

Plazma Tel Ark Katmanlı İmalat Yöntemi ile Malzeme Üretimi ve  
Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

İsmail Bayar

**DOKTORA TEZİ**

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2021

Material Production with Plasma Wire Arc Additive Manufacturing Method  
and the Investigation of Its Mechanical Properties

İsmail Bayar

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Department of Mechanical Engineering

May 2021

Plazma Tel Ark Katmanlı İmalat Yöntemi ile Malzeme Üretimi ve  
Mekanik Özelliklerinin Araştırılması

İsmail Bayar

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
Konstrüksiyon ve İmalat Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Mustafa Ulutan

“Bu Tez ESOĞÜ-BAP tarafından 202015A201 no’lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.

Mayıs 2021

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Mustafa ULUTAN danışmanlığında hazırlamış olduğum "Plazma Tel Ark Katmanlı İmalat Yöntemi ile Malzeme Üretimi ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması" başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 20/05/2021

İsmail Bayar



## ÖZET

Bu çalışma kapsamında plazma tel ark katmanlı imalat yöntemi (P-TAKİ) ve toz takviyesi ile oluşturulan özlü teller kullanılarak yeni bir uygulama ile kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. AISI 304 paslanmaz çelik ince borulara bor karbür, silisyum karbür ve ferrokrom karbür tozları takviye edilerek ve sade AISI 304 paslanmaz çelik tel kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu malzemelerin mekanik özellikleri birbiri ile karşılaştırılmıştır. Toz takviyesinin mikroyapısı, çekme dayanımı, aşınma davranışı ve sertlik üzerine etkisi araştırılmıştır.

Deneysel çalışmalarda sade AISI 304 tel malzeme, SiC ve FeCrC toz takviyeli teller kullanılarak P-TAKİ yöntemi ile düz duvar şeklinde kompozit malzemeler başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen bu malzemelerin mikroyapıları incelendiğinde boşluk, porozite ve çatlak görülmemiştir. B<sub>4</sub>C takviyeli malzeme üretiminde ise ilk katmanlarda makro çatlaklar oluştuğu için çalışmaya devam edilmemiştir. Deney sonuçlarına göre toz takviyesi sertlik ve aşınma direncini arttırmıştır, fakat SiC takviyeli malzemede çekme dayanımı istenildiği ölçüde iyileştirilememiştir. FeCrC takviyeli malzemede çekme dayanımı, sertlik ve aşınma direnci özelliklerinde sade AISI 304 P-TAKİ malzemesine göre oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen AISI 304 P-TAKİ malzemesinin çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci ve tokluk değerleri döküm AISI 304 malzemesine göre gelişme göstermiştir. En iyi çekme dayanımı 978,7±45 MPa değeri ile FeCrC takviyeli yatay numunesinde elde edilmiştir. En iyi aşınma direnci ve sertlik değeri ise SiC takviyeli malzemelerde elde edilmiştir. SiC takviyeli malzemenin aşınma direnci sade AISI 304 P-TAKİ malzemesine göre 25,2 kat daha iyidir.

**Anahtar Kelimeler:** Plazma Tel Ark Katmanlı İmalat, Malzeme Üretimi, Mikroyapı, Mekanik Özellikler, Aşınma

## SUMMARY

In this study, the composite material was produced with a new application using the plasma wire arc additive manufacturing method (P-WAAM) and powder-reinforced flux-cored wires. The materials were produced by reinforcing AISI 304 stainless steel thin pipes with boron carbide, silicon carbide, and ferrochromium carbide powders and using only AISI 304 stainless steel wire. The mechanical properties of these materials have been compared with each other. The effect of powder reinforcement on microstructure characteristics, tensile strength, wear resistance, and microhardness have been investigated.

In experimental studies, using the AISI 304, the SiC reinforced, and the FeCrC reinforced wires were successfully produced the composite materials in the form of walls. When the microstructures of these produced materials were examined, no voids, porosity, and cracks were observed. In the production of the B<sub>4</sub>C reinforced material, work was not continued as macro cracks occurred in the first layers. According to the results, the powder reinforcement increased the hardness and wear resistance, but the tensile strength of the SiC reinforced material was not improved enough. In the FeCrC reinforced material, very good results were obtained in tensile strength, hardness, and wear resistance properties compared to the AISI304 P-WAAM material. The tensile strength, microhardness, wear resistance, and toughness values of the AISI 304 P-WAAM material have improved compared to the cast AISI 304 material. The highest tensile strength was obtained with the value of  $978.7 \pm 45$  MPa in the FeCrC reinforced horizontal sample. The greatest wear resistance and hardness values were obtained in SiC reinforced materials. The wear resistance of the SiC reinforced material is 25,2 times better than AISI 304 P-WAAM material.

**Keywords:** Plasma Wire Ark Additive Manufacturing, Material Production, Microstructure, Mechanical Properties, Wear

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xii
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xvi
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2. TEORİK BİLGİLER</b> .....	3
2.1. Plazma Ark Kaynağı.....	3
2.2. Paslanmaz Çelikler .....	4
2.2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler .....	6
2.2.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler.....	6
2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler.....	9
2.2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler.....	9
2.2.5. Çökelme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler.....	9
2.3. Bor Karbür (B <sub>4</sub> C).....	10
2.4. Silisyum Karbür (SiC) .....	10
2.5. Ferrokrom Karbür (FeCrC).....	11
<b>3. KATMANLI İMALAT</b> .....	12
3.1. Tel Ark Katmanlı İmalat (TAKİ).....	15
3.1.1. Tungsten İnert Gaz Kaynağı ile Tel Ark Katmanlı İmalat (TIG - TAKİ) Sistemi .....	17

## İÇİNDEKİLER (devam)

### Sayfa

3.1.2. Plazma Ark Kaynağı ile Tel Ark Katmanlı İmalat (P - TAKİ) Sistemi.....	17
3.1.3. Gaz Metal Ark Kaynağı ile Tel Ark Katmanlı İmalat (MIG-TAKİ) Sistemi ..	18
3.1.4. Soğuk Metal Transferi İşlemi ile Tel Ark Katmanlı İmalat (CMT - TAKİ) Sistemi .....	18
<b>4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....</b>	<b>20</b>
4.1. Tel Ark Katmanlı İmalat Sistemlerinde Süreç Geliştirme.....	20
4.2. Tel Ark Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilen Malzemelerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri .....	28
<b>5. TEL ARK KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ İÇİN DENEY SİSTEMİ TASARIMI.....</b>	<b>39</b>
5.1. Plazma Ark Kaynağı.....	40
5.2. Kartezyen Manipülatör (Hareket Sistemi).....	41
5.3. Bilgisayar Kontrolü .....	42
5.4. Plazma Torcu .....	42
5.5. Tel Besleyici ve Tel Sabitleyici .....	44
5.6. Alt Malzeme ve Hareketli Platform.....	46
<b>6. MATERYAL VE YÖNTEM .....</b>	<b>48</b>
6.1. Deney Malzemeleri ve Tellerin Hazırlanması.....	48
6.2. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi.....	51
6.3. Malzeme Üretimi ve Numunelerin Elde Edilmesi.....	52
6.4. Mikroyapı İncelemeleri .....	54
6.5. Çekme Testi İncelemeleri .....	56
6.6. Sertlik Testleri .....	58
6.7. Aşınma Testleri.....	59
<b>7. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>62</b>

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
7.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi .....	62
7.2. Mikroyapı İncelemeleri .....	70
7.3. Aşınma Testi Sonuçları.....	84
7.4. Mikrosertlik Sonuçları .....	92
7.5. Çekme Testi Sonuçları.....	94
<b>8. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>101</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>104</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. PAW ve TIG kaynaklarının şematik olarak karşılaştırılması (O'Brien ve American Welding, 1991).....	3
2.2. Nikel ve Krom oranına göre paslanmaz çelik türleri (Steels, 2013) .....	5
2.3. Cr <sub>es</sub> / Ni <sub>es</sub> ikili diyagramında östenitik paslanmaz çeliklerdeki .....	7
3.1. Katmanlı imalat ile üretilmiş malzemeler; a) Bakır roket nozulu, b) Otomotiv pistonu, .....	13
3.2. a) TAKİ sistemi, b) TAKİ biriktirme bölgesinin şematik görünümü (D. Ding vd., 2015).....	16
4.1. a) Salımlı, b) Paralel biriktirme stratejileri, (A. K. Syed vd., 2021) .....	22
4.2. µ-PTA yöntemi performansının malzeme (duvar) genişliği, etkili malzeme genişliği ve yükseklik açısından, diğer yöntemlerle karşılaştırılması (Jhavar vd., 2014).....	33
5.1. Deney sisteminin şematik olarak gruplandırılması .....	39
5.2. Plazma ark kaynak cihazı .....	40
5.3. Kartezyen manipülatör .....	41
5.4. G kodlarının yazıldığı bilgisayar ekranı ve arayüz programı .....	42
5.5. Plazma torcu, a) ana ark oluşmadan önceki konum, b) ana ark oluşuktan sonraki konum.....	43
5.6. Farklı çaplardaki plazma nozulları .....	44
5.7. Farklı tel besleyici konumlarının gösterilmesi .....	45
5.8. Tel besleyici ve tel açısı gösterimi .....	46
5.9. Hareketli platform ve alt malzeme .....	47
6.1. Oluşturulan kompozit tellerin şematik görünümü .....	50
6.2 Malzeme üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) SiC, b)FeCrC .....	51
6.3 P-TAKİ yöntemi ile üretilen malzemeler, a) 304 paslanmaz çelik malzeme, b) SiC takviyeli malzeme, c) FeCrC takviyeli malzeme .....	53
6.4. Duvar şeklinde üretim için ilerleme planlaması .....	53
6.5. Deneylerde kullanılan numunelerin üretilen malzeme üzerinde gösterimi .....	54
6.6. Mikroyapı numunelerinin şematik gösterimi .....	55

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.7. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM).....	56
6.8. a) Üretilen parçalardan kesilen çekme numuneleri b) Çekme deney numunesi ölçüleri.....	57
6.9. Çekme deneyi sonrası numuneler.....	57
6.10. Shimadzu AG-IS 250 kN çekme cihazı.....	58
6.11. Mikrosertlik numunesi.....	59
6.12. Mikrosertlik ölçüm cihazı.....	59
6.13. Aşınma testlerinin yapıldığı yüzey .....	60
6.14. Örnek aşınma izi kesit alanı.....	60
6.15. Aşınma testi cihazı .....	61
7.1. a) Üretim ilerleme yönü, b) Üretim ilerleme yönüne göre katman yükseklik ve genişliğinin belirlendiği bölgelerin şematik gösterimi .....	63
7.2. Ön deneylerde oluşturulan AISI 304 numunelerin üstten görünümü.....	64
7.3. Ön deneylerde 304 paslanmaz çelik tel ile oluşturulan numunelerin.....	65
7.4. Ön deneylerde SiC takviyeli tel ile oluşturulan numunelerin.....	67
7.5. Ön deneylerde FeCrC takviyeli tel ile oluşturulan numunelerin.....	69
7.6. B <sub>4</sub> C Takviyeli tel ile oluşturulan tek katman numune.....	70
7.7. 304 paslanmaz çelik numunelerinin OM görüntüleri a) 200x büyütme üst numune, ..	71
7.8. 304 P-TAKİ numunesinin katman geçiş bölgesinin OM görüntüsü .....	72
7.9. Ortalama İDKA mesafelerinin belirlendiği OM görüntüleri, a) alt numune, b) üst numune .....	73
7.10. 304 P-TAKİ numunelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) Üst numune, b) Alt numune.....	74
7.11. 304 P-TAKİ malzemesinin XRD analizi.....	75
7.12. SiC takviyeli numunelerinin OM görüntüleri a)200x büyütme üst numune, b)500x büyütme üst numune, c)200x büyütme alt numune, d)500x büyütme alt numune ....	76
7.13. SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin katman geçiş bölgesinin OM görüntüleri.....	77
7.14. SiC takviyeli numunelerin dendrit ve ötektik bölgelerin yüzdesel dağılımı, .....	77
7.15. SiC takviyeli P-TAKİ malzemelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri, .....	78

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
7.16. SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin XRD analizi.....	79
7.17. FeCrC takviyeli malzemenin OM görüntüleri a) 200x büyütme üst numune, .....	80
7.18. FeCrC takviyeli numunenin katman geçiş bölgesinin OM görüntüsü .....	81
7.19. FeCrC takviyeli numunelerinin dendrit ve ötektik bölgelerin yüzdesel dağılımı, .....	82
7.20. FeCrC takviyeli numunelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri, .....	83
7.21. FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemesinin XRD analizi .....	84
7.22. Numunelerin özgül aşınma oranları .....	85
7.23. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları.....	86
7.24. AISI 304 döküm malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizi ....	87
7.25. 304 P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizi, a) üst numune, b) alt numune .....	88
7.26. SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri, a) üst numune, b) alt numune .....	89
7.27. FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizi, a) üst numune, b) alt numune .....	90
7.28. Numunelerin sürtünme katsayısı/ aşınma mesafesi grafikleri, a) 304 döküm,.....	91
7.29. 304 P-TAKİ numunesinin ortalama mikrosertlik değerleri.....	92
7.30. SiC takviyeli P-TAKİ numunesinin ortalama mikrosertlik değerleri.....	93
7.31. FeCrC takviyeli P-TAKİ numunesinin ortalama mikrosertlik değerleri.....	94
7.32. Numunelerin çekme testi ile elde edilen çekme dayanımları .....	95
7.33. Numunelerin çekme testi ile elde edilen akma dayanımları.....	97
7.34. Numunelerin çekme testi ile elde edilen yüzde uzama miktarları.....	98
7.35. Numunelerin gerilme/Yüzde uzama grafiği .....	99
7.36. Çekme deneyi numunelerin kırık kesitlerinin SEM görüntüleri, .....	100



## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
6.1 Deneylede üretilen malzemelerin isimlendirilmesi.....	49
6.2 AISI 304 paslanmaz çeliğın kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri.....	49
6.3 Tozların yoğunluğu ve 1 metre boru içindeki miktarları.....	50
6.4 P-TAKİ malzeme üretiminde kullanılan deney parametreleri .....	52
7.1 AISI 304 paslanmaz çelik ile yapılan ön deney parametreleri .....	63
7.2 SiC takviyeli tel ile yapılan ön deney parametreleri .....	66
7.3 FeCrC takviyeli tel ile yapılan ön deney parametreleri .....	67

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ****Simgeler**

FeCrC

B<sub>4</sub>C

SiC

**Açıklama**

Ferrokrom karbür

Bor karbür

Silisyum karbür

**Kısaltmalar**

CAD

CAM

DED

PBF

AISI

**Açıklama**

Bilgisayar destekli tasarım (Computer aid designing)

Bilgisayar destekli imalat (Computer aid manufacturing)

Doğrudan enerji ile biriktirme (Direct energy deposition)

Toz yatağı füzyon birleştirme (Powder bed fusion)

American iron and steel institute

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Malzeme üretimi için endüstride döküm, toz metalürjisi vb. gibi birçok üretim yöntemi kullanılmaktadır. Üretim yöntemleri, sürekli olarak verim, zaman ve maliyet açısından geliştirilmekte ve yeni yöntemler elde edilmektedir.

Bu yeni yöntemlerden biri olan katmanlı imalat son yıllarda hızlı bir gelişme göstermektedir. Katmanlı imalat, genel olarak toz veya tel olan ham malzemenin ergitilip, üst üste dizilen katmanlar halinde birleştirilerek oluşturulduğu bir imalat yöntemidir. Bu imalat yöntemi, geleneksel imalat yöntemlerine göre, karmaşık ve detaylı parçaların üretilmesi, kalıp kullanılmaması, oluşan malzeme kaybını çok az miktarlara indirmesi gibi avantajlar sağlamaktadır. Katmanlı imalat öncelikle üç boyutlu yazıcı ismi ile polimer malzemelerde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde ise metal malzemeler için araştırmalar yapılmaktadır.

Metallerde endüstriyel olarak katmanlı imalatın toz esaslı ve tel esaslı olarak iki tür uygulaması vardır. Toz esaslı, metal bir tabaka üzerine beslenen ince tozların enerji girdisi ile (lazer, plazma, elektron demeti) ergitilmesi, tel esaslı ise yönlendirilmiş enerji yoğunluğu ile tel malzemenin ergitilmesi esasına dayanmaktadır ve tel ark katmanlı imalat (TAKİ) olarak adlandırılmaktadır. TAKİ yöntemi özellikle havacılık, savunma sanayi ve gıda sektörlerinde kullanılan Titanyum alaşımları, Alüminyum alaşımları ve paslanmaz çeliklerdeki son dönem uygulamaları ile dikkat çekmektedir. Özellikle östenitik paslanmaz çelikler, kriyojenik işlem sıcaklıklarından fırın ve jet motorları gibi yüksek sıcaklığın gerekli olduğu uygulamalara kadar yaygın bir alanda başarıyla kullanılırlar. Yüksek korozyon direnci ve üstün mekanik özelliklere sahiptir. Ancak çalışma ortamlarında aşınma özellikleri açısından zayıf kalmaktadırlar. Ayrıca paslanmaz çelik malzemeler ile iş parçası imalatının döküm, talaşlı imalat ve plastik şekil verme gibi klasik yöntemlerle yapılması durumunda pek çok kısıtlama ile karşılaşmaktadır. Bu nedenlerle östenitik paslanmaz çeliklerin sert partiküllerle takviyesine imkan veren ve imalatını kolaylaştıran yöntemlere ihtiyaç vardır.

Bu tez çalışmasında, tel ark katmanlı imalat yönteminde ısı kaynağı olarak plazma ark kaynak cihazı kullanılarak AISI 304 paslanmaz çelik telden malzeme üretimi

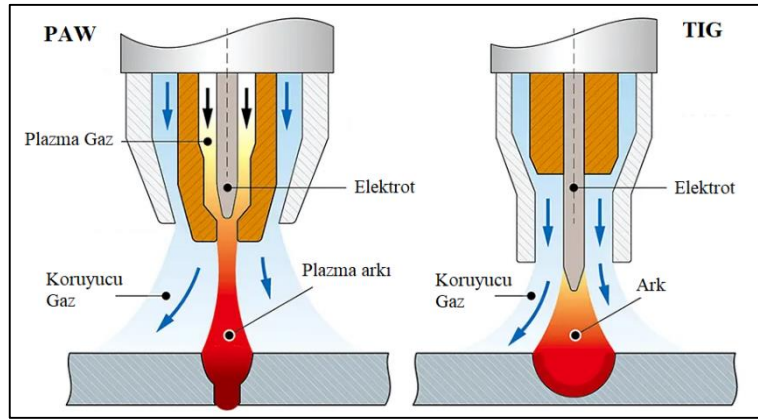
gerçekleştirilmiştir. Kaynak torcunun hareketlerinin standart olması için kartezyen manipülatör geliştirilmiştir. Tel ilerlemesi için tel besleyici kullanılmıştır. Malzeme üretim geometrisi ve ilerleme hızı gibi parametreler bilgisayar destekli imalat (CAM) programı ile oluşturulmuştur. Ayrıca AISI 304 paslanmaz çelik malzemeye farklı alaşım tozlarının eklenmesi ile aşınma dayanımı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Metal matrisli kompozit malzemelerin üretimi için AISI 304 paslanmaz çelik ince borular içerisine silisyum karbür, bor karbür ve ferrokrom karbür tozları yerleştirilerek özlü teller üretilmiştir. Toz takviyeli teller ile üretilen malzeme özellikleri, sade AISI 304 paslanmaz çelik tel ile üretilen malzeme ile karşılaştırılmıştır. Üretilen malzemelerin mikroyapıları optik mikroskop (OM), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntülenmiş, enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) analizi ile içeriğindeki elementler belirlenmiştir. Ayrıca X-ışını kırınımı (XRD) analizi ile oluşan fazlar saptanmıştır. Sertlik miktarları Vickers mikrosertlik yöntemi ile üretim yönü boyunca belirlenmiştir. Malzemelerin aşınma testi sırasında, üretilen malzemelere ek olarak aynı koşullarda döküm AISI 304 paslanmaz çelik malzemeninde aşınma özellikleri belirlenerek karşılaştırma yapılmıştır. İlk biriktirilen katmanlar ile son biriktirilen katmanlar arasındaki özellikleri belirlemek için malzemelerin alt ve üst bölgelerinden farklı numuneler çıkarılarak incelenmiştir. Çekme testi ile malzemelerin akma ve çekme dayanımları ile yüzde uzama miktarları belirlenmiştir. Gelişmekte olan bir katmanlı imalat yönteminin uygulanması, üretimde özlü teller kullanılarak malzemeye etkilerinin araştırılması ve işlem parametrelerinin geliştirilmesi yenilikçi çalışmalar olarak değerlendirilmiştir.

Tez çalışması plazma ark kaynağı ve deneyde kullanılan malzemelerin tanıtımı, katmanlı imalat ve türlerinin anlatılması ve tel ark katmanlı imalat sistemi için tasarlanan üretim ve deney sistematığının sunulması bölümlerini içermektedir. Ayrıca incelenen literatür, deneysel çalışmalar, malzemeler ve analizler detaylı olarak sunulmuştur. Son bölümlerde; üretilen malzemelere uygulanan test ve analiz sonuçları; mikroyapı, çekme dayanımı, sertlik ve aşınma testi başlıkları altında görüntü ve grafikler ile ayrı ayrı ve karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Deney sonuçları ve genel yorumlar bütün olarak değerlendirilerek ve sonuçlar kısmında özetlenmiştir.

## 2. TEORİK BİLGİLER

### 2.1. Plazma Ark Kaynağı

Plazma ark kaynağı (plasma arc welding, PAW), elektrik arkı kullanılarak, ana metali ve varsa dolgu metalini ergitmek için yapılan bir füzyon kaynağı işlemidir. Elektrik arkı bir elektrot ve iş parçası arasında oluşur. Tungsten inert gaz (TIG) kaynağı gibi, plazma ark kaynağı torcunda da ergimeyen bir tungsten elektrot kullanılır. Bu elektrot, ucunda küçük bir açıklığa sahip su soğutmalı bakır nozul içine yerleştirilmiştir. PAW ve TIG kaynaklarının şematik olarak karşılaştırılması Şekil 2.1'de verilmiştir. TIG kaynağından farklı olarak, plazma ark kaynağında, gazı yönlendirmek ve arkı dar bir kolona odaklamak için ark daraltıcı bir nozul kullanır (Şekil 2.1). Plazma ark kaynağında, elektrot tamamen nozul içerisindedir ve temassız bir ark başlangıcı oluşur. Bu tungsten elektrot ile nozul arasında düşük akımlı, yüksek frekanslı bir pilot ark ile gerçekleştirilir. Pilot ark oluşturulduktan sonra iyonlar nozuldan akar ve uygun bir mesafede iş parçasına doğru ana arkın başlamasını sağlar (O'Brien ve American Welding, 1991).



