ve genel olarak yakın değerlerde çıkmıştır.



Şekil 5.18. Grup (2) kesit sertlik değerleri.

Şekil 5.19'daki grafikte 2. grup üretimin yatay ve dikey olarak orta kısmından alınan numunelerin sertlik değerleri gösterilmektedir. Dikey ve yatay yönlenmedeki ortalama sertlik değerleri sırasıyla 199 HV ve 197 HV olarak hesaplanmıştır. Dikey yönde sertlik değeri bir miktar fazla çıkmış ancak bu fazlalık kayda değer miktarda olmamıştır. Bu durumda her iki yönlenmenin ortalama sertlik değerinin ölçüm şartlarında aynı değerde olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca bu değerler 2. grup üretimin ortalama kesit değerleriyle aynı büyüklükte olmuştur. Buradan tıpkı 1. grup üretimde olduğu gibi paslanmaz çelik ile üretilen yapının sertlik değerinin parça üzerinde benzer dağılıma sahip olabileceği düşünülmüştür.



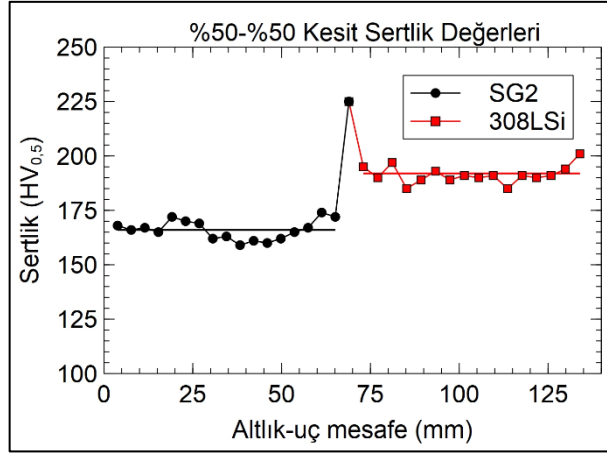
Şekil 5.19. Grup (2) orta kısım sertlik değerleri.

Literatürde benzer paslanmaz çelik tel ile TAEİ üretimi gerçekleştirilmiş ve yakın sertlik değerlerinin ölçüldüğü görülmüştür. Elmer vd., [226], 308L tel ile ürettikleri yapıda

sertlik değerini 206 HV olarak bulmuşlardır. Bu değer 2. grup üretimin ortalama sertlik değerlerine oldukça yakındır. Abe ve Sasahara tarafından üretilen yapıda sertlik değerinin 190-200 HV arasında ölçüldüğü görülmüştür [207]. Bir başka çalışmada Li vd. [221], ortalama sertlik değerini 224 HV olarak hesaplamışlardır. Bu değer 2. grup üretiminkiyle (≈ 197 HV) kıyaslandığında, yaklaşık 27 HV kadar bir fark görülmektedir. Bu durumun kıyaslanan çalışmada öncelikle üretimin blok tipi olarak gerçekleşmesinden ve üretim işlemlerinde farklı parametrelerin kullanılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Blok tipi üretim ve farklı üretim parametrelerinin uygulanmış olması, ısı girdisi ve soğuma stratejisini değiştireceğinden mikroyapıda farklılık meydana getirmesi muhtemeldir. Isı girdisindeki değişimler, mikroyapıdaki tane boyutları, delta ferrit miktarı ve yüksek ısı girdileri süresince meydana gelen tavlama etkisi gibi faktörler sertlik değerlerinin değişiminde rol oynamaktadır [226]. Bunlardan dolayı farklı TAEİ ile üretilmiş yapılarda sertlik değerindeki benzersizliklerin olma potansiyeli kaçınılmaz bir durumdur.

5.4.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Sertlik Ölçümleri

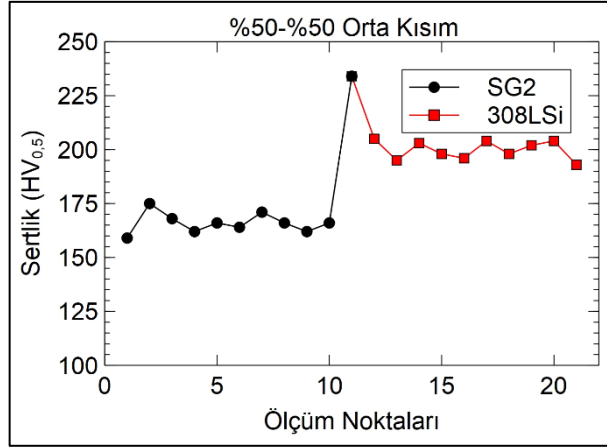
FDM parça üretiminin ilki olan 3. grup üretimin kesit boyunca ölçülen sertlik değerleri grafik olarak Şekil 5.20'de gösterilmektedir. Bu üretim iki farklı malzeme kombinasyonu ile üretildiğinden sertlik değerleri 3 farklı bölge için değerlendirilmiştir. Şekil 5.20'deki grafikte siyah ile renklendirilmiş değerler SG2, kırmızılar ise 308LSi tarafına aittir. SG2 içeren kısmın ortalama sertlik değeri 166 HV olarak hesaplanmıştır. Bu değer 1. grup üretimin kesit ve orta kısmında ölçülen sertlik değerleriyle neredeyse birebir örtüşmektedir. Bu durumda % 50-% 50 üretimin SG2 düşük alaşımlı çelik içeren kısmının sertlik özellikleri bakımından ana malzeme özelliklerini sağladığı söylenebilmektedir.



Şekil 5.20. Grup (3) kesit sertlik değerleri.

3. grup üretimin 308LSi tarafının ortalama sertlik değeri 191 HV olarak hesaplanmıştır. Bu değer 2. grup üretimin ortalama 196 HV'lik değeriyle kıyaslandığında çok az bir fark olduğu ve bu farkın ihmal edilebileceği düşünülmektedir. Bu durumda 3. grup üretimin paslanmaz çelik tarafının da sertlik değerleri bakımından ana malzeme özelliklerini yansıttığı söylenebilir. Yakın değerlerin sağlanabilmesindeki durum mikroyapı benzerliğinin yanı sıra 308LSi tarafının kimyasal içeriğinin korunmasına da bağlanabilir. Üretim esnasında seyrelmenin çok az olduğu ve kimyasal bileşimde büyük değişimler olmadığı düşünülmektedir. Optik emisyon ve EDS analizi çalışmaları bu sonucu doğrular niteliktedir.

Şekil 5.21'de 3. grup üretimin orta kısmından alınan sertlik değerleri gösterilmektedir. Orta kısımdan alınan sertlik değerlerinde SG2 tarafı ortalama 165 HV, 308LSi tarafı ise 200 HV olarak hesaplanmıştır. SG2 tarafı kesit değerlerine çok yakın bulunmuş, 308LSi tarafı ise çok az bir farkla yakın çıkmıştır. Genel olarak orta kısımdan alınan sertlik değerlerinin SG2 ve 308LSi tarafı için kesitten alınan ölçümlerle uyum içinde olduğu görülmüştür.



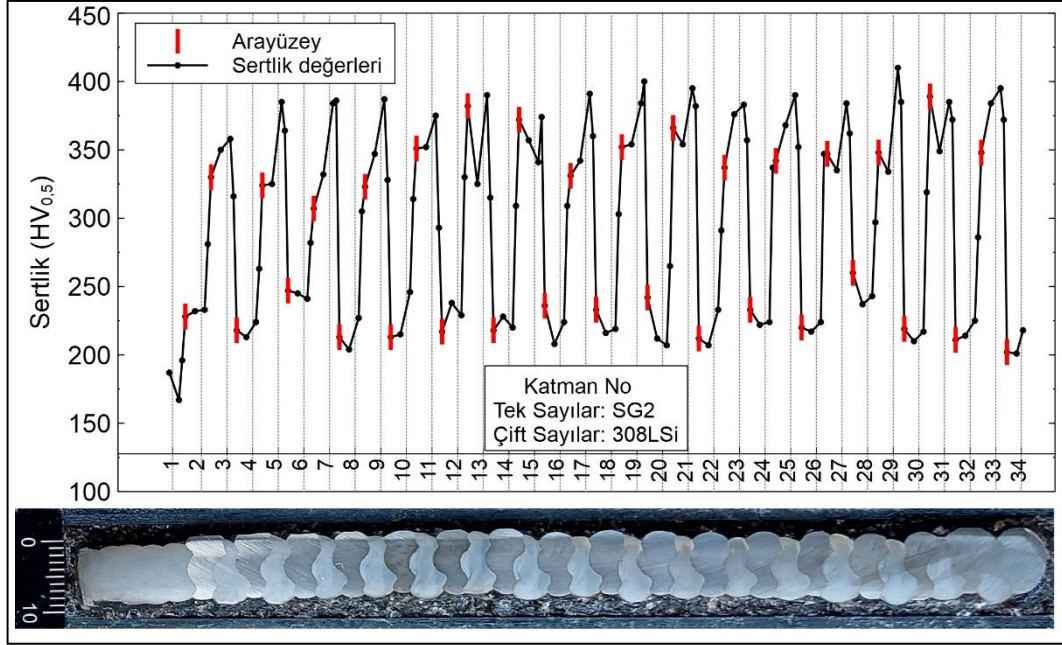
Şekil 5.21. Grup (3) orta kısım sertlik değerleri.

Şekil 5.20 ve Şekil 5.21'deki grafiklere bakıldığında göze çarpan en önemli durum ara yüzeydeki sertlik değerinin yüksek olmasıdır. Kesit değerlerinden alınan ölçümlerle ara yüzeyin sertlik değeri 225 HV, orta kısımdan alınan ölçümlerde ise ara yüzeyin sertlik değeri 234 HV olarak ölçülmüştür. Bu değerlere bakıldığında ara yüzeyin her iki ana malzemeden daha yüksek sertlikte olduğu görülmektedir. Ara yüzeyde sertlik değerlerinin yüksek çıkmasının sebeplerinden birinin ara yüzeyde ikincil faz oluşma durumuna bağlanabilir. SG2 tel kullanılarak yapılan 1. grup üretimde OE çalışmalarına göre C değeri ortalama % 0,07, 308LSi tel ile yapılan 2. grup üretimde ise C değeri ortalama % 0,02 olarak ölçülmüştür. SG2 tarafında C değerinin yüksek olması ve 308LSi paslanmaz çeliğin % 18,8 kadar Cr içermesi birleşme ara yüzeyinde C içeren bileşikler oluşturma ihtimalini arttırmaktadır. Krom değeri yüksek olan fazlar sertlik değerini yükseltmektedir [229]. C elementinin karbür oluşumuna elverişli yüksek miktarda Cr içeren ortama geçişi, ergime sınırında martenzit oluşumuna sebep olmakta ve tane sınırlarının yakın bölgelerinde sertlik değerinde artış meydana getirmektedir [230]. Ara yüzey sertlik değerinin yüksek olduğu başka bir çalışmada bu artışın gerekçesi olarak martenzitik dönüşümün meydana gelmesi gösterilmiştir [100].

5.4.4. 4. Grup (Sıralı) Sertlik Ölçümleri

SG2 ve 308LSi tel malzemesinin her bir katman için sırasıyla üretime dahil olduğu 4. grup üretimin kesit kısmından alınan sertlik ölçümleriyle oluşturulan grafik, kesit resmiyle beraber Şekil 5.22'de gösterilmektedir. Sertlik ölçümleri her bir katmanın

orta noktasından, ara yüzeye yakın noktalarından ve ara yüzeyden alınmıştır. Şekil 5.22'deki grafik incelendiğinde sertlik dağılımlarının bahsedilen ölçüm noktalarına göre değiştiği ancak bu değişimin genel olarak belirli bir düzen içerisinde gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 5.22. Grup (4) kesit sertlik değerleri.

Şekil 5.22'de verilen grafikte ifade edildiği gibi tek sayılı katmanlar SG2 kısmını çiftler ise 308LSi tarafını içermektedir. 4. grup kesit sertlik grafiğine bakıldığında genel olarak en yüksek sertliğin SG2 katmanında, en düşüğün ise 308LSi içeren katmanlarda ölçüldüğü görülmektedir. Ara yüzeyler katman geçişlerine göre değişen farklı sertlik karakteristiği sergilemiştir. SG2 katmanından 308LSi katmanına geçerken ara yüzeyde ölçülen sertlik değerleriyle, 308LSi'den SG2'ye geçiş ara yüzeyindeki ölçülen sertlik değerlerinde ciddi bir fark bulunmaktadır. Bu durum verilen grafiğin alt noktasındaki kırmızı renkli çubuklar ile üst noktadaki kırmızı çubukların konumlarına bakıldığı zaman belirgin bir şekilde görülmektedir. Sayısal değerler verilmeden önce şu şekilde genel bir değerlendirme yapılması uygun görülmüştür: 308LSi içeren katmandan SG2 katmanının merkezine doğru gidildikçe sertlik değeri ciddi oranlarda giderek artmıştır. SG2 katmanının merkezinden 308LSi kısmına doğru gidildikçe ara yüzeyde sertlik değeri kayda değer bir şekilde azalmış ve

308LSi katmanının merkezinde en küçük değerini almıştır. Bu iki durum bir döngü içerisinde son katmanlara doğru genel olarak benzer düzende ilerlemiştir.

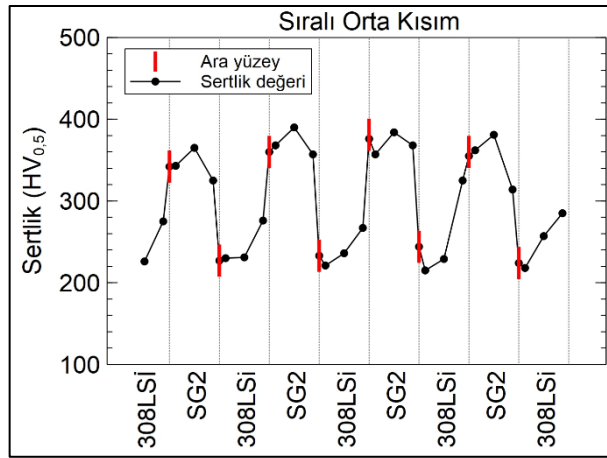
Sıralı kesit sertlik ölçümlerinde maksimum sertlik değeri SG2 katmanında ortalama 370 HV olarak hesaplanmıştır. Minimum sertlik değerleri ise 308LSi katmanlarında ortalama 226 HV olarak bulunmuştur. SG2 den 308LSi tarafına geçişte ara yüzeyin sertlik değeri ortalama 225 HV, 308LSi den SG2 kısmına geçişte meydana gelen ara yüzeyde ise ortalama sertlik değeri 347 HV olarak hesaplanmıştır. Maksimum ve minimum sertlik değerleri arasında ve her iki ara yüzeyin sertlik değerleri arasında ciddi bir fark bulunmaktadır.

4. grup üretimde SG2 katmanında 308LSi katmanına geçişteki ara yüzeyin ortalama sertliği, 308LSi katmanlarının sertliğine çok yakın değerlerde ölçülmüştür. Bu durum öncelikle 308LSi'nin üretim esnasında kimyasal bileşim olarak daha az seyrelmesine dayandırılmıştır. Sıralı üretimdeki 308LSi katmanının mikroyapısında, SG2 katmanında olduğu gibi sertliği yüksek oranlarda arttıran bir yapı oluşumunun bulunmadığı düşünülmektedir. Bu durumda Şekil 5.14 b'de yer alan sıralı üretimin 308LSi katmanındaki XRD piklerinin, bileşik oluşumundan ziyade ağırlıklı olarak γ ve δ ferrit fazlarına ait olduğu söylenebilir. Ancak sıralı üretimdeki bu pikler 2. grup 308LSi üretimine göre farklılık içermekte ve mikroyapı kısmında bahsedildiği gibi sıralı üretimin 308LSi katmanında δ ferrit yoğunluğunun yüksek olduğunu işaret etmektedir. δ ferrit yoğunluğunun yüksek olması 2. grup 308LSi üretiminin 196 HV olarak hesaplanan sertlik değerini sıralı üretimde 226 HV seviyelerine çıkartan etken olduğu düşünülmüştür. Yapılan bir araştırmada δ ferrit fazının sertliği artırıcı etki yaptığından bahsedilmiştir [231]. Bir başka çalışmada δ ferrit miktarının östenitik paslanmaz çelikten fazla olduğu yapıda sertlik değerinin bir miktar daha yüksek olduğu tespit edilmiştir [232].

Şekil 5.23'te sıralı üretimin orta kısmından alınan sertlik ölçümleriyle elde edilen grafik gösterilmektedir. Kesit ölçümlerinde olduğu gibi sertlik değerlerindeki değişim orta kısımda da benzer olmuştur. Ortalama sertlik değerleri SG2 kısmında 380 HV, 308LSi kısmında 236 HV, SG2'den 308LSi geçiş ara yüzeyinde 232 HV, 308LSi'den SG2'ye geçişte 358 HV olarak hesaplanmıştır. Bu değerler yukarıda verilen kesit

değerlerine oldukça yakındır. Bu durumda ölçümü gerçekleştirilen sertlik kesit değerlerinin, 4. grup üretilen parçanın sertlik karakteristiğini genel olarak yansıttığı söylenebilir.

Sıralı üretimde ölçülen sertlik değerlerinde karşılaşılan bir başka benzer durum bulunmaktadır. 3. grup üretim bilindiği gibi SG2'den 308LSi tarafına geçişin olduğu bir ara yüzey içermektedir. 3. grup kesit sertlik ölçüm testleri sonucunda ara yüzeyin sertlik değeri bir önceki başlıkta anlatıldığı gibi 225 HV olarak bulunmuştur. Bu değer sıralı üretimde SG2'den 308LSi'ye geçiş ara yüzeyinde ölçülen ortalama sertlik değeriyle (225 HV) aynı bulunmuştur. Bahsedilen bu durum sertlik ölçüm değerlerinde rastlanılan farklı bir sonuç olmuştur. Her iki ara yüzeyde sertlik değerinin benzer çıkması bir önceki paragrafta bahsedilen 308LSi malzemesinin kimyasal bileşim olarak daha az seyrelmesi ve mikro yapısını daha çok koruyabilmesine dayandırılmıştır.



Şekil 5.23. Grup (4) orta kısım sertlik değerleri.

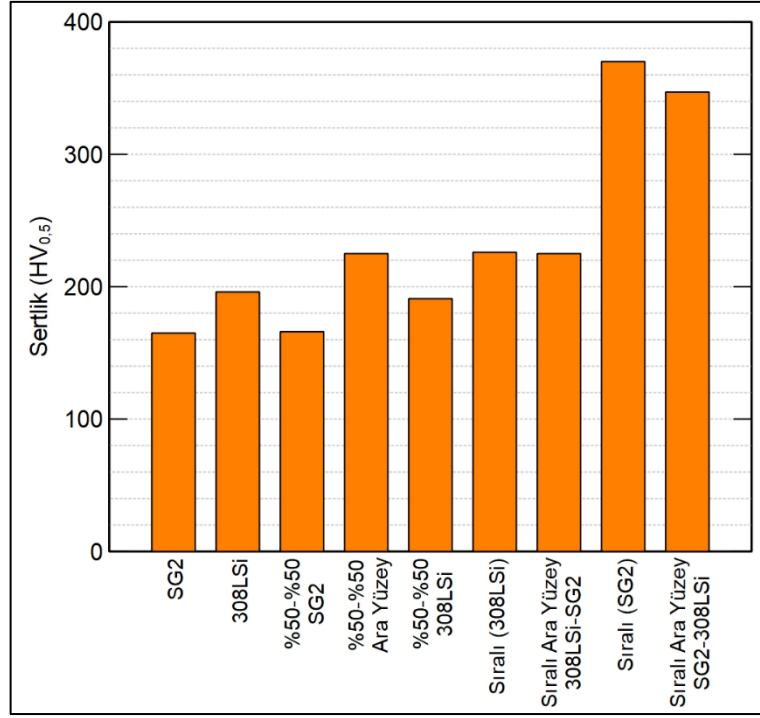
Ahsan vd. [96], tarafından 3. grup üretime benzer gerçekleştirilen TAEİ işleminde, bu çalışmadan farklı olarak 316L paslanmaz çelik üzerine SG2 geçiş ara yüzeyi olan üretim yapmışlardır. Uyguladıkları sertlik ölçümlerinde ara yüzeye gelindiğinde sertlik 220 HV den 350 HV'ye kadar artmış ve SG2 kısmında daha yüksek hesaplanmıştır. Sertlikte meydana gelen artışı, paslanmaz çelik tarafından düşük karbonlu çelik tarafına geçen ve katı çözültü sertleştirme etkisine sebep olan (solid solution hardening effect) Cr elementine bağlamışlardır. Bahsedilen durumlar ve

örnek literatürde ölçülen değerler 4. grup üretimde bulunan sonuçlarla çok yakınlık sağlamaktadır.

Bir başka çalışmada TAEİ yöntemiyle dubleks paslanmaz çelik üzerine düşük alaşımlı çelik FDM üretimi yapılmış ve ara yüzeye yakın yerlerde sertlik değerleri 307-320 HV arasında değişen bir değer göstermiştir. Bu durum düşük alaşımlı çelikteki martenzit dönüşümüne bağlanmıştır [100]. Titanyum alaşımı ve Inconel 625 süper alaşımı ile gerçekleştirilen bir üretimde ise Cr ve Mo içeren fazların sertlik değerini arttırıcı etki yaptığından bahsedilmiştir [229].

5.4.5. Sertlik Ölçümleri Genel Değerlendirme

Sertlik deneyi sonuçlarını tüm üretim gruplarıyla genel olarak değerlendirebilmek için Şekil 5.24'te gösterilen grafik çizilmiştir. Tüm değerlendirmeler ortalama ölçülen değerler baz alınarak yapılmıştır. En düşük sertlik değeri sadece SG2 tel kullanılarak gerçekleştirilen 1. grup (SG2) üretimde 165 HV olarak bulunmuştur. 3. grup (% 50-% 50) üretimin SG2 tarafından ölçülen ortalama sertlik değeri 166 HV olarak 1. grup üretimle örtüşmüştür. Benzer şekilde 2. grup (308LSi) üretimin sertlik değeri ile 3. grubun sertlik değeri birbirine çok yakın çıkmış sırasıyla 196 HV ve 191 HV olarak hesaplanmıştır. 3. grup üretimde ara yüzeyin sertliği 225 HV olarak ölçülmüş ve esas malzemelerden daha yüksek bulunmuştur.



Şekil 5.24. Sertlik sonuçları karşılaştırma grafiği.

Tüm üretim grupları arasında en yüksek sertlik değeri 370 HV ile sıralı üretimin SG2 katmanında ölçülmüştür. Bunu 347 HV ile en yüksek hesaplanan ikinci değer olarak 308LSi üzerine üretilen SG2 ile meydana gelen ara yüzey takip etmiştir. Sıralı üretimin paslanmaz kısmından alınan ölçümlerde sertlik değeri 226 HV, SG2 üzerine üretilen 308LSi ara yüzeyindeki sertlik değeri 225 HV ölçülerek yaklaşık olarak aynı bulunmuştur. 3. grup üretimin ara yüzeyindeki sertlik değeri 225 HV ölçülerek sıralı üretimden alınan bu değerlerle aynı bulunmuştur. Sertlik deneylerinde kesit kısmından alınan ölçümlerle, üretilen parçaların orta bölgelerinden alınan ölçümler çok yakın sonuçlar göstermiştir. Bu durumda kesit kısmının üretilen parçaların sertlik karakteristiğini genel olarak yansıttığı söylenebilmektedir. Sertlik deneyleri sonucunda; TAEİ işlemiyle sertlik değeri artırılabilen ve bölgesel olarak sertlik özellikleri değiştirilebilen FDM yapıların üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

5.5. ÇEKME DENEYİ

4 farklı üretim grubuna uygulanan çekme testleri sonrası elde edilen sonuçlar her bir üretim grubu için ayrı başlıklar altında açıklanmıştır. Bu başlıkların içeriğinde ise;

çekme deneyi sonrası makineden alınan gerilme-uzama grafikleri, deney sonuçlarını içeren çizelgeler, numunelerin çekme deneyi sonrası kopmuş görüntüleri ve kırık yüzey resimleri verilmiştir. Sonuçlar dikey ve yatay olarak yönlendirilmiş numuneler için ayrı ayrı incelenmiştir. Çekme deneyinin son başlığında ise tüm sonuçların genel değerlendirmesi yapılmıştır.

5.5.1. 1. Grup (SG2) Çekme Deneyi Sonuçları

Çizelge 5.1’de 1. grup üretimin çekme deneyi sonuçları, Şekil 5.25’te çekme deneyi sonucu makineden elde edilen gerilme-uzama grafikleri ve Şekil 5.26’da (a, dikey ve b, yatay) ise çekme testi sonrası numune görüntüleri verilmiştir. Çizelge 5.1 incelendiğinde dikey konumdaki ortalama çekme gerilmesi yaklaşık 480 MPa, ortalama maksimum uzama ise % 22,5 olarak hesaplanmıştır. En küçük çekme değeri yaklaşık 474 MPa, en yükseği ise yaklaşık 485 MPa olarak bulunmuştur. Her iki değer arasında yaklaşık % 2,27’lik bir fark bulunmaktadır. Maksimum ve minimum uzamanın sırasıyla % 23,02 ve % 21,46 olduğu değerler arasında ise yaklaşık % 6,78’lik bir fark bulunmaktadır. Elde edilen bu fark yüzdelere ve Şekil 5.25’te gösterilen gerilme-uzama grafiklerine bakıldığında dikey konumdaki numunelerin çekme değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve ortalama değere yakın olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bu numunelerin parçanın değişik kısımlarından çıkarılma durumu da düşünüldüğünde dikey yönlendirilmiş numuneler için yüksek ölçüde homojenliğin sağlandığı düşünülmektedir.

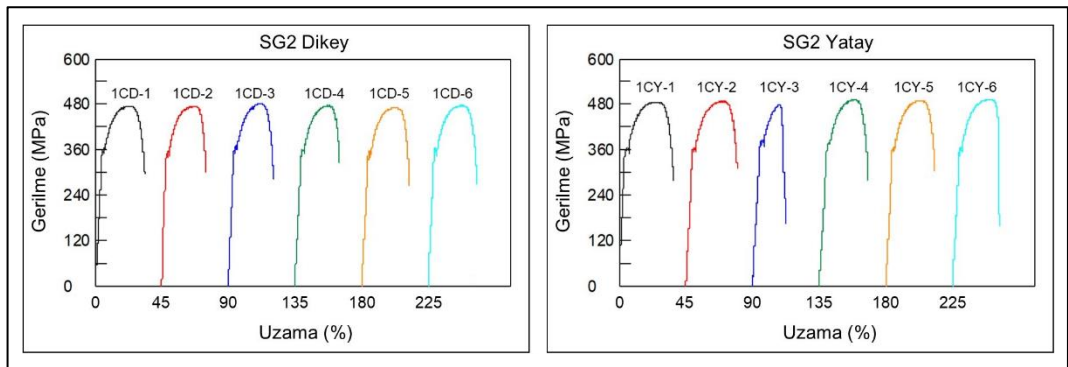
Çizelge 5.1. Grup (1) çekme deneyi sonuçları.

1. Grup (SG2) Çekme Deneyi Sonuçları					
Dikey			Yatay		
Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)	Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)
1CD-1	478,77	23,01	1CY-1	489,50	25,33
1CD-2	479,02	22,39	1CY-2	491,31	24,97
1CD-3	485,26	21,46	1CY-3	482,81	17,96
1CD-4	479,49	22,91	1CY-4	495,13	24,06
1CD-5	474,15	23,02	1CY-5	493,12	23,60
1CD-6	480,41	22,03	1CY-6	495,90	25,13
Ortalama	479,52	22,47	Ortalama	492,99	24,62

Not: 1CY-3 Ortalamaya dahil edilmemiştir.

Yatay yönde teste tabi tutulan çekme numunelerinden elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde 1CY-3 numaralı numunenin diğerlerine göre benzer çekme dayanımına ancak daha düşük % uzama değerine sahip olduğu görülmektedir. Şekil 5.26’da gösterilen deney sonrası kopan numune resimleri incelendiğinde bu numunede düşük uzamanın gerçekleştiği daha iyi anlaşılabilir. 1CY-3 nolu numune için çekme dayanımını daha az etkileyen ancak uzamasını olumsuz etkileyen bu durumun kopma bölgesinde var olan mikro boşluktan/boşluklardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu nedenle bu numuneden elde edilen sonuçlar, yatay konumdaki diğer numunelerin değerlerinin birbirine yakın olduğu durumu göz önüne alınarak ortalamaya dahil edilmemiştir.

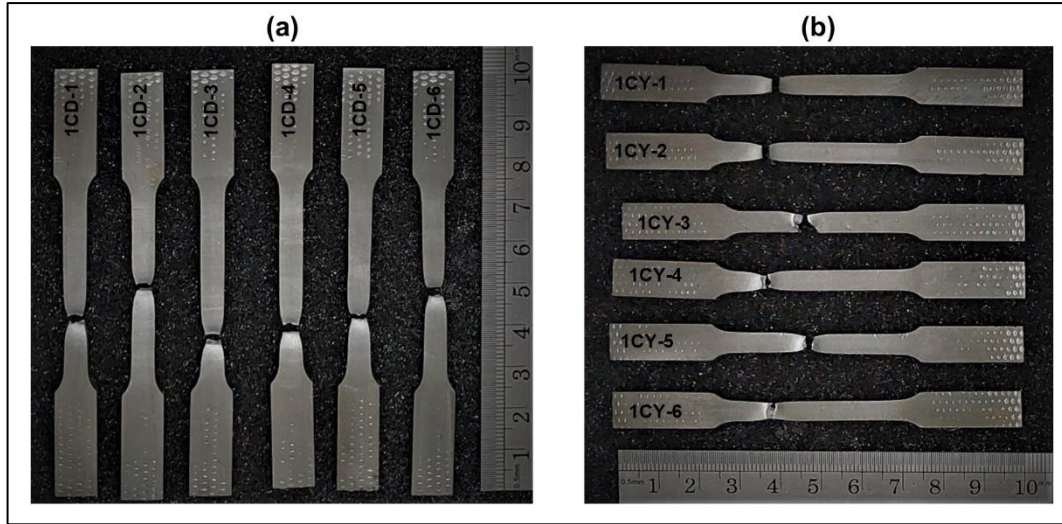
Hatalı sayılan numune haricinde yatay konumda olan 1. grup çekme numunelerinin ortalama maksimum çekme değeri ve maksimum % uzama değeri sırasıyla yaklaşık 493 MPa ve % 24,62 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan en düşük gerilme değeri (489,50 MPa) ile en yüksek değeri (496 MPa) arasında yaklaşık % 1,2’lik fark, % uzama değerleri için ise (% 23,60-% 25,33) % 6,83’lük bir fark bulunmaktadır. Bu değerlere göre dikey yönlü numunelerde olduğu gibi yatay çekme numunelerinde de gerçekleştirilen üretim koşulları altında numunelerin farklı bölgelerden çıkarılma durumu düşünüldüğünde malzemenin çekme özellikleri bakımından yüksek ölçüde homojenliğin sağlandığı sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.25. Grup (1) gerilme-uzama grafikleri.

St37 malzemesinin referans değerleri çekme dayanımını ortalama 435 MPa, % uzamasını ise \geq % 21 olarak göstermektedir [233]. Bu değerler göz önüne alındığında yatay ve dikey 1. grup üretimlerin çekme değerlerinin benzer kimyasal içeriğe sahip

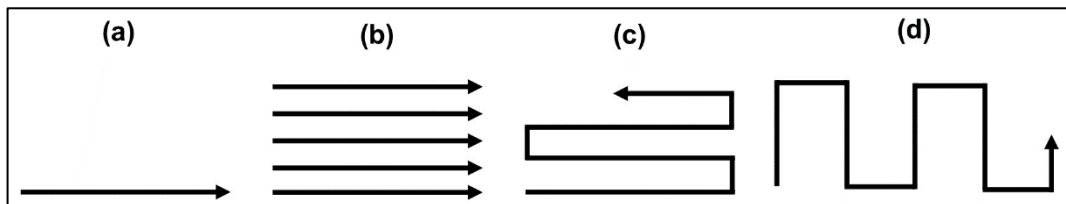
St37 malzemesiyle yakın değerleri sağladığı görülmektedir. Ayrıca TAEİ yöntemiyle üretilen parçanın çekme dayanımının St37 malzemesi için verilen referans değerlere göre daha yüksek olabileceği sonucuna varılmıştır. Bu durumun TAEİ işlemiyle üretilen malzemenin katmanlara tekrarlı ısıl işlem uygulamış bir şekilde üretilmesine ve ısıl işleme malzeme özelliklerinin iyileştirilmesine dayandırılabilir.



şekil 5.26. Grup (1) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.

1. grup üretimdeki dikey ve yatay çekme değerlerinin kıyaslanması durumunda, yatay numunelerin ortalama çekme dayanımı ve % uzama değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu durum üretimde seçilen kaynak parametrelerinin, katmanlar arası geçiş sıcaklığının her bir katman için eşit ayarlanmasına ve malzeme yığma stratejisinin uygunluğuna dayandırılabilir. Bu şekilde üretimle çekme özellikleri açısından yüksek ölçüde homojenlik sağlanabildiği söylenilebilmektedir. Her ne kadar durum böyle olsa da yatay değerlerin bir miktar yüksek olduğu kaçınılmazdır. Yatay ve dikey yöndeki numunelerin çekme değerlerinde meydana gelen bu farklılığın mikroyapıdaki değişimlerden kaynaklandığı düşünülmüştür. Benzer çıkarıma aynı malzeme ile gerçekleştirilen bir başka TAEİ işlemi çalışmasında rastlanılmıştır [215]. Aynı besleyici tel kullanılarak (SG2:ER70S-6) yapılan bazı çalışmalarda ise yatay numunelerin çekme dayanımının dikeylere göre bir miktar yüksek olduğu belirtilmiştir [234,235].

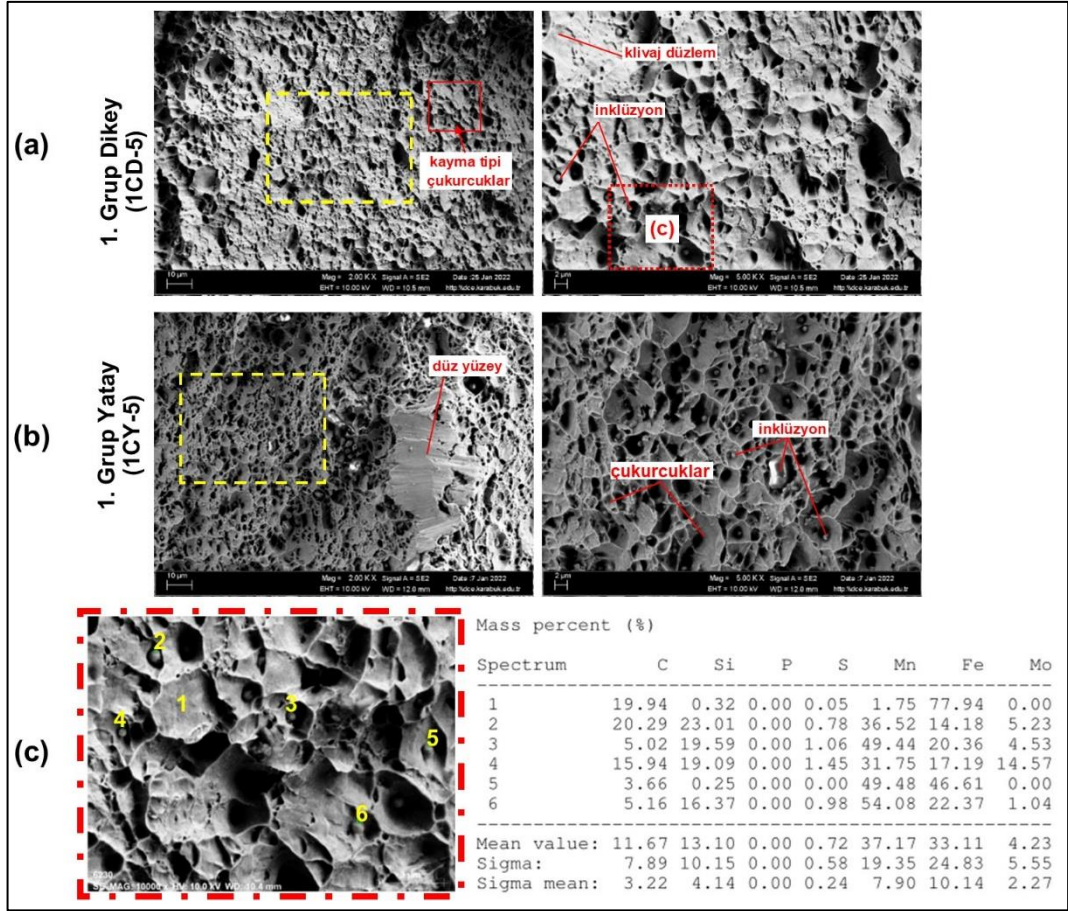
SG2 tel kullanılarak yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde farklı çekme dayanım ve yüzde uzama değerleri görülebilmektedir. Örneğin yatayda elde edilen çekme dayanımının büyük farklarla 429 ± 8 MPa [215] ve 503 ± 21 MPa [211] olarak değiştiğini gösteren farklı çalışmalar mevcuttur. Çekme dayanımında genel olarak hesaplanan değerler yaklaşık olarak 470-500 MPa arasında değişmektedir [148,211,228,234]. Benzer şekilde uzama değerleri bir çalışmada dikeyde 12 ± 3 , yatayda ise 35 ± 2 olarak hesaplanırken [211], başka bir çalışmada dikeyde $38 \pm 2,6$, yatayda ise $36 \pm 2,2$ olarak bulunmuştur [228]. Bu değerler göz önüne alınacak olursa 1. grup üretimde ortalama çekme dayanımı değerlerinin literatüre yakın olduğu söylenebilmektedir. Ancak yüzde uzama değerlerinde bir miktar farklılık bulunmaktadır. Bu farklılığın esasen üretim parametrelerinden ve malzeme biriktirme stratejisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Malzeme biriktirme türleri Le ve Paris'in çalışmasından anlaşıldığı gibi tek dikiş çoklu katman, bindirme dikişli çoklu katman ve salınlı çoklu katman tipinde gerçekleştirilebilmektedir [215]. Bu durumlar Şekil 5.27'de örneklendirilmiştir. Şekil 5.27 a) tek paso biçiminde duvar tipi parça üretimini, b) paralel pasolu, c) bindirme pasolu ve d) salınım şeklinde blok tipi parçalar üretim prensibini göstermektedir. Bu üretim tiplerine göre diğer üretim koşulları aynı tutulduğunda, malzeme biriktirme tipinin değiştirilmesi durumunda mikroyapının farklılıklar içermesi olasıdır. Bu farklılıklar çoğunlukla katmanların maruz kaldığı ısı miktarının etkilerinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple çalışmada ve literatür çekme sonuçlarında malzeme biriktirme türüne göre mekanik özelliklerde değişimlerin olması kaçınılmazdır. Aldalur vd. [228] tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, salınım ve bindirme şeklinde iki farklı üretim prosedürü uygulanmış ve mikroyapının her iki yapı için tamamen farklı olduğu belirtilmiştir. Daha düşük tane boyutlarına sahip olan salınlı üretimde daha yüksek çekme dayanımı elde edilmiştir.



Şekil 5.27. Kaynak dikişi oluşturma şekline göre malzeme biriktirme türleri.

1. grup üretimin çekme testi sonrası SEM ile incelenen kırık yüzey resimleri Şekil 5.28'de gösterilmiştir. Şekil 5.28 a) dikey, b) yatay numuneleri ve c) ise EDS analizi uygulanan kısmın SEM görüntüsünü ve sonuçlarını ifade etmektedir. Her bir yönlenmedeki numunenin iki farklı büyütme resmi verilmiştir. Sol kısımda 2000X büyütme, sağda ise 5000X büyütme resmi yer almaktadır. EDS'den alınan resimlere ise 10000X büyütme uygulanmıştır. İleriki kısımlarda yer alan çekme ve yorulma numunelerine uygulanan kırık yüzey çalışmaları için de aynı prosedürler uygulanmıştır.

1. grup dikey kırık yüzey resimleri incelendiğinde farklı büyüklükte çukurcukların (dimples) bulunduğu ve kayma tipi çukurcukların (shear fracture dimples [236]) olduğu görülmektedir. Yatay numunede ise çukurcuklar daha yoğun olarak bulunmaktadır. Yoğun çukurcuk oluşumu yatay numunenin sünekliğinin dikeye göre bir miktar fazla olmasının göstergesidir. Buna karşın her iki yönlenmedeki numunelerin sünek kopma davranışı sergilediği görülmektedir. Bu numunelerde sayıca fazla olan ve boyutları kısmi olarak değişebilen inklüzyonlar gözlemlenmiştir. Kırık yüzey incelemelerinde inklüzyon dağılımının bölgesel olarak değiştiği ancak kopmanın gerçekleştiği esas bölgelerde yoğunlaştığı görülmüştür. Şekil 5.28 c'de dikey numunedeki inklüzyonlara uygulanan EDS sonuçları gösterilmektedir. 1 numaralı ölçüm ana malzemeye diğerleri ise küre şeklinde bulunan inklüzyonlara uygulanmıştır. Inklüzyonların olduğu sonuçlara bakıldığında Mn oranının yüksek olduğu görülmektedir. Buradan küre şeklinde parçacıkların Mn esaslı bir bileşik olabileceği düşünülmüştür. Literatüre bakıldığında benzer küre yapılarıyla karşılaşmış, bunun MnO (Manganoksit) olduğuna değinilmiştir [237-239]. MnO koruyucu gazın oksitleme potansiyelinden ve TAEİ işleminde yüksek ısı girdisinden ve hızlı soğumadan dolayı oluşabilmektedir [203].



Şekil 5.28. Grup (1) çekme testi kırık yüzey resimleri.

Şekil 5.28’de gösterilen kırık yüzeylerde bulunan küre parçalarına bakıldığında bunların çevresinde yer alan boşlukların merkezine yerleştiği görülmektedir. Kırık yüzey incelemelerinde MnO olduğu düşünülen bu parçalara oldukça fazla rastlanılmıştır. Bunlara çoğu bölgede rastlanması ve sayıca fazla olmaları, küre parçalarının kopma işlemini tetikleyen ve hızlandıran bir unsur olduğu düşünülmüştür. Küre parçalarının çevresinde yer alan boşlukların kesit daralmasına sebebiyet vereceği ve bu yüzden çekme esnasında dayanabilecek yük seviyesini düşüreceği ve böylece çekme dayanımı azaltan bir etki yapabileceği sonucu çıkarılmıştır. Literatürde benzer şekilde MnO inklüzyonlarının aktif yük alanını azaltarak çekme dayanımını olumsuz etkileyebileceğinden bahsedilmiş ve anlatılan bu durum desteklenmiştir [238].

5.5.2. 2. Grup (308LSi) Çekme Deneyi Sonuçları

2. grup sadece 308LSi paslanmaz çelik tel ile üretilen numunelerin çekme sonuçları Çizelge 5.2’de, çekme grafikleri ise Şekil 5.29’da verilmiştir. Dikey yöndeki sonuçlara bakıldığında 2CD-1 numunesi mikro gözenekten kaynaklandığı düşünülen hata dolayısıyla diğer numunelere göre daha düşük dayanım ve uzama sergilemiştir. Bu sebeple dikey çekme sonuçlarının ortalama değerine bu numune dahil edilmemiştir. Çizelge 5.2 incelendiğinde dikey yöndeki diğer numunelerde birbirine yakın sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu numunelerin 2. grup üretimin farklı kısımlarından çıkarılma durumu düşünüldüğünde, parçanın bir bütün olarak çekme dayanımı bakımından, dikey yönde homojen özellik sergilediği söylenebilmektedir. Bu durumun, üretim yapılırken torç hareketinin her katman üretiminde aynı noktadan başlayıp aynı noktada bitmesinin sağladığı faydadan olduğu düşünülmektedir. Böylelikle üretim dairesel bir harekete benzer şekilde gerçekleşmiş, üretilen her bir katmanda dikişin her bölgesinin yaklaşık olarak eşit ısı girdisine ve eşit bir soğuma hızına sahip olması sağlanmıştır.

Çizelge 5.2. Grup (2) çekme deneyi sonuçları.

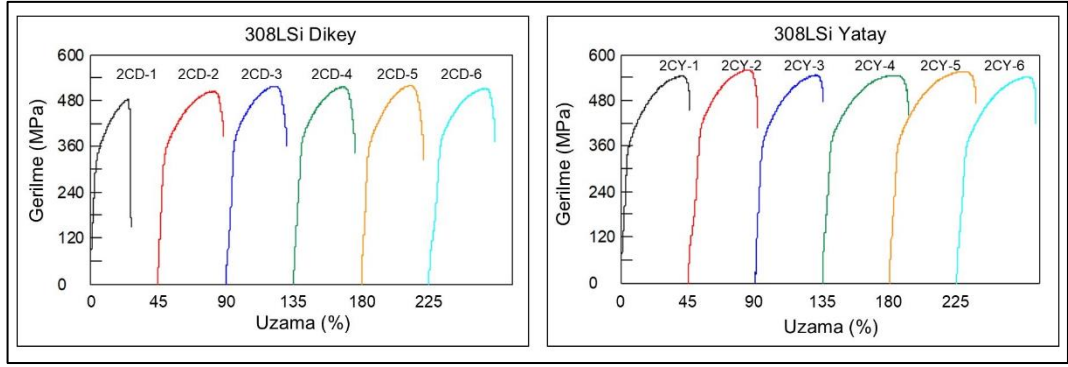
2. Grup (308LSi) Çekme Deneyi Sonuçları						
Dikey			Yatay			
Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)	Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)	
2CD-1	486,07	25,03	2CY-1	547,82	40,72	
2CD-2	508,06	37,08	2CY-2	563,54	39,80	
2CD-3	520,24	32,50	2CY-3	550,59	40,67	
2CD-4	514,77	36,89	2CY-4	549,34	47,72	
2CD-5	519,05	32,35	2CY-5	560,28	49,45	
2CD-6	522,75	33,54	2CY-6	545,18	46,65	
Ortalama	516,97	34,47	Ortalama	552,79	44,17	

Not: 2CD-1 Ortalamaya dahil edilmemiştir.

Dikey yönde çıkarılan paslanmaz çelik numunelerin ortalama çekme gerilmesi yaklaşık 517 MPa, % uzama değeri ise yaklaşık % 34,5 olarak hesaplanmıştır. En yüksek çekme gerilmesi yaklaşık 523 MPa, en düşüğü ise 508 MPa olarak hesaplanırken, en yüksek ve en düşük % uzama değerleri sırasıyla yaklaşık % 37,1 ve % 32,4 olarak bulunmuştur. Yatay yöndeki çekme değerleri incelendiğinde ise öncelikle dikeylere nazaran daha yüksek gerilme ve uzama değerlerine ulaşıldığı söylenebilmektedir. En yüksek çekme dayanımı yaklaşık 560 MPa ile 2CY-5 nolu

numunede elde edilmiştir. Benzer şekilde en büyük % uzama değeri yaklaşık % 50 ile yine aynı numunede hesaplanmıştır. Ortalama çekme gerilmesi yatay numuneler için yaklaşık 553 MPa, maksimum % uzama ise yaklaşık % 44,2 olarak ölçülmüştür. Bu değerlere göre yataydaki numuneler dikeye göre yaklaşık % 7 daha fazla gerilme dayanımına ve yaklaşık % 28 daha fazla uzamaya sahip olmuştur. Yatay yöndeki numunelerde çekme dayanımdaki artış daha az oranda görülürken uzama değerlerinde nispeten daha yüksek oranda artış görülmüştür. Bu durumda yatay numunelerin sünekliliğinin dikeydekilere göre daha yüksek olduğu açıktır. 2. grup üretimde uygulanan TAEİ üretim parametreleri dahilinde çekme özellikleri bakımından dikey ve yatay yönde anizotropik bir durum olduğu anlaşılmaktadır. TAEİ ile üretilen yapılarda anizotropik mekanik özelliklerin meydana geldiği başka çalışmalarda bulunmaktadır [33,218,240-242]. Üretim işlemi süresince meydana gelen tekrarlı termal döngülerin ve buna bağlı olarak mikroyapıda meydana gelen değişimlerin başlıca bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Literatürde hızlı ısınma ve soğumanın sütunsal tane büyümesine sebebiyet verdiği ve bu durumun Eİ parçalarında anizotropik özelliklere neden olduğu belirtilmiştir [243]. Bir başka çalışmada, TAEİ parçalarının mikroyapısında büyük sütunsal dendritlerin tipik olarak bulunduğu, bununda mekanik özellikleri düşürerek ve anizotropik özellik davranışı oluşturduğundan bahsedilmiştir [244].

Şekil 5.11'de 2. grup üretimin mikroyapı resimleri değerlendirildiğinde inşa yönü boyunca sütunsal dendritik yapının yer aldığı görülmektedir. Özellikle sıcaklık gradyanlarının bulunduğu kısımlara doğru (yukarıya) dendritler uzanmış durumdadır. TAEİ işlem süresince ısı girdisi inşa yönü boyunca ilerlediğinden mikroyapıdaki bu oluşum dikey numunelerde meydana gelecektir. Bu durum ayrıca bir önceki paragrafta bahsedilen anizotropik özellik karakteristiği için bir etken oluşturmaktadır. 308L tel kullanılarak yapılan bir çalışmada sütunlu kristallerin inşa yönü boyunca büyümesi yatay ve dikey yönde çekme özelliklerinin farklı olmasının temel nedeni olduğu belirtilmiştir. Ayrıca yataydaki gerilmelerin genellikle tane sınırı kuvvetlerine direnç gösterdiği, dikey gerilmelerin ise esas olarak tanelerin içindeki kuvvetlere ve biriken katmanlar arasındaki bağlanma kuvvetlerine direndiği vurgulanmıştır [218]. Literatür verileriyle de bahsedilen bu durumlar 2. grup üretimdeki çekme dayanımının yöne bağlı olarak değişmesinin sebepleri olduğu düşünülmektedir.



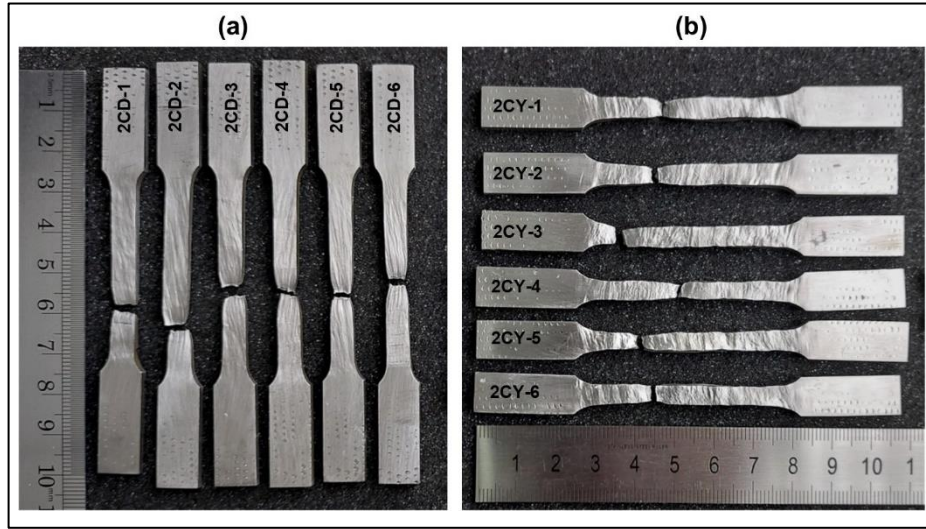
Şekil 5.29. Grup (2) gerilme-uzama grafikleri.

Gordon vd. [223], 308L tel kullanarak yaptıkları üretimde dikeyde yaklaşık 499 ± 7 MPa, yatayda ise 524 ± 13 MPa çekme dayanımı elde etmişlerdir. Ke ve Xiong çalışmalarında TIG yöntemiyle 308L tel ile üretim gerçekleştirerek sadece yatay yönde uyguladıkları çekme testinde, çekme dayanımını yaklaşık 492 MPa, % uzama değerini ise yaklaşık % 50 olarak bulmuşlardır [219]. Bir başka çalışmada Laghi vd. [245], 308LSi malzemesiyle gerçekleştirdikleri üretimde dikeyde yaklaşık 513 ± 41 MPa, yatayda ise yaklaşık 553 ± 6 MPa çekme dayanımı bulmuşlardır. Bu değerler ile kıyaslandığında 2. grup üretim için literatüre yakın sonuçların elde edildiği görülmektedir. Sonuçlarda meydana gelen farklılıklar uygulanan kaynak yöntemi, üretim parametreleri ve test koşullarının değişikliğine dayandırılmıştır.

Literatürde 304L çeliğin minimum çekme dayanımı ve % uzamanın sırasıyla 480 ve % 40 olduğu, maksimum değerlerinin ise 655 MPa ile % 55 olduğu belirtilmiştir [246]. Bu değerlere göre 2. grup numunelerden elde edilen çekme değerleri ortalamasının 304L çeliğinin bahsedilen literatür değerlerinin arasında olduğu anlaşılmaktadır. Bu bakımdan 2. grupta üretilen parça çekme dayanımı açısından 304L çeliğinin belirlenen aralık değerlerinde özelliklerini yansıtabilmiş ve ticari olarak bulunabilen bu çeliğin yerine kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

Şekil 5.30'da (a, dikey ve b, yatay) 2. grup numunelerin çekme testi sonrası görüntüleri verilmiştir. Bu numunelerin makro görüntüleri değerlendirildiğinde ticari olarak bulunan paslanmaz çeliklerde çekme testi sonrasında rastlanılmayan bir durum oluşmuştur. Test bölgesinin uzama gösteren kısımları yatay ve dikey yöndeki numuneler için belirgin ve birbirinden keskin bir şekilde ayrılan şekilsel biçimi farklı

sünme davranışı sergilemiştir. Dikey yöndeki numuneler çekme eksenine paralel uzanan kayma bantları içeren boğumlu bir yapı oluştururken, yataydakiler ise çekme eksenine dik ve daha sıkı biçimde olan kayma bantlı bir yapı meydana getirmiştir. Bu yapıların çekme kuvvetine karşın gösterilen direnç sonucu meydana gelen şekil değişiminden kaynaklandığı düşünülmektedir. Buna göre yatay yöndeki numunelerde görülen bu sıkı kayma bantlı yapının çekme dayanımının ve % uzamanın dikeydekilere göre daha fazla olmasını sağlamıştır.



Şekil 5.30. Grup (2) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.

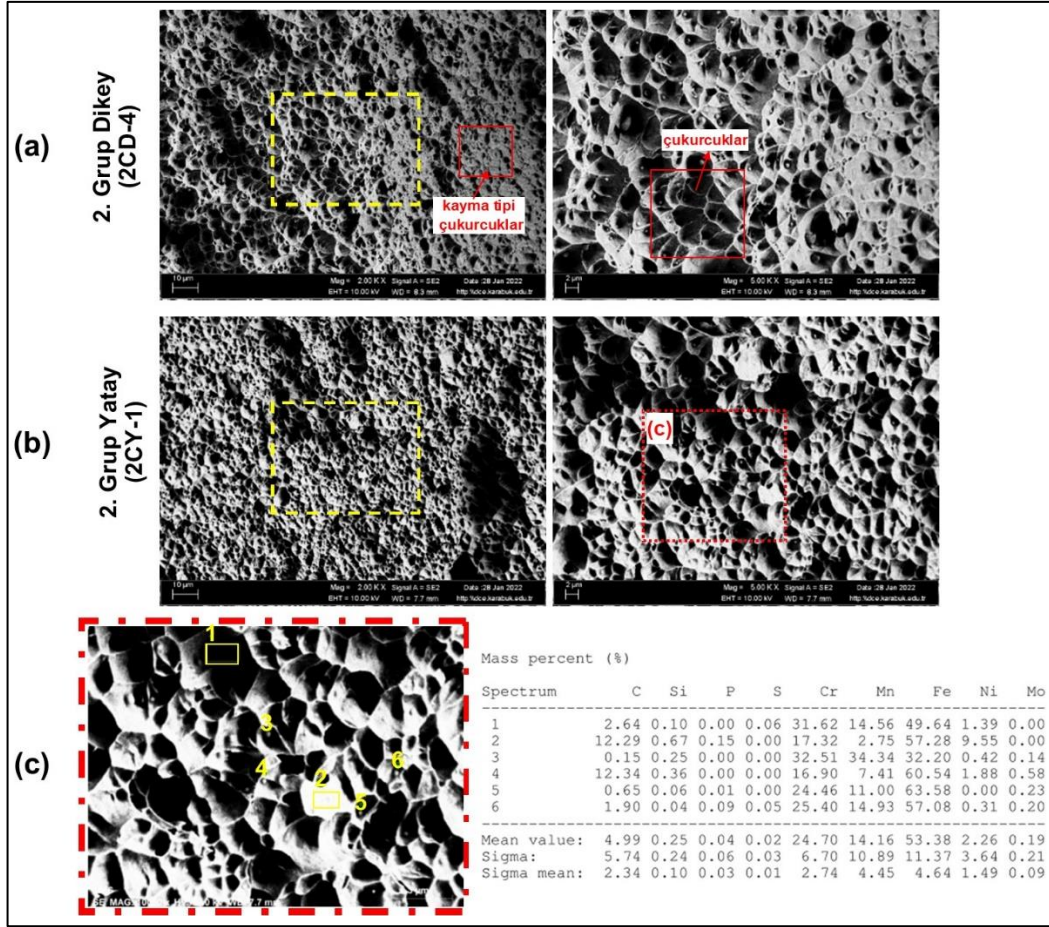
Çekme sonrası yatay ve dikey numunelerde test bölgesinde meydana gelen şekil değişimleri makro resimleri ile Şekil 5.31’de (a, dikey ve b, yatay) daha belirgin görülmektedir. Literatürdeki TAEİ yöntemiyle üretilmiş paslanmaz çeliklerin çekme testleri sonrası kopan yüzey görüntüleri araştırılmıştır. Çekme test bölgesinin kopma resimleri paylaşılan çalışmalar dahilinde TAEİ yöntemiyle üretilen paslanmaz çeliklerde benzer oluşumlara rastlanılmıştır [247-249]. Pragana vd. [248], çalışmalarında bu durumu yatay ve dikey konumda mikroyapıdaki dendrit oluşumunun yönlenme biçimi farklılığından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Yatay numunelerde birincil dendrit kolları dik konumda iken dikeyde paralel olarak uzanmaktadır. Yatay numuneler için farklılığı, dendritlerin birincil kollarına yerleştirilmiş çoklu konumlarda sabit boyunların büyümesine bağlamışlar ve bu olayın da boyun vermenin ötesinde plastik deformasyona dayanma kabiliyetine ve ek dayanıma neden olduğunu belirtmişlerdir. Dikey numuneler için ise çekme

yüklemesinin dislokasyon hareketine önemli bir engel oluşturmadan temel olarak dendritleri uzatmasına dayandırmışlardır.



Şekil 5.31. Grup (2) numunelerin test bölgesinde görülen şekil değişimleri.

Şekil 5.32’de 2. grup paslanmaz çelik çekme kırık yüzeyleri gösterilmektedir. 1. grup üretimin yatay numunesinde olduğu gibi, 2. grupta da kayma tipi çukurcuklar görülmektedir. Çukurcuklar yatay numunede dikeye göre daha yoğun bir şekilde oluşmuştur. Bu durum çekme testi sonuçlarıyla da destekleneceği gibi yatay numunenin daha sünek olduğunu göstermektedir. Yatay numunede dikeye göre daha eş benzer boyutta çukurcuklar oluşmuştur. 1. grup üretime benzer şekilde 2. grup üretimde de kırık yüzey bölgesinde küre şeklindeki inklüzyonlar yoğunlaşmış bir şekilde bulunmaktadır. Bu inklüzyonların çukurcuk oluşumunda ve çukurcuk biçiminde etkili olabileceği düşünülmektedir. Bir araştırmada küçük çukurcukların tane sınırlarındaki mikro boşluk veya diğer mikroyapısal özelliklerden, büyüklerinin ise oksit parçalarının çekirdeklenmesiyle meydana gelebileceğine değinilmiştir [250].



Şekil 5.32. Grup (2) çekme testi kırık yüzey resimleri.

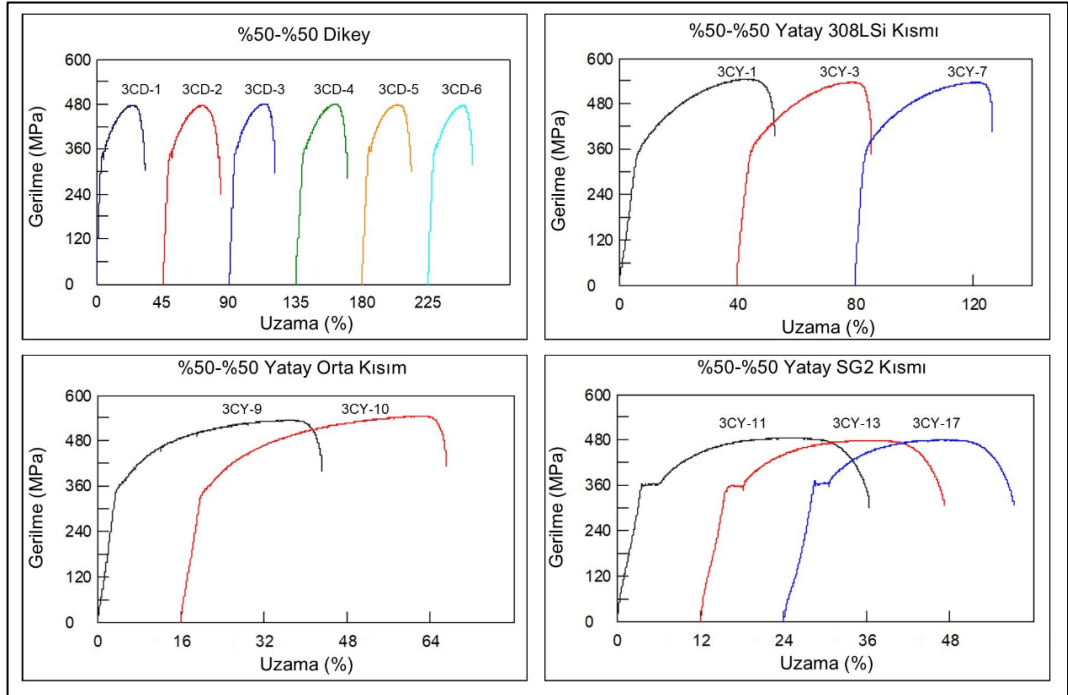
Şekil 5.32 c’de gösterilen EDS sonuçlarına göre kırık yüzeydeki küre parçalarında Mn, Cr ve Fe elementi yoğun olarak bulunmaktadır. 1. grup üretimde olduğu gibi bu parçacıkların MnO olma ihtimali bulunmaktadır. EDS ile benzer alaşım elementlerinin bulunduğu bir çalışmada, bu yapıyı krom ferromanganez oksit olarak tanımlamışlardır [251]. Başka bir çalışmada ise tek tel ve çift tel besleme ile Cr-Ni alaşımli paslanmaz çelikle TAEİ işlemi gerçekleştirilmiş, kırık yüzey çalışmalarında benzer küresel parçalar ikincil faz partikülü olarak belirtilmiştir. Çift tel besleme ile daha düşük boyutlarda daha yoğun çukurcuklar ve daha fazla sayıda küresel parçacık görülmüştür. Çalışma sonucunda çift tel besleme ile çekme dayanımında % 10,2, uzama değerinde ise % 176 artış bulunmuştur [252].

5.5.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Çekme Deneyi Sonuçları

3. grup dikey numunelerin çekme test sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir. Çekme makinesinden elde edilen gerilme-uzama grafikleri ise yatay numunelerle birlikte Şekil 5.33'te gösterilmiştir. Numune sayısı fazla olması sebebiyle yatay yönlenme için sadece belirli numunelerin çekme grafikleri verilmiştir.

Çizelge 5.3. Grup (3) dikey çekme deneyi sonuçları.