Şekil 2.1. PAW ve TIG kaynaklarının şematik olarak karşılaştırılması (O'Brien ve American Welding, 1991).

Nozuldan geçen daraltılmış ark ile daha yüksek enerji yoğunluğu ve daha yüksek ark ısısı elde edilir. Bu özelliklerinden dolayı plazma ark kaynağı TIG kaynağına göre, daha yüksek enerji yoğunluğu, daha derin penetrasyon ve daha yüksek ilerleme hızlarına sahiptir. Plazma içerisinde 10000 °C ile 20000 °C sıcaklıklara ulaşılır. Daraltılmış ark neredeyse sütun şeklinde olduğundan, ark ile iş parçası arasındaki güç yoğunluğu ve temas alanı, ark uzunluğundaki değişikliklerden etkilenmez. Plazma ark kaynağındaki daraltılmış ark, TIG

kaynağı vb. diğer ark kaynaklarında oluşan yönlendirilmiş arklardan daha kararlıdır (Messler, 1999; O'Brien ve American Welding, 1991). Yüksek enerji yoğunluğu, derin penetrasyon, yüksek ilerleme hızlarına uygunluk ve ark kararlılığı özelliklerinden dolayı plazma ark kaynağının, tel ark katmanlı imalatta ısı kaynağı sağlamak için kullanılması uygun görülmüştür.

## 2.2. Paslanmaz Çelikler

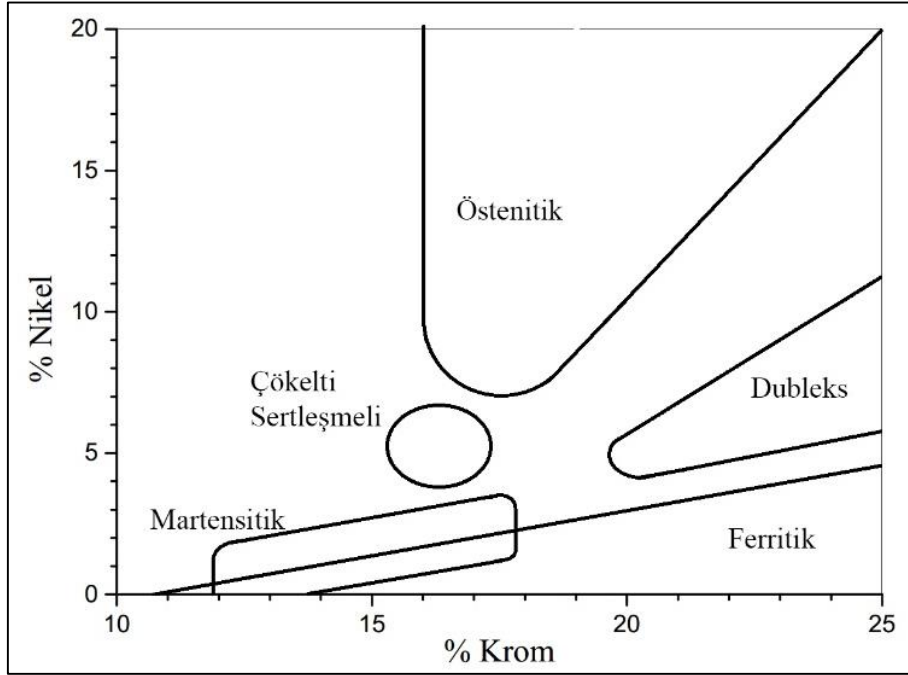
Paslanmaz çelikler ve üstün mekanik özellikleri iyi korozyon direncinden dolayı, mutfak aletleri gibi düşük kaliteli uygulamalardan uzay araçlarına kadar çeşitli endüstriyel uygulamalarda talep gören önemli mühendislik malzemeleridir. Bu geniş kullanım alanı paslanmaz çelikleri önemli bir alaşım sınıfı haline getirmektedir. Çeliklere paslanmaz özelliği kazandırmak için en az %10,5 Cr ilave etmek gereklidir. Bu krom seviyesinde normal koşullarda, metal yüzeyinde pasif bir krom oksit tabakası oluşturularak, metal yüzeyinin hemen altında kalan kısımdan itibaren korozyondan korunur.

Daha nemli veya kirli ortamlarda ise karbon gibi elementlerin varlığında paslanmayı engellemek için, alaşıma daha fazla krom eklemek gereklidir. Paslanmaz çelikler; ferritik, östenitik ve martenzitik olmak üzere üç ana tip mikroyapıdan oluşurlar. Bu üç ana mikroyapıdan ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çelikler, martenzitik paslanmaz çelikler, dubleks paslanmaz çelikler, çökelme sertleştirici paslanmaz çelikler olarak beş ana sınıfa ayrılabilir (Lippold ve Kotecki, 2005; Lo vd., 2009). İçerdikleri Nikel ve Krom oranına göre paslanmaz çelik türleri Şekil 2.2'de verilmiştir.

Paslanmaz çeliklere alaşım elementleri eklenerek belirli özellikleri değiştirilebilir, aşağıda elementlerin paslanmaz çeliklere etkileri verilmiştir.

- Nikel: Östenit bölgesini artırır. Çökelme sertleşmesi yapılan paslanmaz çeliklerde dayanımı artırır. Tokluğun, şekillendirilebilirliğin ve korozyon direncinin yüksek olmasını sağlar.
- Krom: Ferrit bölgesini artırır. Sertliğin ve korozyon direncinin yüksek olmasını sağlar.

- Karbon: Dayanımı artırır, korozyon direncini azaltan çökeltilerin gelişmesini sağlar, artan karbon içeriği kritik soğuma hızını düşürür.
- Silisyum: Ferrit bölgesini artırır. Korozyon direncinin yüksek olmasını sağlar.



Şekil 2.2. Nikel ve Krom oranına göre paslanmaz çelik türleri (Steels, 2013)

- Mangan: Sünekliliğin yüksek olmasını sağlar. Düşük sıcaklıklarda östenit büyümesini, yüksek sıcaklıklarda ise ferrit büyümesini engeller.
- Azot: Östenit bölgesini artırır. Mukavemetin yüksek olmasını sağlar. Çukurcuk korozyonunu oluşumunu engeller. Ferritik paslanmaz çeliklerde tokluğun, martenzitik paslanmaz çeliklerde ise sertliğin yüksek olmasını sağlar.
- Bakır: Östenit bölgesini artırır. Farklı asit ortamlarında korozyon direncini yükseltir. Çökeltme sertleşmesi yapılan paslanmaz çeliklerde dayanımı artırır.
- Molibden: Korozyon direncinin ve mukavemetin yüksek olmasını sağlar. Ferrit bölgesini artırır. Martenzitik paslanmaz çeliklerde yüksek ısı işlem sıcaklıklarında mukavemetin yüksek olmasını sağlar.
- Alüminyum: Korozyon direncinin yüksek olmasını sağlar. Çökeltme sertleşmesi yapılan paslanmaz çeliklerde dayanımı artırır.
- Vanadyum: Ferrit bölgesini artırır. Martenzitik paslanmaz çeliklerde sertliğin yüksek olmasını sağlar.

- Niyobyum: Hem ferrit hem de östenit bölgesini artırır. Karbon elementi ile bağlanarak östenitik paslanmaz çeliklerde taneler sınırlarındaki korozyonu engeller ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetin artmasını sağlar. Martenzitik paslanmaz çeliklerde ise sertliği azaltır.
- Titanyum: Ferrit bölgesini artırır. Karbon elementi ile bağlanarak östenitik paslanmaz çeliklerde taneler sınırlarındaki korozyonu engeller ve yüksek sıcaklıklarda mukavemetin artmasını sağlar. Ferritik paslanmaz çeliklerde tokluğun yüksek olmasını sağlar. Martenzitik paslanmaz çeliklerde ise sertliği azaltır. Ayrıca çökeltme sertleşmesi yapılan paslanmaz çeliklerde dayanımı artırır (Beddoes ve Parr, 1999; Bhadeshia ve Honeycombe, 2006).

### 2.2.1. Ferritik Paslanmaz Çelikler

Hacim merkezli kübik (HMK) yapıda olan ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere göre yüksek korozyon direnci, yüksek sıcaklıklarda daha iyi oksidasyon direnci ve daha az süneklığe sahiptir, martenzitik paslanmaz çelikler gibi ısıl işlem ile sertleştirilemezler. Östenitik paslanmaz çeliklerden sonra en fazla kullanılan paslanmaz çelik türüdür. Genelde yapısında nikel elementi bulunmaz, karbon elementini çok az bulunur, bu özellikleri ile basitçe şekillendirilebilirler. Tavlama ısıl işlemi uygulanabilir. Ağırlık olarak %11 - 30 kromdan oluşan ferritik paslanmaz çelikler, östenitik paslanmaz çeliklere göre daha düşük maliyetlidir. Otomobillerde, basınçlı kaplarda, karayolu ve demiryolu taşımacılığında, elektrik üretiminde ve madencilikte yaygın olarak kullanılmaktadır. En fazla kullanılan ferritik paslanmaz çelikler, AISI 442 ve AISI 430'dur (Ghosh vd., 2017; Tanure vd., 2019).

### 2.2.2. Östenitik Paslanmaz Çelikler

Östenitik paslanmaz çelikler, yüksek korozyon direnci, şekillendirme ve kaynaklanma özelliğine sahiptir, kriyojenik işlem sıcaklıklarından fırın ve jet motorları gibi yüksek sıcaklığın gerekli olduğu uygulamalara kadar yaygın bir alanda başarıyla kullanılabilirler. Ağırlık olarak krom %16 ile %28 arasında, nikel ise %3,5 ile %32 arasında değişen oranlarda ve farklı kimyasal içeriklerden oluşurlar. Östenitik paslanmaz çelikler, ağırlıklı olarak Fe'nin yüzey merkezli kübik (YMK) allotropu olan östenit fazdan (genellikle



$\gamma$  ile gösterilir) oluşur. Östenitik paslanmaz çelikler, çelik malzemeden yapılmış kalıp ile şekillendirmek için oldukça sünek yapıya sahiptir. Çekme kuvveti yaklaşık 200 MPa'dır, soğuk işlem ile çekme kuvveti 2000 MPa seviyesine kadar çıkmaktadır. Östenit yapısını oda sıcaklığında kararlı halde tutmak için nikel eşdeğerinin yüksek seviyelerde olması gerekir. 300 serisi paslanmaz çelikler ağırlıklı olarak bu oranlardaki nikel ile alaşımlandırılarak elde edilir (Hedström, 2007; McGuire, 2008).

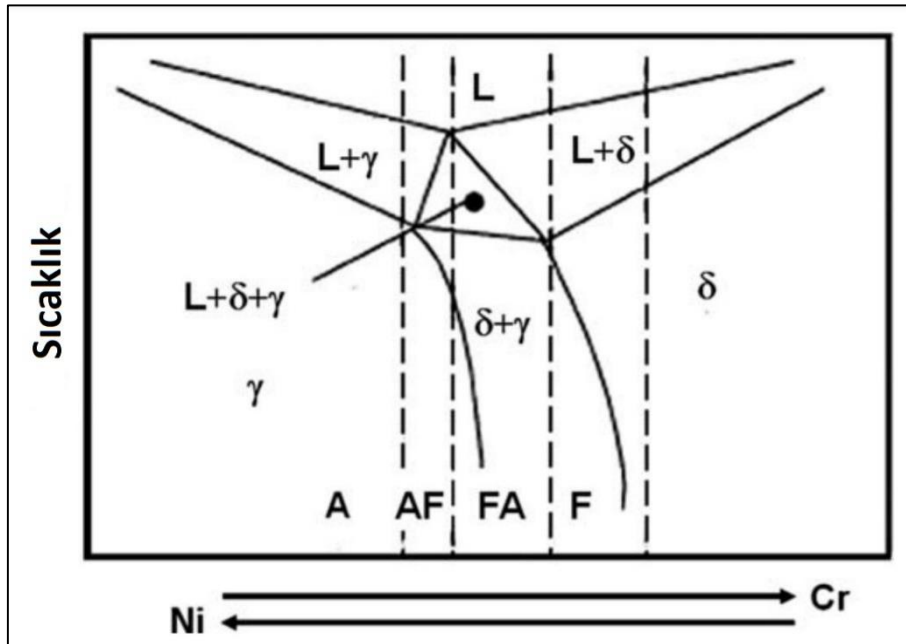
Paslanmaz çeliklerde alaşımanın sınıflandırması demir, nikel ve krom üçlü dengelerine dayanmaktadır, ancak basitleştirmek için, krom ve nikel eşdeğerlerine dayanan katılaşma modları kullanılır. Bu katılaşma modları;

$$\text{A modu: } L \rightarrow (L + \gamma) \rightarrow \gamma \quad (2.1)$$

$$\text{AF modu: } L \rightarrow (L + \gamma) \rightarrow (L + \delta + \gamma) \rightarrow (\gamma + \delta) \rightarrow \gamma \quad (2.2)$$

$$\text{FA modu: } L \rightarrow (L + \delta) \rightarrow (L + \delta + \gamma) \rightarrow (\gamma + \delta) \rightarrow \gamma \quad (2.3)$$

$$\text{F modu: } L \rightarrow (L + \delta) \rightarrow \delta \rightarrow (\gamma + \delta) \rightarrow \gamma \quad (2.4)$$



Şekil 2.3.  $Cr_{eş} / Ni_{eş}$  ikili diyagramında östenitik paslanmaz çeliklerdeki dört katılaşma modunun gösterimi (Fu vd., 2009)

Dört katılaşma modunun,  $Cr_{eş} / Ni_{eş}$  ikili diyagramında gösterimi Şekil 2.3'deki gibidir.  $Cr_{eş} / Ni_{eş}$ , aşağıdaki denklemler (2.5 ve 2.6) kullanılarak belirlenir.

$$Ni_{eş} = \%Ni + 35 \times \%C + 20 \times \%N + 0,25 \times \%Cu \quad (2.5)$$

$$Cr_{eş} = \%Cr + \%Mo + 0,7 \times \%Nb \quad (2.6)$$

Buradaki denklemin sonucuna göre  $Cr_{eş} / Ni_{eş}$  oranına göre hangi modda olduğu aşağıda belirtilen aralıklardan belirlenir. Bu değerler alaşım elementlerinin ağırlık yüzdesi (%ağ.) cinsindedir.

$$A \text{ (östenit) modu: } Cr_{eş} / Ni_{eş} < 1,25$$

$$AF \text{ (östenit – ferrit) modu: } 1,25 < Cr_{eş} / Ni_{eş} < 1,48$$

$$FA \text{ (ferrit – östenit) modu: } 1,48 < Cr_{eş} / Ni_{eş} < 1,95$$

$$F \text{ (ferrit) modu: } Cr_{eş} / Ni_{eş} > 1,25$$

Mevcut AISI 304 paslanmaz çelik için,  $Cr_{eş}$  değeri 19,92 ve  $Ni_{eş}$  değeri 11,76'dır.  $Cr_{eş}/Ni_{eş}$  oranı 1,69 olmaktadır. Dengeli katılaşma koşulları altında AISI 304 paslanmaz çelik için yukarıdaki katılaşma modlarından FA moduna denk gelir. Birincil katılaşma aşamasında birincil ferrit oluşumu ile üç fazlı (ferrit, östenit ve sıvı) reaksiyon meydana gelecektir. Bu üç fazlı reaksiyonun devamında, sıcaklık daha da düşürüldüğünde katılaşma gerçekleşecektir. Bununla birlikte, katılaşma hızı, östenitik paslanmaz çeliklerin katılaşma davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Katılaşma hızı yeterince yüksek olduğunda, katılaşma davranışı, denge katılaşmasından belirgin şekilde sapacaktır ve denge dışı katılaşma ile yeni mikro yapılar oluşacaktır (Fu vd., 2009).

$Ni_{eş}$  denkleminde C ve N ara elementlerinin önemli olarak östenit sabitleme kabiliyeti gösterir (Kotecki ve Siewert, 1992). AISI 304 ve AISI 316 alaşımları (ve bunların düşük karbonlu olanları AISI 304L ve AISI 316L) en yaygın olarak seçilen östenitik paslanmaz çelik alaşımları olarak kabul edilir (Lippold ve Kotecki, 2005). Östenitik çeliklere yüksek seviyelerde katı çözelti alaşım elementlerinin dahil edilmesi, malzeme özelliklerinin (örneğin, korozyon direnci ve faz) kontrol edilmesi açısından olumlu bir durumdur fakat düşük alaşımlı çeliklere göre maliyetleri çok yüksektir (Baddoo, 2008).

### 2.2.3. Martenzitik Paslanmaz Çelikler

Martenzitik paslanmaz çelikler ağırlıkça yaklaşık %11 ile %18 krom ve %1'e kadar karbon ve az miktarlarda nikel, molibden, tungsten, vanadyum ve niyobyum içerirler. Mekanik özellikleri, ısıl işlemle değiştirilebilir. Orta derecede korozyon direnci, yüksek sertlik, yüksek sıcaklıklarda çalışma ve iyi gerilme özellikleri nedeniyle otomotiv, medikal ve havacılık sektöründe daha çok kullanılır. Isıl işlem ile östenit yapının, martenzitik yapıya dönüşümü ile sertleştirilirler. Korozyon direncinin sınırlı olmasından dolayı, paslanmaz çelik türleri içinde en az tercih edilen türdür (Alam vd., 2020; McGuire, 2008).

### 2.2.4. Dupleks Paslanmaz Çelikler

Ferrit ve östenit fazlarını bir arada içeren paslanmaz çelik türüdür. İki fazın birleşiminde ferrit; yüksek mukavemet sağlarken, östenit; iyi süneklik ve genel korozyon direncine katkıda bulunur. Bu dupleks alaşımlar östenitik paslanmaz çeliklerle eşdeğer korozyon direncine sahiptirler ve maliyet açısından östenitik paslanmaz çeliklere alternatiflerdir. En az %20 krom içerirler. Nikel oranının düşük olması daha ekonomik olmasını sağlamaktadır. Diğer paslanmaz çelik türlerine göre daha yeni bir türdür ve kimyasal, nükleer, petrol ve gaz gibi farklı sektörlerin, ekipmanların ve borularının imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır. (Leite vd., 2019; Westin, 2010).

### 2.2.5. Çökeltme Sertleşmeli Paslanmaz Çelikler

İyi korozyon direncine ve çok yüksek mukavemetli malzemelere duyulan ihtiyaçtan dolayı oluşturulmuş paslanmaz çelik türüdür. Çökelti sertleştirici paslanmaz çelikler ağırlıkça yaklaşık olarak %13-30 Cr, %3-8 Ni ve az miktarlarda bakır, alüminyum, fosfor, titanyum, molibden ve niyobyum içerirler. Bu alaşımlar, şekillendirilebilirlik, kaynaklanabilirlik, mukavemet, tokluk ve korozyon direncinin çok iyi bir birleşimine sahiptir. Havacılık, kimya, petrokimya, gıda, metal işleme endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çökeltme sertleşmeli paslanmaz çeliklerinin sertleştirilmesi, şekillendirme ve işlemeden sonra 400°C ile 700°C arasındaki sıcaklıklarda yaşlanma ile yapılır. Bu yaşlanma sürecinde, sert metaller arası bileşiklerin östenitik/martenzitik matriste çökmesi

veya östenitin martenzite dönüşümünü kolaylaştırarak çökeltme sertleşmesi yapılır (Y. Sun ve Bell, 2013).

### 2.3. Bor Karbür (B<sub>4</sub>C)

Bor karbür (B<sub>4</sub>C), yüksek sertlik (29,1 GPa), düşük yoğunluk (2,52 g cm<sup>-3</sup>), yüksek erime noktası (2450 °C), yüksek elastik modül (448 GPa), kimyasal kararlılık, yüksek nötron soğurma vb. gibi özelliklere sahip bir seramik malzemedir. Bor karbür, elmas ve kübik bor nitrürden sonra üçüncü en sert malzemedir. Olağanüstü sertliği, metallerin ve seramik malzemelerin parlatılması ve su jeti ile kesilmesi gibi işlemler için uygun bir aşındırıcı toz haline getirir. Bor karbür kaplamalı takımlar, pirinç, paslanmaz çelik, titanyum alaşımları, alüminyum alaşımları, dökme demir vb. gibi çeşitli alaşımların kesilmesi için kullanılır. Düşük özgül ağırlık, yüksek sertlik ve darbe direncinin kombinasyonu ile araç ve gövde zırhı olarak kullanılmasına olanak sağlar. Bor karbürün modül/yoğunluk oranı, yüksek sıcaklıktaki malzemelerin çoğundan daha yüksektir (1,8x10<sup>7</sup> m) ve bu nedenle güçlendirici bir ortam olarak etkili bir şekilde kullanılabilir (Suri vd., 2013).

### 2.4. Silisyum Karbür (SiC)

Silisyum karbür (SiC), yüksek erime noktası, düşük termal genişleme, hafiflik, yüksek sertlik, korozyon ve aşınmaya karşı direnç, hem düşük hem de yüksek sıcaklıklarda yüksek kırılma mukavemeti, yüksek termal iletkenlik, düşük kimyasal reaktivite gibi birçok mükemmel fiziksel ve kimyasal özelliğe sahip bir seramik malzemedir (Feng vd., 2018; Majid, 2018). SiC güçlü kovalent bağlardan oluşur ve bu bağlar gelişmiş yüksek erime noktası ve sertlik özelliklerinin elde edilmesini sağlar. Bu nedenle, termal ve enerji ile ilgili alanlara ek olarak havacılık, zırh korumaları ve nükleer füzyon uygulamaları alanında da kullanılabilir. SiC, 3,16-3,3 g/cm<sup>3</sup> arasında değişen bir yoğunluk değerine sahiptir. Silisyum karbür; α-SiC ve β-SiC olmak üzere iki farklı kristal yapıdan meydana gelir. β-SiC kübik, α-SiC ise hegzagonal ve rombohedral yapılardan oluşur (Pierson, 1996).

## 2.5. Ferrokrom Karbür (FeCrC)

Ferrokrom karbür çoğunlukla demir-çelik sektöründe mukavemet arttırıcı ve korozyon karşıtı bir malzeme olarak kullanılır. Genel olarak %45-95 arası krom içerir. Yüksek sıcaklıklarda elektrik fırınlarında veya plazma fırınlarda kromitin karbonla indirgenmesi ile üretilir. Ferrokromların genel kimyasal bileşimi %60-70 Cr, %2-3 Si ve farklı karbon oranlarında:% 5-8 C arasında yüksek karbonlu (HC), %1-4 arasında orta karbonlu (MC) ve %0,1-0,5 C arasında ve düşük karbonlu (LC) sınıflar bulunur. Ferroalaşımın esas olarak çelik yapımında kullanıldığından, çelik endüstrisinin değişen gereksinimlerini karşılamak için farklı derecelerde alaşımlar geliştirilmiştir. Metalürjide krom cevheri çoğunlukla paslanmaz çelik üretiminde kullanılır. Silah sanayinin de en önemli malzemesi ferrokromdur (Gasik, 2013). Fe-Cr-C alaşım sistemleri, çeşitli aşınma ve korozyon mekanizmalarına maruz kalan yüzeyleri korumak ve yüksek maliyetli makine parçalarının ömrünü uzatmak için yüzey kaplama işlemlerinde de önemli bir etkiye sahiptir (Hornung vd., 2013).