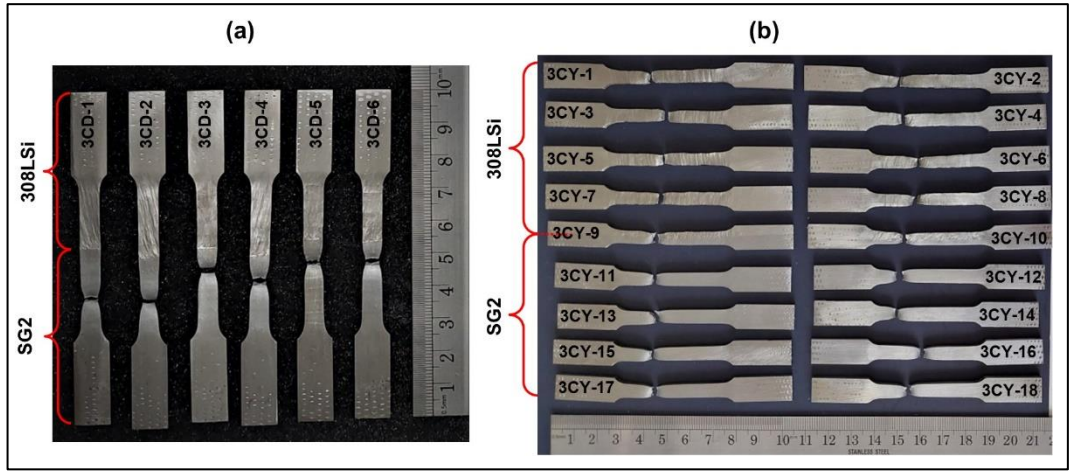
3. Grup (%50-%50) Çekme Deneyi Sonuçları			
	Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Maksimum Uzama (%)
%50-%50 Dikey	3CD-1	480,80	24,61
	3CD-2	479,87	26,05
	3CD-3	484,91	24,11
	3CD-4	484,40	27,22
	3CD-5	481,72	24,46
	3CD-6	480,11	23,81
	Ortalama	481,97	25,04



Şekil 5.33. Grup (3) gerilme-uzama grafikleri.

Şekil 5.34'te (a, dikey ve b, yatay) 3. grup numunelerin çekme testi sonrası durumları gösterilmektedir. 3. grup çekme sonuçlarının değerlendirilmesine ilk olarak kopma durumlarının incelenmesiyle başlanılmıştır. Şekil 5.34 a'da dikey numunelerin kopma

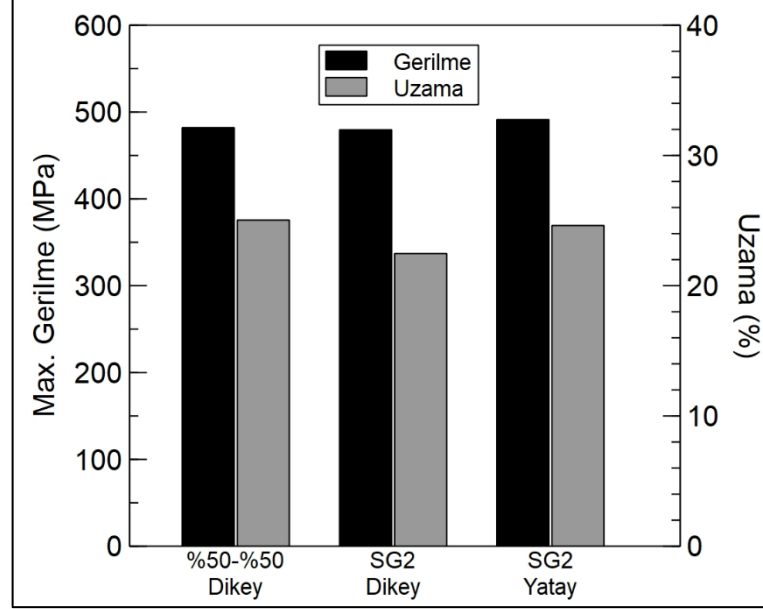
resimlerine bakıldığında tüm numunelerin SG2 tarafından koptuğu açıkça görülmektedir. Bu durumda öncelikle düşük alaşımlı çelik ile paslanmaz çeliğin birleşmesinden meydana gelen ara yüzeyin dayanımının SG2'den daha fazla olduğu söylenebilmektedir. Ayrıca üretim esnasında ara yüzeyde mukavemeti azaltacak herhangi bir hatanın olmadığı, birleşme açısından sağlıklı bir ara yüzey olduğu da belirtilebilir. Kopmaların ara yüzeyin uzak kısımlarında gerçekleşmesi durumu da başka bir olumlu sonuçtur. Böylelikle ara yüzeye yakın kısımlarında da birleşmeden kaynaklı hataların olmadığı ve bu kısımların dayanımının SG2 ana malzemesine yakın veya daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Bütün bunlar 3. grup FDM üretimini çekme dayanımı açısından başarılı kılmaktadır.



Şekil 5.34. Grup (3) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.

3. grup dikey numunelerin ortalama çekme gerilmesi yaklaşık 482 MPa, % uzama değeri ise % 25 olarak hesaplanmıştır. Bu numunelerin SG2 tarafından koptuğu göz önüne alındığında, çekme dayanımlarının 1. grup üretimdeki tamamı SG2 tel ile üretilmiş dikey numunelere yakın olması beklenmektedir. Bu durum her iki grup için hesaplanan değerlerle yüksek ölçüde örtüşmektedir. SG2 dikey numunelerin ortalama çekme dayanımı yaklaşık 480 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer neredeyse 3. grup dikey numunelerin dayanım değerleriyle aynıdır. % Uzama değerlerine bakıldığında ise 1. grup yatay numunelerin % 24,6'lık değerine yakın olduğu görülmektedir. 3. grup üretimlerin paslanmaz tarafında meydana gelen bir miktar uzama, 3. grup dikey numunelerin % uzamasının 2. grup yataya yakın olmasına ve 2. grup dikeyden bir

miktar fazla olmasına katkı sağlamıştır. Şekil 5.35'te verilen kıyaslama grafiğinde bu durum daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 5.35. Grup (2) ve grup (3) dikey çekme sonuçlarının kıyaslanması.

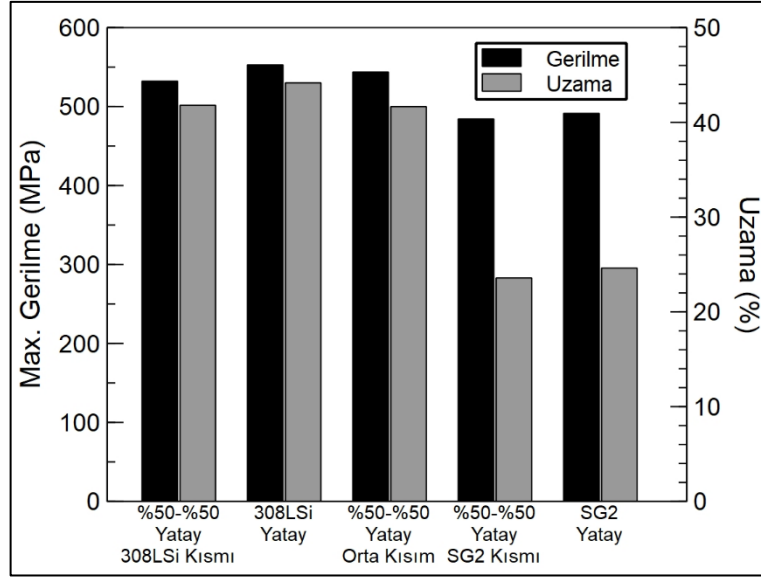
Yatay numunelerin çekme test sonuçları Çizelge 5.4'te verilmiştir. Yatay numuneler ara yüzeye kadar aynı tür malzeme içeriğine sahiptir. Bunların dışında her iki malzemenin ara yüzeye yaklaşık olarak eşit mesafede bulunan 3CY-9 ve 3CY-10 yatay numuneleri, çekme eksenine boyunca uzun bir birleşme ara yüzeyi içermektedir. Tamamı 308LSi malzeme içeren numunelerin ortalama çekme dayanımı yaklaşık 532 MPa ve % uzama değeri ise % 42 olarak bulunmuştur. 2. grup yatay numuneler ile kıyaslandığında çekme dayanımında yaklaşık % 4'lük, % uzama değerinde ise % 5,4'lük bir azalma hesaplanmıştır. Bu değerlere göre her iki numune grubu yaklaşık olarak benzer sonuçlar vermiştir. Bu durumda 3. grup numunelerde farklı iki malzeme kimyasal içeriğinden dolayı önemli mikroyapı değişimlerinin olmadığı düşünülebilir. Bu durum yatay numunelerin SG2 kısmından 308LSi tarafına doğru element geçişinin çok düşük miktarlarda olduğunu ve paslanmaz çelik kısmında esas malzemede seyrelmenin çok az olduğuna dayandırılabilir. Buna ek olarak Şekil 5.34 b incelendiğinde 308LSi içeren tarafta 2. grup yatay numunelerde olduğu gibi çekme testi esnasında çekme eksenine dik olan bantlaşmış yapı (Şekil 5.31 a) oluşumu görülmüştür.

Çizelge 5.4. Grup (3) yatay çekme deneyi sonuçları.

3. Grup (%50-%50) Yatay Çekme Deneyi Sonuçları					
308LSi Kısmı			SG2 Kısmı		
Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)	Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)
3CY-1	548,68	43,88	3CY-11	488,44	24,56
3CY-2	536,04	44,93	3CY-12	484,32	23,67
3CY-3	540,85	39,47	3CY-13	482,01	23,55
3CY-4	538,55	39,20	3CY-14	485,99	22,63
3CY-5	518,95	41,71	3CY-15	483,09	23,82
3CY-6	504,43	40,96	3CY-16	481,68	23,80
3CY-7	540,56	41,20	3CY-17	483,61	23,21
3CY-8	529,33	43,09	3CY-18	484,20	23,40
Ortalama	532,17	41,80	Ortalama	484,17	23,58

Orta Kısım		
Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)
3CY-9	538,16	36,83
3CY-10	549,08	46,49
Ortalama	543,62	41,66

3. grup yatay orta kısımda bulunan ve çekme eksenini boyunca uzun bir ara yüzey içeren numunelerin çekme dayanımı ortalama yaklaşık olarak 544 MPa, % uzama değeri ise % 41,7 hesaplanmıştır. Bu değerler aynı üretimin 308LSi kısmına oldukça yakın çıkmıştır. Ara yüzey çekme eksenini boyunca paralel olduğu durumda da dikey numunelerdeki gibi herhangi bir hata ile karşılaşılmasıdır. Yatay numunelerin SG2 tarafında ise yaklaşık olarak 484 MPa çekme dayanımı ve % 23,6 uzama değeri hesaplanmıştır. 1. grup yatay çekme değerleri ile kıyaslandığında yaklaşık olarak çekme dayanımında % 1,8, uzama değerinde ise % 4,2'lik azalma görülmüştür. 308LSi tarafında olduğu gibi çekme değerlerindeki değişim SG2 tarafında da göz ardı edilebilir şekildedir. 1. grup yatay (SG2)-3. grup yatay SG2 kısmı, 2. grup yatay (308LSi)-3. grup yatay 308LSi kısmı ve orta kısımdan elde edilen çekme değerleri sonuçlarının birbirleriyle kıyaslanabilmesi açısından sütunlu grafik olarak Şekil 5.36'da verilmiştir.

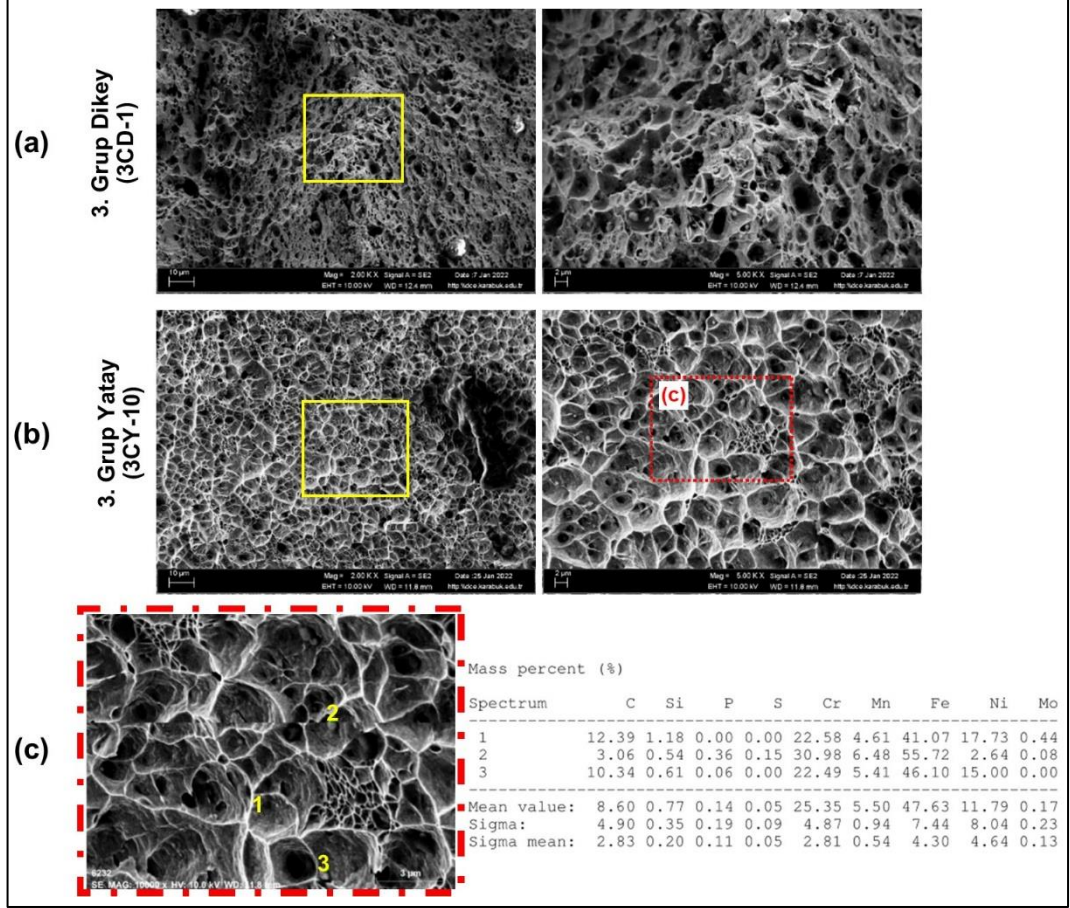


Şekil 5.36. Grup (3) yatay numunelerinin karşılaştırmalı grafiği.

Şekil 5.37’de 3. grup çekme test numunelerine ait SEM ile incelenen kırık yüzeyleri gösterilmektedir. Dikey yöndeki numuneler bilindiği gibi SG2 tarafından koptuğu için kırık yüzey resminin 1. grup dikey yöndeki numuneye benzer olması beklenilmektedir. Her iki resim kıyaslandığında bu durumun yüksek ölçüde sağlandığı görülmektedir. Çukurcuk boyutları ve sayıları değerlendirildiğinde yaklaşık olarak benzer olduğu anlaşılmaktadır. 1. grup üretimde bahsedildiği gibi kayma tipi çukurcuk oluşumu 3. grup dikey numunelerde de görülebilmektedir.

3. grup üretimin yatay yönlenmedeki incelen kırık yüzeyi 3CY-10 numunesi ait olup bu numune çekme eksenine paralel uzanan uzun bir ara yüzey içermektedir. Bu durumda kırık yüzey iki farklı malzeme içermektedir. Şekil 5.37 b’de bu numunenin paslanmaz çelik tarafının kırık yüzey incelemesi yapılmıştır. Bu yüzey 2. grup üretime benzer ağırlıklı olarak çukurcuklu yapıdan oluşmaktadır. İnküzyon oluşumu dikey yöndeki kırık yüzeyde de görülmüş ancak bunların sayı bakımından diğer numunelere nazaran az olduğuna rastlanılmıştır. Burada dikkat çeken başka bir durum çukurcuklar arasında bal peteği görünümünde olan başka çukurcuk gruplarının varlığıdır. Şekil 5.37 c’de gösterilen 10000X büyütmede, bal peteksi bu yapı daha belirgin görülebilmektedir. Bu yapının sünekliği artırıcı etki yaptığı düşünülmektedir. Şekil 5.37 c’de EDS sonuçlarına bakıldığında kırık yüzeyde önceki numunelerdeki gibi inküzyon ve/veya ikincil fazların varlığı anlaşılmaktadır. Ayrıca ana malzemedan

alınan 1 numaralı EDS örneği de paslanmaz çelik temel alaşım elementlerinin yoğunluğunu göstermektedir.

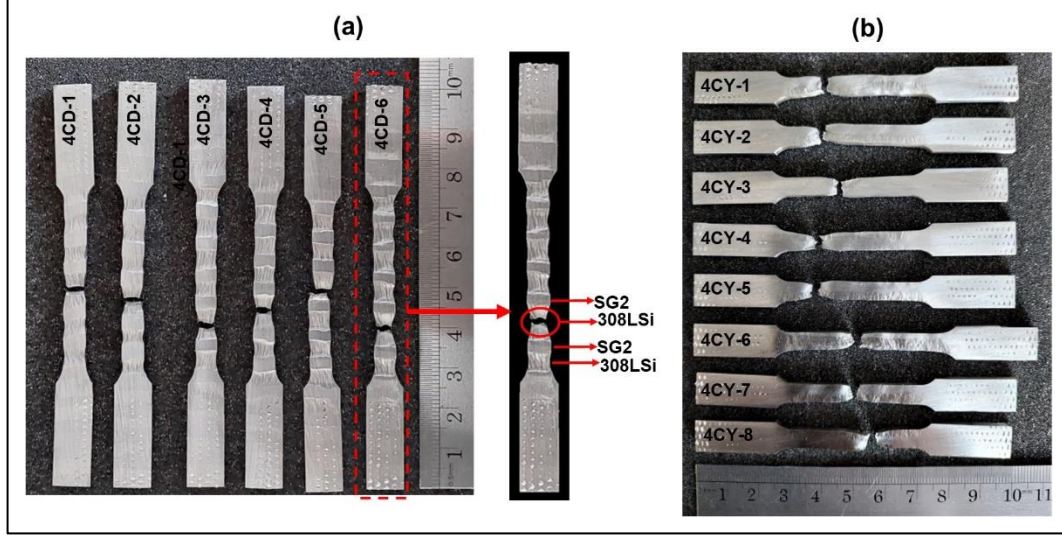


Şekil 5.37. Grup (3) çekme testi kırık yüzey resimleri.

5.5.4. 4. Grup (Sıralı) Çekme Deneyi Sonuçları

3. grup üretimde olduğu gibi çekme testi sonrası 4. grup numunelerin makro boyutta kopma yüzeylerinin incelenmesi ara yüzey durumunun ve test sonuçlarının değerlendirilmesi açısından önem arz etmektedir. Bu nedenle ilk değerlendirmeler Şekil 5.38'de a) dikey ve b) yatay) verilen çekme testi sonrası numune durumlarına bakılarak yapılmıştır. Şekil 5.38 a'da gösterilen dikey numunelere bakıldığında çekme testinde kopmanın ara yüzeylerden değil 308LSi katmanı tarafından gerçekleştiği açıktır. Bu durum ara yüzeyin çekme dayanımının yüksek olduğu ve farklı iki malzemenin birleşme bölgesinde dayanımı azaltacak hatalar olmadığı ve zararlı

yapılar içermediği anlamına gelmektedir. Böylelikle sıralı üretimde ara yüzey hatalarından yoksun başarılı bir FDM parçasının üretilebildiği söylenebilir.

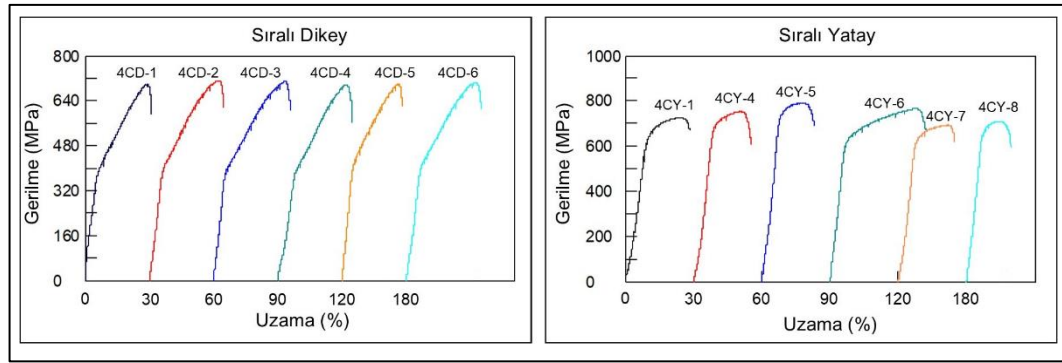


Şekil 5.38. Grup (4) numunelerin çekme testi sonrası görünümü.

4. grup üretimdeki numunelerin çekme testi sonuçları Çizelge 5.5'te verilmiştir. Bu numunelere ait makine verilerinden alınan gerilme-uzama grafikleri ise Şekil 5.39'da gösterilmiştir. Dikey yöndeki sonuçlara göre maksimum ortalama çekme dayanımı yaklaşık 709 MPa, uzama değeri ise % 31 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre sıralı üretimde tek malzeme içerikli 1. ve 2. grup üretimlere göre yüksek dayanım elde edildiği görülmektedir. Çekme dayanımında 1. grup üretime (479,5 MPa) göre yaklaşık % 48, 2. gruba (517 MPa) göre yaklaşık % 37 artış görülmüştür. % Uzama değerlerinde ise 1. grup üretime göre % 37 artış olmuştur. % uzama değeri 2. grup üretime yaklaşmış ancak yaklaşık % 10'luk bir azalma görülmüştür. Sıralı dikey numunelerin % uzama değeri düşük alaşımlı çeliğe göre önemli derecede artış göstermiş ve paslanmaz çeliğe yaklaşmıştır. Sıralı üretimin tüm kopmaları paslanmaz çelik bölgesinde meydana gelmiştir. Üretimin SG2 tel içeren kısmı gevrek, 308LSi kısmı ise sünek bir davranış göstermiştir. Şekil 5.40'da bu durum örneklendirilmiştir. Kopma bölgesinin 308LSi kısmından gerçekleşmesi aynı zamanda bu bölgelerde ölçülen sertlik değerleriyle de bir bütünlük sağlamaktadır. Sertlik ölçümlerinde SG2 tarafının değerinin kayda değer derecede 308LSi'ye göre daha fazla çıkması bu durumu desteklemektedir.

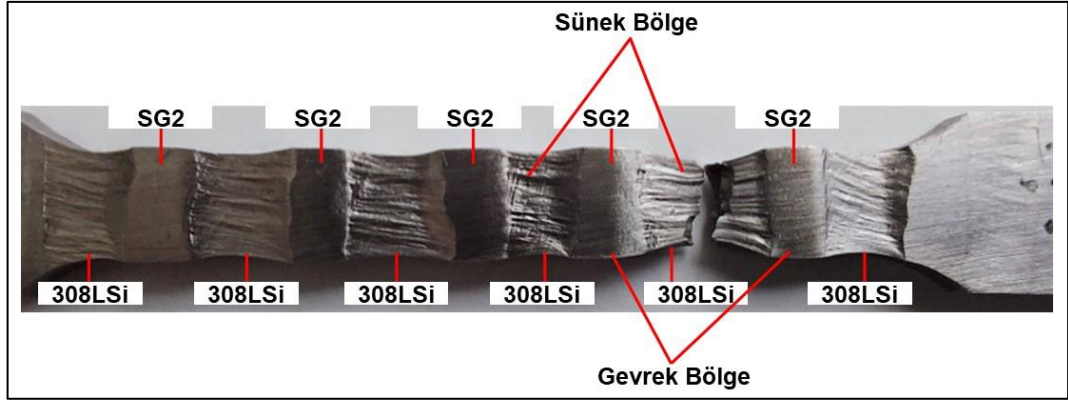
Çizelge 5.5. Grup (4) çekme deneyi sonuçları.

4. Grup (Sıralı) Çekme Deneyi Sonuçları					
Dikey			Yatay		
Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)	Numune No	Çekme Gerilmesi (MPa)	Max. Uzama (%)
4CD-1	703,40	29,15	4CY-1	731,12	23,80
4CD-2	718,71	32,57	4CY-2	767,78	16,58
4CD-3	713,56	33,43	4CY-3	688,41	16,17
4CD-4	702,03	32,16	4CY-4	758,38	20,98
4CD-5	705,02	26,52	4CY-5	794,80	17,68
4CD-6	711,81	32,40	4CY-6	771,15	37,97
Ortalama	709,09	31,04	4CY-7	698,72	21,66
			4CY-8	715,72	14,20
			Ortalama	740,76	21,13



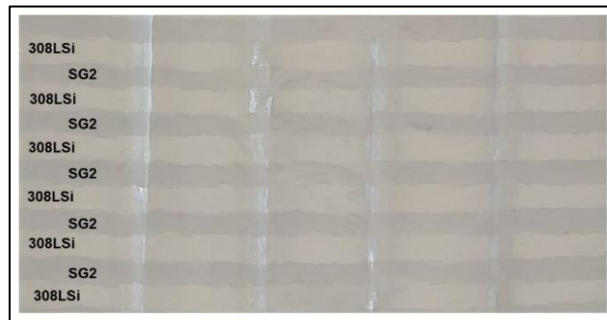
Şekil 5.39. Grup (4) gerilme-uzama grafikleri.

Şekil 5.38 a'da ve Şekil 5.40'da gösterilen dikey numuneler incelendiğinde 308LSi içeren kısımlarının çoklu bölgelerden deforme olarak bel verdiği ve çekme esnasında uzamaya çalıştığı görülmektedir. Ancak bu uzamalar kopmanın olmadığı yerlerde SG2 içeren kısımlar tarafından sınırlandırılmıştır. Gevrek olan SG2 kısımları bir bariyer görevi üstlenmiş ve sünek olan bölgelerin kopmasına engel olarak kopma sürecini geciktirmiştir. Maksimum yüklenmede ise sünek olan paslanmaz çelik bölgesi yüksek çekme gerilmesi nedeniyle dayanabileceği maksimum gerilmeden sonra hasara uğramıştır. Şekil 5.40'da test bölgesinin çoklu sayıda bel vermeye zorlanmış 308LSi kısımları incelendiğinde, 2. grup dikey numunelerdeki gibi çekme eksenine paralel uzanan kayma bantlarının oluştuğu görülmektedir.



Şekil 5.40. Grup (4) sıralı dikey numunenin çekme sonrası makro görünümü.

4. grup yatay numunelerin çekme sonuçları incelendiğinde gerilme ve uzama değerleri için birbirinden farklı sonuçlar bulunduğu görülmektedir. Özellikle uzama değerleri arasında büyük değişimler bulunmaktadır. Bu durum test numunelerinin farklı ara yüzey bölgelerini içeren kısımlardan çıkarılmasının sonucudur. Ara yüzey yatay ekseninde sürekli ilerleyen düz bir çizgi halinde olmayıp kısmi dalgalanma şeklinde oluşmuştur. Ayrıca parçada birçok ara yüzey bulunmakta ve eşit ölçülerde ara yüzeyi içeren numune çıkarımı oldukça zordur. Yani test numunelerinin iki farklı malzemedeki aynı oranda ve aynı ara yüzey sayısına sahip olacak şekilde elde edilmesi çok zor olduğundan bu durum uygulanamamıştır. Ancak elde edilen sonuçlar üretimler açısından genel bir değerlendirme yapılmaya uygun bulunmuştur. Bu durumların daha iyi anlaşılması için 4. grup üretimin zımparalama öncesi frezeleme işlemi uygulanmış bölgesi Şekil 5.41’de gösterilmiştir.



Şekil 5.41. Grup (4) üretimde frezeleme işlemi uygulanmış örnek bir parça.

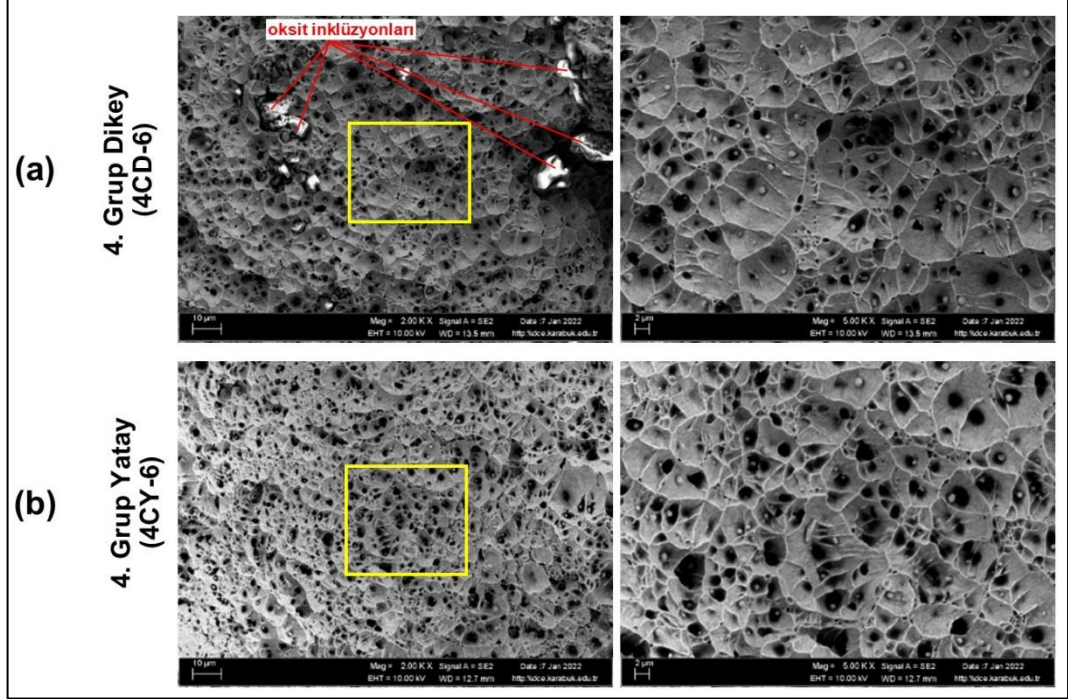
4. grup sıralı üretimin yatay çekme sonuçlarına göre en yüksek çekme dayanımı 4CY-5 numunesinde yaklaşık 795 MPa olarak bulunmuştur. Bu değer 1. grup ortalama yatay

çekme dayanımının yaklaşık % 161'i, 2. grup yatayın ise yaklaşık % 144'ü kadardır. Sıralı üretimin yatay kısmında yüksek değerlerde çekme dayanımı elde edilebilmiştir. Ancak en yüksek dayanımının olduğu bu numunede % uzama değeri yaklaşık % 18 olarak bulunmuştur. Bir diğer yüksek değerler 4CY-6 nolu numunesinde çekme dayanımı yaklaşık 771 MPa, uzama değeri ise % 38 olarak elde edilmiştir. Çekme dayanımı bir önceki numuneye benzer şekilde 1. ve 2. grup üretimlerden oldukça yüksek çıkmıştır. Bu numunede ayrıca uzama değeri de yüksektir. % uzama değeri 2. grup üretime yakın değerlerde bulunmuştur. Şekil 5.38'de 4CY-6 nolu bu numuneye bakıldığında uzamanın yüksek olduğu görülmektedir. Bu numunenin kopma görüntüsüne bakıldığında, test bölgesinin orta kısmının 308LSi'den diğer kısımlarının ise orta kısmı içine alan ve çekme eksenine boyunca iki uzun ara yüzey içeren SG2 telden oluştuğu görülmektedir. Orta kısmının paslanmaz çelikten oluşumu malzemeye yüksek oranda süneklik katmış, sünek kısmı içine alan ve gevrek sayılan yan kısımlar ise dayanım artışı sağlamıştır.

Yukarıda bahsedilen numuneler 4. grup yatay üretim için farklı karakteristikleri yansıtan durumlar oluşturmuştur. Yatay numuneler genel olarak değerlendirildiğinde ortalama çekme dayanımı yaklaşık 741 MPa, % uzama değeri ise % 21 olarak hesaplanmıştır. Çekme dayanımı tüm üretim grupları içerisinde en yüksek değerini almıştır. % uzama değeri ise 1. grup üretimin dikey değerlerine çok yakın bulunmuştur. Yatay numunelerin ortalama değeri dikey numunelerle kıyaslandığında ise çekme dayanımının bir miktar arttığı uzama değerinin ise önemli derecede düştüğü görülmektedir. 4. grup üretim için tüm sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde şu çıkarım yapılmıştır: Sıralı üretimle çekme dayanımında her iki ana malzemenin değerlerini aşan önemli derecede artış görülmekte, uzama değerinde ise % uzaması düşük olan malzemeye yakın bir değer elde edilmektedir. Bu tür üretimle çekme dayanımı ciddi bir şekilde artmış, % 21-% 31 arasında değişen uzama değeriyle yeterli sünekliğe sahip sayılabilen bir yapı elde edilmiştir.

Şekil 5.42'de 4. grup üretimlerin çekme testi sonrası kırık yüzeylerinin SEM resimleri gösterilmiştir. Her iki kırık yüzey paslanmaz çelik kısmı tarafından alınmıştır. Dikey numuneye bakıldığında oksit inklüzyonlarının büyüklüğü ve sayıca nispeten fazla

oluşu dikkat çekmektedir. Bununla beraber küre şeklinde inklüzyon ve/veya ikincil faz partikülleri de dikey ve yatay numunelerin yapısında yer almaktadır.



Şekil 5.42. Grup (4) çekme testi kırık yüzey resimleri.

Sıralı üretimde sürekli olarak farklı tel ile besleme işlemi gerçekleştiğinden malzeme içeriğindeki seyrelme durumu 3. grupta olduğundan fazladır. Örneğin; C oranı yüksek olan SG2 telden, C oranı düşük olan 308LSi tel içeren kısma C elementinin geçiş ihtimali her katman için daha yüksektir. Benzer şekilde 308LSi kısmında yüksek oranda bulunan Cr elementinin, Cr'ca fakir olan SG2 tarafına geçiş potansiyeli de yüksektir. Durum böyle olunca sıralı üretimde inklüzyon ve ikincil faz partiküllerinin olma ihtimali de artmaktadır. Düşük alaşımlı çelik ile paslanmaz çelik malzemenin termal özellikleri arasındaki fark da göz önüne alındığı zaman tekli malzemeli üretime göre ısınma ve soğuma karakteristiklerinin farklılık göstereceği açıktır. Dikey yöndeki oksit inklüzyonları boyutunun diğer gruptakilere göre daha büyük olması SG2 telin ısı iletim katsayısının 308LSi'den yaklaşık 3 kat fazla olmasına dayandırılabilir. Isı iletim katsayısı düşük olan malzemede ergime ve katılma süreci daha uzun sürecektir. Paslanmaz çelik tarafı ısıyı az iletmediği için bir alt katmanda bulunan düşük alaşımlı çeliğe transfer olan ısı daha az olacak bu yüzden ısı paslanmaz çelik üzerinde daha uzun süre kalacaktır. Katılmanın daha uzun sürelerde gerçekleştiği paslanmaz

tarafında ise ergiyik havuzu daha uzun sürede katıya dönüşeceğinden inklüzyon olma ihtimali artacaktır.

İnklüzyon oluşumunu arttıran bir diğer etkenin ise SG2 tel ile üretim yapılırken kullanılan koruyucu gaz olduğu düşünülmektedir. Bu koruyucu gaz daha çok miktarda oksijen içerdiğinden SG2 içeren katman üretilirken bir alt katmanda bulunan paslanmaz çelik de (308LSi) ergimekte ve ortama daha fazla oksit yapıcı gaz gönderilmektedir. Bu bakımdan hem katılaşmanın uzun sürmesi hem de koruyucu gaz dolayısıyla oksit olma ihtimalinin artması büyük yapılı ve sayıca fazla olan inklüzyonların oluşma ihtimalini arttırmaktadır. İnküzyon sayısının fazla olmasındaki bir diğer etkenin 308LSi tel malzemesinin SG2 tele göre daha fazla Mn alaşım elementi içermesi olduğu düşünülmüştür. Katalog verilerinde 308LSi tel malzemesi SG2'ye göre % 25 daha fazla Mn içermektedir. Mn içeriğinin malzemede ağırlıkça daha fazla bulunması yapıda MnO inklüzyonunun oluşma ihtimalini arttırmaktadır.

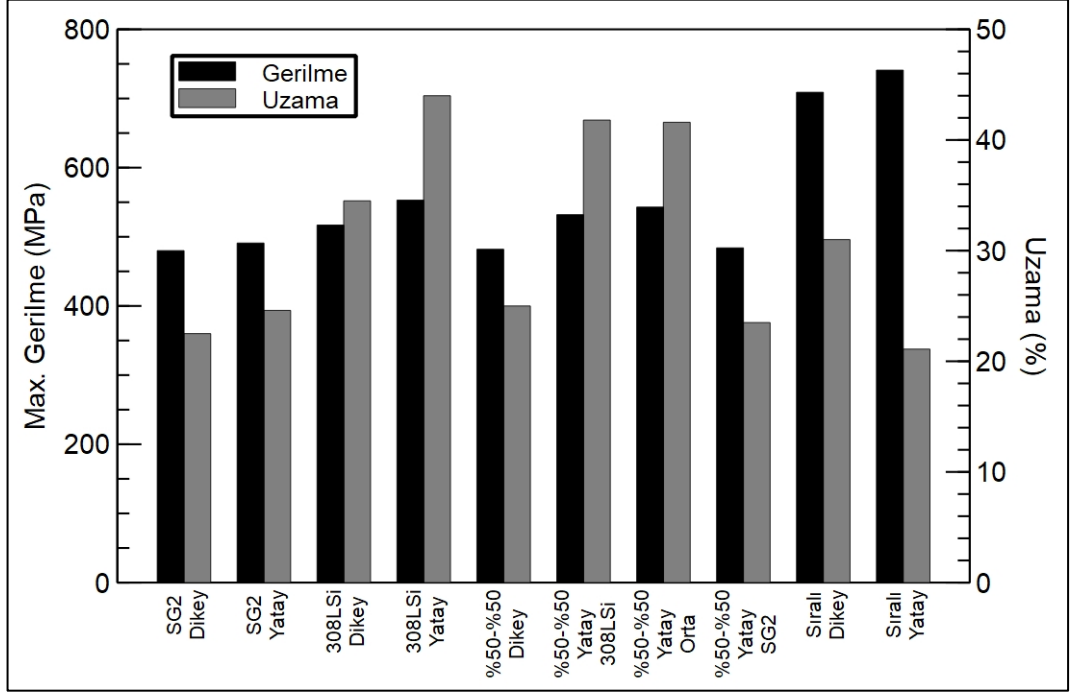
Şekil 5.42'de gösterilen yatay ve dikey yöndeki kırık yüzey resimlerine bakıldığında, incelenen numuneler dahilinde çukurcuk oluşumu ve yoğunluğunun nispeten benzer olduğu görülmektedir. Bunun yanı sıra her iki numunenin de sünek kopma davranışı sergilediği tespit edilmiştir.

5.5.5. Çekme Deneyi Genel Değerlendirme

Çekme deneyi sonucunda tüm gruplar için hesaplanan maksimum gerilme ve % uzama değerleri Şekil 5.43'teki grafikte gösterilmiştir. Çekme deneyi sonucunda en düşük dayanım değerleri yaklaşık 480 MPa ile sadece SG2 tel ile gerçekleştirilen 1. grup üretimin dikey yönünde hesaplanmış ve bunu aynı gruptaki yatay yönlenmedeki numuneler, 3. grup üretimin dikey numuneleri ve 3. grup yatay numunelerin SG2 kısmı olanları takip etmiştir. Bu numunelerde % uzama değeri ise birbirine çok yakın çıkmıştır.

2. grup üretimde anizotropik çekme özellikleri görülmüş dikeyde yaklaşık 517 MPa çekme dayanımı ve % 34,5 uzama, yatayda ise yaklaşık 553 MPa çekme dayanımı ile % 44 uzama hesaplanmıştır. 3. grup üretimin yatay kısmından alınan numuneler 1. ve

2. gruptaki yatay numunelerin sonuçlarıyla yakın olarak örtüşmüştür. 3. grup üretimin orta kısmından alınan ve çekme eksenini boyunca test bölgesinde uzun bir ara yüzey içeren numunelerin çekme özellikleri 308LSi yatay numunelere benzer bulunmuştur.



Şekil 5.43. Çekme deneyi sonuçları karşılaştırma grafiği.

Çekme deneyleri sonucunda en yüksek çekme dayanımı 4. grup (sıralı) üretimde bulunmuştur. Bu gruba ait dikey ve yatay numuneler çekme dayanımı açısından diğer gruplara göre daha yüksek ancak birbirlerinden farklı çekme özellikleri sergilemiştir. Sıralı üretimin yatay numunelerinde, tüm üretim grupları içerisinde en yüksek çekme dayanımına ulaşılmıştır. Bu numunelerde çekme dayanımı 741 MPa, % uzama değeri ise % 21,1 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere bakıldığında çekme dayanımında SG2 ve 308LSi üretimlerine göre ciddi oranlarda artış görülmüştür. % uzama değerinde ise SG2 esas malzemesinin çok gerisinde kalmayan değerlere ulaşılmıştır. Çekme deneyi sonucunda sıralı üretimle çekme özellikleri üstün FDM yapıların üretilebileceği görülmüştür.

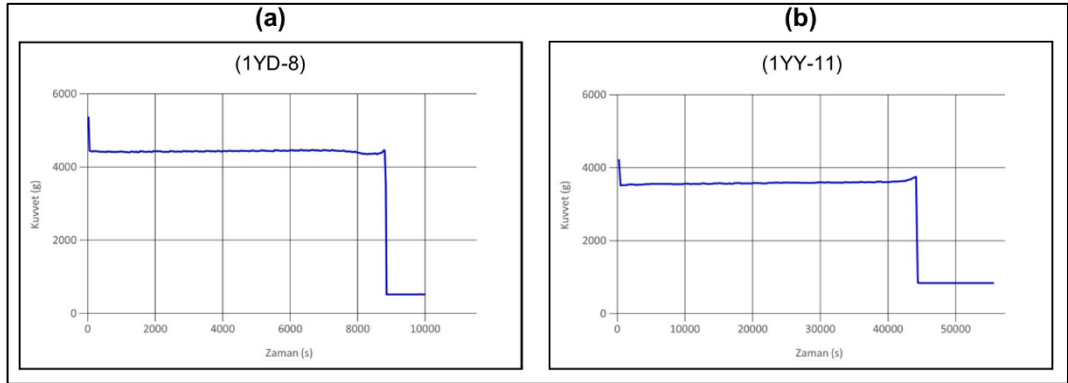
Çekme deneyinde incelen kırık yüzeylerde tüm kopmaların sünek bir şekilde gerçekleştiği, kırılma yüzeylerinde küresel biçimde inklüzyonların olduğu ve bu

inklüzyonların paslanmaz çelik içeren malzemelerde daha fazla meydana geldiği görülmüştür.

5.6. YORULMA DENEYİ

5.6.1. 1. Grup (SG2) Yorulma Deneyi Sonuçları

Sadece SG2 tel ile yapılan 1. grup üretime uygulanan yorulma testlerinde makine verilerinden alınan örnek kuvvet zaman grafikleri Şekil 5.44'te (a, dikey ve b, yatay) gösterilmiştir. Yorulma deneyi sonuçları ise dikey ve yatay her bir numune için sırasıyla Çizelge 5.6 ve Çizelge 5.7'de verilmiştir. Bu çizelgelerde numune sonuçlarının yanı sıra aynı grupta tekrar edilen test sonuçlarının hesaplanan ortalama değerleri de yer almaktadır. Bu verilerden elde edilen 1. grup yorulma grafikleri Şekil 5.45'te yorulma testi sonrası numuneler ise Şekil 5.46'da (a, dikey ve b, yatay) gösterilmiştir. Şekil 5.45 a ve b'deki grafikler test edilen tüm numunelerin sonuçlarından, Şekil 5.45 c'deki ise aynı genlik grubunda bulunan değerlerin ortalama değerlerinden oluşturulmuştur. Ortalama değerler ile oluşturulan grafikler dikey ve yatay yöndeki sonuçların kıyaslamasında kullanılmıştır.



Şekil 5.44. Grup (1) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örnekleri.

Çizelge 5.6. Grup (1) dikey yorulma deneyi sonuçları.

SG2 Dikey Yorulma Sonuçları						
Genlik Grubu	Numune No	Kuvvet (N)	Çevrim Sayısı	Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı	Ortalama Gerilme (MPa)
1	1YD-14	53,9	6830	354	7593	351
	1YD-6	54,0	8610	346		
	1YD-1	52,9	7340	353		
2	1YD-16	47,5	56820	302	43670	306
	1YD-11	46,9	32450	308		
	1YD-12	48,3	41740	309		
3	1YD-8	44,3	94220	282	126103	277
	1YD-4	43,0	162970	271		
	1YD-10	42,6	121120	277		
4	1YD-17	37,7	600370	244	576763	243
	1YD-15	38,1	642480	242		
	1YD-7	37,0	487440	243		
5	1YD-2	34,5	2894520	218	2299417	218
	1YD-13	33,1	1842040	214		
	1YD-18	33,6	2161690	223		
6	1YD-3	27,7	10000000	179	10000000	178
	1YD-5	28,8	10000000	180		
	1YD-9	27,3	10000000	175		

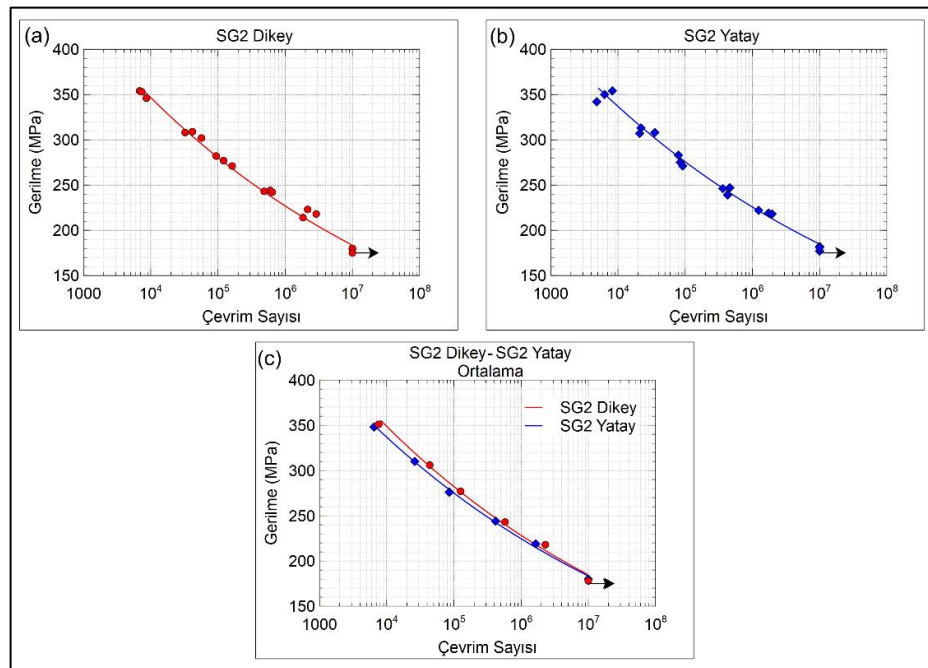
Dikey yöndeki numunelerin yorulma testlerinde uygulanan en yüksek ortalama gerilme değeri 351 MPa olarak hesaplanmış ve bu gerilmeye karşılık yorulma ömrü yaklaşık $7,5 \times 10^3$ bulunmuştur. Bu değer düşük çevrimli yorulma bölgesine dahil olmuştur. En yüksek yorulma gerilmesinin yaklaşık % 21 olarak azaldığı yaklaşık 277 MPa değerine tekabül eden 3. genlik grubu test sonucunda yüksek çevrimli yorulma bölgesine geçilmiş ve yaklaşık $1,3 \times 10^5$ çevrim sayısına ulaşılmıştır. Dikey numunelerden 10^6 mertebelerindeki yorulma ömrü değerine 243 MPa değerlerinde yaklaşılmış ve 218 MPa gerilme değerinde ise 10^6 çevrim sayısı aşılmıştır. Yorulma testlerinin sonlandığı ortalama 178 MPa gerilme değerinde 10^7 çevrim sayısına ulaşılmıştır. Burada numune herhangi bir makro hasara uğramamış ve kopma gerçekleşmemiştir. Bu sonuçlara göre 1. grup dikey numuneler için yorulma sınırının yaklaşık olarak 178 MPa bulunduğu söylenebilmektedir.

Yatay numunelerin yorulma testlerinde ortalama 348 MPa değerlerine tekabül eden gerilme değerinde yorulma ömrü düşük çevrimli yorulma bölgesinde olmak üzere yaklaşık $6,5 \times 10^3$ olarak bulunmuştur. Dikey numuneler ile kıyaslandığında en yüksek gerilme değerine tekabül eden yorulma ömrü değerinde bir miktar düşüş görülmektedir. Ancak bu durum düşük çevrimli bölgede gerçekleştiğinden göz ardı edilebilir niteliktedir. Yatay numunelerde yüksek çevrimli yorulma bölgesine 276

MPa gerilme değerlerinde yaklaşılmış ve ortalama 244 MPa gerilme genliğinde yaklaşık $4,2 \times 10^5$ çevrim sayısına ulaşılmıştır. Yatay numunelerde ortalama 180 MPa değerinde 10^7 çevrim sayısına ulaşılmış ve burada kopma olmadığı için deney durdurulmuştur. 1. grup yatay test grubu için yorulma sınırı 180 MPa olarak bulunmuştur.

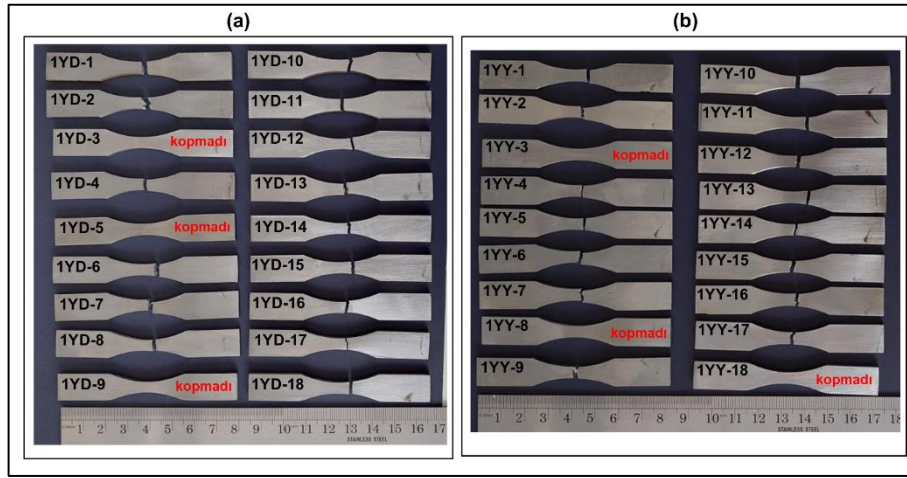
Çizelge 5.7. Grup (1) yatay yorulma deneyi sonuçları.

SG2 Yatay Yorulma Sonuçları						
Genlik Grubu	Numune No	Kuvvet (N)	Çevrim Sayısı	Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı	Ortalama Gerilme (MPa)
1	1YY-7	54,2	4840	342	6483	348
	1YY-9	54,5	6340	350		
	1YY-1	53,0	8270	354		
2	1YY-16	46,8	21070	307	26150	310
	1YY-6	48,8	35360	308		
	1YY-4	47,3	22020	313		
3	1YY-12	43,8	79430	283	85460	276
	1YY-10	41,5	84780	275		
	1YY-17	42,3	92170	271		
4	1YY-15	37,9	461580	247	417490	244
	1YY-2	38,7	363210	246		
	1YY-11	35,9	427680	239		
5	1YY-14	35,0	1749500	219	1653250	219
	1YY-5	34,0	1242470	222		
	1YY-13	32,6	1967780	218		
6	1YY-8	27,8	10000000	177	10000000	180
	1YY-18	28,2	10000000	182		
	1YY-3	27,4	10000000	181		



Şekil 5.45. Grup (1) yorulma sonuç grafikleri.

Şekil 5.45 c’de gösterilen yorulma grafiğine bakıldığında dikey numunelerin yorulma eğrisinin 10^6 ömre kadar yatayınkinin bir miktar üzerinde olduğu görülmektedir. Ancak her iki test grubunun hem grafik hem de tablodaki sonuç verilerine bakıldığında aralarında kayda değer bir fark görülememiştir. Özellikle yorulma ömrünün 10^6 çevrim sayısına yaklaştığı kısımlarda eğrilerde kesişme başlamış ve 10^7 mertebelerine doğru örtüşmüştür. Buradan uygulanan TAEİ üretim parametreleri dahilinde 1. grup dikey ve yatay yönlenmedeki yorulma sınırının yaklaşık olarak aynı gerilme değerinde olduğu sonucu çıkarılmıştır.

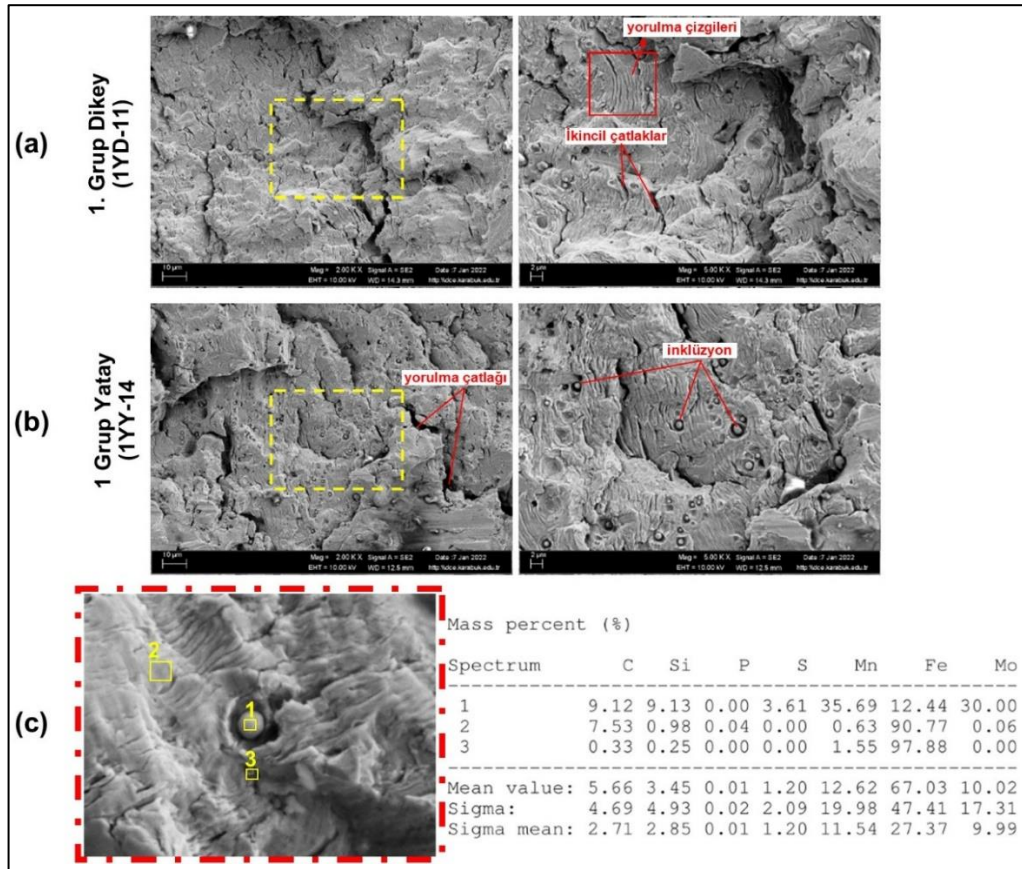


Şekil 5.46. Grup (1) yorulma numunelerinin test sonrası görünümü.

Bartsch vd. [253], TAEİ işlemiyle üretilen SG2 malzemeli yapıya uyguladıkları yorulma testinde 190 MPa gerilme değerinde yaklaşık $3,6 \times 10^6$ çevrim sayısına ulaşmış ve testi durdurmuşlardır. 1. grup üretimin yorulma deneyi sonucunda 10^7 çevrim sayısında yorulma dayanımının yaklaşık 180 MPa olduğu düşünüldüğünde literatürle çok yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Bir başka çalışmada Ron vd. [199], SG2 ile üretilmiş ve St37 malzemesinden elde ettikleri numunelere 50 Hz hızında yorulma testi uygulamışlardır. SG2’li yapının yorulma sınırını 10^8 çevrim sayısında 220 MPa, aynı çevrim sayısında St37’nin yorulma dayanımını ise 230 MPa olarak bulmuşlardır. Bu çalışma ile kıyaslandığında ise yorulma dayanımında 40 MPa’lık bir fark bulunmaktadır. Bu farkın meydana gelmesinde deneylerde uygulanan yorulma hızının beş katı kadar büyük olmasının etkisi olduğu düşünülmektedir. Guennec vd. [254], tarafından, düşük karbonlu çelik için uygulanan ve yorulma test hızının (frekansının) etkilerinin araştırıldığı çalışmada, yorulma dayanımının artan test

hızıyla artma eğiliminde oldukları bulunmuştur. Zainulabdeen [255], tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada ise St37 malzemesinin yorulma dayanımı 10^6 çevrim sayısında 160 MPa olarak bulunmuştur. Bu değerlere göre 1. grup üretimin yorulma dayanımının St37 malzemesinin gerisinde olmadığı söylenebilir.

1. grup yorulma numunelerinin kırık yüzey resimleri Şekil 5.47’de gösterilmektedir. Dikey ve yatay olarak incelenen her iki numune resimlerine bakıldığında, çekmedeki sünek kopmaların aksine, yorulmada gevrek kırılma davranışı sergilendiği açıktır. Yorulma çizgileri her iki numunede belirgin bir şekilde görülmektedir. Yorulma çizgileri yorulma hasarına maruz kalan malzemede bulunan işaretlerdir. Yorulma hasarına uğrayan bir parçanın yüzeyinde yüzlerce bulunabilir. Her bir yorulma çizgisi, genellikle bir yorulma çatlakını ana malzemeye yayan bir yorulma döngüsünün göstergesidir [256]. Yorulma çizgilerinin fazla dağılımı, genellikle yorulma çatlaklarının ilerleme hızını arttırmaktadır [257]. Yorulma çizgilerinin, bir numunenin maruz kaldığı döngü sayısı ile her zaman doğrudan bir ilişkisi yoktur [256].

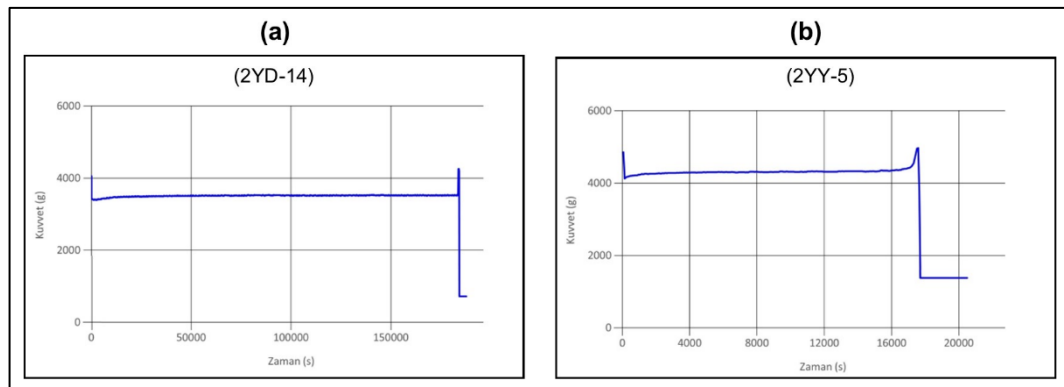


Şekil 5.47. Grup (1) yorulma testi kırık yüzey resimleri.

Şekil 5.47’de dikey numune üzerinde ikincil çatlaklar gösterilmiştir. İkincil çatlaklar esas çatlak yönüne dik olarak ilerleyen, yük dağılımı yönünü değiştirerek ana çatlak ilerleme hızını azaltan yapılardır. Bunun dışında her iki yönlenmedeki numunelerin kırık yüzeylerine bakıldığında tıpkı çekmedeki gibi inklüzyonlar görülmektedir. Şekil 5.47 c’de verilen EDS sonuçlarına göre 1. numaralı örnekte Mn elementinin ağırlıkça yüksek oranda çıkması çekme deneyi kısmında anlatıldığı gibi MnO inklüzyonu olması ihtimalini arttırmaktadır. Inklüzyon partikülleri sayıca değerlendirildiğinde çekme testi numunelerinin yüzeyinde rastlatılanlara göre daha az miktarlarda olduğu görülmüştür. Ayrıca küre parçalarının bulunduğu yerin dışında çekmede olduğu gibi sünek davranışlı çukurcuklu yapılar oluşmamıştır. Bütün bu durumlar değerlendirildiğinde 1. grup yorulma numunelerinin kırılma esnasında gevrek davranış gösterdiği anlaşılmaktadır. Dikey ve yatay her iki numune kırılma yüzeyi resimlerinin birbirine çok benzer olduğu görülmüş ve bu yüzden kopma davranışının değerlendirilmesinde önemli bir farka rastlanılmamıştır.

5.6.2. 2. Grup (308LSi) Yorulma Deneyi Sonuçları

2. grup sadece paslanmaz çelik tel kullanılarak yapılan üretimlere uygulanan yorulma testlerinde makine verilerinden alınan örnek kuvvet-zaman grafikleri Şekil 5.48’de (a, dikey ve b, yatay) gösterilmektedir. Yorulma testleri sonuçları ise dikey ve yatay yöndeki numuneler için sırasıyla Çizelge 5.8 ve Çizelge 5.9’da verilmiştir. Bu değerler ile oluşturulan 2. grup yorulma grafikleri Şekil 5.49’da verilmiştir. Şekil 5.50’de (a, dikey, b, yatay) ise numunelerin test sonrası resimleri gösterilmektedir.



Şekil 5.48. Grup (2) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örnekleri.

Dikey yöndeki 2. grup yorulma testlerinde uygulanan en yüksek ortalama gerilme 355 MPa olarak hesaplanmış, bu gerilme genliği değerine göre ortalama yorulma ömrü düşük çevrimli bölgede $1,5 \times 10^4$ olarak bulunmuştur. Ortalama 280 MPa gerilme genliği değerinde yaklaşık $2,3 \times 10^5$ çevrim değeri ile yüksek çevrimli yorulma bölgesine geçilmiştir. Bahsedilen bu iki gerilme değerine tekabül eden ömür değeri, yakın gerilme değerlerindeki 1. grup üretimin yorulma ömür değerlerinin üzerinde çıkmıştır. 2. grup üretimde ortalama 228 MPa değerlerinde 10^6 mertebelerinde çevrim sayısı değeri aşılarak yaklaşık 2×10^6 yorulma ömrü elde edilmiştir. 1. grup üretimde bu değere yaklaşık 220 MPa gerilme genliğiyle ulaşılmış ve daha az yorulma ömrü elde edilmiştir. 2. grup dikey yöndeki yorulma sınırı ise ortalama 194 MPa hesaplanmış ve 10^7 çevrim sayısına ulaşılmıştır. 1. grup üretimde olduğu gibi herhangi bir hasar olmadığından deney durdurulmuştur. Dikey yöndeki paslanmaz çelik malzemeli üretimin yorulma dayanım-ömür değerleri, düşük alaşımlı çeliğe göre daha fazla bulunmuştur.

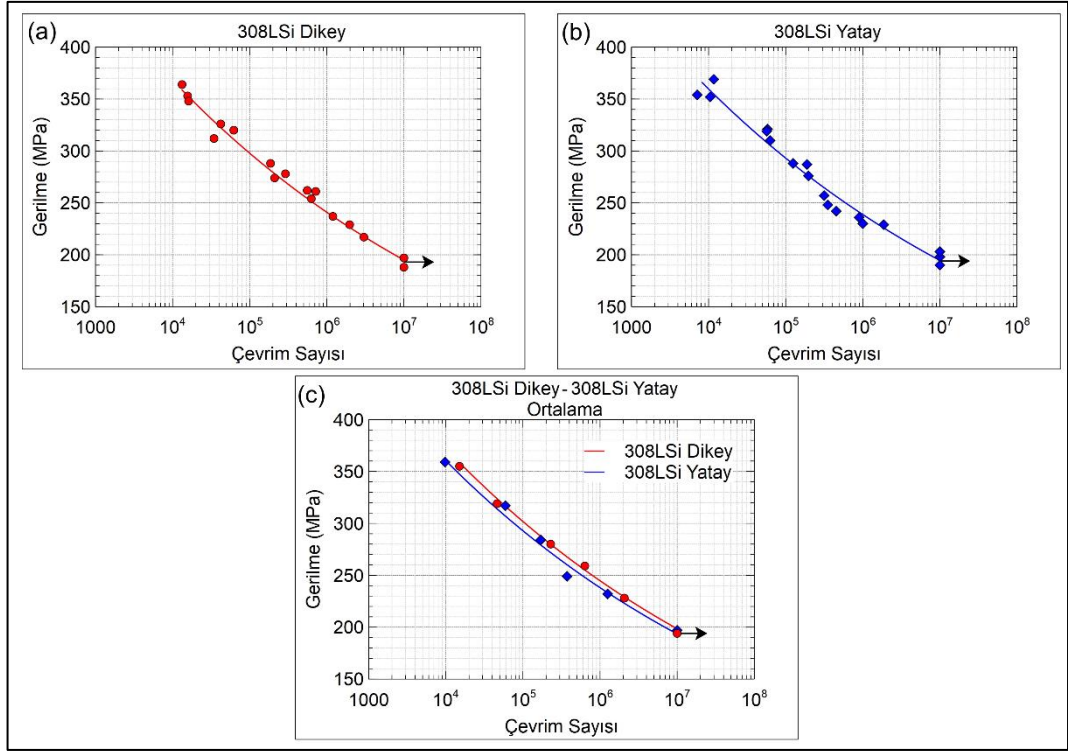
Çizelge 5.8. Grup (2) dikey yorulma deneyi sonuçları.