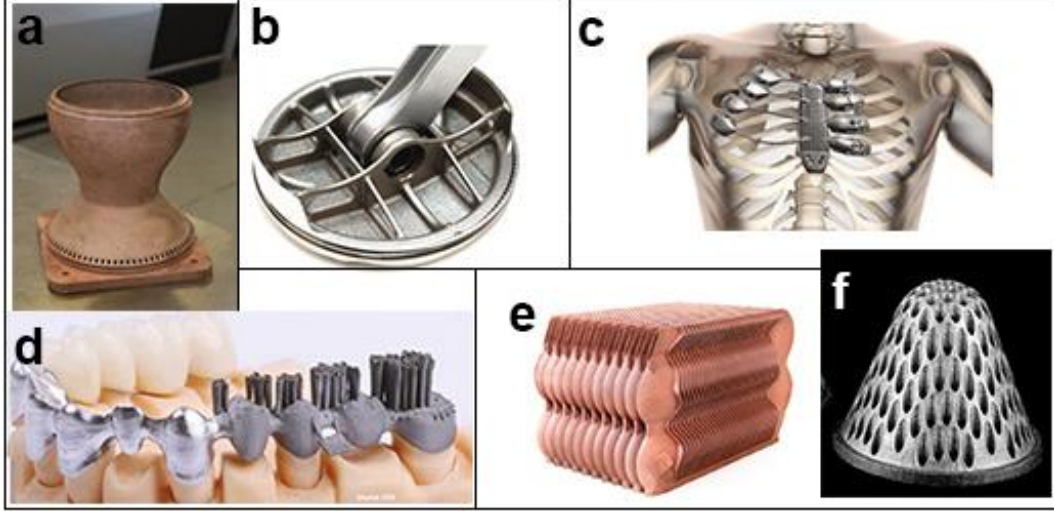
### 3. KATMANLI İMALAT

Katmanlı imalat (Kİ) yönteminde yapıların imalatı, talaşlı imalat gibi geleneksel yöntemlerin aksine, 3B model verilerinden yararlanılarak genellikle üst üste katmanlar halinde biriktirerek gerçekleştirilir (Tan vd., 2019). Çok az bir malzeme kaybı, maliyet tasarrufu, karmaşıklıktan uzak üretim ve net şekle yakın ürün elde edilmesi gibi özellikleri ile Kİ yöntemi son yıllarda ilgi odağı olmuştur. Son yirmi yılda, endüstride hızlı bir gelişme göstermiştir. İlk çıktığı zamanlarda hızlı prototipleme ve hızlı kalıplama gibi farklı isimlerde de kullanılmıştır (Frazier, 2014). Maliyet tasarrufu ve sadeliğine ek olarak Kİ yönteminin yüksek enerji verimliliği, farklı metallerin birlikte kullanılabilmesi, sürdürülebilir üretim süreci, yüksek üretim hızı gibi birçok başka avantajı da vardır. Bu avantajlarla Kİ yönteminin yakın gelecekte üretim şartlarını değiştirmesi beklenmektedir. Sektörlerin yanı sıra dünyanın dört bir yanındaki araştırmacılar Kİ yönteminin üretim süreçleri için uygulanabilirliği konusunda araştırmalar yapmaktadır. Kİ yöntemi metaller, seramikler, polimerler, kompozitler ve biyolojik sistemler dahil olmak üzere tüm malzeme sınıflarındaki üretimi kapsamaktadır (Badiru vd., 2017; Frazier, 2014). Araştırma laboratuvarlarında ve üretim sektörlerinde Kİ yöntemi ile üretilmiş metal parçaların bazı örnekleri Şekil 3.1’de gösterilmektedir.

Temeli ergime ve katılaşmaya dayanan katmanlı imalat işleminin en önemli özelliklerinden biri de kaynak metalürjisi ve teknolojileri alanındaki bilgi birikiminden yararlanılıyor olmasıdır. Kaynak alanındaki bu deneyim, ek imalat sürecini ve üretilen parçaların mikroyapısal özelliklerini daha iyi anlamak için kullanılabilir (Oliveira vd., 2020).

Metallerin katmanlı imalatında, toz yatağı füzyonu (Powder Bed Fusion, PBF) ve yönlendirilmiş enerji biriktirme (Direct Energy Deposition, DED) olmak üzere yaygın olarak kullanılan iki teknik vardır. Toz yatağı füzyonu tekniği, seçici lazer sinterleme (SLS), seçici lazer eritme (SLM) ve elektron ışını eritme (EBM) yöntemlerini içerir. Metallerin üretimi için SLM ve EBM kullanılmaktadır. Bu iki yöntemde 3B bilgisayar destekli tasarım (CAD) dosyaları katmanlara ayrılır ve veriler yazdırılmak üzere Kİ cihazına gönderilir. Daha sonra, makinede ısı kaynağı ile birlikte son ürün tamamlanana kadar tozları katmanlar

halinde eriten bir dizi çevrim gerçekleştirilir. Her döngüde, sabit bir toz kalınlığı bir alt malzeme üzerinde biriktirilir ve tarama desenine göre toza bir ısı uygulanır (Tan vd., 2019).



Şekil 3.1. Katmanlı imalat ile üretilmiş malzemeler; a) Bakır roket nozulu, b) Otomotiv pistonu, c) Göğüs kemiği implantı, d) Diş implantı, e) Bakır malzemeden karmaşık ısı eşanjörü, f) karmaşık filtre (Milewski, 2019)

Yönlendirilmiş enerji biriktirme (DED) yöntemi de diğer katmanlı imalat teknolojileri gibi katı bir modeli dilimlemeye ve parçayı katmanlar halinde bir şekilde oluşturmaya dayanır. Bu temel yaklaşım polimerler, seramikler ve metal matrisli kompozitler için kullanılmaktadır. Ancak bu yöntem ağırlıklı olarak metal malzemelere uygulanmaktadır. Bu nedenle, bu teknolojiye genellikle “metal biriktirme” teknolojisi de denilmektedir. Yönlendirilmiş enerji biriktirme yönteminde, bir alt tabakayı ısıtmak ve erime havuzunda biriktirilen malzemeyi ergitmek için, enerji dar ve odaklanmış bir bölgeye iletilir. Toz yatağı füzyon yöntemlerinden farklı olarak DED yönteminde, bir toz yatağına önceden yerleştirilmiş bir malzemeyi ergitmek için değil, katmanlar biriktirildikçe beslenen malzemeleri ergitmek için kullanılır. Bu yöntemde beslenen malzemeler toz veya tel şeklindedir.

DED yönteminin avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Farklı malzemeler, istenilen özelliklerde tek bir yapı altında bir araya getirilebilir.
- Dövme ve döküm gibi geleneksel üretim süreçlerine göre herhangi bir alet veya kalıp olmadan serbest formda üretim yapılabilir.

- Çok büyük iş parçalarının üretimi için örnek prototipler yapılabilir.
- Daha yüksek biriktirme oranı veya üretim hızı elde edilebilir.
- Hasarlı parçaların onarımı veya mevcut parçaları aşınmaya ve korozyona dayanıklı hale getirmek için kaplama yapılabilir.
- Ön kalıplara veya mevcut parçalara metal ekleyerek üretim yapılabilir.

Dezavantajları ise;

- Genelde üretilen parçalarda kalıntı gerilme oluşur, bu yüzden gerilim giderme işlemlerine ihtiyaç duyulabilir.
- Kalıntı gerilmeden kaynaklanan distorsiyonlar oluşabilir.
- Toz yatağı füzyon gibi katmanlı imalat yöntemlerine göre yüzey pürüzlülüğü daha yüksektir (Dutta, 2020).

Toz besleme yönteminde temel olarak toz karışımlarının değiştirilerek kontrol edilebilir olması mikroyapının geliştirilmesi konusunda özgürlük sağlar. Bu özelliği ile farklı malzemelerden oluşan heterojen parçalar da üretilebilir. Fakat ergime sıcaklıklarının farklılıkları gibi sorunlardan dolayı son üründe katılma sorunları (gözenek, boşluk) görülebilir. Bu boşluk ve gözeneklerin varlığı, yöntem için yorulma, aşınma ve mekanik özelliklerinin azalması gibi bir dezavantaja sebep olur. Dezavantajlarına rağmen, bu teknoloji, küçük ve orta büyüklükte parçaların yapımında çeşitli endüstriler tarafından kullanılmaya başlanmıştır (Gibson vd., 2016; Shipley vd., 2018).

Yönlendirilmiş enerji biriktirme yöntemlerinden bir diğeri olan tel besleme yöntemlerinde ise, biriktirilen malzemenin hacmi beslenen telin hacmi kadardır ve eriyik havuzundan küçük sıçramalar hariç %100'e yakın besleme verimliliği vardır (Gibson vd., 2016). Ayrıca daha yüksek biriktirme hızı (> 10 kg/sa), düşük gözenekli mikroyapı, daha verimli enerji kullanımı (ark için %90'a kadar) ve net şekle yakın üretim kabiliyeti gibi avantajlara sahiptir (Abe ve Sasahara, 2016; González vd., 2017). Tel besleme yöntemlerinde genel olarak, ısı kaynağı ark, lazer veya elektron ışını olabilir. Tel beslemeli ve ark tabanlı katmanlı imalat işlemleri tel ark katmanlı imalat (TAKİ) olarak isimlendirilir.



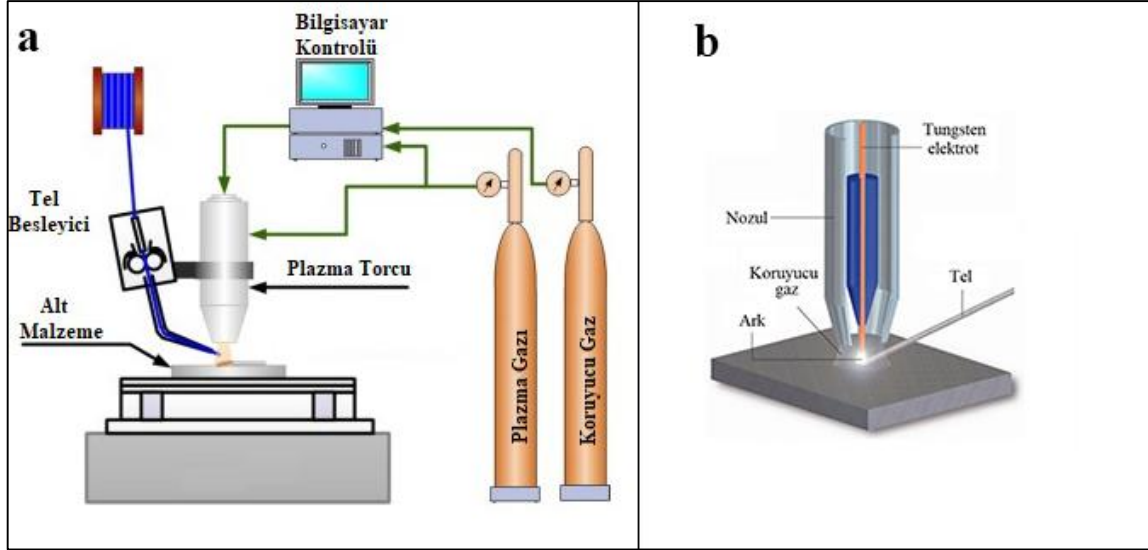
### 3.1. Tel Ark Katmanlı İmalat (TAKİ)

Tel Ark katmanlı imalat (TAKİ), önemli stratejik avantajlar sağlayan yeni bir katmanlı imalat teknolojisidir (F. Martina vd., 2012). TAKİ yöntemi doğrudan enerji biriktirme kategorisinde sınıflandırılmaktadır ve ısı kaynağı olarak kullanılan bir elektrik arkı ile hammadde olarak kullanılan bir telin kombinasyonu olarak tanımlanır (Rodrigues vd., 2019). Bu teknoloji, ark kaynağı ile tel beslemeyi bir araya getirerek, tasarım özgürlüğü, düşük ilk yatırım maliyeti, düşük malzeme maliyeti (toz malzemeye göre) ve düşük üretim süresi gibi avantajlar sağlamaktadır. Bu açıdan TAKİ yöntemi, özellikle değeri yüksek malzemelerden yapılan özel ve büyük iş parçalarının üretiminde kullanım uygunluğu açısından öne çıkmaktadır. Ayrıca biriktirme oranı (50-130 g/dk arasında), diğer katmanlı imalat yöntemlerine göre daha yüksektir. Bu özelliği ile hızlı bir üretim sağlar (Gibson vd., 2016).

Temel bir TAKİ sisteminin genel unsurları tel besleyici, ark kaynağı ünitesi, koruyucu gaz, bilgisayar, robotik kol veya üç eksenli manipülatör ve kaynak torcundan oluşur. Genel hatlarıyla TAKİ biriktirme bölgesinin şematik görünümü Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu şematik görüntüde tel, bir tel besleyici yardımı ile nozul dışından ark bölgesine gelmektedir. Tel tungsten inert gaz kaynağı ve plazma ark kaynağında nozul dışından beslenmektedir. Gaz metal ark kaynağı ve soğuk metal transferi uygulamalarında ise tel, nozul içerisinden tel besleyici kullanılarak gelir. TAKİ yöntemi diğer katmanlı imalat yöntemlerine benzer şekilde, üç boyutlu CAD modelleme yazılımı ile veya üç boyutlu tarama işlemleri ile başlar. Bu model üretim geometrisi (torç yolu) oluşturmak için kullanılır. Bu adımı uygun kaynak parametrelerinin (ilerleme hızı, tel besleme hızı akım, voltaj vb.) belirlenmesi takip eder (D. Ding vd., 2015).

Belirlenen üretim geometrisi ve kaynak parametreleri ile iki boyutlu hareket ile ilk katman alt malzeme üzerinde oluşturulur, ikinci katman için torç, üçüncü boyutta katman yüksekliği kadar yükseltilir ve ilk katmanın üzerinde ikinci katman oluşturulur, bu işlemler parça tamamlanana kadar devam eder. Daha sonra bu işlemlerden bağımsız olarak, üretilen malzemede oluşan fazlalıklar talaşlı imalat yöntemi ile giderilebilir ve/veya ısı işlemler uygulanabilir. Bu işlemler basit ve kolay görülebilir, fakat bu adımların tümü yüksek kaliteli parçayı üretmek için dikkatle hesaplanması ve uygulanması gereken çok sayıda küçük alt

adım içerir. Bazı adımlar sırasında oluşan bir hata, parçanın mikroyapısını, mekanik özelliklerini ve parçanın genel kalitesini etkileyen büyük kusurlara neden olabilir. Bunun gibi durumlardan dolayı karmaşık bir süreç olduğu açıktır (Gibson vd., 2016; González vd., 2017).



Şekil 3.2. a) TAKİ sistemi, b) TAKİ biriktirme bölgesinin şematik görünümü (D. Ding vd., 2015)

Malzeme üretimi katmanlar halinde gerçekleştirilirken, kaynak boncukları üst üste ve üretim yönünde birleşir. Bu birleşme sırasında malzeme türü, tel besleme açısı, çevresel koşullar vb. durumlardan dolayı malzemede dalgalanmalar oluşabilir. Üç boyutlu üretilen malzemede dalgalanmalar da dahil olmak üzere en az 5-6 mm genişliğinde düz bir metalik duvar oluşturulur. Üretim sonrası işlemler ile bu dalgalanma ile oluşan fazlalıklar atılır. Kalan kısım ise etkili (efektif) duvar genişliği olarak adlandırılır (Busachi vd., 2015). Yüksek ısı girdisi nedeniyle, TAKİ yöntemi ile oluşturulan bazı parçalarda kalıntı gerilme ve distorsiyon görülebilir. Bu durum oluşturulan parçaların mekanik performansını düşürür ve gerekli toleransların elde edilmesinde zorluklara neden olur (Jialuo, 2012 Qui, 2013). Martina ve ark. (F. Martina vd., 2012) TAKİ yöntemini geleneksel üretim ile kıyaslandığında, oluşan atığın genel olarak %90'dan % 10'a düşürüldüğünü belirtmiştir. TAKİ yönteminin, diğer katmanlı imalat teknolojileri ve geleneksel üretim yöntemlere göre daha düşük yatırım ve gerekli ekipmanların piyasada kolay bulunabilir olması gibi bazı avantajları vardır.

TAKİ yöntemleri ark özelliklerine bağlı olarak kullanılan ısı kaynağına göre üç gruba ayrılabilir: 1) Gaz tungsten ark kaynağı (TIG), 2) Gaz metal ark kaynağı (MIG/MAG), 3) Plazma ark kaynağı (PAW) ve bunlara ek olarak MIG kaynağından modifiye edilen, yüksek biriktirme oranını korurken düşük sıçrama ve yüksek enerji verimliliği sunan soğuk metal transfer (CMT) kaynağı eklenebilir.

### **3.1.1. Tungsten İnerit Gaz Kaynağı ile Tel Ark Katmanlı İmalat (TIG - TAKİ) Sistemi**

Bu işlemde biriktirme yapmak için ısı kaynağı olarak gaz tungsten ark kaynağı (TIG) sistemi kullanılır. Daha yüksek ark verimliliği nedeniyle oldukça yoğun bir metal yapı üretilebilir. TIG sisteminde diğer kaynak sistemlerine göre biriktirilen parçalarda daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde edilir. Bu sistemde tel, nozuldan bağımsız olarak dışarıdan ark havuzuna bir tel besleyici yardımı ile aktarılır. Bu durum için torç ile tel besleyici arasında bir senkronizasyon sağlanması gerekmektedir. TIG kaynağında ergimeyen tungsten elektrot kullanılıyor olması, diğer TAKİ yöntemlerine göre daha yüksek sıcaklıklara çıkılmasını ve beslenen telin çapaksız bir birikimle tamamen ergimesini sağlar. Son yıllarda, TIG-TAKİ yönteminin malzeme üretimindeki yeterliliği nedeniyle, araştırmacılar metal parçaların katmanlı imalatı için bu süreç üzerinde çalışmaktadırlar. Üretilen malzemelerin boyutsal doğruluğunun sağlanması, daha iyi mekanik özellikler ve yüzey görünümü elde etmek için sıcaklık kontrolü önemlidir. Metal biriktirme işlemi sırasında ısı transferi ve sıcaklık yoğunluğu, parçanın geometrik yapısını etkiler. Sıcaklık özellikle ilerleme yolundaki dönüş noktalarında önemli ölçüde artabilir ve parça geometrisini ve yüzey kalitesini etkiler. Bunun gibi sıcaklığın etkili olduğu durumlarda TIG-TAKİ yöntemi kullanımı etkin rol oynamaktadır (Chen vd., 2016; Gokhale ve Kala, 2020; Marinelli, Martina, Lewtas, vd., 2019).

### **3.1.2. Plazma Ark Kaynağı ile Tel Ark Katmanlı İmalat (P - TAKİ) Sistemi**

Plazma ark kaynağı, daha iyi ark kontrolü, yüksek ilerleme hızı ve daha küçük ısıdan etkilenen bölge gibi özelliklerinden dolayı TAKİ için diğerlerine göre oldukça avantajlıdır.(Bai vd., 2018). Plazma ark kaynağının yüksek enerji yoğunluğuna sahip olması, daha yüksek biriktirme hızı ve daha düşük yüzey pürüzlülüğü elde edilmesini sağlar. Ayrıca yüksek enerji yoğunluğu sayesinde gözeneklilik ve füzyon eksikliği gibi metalürjik

sorunlar oluşmaz. Tungsten inert gaz kaynağı TAKİ yöntemindeki gibi tel, nozuldan bağımsız olarak dışarıdan ark havuzuna aktarılır. Bu durum için TIG yöntemine benzer şekilde, torç ile tel besleyici arasında senkronizasyon sağlanması gerekmektedir. TAKİ yöntemlerinde görülen kalıntı gerilme ve distorsiyon gibi olumsuz durumlar, ısıdan etkilenen bölgenin düşük olması nedeniyle plazma ark kaynağında diğer yöntemlere göre daha düşük olmaktadır. Ortalama biriktirme hızı 2-4 kg/sa' tır. Titanyum ve paslanmaz çelik malzemeler için bu yöntem ile orta ve büyük boyutlu iş parçalarında yüksek mekanik özellikler sağlanır. Bu özelliklerle birlikte, plazma kaynağının diğer kaynak yöntemlerine göre yüksek bir başlangıç maliyeti vardır (Artaza vd., 2020; S. Singh vd., 2021).

### **3.1.3. Gaz Metal Ark Kaynağı ile Tel Ark Katmanlı İmalat (MIG - TAKİ) Sistemi**

Gaz metal ark kaynağı sistemleri düşük maliyetli ve sade kaynak sistemleridir ve tel ark katmanlı imalatta verimli bir şekilde kullanılabilir. Nozul içerisinden, tel besleyici ile desteklenen tel kullanılır, ayrı bir tel besleyici kullanımına gerek yoktur. Ortalama biriktirme hızı 3-4 kg/sa'tir. Diğer ark yöntemlerine göre daha zayıf ark kararlılığına sahiptir, bundan dolayı sıçramalara neden olur. Sıcak iş takım çeliği ile yapılan bir çalışmada katmanlar arası kuvvetli bir birleşim elde edilmemesine rağmen yatay konumda güçlü bir gerilme dayanımı elde edilmiştir. İki farklı tel malzeme kullanımına izin veren tandem gaz metal ark kaynağı sistemleri de geliştirilmiştir. Bu sistemde Ortalama biriktirme hızı 6-8 kg/sa'e çıkar ve metaller arası bileşik kolay bir karıştırma ile elde edilir (S. Singh vd., 2021; T. Wang vd., 2018).