308LSi Dikey Yorulma Sonuçları						
Genlik Grubu	Numune No	Kuvvet (N)	Çevrim Sayısı	Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı	Ortalama Gerilme (MPa)
1	2YD-8	53,8	15680	353	15030	355
	2YD-10	55,1	16140	348		
	2YD-2	54,6	13270	364		
2	2YD-9	50,9	42160	326	46257	319
	2YD-18	50,3	62170	320		
	2YD-5	49,4	34440	312		
3	2YD-16	43,2	186380	288	229287	280
	2YD-1	42,8	210530	274		
	2YD-17	43,1	290950	278		
4	2YD-12	40,5	630280	254	635397	259
	2YD-3	39,7	718170	261		
	2YD-15	40,8	557740	262		
5	2YD-4	35,8	1200150	237	2067730	228
	2YD-14	35,1	1977310	229		
	2YD-7	34,2	3025730	217		
6	2YD-11	31,2	10000000	197	10000000	194
	2YD-13	29,4	10000000	188		
	2YD-6	30,5	10000000	197		

Çizelge 5.9. Grup (2) yatay yorulma deneyi sonuçları.

308LSi Yatay Yorulma Sonuçları						
Genlik Grubu	Numune No	Kuvvet (N)	Çevrim Sayısı	Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı	Ortalama Gerilme (MPa)
1	2YY-3	56,3	10490	352	9767	359
	2YY-18	55,8	11680	369		
	2YY-14	55,2	7130	354		
2	2YY-11	49,7	58040	321	59227	317
	2YY-10	49	56900	319		
	2YY-9	48,8	62740	310		
3	2YY-5	43	188890	287	170360	284
	2YY-17	43,5	124740	288		
	2YY-7	42,7	197450	276		
4	2YY-12	39,2	315520	257	373230	249
	2YY-2	38,3	452410	242		
	2YY-16	38,1	351760	248		
5	2YY-6	35,7	896030	236	1254823	232
	2YY-1	36,3	1867420	229		
	2YY-13	35,1	1001020	230		
6	2YY-4	30,7	10000000	198	10000000	197
	2YY-15	30,4	10000000	203		
	2YY-8	29,8	10000000	190		

2. grup yatay numunelerin yorulma test sonuçlarına bakıldığında en yüksek ortalama gerilme değeri ortalama 359 MPa olarak uygulanmış ve yaklaşık $9,8 \times 10^3$ yorulma ömrüne ulaşılmıştır. En yüksek gerilme genliği değerinde dikey numunelere göre daha az bir yorulma ömrü bulunmuştur. 1. grup üretimin yatay yöndeki değerleriyle kıyaslandığında ise 10 MPa kadar daha yüksek gerilme genliği değerinde yaklaşık 1. grubun yataydakinin 1,5 katı kadar yorulma ömrüne ulaşılmıştır. Ortalama 284 MPa gerilme değerinde yüksek çevrimli yorulma bölgesine geçilmiştir. Uygulanan gerilme değerlerinin yaklaşık olarak dikeydekine yakın olduğu ortalama 232 MPa değerinde yaklaşık $1,25 \times 10^6$ yorulma ömrü hesaplanmış ve bu değer ile dikeyin yaklaşık % 39'ı kadar aşağısında kalmıştır. Ortalama gerilme değerinin 197 MPa olduğu durumda yorulma sınırına ulaşılmış ve numunede hasar görülmeden 10^7 yorulma ömrüne ulaşılmıştır.

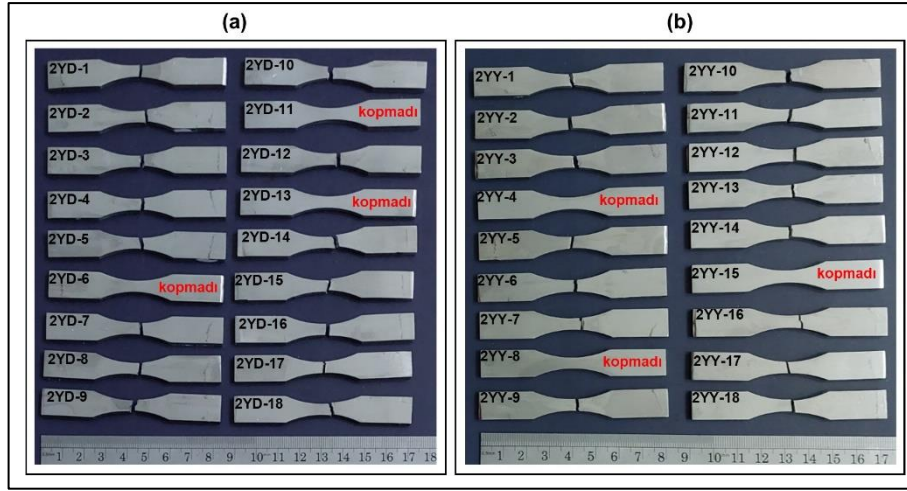


Şekil 5.49. Grup (2) yorulma sonuç grafikleri.

2. grup yatay yöndeki numunelerin yorulma dayanımı 1. grup üretimin her iki yöndeki numunelerinden daha fazla ancak 2. grup dikeydekilere göre bir miktar daha düşük bulunmuştur. Şekil 5.49 c' de gösterilen karşılaştırma grafiğine bakıldığında bu durum daha belirgin olarak görülmektedir. Dikey yöndeki numunelerin yorulma eğrisi yataydakilerin üzerinde çıkmıştır. Literatür çalışmalarında TAEİ yöntemiyle üretilen yapılarda benzer duruma rastlanılmıştır [139,200]. Literatürde, 308L tel ile gerçekleştirilen bir üretimde dikey numunelerin yorulma çatlak ilerleme hızının yataydakilere göre daha düşük olduğu bulunmuş bu durumun dikey yöndeki sütünsal tanelerin güçlü yapısından kaynaklandığı belirtilmiştir [223].

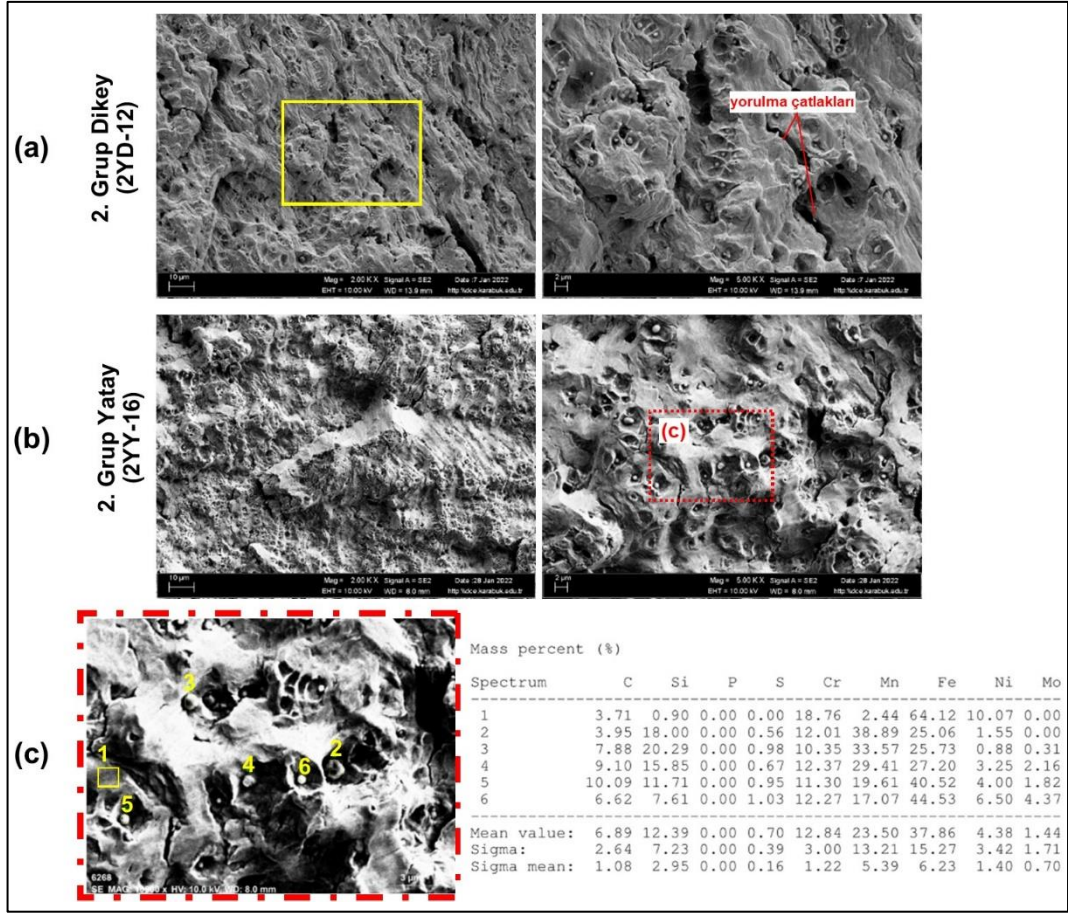
2. grup üretimin mekanik özellikleri daha önceden belirtildiği gibi yakın kimyasal içeriğinden dolayı 304 çeliğiyle kıyaslanabilmektedir. 304 çeliğine 50 Hz deney hızıyla uygulanan yorulma testi sonucunda 10⁷ yorulma ömründe yorulma dayanımı yaklaşık 320 MPa olarak bulunmuştur [258]. Bir başka çalışmada aynı tür paslanmaz çeliğe uygulanan testler sonucu yorulma dayanımı, 10⁸ çevrim sayısında 290 MPa olarak belirtilmiştir [259]. 2. grup üretimlerin ortalama gerilme dayanımının yaklaşık 196 MPa çıkması bahsedilen literatür sonuçlarının altında kalmasına neden olmuştur.

Bu durum deney koşullarının değişikliğinin yanı sıra TAEİ işleminin etkilerine de dayanmaktadır. Literatürde TAEİ işlemiyle üretilen parçanın yorulma dayanımının aynı dövülebilir alaşımından düşük değerlerde çıkması inşa yönünde tekrarlı olarak ergiyen katmanların farklı seviyelerde kalıntı gerilme içermesine ve mikroyapının değişiminden kaynaklanabileceğine değinilmiştir [139].



Şekil 5.50. Grup (2) yorulma numunelerinin yorulma testi sonrası görünümü.

Şekil 5.51’de 2. grup üretimin yorulma testi sonucu kırılan yüzeylerinin SEM ile inceleme sonucu alınan resimleri gösterilmektedir. Yatay ve dikey numune resimlerine bakıldığında küre şeklinde inklüzyon oluşumları dikkat çekmektedir. Inklüzyon çevrelerinin sünek kopmayı destekleyen çukurcuk oluşturma eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Elde edilen resimler çerçevesinde yatay numunelerde inklüzyon miktarlarının dikeye göre daha fazla olduğu görülmektedir. Dikey ve yatay numunelerin yarı sünek davranışa yakın bir kopma gösterdiği görülmüştür. Süneklilik durumu yatayda bir miktar daha fazladır.

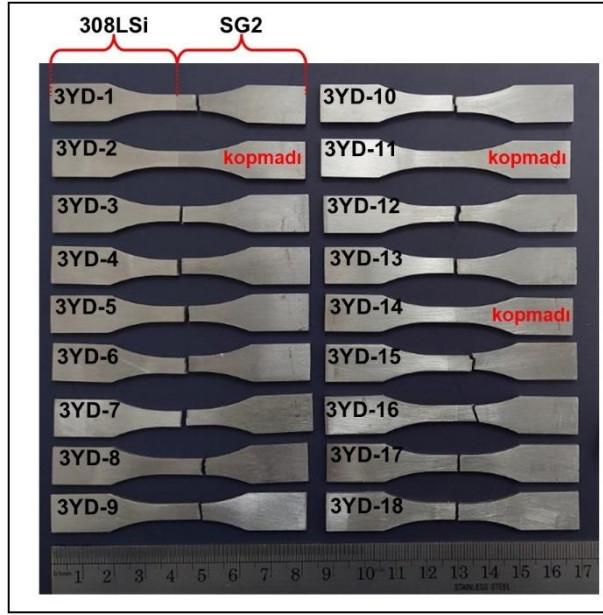


Şekil 5.51. Grup (2) yorulma testi kırık yüzey resimleri.

Şekil 5.51 c’de verilen EDS sonuçlarına bakıldığında matris malzemeden alınan 1 numaralı ölçümün Cr ve Ni yoğunlukları bakımından esas tel malzemesine çok yakın olduğu görülmektedir. 2 ve 6 arası nokta EDS ölçümlerde ise Mn oranı yüksek çıkmıştır. Önceki kopma yüzeylerindeki gibi bu inklüzyonların da MnO olma ihtimalinin yüksek olduğu düşünülmektedir. 1. grup üretimin yorulma yüzeyleri ile kıyaslandığında 2. grup üretimin inklüzyon miktarlarının yüksek olduğu ve 1. grupta gevrek kırılma davranışına karşın yarı sünek davranışa yakın bir kırılma gerçekleştiği söylenebilmektedir. MnO olduğu varsayılan inklüzyon miktarlarının yüksek olma durumu, üretim esnasında oksitlenme potansiyelinin yanı sıra 308LSi tel malzemesinde daha fazla Mn içeriğinin olmasına da dayandırılabilir.

5.6.3. 3. Grup (%50 SG2-%50 308LSi) Yorulma Deneyi Sonuçları

Birleşme ara yüzeyi içermesinden dolayı çekme deneyi sonuçlarında olduğu gibi 3. grup yorulma numunelerinin de ilk değerlendirilmesi kopma bölgelerinin makro boyutta incelenmesiyle gerçekleşmiştir. Şekil 5.52’de 3. grup dikey yorulma numunelerinin test sonrası kopmuş durumları gösterilmektedir.

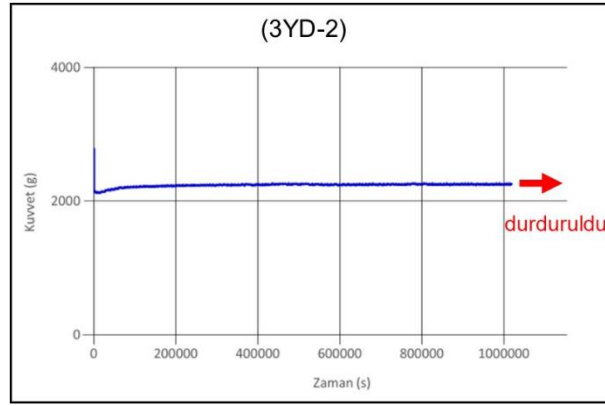


Şekil 5.52. Grup (3) yorulma numunelerinin yorulma testi sonrası görünümü.

Şekil 5.52 incelendiğinde yorulma numunelerinin büyük bir kısmının belirgin bir şekilde SG2 tarafından koptuğu görülmektedir. Örneğin 3YD-1, 3YD-8, 3YD-15 ve 3YD-16 numunelerinin kopmuş durumlarına bakıldığında bu durum anlaşılabilir. Bazı numunelerde ise kopmanın ara yüzeye çok yakın kısımlarda meydana geldiği görülmüştür. Örneğin; 3YD-4 numunesinin kopma bölgesi ve makine çenelerine bağlandığı kısımlara olan uzaklığı ölçüldüğünde ara yüzeye en yakın olan numune olduğu tespit edilmiştir. Kopmanın ara yüzeyde mi yoksa ana malzeme mi gerçekleştiğini anlamak için bu numunenin kırık yüzeyine çoklu nokta EDS analizi yapılmıştır. Farklı noktalardan alınan element içerik ölçümlerinde 308LSi malzemesinin temel alaşım elementi olan Cr ve Ni gibi esas elementlere rastlanılmamıştır. Bu durumda kopmanın SG2 tarafından gerçekleştiği düşünülmüştür. Böylelikle 3. grup üretime uygulanan TAEİ üretim parametreleri dahilinde ara

yüzeyde yorulma dayanımını azaltacak bir hata ve oluşuma rastlanılmadığı söylenebilmektedir.

3. grup yorulma test numunesinin örnek kuvvet-zaman grafiği Şekil 5.53'te, deney sonuçları Çizelge 5.10'da, bu sonuçlardan elde edilen yorulma grafiği ise Şekil 5.54 a'da verilmiştir. Çizelge 5.10'da verilen 3. grup dikey yorulma sonuçları incelendiğinde ortalama 381 MPa en yüksek gerilme ile düşük çevrimli yorulma bölgesinde $8,3 \times 10^3$ yorulma ömrüne ulaşılmıştır. Yüksek çevrimli yorulma bölgesine ortalama 248 MPa gerilme genliğinde geçilmiş ve burada yorulma ömrü yaklaşık $3,1 \times 10^5$ olarak bulunmuştur. Ortalama 222 MPa gerilme genliğinde 10^6 mertebelerinde yorulma ömrüne ulaşılmıştır. Kopmanın olmadığı 10^7 çevrim sayısında deneyler durdurulmuş ve yorulma sınırı ortalama 170 MPa olarak hesaplanmıştır.



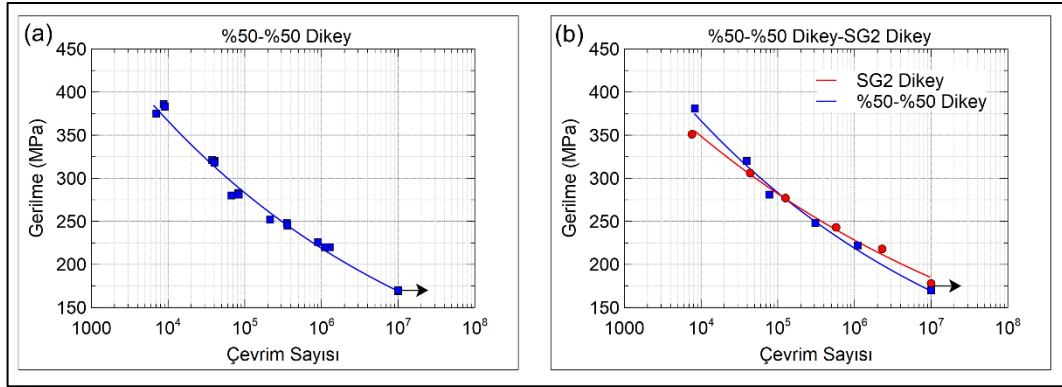
Şekil 5.53. Grup (3) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örneği.

3. grup dikey numunelerde yorulma hasarı SG2 kısmından gerçekleştiği için sonuçlar 1. grup üretimin dikey kısmındaki sonuçlarla mukayese edilmiştir. Her iki numune grubunun kıyaslama grafiği Şekil 5.54 b'de gösterilmektedir. Burada yüksek gerilme genliğinin olduğu başlangıç testlerinde 3. grup üretimde daha yüksek gerilme değerinde daha uzun ömür elde edilmiştir. Ancak bu durum düşük çevrimli bölgede gerçekleştiğinden genel bir üstünlük olduğundan bahsedilememektedir. 10^5 çevrim sayısına yaklaşıldığında her iki yorulma eğrisinin kesiştiği ve yorulma sınırına doğru yakın eğimde devam ettiği görülmektedir. Buradan yola çıkarak 1. grup dikey ile 3. grup dikey arasında 8 MPa'lık bir değer farkı bulunsa da her iki test grubunun yaklaşık olarak benzer değerlerde yorulma sınırına sahip olduğu söylenebilir. Burada 3. grup

numunelerde kopmanın SG2 kısmından gerçekleşmesi de sonuçları doğrular nitelik taşımaktadır.

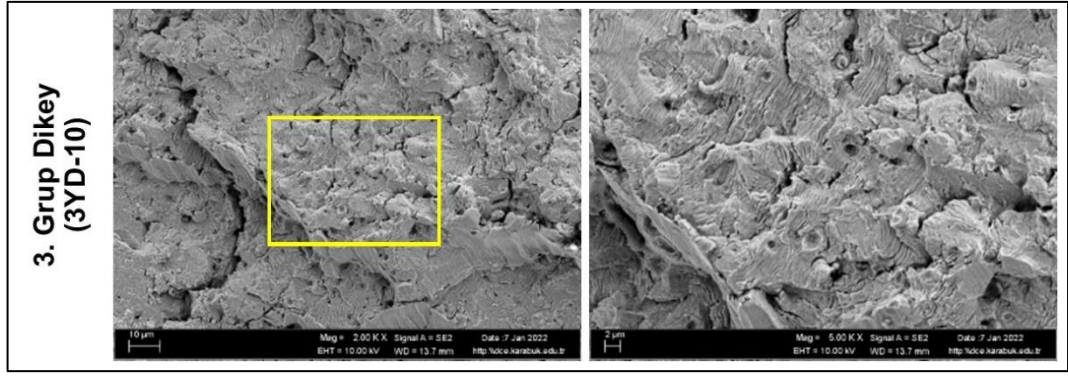
Çizelge 5.10. Grup (3) dikey yorulma deneyi sonuçları.

%50-%50 Dikey Yorulma Sonuçları						
Genlik Grubu	Numune No	Kuvvet (N)	Çevrim Sayısı	Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı	Ortalama Gerilme (MPa)
1	3YD-8	52,2	8750	386	8293	381
	3YD-15	51,4	7030	375		
	3YD-1	51,8	9100	383		
2	3YD-9	44,0	40250	320	39343	320
	3YD-13	42,3	37650	321		
	3YD-17	42,7	40130	318		
3	3YD-12	36,7	81830	283	77467	281
	3YD-16	38,2	67040	280		
	3YD-18	37,3	83530	281		
4	3YD-10	34,1	214070	252	309580	248
	3YD-3	33,2	354120	248		
	3YD-4	32,3	360550	245		
5	3YD-6	30,2	1286740	220	1099870	222
	3YD-7	28,8	1110260	220		
	3YD-5	30,8	902610	226		
6	3YD-2	22,4	10000000	170	10000000	170
	3YD-14	23,3	10000000	169		
	3YD-11	22,0	10000000	170		



Şekil 5.54. Grup (3) yorulma sonuç grafiği ve kıyaslama.

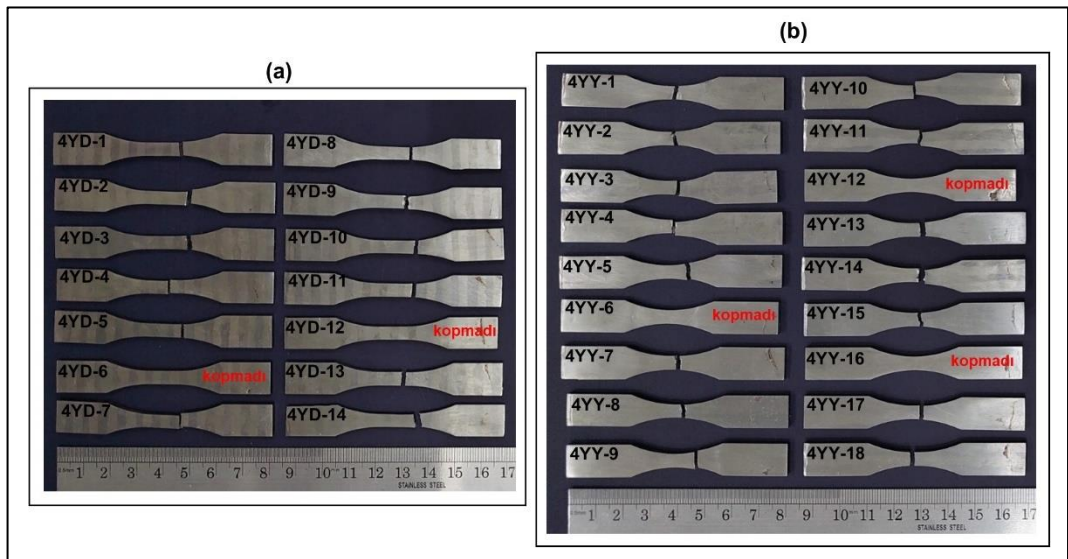
Şekil 5.55'te 3. grup üretimin SEM ile incelenen kopma yüzeyleri gösterilmektedir. Yorulma çatlakları bu yüzeyde belirgin bir şekilde görülmüş, inklüzyonlar ve sayılarının önceki üretilere göre daha az olduğu tespit edilmiştir. Kopma davranışının gevrek olduğu söylenebilmektedir. Kopma işlemi SG2 tarafından gerçekleştiği için 1. grup dikey yöndeki numunenin kopma yüzeyine oldukça benzer olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5.55. Grup (3) yorulma testi kırık yüzey resimleri.

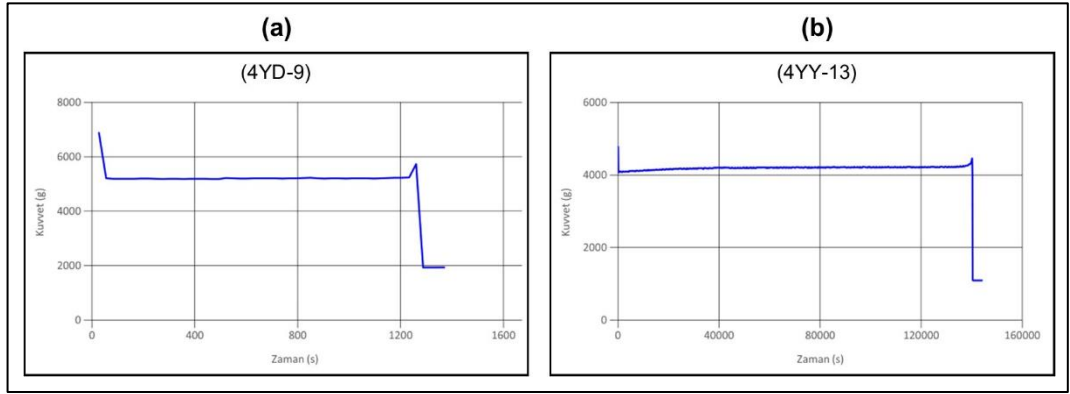
5.6.4. 4. Grup (Sıralı) Yorulma Deneyi Sonuçları

3. grup yorulma numunelerinde olduğu gibi 4. grup sıralı üretiminde yorulma deney sonuçları ilk olarak kopma bölgelerinin incelenmesiyle değerlendirilmiştir. Özellikle 4. grup dikey numunelerin test bölgesi birden fazla birleşme ara yüzeyi içerdiğinden, kopma bölgesinin tespiti daha çok önem kazanmaktadır. 4. grup üretimlerin yorulma deneyi sonrası kopmuş durumdaki resimleri Şekil 5.56’da (a, dikey ve b, yatay) verilmiştir. 4. grup yorulma test numunelerinin örnek kuvvet-zaman grafikleri ise Şekil 5.57’de verilmiştir. Yorulma test sonuçlarından elde edilen grafikler ise Şekil 5.58’de (a, dikey, b, yatay ve c, dikey-yatay ortalama) verilmiştir.



Şekil 5.56. Grup (4) yorulma numunelerinin test sonrası görünümü.

Şekil 5.56 a'ya bakıldığında dikey numunelerin kopma durumu görülmektedir. Dikey numunelerden hasara uğrayarak kopmaların tümü 308LSi bölgesinden gerçekleşmektedir. Kopmalar direkt olarak ana malzeme kısmından gerçekleşmiş ve ara yüzeylerde yorulmadan kaynaklı herhangi bir hasar oluşmamıştır. 308LSi kısmında hasarın meydana gelmesi çekme testinde olduğu gibi yorulmada da süneklik-gevreklik durumlarıyla değerlendirilebilmektedir. SG2 kısmının ve ara yüzeyin sertlik değeri daha yüksek ve 308LSi malzemesine göre daha gevrek yapıdadır. Ancak bu gevrek yapıda ve sertlik değeri yüksek ara yüzeylerde ve esas malzemede yorulma dayanımını engelleyecek bir yapı veya herhangi bir hata meydana gelmemiştir. Bu durum 4. grup üretimin yorulma davranışı açısından olumlu bir sonuç olarak değerlendirilmektedir.



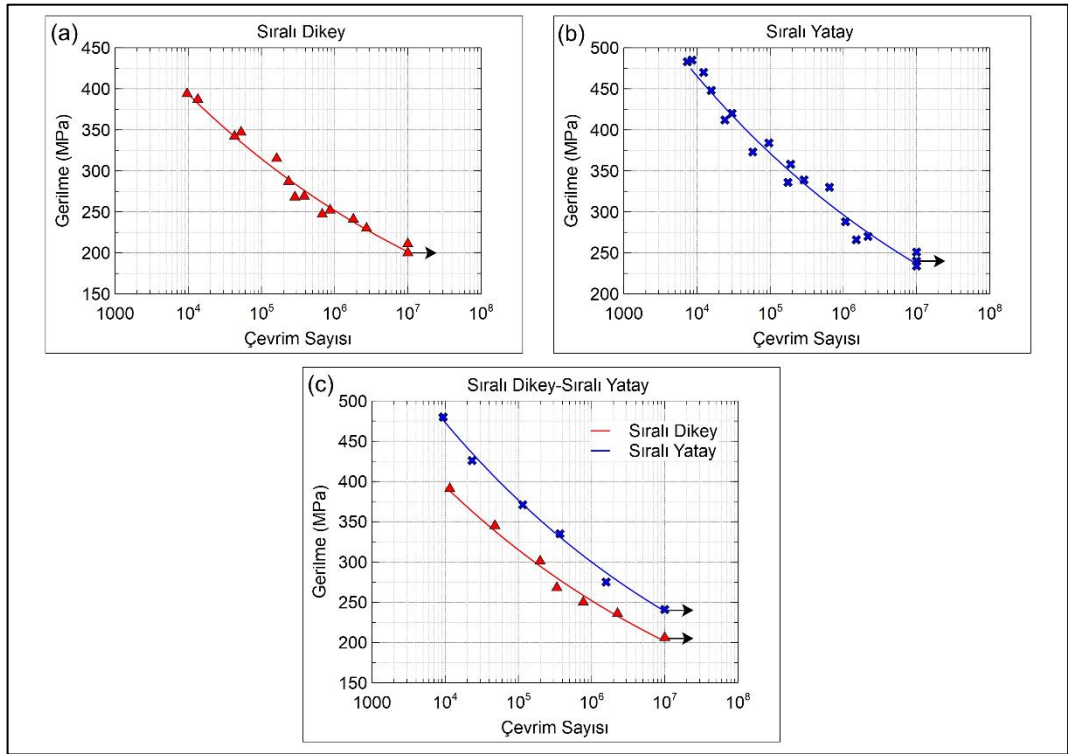
Şekil 5.57. Grup (4) yorulma testi kuvvet-zaman grafiği örnekleri.

4. grup dikey yönlenmedeki yorulma numunelerinin test sonuçları Çizelge 5.11'de verilmiştir. Bir istisna olarak diğer test gruplarına göre burada 7 farklı gerilme genliği ve her bir genlik grubunda 2 şer adet numune test edilmiştir. Dikey yöndeki yorulma sonuçlarına göre en yüksek ortalama gerilme genliğinin uygulandığı 391 MPa değerinde düşük çevrimli yorulma bölgesinde yaklaşık $1,2 \times 10^4$ çevrim sayısında yorulma ömrü elde edilmiştir. Diğer tüm üretimlerin dikey test gruplarıyla kıyaslandığında daha yüksek gerilme değerinde daha uzun yorulma ömrüne sahip olması ilk değerlendirmede olumlu bir sonuç olarak ortaya çıkmıştır. Yüksek çevrimli yorulma bölgesine yaklaşık 2×10^5 yorulma ömründe ve ortalama 301 MPa gerilme değerinde ulaşılmıştır. Bu değerler de bir önceki gibi diğer üretim gruplarına göre daha yüksek bulunmuştur. Ortalama gerilme genliğinin 250 MPa olduğu durumda 10^6

çevrim sayılarına yaklaşılmış ve ortalama 236 MPa gerilme genliğinde yaklaşık $2,3 \times 10^6$ çevrim sayısında yorulma ömrü elde edilmiştir. Ortalama gerilme genliğinin 206 MPa olduğu değerde 10^7 çevrim sayısına ulaşılmış ve yorulma sınırı bu değer olarak belirlenmiştir.

Çizelge 5.11. Grup (4) dikey yorulma deneyi sonuçları.

Sıralı Dikey Yorulma Sonuçları						
Genlik Grubu	Numune No	Kuvvet (N)	Çevrim Sayısı	Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı	Ortalama Gerilme (MPa)
1	4YD-2	53,3	9630	394	11570	391
	4YD-9	52,0	13510	387		
2	4YD-3	45,2	42900	342	47770	345
	4YD-14	47,2	52640	347		
3	4YD-8	40,8	161400	315	198210	301
	4YD-7	38,8	235020	287		
4	4YD-10	36,1	384810	269	335700	268
	4YD-1	35,3	286590	268		
5	4YD-11	33,7	676030	247	771460	250
	4YD-4	32,5	866890	252		
6	4YD-13	30,3	2727070	230	2264385	236
	4YD-5	31,3	1801700	241		
7	4YD-6	26,7	10000000	200	10000000	206
	4YD-12	27,2	10000000	211		



Şekil 5.58. Grup (4) yorulma sonuç grafikleri.

4. grup yatay yorulma numunelerinin test sonuçları Çizelge 5.12’de verilmiştir. Her bir genlik grubundaki numune sonuçlarına ve Şekil 5.58 b’de gösterilen grafiğe bakıldığında numunelerin gerilme-ömür değerlerinin diğer üretim gruplarında olduğu gibi bir düzen içerisinde sonuçlanmadığı görülmektedir. Bu durum çekme testi kısmında açıklandığı gibi, çıkartılan numunelerin içerdiği malzeme miktarı ve numuneye dahil olan ara yüzey durumu gibi etkenlerden kaynaklıdır.

Çizelge 5.12. Grup (4) yatay yorulma deneyi sonuçları.

Sıralı Yatay Yorulma Sonuçları						
Genlik Grubu	Numune No	Kuvvet (N)	Çevrim Sayısı	Gerilme (MPa)	Ortalama Çevrim Sayısı	Ortalama Gerilme (MPa)
1	4YY-15	74,5	12320	470	9413	480
	4YY-18	74,2	7370	483		
	4YY-14	75,7	8550	485		
2	4YY-11	67,6	15690	448	23290	426
	4YY-1	65,3	24080	412		
	4YY-5	63,9	30100	420		
3	4YY-2	57,7	57860	373	114723	371
	4YY-4	56,7	190290	358		
	4YY-7	58,0	96020	384		
4	4YY-3	51,7	175040	336	370603	335
	4YY-9	51,1	646480	330		
	4YY-10	51,7	290290	339		
5	4YY-13	42,1	1500870	266	1580200	275
	4YY-17	42,5	2167490	270		
	4YY-8	43,2	1072240	288		
6	4YY-12	37,6	10000000	251	10000000	241
	4YY-16	37,1	10000000	240		
	4YY-6	36,5	10000000	234		

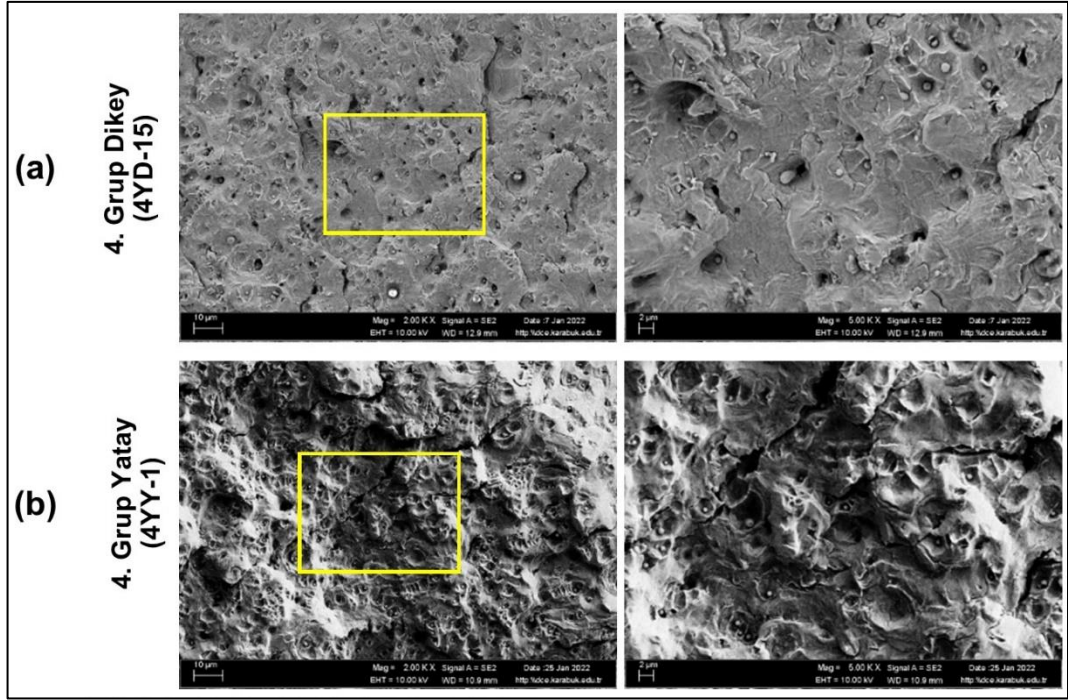
Yatay yönlenmedeki yorulma sonuçlarına ilk olarak bakıldığında diğer üretim gruplarına göre uygulanan daha yüksek gerilme değerlerinde daha uzun yorulma ömrü elde edildiği belirgin bir şekilde görülmektedir. 480 MPa olarak uygulanan en yüksek ortalama gerilme değeri ile yaklaşık $9,4 \times 10^3$ çevrim sayısında yorulma ömrü elde edilmiştir. Uygulanan gerilme değeri diğer numune gruplarında uygulanan en yüksek gerilme değerine göre yaklaşık 100 MPa daha fazladır. Buna rağmen diğer gruptaki numunelere benzer çevrim sayısında yorulma ömrüne sahip sonuç elde edilmiştir. Yüksek çevrimli yorulma bölgesine geçiş 371 MPa gerilme değeri ile başlamıştır. Bu değer neredeyse ilk 3 üretim grubunda uygulanan ve 10^3 mertebelerinde yorulma ömrü ile sonuçlanan gerilme genliğine denktir. Yatay numunelerde ortalama 275 MPa gerilme genliğinde 10^6 mertebelerinde yorulma ömrüne ulaşılmıştır. Yorulma sınırı ise

ortalama 241 MPa genlik değerinde bulunmuş ve bu gerilme değerinde 10^7 çevrim sayısına ulaşılmıştır.

4. grup yatay yorulma numuneleri yukarıda da bahsedildiği gibi diğer üretim gruplarına göre daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu numune grubuna en yakın sonuçlar içeren numune grubu benzer şekilde 4. grup dikey yönlenmedekiler olmuştur. Buna rağmen Şekil 5.58'deki kıyaslama grafiğine bakıldığında yatay numunelerin dikeydekilere göre daha yüksek sonuçlara sahip olduğu görölmektedir. Yatay grubun yorulma eğrisi belirgin bir şekilde dikeydekinin üzerine çıkmıştır. Dikeyde yorulma sınırı 206 MPa olarak bulunurken, yataydaki yorulma sınırı ise 240 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu durumda yataydaki numunelerin yorulma dayanım değerinin dikeydekilere göre yaklaşık % 17 daha fazla olduğu görölmektedir. 4. grup üretim için yorulma dayanımlarının değerlendirildiğinde yönlenmeye bağlı olduğu ve anizotropik durumun baskın olduğu açıkça söylenebilmektedir.

Yataydaki numunelerin test bölgesi boyunca uzanan uzun bir ara yüzey içermesi ve bu ara yüzey sayısının birden fazla olma durumu yorulma dayanımını artırıcı etki yapmıştır. Ara yüzeyin yorulma eksenine dik oluşu numunelerin hasara uğramasını zorlaştırmıştır. Şekil 5.22'de göröldüğü gibi 4. grup ara yüzeylerin sertlik değeri oldukça yüksektir. Sertlik değerinin fazla olması çekme de olduğu gibi yorulma dayanımını da arttırdığı düşünölmektedir.

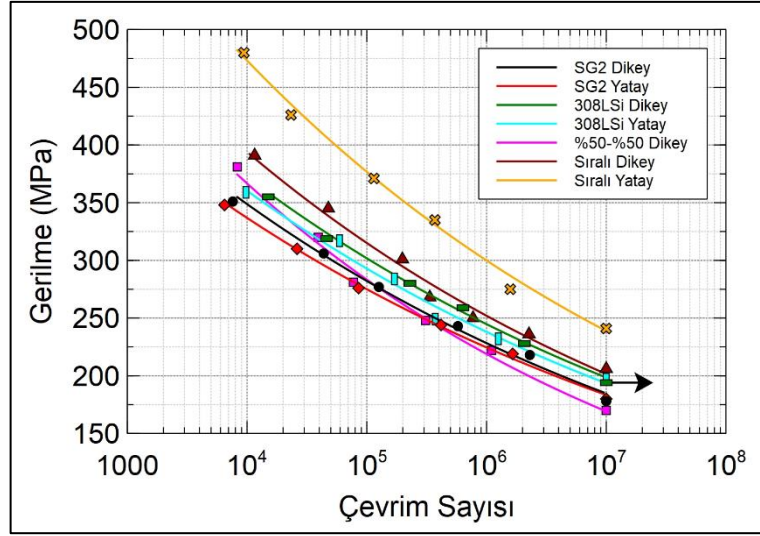
Şekil 5.59'da 4. grup üretimin yorulma numunelerinin SEM ile incelenen kırık yüzeyleri gösterilmektedir. Bu yüzeylerde önceki üretim gruplarında olduğu gibi inklüzyonlar belirgin bir şekilde bulunmaktadır. Dikey ve yatay her iki kopma yüzeyi paslanmaz çelik tarafına aittir. Dikey numunenin kırık yüzey resmine bakıldığında gevrek, yataydakine bakıldığında ise yarı gevrek kırılma davranışı sergilediği görölmektedir. Kırılma resimleri yatay ve dikey yönlenme bakımından kendi içlerinde değerlendirildiğinde 2. grup üretime oldukça benzemektedir. 2. grup üretimde olduğu gibi yatay numunede inklüzyon sayısının dikeye göre daha fazla miktarda oluşu ve inklüzyon çevrelerinde sünek kırılma davranışına yaklaşan çukurcukların oluşumu oldukça benzer durumlardır.



Şekil 5.59. Grup (4) yorulma testi kırık yüzey resimleri.

5.6.5. Yorulma Deneyleri Genel Değerlendirme

Şekil 5.60'da tüm üretim gruplarının ortalama genlik değerlerinden oluşturulan karşılaştırmalı yorulma grafiği gösterilmektedir. Grafiğe göre yorulma sınırının en yüksek olduğu değer 4. grup üretimin yatay yönünde 241 MPa olarak bulunmuştur. Tek malzemeli üretimde yorulma sınırının en düşük olduğu değer ise 1. grubun dikey yönünde 178 MPa olarak hesaplanmıştır. Yorulma sınırının en yüksek değeri ile en düşük değeri kıyaslandığında sıralı üretim ile yorulma dayanımında tek malzemeli üretime göre yaklaşık % 35 civarında bir artış meydana geldiği görülmüştür. Buradan FDM üretimiyle yorulma dayanımının önemli miktarlarda artırılabilceği sonucu çıkarılmıştır.



Şekil 5.60. Yorulma sonuç grafiklerinin birlikte gösterimi.

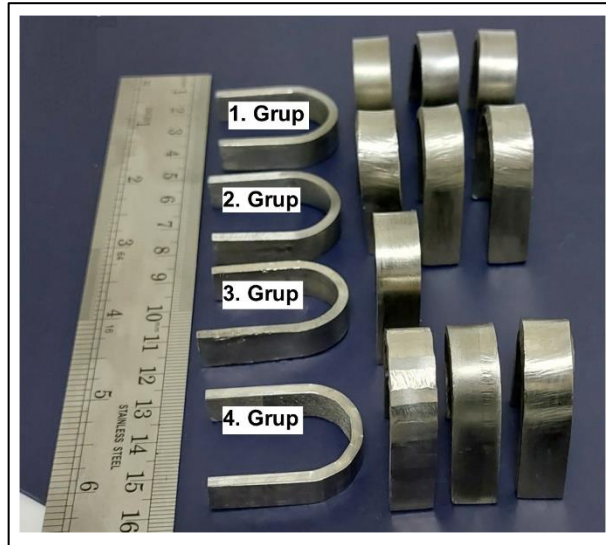
4. grup üretim haricinde diğer grupların yatay ve dikey yöndeki sonuçları kıyaslandığında, dikey yöndekilerin diğerine göre bir miktar üzerinde olduğu görülmektedir. Ancak bu fark kayda değer miktarda olmamıştır. 4. grup dikey ile yatay numunelerin yorulma değerlerinde daha önce bahsedildiği gibi aralarında ciddi miktarda fark bulunmaktadır. 4. grup üretimde yatay değerlerin yorulma sınırı dikeylere göre % 17 daha fazla bulunmuştur. Dikeyde elde edilen sonuçlar ise yorulma dayanımının en yüksek olduğu 2. test grubunu oluşturmuştur. 4. grup üretimin yorulma özellikleri açısından belirgin bir şekilde anizotropik yapıya sahip olduğu söylenebilmektedir. 308LSi paslanmaz çelik ile yapılan 2. grup üretimle, SG2 düşük alaşımlı çeliğin yorulma değerleri kıyaslandığında paslanmaz çelik yapının yorulma dayanımının daha yüksek olduğu görülmüştür. 2. grup dikey grubun yorulma değerleri 4. grup dikeye oldukça yaklaşmıştır.

Kırılma yüzeyleri değerlendirildiğinde genel olarak SG2 tarafından kopmalar gevrek, paslanmaz çelik kısmından kopmalar ise yarı gevrek davranışa yaklaşan bir eğilim gösteren şekilde olmuştur. Paslanmaz çelik tarafından kopan numunelerde inklüzyon sayısı daha yüksek ve daha küçük boyutlarda olmuştur. Yorulma hasarları genel olarak inklüzyonların yoğun olarak bulunduğu bölgelerde gerçekleşmiştir.

5.7. EĞME DENEYİ

TAEİ yöntemiyle üretilen 4 farklı üretimden elde edilen numunelere tek yönlü eğme testi uygulanmıştır. Eğme testleri üretimden sonraki TAEİ parçalarının ekstra şekil verilebilme kabiliyetini araştırmak üzere gerçekleştirilmiştir.

Eğme numunelerinin 180° eğme testi uygulandıktan sonraki durumları Şekil 5.61’de gösterilmektedir. Eğme testi esnasında ve sonrasında numunelerde gözle görülebilen çizik, çatlak ve kırılma gibi herhangi bir hata görülmemiştir. Birleşme ara yüzelerinin olduğu 3. ve 4. grup üretimlerde ara yüzey ve yakın kısımları incelenmiş ve şekil değişiminden kaynaklı kusur görülmemiştir. 4. grup üretimin gevrek olan yani SG2 tel içeren kısımları da dikkatle incelenmiş ve hatasız bir şekil değişimine uğradığı görülmüştür. Ayrıca 4. grup üretimin paslanmaz çelik içeren kısımlarına bakıldığında çekme testindeki gibi sünek bir şekil değişimine uğradığı görülmüştür. Testler sonucunda tüm numuneler hasarsız bir şekilde 180° eğilebilmiştir.



Şekil 5.61. Eğme deneyi sonrası numuneler.

TAEİ ile üretilmiş numuneler eğme testi esnasında iç kısımları basma, dış kısımları ise çekme gerilmesine maruz kalmaktadır. Bu nedenle eğme testine tabi tutulan numunelerin basma gerilmesine maruz kalan yüzeyleri de ayrıca incelenmiş ve herhangi bir üretim hatasına rastlanılmamıştır. Literatürde gevrek bir malzemeye

uygulanan eğme testinde dış kısımda meydana gelen çekme gerilmesinin yüksek değerlere ulaşabildiği ve malzemenin tam eğilme göstermeden belirli açıda hasara uğrayabileceğinden bahsedilmiştir [260]. Birleşme ara yüzeyinde oluşan intermetaliklerin sertlik değerinin yüksek ve kırılgan olmalarından dolayı, eğme davranışını olumsuz etkileyebileceğinden bahsedilmiştir [261]. Bunlara ek olarak üretim işleminden kaynaklı gaz boşluğu ve yetersiz ergime gibi kusurlar eğmede hasar oluşumunu tetikleyen unsurlardır. Bu durumlar değerlendirildiğinde 3. ve 4. grup üretimler için makro incelemeler dahilinde, eğme davranışına zararlı olabilecek yapı veya yapıların oluşmadığı, TAEİ ile gerçekleştirilen 4 farklı üretimin eğme deneyi açısından başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

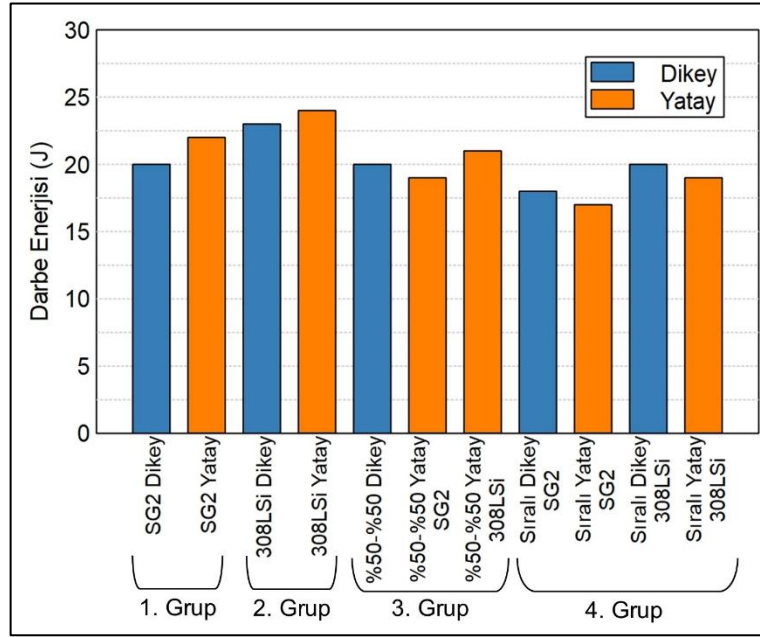
5.8. ÇENTİK DARBE DENEYİ

TAEİ yöntemiyle üretilen parçalar ani yüklere maruz kalan konstrüktif bir yapı olarak kullanılabilirler. Ani yüklemeler altındaki malzeme davranışlarını belirlemeye yönelik gerçekleştirilen testlerden birisi de çentik darbe testidir. Bu bakımdan TAEİ yöntemiyle üretilen numunelere sadece oda sıcaklığında olmak üzere çentik darbe testi uygulanmıştır. Çentik darbe deneyi sonucu, numune tiplerine göre elde edilen kırılma enerjisi değerleriyle oluşturulan grafik Şekil 5.62’de verilmiştir. Şekil 5.63’te ise deney sonrası numunelerin görüntüleri yer almaktadır.

Çentik darbe deneylerinde genel olarak 10 mm x 10 mm x 55 mm ölçülerinde kare kesitli numuneler kullanılmaktadır. Ancak bu kesit boyutlarında numune çıkarımının mümkün olmadığı, kesiti daha ince olan sac halinde malzemelere de testler uygulanabilmektedir. Çalışmalarda 2,5 mm kalınlığındaki numuneler test edilmiştir. Bu bakımdan kırılma enerjileri değerlendirildiğinde kalınlık değerinin büyüklük derecesi göz önüne alınmalıdır.

Şekil 5.62’de gösterilen sonuçlara göre 1. grup dikey yöndeki numunelerin kırılma enerjisi ortalama 20 J, yataydakilerin ise 22 J olarak hesaplanmıştır. 2. grup üretimde ise yönlenmeye göre değerler dikey ve yatay olarak sırasıyla 23 J ve 24 J olarak değişmektedir. Her iki grup üretimdeki farklı yönlenmedeki değerler yaklaşık olarak benzer çıkmıştır. Literatürde, benzer şekilde dikey ve yatay yöndeki numunelere

uygulanan testlerde sonuçlar arasında önemli bir fark görülmemiştir [217,235]. Yönden bağımsız olarak, üretilen parçaların numune çıkarım bölgeleri (alt ve üst gibi) ise darbe enerjisini etkilemektedir [235]. Çünkü mikroyapı kısmındaki çalışmalarda anlatıldığı gibi TAEİ ile üretilen parçalarda bölgesel olarak mikroyapı değişimleri olabilmektedir. Mikroyapı darbe enerjisini ve tokluk özelliklerini etkileyen önemli faktördür. Ayrıca katmanlı yapılar için ve tane boyutundaki değişimin derecesine göre tokluk değerlerinde anizotropik değişim olabilmektedir [217].

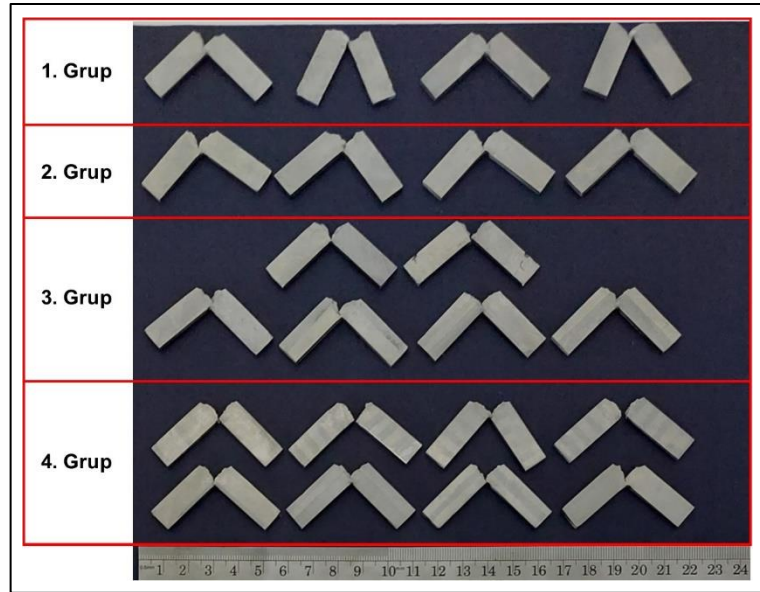


Şekil 5.62. Çentik darbe deneyi sonuçları.

3. grup üretimin çentik darbe sonuçları değerlendirildiğinde öncelik olarak dikey numunelerin kırılma enerjisi ortalama değerinin 20 J olduğu görülmektedir. Bu değer 1. grup üretimin dikey kısmıyla aynı büyüklüktedir. Buradan dikey yöndeki ara yüzey tokluk değerinin, tokluğu en düşük değerde olan esas malzemeden daha az olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca birleşme ara yüzeyinde tokluk değerini düşüren veya olumsuz etkileyen herhangi bir hata veya yapı oluşumunun meydana gelmediği söylenebilmektedir. 3. grup yatay numunelerin sonuçlarına bakıldığında ise çelik ve paslanmaz çelik tarafından kırılma işlemi uygulanan numunelerin ortalama darbe enerjisinin sırasıyla 19 J ve 20 J olduğu ve birbirine çok yakın bulunduğu görülebilmektedir. Bu değerler de yaklaşık olarak tokluğu düşük olan esas

malzemelerle benzerlik göstermektedir. Ayrıca yatay yöndeki sonuçlar dikeylerle neredeyse aynı değerdedir.

Şekil 5.62’de gösterilen 4. grup üretimin kırılma enerjilerine bakıldığında en düşük değerlerin yer aldığı görülmektedir. Yönlenme etkisine bakılmaksızın paslanmaz çelik kısmından hasara uğratılan parçalarda darbe enerjisi değeri önceki üretim gruplarında olduğu gibi daha yüksek bulunmuştur. Darbe enerjisindeki düşük değerlerin bu grupta yer almasının ise mikroyapı ve sertlik sonuçlarıyla ilgili olduğu düşünülmektedir. Mikroyapı incelemeleri ve özellikle XRD çalışmaları sonucunda 4. grup sıralı üretimde δ ferrit fazının yoğun olduğu bulunmuştur. Literatürde δ ferrit miktarının artmasıyla tokluk değerinin düştüğü belirtilmiştir [262]. Ayrıca yüksek sertlik değerlerinin süneklik ve tokluk özelliklerini düşürme potansiyeli bulunmaktadır [227,263]. Bir başka çalışmada çok pasolu kaynak işlemlerinde bölgesel olarak yer alan kırılma fazların düşük tokluk değerlerine sebep olabileceği bildirilmiştir [264].



Şekil 5.63. Çentik darbe deneyi sonrası numuneler.

Çentik darbe deneyi sonucunda elde edilen sonuçlar önceki paragrafta açıklanmıştır. Sonuçlara göre FDM yapıları üretimlerin darbe enerjilerinin esas malzemeli üretimlere göre nasıl değişebileceği hakkında detay içermeyen çıkarımlarda bulunulmuş ve sonuçları etkileyebilecek durumlara değinilmiştir. FDM yapıların darbe altındaki davranışlarının değerlendirilebilmesi için daha ileri çalışmalar yapılmasının faydalı

olacağı düşünülmektedir. Bu çalışmalarda standart numuneler kullanılabilir, numune sayıları arttırılabilir, üretilen parçanın alt, orta ve üst kısmındaki özellikler bölgesel olarak incelenebilir ve ayrıca farklı sıcaklıklarda deneyler uygulanabilir. Böylece daha fazla sonuç ortaya çıkarılarak FDM yapıların darbeli yük altındaki özellikleri detaylı bir şekilde ortaya konabilir.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında öncelikle geliştirilmiş özelliklere sahip bir TAEİ tezgahının tasarımı ve Karabük Üniversitesi atölye ve laboratuvarlarında üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu tezgah endüstriyel tipte ticari olarak temin edilebilen makinelerle kıyaslanabilecek seviyede başarılı bir şekilde üretilebilmiştir. Eİ tezgahı imalatının ardından parça üretim işlemlerine geçilmiştir. MIG/MAG yöntemiyle pilot çalışmalarda belirlenen kaynak parametreleri uygulanarak birbirinden farklı 4 grup üretim işlemi gerçekleştirilmiştir. Üretim işlemlerinde esas malzeme olarak düşük alaşımlı çelik içeriğine sahip SG2 ile östenitik paslanmaz çelik özelliğine sahip olan 308LSi teller kullanılmıştır. İlk iki grup sadece esas malzemeden oluşacak şekilde diğerleri ise bu esas malzemelerin farklı kombinasyonları şeklinde üretilmiştir. Farklı iki telin birlikte kullanıldığı üretimlere nitelikli üretimler tanımlaması yapılmış ve bunların FDM (fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler) yapıları olduğundan bahsedilmiştir. Üretim işlemleri tamamlandıktan sonra 4 farklı grup olarak gerçekleştirilen üretimlerin mekanik ve metalurjik özelliklerini belirlemek için testler uygulanmıştır. Mekanik özellikleri belirlemek için; sertlik, çekme, yorulma, eğme ve çentik darbe testleri yapılmıştır. Metalurjik özellikler için ise makro yapı, mikroyapı çalışmaları uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar ayrıca OE, XRD, SEM ve EDS çalışmalarıyla desteklenmiştir. Tez çalışması sonucunda elde edilen genel sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Tez süresince yapılan ilk çalışmalarda elde bulundurulmuş TAEİ işlemine yönelik 3B yazıcılar kullanılmış daha sonra bu yazıcıların büyük yapıların üretimi konusunda sınırlı özelliklerde olduğu anlaşılmıştır. Bundan dolayı yeni bir TAEİ makinesine ihtiyaç duyulmuş ve geçmişte edinilen tecrübelerle yeni bir tezgah tasarımı yapılmıştır. Bu tasarıma bağlı kalınarak üstün özelliklere sahip yeni bir TAEİ tezgahı başarılı bir şekilde üretilmiştir.

- İmalatı tamamlanan tezgahla 4 farklı üretim grubundan oluşan parçalar başarılı bir şekilde üretilmiş, makro yapı çalışmalarında 4 farklı üretim grubunun gözle incelenmesi sonucu parça bütünlüğünü bozacak herhangi bir hataya rastlanılmamıştır. Makro görünümü genel olarak düzgün olan kaynak dikişine sahip katmanlı yapılar elde edilmiştir.
- OE çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre, üretimlerin kimyasal bileşimi tel malzemelerinin katalog değerlerine oldukça yakın çıkmıştır. 3. grup üretimin esas malzeme içeren bölgelerinin kimyasal içerikleri, 1. ve 2. grup sadece esas malzeme kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerle yaklaşık olarak aynı bulunmuştur.
- XRD analizi sonuçlarında 1. ve 2. grup üretimlerde esas üretim malzemelerinin bilinen faz yapılarının dışında herhangi bir farklı oluşuma rastlanılmamıştır. SG2 düşük alaşımlı çelik ile üretilen yapının tamamının α ferrit fazından, 308LSi östenitik paslanmaz çelik ile üretilen yapının ise içerisinde δ ferrit fazını bulduran ancak çoğunlukla östenit fazından oluşan bir yapıdan meydana geldiği belirlenmiştir. 3. grup üretimde elde edilen XRD sonuçları 1. ve 2. grupla bir bütünlük sağlamıştır. 4. grup üretimin SG2, 308LSi ve ara yüzey içeren kısımlarının tamamının baskın olarak ferrit yapısından oluştuğu görülmüştür.
- Mikroyapı çalışmalarında üretilen parçaların inşa yönü boyunca değişiklik gösteren farklı yapılara sahip olduğu belirlenmiştir. Bu durumun oluşmasında temel olarak TAEİ işleminin uygulanmasından kaynaklı tekrarlı ısı girdilerinin ve tekrarlı soğuma işlemlerinin katkısının olduğu belirlenmiştir. Birleşme ara yüzeyi içeren 3. ve 4. grupta farklı faz ve yapı oluşumlarına rastlanılmıştır. Termal etkilerin yanı sıra, SG2 ve 308LSi malzemelerinin farklı kimyasal bileşiminden dolayı birbirleri arasındaki element transferinin bu duruma etkisi büyük olmuştur.
- Tüm üretim gruplarında kesit boyunca ölçülen sertlik değerleri orta kısımdan alınanlarla yüksek oranlarda örtüşmüş ve parça genelindeki sertlik dağılımı hakkında genel bir bilgi vermiştir. Birleşme ara yüzeyinin olduğu yerlerde sertlik

değerlerinde ani değişimler yaşanmıştır. Sıralı üretimde sertlik karakteristiği değişen birçok farklı duruma rastlanılmış en yüksek sertlik değeri SG2 tarafında ortalama 370 HV olarak hesaplanmıştır.

- Çekme testlerinde tüm üretim grupları arasında en yüksek ortalama çekme dayanımının 4. grup numunelerde olduğu bulunmuştur. Sıralı üretimde sadece SG2 ve sadece 308LSi ile yapılan üretime göre çekme dayanımı daha yüksek olan yapı elde edilmiştir. Çekme dayanımında sıralı üretimle sadece SG2 ile gerçekleştirilen üretime göre yaklaşık % 50, 308LSi üretimine göre ise % 34 artış sağlanmıştır. Çekme testi sonrası SEM ile kırık yüzey çalışmalarında incelenen tüm numunelerin sünek kırılma davranışı sergilediği ve kırılma yüzeylerinde inklüzyonların bulunduğu görülmüştür. Ara yüzey içeren bütün numunelerde kopma esas malzemenin bulunduğu taraftan gerçekleşmiştir. 3. ve 4. grup üretimlerinin ara yüzeyinde çekme dayanımını olumsuz etkileyecek herhangi bir oluşuma rastlanılmamış, çekme dayanımı yüksek ara yüzey içeren FDM yapıları başarılı bir şekilde üretilmiştir.
- Tüm üretim gruplarına uygulanan yorulma testleri sonucu 10^7 ömür sayısında yorulma sınırları tespit edilebilmiştir. Sıralı üretimin yorulma dayanımında tek malzemeli SG2 üretime göre % 34 oranında artış meydana gelmiştir. Yorulma testleri sonucunda bütün kopmalar esas malzeme tarafından gerçekleşmiştir. Kırık yüzey incelemeleri sonucunda, çekme kırık yüzeylerinde olduğu gibi inklüzyonlara rastlanılmıştır. SG2 kısmından kırılan numuneler gevrek, 308LSi tarafından kırılanlar ise yarı gevrek davranışa yakın bir kırılma sergilemiştir. Birleşme ara yüzeyi içeren numunelerin hiçbiri ara yüzey kısmından hasara uğramamıştır. Bu bakımdan FDM parçalarının ara yüzeyinde yorulma ömrünü azaltacak herhangi bir yapı ve hatanın olduğu görülmemiş, yorulma dayanımı açısından başarılı olan FDM yapıları elde edilmiştir.
- Eğme deneyi sonrası numune yüzeylerinde çizik, çatlak ve kırılma gibi herhangi bir hasara rastlanılmamıştır. Tüm numuneler başarılı bir şekilde 180° eğilebilmiştir.