### **3.1.4. Soğuk Metal Transferi İşlemi ile Tel Ark Katmanlı İmalat (CMT - TAKİ) Sistemi**

Soğuk metal transferi (CMT) işlemi, MIG kaynağının modifiye edilmiş halidir. Yüksek biriktirme oranını korurken, düşük sıçramalı, yüksek enerji verimliliğine sahiptir. Bu uygulamada ergitilen damlacıkların transferi yöntemiyle biriktirme yapılır. Malzeme biriktirme işlemi dört adımda gerçekleştirilir. İlk adım, nozul içerisinden geçen telin nozul içinde oluşan ark ile ergitilmesidir. İkinci aşamada, ergiyen tel, sıvı metal damlası olarak alt tabaka ile temas halinde aşağı iner. Kısa devre oluşması ile güç kaynağı denetleyici tarafından enerji kesilir ve ark söner. Üçüncü aşamada, yüzey gerilimi nedeniyle ve telin

kaynak havuzundan mekanik olarak geri çekilmesi ile damlacık telden ayrılır. Son olarak, dördüncü adım, biriktirme işlemi döngüsünü devam ettirmek için arkın yeniden başlatılmasını içerir. Sonuç olarak, sisteme düşük bir ısı girdisi sağlanmış olur. Isı girdisinin düşük olması, bu sistemin ısı kaynağı olarak TAKİ yönteminde kullanılmasını avantajlı hale getirir. Bu yöntemde de yüksek mukavemetler elde edilmesine rağmen düşük miktarlarda da olsa anizotropi görülmektedir. MIG kaynağına benzer olarak tel nozul içerisinden geçerek ark ergitilir. Ortalama biriktirme hızı 2-3 kg/sa'tir (Cadiou vd., 2020; S. Singh vd., 2021).

## 4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Son dönemde TAKİ yöntemleriyle yapılan çalışmalarda süreç ve farklı malzemelerin üretilmesi konularına ağırlık verilmiştir. Bu yöntemlerde demir, alüminyum, titanyum alaşımları ve paslanmaz çelik malzemeler üzerine yapılan çalışmalar yoğunluktadır. Bu çalışmalar özellikle TAKİ sistemlerinde süreç geliştirme ve üretilen malzemelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması başlıkları altında incelenmiştir.

### 4.1. Tel Ark Katmanlı İmalat Sistemlerinde Süreç Geliştirme

TAKİ yöntemlerinde süreç planlaması, oluşacak ürünün kalitesini etkileyen önemli bir adımdır. TAKİ işlem planlamasındaki önemli adımlar arasında, katmanlar için biriktirme yolları, bilgisayar kontrolü ve parametrelerinin (tel besleme hızı, ilerleme hızı ve ark akımı) ayarlanması yer alır.

Isı sağlayıcısı olarak TIG kaynağı, tel malzemesi olarak 304 paslanmaz çelik kullanılan çalışmada (Dinovitzer vd., 2019) tek katman malzeme biriktirme yapılarak tel besleme hızı, ilerleme hızı ve ark akımının etkisi incelenmiştir. Tel besleme hızının etkisi incelendiğinde, tel besleme hızı ile katman yüksekliği arasında doğrusal bir değişim görülmüştür. Birikim yapıldığında yüksek ve dar bir katman oluşuyorsa bu tel besleme hızının nispeten yüksek olmasının sonucu olarak açıklanmaktadır. Tel besleme hızının artırılması ile katman en boy oranı yükselmektedir. Üretilen katmanın dalgalanması ve alt malzemede meydana gelen ergime derinliğinin ise tel besleme hızından bağımsız olduğu belirtilmiştir. Farklı ilerleme hızları ile tek katman üretimler yapıldığında ilerleme hızı arttıkça, katman genişliği ve erime derinliği azalırken, katman yüksekliğinde önemli bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Isı girdisinin neden olduğu erime derinliğinin, ilerleme hızının artması ile düşeceği açıklanmıştır. Artan ilerleme hızına bağlı olarak dalgalanma da hafif bir artış olduğu belirtilmiştir. Çalışmada ark akımı değeri arttıkça katman genişliği ve erime derinliği miktarları artmış, katman yüksekliğinde ise önemli bir değişiklik görülmemiştir. Ayrıca ark akım değeri arttıkça dalgalanmaların azaldığı bildirilmiştir. Argon akış hızının ise katman yüksekliği, katman genişliği, erime derinliği ve dalgalanmalar

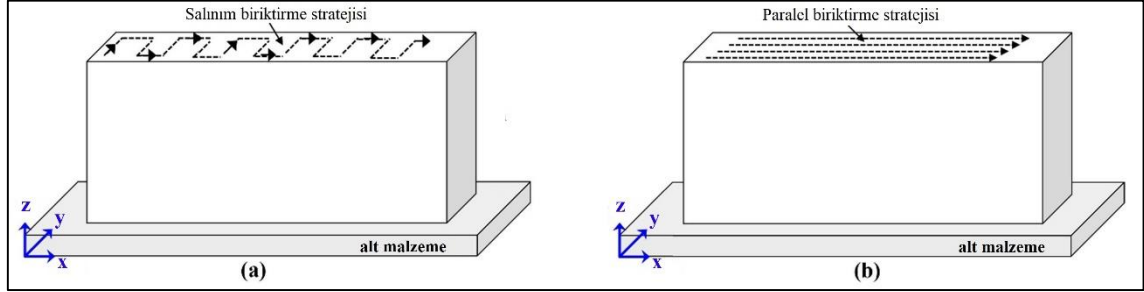
üzerinde hiçbir etkisi gözlenmemiştir, bu nedenle literatürde kritik bir parametre olarak kabul edilmemektedir.

Katman geometrisinin incelendiği bir başka çalışmada (Benakis vd., 2020) yüksek ve düşük frekanslı darbeleri-TIG kaynağı ile çeşitli tek katman numuneler üretilmiştir. Hem yüksek hem de düşük frekanslı darbe ile farklı tel besleme ve ilerleme hızlarında yapılan üretimlerde, katman genişliğinin, yüksekliğinin ve erime derinliğinin kontrol edilebileceği belirtilmiştir. Yüksek frekanslı darbenin daha düşük ısı girdisi ve ark daralması özelliği ile ısıdan etkilenen bölgeyi azalttığı görülmüştür. İncelemede aynı deneysel düzende ilk katman için (alt malzeme ile temas) yüksek erime derinliği ve geniş katman oluşumunun uygun olacağı, sonraki katmanlar için ise düşük erime derinliği ve dar katman oluşumunun uygun olacağı açıklanmıştır. Bu durum yüksek ve düşük frekanslı darbe yöntemi kullanılarak sağlanmıştır.

MIG kaynağı kullanılan TAKİ sistemi ve katman geometrisinin incelendiği bir diğer çalışmada (Le vd., 2021) ise kaynak akımı, voltajı ve ilerleme hızının, tek katman numunelerin boyutunu ve şeklini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Voltaj ve ilerleme hızı katman genişliği üzerine, kaynak akımı ve ilerleme hızının katman yüksekliği üzerine etkili olduğu açıklanmıştır. Optimize edilmiş işleme parametreleri (ark akımı: 122A, ark voltajı: 20V ve ilerleme hızı: 368 mm/dk) kullanılarak ısı girdisini en aza indirilirken, katman genişliği ve katman yüksekliğine sahip düzgün ve düzenli tek katman numuneler üretilmiştir. Ayrıca bu sistem için tel besleme hızı kaynak akımına göre otomatik olarak ayarlanmaktadır. Kaynak akımındaki artışla tel besleme hızının arttığı belirtilmiştir.

TAKİ ile ilerleme (biriktirme) yolu farklılıklarının incelendiği bir çalışmada (A. K. Syed vd., 2021) salınım ve paralel geçiş biriktirme stratejileri (Şekil 4.1) ile Ti-6Al-4V malzemesinin üretimi yapılmıştır. Sonuçta her iki biriktirme stratejisinde de, büyük ısı değişimleri ile yönlü katılaşmanın bir sonucu olarak, malzeme üretim yönü boyunca sütunsal birincil  $\beta$  taneleri oluşmuştur. Salınlı biriktirme stratejisinde daha yüksek ısı girdileri ve daha yavaş soğutma hızları ortaya çıkmıştır. Böylece daha geniş sütunlu birincil  $\beta$  tanecikleri ve daha kaba bir dönüşüm  $\alpha + \beta$  mikroyapısı oluşmuştur. Kaba dönüşüm mikroyapısının bir sonucu olarak, salınlı biriktirmede, paralel biriktirmeye göre daha düşük akma ve gerilme

mukavemeti elde edilmiştir. Paralel biriktirmedeki daha ince dönüşüm mikroyapısı, çatlak başlangıcına karşı daha fazla dirençli bir yapı oluşturmuştur.



Şekil 4.1. a) Salımlı, b) Paralel biriktirme stratejileri, (A. K. Syed vd., 2021)

İlerleme yolu stratejisinin incelendiği başka bir çalışmada (Dinovitzer vd., 2019) katmanlar her defasında aynı başlangıç noktasından ve bitiş noktasından hareketle biriktirilmiştir. Tüm katmanların aynı noktadan başladığı biriktirme işleminde, üretilen malzemenin başlangıcında malzeme yüksekliği yüksek bir seviye iken sonlarda malzeme yüksekliği azaldığı görülmüştür. Bu yükseklik farkının daha fazla katman biriktirildiğinde veya katmanlar arasında değişen biriktirme yönleri kullanılarak azalacağı belirtilmiştir. Bitiş noktasından başlanan çalışmada ise bu yükseklik farklılıkları görülmemiştir.

TAKİ yönteminde biriktirme sırasında ısı girdisinin düşük olması yetersiz ergimeye, düzensiz birikmeye ve birleşmemiş katmanlara neden olurken, aşırı miktarda ısı girdisi ise üretilen malzemenin mikroyapı, katman geometrisi ve mekanik özelliklerini etkilemekle birlikte önceden biriktirilmiş katmanların yeniden erimesine de neden olmaktadır. Aşırı miktarda oluşan ısıyı azaltmak için yapılan bir çalışmada (Dinovitzer vd., 2019) katmanlar arası geçiş yapılırken ısı girdisi azaltılarak deneyler yapılmıştır. Isı girdisinin her katman arasında %5, %10 veya %20 art arda azaltılması ile yapılan deneylerde ısı girdisinin %20 azaldığı durumda en iyi sonuç elde edilmiştir. Bu değer kullanılan malzeme özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Ayrıca ısı girdisinin azaltılması için sabit akım değerinde ilerleme hızının artırılmasının daha uygun olacağı belirtilmiştir.

Tel besleme yönü TAKİ yöntemlerinde farklı sonuçlara sebep olabilmektedir. Büyük ölçekli saf Wolfram refrakter malzemelerin üretildiği bir çalışmada (Marinelli, Martina, Ganguly, vd., 2019) tel besleme yönünün etkileri araştırılmıştır. Tel besleme yönünün



gözenekler, yetersiz ergime ve çapak oluşumu gibi yapısal kusurlar üzerinde etkili olduğu değerlendirilmiştir. Ön ve yan tel beslemenin araştırıldığı çalışmada, ön tel besleme yönü ile üretim yapılırken hatasız bir Wolfram yapısı biriktirilmiştir. Biriktirilen malzemenin mikroyapısı da tel besleme yönünden etkilenmiştir. Yan tel besleme ile üretilen yapının aksine, ön tel besleme ile üretilen yapıda simetrik ve düzenli tane dağılımı gözlenmiştir; Ayrıca TIG ile TAKİ yönteminin, Wolfram malzeme için yoğun ve büyük ölçekli bileşenler üretmek için mevcut yöntemlerin yerine kullanabileceği açıklanmıştır.

Farklı tel besleme mesafelerinin (alt malzeme ile tel arasındaki mesafe) araştırıldığı bir TAKİ çalışmasında (C. Wang vd., 2021) ısı sağlayıcısı olarak hibrit plazma ark ve lazer kaynakları ile Ti-6Al-4V tel kullanılmıştır. Alt malzeme ile telin birleşik olduğu durumda, tel ergimiş ancak elde edilen katmanda düzensiz salınımlar oluşmuştur. Alt malzeme ile tel ucu arasındaki mesafe 1-2 mm'ye çıkarıldığında optimum (pürüzsüz ve salınımsız) katman görünümü elde edilmiştir. Bu mesafe daha da artırıldığında (3- 4 mm) telin ucunda büyük damlacıklar oluşmaya başlamış ve eriyik havuzda önemli salınımlara neden olmuştur. Bu durumun malzemedeki yüksek yüzey gerilimi ile açıklanmıştır. Ayrıca tel besleme mesafesi 1 mm'den 4 mm'ye doğru yükselirken katman genişliğinin bir miktar arttığı görülmüştür.

Alt malzemenin önceden ısıtılmadığı çalışmalarda (Fu vd., 2009; J. Wang vd., 2020) katman ile alt malzeme arasında büyük bir sıcaklık değişimi olduğu ve katmanda dikey yönlü sütünsal tanecikler oluştuğu belirtilmiştir. Ara yüzeydeki sıcaklık farkı, oluşan karbürlerin ince ve eşit dağılımlı oluşmasını engellemektedir. Alt malzemenin ısıtıldığı çalışmalarda (Alberti vd., 2016) sıcaklık değişiminde önemli bir düşüş olduğu ve daha iyi özellikler gösteren hücresel ince taneciklerin oluştuğu belirlenmiştir. Bu nedenle, daha iyi mekanik özellikler gösteren ince tanecikli için alt malzemenin ısıtılması uygun olacaktır. TAKİ yönteminde kullanılan telin ön ısıtmasının etkilerinin araştırıldığı bir çalışmada (Kisielewicz vd., 2021), bu durumun katmanların yükseklik ve genişlik ayarlamalarında etkili olduğu, ergime derinliğinin arttığı belirtilmiştir. Isı kaynağı olarak ön ısıtmada elektrik gücü, ana ısıtmada lazer ışınının kullanıldığı çalışmada kararlı bir biriktirme sağlandığı ve yetersiz ergimelerin ortadan kalktığı açıklanmıştır.

TAKİ ile malzeme üretiminde ara katman sıcaklıklarındaki değişimlerin malzemeye etkisi üç farklı durum için incelenmiştir (Jafari vd., 2021). Bunlar;

1) Keskin sıcaklık değişikleri: Biriktirme işleminin başlangıcında (ilk birkaç katman), ara katman sıcaklıkları alt malzemenin güçlü ısı yayma etkisinden dolayı büyük ölçüde artar.

2) Yarı kararlı sıcaklık değişiklikleri: Bu aşamada ısı dağılımı modu, ısı iletiminden ısı radyasyonuna kademeli olarak değişir ve değişimdeki keskinlik küçüktür, bu da bu aşamanın kontrol edilebilir olduğunu gösterir.

3) Kararlı sıcaklık değişiklikleri: Son aşamada, erimiş havuz sabit duruma ulaşır, böylece erimiş havuzdan ısı akışı değişmeden kalır. Bu aşama, TAKİ için en iyi durum olarak kabul edilir, çünkü minimum düzeyde değişikler ile tek tip katmanların biriktirilmesini sağlar.

Ara katman sıcaklıklarının incelendiği başka bir çalışmada ise, yüksek ara katman sıcaklıklarında bir sonraki katman sıcaklığının etkisiyle eriyik havuzu daha uzun süre erimiş halde kaldığı için katmanlarda dalgalanma ve yanlara salınımlar oluştuğu açıklanmıştır (Hauser vd., 2020).

TAKİ ile malzeme üretimi, ön çalışma eksikliği, parametrelerin yeterince kontrol edilememesi, termal deformasyona yol açan ısı birikimi, yetersiz ergime, biriktirmede oluşan dalgalanmalar, oksidasyon, gözeneklilik ve çatlak oluşumu gibi çeşitli hata ve zorluklara sahiptir. Sonuçta en uygun şartlarda bile kalıntı gerilmeler oluşabilmektedir. Bu gerilmeler yüksek boyuttaysa malzemenin mekanik özelliklerini etkilemektedir (J. Ding vd., 2011). Karşılaşılan zorlukları yok etmek veya azaltmak için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Bu gerilmeler yüksek boyuttaysa malzemenin mekanik özelliklerini etkiler. Wu vd. yaptıkları çalışmada (Q. Wu vd., 2020), termomekanik modelleme ve farklı alaşımlar için (Inconel 718, AISI 316 paslanmaz çelik ve Incoloy 800H) kalıntı gerilme ve distorsiyon etkisini incelemişlerdir. Gerilmeler üzerinde en etkili parametrelerin sırasıyla alt malzemenin ön ısıtma sıcaklığı, ark akımı, alt tabaka kalınlığı ve ilerleme hızı olduğu belirtilmiştir.

Martina vd. (F. Martina vd., 2016) TAKİ ile Ti6Al4V malzeme üretiminde oluşan distorsiyon ve kalıntı gerilmeleri ortadan kaldırmak için pasolar arası yüksek basınçlı haddelenme yapmışlardır. Haddelenmemiş numunelerde alt malzeme ile biriktirilen malzeme

arasındaki arayüzde güçlü (500 MPa) bir kalıntı gerilimi görülmüştür. Alt malzemedan üretilen duvarın tepe noktasına doğru gidildikçe kalıntı gerilme miktarının doğrusal olarak düşmekte olduğu ifade edilmiştir. Pasolar arası haddeleme yapıldığında distorsiyon ve kalıntı gerilmenin büyük oranda azaldığı görülmüştür. Özellikle alt malzeme ile biriktirilen malzeme arasındaki ara yüzde bu değer 200 MPa'a kadar düşmüştür. Haddeleme işlemi, üretilen duvarın üst kısımlarında daha yüksek basınç gerilmelerine neden olmuştur. Haddeleme yapmak üretilen malzemenin duvar genişliğinde artışa, katman yüksekliğinde azalmaya neden olmuştur. Katman yüksekliklerinin standart sapması, bu yöntem ile önemli ölçüde azalmıştır. Bu durumun TAKİ sistemlerinde işlem tekrarlanabilirliği sağladığı ve sürecin endüstriyel uygulamasına yardımcı olabileceği belirtilmiştir.

TAKİ yöntemi ile üretilen Inconel 718 ve Ti-6Al-4V malzemelerde kalıntı gerilmelerin etkisi incelenmiştir (Mukherjee vd., 2017). Kalıntı gerilmelere ısı girdisi ve katman kalınlığının etkileri birleştirilmiş termal, akışkan ve mekanik modeller kullanılarak değerlendirilmiştir. Bu model düşük kalıntı gerilime sahip uygun boyutlu parçaların üretimi için gerekli ısı girdisi ve katman kalınlığını belirlemek için geliştirilmiştir. Çalışmada, Ti-6Al-4V malzemedde, aynı işlem koşullarında IN 718'den daha yüksek kalıntı gerilmeler olduğu görülmüştür. Bununla birlikte IN 718 malzemesinin, akma gerilmesine yakın yüksek kalıntı gerilmeler nedeniyle delaminasyon ve burkulmaya karşı daha hassas olduğu belirtilmiştir. Sonuç olarak, duvar şeklinde bir parça üretiminde her bir katmanın kalınlığı azaltılarak, kalıntı gerilmelerin % 30'a kadar azaltılabileceği görülmüştür. Isı girdisinin iki katına çıkarılarak kalıntı gerilmenin yaklaşık %20 oranında azaltılabileceği, fakat bu durumun termal distorsiyonu yaklaşık 2,5 kat artırdığı belirtilmiştir. Bu nedenle, uygun bir ısı girdisinin iyi mekanik özelliklere sahip bir parça üretimi için etkili olacağı açıklanmıştır.

Gözeneklilik, TAKİ sistemlerinde mekanik özellikleri olumsuz etkilemesi nedeniyle yok edilmesi veya en aza indirilmesi gereken diğer bir yapısal kusurdur. Mekanik özellikleri olumsuz etkilemesinin yanında katmanların düzensiz şekillerde biriktirmesine neden olarak üretilen parçaların boyutsal doğruluğunu da etkiler. Gözeneklilik tel malzemesinden (hammadde) veya işlem parametrelerinden kaynaklanabilir (Busachi vd., 2015; Sames vd., 2014). TAKİ üretiminde kullanılan tel ve alt malzeme nem, yağ ve tamamen çıkarılması zor olabilecek diğer hidrokarbon bileşikler gibi yüzey kirliliğine sahiptir. Bu kirliliğe sebep olan malzemeler erimiş havuz tarafından kolayca emilebilirler. Katılma sonrasında bu

malzemeler gözenek oluştururlar. Bu sebeplerden dolayı üretimden önce malzemelerin temizlenmesi gerekmektedir. İşlemden parametrelerinden kaynaklı gözeneklilik ise temel olarak zayıf ilerleme planlaması veya dengesiz biriktirme sürecinden kaynaklanır. Gözenekliliği kontrol etmek için yapılan bir araştırmada (B. Wu vd., 2018) aşağıdaki yöntemler önerilmiştir.

- Isı kaynağı olarak kısa devre veya darbe (pulse) özelliği olan MIG ve CMT kaynakları kullanımı,
- En iyi kalitede koruyucu gaz kullanımı ve koruyucu gaz iletimi için kısa ve organik olmayan boru kullanımı,
- Üretimde temizlenmiş ve kaliteli tel ve alt malzeme kullanılması,
- Deney öncesi tek katman olarak malzeme biriktirerek, şekil olarak optimizasyonun sağlanması,
- Üretim sırasında termal profilin izlenmesi ve kontrolü,
- İşlem sonrası uygun ısıl işlem uygulanması, olarak açıklanmıştır.

TAKİ sistemlerinde görülen diğer bir hata ise çatlak ve ayrışma oluşumudur. Çatlak ve ayrışma kullanılan malzeme özellikleri ve ısıl döngüden dolayı oluşur. TAKİ ile üretilen malzemelerde tane sınırı çatlağı ve katılaşma çatlağı görülür. Tane sınırı çatlağı çözünme veya çökelti oluşumu sırasındaki değişimlerden kaynaklanır. Katılaşma çatlağı ise katılaşma sırasındaki tane akışındaki bir engelden veya erimiş havuzdaki yüksek gerilimlerden oluşur. Ayrışma ise uygun olmayan çökeltme sıcaklığının veya katmanların yeniden eritilmesinin bir sonucu oluşur (Sames vd., 2014). Yapılan bir araştırmada (S. R. Singh ve Khanna, 2021) çatlakların ve ayrışma hatasının oluşmaması için, biriktirme başlamadan alt malzemenin ısıtılması, biriktirme sırasında yavaş soğutma hızı ve uygun bileşime ve farklı özelliklere sahip karışık teller kullanmanın uygun olacağı önerilmiştir.