- Çentik darbe deneyi sonucunda 308LSi paslanmaz çelik tarafından kırılma işlemi uygulanan numunelerin kırılma enerjisi, SG2 düşük alaşımlı çelikten uygulanana göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Sıralı üretimin kırılma enerjisi değerleri genel olarak tek malzeme içeren üretime göre daha düşük bulunmuştur.

Çalışmalar kapsamında elde edilen genel sonuçlar yukarıda açıklanmıştır. TAEİ işlemi ve özellikle FDM yapıların TAEİ konusunda ileride yapılabilecek çalışmalar için aşağıda bazı önerilerde bulunulmuştur.

- TAEİ yöntemiyle üretilen FDM yapılarında iki farklı malzemenin birleşmesinden meydana gelen ara yüzeyin karakterizasyonu daha detaylı bir şekilde gerçekleştirilebilir. Ara yüzey dayanımının ana malzemelere göre artmasını sağlayan mekanizmaların neler olduğu çalışılabilir.
- FDM yapılarının üretiminde besleyici tel malzemelerinin termal özelliklerinin farklı olmasından kaynaklanan zorlukların giderilmesi üzerine çalışılabilir. Bu şekilde katman geçişi arasındaki keskin olan farklılık azaltılabilir.
- TAEİ üretimi süresince katmanlar arasındaki çok farklı sıcaklık gradyanlarının oluşmasını minimize edebilecek yeni çalışmalar yapılabilir.
- FDM yapılarının tokluk değerlerinin daha detaylı belirlenebilmesi için üretilen parçaların farklı bölgelerinden numuneler alınarak ve farklı deney parametreleri uygulanarak testler detaylandırılabilir. Bu şekilde FDM yapılarının tokluk özellikleri kapsamlı olarak belirlenebilir.
- Çalışmadaki sıralı üretim üzerinde gerçekleştirilen XRD ve mikroyapı çalışmalarında ferrit oranı yüksek olan bir yapı elde edilmiştir. Bu nedenle özellikle paslanmaz çelik katmanında esas malzeme özelliklerini sergileme konusunda değişimler olabilir. Bu bakımdan mikroyapı kontrolünün sağlanması ve uygun yapının belirlenebilmesi konusunda farklı çalışmalar gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

1. Moeini, G., Sajadifar, S. V., Wegener, T., Brenne, F., Niendorf, T., and Böhm, S., "On the low-cycle fatigue behavior of friction stir welded Al–Si12 parts produced by selective laser melting", *Materials Science And Engineering: A*, 764: 138189 (2019).
2. Pradel, P., Zhu, Z., Bibb, R., and Moultrie, J., "Investigation of design for additive manufacturing in professional design practice", *Journal Of Engineering Design*, 29 (4–5): 165–200 (2018).
3. Jin, Y., Du, J., and He, Y., "Optimization of process planning for reducing material consumption in additive manufacturing", *Journal Of Manufacturing Systems*, 44: 65–78 (2017).
4. Fang, X., Du, J., Wei, Z., He, P., Bai, H., Wang, X., and Lu, B., "An investigation on effects of process parameters in fused-coating based metal additive manufacturing", *Journal Of Manufacturing Processes*, 28: 383–389 (2017).
5. Zuo, H., Li, H., Qi, L., and Zhong, S., "Influence of interfacial bonding between metal droplets on tensile properties of 7075 aluminum billets by additive manufacturing technique", *Journal Of Materials Science & Technology*, 32 (5): 485–488 (2016).
6. Hoefler, K., Haelsig, A., and Mayr, P., "Arc-based additive manufacturing of steel components—comparison of wire- and powder-based variants", *Welding In The World*, 62 (2): 243–247 (2018).
7. Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., Rajput, S. K., Sonia, P., Singhal, P., and Saxena, K. K., "Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview", *Materials Today: Proceedings*, 26: 3058–3070 (2020).
8. Buchanan, C., Matilainen, V.-P., Salminen, A., and Gardner, L., "Structural performance of additive manufactured metallic material and cross-sections", *Journal Of Constructional Steel Research*, 136: 35–48 (2017).
9. Gokuldoss, P. K., Kolla, S., and Eckert, J., "Additive manufacturing processes: selective laser melting, electron beam melting and binder jetting—selection guidelines", *Materials*, 10 (6): 672 (2017).
10. Tan, L. J., Zhu, W., and Zhou, K., "Development of organically modified montmorillonite/polypropylene composite powders for selective laser sintering", *Powder Technology*, 369: 25–37 (2020).

11. Kim, Y.-K., Youn, S.-J., Kim, S.-W., Hong, J., and Lee, K.-A., "High-temperature creep behavior of gamma Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy additively manufactured by electron beam melting", *Materials Science And Engineering: A*, 763: 138138 (2019).
12. Yang, M. and Sisson, R. D., "Carburizing heat treatment of selective-laser-melted 20MnCr5 steel", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 29 (6): 3476–3485 (2020).
13. Popov, V. V. and Fleisher, A., "Hybrid additive manufacturing of steels and alloys", *Manufacturing Review*, 7: 6 (2020).
14. Hascoët, J.-Y., Parrot, J., Mognol, P., and Willmann, E., "Induction heating in a wire additive manufacturing approach", *Welding In The World*, 62 (2): 249–257 (2018).
15. Li, F., Chen, S., Shi, J., Tian, H., and Zhao, Y., "Evaluation and optimization of a hybrid manufacturing process combining wire arc additive manufacturing with milling for the fabrication of stiffened panels", *Applied Sciences*, 7 (12): 1233 (2017).
16. van de Werken, N., Tekinalp, H., Khanbolouki, P., Ozcan, S., Williams, A., and Tehrani, M., "Additively manufactured carbon fiber-reinforced composites: State of the art and perspective", *Additive Manufacturing*, 31: 100962 (2020).
17. Chen, H., Zi, X., Han, Y., Dong, J., Liu, S., and Chen, C., "Microstructure and mechanical properties of additive manufactured W-Ni-Fe-Co composite produced by selective laser melting", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 86: 105111 (2020).
18. Somashekara, M. A. and Suryakumar, S., "Studies on dissimilar twin-wire weld-deposition for additive manufacturing applications", *Transactions Of The Indian Institute Of Metals*, 70 (8): 2123–2135 (2017).
19. Haase, C., Bültmann, J., Hof, J., Ziegler, S., Bremen, S., Hinke, C., Schwedt, A., Prah, U., and Bleck, W., "Exploiting process-related advantages of selective laser melting for the production of high-manganese steel", *Materials*, 10 (1): 56 (2017).
20. Mohd Yusuf, S., Cutler, S., and Gao, N., "Review: The impact of metal additive manufacturing on the aerospace industry", *Metals*, 9 (12): 1286 (2019).
21. Ge, J., Lin, J., Lei, Y., and Fu, H., "Location-related thermal history, microstructure, and mechanical properties of arc additively manufactured 2Cr13 steel using cold metal transfer welding", *Materials Science And Engineering: A*, 715: 144–153 (2018).
22. Fang, X., Zhang, L., Li, H., Li, C., Huang, K., and Lu, B., "Microstructure evolution and mechanical behavior of 2219 aluminum alloys additively fabricated by the cold metal transfer process", *Materials*, 11 (5): 812 (2018).

23. Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Shi, X., Ma, Q., Tang, S., Fan, H., and Ma, S., "Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing", *Materials And Manufacturing Processes*, 32 (16): 1881–1886 (2017).
24. Arrizubieta, J. I., Ukar, O., Ostolaza, M., and Mugica, A., "Study of the environmental implications of using metal powder in additive manufacturing and its handling", *Metals*, 10 (2): 261 (2020).
25. Geng, Y., Xie, W., Tu, Y., Deng, S., Egan, D., Dowling, D. P., Song, H., Zhang, S., and Harrison, N., "Ti–6Al–4V microstructural functionally graded material by additive manufacturing: Experiment and computational modelling", *Materials Science And Engineering: A*, 823: 141782 (2021).
26. Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y.-G., Lee, J.-H., and Zhang, J., "Additive manufacturing of metallic materials: A review", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 27 (1): 1–13 (2018).
27. Childerhouse, T. and Jackson, M., "Near net shape manufacture of titanium alloy components from powder and wire: a review of state-of-the-art process routes", *Metals*, 9 (6): 689 (2019).
28. Gomez, C., Su, R., Thompson, A., DiSciaccia, J., Lawes, S., and Leach, R., "Optimization of surface measurement for metal additive manufacturing using coherence scanning interferometry", *Optical Engineering*, 56 (11): 111714 (2017).
29. Wang, D., Wang, Y., Wu, S., Lin, H., Yang, Y., Fan, S., Gu, C., Wang, J., and Song, C., "Customized a Ti6Al4V bone plate for complex pelvic fracture by selective laser melting", *Materials*, 10 (1): 35 (2017).
30. Internet: Siemens, "Sheet Lamination", <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/sheet-lamination/55512> (2021).
31. Sireesha, M., Lee, J., Kranthi Kiran, A. S., Babu, V. J., Kee, B. B. T., and Ramakrishna, S., "A review on additive manufacturing and its way into the oil and gas industry", *RSC Advances*, 8 (40): 22460–22468 (2018).
32. Internet: Sciaky Inc., "What is directed energy deposition (DED) 3D printing?", <https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/what-is-ded-3d-printing> (2021).
33. Zhang, C., Li, Y., Gao, M., and Zeng, X., "Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source", *Materials Science And Engineering: A*, 711: 415–423 (2018).
34. Yang, J., Yang, H., Yu, H., Wang, Z., and Zeng, X., "Corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy in NaCl solution", *Metallurgical And Materials Transactions A*, 48 (7): 3583–3593 (2017).

35. Henckell, P., Gierth, M., Ali, Y., Reimann, J., and Bergmann, J. P., "Reduction of energy input in wire arc additive manufacturing (WAAM) with gas metal arc welding (GMAW)", *Materials*, 13 (11): 2491 (2020).
36. Charles Murgau, C., Lundbäck, A., Åkerfeldt, P., and Pederson, R., "Temperature and microstructure evolution in gas tungsten arc welding wire feed additive manufacturing of Ti-6Al-4V", *Materials*, 12 (21): 3534 (2019).
37. Artaza, T., Bhujangrao, T., Suárez, A., Veiga, F., and Lamikiz, A., "Influence of heat input on the formation of laves phases and hot cracking in plasma arc welding (PAW) additive manufacturing of Inconel 718", *Metals*, 10 (6): 771 (2020).
38. Cong, B., Ding, J., and Williams, S., "Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 76 (9–12): 1593–1606 (2015).
39. Li, Y., Wu, S., Lv, X., Feng, J., Qu, H., and Cheng, F., "Study on the influence of interlayer temperature on microstructure and mechanical properties of submerged arc additively manufactured low-carbon steel and its in-situ toughening mechanism", *Journal Of Manufacturing Processes*, 71: 356–373 (2021).
40. Treutler, K. and Wesling, V., "The current state of research of wire arc additive manufacturing (WAAM): A review", *Applied Sciences*, 11 (18): 8619 (2021).
41. Yang, X., Liu, J., Wang, Z., Lin, X., Liu, F., Huang, W., and Liang, E., "Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured AZ31 magnesium alloy using cold metal transfer process", *Materials Science And Engineering: A*, 774: 138942 (2020).
42. Haselhuhn, A. S., Wijnen, B., Anzalone, G. C., Sanders, P. G., and Pearce, J. M., "In situ formation of substrate release mechanisms for gas metal arc weld metal 3-D printing", *Journal Of Materials Processing Technology*, 226: 50–59 (2015).
43. Gomez Ortega, A., Corona Galvan, L., Deschaux-Beaume, F., Mezrag, B., and Rouquette, S., "Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 23 (4): 316–332 (2018).
44. Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Diao, C., and Williams, S., "Preliminary investigation of building strategies of maraging steel bulk material using wire + i", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 28 (2): 594–600 (2019).
45. Gneiger, S., Österreicher, J. A., Arnoldt, A. R., Birgmann, A., and Fehlbier, M., "Development of a high strength magnesium alloy for wire arc additive manufacturing", *Metals*, 10 (6): 778 (2020).

46. Prado-Cerqueira, J., Camacho, A., Diéguez, J., Rodríguez-Prieto, Á., Aragón, A., Lorenzo-Martín, C., and Yanguas-Gil, Á., "Analysis of favorable process conditions for the manufacturing of thin-wall pieces of mild steel obtained by wire and arc additive manufacturing (WAAM)", *Materials*, 11 (8): 1449 (2018).
47. Nilsiam, Y., Haselhuhn, A., Wijnen, B., Sanders, P., and Pearce, J., "Integrated voltage—current monitoring and control of gas metal arc weld magnetic ball-jointed open source 3-D printer", *Machines*, 3 (4): 339–351 (2015).
48. Chen, F., Yang, Y., and Feng, H., "Regional control and optimization of heat input during cmt by wire arc additive manufacturing: modeling and microstructure effects", *Materials*, 14 (5): 1061 (2021).
49. Marenych, O., Kostryzhev, A., Shen, C., Pan, Z., Li, H., and van Duin, S., "Precipitation strengthening in Ni–Cu alloys fabricated using wire arc additive manufacturing technology", *Metals*, 9 (1): 105 (2019).
50. Josten, A. and Höfemann, M., "Arc-welding based additive manufacturing for body reinforcement in automotive engineering", *Welding In The World*, 64 (8): 1449–1458 (2020).
51. Lee, C., Seo, G., Kim, D. B., Kim, M., and Shin, J.-H., "Development of defect detection AI model for wire + arc additive manufacturing using high dynamic range images", *Applied Sciences*, 11 (16): 7541 (2021).
52. Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Dang, X., Huang, K., Wang, L., and Lu, B., "Correlations between microstructure characteristics and mechanical properties in 5183 aluminium alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing with different arc modes", *Materials*, 11 (11): 2075 (2018).
53. Internet: AMFG, "The Benefits of Wire Arc Additive Manufacturing", <https://amfg.ai/2018/05/17/an-introduction-to-wire-arc-additive-manufacturing/> (2021).
54. Alonso, U., Veiga, F., Suárez, A., and Artaza, T., "Experimental investigation of the influence of wire arc additive manufacturing on the machinability of titanium parts", *Metals*, 10 (1): 24 (2019).
55. da Silva, L. J., Souza, D. M., de Araújo, D. B., Reis, R. P., and Scotti, A., "Concept and validation of an active cooling technique to mitigate heat accumulation in WAAM", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 107 (5–6): 2513–2523 (2020).
56. Thien, A., Saldana, C., and Kurfess, T., "The effect of WAAM process parameters on process conditions and production metrics in the fabrication of single-pass multi-layer wall artifacts", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 119: 531-547 (2021).
57. Tangestani, R., Farrahi, G. H., Shishegar, M., Aghchekhandi, B. P., Ganguly, S., and Mehmanparast, A., "Effects of vertical and pinch rolling on residual stress

- distributions in wire and arc additively manufactured components", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 29 (4): 2073–2084 (2020).
58. Dhinakaran, V., Ajith, J., Fathima Yasin Fahmidha, A., Jagadeesha, T., Sathish, T., and Stalin, B., "Wire arc additive manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys – A review", *Materials Today: Proceedings*, 21: 920–925 (2020).
 59. Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., and Newman, S. T., "Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, 22: 672–686 (2018).
 60. Wang, X., Wang, A., Wang, K., and Li, Y., "Process stability for GTAW-based additive manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, 25 (5): 809–819 (2019).
 61. Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., and Oliveira, J. P., "Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)", *Materials*, 12 (7): 1121 (2019).
 62. Pal, K. and Pal, S. K., "Effect of pulse parameters on weld quality in pulsed gas metal arc welding: A Review", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 20 (6): 918–931 (2011).
 63. Kahraman, N. ve Gülenç, B., "Modern Kaynak Teknolojisi ve Kaynak İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği", 4. Ed., *EPAMAT Basım Yayın*, (2020).
 64. Chen, C., Chen, F., Yang, Y., and Zhang, H., "Study on appearance and mechanical behavior of additively manufacturing of Ti–6Al–4V alloy by using cold metal transfer", *CIRP Journal Of Manufacturing Science And Technology*, 35: 250–258 (2021).
 65. Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., Roberts, J., and Li, H., "Fabrication of Fe-FeAl functionally graded material using the wire-arc additive manufacturing process", *Metallurgical And Materials Transactions B*, 47 (1): 763–772 (2016).
 66. Liu, Z. M., Cui, S., Luo, Z., Zhang, C., Wang, Z., and Zhang, Y., "Plasma arc welding: Process variants and its recent developments of sensing, controlling and modeling", *Journal Of Manufacturing Processes*, 23: 315–327 (2016).
 67. Wang, Z. and Zhang, Y., "A review of aluminum alloy fabricated by different processes of wire arc additive manufacturing", *Materials Science*, 27 (1): 18–26 (2021).
 68. Acherjee, B., "Hybrid laser arc welding: State-of-art review", *Optics & Laser Technology*, 99: 60–71 (2018).
 69. Vidyarthy, R. S. and Dwivedi, D. K., "Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration", *Journal Of Manufacturing Processes*, 22: 211–228 (2016).

70. Campbell, S. W., Galloway, A. M., and McPherson, N. A., "Arc pressure and weld metal fluid flow while using alternating shielding gases. Part 1: arc pressure measurement", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 18 (7): 591–596 (2013).
71. Ou, W., Mukherjee, T., Knapp, G. L., Wei, Y., and DebRoy, T., "Fusion zone geometries, cooling rates and solidification parameters during wire arc additive manufacturing", *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 127: 1084–1094 (2018).
72. Fuchs, J., Schneider, C., and Enzinger, N., "Wire-based additive manufacturing using an electron beam as heat source", *Welding In The World*, 62 (2): 267–275 (2018).
73. Yuan, T., Yu, Z., Chen, S., Xu, M., and Jiang, X., "Loss of elemental Mg during wire + arc additive manufacturing of Al-Mg alloy and its effect on mechanical properties", *Journal Of Manufacturing Processes*, 49: 456–462 (2020).
74. Palani, P. K. and Murugan, N., "Selection of parameters of pulsed current gas metal arc welding", *Journal Of Materials Processing Technology*, 172 (1): 1–10 (2006).
75. Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., and Frei, H., "Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure", *Additive Manufacturing*, 26: 138–146 (2019).
76. Zhou, Y., Lin, X., Kang, N., Huang, W., Wang, J., and Wang, Z., "Influence of travel speed on microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured 2219 aluminum alloy", *Journal Of Materials Science & Technology*, 37: 143–153 (2020).
77. Ou, W., Wei, Y., Liu, R., Zhao, W., and Cai, J., "Determination of the control points for circle and triangle route in wire arc additive manufacturing (WAAM)", *Journal Of Manufacturing Processes*, 53: 84–98 (2020).
78. Shen, C., Pan, Z., Cuiuri, D., van Duin, S., Luo, D., Dong, B., and Li, H., "Influences of postproduction heat treatment on Fe₃Al-based iron aluminide fabricated using the wire-arc additive manufacturing process", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 97 (1–4): 335–344 (2018).
79. Chowdhury, S., Nirsanametla, Y., Muralidhar, M., Bag, S., and Patra, S. K., "Influence of weld parameters on weld regimes and vaporization rate in electron beam welding of Ti6Al4V alloy", *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 41 (4): 180 (2019).
80. Zhu, Z., Dhokia, V., Nassehi, A., and Newman, S. T., "Investigation of part distortions as a result of hybrid manufacturing", *Robotics And Computer-Integrated Manufacturing*, 37: 23–32 (2016).
81. Somashekara, M. A., Naveenkumar, M., Kumar, A., Viswanath, C., and Simhambhatla, S., "Investigations into effect of weld-deposition pattern on

- residual stress evolution for metallic additive manufacturing", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 90 (5–8): 2009–2025 (2017).
82. Bannour, S., Abderrazak, K., Mhiri, H., and Le Palec, G., "Effects of temperature-dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy", *Optics & Laser Technology*, 44 (8): 2459–2468 (2012).
 83. Waqas, A., Qin, X., Xiong, J., Wang, H., and Zheng, C., "Optimization of process parameters to improve the effective area of deposition in GMAW-based additive manufacturing and its mechanical and microstructural analysis", *Metals*, 9 (7): 775 (2019).
 84. Raut, L. P. and Taiwade, R. V., "Wire arc additive manufacturing: a comprehensive review and research directions", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (7): 4768–4791 (2021).
 85. Kah, P. and Martikainen, J., "Influence of shielding gases in the welding of metals", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 64 (9–12): 1411–1421 (2013).
 86. Zhao, Y., Shi, X., Yan, K., Wang, G., Jia, Z., and He, Y., "Effect of shielding gas on the metal transfer and weld morphology in pulsed current MAG welding of carbon steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 262: 382–391 (2018).
 87. Mvola, B. and Kah, P., "Effects of shielding gas control: Welded joint properties in GMAW process optimization", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 88 (9–12): 2369–2387 (2017).
 88. Hu, Y., Xue, J., Dong, C., Jin, L., and Zhang, Z., "Effect of additional shielding gas on welding seam formation during twin wire DP-MIG high-speed welding", *Applied Sciences*, 8 (9): 1658 (2018).
 89. Bitharas, I., McPherson, N. A., McGhie, W., Roy, D., and Moore, A. J., "Visualisation and optimisation of shielding gas coverage during gas metal arc welding", *Journal Of Materials Processing Technology*, 255: 451–462 (2018).
 90. Agius, D., Kourousis, K., and Wallbrink, C., "A review of the as-built SLM Ti-6Al-4V mechanical properties towards achieving fatigue resistant designs", *Metals*, 8 (1): 75 (2018).
 91. Cunningham, C. R., Wikshåland, S., Xu, F., Kemakolam, N., Shokrani, A., Dhokia, V., and Newman, S. T., "Cost modelling and sensitivity analysis of wire and arc additive manufacturing", *Procedia Manufacturing*, 11: 650–657 (2017).
 92. Cai, X., Fan, C., Lin, S., Ji, X., Yang, C., and Guo, W., "Effects of shielding gas composition on arc properties and wire melting characteristics in narrow gap MAG welding", *Journal Of Materials Processing Technology*, 244: 225–230 (2017).

93. Cai, X., Fan, C., Lin, S., Yang, C., Ji, X., and Hu, L., "Effects of shielding gas composition on arc characteristics and droplet transfer in tandem narrow gap GMA welding", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 22 (5): 446–453 (2017).
94. John, B., Paulraj, S., and Mathew, J., "The role of shielding gas on mechanical, metallurgical and corrosion properties of corten steel welded joints of railway coaches using GMAW", *Advances In Science And Technology Research Journal*, 10 (32): 156–168 (2016).
95. Bradáč, J. and Moravec, J., "The impact of selected processes and technological parameters on the geometry of the weld pool when welding in shields gas atmosphere", *Acta Polytechnica*, 57 (2): 78 (2017).
96. Ahsan, Md. R. U., Tanvir, A. N. M., Ross, T., Elsayy, A., Oh, M.-S., and Kim, D. B., "Fabrication of bimetallic additively manufactured structure (BAMS) of low carbon steel and 316L austenitic stainless steel with wire + arc additive manufacturing", *Rapid Prototyping Journal*, 26 (3): 519–530 (2019).
97. Ahsan, Md. R. U., Tanvir, A. N. M., Seo, G.-J., Bates, B., Hawkins, W., Lee, C., Liaw, P. K., Noakes, M., Nycz, A., and Kim, D. B., "Heat-treatment effects on a bimetallic additively-manufactured structure (BAMS) of the low-carbon steel and austenitic-stainless steel", *Additive Manufacturing*, 32: 101036 (2020).
98. Gülcan, O., Şimşek, U., ve Kavas, B., "Eklemeli imalatla üretilen işlevsel olarak derecelendirilmiş metal yapılar", *Mühendis Ve Makina*, 62 (702): 1–22 (2021).
99. Wang, J., Pan, Z., Ma, Y., Lu, Y., Shen, C., Cuiuri, D., and Li, H., "Characterization of wire arc additively manufactured titanium aluminide functionally graded material: Microstructure, mechanical properties and oxidation behaviour", *Materials Science And Engineering: A*, 734: 110–119 (2018).
100. Chandrasekaran, S., Hari, S., and Amirthalingam, M., "Wire arc additive manufacturing of functionally graded material for marine risers", *Materials Science And Engineering: A*, 792: 139530 (2020).
101. Chen, X., Han, J., Wang, J., Cai, Y., Zhang, G., Lu, L., Xin, Y., and Tian, Y., "A functionally graded material from TC4 to 316L stainless steel fabricated by double-wire + arc additive manufacturing", *Materials Letters*, 300: 130141 (2021).
102. Treutler, K., Kamper, S., Leicher, M., Bick, T., and Wesling, V., "Multi-material design in welding arc additive manufacturing", *Metals*, 9 (7): 809 (2019).
103. Marinelli, G., Martina, F., Lewtas, H., Hancock, D., Ganguly, S., and Williams, S., "Functionally graded structures of refractory metals by wire arc additive manufacturing", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 24 (5): 495–503 (2019).

104. Yin, S., Yan, X., Chen, C., Jenkins, R., Liu, M., and Lupoi, R., "Hybrid additive manufacturing of Al-Ti6Al4V functionally graded materials with selective laser melting and cold spraying", *Journal Of Materials Processing Technology*, 255: 650–655 (2018).
105. Meng, W., Xiaohui, Y., Zhang, W., Junfei, F., Lijie, G., Qunshuang, M., and Bing, C., "Additive manufacturing of a functionally graded material from Inconel625 to Ti6Al4V by laser synchronous preheating", *Journal Of Materials Processing Technology*, 275: 116368 (2020).
106. Su, Y., Chen, B., Tan, C., Song, X., and Feng, J., "Influence of composition gradient variation on the microstructure and mechanical properties of 316 L/Inconel718 functionally graded material fabricated by laser additive manufacturing", *Journal Of Materials Processing Technology*, 283: 116702 (2020).
107. Ansari, M., Jabari, E., and Toyserkani, E., "Opportunities and challenges in additive manufacturing of functionally graded metallic materials via powder-fed laser directed energy deposition: A review", *Journal Of Materials Processing Technology*, 294: 117117 (2021).
108. Wei, C. and Li, L., "Recent progress and scientific challenges in multi-material additive manufacturing via laser-based powder bed fusion", *Virtual And Physical Prototyping*, 16 (3): 347–371 (2021).
109. Yan, L., Chen, Y., and Liou, F., "Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition", *Additive Manufacturing*, 31: 100901 (2020).
110. Rajesh Kannan, A., Mohan Kumar, S., Pravin Kumar, N., Siva Shanmugam, N., Vishnu, A. S., and Palguna, Y., "Process-microstructural features for tailoring fatigue strength of wire arc additive manufactured functionally graded material of SS904L and Hastelloy C-276", *Materials Letters*, 274: 127968 (2020).
111. Popovich, V. A., Borisov, E. V., Popovich, A. A., Sufiiarov, V. Sh., Masaylo, D. V., and Alzina, L., "Functionally graded Inconel 718 processed by additive manufacturing: Crystallographic texture, anisotropy of microstructure and mechanical properties", *Materials & Design*, 114: 441–449 (2017).
112. Loh, G. H., Pei, E., Harrison, D., and Monzón, M. D., "An overview of functionally graded additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, 23: 34–44 (2018).
113. Bandyopadhyay, A. and Heer, B., "Additive manufacturing of multi-material structures", *Materials Science And Engineering: R: Reports*, 129: 1–16 (2018).
114. Geng, Y., Phelan, B., Raghavendra, R., and Harrison, N., "Single-step process of microstructural functionally graded Ti6Al4V by laser powder bed fusion additive manufacturing", *Welding In The World*, 64: 1357-1366 (2020).

115. Budynas, R. G. and Nisbett, J. K., "Shigley's Mechanical Engineering Design", 9th ed. Ed., **McGraw-Hill**, New York, 266-267 (2011).
116. Callister, W. D., Rethwisch, D. D., Genel, K., Bindal, C., Demirkol, M., Artır, R., Bakkal, M., Parasız, S. A., Argun, N., Aydemir, T., Aslan, T., ve Özen, S. P., "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği = Materials Science and Engineering", 255 (2014).
117. Gören, Ş., "The effects of heat treatment on microstructure, hardness and fatigue behavior of (AMS5659) 15-5 precipitation hardenable stainless steel", Doktora Tezi, **The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University**, Ankara, 28 (2018).
118. Saygın, M., "AISI 1020 çeliklerinde borlamanın yorulma dayanımına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, **Osmangazi Üniversitesi**, Eskişehir, 6-9 (2006).
119. Kızgın, M., "Küresel grafitli dökme demir (GGG50) malzemeye bakır ihtivasının yorulma dayanımına etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 20-21 (2021).
120. Turan, M. Y., "Mekanik yüzey işlemlerinin malzemelerin yorulma davranışına etkisi", Yüksek Lisans Tezi, **Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 33-34 (2011).
121. Çelebi, G., "Design and implementation of a fatigue testing machine for welded parts", Yüksek Lisans Tezi, **The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Çankaya University**, Ankara, 11-12 (2020).
122. Akkuş, A., "Galvanizli ve östenitik paslanmaz çelik sacların nokta kaynaklı bağlantılarının yorulma dayanımlarının araştırılması", Doktora Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 26-28 (2006).
123. Vaezi, M., Drescher, P., and Seitz, H., "Beamless metal additive manufacturing", **Materials**, 13 (4): 922 (2020).
124. Uğla, Adnan A., A.-O., "Experimental investigation of shaped metal deposition process by pulsed TIG-wire technique", Doktora Tezi, **University Of Gaziantep Graduate School Of Natural & Applied Sciences**, Gaziantep, (2016).
125. Keskin, Ö. Ö., "Investigation of cylindrical part manufacturing by shaped metal deposition", Yüksek Lisans Tezi, **University Of Gaziantep Graduate School Of Natural & Applied Sciences**, Gaziantep, (2016).
126. Atalay, Y., "Hybrid additive manufacturing by shaped metal deposition", Yüksek Lisans Tezi, **University Of Gaziantep Graduate School Of Natural & Applied Sciences**, Gaziantep, (2020).
127. Yıldız, A. S., "Tel beslemeli ark ergitmeli eklemeli imalat yöntemiyle üretilen parçaların ısıl davranış, geometrik, mekanik ve metalürjik özelliklerinin araştırılması", Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (2020).

128. Yeşildağ, İ., "Düşük alaşımlı çelikten tel ark eklemeli imalat ile üretilen bir parçanın mekanik özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi*, Karabük, (2020).
129. Bayar, İ., "Plazma tel ark katmanlı imalat yöntemi ile malzeme üretimi ve mekanik özelliklerinin araştırılması", Doktora Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, (2021).
130. Vazquez, L., Rodriguez, M. N., Rodriguez, I., and Alvarez, P., "Influence of post-deposition heat treatments on the microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V parts manufactured by CMT-WAAM", *Metals*, 11 (8): 1161 (2021).
131. Zhuo, Y., Yang, C., Fan, C., and Lin, S., "Grain morphology evolution mechanism of titanium alloy by the combination of pulsed arc and solution element during wire arc additive manufacturing", *Journal Of Alloys And Compounds*, 888: 161641 (2021).
132. Attar, H., Bermingham, M. J., Ehtemam-Haghighi, S., Dehghan-Manshadi, A., Kent, D., and Dargusch, M. S., "Evaluation of the mechanical and wear properties of titanium produced by three different additive manufacturing methods for biomedical application", *Materials Science And Engineering: A*, 760: 339–345 (2019).
133. Zhuo, Y., Yang, C., Fan, C., and Lin, S., "Effect of diameter and content of zirconium dioxide on the microstructure and mechanical properties of the TC17 titanium alloy repaired by wire arc additive manufacture", *Journal Of Alloys And Compounds*, 893: 162295 (2022).
134. Zhang, G., Chen, X., Cai, Y., Lu, L., Xin, Y., Jia, D., Tian, Y., and Han, J., "Microstructure and mechanical properties of Ti-3Al-2V alloy by dual wire + arc additive manufacturing", *Materials Letters*, 299: 130109 (2021).
135. Palmeira Belotti, L., van Dommelen, J. A. W., Geers, M. G. D., Goulas, C., Ya, W., and Hoefnagels, J. P. M., "Microstructural characterisation of thick-walled wire arc additively manufactured stainless steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 299: 117373 (2022).
136. Uгла, A. A. and Yilmaz, O., "Deposition-path generation of SS308 components manufactured by tig welding-based shaped metal deposition process", *Arabian Journal For Science And Engineering*, 42 (11): 4701–4711 (2017).
137. Khaudair, H. J., Uгла, A. A., and Almusawi, A. R. J., "Effect of double wire cold feed on characteristics of additive manufactured components", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (9): 6801–6807 (2021).
138. Lunde, J., Kazemipour, M., Salahi, S., and Nasiri, A., "Wire arc additive manufacturing of AISI 420 martensitic stainless steel: on as-printed microstructure and mechanical properties", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30: 9181-9191 (2021).

139. Duraisamy, R., Kumar, S. M., Kannan, A. R., Shanmugam, N. S., and Sankaranarayanan, K., "Fatigue behavior of austenitic stainless steel 347 fabricated via wire arc additive manufacturing", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (9): 6844–6850 (2021).
140. Rajesh Kannan, A., Siva Shanmugam, N., Rajkumar, V., and Vishnukumar, M., "Insight into the microstructural features and corrosion properties of wire arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594)", *Materials Letters*, 270: 127680 (2020).
141. Zhu, B., Lin, J., Lei, Y., Zhang, Y., Sun, Q., and Cheng, S., "Additively manufactured δ -ferrite-free 410 stainless steel with desirable performance", *Materials Letters*, 293: 129579 (2021).
142. Yang, L., Lu, W., Liu, Z., Zhang, Y., Xu, F., Gao, H., and Yao, Z., "Location-dependent microstructure and properties for plasma arc additively manufactured duplex stainless steel ER2209 wire", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (9): 6788–6800 (2021).
143. Lyu, Z., Sato, Y. S., Tokita, S., Zhao, Y., Jia, J., and Wu, A., "Microstructural distribution and anisotropic tensile behavior in a 2Cr13 martensitic stainless steel thin wall fabricated by wire arc additive manufacturing", *Materials Today Communications*, 29: 102870 (2021).
144. Rodrigues, T. A., Duarte, V., Avila, J. A., Santos, T. G., Miranda, R. M., and Oliveira, J. P., "Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties", *Additive Manufacturing*, 27: 440–450 (2019).
145. Xiaowei, W., Dongqing, Y., Yong, H., Qi, Z., Jikang, F., and Kehong, W., "Microstructure and mechanical properties of as-deposited and heat-treated 18Ni (350) maraging steel fabricated by gas metal arc-based wire and arc additive manufacturing", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (9): 6972–6981 (2021).
146. Hu, Q., Miao, J., Wang, X., Li, C., and Fang, K., "Microstructure and properties of ER50-6 steel fabricated by wire arc additive manufacturing", *Scanning*, 2021: 1–8 (2021).
147. Li, X., Lin, J., Xia, Z., Zhang, Y., and Fu, H., "Influence of deposition patterns on distortion of H13 steel by wire-arc additive manufacturing", *Metals*, 11 (3): 485 (2021).
148. Haden, C. V., Zeng, G., Carter, F. M., Ruhl, C., Krick, B. A., and Harlow, D. G., "Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties", *Additive Manufacturing*, 16: 115–123 (2017).
149. Langelandsvik, G., Eriksson, M., Akselsen, O. M., and Roven, H. J., "Wire arc additive manufacturing of AA5183 with TiC nanoparticles", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 119: 1047-1058 (2021).

150. Li, S., Zhang, L.-J., Ning, J., Wang, X., Zhang, L.-L., Long, J., Zhou, X.-R., and Na, S.-J., "Microstructures and properties of wire-arc additively manufactured 5356 aluminium alloy protected by different proportions of nitrogen and argon", *Journal Of Materials Science*, 56 (31): 17785–17804 (2021).
151. Köhler, M., Sun, L., Hensel, J., Pallaspuuro, S., Kömi, J., Dilger, K., and Zhang, Z., "Comparative study of deposition patterns for DED-Arc additive manufacturing of Al-4046", *Materials & Design*, 210: 110122 (2021).
152. Zhang, Z., Ma, Z., He, S., Song, G., and Liu, L., "Effect of laser power on the microstructure and mechanical properties of 2319-al fabricated by wire-based additive manufacturing", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (9): 6640–6649 (2021).
153. Ortega, A. G., Corona Galvan, L., Salem, M., Moussaoui, K., Segonds, S., Rouquette, S., and Deschaux-Beaume, F., "Characterisation of 4043 aluminium alloy deposits obtained by wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 24 (6): 538–547 (2019).
154. Ying, T., Zhao, Z., Yan, P., Wang, J., and Zeng, X., "Effect of fabrication parameters on the microstructure and mechanical properties of wire arc additive manufactured AZ61 alloy", *Materials Letters*, 307: 131014 (2022).
155. Bi, J., Shen, J., Hu, S., Zhen, Y., Yin, F., and Bu, X., "Microstructure and mechanical properties of AZ91 Mg alloy fabricated by cold metal transfer additive manufacturing", *Materials Letters*, 276: 128185 (2020).
156. Wang, P., Zhang, H., Zhu, H., Li, Q., and Feng, M., "Wire-arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy fabricated by cold metal transfer heat source: Processing, microstructure, and mechanical behavior", *Journal Of Materials Processing Technology*, 288: 116895 (2021).
157. Guo, Y., Pan, H., Ren, L., and Quan, G., "Microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured AZ80M magnesium alloy", *Materials Letters*, 247: 4–6 (2019).
158. Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S., and Williams, S., "Development of Wire + Arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 82: 329–335 (2019).
159. Lan, B., Wang, Y., Liu, Y., Hooper, P., Hopper, C., Zhang, G., Zhang, X., and Jiang, J., "The influence of microstructural anisotropy on the hot deformation of wire arc additive manufactured (WAAM) Inconel 718", *Materials Science And Engineering: A*, 823: 141733 (2021).
160. Zhang, L., Qi, L., Deng, S., Oguntuase, O., Deng, T., Wang, H., and Ojo, O. A., "Analyses of anodically formed passive film and corrosion behavior of wire-arc additive manufactured ATI 718Plus® superalloy", *Additive Manufacturing*, 48: 102443 (2021).

161. Qiu, Z., Dong, B., Wu, B., Wang, Z., Carpenter, K., Wu, T., Zhang, J., Wexler, D., Zhu, H., and Li, H., "Tailoring the surface finish, dendritic microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured Hastelloy C276 alloy by magnetic arc oscillation", *Additive Manufacturing*, 48: 102397 (2021).
162. Zhao, X., Di, X., Zhang, X., and Li, C., "Improvement in corrosion resistance of wire arc additive manufactured Inconel 625 alloy through heat treatment", *Materials Research Express*, 8 (6): 066529 (2021).
163. Bharat Kumar, C. H. and Anandkrishnan, V., "Experimental investigations on the effect of wire arc additive manufacturing process parameters on the layer geometry of Inconel 825", *Materials Today: Proceedings*, 21: 622–627 (2020).
164. Rajeev, G. P., Rahul, M. R., Kamaraj, M., and Bakshi, S. R., "Microstructure and high temperature mechanical properties of wire arc additively deposited stellite 6 alloy", *Materialia*, 12: 100724 (2020).
165. Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S., and Williams, S., "Grain refinement in an unalloyed tantalum structure by combining wire+arc additive manufacturing and vertical cold rolling", *Additive Manufacturing*, 32: 101009 (2020).
166. Yu, L., Chen, K., Zhang, Y., Liu, J., Yang, L., and Shi, Y., "Microstructures and mechanical properties of NiTi shape memory alloys fabricated by wire arc additive manufacturing", *Journal Of Alloys And Compounds*, 892: 162193 (2022).
167. Sun, L., Jiang, F., Huang, R., Yuan, D., Guo, C., and Wang, J., "Microstructure and mechanical properties of low-carbon high-strength steel fabricated by wire and arc additive manufacturing", *Metals*, 10 (2): 216 (2020).
168. Wang, J., Cui, Y., Liu, C., Li, Z., Wu, Q., and Fang, D., "Understanding internal defects in Mo fabricated by wire arc additive manufacturing through 3D computed tomography", *Journal Of Alloys And Compounds*, 840: 155753 (2020).
169. Jurić, I., Garašić, I., Bušić, M., and Kožuh, Z., "Influence of shielding gas composition on structure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Inconel 625", *JOM*, 71 (2): 703–708 (2019).
170. Su, C. and Chen, X., "Effect of depositing torch angle on the first layer of wire arc additive manufacture using cold metal transfer (CMT)", *Industrial Robot: The International Journal Of Robotics Research And Application*, 46 (2): 259–266 (2019).
171. Fu, R., Tang, S., Lu, J., Cui, Y., Li, Z., Zhang, H., Xu, T., Chen, Z., and Liu, C., "Hot-wire arc additive manufacturing of aluminum alloy with reduced porosity and high deposition rate", *Materials & Design*, 199: 109370 (2021).
172. Wu, W., Xue, J., and Yao, P., "A comparative study on single- and double-arc deposition processes", *Materials And Manufacturing Processes*, 35 (3): 346–353 (2020).

173. Gudur, S., Nagallapati, V., Pawar, S., Muvvala, G., and Simhambhatla, S., "A study on the effect of substrate heating and cooling on bead geometry in wire arc additive manufacturing and its correlation with cooling rate", *Materials Today: Proceedings*, 41: 431–436 (2021).
174. Yu, Z., Yuan, L., He, F., Ding, D., Polden, J., and Pan, Z., "The strategy for fabricating wire-structure parts using robotic skeleton arc additive manufacturing", *2019 IEEE 9th Annual International Conference On CYBER Technology In Automation, Control, And Intelligent Systems (CYBER)*, Suzhou, China, 119–124 (2019).
175. Li, X., Han, Q., and Zhang, G., "Large-size sprocket repairing based on robotic GMAW additive manufacturing", *Welding In The World*, 65 (5): 793–805 (2021).
176. Ayan, Y., Sarı, E., and Kahraman, N., "3B metal yazıcı kullanılarak MIG-MAG kaynak yöntemi ile tamir-onarım kaynak uygulamasına bir örnek", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 6 (4): 1190–1199 (2018).
177. Xiaolong, C., Zulei, L., Yanhua, G., Zhonggang, S., Yaoqi, W., and Lian, Z., "A study on the grain refinement mechanism of Ti-6Al-4V alloy produced by wire arc additive manufacturing using hydrogenation treatment processes", *Journal Of Alloys And Compounds*, 890: 161634 (2022).
178. Ayan, Y. and Kahraman, N., "Yapı çeliğinin TIG eklemeli imalatı için parametrik bir çalışma", *5th International Iron & Steel Symposium (UDCS'21)*, Karabük, Türkiye, 266-269 (2021).
179. Corradi, D. R., Coelho, F. G., Antonello, M. G., Bracarense, A. Q., Arias, A. R., and Barbosa, T. P., "The influence of magnetic arc oscillation on the deposition width variation along the length of multi-layer single-pass walls produced by wire arc additive manufacturing process", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (7): 5278–5289 (2021).
180. Tang, F., Luo, Y., Cai, Y., Yang, S., Zhang, F., and Peng, Y., "Arc length identification based on arc acoustic signals in GTA-WAAM process", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 118: 1553-1563 (2021).
181. Xiong, J., Zhang, Y., and Pi, Y., "Control of deposition height in WAAM using visual inspection of previous and current layers", *Journal Of Intelligent Manufacturing*, 32 (8): 2209–2217 (2021).
182. Wang, Y., Xu, X., Zhao, Z., Deng, W., Han, J., Bai, L., Liang, X., and Yao, J., "Coordinated monitoring and control method of deposited layer width and reinforcement in WAAM process", *Journal Of Manufacturing Processes*, 71: 306–316 (2021).
183. Halisch, C., Radel, T., Tyralla, D., and Seefeld, T., "Measuring the melt pool size in a wire arc additive manufacturing process using a high dynamic range two-colored pyrometric camera", *Welding In The World*, 64 (8): 1349–1356 (2020).

184. Xiong, J., Yin, Z., and Zhang, W., "Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 87 (1–4): 579–586 (2016).
185. Zhang, C., Gao, M., and Zeng, X., "Workpiece vibration augmented wire arc additive manufacturing of high strength aluminum alloy", *Journal Of Materials Processing Technology*, 271: 85–92 (2019).
186. Wang, Y., Chen, X., Shen, Q., Su, C., Zhang, Y., Jayalakshmi, S., and Singh, R. A., "Effect of magnetic Field on the microstructure and mechanical properties of inconel 625 superalloy fabricated by wire arc additive manufacturing", *Journal Of Manufacturing Processes*, 64: 10–19 (2021).
187. Fang Li, Shujun Chen, Junbiao Shi, Yun Zhao, and Hongyu Tian, "Thermoelectric cooling-aided bead geometry regulation in wire and arc-based additive manufacturing of thin-walled structures", *Applied Sciences*, 8 (2): 207 (2018).
188. Singh, S., Jinoop, A. N., Palani, I. A., Paul, C. P., Tomar, K. P., and Prashanth, K. G., "Microstructure and mechanical properties of NiTi-SS bimetallic structures built using wire arc additive manufacturing", *Materials Letters*, 303: 130499 (2021).
189. Zhang, M., Zhang, Y., Du, M., Zhang, S., and Lei, L., "Experimental characterization and microstructural evaluation of silicon bronze-alloy steel bimetallic structures by additive manufacturing", *Metallurgical And Materials Transactions A*, 52 (10): 4664–4674 (2021).
190. Reisgen, U., Sharma, R., and Oster, L., "Plasma multiwire technology with alternating wire feed for tailor-made material properties in wire and arc additive manufacturing", *Metals*, 9 (7): 745 (2019).
191. Mohan Kumar, S., Rajesh Kannan, A., Pravin Kumar, N., Pramod, R., Siva Shanmugam, N., Vishnu, A. S., and Channabasavanna, S. G., "Microstructural features and mechanical integrity of wire arc additive manufactured SS321/Inconel 625 functionally gradient material", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (8): 5692–5703 (2021).
192. Sridar, S., Klecka, M. A., and Xiong, W., "Interfacial characteristics of P91 steel - Inconel 740H bimetallic structure fabricated using wire-arc additive manufacturing", *Journal Of Materials Processing Technology*, 300: 117396 (2022).
193. Xiong, X., Qin, X., Ji, F., Hu, Z., and Hua, L., "Microstructure and mechanical properties of wire + arc additively manufactured mild steel by welding with trailing hammer peening", *Steel Research International*, 92 (11): 2100238 (2021).
194. Yang, Y., Jin, X., Liu, C., Xiao, M., Lu, J., Fan, H., and Ma, S., "Residual stress, mechanical properties, and grain morphology of Ti-6Al-4V alloy produced by

- ultrasonic impact treatment assisted wire and arc additive manufacturing", *Metals*, 8 (11): 934 (2018).
195. Zhang, T., Li, H., Gong, H., Ding, J., Wu, Y., Diao, C., Zhang, X., and Williams, S., "Hybrid wire - arc additive manufacture and effect of rolling process on microstructure and tensile properties of Inconel 718", *Journal Of Materials Processing Technology*, 299: 117361 (2022).
 196. Colegrove, P. A., Martina, F., Roy, M. J., Szost, B. A., Terzi, S., Williams, S. W., Withers, P. J., and Jarvis, D., "High pressure interpass rolling of wire + arc additively manufactured titanium components", *Advanced Materials Research*, 996: 694–700 (2014).
 197. Ma, C., Liu, Y., Li, C., Dong, H., Li, D., Wu, X., Liu, P., Sun, Q., Jin, H., and Zhang, F., "Mechanical properties of carbon steel by compound arc and vibration shock forging-rolling", *Journal Of Manufacturing Processes*, 60: 11–22 (2020).
 198. Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, J., and Berto, F., "Fatigue crack growth behaviour of wire and arc additively manufactured ER70S-6 low carbon steel components", *International Journal Of Fracture*, (2021).
 199. Ron, T., Levy, G. K., Dolev, O., Leon, A., Shirizly, A., and Aghion, E., "The effect of microstructural imperfections on corrosion fatigue of additively manufactured ER70S-6 alloy produced by wire arc deposition", *Metals*, 10 (1): 98 (2020).
 200. Syed, A. K., Zhang, X., Caballero, A., Shamir, M., and Williams, S., "Influence of deposition strategies on tensile and fatigue properties in a wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V", *International Journal Of Fatigue*, 149: 106268 (2021).
 201. Wang, X., Zhao, Y., Wang, L., Wei, L., He, J., and Guan, X., "In-situ SEM investigation and modeling of small crack growth behavior of additively manufactured titanium alloy", *International Journal Of Fatigue*, 149: 106303 (2021).
 202. Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., and Antonysamy, A. A., "Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V", *Metallurgical And Materials Transactions A*, 44 (2): 968–977 (2013).
 203. Dirisu, P., Supriyo, G., Martina, F., Xu, X., and Williams, S., "Wire plus arc additive manufactured functional steel surfaces enhanced by rolling", *International Journal Of Fatigue*, 130: 105237 (2020).
 204. İnternet: Magmaweld, "MG2", <https://www.magmaweld.com.tr/elektrod-tel-toz/gazalti-mig-mag-telleri/alasimsiz-celikler/mg-2/uo/mg-2> (2021).
 205. İnternet: Magmaweld, "MI 308LSi", <https://www.magmaweld.com.tr/elektrod-tel-toz/gazalti-mig-mag-telleri/paslanmaz-celikler/mi-308lsi/uo/mi-308lsi> (2021).

206. Ron, Levy, Dolev, Leon, Shirizly, and Aghion, "Environmental behavior of low carbon steel produced by a wire arc additive manufacturing process", *Metals*, 9 (8): 888 (2019).
207. Abe, T. and Sasahara, H., "Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing", *Precision Engineering*, 45: 387–395 (2016).
208. Tonelli, L., Sola, R., Laghi, V., Palermo, M., Trombetti, T., and Ceschini, L., "Influence of interlayer forced air cooling on microstructure and mechanical properties of wire arc additively manufactured 304L austenitic stainless steel", *Steel Research International*, 92 (11): 2100175 (2021).
209. Aydın, A., "Sürtünme karıştırma kaynağı (FSW) ile kaynak edilmiş alüminyum alaşımlarının yorulma ömrünün artırılması", Doktora Tezi, *Dokuz Eylül Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 106-107 (2017).
210. Kumru, N., "ETİAL-141, 145 ve 160 Tipi döküm alüminyum ile plaka tipi alüminyum malzemeler için yorulma makinası tasarımı ve eğilmeli yorulma davranışlarının incelenmesi", Doktora Tezi, *Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 77 (2007).
211. Rafieazad, M., Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., and Nasiri, A., "Microstructural evolution and mechanical properties of a low-carbon low-alloy steel produced by wire arc additive manufacturing", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 105 (5–6): 2121–2134 (2019).
212. Waqas, A., Qin, X., Xiong, J., Zheng, C., and Wang, H., "Analysis of ductile fracture obtained by charpy impact test of a steel structure created by robot-assisted GMAW-based additive manufacturing", *Metals*, 9 (11): 1208 (2019).
213. Ayan, Y. and Kahraman, N., "Wire arc additive manufacturing of low-carbon mild steel using two different 3D printers", *Physics Of Metals And Metallography*, 122: 1521-1529 (2021).
214. Dirisu, P., Ganguly, S., Mehmanparast, A., Martina, F., and Williams, S., "Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components", *Materials Science And Engineering: A*, 765: 138285 (2019).
215. Le, V. T. and Paris, H., "On the use of gas-metal-arc-welding additive manufacturing for repurposing of low-carbon steel components: microstructures and mechanical properties", *Welding In The World*, 65 (1): 157–166 (2021).
216. Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevecchi, F., Venturini, G., Durante, M., Boccarusso, L., Minutolo, F. M. C., and Squillace, A., "Selection of optimal process parameters for wire arc additive manufacturing", *Procedia CIRP*, 62: 470–474 (2017).

217. Waqas, A., Xiansheng, Q., Jiangtao, X., Chaoran, Y., and Fan, L., "Impact toughness of components made by GMAW based additive manufacturing", *Procedia Structural Integrity*, 13: 2065–2070 (2018).
218. Le, V. T., Mai, D. S., Doan, T. K., and Paris, H., "Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 24 (4): 1015–1026 (2021).
219. Ke, Y. and Xiong, J., "Microstructure and mechanical properties of double-wire feed GTA additive manufactured 308L stainless steel", *Rapid Prototyping Journal*, 26 (9): 1503–1513 (2020).
220. Zhang, X., Wang, K., Zhou, Q., Ding, J., Ganguly, S., Marzio, G., Yang, D., Xu, X., Dirisu, P., and Williams, S. W., "Microstructure and mechanical properties of TOP-TIG-wire and arc additive manufactured super duplex stainless steel (ER2594)", *Materials Science And Engineering: A*, 762: 138097 (2019).
221. Li, Y., Luo, Y., Li, J., Song, D., Xu, B., and Chen, X., "Ferrite formation and its effect on deformation mechanism of wire arc additive manufactured 308 L stainless steel", *Journal Of Nuclear Materials*, 550: 152933 (2021).
222. Le, V. T. and Mai, D. S., "Microstructural and mechanical characteristics of 308L stainless steel manufactured by gas metal arc welding-based additive manufacturing", *Materials Letters*, 271: 127791 (2020).
223. Gordon, J. V., Haden, C. V., Nied, H. F., Vinci, R. P., and Harlow, D. G., "Fatigue crack growth anisotropy, texture and residual stress in austenitic steel made by wire and arc additive manufacturing", *Materials Science And Engineering: A*, 724: 431–438 (2018).
224. Mittal, R. and Sidhu, B. S., "Microstructures and mechanical properties of dissimilar T91/347H steel weldments", *Journal Of Materials Processing Technology*, 220: 76–86 (2015).
225. Arivazhagan, N., Singh, S., Prakash, S., and Reddy, G. M., "Investigation on AISI 304 austenitic stainless steel to AISI 4140 low alloy steel dissimilar joints by gas tungsten arc, electron beam and friction welding", *Materials & Design*, 32 (5): 3036–3050 (2011).
226. Elmer, J. W., Gibbs, G., Carpenter, J. S., Coughlin, D. R., Hochanadel, P., Vaja, J., Gurung, P., Johnson, A., and Dvornak, M. J., "Wire-based additive manufacturing of stainless steel components", *Welding Journal*, 99 (1): 8–24 (2020).
227. Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., and Nasiri, A., "On the post-printing heat treatment of a wire arc additively manufactured ER70S part", *Materials*, 13 (12): 2795 (2020).
228. Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., and Lamikiz, A., "High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on

- microstructure and mechanical properties", *Journal Of Manufacturing Processes*, 58: 615–626 (2020).
229. Lu, L., Tian, Y., Cai, Y., Xin, Y., Chen, X., Zhang, G., and Han, J., "Microstructure and mechanical properties of a functionally graded material from TA1 to Inconel 625 fabricated by dual wire + arc additive manufacturing", *Materials Letters*, 298: 130010 (2021).
 230. Sędek, P., Brózda, J., Wang, L., and Withers, P. J., "Residual stress relief in MAG welded joints of dissimilar steels", *International Journal Of Pressure Vessels And Piping*, 80 (10): 705–713 (2003).
 231. Muterlle, P., Zendron, M., and Molinari, A., "Influence of delta ferrite on mechanical properties stainless steel produced by MIM", *20th International Congress of Mechanical Engineering*, Brazil, (2009).
 232. Kulkarni, A., Dwivedi, D. K., and Vasudevan, M., "Dissimilar metal welding of P91 steel-AISI 316L SS with Incoloy 800 and Inconel 600 interlayers by using activated TIG welding process and its effect on the microstructure and mechanical properties", *Journal Of Materials Processing Technology*, 274: 116280 (2019).
 233. İnternet: The World Material, "1.0037 Material St37-2 Steel Equivalent, Properties, Composition, DIN 17100", <https://www.theworldmaterial.com/1-0037-material-st37-steel-din-17100/> (2021).
 234. Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., and Nasiri, A., "Effect of solidification defects and HAZ softening on the anisotropic mechanical properties of a wire arc additive-manufactured low-carbon low-alloy steel part", *JOM*, 71 (11): 4215–4224 (2019).
 235. Ermakova, A., Mehmanparast, A., Ganguly, S., Razavi, J., and Berto, F., "Investigation of mechanical and fracture properties of wire and arc additively manufactured low carbon steel components", *Theoretical And Applied Fracture Mechanics*, 109: 102685 (2020).
 236. Zhong, Y., Zheng, Z., Li, J., and Wang, C., "Fabrication of 316L nuclear nozzles on the main pipeline with large curvature by CMT wire arc additive manufacturing and self-developed slicing algorithm", *Materials Science And Engineering: A*, 820: 141539 (2021).
 237. Yang, D., Fang, H., Peng, Y., Fan, J., Huang, Y., Wang, K., Yan, D., and Li, D., "Investigation of spatters in cold metal transfer + pulse-based wire and arc additive manufacturing of high nitrogen austenitic stainless steel", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (9): 6881–6894 (2021).
 238. Zhang, X., Zhou, Q., Wang, K., Peng, Y., Ding, J., Kong, J., and Williams, S., "Study on microstructure and tensile properties of high nitrogen Cr-Mn steel processed by CMT wire and arc additive manufacturing", *Materials & Design*, 166: 107611 (2019).

239. Yang, D., Huang, Y., Fan, J., Jin, M., Peng, Y., and Wang, K., "Effect of N2 content in shielding gas on formation quality and microstructure of high nitrogen austenitic stainless steel fabricated by wire and arc additive manufacturing", *Journal Of Manufacturing Processes*, 61: 261–269 (2021).
240. Wang, T., Zhang, Y., Wu, Z., and Shi, C., "Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire", *Vacuum*, 149: 185–189 (2018).
241. Zhang, Y., Cheng, F., and Wu, S., "The microstructure and mechanical properties of duplex stainless steel components fabricated via flux-cored wire arc-additive manufacturing", *Journal Of Manufacturing Processes*, 69: 204–214 (2021).
242. Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G., Veljkovic, M., and Trombetti, T., "Assessment of design mechanical parameters and partial safety factors for wire-and-arc additive manufactured stainless steel", *Engineering Structures*, 225: 111314 (2020).
243. Fu, Y., Zhang, H., Wang, G., and Wang, H., "Investigation of mechanical properties for hybrid deposition and micro-rolling of bainite steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 250: 220–227 (2017).
244. Zhang, T., Li, H., Gong, H., Wu, Y., Ahmad, A. S., and Chen, X., "Effect of rolling force on tensile properties of additively manufactured Inconel 718 at ambient and elevated temperatures", *Journal Of Alloys And Compounds*, 884: 161050 (2021).
245. Laghi, V., Palermo, M., Tonelli, L., Gasparini, G., Ceschini, L., and Trombetti, T., "Tensile properties and microstructural features of 304L austenitic stainless steel produced by wire-and-arc additive manufacturing", *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (9–10): 3693–3705 (2020).
246. Elmer, J. W. and Gibbs, G., "Mechanical rolling and annealing of wire-arc additively manufactured stainless steel plates", *Science And Technology Of Welding And Joining*, 1–8 (2021).
247. Ji, L., Lu, J., Liu, C., Jing, C., Fan, H., and Ma, S., "Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing", *MATEC Web Of Conferences*, 128: 03006 (2017).
248. Pragana, J. P. M., Cristino, V. A. M., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., and Martins, P. A. F., "Integration of forming operations on hybrid additive manufacturing systems based on fusion welding", *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing-Green Technology*, 7 (3): 595–607 (2020).
249. Wang, C., Liu, T. G., Zhu, P., Lu, Y. H., and Shoji, T., "Study on microstructure and tensile properties of 316L stainless steel fabricated by CMT wire and arc additive manufacturing", *Materials Science And Engineering: A*, 796: 140006 (2020).

250. Lin, Z., Goulas, C., Ya, W., and Hermans, M. J. M., "Microstructure and mechanical properties of medium carbon steel deposits obtained via wire and arc additive manufacturing using metal-cored wire", *Metals*, 9 (6): 673 (2019).
251. Wu, T., Liu, J., Wang, K., Wang, L., and Zhang, X., "Microstructure and mechanical properties of wire-powder hybrid additive manufacturing for high nitrogen steel", *Journal Of Manufacturing Processes*, 70: 248–258 (2021).
252. Feng, Y., Zhan, B., He, J., and Wang, K., "The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel", *Journal Of Materials Processing Technology*, 259: 206–215 (2018).
253. Bartsch, H., Kühne, R., Citarelli, S., Schaffrath, S., and Feldmann, M., "Fatigue analysis of wire arc additive manufactured (3D printed) components with unmilled surface", *Structures*, 31: 576–589 (2021).
254. Guennec, B., Ueno, A., Sakai, T., Takanashi, M., and Itabashi, Y., "Effect of the loading frequency on fatigue properties of JIS S15C low carbon steel and some discussions based on micro-plasticity behavior", *International Journal Of Fatigue*, 66: 29–38 (2014).
255. Zainulabdeen, A. A., "Study of fatigue fractography of mild steel used in automotive industry", *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 15 (1): 82–88 (2019).
256. İnternet: Corrosionpedia, "Fatigue Striation", <https://www.corrosionpedia.com/definition/6160/fatigue-striation> (2021).
257. Mu, S., Li, Y., Song, D., Xu, B., and Chen, X., "Low cycle fatigue behavior and failure mechanism of wire arc additive manufacturing 16MND5 bainitic steel", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 30 (7): 4911–4924 (2021).
258. Susanto, H., Ridha, M., and Huzni, S., "Fatigue correction behaviour of AISI 304 stainless steel in 3.5% NaCl solution", *Proceedings of The 2nd Annual International Conference Syiah Kuala University 2012 & The 8th IMT-GT Uninet Biosciences Conference*, Banda Aceh, 2 (2): 5 (2012).
259. Nakajima, M., Nakamura, Y., Suzuki, K., Bai, Y., and Uematsu, Y., "Effect of solution treatment after nitriding on fatigue properties in type 304 stainless steel", *International Journal Of Fatigue*, 68: 103–110 (2014).
260. Küçüköner, H., "Dubleks paslanmaz çelik ve basınçlı kap çeliğinin tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilmesi ve birleştirmelerin mekanik/mikro yapı özelliklerinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 68 (2019).
261. Durgutlu, A., "Patlama kaynağı yöntemi ile bakır-paslanmaz çelik malzemelerinin birleştirilmesi ve ara yüzeyin mekanik-mikroyapı özelliklerinin incelenmesi", Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 98 (2003).

262. Khalifeh, A. R., Dehghan, A., and Hajjari, E., "Dissimilar joining of AISI 304L/St37 steels by TIG welding process", *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 26 (6): 721–727 (2013).
263. Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., and Nasiri, A., "Comparison of microstructural characteristics and mechanical properties of shipbuilding steel plates fabricated by conventional rolling versus wire arc additive manufacturing", *Additive Manufacturing*, 32: 101086 (2020).
264. Shassere, B., Nycz, A., Noakes, M., Masuo, C., and Sridharan, N., "Correlation of microstructure and mechanical properties of metal big area additive manufacturing", *Applied Sciences*, 9 (4): 787 (2019).

ÖZGEÇMİŞ

Yusuf AYAN ilk ve orta öğrenimini Ankara’da tamamladı. 2006 yılında Kırıkkale Fen Lisesi’nden mezun oldu. 2007 yılında Kocaeli Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü’nde öğrenim görmeye başladı ve 2012 yılında bu bölümden mezun oldu. 2017 yılında Karabük Üniversitesi’nde İmalat Mühendisliği anabilim dalında yüksek lisans eğitimini tamamladı ve aynı yıl aynı anabilim dalında doktora eğitimine başladı. 2013 yılından bu yana Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Bölümü’nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.