Tel ark katmanlı imalat (TAKİ) yöntemi ile tel besleyici ile beslenebilecek herhangi bir malzeme kullanılabilir. Titanyum esaslı alaşımlar TAKİ sistemlerinde çok fazla incelenen malzemelerdendir. Bu yöntem ile Ti alaşımlarının maliyetinde önemli azalmalar sağlanmaktadır. Wang vd. yaptıkları araştırmada (F. Wang vd., 2013) TIG-TAKİ ile üretilen Ti-6Al-4V iş parçalarının mikroyapısı, çekme ve yorulma özelliklerini incelemiştir. Üretilen parçaların makroyapısında anizotropi görülmüştür. Alt tabakadan üretilen parça yönüne

doğru büyüyen büyük kolonsal  $\beta$  taneciklerinden oluşmuştur. Parçanın üst kısmının ise tamamen ince  $\alpha + \beta$  Widmanstätten mikroyapısından oluştuğu belirlemiştir. Üretilen parçaların ortalama mukavemeti döküm Ti-6Al-4V malzemeye göre daha düşük, sünekliği ise döküm Ti-6Al-4V malzemeye ile yakın bir değer olarak belirlenmiştir. Yatay çekme numunelerinde dikey numunelere göre yüksek mukavemet düşük süneklik görölmüştür. TAKİ ile üretilen parçaların yorulma ömrü döküm Ti-6Al-4V malzemeye göre daha iyi çıkmıştır. Fakat test sırasında az sayıda test numunesi erken bir aşamada kırılmıştır. Bu durum biriktirme sırasında telin kirlenmesinin neden olduğu sıkışmış gaz gözeneklerine bağlanmıştır. Son olarak TAKİ yöntemi ile Ti-6Al-4V alaşımından üretilen parçalarda gözeneklilik yok edildiğinde çok iyi mekanik özelliklerin elde edilebileceğini açıklamışlardır.

Ti-6Al-4V malzemesinin plazma ark TAKİ yöntemi ile üretildiği başka bir çalışmada (Alonso vd., 2020) malzeme özellikleri ve üretilen iş parçasının işlenebilirlik performansı incelenmiştir. Üretilen parçalarda gözenekler veya erime eksikliği gibi tipik yapısal hatalar gözlenmemiştir. Sertlikteki küçük farklılıkların ise biriktirme sırasındaki ısıl döngüler nedeniyle oluştuğu belirtilmiştir. Üretilen iş parçasının kesme kuvvetleri üzerine etkisi incelendiğinde döküm malzemeye göre daha yüksek kesme torku ve kesme derinliği elde edilmiştir. Talaş geometrisi ile ilgili olarak, yüksek ilerleme hızında, daha küçük bir talaş uzunluğu oluşmuştur. Kesme hızının değiştirilmesiyle talaş uzunluğunda büyük farklar gözlemlenmemiştir. Üretilen parça üzerinde yapılan delik delme işleminde, delik kalitesinin TAKİ üretim sürecinden olumlu etkilendiği görölmüştür. Çapak yükseklikleri yaklaşık 0,1 mm daha düşük olarak oluşmuştur. Bu durumun TAKİ yöntemi ile üretilen malzemenin daha yüksek sertliği ve iyi mekanik özelliklerinden kaynaklandığı açıklanmıştır. Ayrıca elde edilen delik çapı ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin, uçak gövdesi parçaları için gerekli tolerans aralığında olduğu belirtilmiştir.

TAKİ yöntemi kullanılarak çeliklerden genel olarak düşük maliyetli parçalar üretmek mümkündür. TAKİ sistemlerinde AISI 304, AISI 308 ve AISI 316 gibi östenitik paslanmaz çelik ve AISI 420 martenzitik paslanmaz çelik alaşımları ile araştırmalar yapılmaya devam etmektedir. Le vd. yaptıkları çalışmada (Le vd., 2021) TAKİ yöntemi ile ince duvar şeklinde 308L paslanmaz çelik parçalar üretilmiştir. İlk önce ark akımı, voltaj ve ilerleme hızlarının tek katman malzeme üretimi üzerine etkisi araştırmışlardır. Bu

parametreler parça üretimini optimize etmek için kullanılmıştır. TAKİ ile üretilen 308L parçaların mikroyapısı genelde dikey olarak büyüyen östenit dendritler ve östenit tane sınırı içinde bulunan  $\delta$ -ferrit içermektedir. Üretilen parçaların mikrosertliği yaklaşık 163 HV<sub>0,1</sub>'dir. Çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama miktarı sırasıyla 532 - 553 MPa, 344 - 353 MPa ve %40 - %54 olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerler dövme ile şekillendirilen 308L paslanmaz çelik (çekme dayanımı: 530 - 650 MPa, akma dayanımı: 360 - 480 MPa ve uzama %35 - %45) ile benzer durumdadır. Bu nedenle TAKİ 308L çelik parçaların mekanik özelliklerinin endüstriyel uygulamalar için yeterli olduğu açıklanmıştır.

Yapılan bir çalışmada (T. Wang vd., 2018) 260 mm uzunluk ve 150 mm yüksekliğe sahip ince duvar şeklinde H13 takım çeliği malzemesinden parçalar MIG kaynağı kullanılarak TAKİ yöntemi ile üretilmiştir. Düzgün olarak biriktirilen malzemelerin katmanları arasında net sınırlar gözlenmemiştir. Mikroyapı, termal döngülerin etkisi ile şekillenmiştir. Sertlik değeri, üretilen parçanın üst kısmından alt kısmına doğru 300 HV ile 360 HV arasında değişmiştir. Parçaların mekanik özellikleri incelendiğinde anizotropi görülmüştür. En yüksek çekme kuvveti üstte bulunan yatay numunede elde edilirken, ortadaki yatay numunenin uzaması en yüksek seviyede olmuştur. Parçaların mekanik özellikleri 830° C'de 4 saat tavlamanın ardından izotropik hale gelmiştir. Çekme numunelerinin kırık kesitleri incelendiğinde hem ısıtılmış hem de ısıtılmamış numunelerde sünek kırılmayı gösteren çukur yapılar elde edilmiştir.

#### **4.2. Tel Ark Katmanlı İmalat Yöntemiyle Üretilen Malzemelerin Mikroyapı ve Mekanik Özellikleri**

Tel ark katmanlı imalat yöntemiyle üretilen malzemelerin mikroyapıları genel olarak hızlı katılma ile oluşmaktadır. Bu yöntem ile üretilen parçaların mekanik özellikleri gelişmekte fakat anizotropi görülmektedir. Yatay ve dikey numuneler incelendiğinde yatay numunelerin akma ve çekme dayanımları daha yüksek olmaktadır. TAKİ sistemlerindeki ısıtılmış çevrimlerin etkisi ile sertlik değerleri yükselmektedir. İncelenen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Duarte vd. (Duarte vd., 2020) yaptıkları çalışmada sıcak dövme işlemine dayalı yeni bir TAKİ yöntemi geliştirmişlerdir. Biriktirme işleminden hemen sonra, üretilen parçalara,

17 N ve 55 N dövme kuvvetleri ile plastik deformasyon uygulanmıştır. Malzeme olarak AISI316L paslanmaz çelik, ısı kaynağı olarak MIG kaynağı kullanılan bu çalışmada, mekanik inceleme yapıldığında iyileştirmeler olduğu gözlenmiştir. Dövme kuvveti uygulanmayan parça ile karşılaştırıldığında, akma mukavemeti 360 MPa'dan 450 MPa'ya, maksimum çekme mukavemeti 574 MPa'dan 622 MPa'ya yükselirken, yüzde uzama miktarı ise %32'den %28'e düşmüştür.

Malzeme olarak AISI 316L paslanmaz çelik tel kullanılan bir çalışmada (L. Wang vd., 2019), soğuk metal transfer (CMT) sistemi ile farklı ark modları ile üretim yapılmıştır. SpeedPulse ve SpeedArc ark modlarının kullanıldığı bu çalışmada, kullanılan ark modlarının TAKİ üretim sürecinde nispeten kararlı, önemli ölçüde verimli ve yapısal olarak daha sağlam olduğu raporlanmıştır. SpeedPulse ve SpeedArc katmanlı imalat ile üretilen numunelerin çekme testlerinde, yatay yön boyunca çekme mukavemetleri 540 MPa'dan büyüktür ve bu değer daha önce yapılan çalışmalardaki değerlerden biraz daha yüksektir. SpeedArc TAKİ ile üretilen parçaların çekme dayanımları ve sertlik değerleri SpeedPulse ile üretilen parçalardan daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Bu durum SpeedArc ile daha ince taneli katılma yapısı elde edilmesi ile oluşmuştur. Numunelerin kırılma türlerinin sünek kırılmalar olduğunu ve malzemelerin uygun tokluk değerlerine sahip olduğu belirtilmiştir.

AISI 308LSi paslanmaz çelik ile yapılan bir çalışmada (Laghi vd., 2019) mekanik özellikler (akma dayanımı ve çekme dayanımları), geleneksel yöntem ile üretilen aynı tür paslanmaz çelik numuneler ile uyumlu olduğu belirtilmiştir. Dikey numunelerin akma ve çekme dayanım değerleri, yatay numunelere göre yaklaşık %10 daha düşük olmuştur. Elastisite modülü ise döküm ile üretilen malzemeye göre yaklaşık %20 daha düşük olarak belirlenmiştir.

Zhang vd. yaptıkları çalışmada (K. Zhang vd., 2020) ilerleme yönüne zıt farklı yönlerden desteklenen iki tel ile çift telli gaz tungsten ark katmanlı imalat yaklaşımını geliştirerek, 308L östenitik paslanmaz çelik teller ile malzeme üretmişlerdir. İkinci tel için farklı tel besleme hızları (0,2, 0,5 ve 0,8 m/dk) kullanılarak ince duvar şeklinde parçalar üretilmiştir. Üretilen numunelerin sertliği ve çekme dayanımları artan tel besleme hızı ile artmaktadır. Tel besleme hızı 0,8 m/dk olduğunda, yatay yöndeki çekme mukavemeti, 0,2 m/dk'da üretilen parçaya göre % 7,55 artmıştır. 0,8 m/dk'da çekme mukavemeti ve yüzde

uzama sırasıyla 570,71 MPa ve %53,7 olarak elde edilmiştir, bu değerler döküm 308L paslanmaz çeliğe göre sırasıyla 50,71 MPa ve %18,7 artmıştır. Numunelerin enine kesitlerindeki merkez hattaki ortalama mikro sertlik değerleri 2 m/dk, 0,5 m/dk ve 0,8 m/dk tel besleme hızları için sırasıyla 182,93 HV, 191,13 HV ve 202,53 HV olarak belirlenmiştir. Üretilen parçaların mikroyapıları incelendiğinde genel olarak  $\delta$ -ferrit ve  $\gamma$  (östenit) fazlarından oluşmuştur ve artan tel besleme hızı ile birlikte  $\delta$ -ferrit içeriği de artmıştır. 0,2 m/dk, 0,5 m/dk ve 0,8 m/dk tel besleme hızlarında, mikroyapıların sırasıyla kaba dendrit, ince dendrit ve sütunsal dendritlerden oluştuğunu görülmüştür.

Isı kaynağı olarak CMT kullanılan TAKİ Inconel 625 alaşımının üretildiği bir çalışmada (Jiang vd., 2021) mekanik özellikler incelenmiştir. Malzemeler yan yana kalın bir duvar oluşacak şekilde yapılmıştır. Bu kalın duvar paralel hareket ve salınımlı hareket olarak iki farklı türde yapılmıştır. En yüksek çekme dayanımı yatay numunelerde paralel ve salınımlı hareket için sırasıyla  $693,5 \pm 12,6$  ve  $751,2 \pm 17,6$  MPa olarak elde edilmiştir. En yüksek uzama ise Dikey yönde sırasıyla  $60 \pm 1,0$  ve  $60 \pm 1,1$ 'dir. Anizotropi miktarları ise sırasıyla %4 ve %4,5 olarak belirlenmiştir. Ayrıca iki hareket için de maksimum sertlik değeri de alt tabakaya yakın olarak belirtildiği açıklanmıştır.

Duraisamy vd. yaptıkları çalışmada (Duraisamy vd., 2020) MIG-TAKİ yöntemi ile AISI 347 paslanmaz çelikten malzeme üretmişlerdir. Bu çalışmada üretilen malzemenin mikroyapısı, üretim yönü boyunca değişen tane morfolojisi ile tamamen heterojen bir görünüm sergilemiştir. Mikroyapı temel olarak östenitik fazdan oluşmuş ve az miktarda  $\delta$ -ferrit ve NbC tespit edilmiştir. Ayrıca sütunlu, eş eksenli ve hücreli dendritlerin varlığı gözlenmiştir. Alt, orta ve üst bölgelerden elde edilen numunelerin ortalama ferrit hacim yüzdesi sırasıyla %4,2, %3,0 ve %1,4'tür. NbC'nin varlığı, EDS çizgi taraması ile doğrulanmıştır. Üretilen parçaların yüksek sıcaklıklarda kuru kayma aşınması incelendiğinde, başlangıçtaki kuru yüzeyin ardından, döküntü oluşumu, hafif oksidasyon oluşumu görülmüştür. 40 N yük altında ve 200°C, 400°C ve 600°C aşınma testi yapılan numunelerin hacim kaybı, alt malzemenin hacim kaybından sırasıyla %13,0, %5,80 ve %13,0 daha yüksektir. Ayrıca 20 N yük altında ve 200°C, 400°C ve 600°C'de yapılan testlerde alt malzemeye göre hacim kaybı sırasıyla %6,0, %29,1 ve %208,0 daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bu aşınma kaybı artışı, yüksek sıcaklıklarda homojen olmayan oksit oluşumuyla açıklanmıştır. Bu çalışmada üretilen malzemelerin ortalama sürtünme katsayısı



0,42–0,46 arasında belirlenmiştir, bu değerin ticari AISI 347 paslanmaz çelik malzemeye (0,40-0,45) göre daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

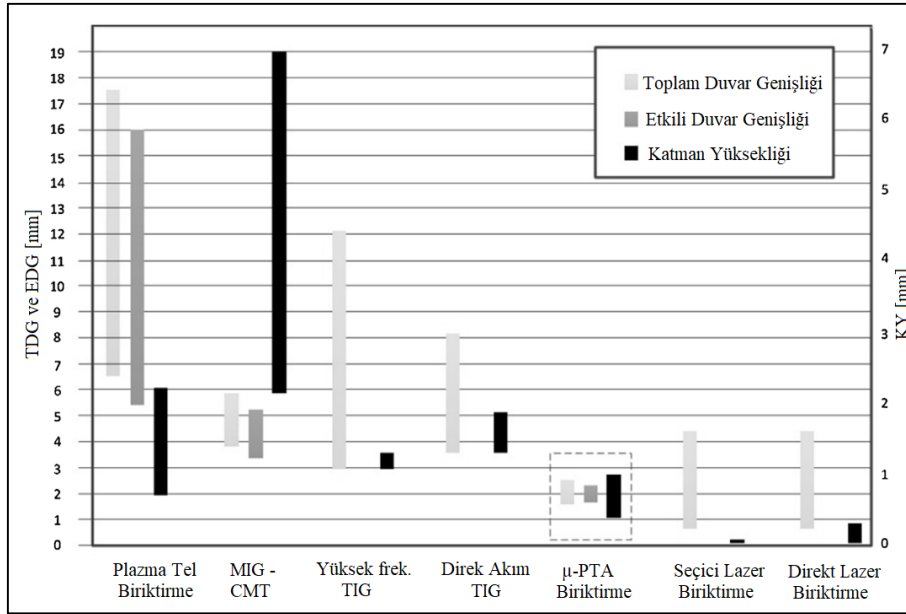
Plazma ark kaynağı ve lazer kaynağının hibrit işlem olarak kullanıldığı TAKİ çalışmasında (C. Wang vd., 2021) güç değerleri karşılaştırılmıştır. Uygulanan aynı güç değeri için, plazma kaynağında tel tarafından lazer işleme göre daha fazla güç emilmiştir. Böylece daha yüksek bir biriktirme hızı sağlanmıştır. Tek başına kullanılan plazma ve lazer işlemlerine göre hibrit işlemde daha yüksek bir biriktirme oranı elde edilmiştir. Lazer işlemiyle karşılaştırıldığında, hibrit işlemde yüksek biriktirme hızının, plazma ve lazer kaynağının birlikte etkileşiminden kaynaklandığı belirtilmiştir. Sadece plazma kaynağı ile hibrit işlem karşılaştırıldığında ise yüksek biriktirme hızının, hibrit işlemde enerjinin geniş bir alana yayılması ve eriyik havuzunun büyümesi ile açıklanmıştır.

Vahedi Nemani vd. yaptıkları çalışmada (Vahedi Nemani vd., 2021) TAKİ yöntemi ile AISI 420 malzemeden parça üretmişlerdir. Üretilen parçalara uygulanan farklı ısıl işlemlerin etkisini incelemişlerdir. Mikroyapıda  $\delta$ -ferrit olduğu görülmüştür. Oluşan  $\delta$ -ferritleri yok etmek ve tamamen martenzitik bir mikroyapı elde etmek için üretilen parçalar 950°C, 1050°C, 1150°C ve 1300°C'lik farklı östenitleştirme sıcaklıklarına tabi tutulmuştur. 1150°C'de yapılan östenitleştirme işleminde  $\delta$ -ferrit ve karbür gibi istenmeyen yapılar giderilmiştir. Bu sıcaklıktaki işlemde yapı tamamen martenzitik olduğu için optimum östenitleştirme sıcaklığı olarak seçilmiştir. Östenitleştirme ısıl işleminin ardından numuneler, 200°C, 300°C, 400°C, 500°C ve 600°C sıcaklıklarında tavlama yapılmıştır. Tavlama işlemi sırasında çöken krom karbürler yapının morfolojisini ve dağılımını değiştirmiştir. Daha düşük sıcaklıklarda (200°C ve 300°C) yapılan tavlama işleminde, temperlenmiş martenzit oluşumu ve gerilim giderme nedeniyle sertlik azalmıştır. 400°C sıcaklıkta ise, optimum karbür oluşumu nedeniyle sertlik değeri yükselmiştir. Bununla birlikte, 500°C ve 600°C'de yapılan tavlama işleminde, karbürlerde taneler arası ayrışma ve tane kabalaşması nedeniyle 400°C'ye göre sertlik azalmıştır. Tek eksen olarak yapılan çekme testinin sonuçları, sertlik ölçümleriyle tutarlı olmuştur. 400°C tavlama optimum mukavemet ve süneklik elde edildiği belirtilmiştir.

Martina vd. (F. Martina vd., 2012) yaptıkları çalışmada, plazma ark TAKİ ile Ti-6Al-4V alaşımı üretmişlerdir. Üretilen parçaların malzeme genişliği, efektif malzeme genişliği

ve katman yüksekliklerini incelemişlerdir. Deneylede tel olarak 1,2 mm çapında tel kullanılmış ve torç ile alt malzeme arasındaki mesafeyi 7 mm olarak belirlemişlerdir. Duvar şeklinde üretilen numunelerin genişliği 17,4 mm, talaşlı kaldırma işleminden sonra efektif malzeme genişliği 15,9 mm olarak belirlemişlerdir. Deneylede maksimum biriktirme oranını 1,8 kg/sa, biriktirme verimliliğini ise %93 olarak hesaplamışlardır. Yaptıkları sertlik deneylede 387 HV mikrosertlik elde ederek, alt malzemeye göre %12 artış olduğunu belirtmişlerdir. Büyük havacılık malzemelerinin plazma kaynağı kullanılarak katmanlı imalat yöntemi ile üretilmesinin uygun olacağını öngörmüşlerdir.

Jhavar vd. (Jhavar vd., 2014) yaptıkları çalışmada ısı kaynağı olarak mikro plazma transferli ark ( $\mu$ -PTA) kullanarak, TAKİ ile parça üretimi gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalarda 300  $\mu$ m çapında AISI P20 tel ve aynı malzemeden alt malzeme kullanmışlardır. Üretilen parçalar yoğun ve iyi bir yüzey kalitesine sahiptir. Parçaların üretiminde biriktirme oranı, ilerleme yönündeki enerji girdisi ve hacimsel tel besleme oranı sırasıyla 28,1 g/sa, 262 J/mm ve 10,6 mm<sup>3</sup>/mm olarak elde etmişlerdir. Biriktirilen ilk katmanlardan itibaren katmanların homojen olduğunu gözlemlemişler ve bu bölgelerin sertlik değerlerini alt malzemenin sertlik değerine ( $\sim$ 250 HV<sub>0,5</sub>) yakındır. Yapılan  $\mu$ -PTA katmanlı imalat işleminde biriktirme verimini %87, toplam duvar kalınlığını 2,45 mm, efektif duvar kalınlığını 2,11 mm olarak belirlemişlerdir. Ayrıca duvarın 15 tabakadan oluştuğunu ve maksimum biriktirme oranının 42 g/sa olduğunu belirtmişlerdir. Şekil 4.2'de elde edilen  $\mu$ -PTA katmanlı imalat yönteminin performansını; duvar genişliği, etkili malzeme genişliği ve yükseklik açısından, diğer yöntemlerle karşılaştırmışlardır. Plazma kaynaklı TAKİ yönteminin, gaz metal ark kaynağı tabanlı işlemlerden daha küçük boyutta biriktirme sağladığını belirtmişlerdir. Fakat lazer tabanlı işlemlerle elde edilebilecek çok küçük boyutlu parça üretiminin P TAKİ ile sağlanamadığını belirtmişlerdir.  $\mu$ -PTA tel biriktirme işleminin bu boşluğu doldurabileceği ve daha ince tel kullanımı ile biriktirme boyutunu daha da azaltarak mikro parçaların üretilmesini sağlayabileceğini açıklamışlardır. Ayrıca bu yöntemin lazer tabanlı işlemlere göre çok daha düşük maliyet ile gerçekleştirilebileceği değerlendirilmiştir.



Şekil 4.2.  $\mu$ -PTA yöntemi performansının malzeme (duvar) genişliği, etkili malzeme genişliği ve yükseklik açısından, diğer yöntemlerle karşılaştırılması (Jhavar vd., 2014)

Wang vd. (K. Wang vd., 2019) yaptıkları çalışmada darbeli plazma ark katmanlı imalat sistemi ile ince cidarlı Inconel 718 alaşımından parçalar üretmişlerdir. Üretilen parçaların mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Deneylerde 1,2 çapında ticari Inconel 718 kaynak teli (ERNiCrMo-3) ve alt malzeme olarak 15 mm kalınlığında çelik levha (Q235A) kullanmışlardır. Üretim yapılırken ısı birikimini azaltmak için enerji girişini katmanlar yükseldikçe azaltmışlardır. Kullanılan akım değeri ilk katmanda 300A iken son katmanda 120A'e düşürülmüştür. Üretilen parçaların farklı katmanlarında farklı tane morfolojileri görülmüştür. Bunlar sütunsal dendritler, hücreli dendritler, eş eksenli dendritler ve interdendritik bölgelerde MC partikülleri şeklindedir. Dayanımı yüksek fazların ve yüksek yoğunluklu dislokasyonların eksikliğinden dolayı çekme testi ile düşük bir mukavemet (872 MPa) ve aşırı yüksek bir süneklik (%34) elde edilmiştir. Standart ısıl işlem uygulandıktan sonra çekme ve akma dayanımlarının sırasıyla 1152 MPa ve 864 MPa'a yükseldiğini, süneklik değerinin ise matrisin çökme sertleşmesinden dolayı %23'e düştüğünü belirtmişlerdir. Elde edilen bu değerler dövme ile şekillendirilen parçalara yakındır. Böylece bu yöntemin alternatif olarak kullanılabilmesi açıklanmıştır.

Lin vd. (Lin vd., 2016) yaptıkları çalışmada, tel beslemeyi optimize ederek, darbeli plazma ark TAKİ yöntemi ile ince genişlikli Ti-6Al-4V alaşımı üretmişlerdir. Burada, ısı girdisi tabakalar yükseldikçe kademeli olarak azaltılmıştır. Üretilen alaşım, ısı girdisine,

farklı ısıl çevrimlere ve aşamalı soğuma oranına bağlı olarak  $\beta$ -taneleri, martenzit ve Widmanstätten'in yatay katman bantlarının eş eksenli olarak büyümesi gibi farklı mikroyapıya sahip morfolojilerden oluşmuştur. Her katmanda ısı girdisini azaltarak ve darbeli akım kullanılmasının malzemedeki tokluğu ve mukavemeti arttırdığını belirtmişlerdir. Mekanik inceleme sonuçlarına göre akma ve çekme dayanımlarının sırasıyla 909 MPa ve 988 MPa, uzama miktarını ise yaklaşık %7,5 olarak hesaplamışlardır. Üretilen parçaların, oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerinin yüksek değerlere çıkması nedeniyle havacılık uygulamalarında mükemmel performans sergileyeceğini öngörmüşlerdir.

Feng vd. (Feng vd., 2018) yapıları çalışmada çift telli besleme ve plazma ark TAKİ yöntemi kullanarak Cr-Ni paslanmaz çelik parçaların üretimi için yenilikçi ve yüksek verimli bir işlem önermişlerdir. Üretilen bileşenlerin mikroyapı, katman görünümü ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçları aynı işlem parametrelerinde, tek telli besleme plazma ark katmanlı imalat işlemi ile karşılaştırmışlardır. Tek telli sisteme göre, çift tel sisteminde biriktirme oranı ortalama 1,06 kat artmıştır. Çift telli sistem ile oluşturulan parçaların üst katmanlarında çok sayıda büyümesi tamamlanmış eş eksenli ferrit taneciği elde edilirken, tek tel sistemindeki parçalarda ise aynı kısımda büyümesi tamamlanmamış eş eksenli ferrit taneleri gözlenmiştir. Büyümesi tamamlanmış eş eksenli ferrit taneleri, çift telli sistemde üretilen parçaların çekme dayanımlarını ve uzama oranlarını önemli oranda etkilemiştir. Çekme dayanımı ortalama olarak tek tel sistemindeki parçalara göre %10,2 artarken, uzama oranını ise %176 arttırmıştır. Bu sonuçlara göre, çift tel sistemi ile üretilen parçaların, daha ince taneli bir mikroyapıya ve üstün mekanik özelliklere sahip olduğu ve bu sistemde daha yüksek bir birikme oranı elde edildiğini belirtmişlerdir.

Brandl vd. (Brandl vd., 2012) yaptıkları çalışmada TAKİ yöntemi ile Ti-6Al-4V teli kullanarak malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Isı kaynağı olarak Nd: YAG lazer kullanarak üretilen malzemelerin, mikroyapı, kimyasal bileşimi ve sertliğini incelemişlerdir. Numuneleri 7 katman olarak, ( $P=3,5$  kW,  $V=10$  mm.s<sup>-1</sup>,  $V_w=40$  mm.s<sup>-1</sup> ve  $P=2,625$  kW,  $V=7,5$  mm.s<sup>-1</sup>,  $V_w=30$  mm.s<sup>-1</sup> parametreleri ile) üretmişlerdir. Daha sonra üretilen parçalara iki farklı ısıl işlem (600°C/4 sa, 1200°C/2 sa) uygulamışlardır. Parçaların sertliğinin işlem parametrelerinden ziyade ısıl işlemden etkilendiği açıklanmıştır. 600°C/4 sa ısıl işlemi, mikroyapıyı önemli ölçüde değiştirmese de ortalama sertliği arttırmıştır (327 HV<sub>0,5</sub> → 343 HV<sub>0,5</sub>). Sertlik artışının katı eriyik sertleşmesi ve/veya Ti<sub>3</sub>Al çökmesinin bir sonucu olarak

ortaya çıktığını belirtmişlerdir. 1200°C/2 sa ısıtıl işleminde ise mikroyapının tamamen değiştiği ve sertliğin azaldığını elde etmişlerdir (327 HV<sub>0,5</sub> → 308 HV<sub>0,5</sub>).

Syed vd. (W. U. H. Syed vd., 2005) yaptıkları çalışmada direkt lazer biriktirme yöntemini kullanarak, tel ve toz besleme arasındaki işlem özelliklerini karşılaştırılmıştır. İki yöntemle oluşturulan çok katmanlı parçaları analiz etmişlerdir. Oluşturulan parçalarda tel beslemeli numunelerin üst ve yan duvarlardaki yüzey kalitesinin daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Her iki yöntem için de mikroyapıları benzer olduğu fakat toz besleme numunelerinde daha az ince dendrit ve gözeneklilik görüldüğünü açıklamışlardır. Toz besleme yönteminde birikim açısı 0-180° arasında olabilirken, tel besleme için birikim açısı 10-75° ile sınırlı kalmıştır. Ark ilerleme yönü ile aynı yönde beslenen toz ile daha az oksidasyon ve daha iyi bir yüzey birikimi elde etmişlerdir. Biriktirme verimi, tel besleme yönteminde daha yüksek olmuştur. Cepheden (ark ilerleme yönüne ters yönde) tel beslemenin ark ilerleme yönü ile aynı yönde beslemeye göre daha iyi kalitede olduğu, ark ilerleme yönü ile aynı yönde beslemenin yüzeyde bozulmalara neden olduğunu belirtmişlerdir. Toz beslemenin, tel beslemeye göre eriyik havuzunda daha büyük düzensizliğe neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Wu vd. (B. Wu vd., 2017) yaptıkları çalışmada, gaz koruması altında TIG-TAKİ yöntemi ile Ti-6Al-4V malzemesi üretmişlerdir. Üretim sırasında ısı birikiminin; katman oluşumu, ark kararlılığı ve metal transfer davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Malzeme katmanlar halinde oluşturulurken, sıcaklık dağılımındaki değişikliklerden ve soğutma oranlarının düşürülmesinden dolayı, katman geometrisi, ilk birkaç tabakada değişmiştir. Üretilen malzeme yüksekliği boyunca ark şekli ve metal transfer davranışındaki değişimler, tel ark katmanlı imalat sürecindeki ısı çevrimleri ile doğrudan ilgili değildir. Fakat tel ile erimiş havuz yüzeyi arasındaki mesafenin artmasının ve yoğunlaşmış metal buharından dolayı oluşan ark daralmasının birlikte etkileri ile oluştuğunu belirtmişlerdir.

Gu vd. (Gu vd., 2016) CMT tel ark katmanlı imalat yöntemi ile malzeme üretimi gerçekleştirmişlerdir. Katmanlar arası soğuk haddeleme ve biriktirme sonrası ısıtıl işlem uygulayarak bunların etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde 1,2 mm çapında 2219 alüminyum alaşımı tel ve 19 mm kalınlığında 2219-T87 plaka kullanılmıştır. Biriktirme esnasında 15 kN, 30 kN ve 45 kN yükler ile katmanlar arası haddeleme yapılmıştır. 45 kN

yük ile haddelenme yapılarak üretilen parçanın çekme ve akma mukavemeti sırasıyla 314 MPa ve 244 MPa olarak belirlenmiştir. Biriktirme sonrası T6 ısıl işleminin etkisi, haddelenmiş ve haddelenmemiş numuneler için karşılaştırılmıştır. Haddelenme yapılmış numunelerde biriktirme sonrası ısıl işlem ile mukavemetin arttığı görülmüştür. En yüksek mekanik özellikler T6 ısıl işlemi ve 45 kN haddelenmiş parçalarda görülmüştür. Bu parçada çekme ve akma dayanımları mukavemeti sırasıyla 450 MPa ve 305 MPa olmuştur.

Ma vd. (Ma vd., 2019) soğuk metal transfer (CMT) kaynağı kullanarak tel ark katmanlı imalat yöntemi ile 205A alüminyum alaşımından parça üretmişlerdir. Üretilen parçaların mikroyapısında  $\alpha$ -Al taneleri,  $Al_2Cu$  fazı ve bir miktar gözenek oluşmuştur. Mikroyapı morfolojisinin gerilme davranışı üzerine etkisi araştırılmıştır. Sonuçlara göre TAKİ ile üretilen parçaların çekme dayanımı döküm parçalara göre gelişme göstermiştir. Bu durum büyük ölçüde  $\alpha$ -Al tanelerinin, nokta şeklindeki  $Al_2Cu$  fazından daha fazla olması ile açıklanmıştır.

Martina vd. (Filomeno Martina vd., 2019) yaptıkları çalışmada üretim süresini ve maliyetini azaltmak için, MIG-TAKİ yöntemi ile yüksek biriktirme oranının elde edilmesinin uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Deneylerde ısı kaynağı olarak tandem ve darbeli MIG kaynağı, 1,2 çapında martenzitik paslanmaz çelik tel (17-4 PH) kullanılarak biriktirme işlemi yapılmıştır. En yüksek biriktirme oranı 9,5 kg/sa, 9 m/dk tel besleme hızında ve 1,2 m/dk ilerleme hızında elde edilmiştir. Tandem torçlu darbeli MIG kaynak yönteminin, çift tel besleme ile sabit biriktirme hızında biriktirmeyi iki kat arttırdığından, yüksek biriktirme hızına uygun olduğu gözlenmiştir. Tel besleme hızındaki artış ile sertlikte önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. 7 m/dk, 8 m/dk ve 9 m/dk tel besleme hızları için sırasıyla 348,2 HV, 347,5 HV ve 340,2 HV sertlik değerleri elde edilmiştir. Daha kalın parça üretimi için, daha yüksek tel besleme hızında tandem işlemi, sıkıştırılmış hava ile soğutma veya kriyojenik soğutma gibi daha iyi bir dış soğutma ortamının kullanılabileceği öngörülmüştür.

Yangfan vd. (Yangfan vd., 2019) yaptıkları çalışmada soğuk metal transferi (CMT) tel ark katmanlı imalat yöntemi ile Inconel 625 alaşımı üretmişlerdir. Alaşımın mikroyapısını, mekanik özelliklerini ve ilerleme hızının üretilen parçalara etkisini araştırmışlardır. Numunelerin farklı katmanlarında farklı mikroyapılar belirlenmiştir. Alt

katmanlar ince hücresel tanelerden oluşurken, üst katmanlara doğru ana yapı klasik ikincil dendrit kolları ve sütunlu dendritler haline gelmiştir. İlerleme hızındaki artışla birlikte numunelerin ortalama mikro sertliği, çekme dayanımı ve akma dayanımı yükselmiştir. Sonuç olarak, CMT TAKİ yöntemi ile üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin, çekme dayanımı hariç, döküm Inconel 625 alaşım parçalarının mekanik özelliklerinden daha iyi olduğu açıklanmıştır.

Wang vd. (Y. Wang vd., 2017) yaptıkları çalışmada, TIG TAKİ yöntemi ile 304L paslanmaz çelik parçalar üreterek, parçaların mekanik özellikleri ve mikroyapısını incelemiştir. Dört katmanlı 304L paslanmaz çelik parça üretilip, özelliklerini dövme ile üretilen standart bir parça ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, katmanların artmasıyla soğutma hızının yavaşladığını, dendrit kolların kalınlaştığını ve morfolojinin daha kararlı hale geldiğini göstermiştir. Katmanlar yükseldikçe birincil dendrit kol alanı 4,94µm'den 13,59µm'ye, ikincil dendrit kol alanı ise 3,52µm'den 8,93µm'ye artmıştır. Dendritlerin varlığı ve tane sınırının etkisi, enine ve boyuna yöndeki mekanik özelliklerin farklı olmasına sebep olmuştur. Mekanik özelliklerin test edilmesi ile mukavemet ve uzama miktarının dövme ile üretilen parçalar ile benzer özelliklerde olduğu ve parçaların uygulama gereksinimlerini karşılayabileceği bildirilmiştir.

Wu vd. (Q. Wu vd., 2017) yaptıkları çalışmada, TIG TAKİ yöntemi ile düzgün bir biriktirme elde etmek için farklı açılarda tel besleme yöntemlerini incelemiştir. Düşük bir tel besleme açısı (30°-50°), geri besleme yönünde biriken malzemenin kırılmasına neden olmuştur. Yüksek bir tel besleme açısı ise (70°), yan besleme yönünde biriken malzemenin bir tarafında sıçramalar oluşturmuştur. Üretilen çok sayıda tek katman numunenin ark ve erimiş havuz sıcaklık dağılımları incelendiğinde, herhangi bir tel besleme yönünde 60°'lik optimum tel besleme açısında homojen bir birikim elde edilebileceği görülmüştür.

Nikam vd. yaptıkları çalışmada (Nikam vd., 2020), CMT TAKİ sistemi ile ferrit ve östenit içerikli ER2594 teli kullanarak çok katmanlı malzeme üretimi yapmışlardır. Üretilen parçalarda gözeneklilik veya füzyon eksikliği olumsuz özellikler görülmemiştir. Östenit-ferrit faz dengesinin TAKİ işlemlerinde tekrarlanan ısıtma ve soğutma işlemlerinden büyük ölçüde etkilendiği açıklanmıştır. Hemen hemen bütün katmanlarda Widmanstätten östenit, tane içi östenit ve tane sınırı östenit gibi farklı östenit morfolojileri gözlenmiştir. Alt

katmanlarda birkaç yerde ikincil östenit ile birlikte geçiş bölgesinde taneler arası östenit baskın olmuştur. Östenitik fazın hacim dağılımı, parçanın yüksekliği arttıkça artmıştır. Çoklu yeniden ısıtma çevrimleri, östenit-ferrit dengesini değiştirmiş ve daha yüksek sertlik elde edilmiştir. Akma dayanımı, çekme dayanımı ve uzama miktarı sırasıyla  $632\pm 13$  MPa,  $855\pm 11$  MPa ve  $\%44,3\pm 2,5$  olarak elde edilmiştir. Bu değerler yanal yönde numuneler üzerinden belirlenmiştir.

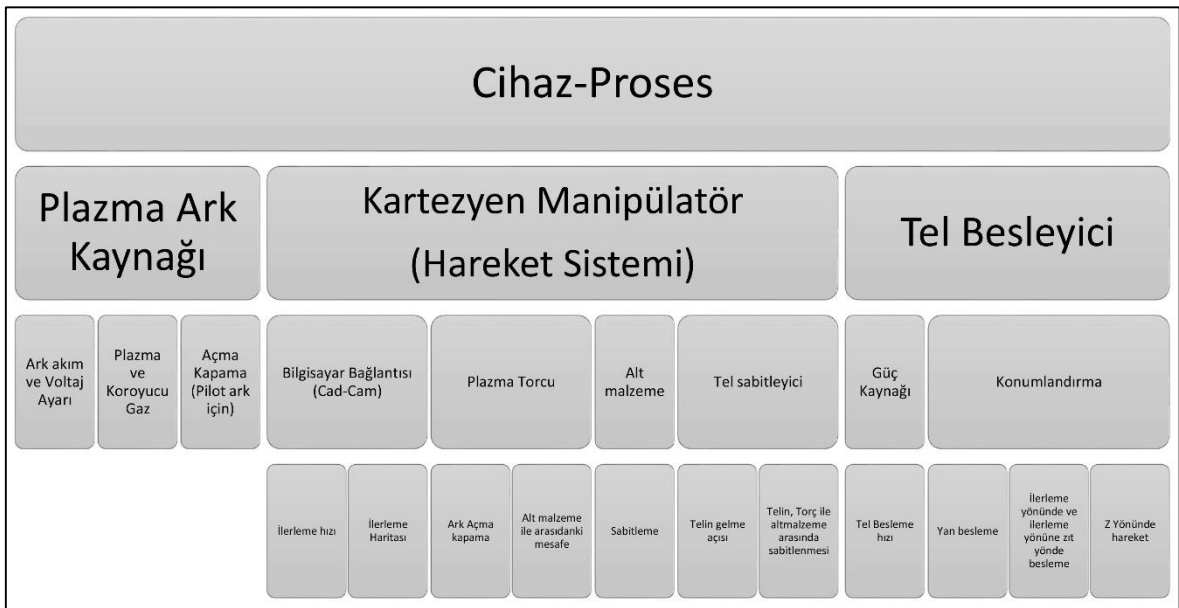
Ark ve kaynak boncuğu yapısının incelendiği Shukla vd.nin yaptıkları çalışmada (Shukla vd., 2020) CMT TAKİ yöntemiyle 10 katman biriktirme yapılmıştır. Ark davranışını belirlemek için kaynak akımı, voltajı, alt malzemedeki termal döngüler ve her katmanın yüksek hızlı ark görüntüleri birlikte incelenmiştir. Belirli bir işlem parametresi için, ark yoğunluğu kademeli olarak birinci katmandan beşinci katmana kadar artarken beşinci katmandan onuncu katmana kadar ise benzer olarak kalmıştır. Ark yoğunluğu değişiminin etkisi, katman profilinin tutarlılığına yansımıştır. Katman genişliğinin kademeli olarak birinci tabakadan dördüncü tabakaya arttığı ve beşinci tabakadan onuncu tabakaya kadar yaklaşık olarak aynı kaldığı görülmüştür.

Literatürde yaptığımız araştırmalar neticesinde P-TAKİ yöntemi ile malzeme olarak farklı teller kullanılmasına rağmen özlü tel kullanımına rastlanmamıştır. Bu tez çalışmasında uygulanan bu yöntemin yenilikçi bir yaklaşım olduğu değerlendirilmiştir.



## 5. TEL ARK KATMANLI İMALAT YÖNTEMİ İÇİN DENEY SİSTEMİ TASARIMI

Tez çalışması için plazma ark kaynağı (PAW) kullanılarak tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi ile malzeme üretimi için bir deney sistemi geliştirilmiştir. TAKİ sistemleri ile farklı malzeme üretimleri ve proses geliştirme araştırmaları yapılmasına rağmen ticari uygulamalar görülmemektedir. Bu nedenle literatür bilgisinden de yararlanılarak ve BAP projesinden alınan finansal destek ile TAKİ malzeme üretimi için uygun bir sistem geliştirilmiştir. Deney sistemi ana hatları ile plazma ark kaynağı, kartezyen manipülatör ve tel besleyiciden oluşmaktadır. TAKİ sistemlerinde arkın üretildiği plazma torç hareketlerinin düzenli olması malzeme üretiminin standartlaştırılması için çok önemlidir. Bu yüzden x, y ve z yönlerinde hareket edecek 3 boyutlu kartezyen manipülatör tasarlanarak üretilmiştir. Şekil 5.1’de deney sistemi şematik olarak gruplandırılmıştır. Tasarlanan deney sisteminde PAW kaynağı, tel besleyici ve kartezyen manipülatör birbirinden bağımsız olarak çalışmaktadır. Bu üç bileşenin birbirine uyumlu olarak çalışması hem işlem kolaylığı hem de standart malzeme üretimi için önemlidir, fakat ekstra maliyete sebep olmaktadır. Ayrıca tel ark katmanlı imalatta değişken sayısının fazlalığı ve bundan dolayı karmaşıklığı şekilde görülmektedir. Deney sistemi elemanları farklı başlıklar altında değerlendirilmiştir.



Şekil 5.1. Deney sisteminin şematik olarak gruplandırılması

### 5.1. Plazma Ark Kaynağı

Plazma ark kaynak cihazında ergimeyen tungsten elektrot torç içerisinde yer almaktadır. Kaynak arkı torç içerisinde oluştuktan sonra biriktirme yapılan yzeye transfer olmaktadır. Bu durum yksek enerji yoğunluğuna sahip ve daha kucuk bir ısıdan etkilenen alan oluşmasına sağlamaktadır. Bzylece diğer TAKİ yöntemlerine gze avantaj sağlanmaktadır (Bai vd., 2018). Bu ozelliklerinden dolay ark oluşumu iwin PAW kaynak cihazı tercih edilmiştir. Onceki senelerde BAP projesi ile alınan ve Osmangazi Unversitesi Takım Tezgahları laboratuvarında bulunan Fronius marka plazma kaynak cihazı (plasma module 10) ve bununla senkronize olarak walışan PTW 1500 plazma kaynak torcu kullanılmıştır (şekil 5.2).



şekil 5.2. Plazma ark kaynak cihazı

Telin ergitilmesi iwin oluşacak arkın akım ve voltaj değerleri ile plazma ve koruyucu gaz miktarları PAW kaynak cihazı uzzerinden ayarlanmaktadır. Malzeme biriktirme işlemi iwin ark oluşumu başlamadan once normal ark değerine gze wok kucuk değerde olan pilot

ark oluşmaktadır. Pilot ark açma işlemi de PAW kaynak cihazı üzerinde yapılır. Pilot ark oluşuktan sonra torç üzerinden ana ark oluşumu sağlanır.

## 5.2. Kartezyen Manipülâtör (Hareket Sistemi)

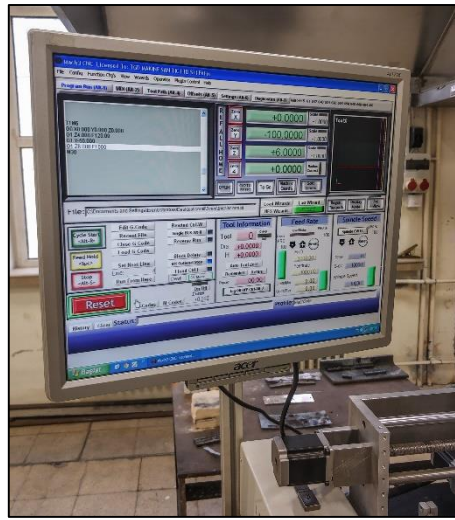
TAKİ sistemlerinde malzeme üretimi için oluşturulan torç yolu hareketleri için robotik veya kartezyen manipülâtör kullanılabilir. Tasarlanan sistemde Şekil 5.3’de gösterilen üç boyutlu kartezyen manipülâtör kullanılmıştır. Üzerine malzeme üretimi yapılacak olan alt malzemenin yerleştirildiği hareketli platform x ve y yönlerinde, plazma torcu ise z yönünde hareket ederek biriktirme bölgesinde üç boyutlu hareket sağlanmıştır. Kontrol kolaylığı sağlamak için kartezyen manipülâtör insan boyuna uygun olacak şekilde bir masa üzerine sabitlenmiştir. Malzeme üretimi esnasında oluşacak titreşimleri yok etmek için çerçeve kısımları alüminyum profilden yapılmıştır.



Şekil 5.3. Kartezyen manipülâtör

### 5.3. Bilgisayar Kontrolü

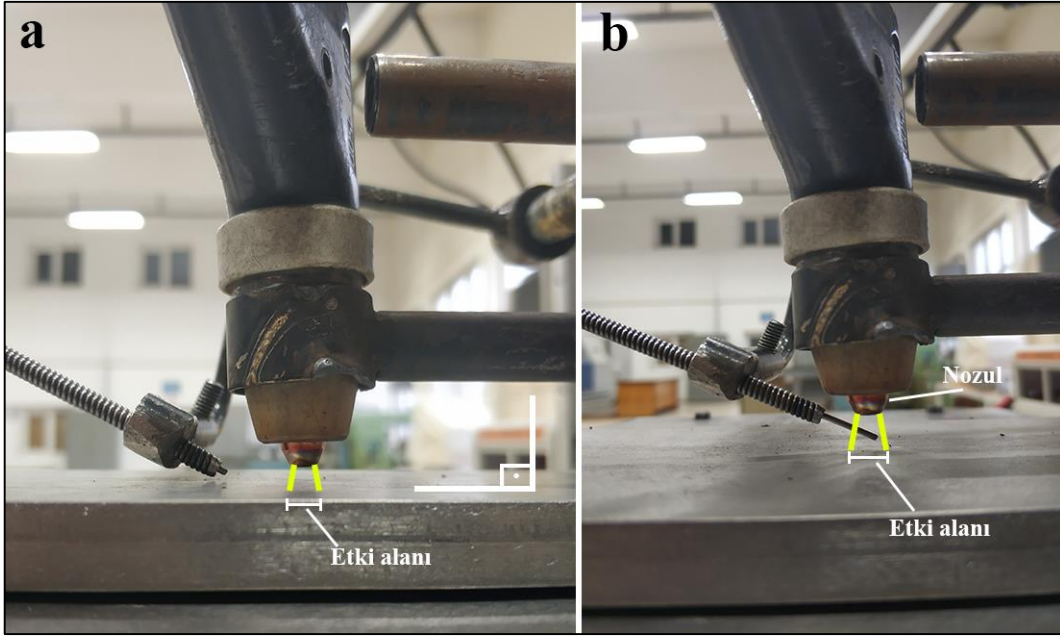
Kartezyen manipülatör üzerinde bilgisayar bağlantısı mevcuttur ve ilerleme hareketleri bilgisayar destekli tasarım (CAD) ve CNC tezgahlarında kullanılan G kodları sistemi ile sağlanmaktadır (Şekil 5.4). Malzeme biriktirme işlemi sırasında kullanılan torç ilerleme hızı ve torç yolunu içeren kodlar bu kısımda yazılmaktadır. Ana arkın oluşması ile birlikte program el ile başlatılarak, kartezyen manipülatör üzerinde bulunan hareketli platformun belirtilen yönlerde ilerlemesi sağlanır.



Şekil 5.4. G kodlarının yazıldığı bilgisayar ekranı ve arayüz programı

### 5.4. Plazma Torcu

Plazma torcu, kartezyen manipülatörün bir parçası olan torç tutucu üzerine sabitlenmiştir. Yapılan deneylerde torç ucu alt malzemeye dik olarak ( $90^\circ$ ) kullanılmıştır. Üretim amaçları doğrultusunda, ark oluşumu için uygun mesafedeki, farklı açılarda da kullanımı mümkündür. Torç üzerinde bulunan iki adet ayar düğmesi vardır. Bunlardan birisi pilot ark oluştuktan sonra, ana arkı oluşturmak ve sonlandırmak için kullanılır, diğeri ise ark akımını değiştirmek için kullanılır.



Şekil 5.5. Plazma torcu, a) ana ark oluşmadan önceki konum, b) ana ark oluşuktan sonraki konum

Ark oluşumu için plazma torcu ile alt malzeme arasında en fazla 2 mm mesafe olmalıdır (Şekil 5.5.a). Bu mesafe aşıldığında genelde ark oluşmaz, fakat ark oluşuktan sonra arkın kopmayacağı belli bir mesafeye kadar arttırılabilir. TAKİ sisteminde normal kaynak işleminden farklı olarak tel kullanılır ve telin ark bölgesine aktarılması gereklidir. Bu yüzden ark oluşuktan sonra plazma torcu ile alt malzeme arasındaki (ark oluşan alan) mesafe bir miktar arttırılır ve tel gönderilir (Şekil 5.5.b). Plazma torcu ile alt malzeme arasındaki mesafenin arttırılması, ısıdan etkilenen alanın artmasına ve etki eden enerji yoğunluğunun azalmasına neden olur. Bu yüzden üretim için optimum mesafe seçilmelidir. Plazma torcu üzerinde ergimeyen %2 toryumlu tungsten elektrot ve plazma nozulu bulunur. Plazma nozulu farklı çaplarda olabilir. Plazma nozulu çapa bağlı olarak biriktirme sırasında arkın etki ettiği alanı değiştirir.

Plazma torcunda farklı çıkış çaplarındaki plazma nozulları kullanılabilir (Şekil 5.6). Nozul çıkış çapının büyük olması daha yüksek etki alanı oluşturur ve ısıdan etkilenen alanın artmasına yol açar. Bu yüzden biriktirilen malzemenin ısıdan daha az etkilenmesi için bu nozul çapının küçük olması tercih edilir. Fakat telin yeterli ergimesi için diğer parametrelerle (ark akımı, tel besleme hızı ve ilerleme hızı) birlikte optimum nozul seçimi yapılmalıdır. TAKİ ile malzeme üretiminde biriktirilen yüzeyin ısıdan daha az etkilenmesi kalıntı gerilme ve distorsiyon hatalarını azaltır (Jia vd., 2020).

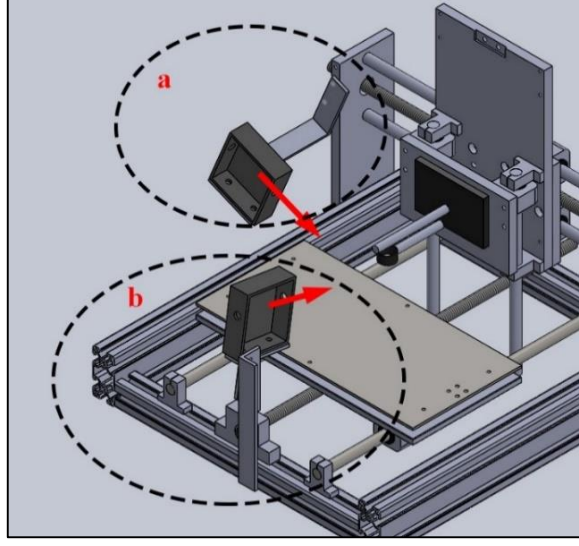


Şekil 5.6. Farklı çaplardaki plazma nozulları

### 5.5. Tel Besleyici ve Tel Sabitleyici

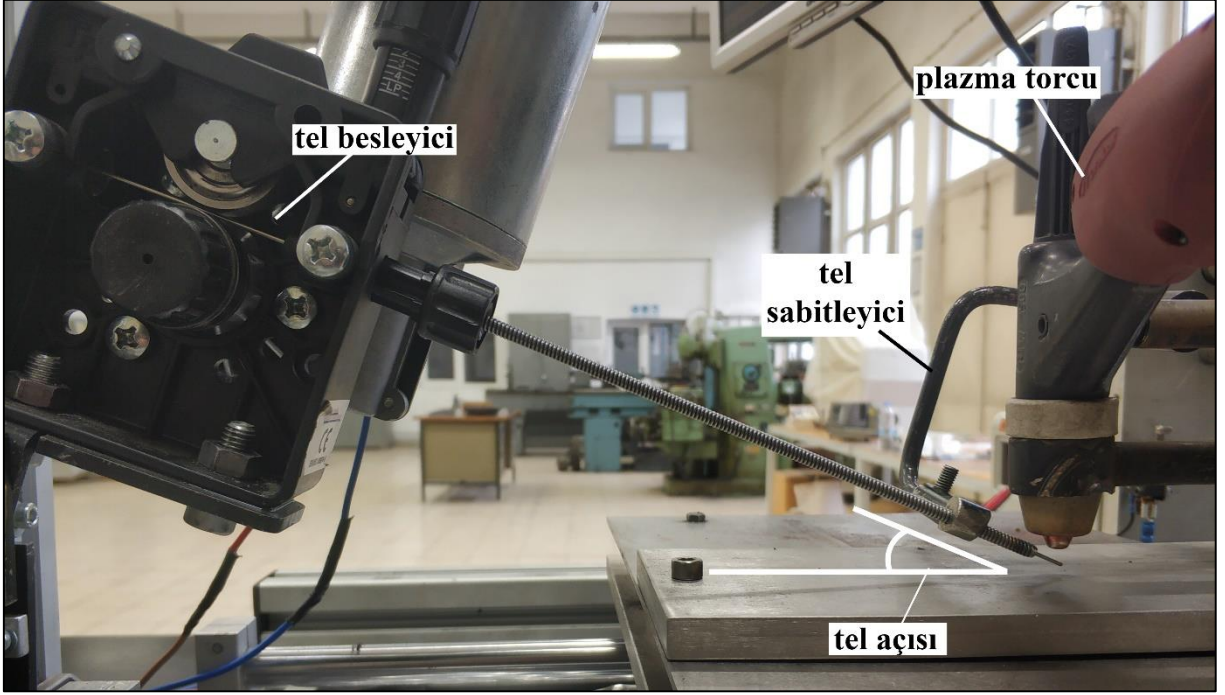
Malzeme biriktirme işleminde kullanılan önemli bileşenlerden biri de tel besleyicidir. Tel besleyici kartezyen manipülatör üzerinde hareketsiz kısma sabitlenmiştir. Tel besleyici, plazma torcunun ilerleme yönü ile dik (Şekil 5.7.a) veya paralel (Şekil 5.7.b) beslenecek şekilde farklı bölgelerden sabitlenebilir. İlerleme yönüne dik olarak beslenen ön çalışmalarda, biriktirilen malzemenin doğrusallığı yeterli olmamış, dalgalanmalar görülmüştür. İlerleme yönü ile paralel beslenen denemelerde biriktirilen malzemenin doğrusallığı çok iyi sonuç vermiştir. Bu yüzden ilerleme yönüne paralel tel beslemesi tercih edilmiştir. Tel besleyici ünitesinden geçen tel, sabit bir hız ile ark bölgesine aktarılmaktadır. Tel besleme hızı tel besleyici ünitesindeki güç kaynağından belirlenmektedir. Pilot ark oluşuktan sonra ana ark oluşumu başlar, ana ark oluşumu ile birlikte tel, ark havuzuna gönderilir. Bu işlem tasarlanan sistemde el ile başlatılmaktadır. Tel besleyici ünitesi ÖYP doktora bütçesinden satın alınmıştır.





Şekil 5.7. Farklı tel besleyici konumlarının gösterilmesi

Tel besleyiciden gelen telin ark havuzu içerisine sabit bir açı ve sabit noktaya titreşimsiz olarak aktarılması içerik kalitesi ve boyutsal olarak düzgün bir malzeme üretmek için çok önemlidir. Ayrıca telin ark içerisine farklı açılarda veya alt malzemeye farklı uzaklık mesafelerinde aktarılması, biriktirilen malzemenin katman genişlik ve yüksekliğini etkilemektedir. Alt malzeme ile tel ucu arasındaki mesafe 1-2 mm'ye çıkarıldığında optimum katman görünümü elde edilmektedir (C. Wang vd., 2021). Bu yüzden yapılan çalışmada bu mesafe 1,5 mm olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu kısımda oluşacak küçük değişimler (titreşim ve kayma gibi), telin ergimemesine veya yetersiz ergimesine sebep olmaktadır. Bu durumlar göz önünde bulundurularak yapılan deneme çalışmalarının ardından torca yaklaşık 20 mm mesafeye (bu mesafe tel açısına bağlı olarak değiştirilebilir) tel sabitleyici tutturulmuştur (Şekil 5.8). Tel sabitleyici, tel açısı ve plazma torcu ile mesafenin ayarlanabileceği şekilde ve farklı tel çapları için ayrı ayrı tasarlanmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda 3 mm tel ve 30°lik tel açısı kullanılmıştır.

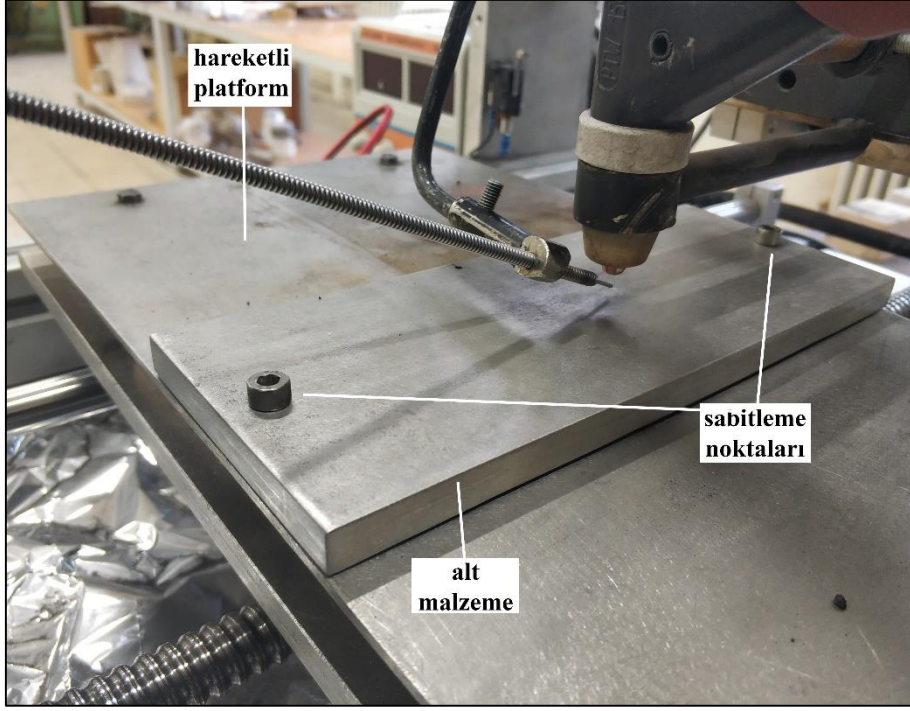


Şekil 5.8. Tel besleyici ve tel açısı gösterimi

## 5.6. Alt Malzeme ve Hareketli Platform

TAKİ sistemlerinde malzemenin üzerine biriktirilmesi için alt malzeme kullanılır. Telin ergidikten sonra alt malzeme üzerinde metalürjik bir bağ kurması gerekmektedir. Bu yüzden biriktirilecek olan malzemeye uygun bileşimde olması gerekir. Isı girdisinin yoğun olması nedeniyle biriktirme bölgesinde, ergimeden arda kalan ısının uzaklaştırılması gerekir. Bundan dolayı alt malzemenin bir miktar kalın olması gerekmektedir. Yeterli kalınlıkta olmayan durumlarda distorsiyonlar oluşur. Distorsiyonların azaltılması için alt malzeme manipülatör üzerinde bulunan hareketli platforma iki noktadan vida ile sabitlenmiştir (Şekil 5.9). Vida yerine mengene veya kıskaç gibi sıkıştırma bileşenleri de kullanılabilir. Oluşan yüksek sıcaklığın diğer bileşenleri etkilememesi için hareketli manipülatör platformun alt kısmına bitişik olarak 1200°C sıcaklığa kadar ısı geçirmeyen seramik plaka yerleştirilmiştir. Hareketli platform x ve y yönlerinde hareket etmektedir.





Şekil 5.9. Hareketli platform ve alt malzeme

## 6. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu doktora tez çalışması; deney sisteminin kurulması, plazma tel ark katmanlı imalat yöntemi (P-TAKİ) ile malzeme üretimi ve üretilen malzemelerin mekanik testleri ile mikroyapı incelemelerinden oluşmaktadır. P-TAKİ yöntemi ile malzeme üretimi için tel olarak AISI 304 paslanmaz çelik boru ile B<sub>4</sub>C, SiC ve FeCrC tozları takviye edilerek oluşturulan özlü teller ve sade AISI 304 paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. Toz takviye edilerek üretilen malzemeler sade AISI 304 paslanmaz çelik tel ve döküm AISI 304 paslanmaz çelik malzeme ile karşılaştırılmıştır. Deney sistemi oluşturulduktan sonra, aşağıdaki işlemler yapılmıştır.

- Dış çapı 3 mm, iç çapı 2 mm olan ince borular ile tozlar kullanılarak kompozit teller oluşturulmuştur.
- Deney sisteminin optimizasyonu ve farklı toz takviyeleri için uygun deney parametrelerinin belirlenmesi için ön deneyler yapılmıştır.
- Alt malzeme olarak kullanılan (200x80x8) mm<sup>3</sup> ölçülerinde AISI 304 paslanmaz çelik üzerine, belirlenen optimum parametreler ile malzeme üretimi katmanlar halinde gerçekleştirilmiştir.
- Üretilen malzemelerin kenarlarında oluşan fazlalıklar talaşlı imalat yöntemleri (frezeleme ve taşlama) kullanılarak alınmış ardından mikroyapı incelemeleri, aşınma testi, mikrosertlik testi, çekme testi ve XRD analizi için uygun boyutlardaki numuneler, tel erozyon ve yaş kesme yöntemleri kullanılarak kesilmiştir.
- Üretilen malzemelerin mikroyapı özellikleri belirlenmiştir.
- Numunelere çekme testi uygulanarak mekanik özellikler belirlenmiştir.
- XRD analizi ile malzemelerde oluşan fazlar belirlenmiştir.
- Küre disk aşınma yöntemi ile aşınma özellikleri belirlenmiştir.
- Vickers mikrosertlik testi ile sertlik değerleri belirlenmiştir.

### 6.1. Deney Malzemeleri ve Tellerin Hazırlanması

Tez çalışmasında plazma kaynağı kullanılarak tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi ile üç farklı tür malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu malzemeler sade 304

paslanmaz çelik P-TAKİ, SiC ve FeCrC toz takviyeli P-TAKİ malzemeleridir. Sade 304 paslanmaz çelik malzeme üretmek için 3 mm çapında 304 paslanmaz çelik tel kullanılmıştır. Diğer malzemelerde kullanılacak malzemelerin çapları ile aynı olması için çap olarak 3 mm tel tercih edilmiştir. Deneylerde üretilen malzemelerin isimlendirilmesi ve kullanılan tel ve tozlar Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelgede B<sub>4</sub>C takviyeli P-TAKİ olarak gösterilen malzeme yapılan ön deneylerde yeterli bağlanma ve çatlaksız numune üretilmediği için tez çalışmasından çıkartılmıştır.

Çizelge 6.1 Deneylerde üretilen malzemelerin isimlendirilmesi

Üretilen malzeme ismi	Kullanılan tel/ince boru	Takviye edilen toz
304 P-TAKİ	Ø3 mm AISI 304 paslanmaz çelik tel	-
SiC takviyeli P-TAKİ	Dış Ø3 mm, iç Ø2 mm AISI 304 paslanmaz çelik boru	SiC tozu
FeCrC takviyeli P-TAKİ	Dış Ø3 mm, iç Ø2 mm AISI 304 paslanmaz çelik boru	FeCrC tozu
B <sub>4</sub> C takviyeli P-TAKİ*	Dış Ø3 mm, iç Ø2 mm AISI 304 paslanmaz çelik boru	B <sub>4</sub> C tozu

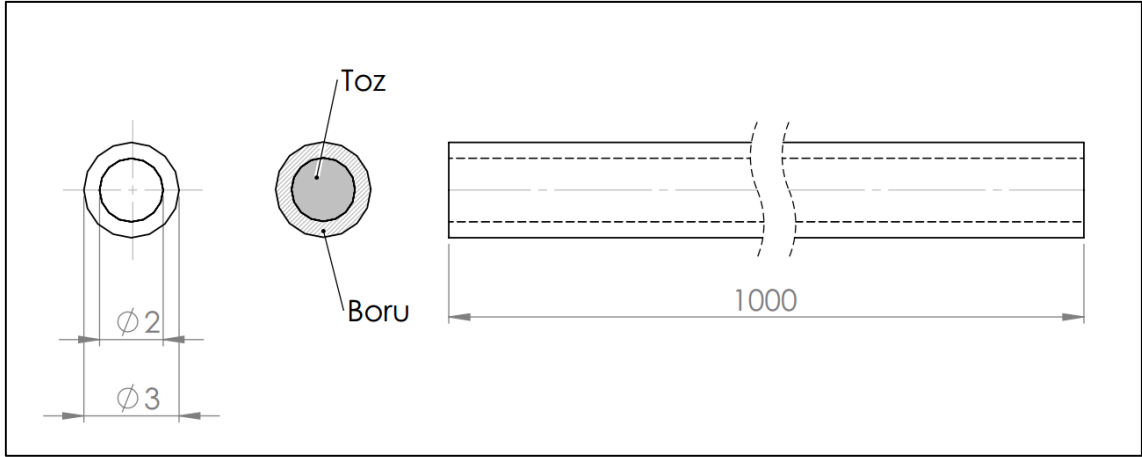
\*: Sadece ön deneme yapılmıştır.

Deneyde kullanılan telin ve alt malzeme olarak kullanılan ticari AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal ve mekanik özellikleri çizelge 6.2’de verilmiştir.

Çizelge 6.2 AISI 304 paslanmaz çeliğin kimyasal bileşimi ve mekanik özellikleri

Kimyasal Bileşimi (%)								
C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	N	Fe
0,06	1,32	0,75	0,045	0,03	18,8	8,4	0,03	Kalanı
Mekanik özellikleri								
Çekme Dayanımı		Akma Dayanımı		Yüzde Uzama		Sertlik (Vickers)		
515 MPa		205 MPa		%40		201 HV		

SiC ve FeCrC takviyeli malzemeler için AISI 304 paslanmaz çelik ince borular B<sub>4</sub>C, SiC ve FeCrC tozları ile doldurularak oluşturulan kompozit teller kullanılmıştır. İnce borular 1 metre uzunluğunda, dış çapı 3 mm, iç çapı 2 mm’dir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Oluşturulan kompozit tellerin şematik görünümü

SiC ve B<sub>4</sub>C tozların boyutu küçük olduğu için kuru olarak boru içerisine doldurulması mümkün olmamıştır, bu yüzden etanol ile sıvı hale getirildikten sonra gerekli sızdırmazlıkların sağlanmasının ardından bir pompa aracılığı ile boru içerisine doldurulmuştur. Daha sonra boru içerisindeki tozların kuruması için 2 saat süre ile 150°C sıcaklığındaki fırında bekletilmiştir. FeCrC tozu ise kuru olarak boru içerisine yerleştirilmiştir. Tozların boru içerisine eşit olarak dağıldığından ve B<sub>4</sub>C ve SiC tozlarının boru içerisinde kuruluğundan emin olmak için ilk oluşturulan teller kesme diski ile kuru koşullarda 5 eşit parçaya bölünmüş ve hassas terazi ile ağırlıkları kontrol edilmiştir. Tel kesilirken uçan tozlardan dolayı 5 eşit parçanın ağırlık farkı en fazla yaklaşık %1 olmuştur. Tozların 1 metre ince boru içindeki ağırlık miktarları çizelge 6.3’de verilmiştir. Tozların miktarları üretim yapılmadan hemen önce hassas terazi ile dolu boru ağırlık miktarından boş tel ağırlık miktarı çıkarılarak elde edilmiştir.

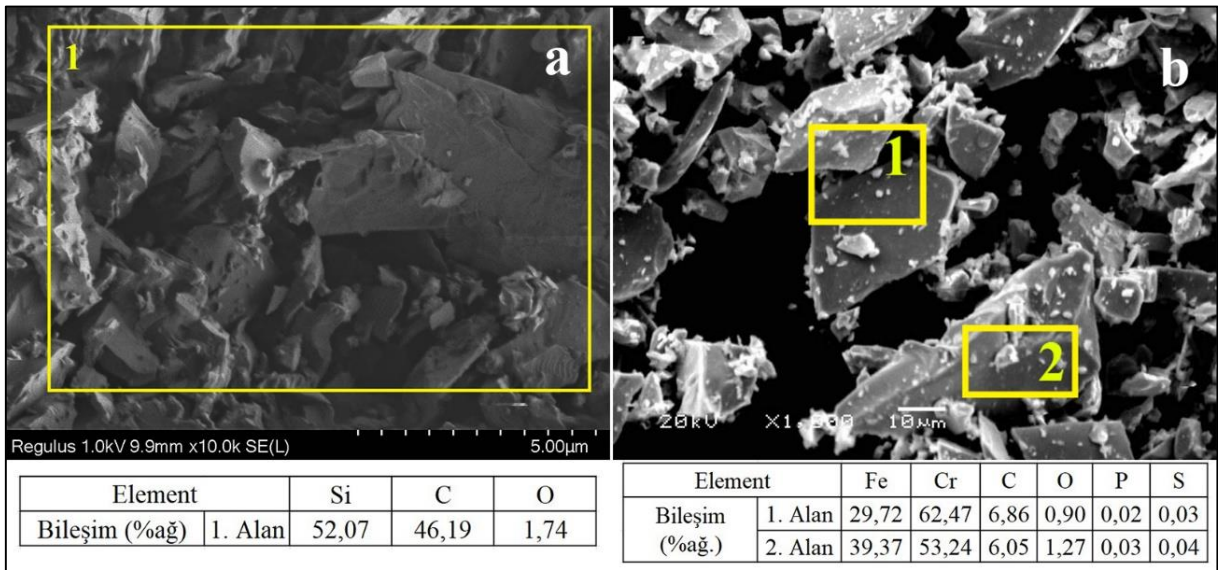
Çizelge 6.3 Tozların yoğunluğu ve 1 metre boru içindeki miktarları

	B <sub>4</sub> C	SiC	FeCrC
Yoğunluk	2,52 g/cm <sup>3</sup>	3,21 g/cm <sup>3</sup>	7,2 g/cm <sup>3</sup>
1 m boru içindeki toz miktarı	4,15 g	5,16 g	13,28 g

Plazma ark kaynağı ve toz kullanılarak yapılan çalışmalarda yüksek enerji girdisi nedeniyle tozların büyük oranda çözülerek farklı bileşim ve oranlarda katıldığı bilinmektedir (Skarvelis vd., 2013; X. C. Zhang vd., 2009). Bu nedenle deneylerde kullanılan toz morfolojisinin küresel veya küresel olmamasının bir fark oluşturmayacağı

düşünülmüştür. Ayrıca maliyet açısından küresel olmayan tozların kullanımı olumlu olarak değerlendirilmiştir.

Deneylerde küresel olmayan tozlar kullanılmıştır. SiC tozu, en az %98,0 saflıkta ve en fazla 10  $\mu\text{m}$  boyutundadır. FeCrC tozu ise yüksek karbonlu ve en fazla 25  $\mu\text{m}$  boyutundadır. Tozların EDS analizi sonucunda elde edilen kimyasal bileşimleri Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.2 Malzeme üretiminde kullanılan tozların SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) SiC, b)FeCrC

Deneylerde alt malzeme olarak (200x80x8) mm<sup>3</sup> boyutlarında AISI 304 paslanmaz çelik plaka kullanılmıştır. Katmanlar üzerinde oluşan yüksek ısı girdisini azaltmak ve alt malzeme içerisinde dağılmasını sağlamak için alt malzemenin 8 mm kalınlıkta seçilmiştir.

## 6.2. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Çalışmalarda kullanılan deney parametreleri Çizelge 6.4’de verilmiştir. Ark akım değeri, ilerleme hızı ve tel besleme hızı değerleri yapılan ön deneyler ile belirlenmiştir. Ön deneyler ve parametrelerin belirlenmesi 7.1. bölümde detaylı olarak açıklanmaktadır. Üretim yapılırken son üretilen katman yüzeyinin sıcaklığı belirli bir seviyeye gelene kadar beklenmiştir. Bu sıcaklıklar geçiş sıcaklığı altında parametre tablosunda yer almaktadır. Katmanlar arasında süre olarak yaklaşık 60 s - 120 s arasında beklenmektedir. Bu süre malzeme türüne ve katmanın bulunduğu konuma göre değişmektedir. Deneylerde plazma

gazı ve koruyucu gaz olarak yüksek saflıkta Argon gazı kullanılmıştır. Üretimlerde torç ile alt malzeme arasındaki mesafe 6 mm olarak belirlenmiştir. Ark oluşumu için bu mesafe önemlidir. Üretim yapılırken bu mesafe içerisinde tel girmektedir. Tel, alt malzemeye veya torca temas etmeyecek şekilde ayarlanmıştır.

Çizelge 6.4 P-TAKİ malzeme üretiminde kullanılan deney parametreleri

İşlem Parametreleri	304	SiC takviyeli	FeCrC takviyeli	Birim
Ark Akım Değeri	115	120	115	A
Ark Voltaj Değeri	25	26	24	V
İlerleme Hızı	3	3	3	mm s <sup>-1</sup>
Tel Besleme Hızı	9	9	12	mm s <sup>-1</sup>
Geçiş Sıcaklığı	160	160	160	°C
Koruyucu Gaz Akış Oranı (Ar)	10			l dak <sup>-1</sup>
Plazma Gazı Akış Oranı (Ar)	0,5			l dak <sup>-1</sup>
Torç mesafesi	6			mm

### 6.3. Malzeme Üretimi ve Numunelerin Elde Edilmesi

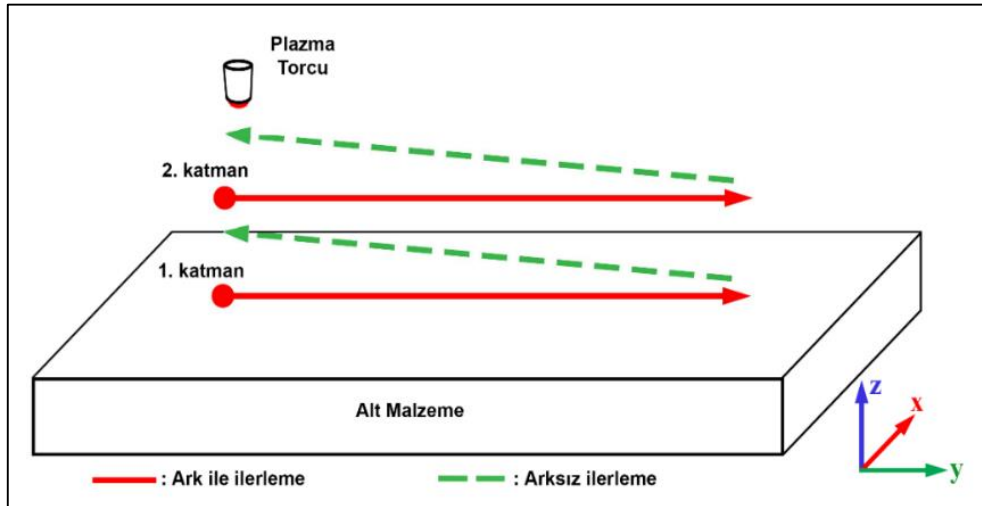
Plazma kaynağı ile tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi kullanılarak duvar şeklindeki 304 P-TAKİ, SiC ve FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemeleri başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen malzemelerin görüntüleri Şekil 6.3’de verilmiştir. 304 paslanmaz çelik malzeme 29 katman, SiC takviyeli malzeme ve FeCrC takviyeli malzeme 21’şer katmandan oluşmuştur. Ortalama duvar genişlikleri sırasıyla 304 paslanmaz çelik, SiC takviyeli, FeCrC takviyeli malzemeler için 5,6 mm, 7,0 mm ve 7,3 mm olarak belirlenmiştir. Üretimin hemen ardından malzemelerin yüzey pürüzlülükleri AISI 304 P-TAKİ paslanmaz çelik malzeme için ( $R_a$ ) 1,67  $\mu\text{m}$ , SiC takviyeli malzeme için 5,18  $\mu\text{m}$ , FeCrC takviyeli malzeme için 4,36  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülükleri, 304 paslanmaz çelik ve FeCrC takviyeli malzemeler için farklı yan ve üst yüzeylerden, SiC takviyeli malzeme için ise yan yüzeyde oluşan cürüflardan dolayı sadece üst yüzeyden elde edilen 5 adet ölçümün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Üretim esnasında alt malzemede oluşan distorsiyon değerleri 304 P-TAKİ, SiC takviyeli ve FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemeleri için sırasıyla 1,6 mm, 2,2

mm ve 1,8 mm olarak belirlenmiştir. Alt malzemede oluşan bu distorsiyonlar numune elde etmek için sorun oluşturmamıştır.



Şekil 6.3 P-TAKİ yöntemi ile üretilen malzemeler, a) 304 paslanmaz çelik malzeme, b) SiC takviyeli malzeme, c) FeCrC takviyeli malzeme

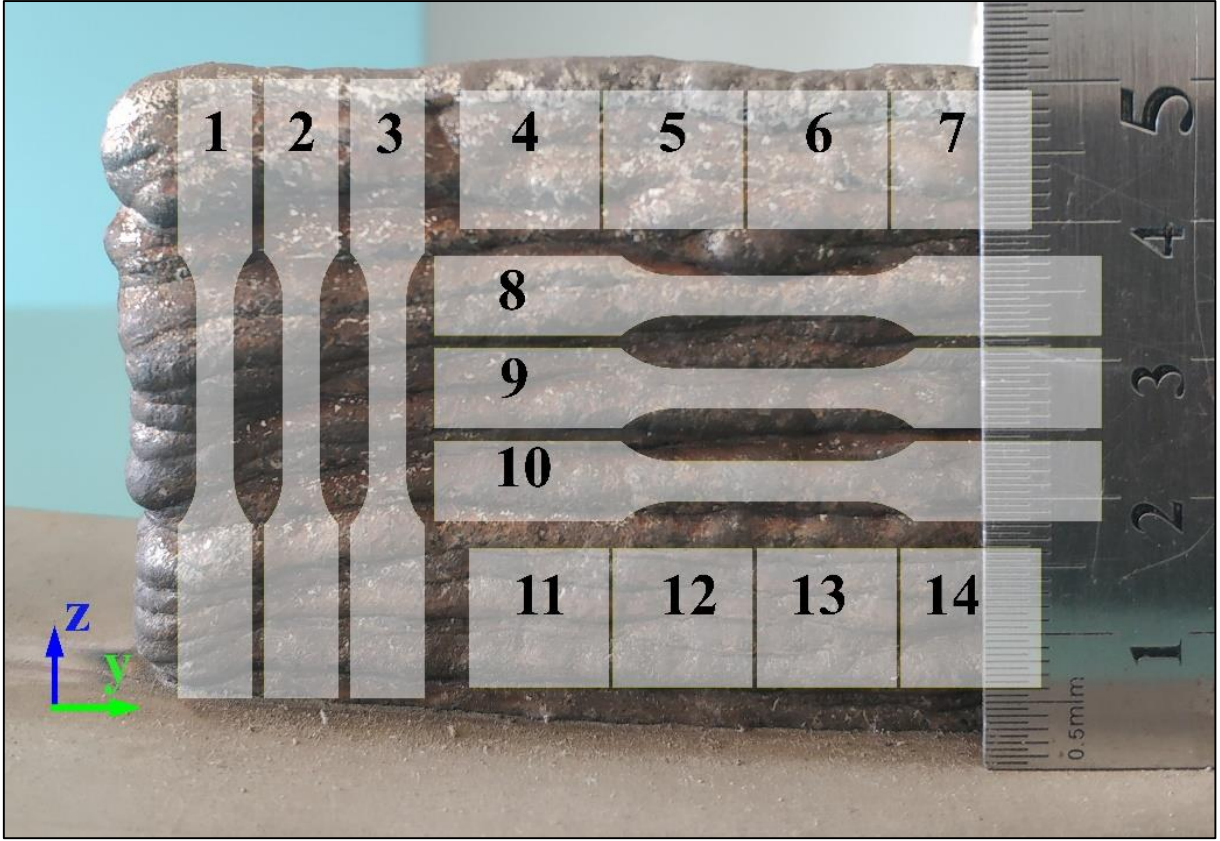
P-TAKİ yöntemi ile üretilen malzemeler için ilerleme planlaması Şekil 6.4'de gösterilmiştir. Kırmızı sürekli çizgi ile gösterilen kısımda ark ile gelen tel ergitilmiştir. Yeşil kesikli çizgi ile gösterilen kısımda ise ergitme olmamıştır. İlerleme y yönünde 130 mm boyunca yapılmıştır. Katmanlar z yönü boyunca yaklaşık 55 mm yüksekliğine kadar biriktirilmiştir. Her katman biriktirildikten sonra, yeni katman için plazma torcu tekrar başlangıç noktasına getirilmiştir. İlerleme hareketleri G kodları ile otomatik olarak sağlanmıştır.



Şekil.6.4. Duvar şeklinde üretim için ilerleme planlaması



Numunelerin üretilmesinin ardından freze ve taşlama kullanılarak malzeme yüzeyleri düz hale getirilmiştir. Ardından tel erozyon kesme yöntemi ile Şekil 6.5’de gösterilen yerlerden numuneler kesilmiştir. Özellikle çekme testi numunelerinin ölçü boyutlarının hassas olması nedeniyle kesme işlemi için tel erozyon yöntemi tercih edilmiştir. Kesme işlemi Yücel Makine Kalıp San.’de bulunan Mitsubishi marka tel erozyon cihazı ile yaptırılmıştır. Dikey çekme testi numuneleri (1, 2 ve 3 nolu numuneler), yatay çekme testi numuneleri (8, 9 ve 10 nolu numuneler), üst mikroyapı, sertlik ve aşınma testi numuneleri (4, 5, 6 ve 7 nolu numuneler), ve alt mikroyapı, sertlik ve aşınma testi numuneleri (11, 12, 13 ve 14 nolu numuneler) Şekil 6.5’de belirtilen kısımlardan kesilmiştir.



Şekil 6.5. Deneylerde kullanılan numunelerin üretilen malzeme üzerinde gösterimi

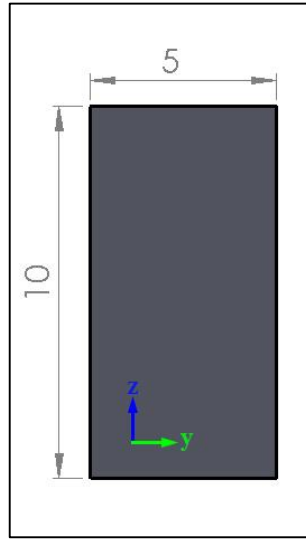
#### 6.4. Mikroyapı İncelemeleri

Plazma tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi ile malzeme üretiminin ardından mikroyapı numuneleri malzeme yüzeyinden Şekil 6.5’de gösterilen kısımlardan çıkarılmıştır. Mikroyapı incelemeleri yapılırken ilk üretilen katmanlar ile son üretilen



katmanlar arasındaki oluşan mikroyapı farklılıklarını belirlemek için üretilen tüm malzemelerde alt ve üst olmak üzere ikişer numune üzerinden inceleme gerçekleştirilmiştir.

Tel erozyon yöntemi ve yaş kesme ile numunelerin kesilmesinin ardından metalografik hazırlık gerçekleştirilmiştir. Numuneler  $10 \times 5 \times 2$  mm<sup>3</sup> boyutlarında y-z yüzeyinden görüntü alınacak şekilde kesilmiştir. Numunelerin üretim yönüne göre şematik gösterimi Şekil 6.6'de verilmiştir.



Şekil 6.6. Mikroyapı numunelerinin şematik gösterimi

Kesim işleminin ardından Struers Tegraforce 4500 cihazı ile zımparalama ve parlatma işlemleri yapılmıştır. Numuneler kaba ve ince olarak sırasıyla 220 ve 600 mesh zımparalar ile zımparalanmıştır. Daha sonra 0,3 µm elmas solüsyon ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminin ardından %3 nital ve 8 g FeCl<sub>3</sub> + 25 ml HCl + 100 ml saf su ile hazırlanan dağlayıcı ile numune yüzeyi daldırma yöntemiyle yaklaşık 30 s bekletilerek dağlanmıştır. Numuneler dağlama işlemi sonrasında etanol ile seyreltilmiştir. Dağlama işleminin ardından Nikon Clemex OM cihazı ile çeşitli büyütmelerde numune yüzeyleri incelenmiştir. Numune yüzeylerinin OM ile incelenmesinin ardından daha detaylı inceleme için ESOGÜ ARUM'da bulunan (Şekil 6.7) alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM) ile 3000X büyütmede mikroyapı görüntüleri ve mikroyapı üzerinde bulunan çeşitli nokta ve alanlardan kantitatif element analizi (EDS) yapılmıştır.

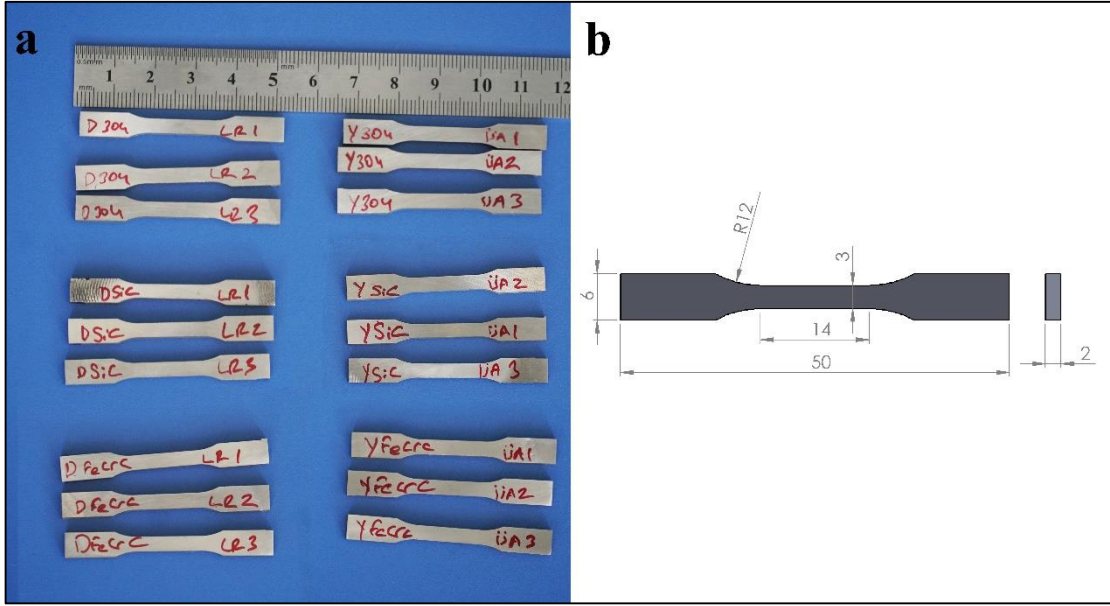


Şekil 6.7. Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FE-SEM)

P-TAKİ yöntemi ile üretilen numunelerin X-Işını Kırınım yöntemi (XRD) ile faz analizi yapılmıştır. XRD analizi ESOGÜ ARUM'da bulunan Panalytical EMPYREAN marka XRD cihazı ile yapılmıştır.

### 6.5. Çekme Testi İncelemeleri

Çekme testleri yapılırken üretilen malzemenin anizotropi durumunu belirlemek için numuneler dikey ve yatay yönlerde elde edilmiştir. Numunelerin kesim yönleri Şekil 6.5'de belirtilmiştir. Son yıllarda çekme testlerinde lokal gerilmeleri belirlemek için küçük numuneler tercih edilmektedir (Rund vd., 2015). Küçük numunelerin testi için hassas çekme testi cihazlarına ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda çekme testlerinde mümkün olduğunda küçük numune kullanılmıştır. Testlerde numune kalınlığı 2 mm, ölçü kesiti 3 mm ve ölçü boyu 14 mm olarak belirlenmiştir, üretilen parçalardan kesilen numuneler ve numune ölçüleri Şekil 6.8'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. a) Üretilen parçalardan kesilen çekme numuneleri b) Çekme deney numunesi ölçüleri



Şekil 6.9. Çekme deneyi sonrası numuneler

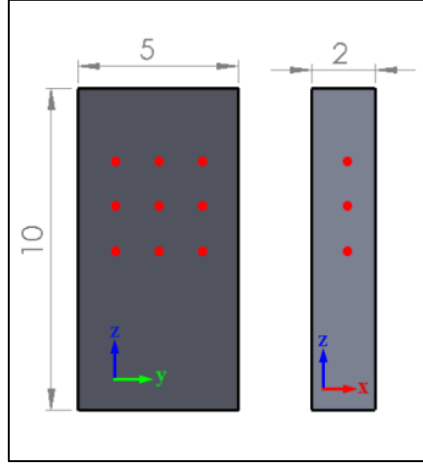
Tez kapsamında her farklı malzeme için 3 yatay 3 dikey olmak üzere 6 numune, toplamda 3 farklı malzemeden 18 çekme numunesi üretilmiştir. Testler Osmangazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarındaki Universal çekme cihazında (Shimadzu AG-IS 250 kN) yapılmıştır. (Şekil 6.10). Testler oda sıcaklığı koşullarında 5 mm/dak çekme hızında yapılmıştır. Çekme testi sonrasında numunelerin görüntüleri Şekil 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.10. Shimadzu AG-IS 250 kN çekme cihazı.

## 6.6. Sertlik Testleri

Üretilen malzemelere takviye edilen sert karbürlerin etkilerini görmek ve birbiri ile karşılaştırma yapabilmek için tüm numunelere Vickers mikrosertlik testi uygulanmıştır. Plazma tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi ile üretilen malzemelerin sertlik testleri için, Şekil 6.11’de gösterildiği gibi, ön yüzeyden (y-z düzlemi) ve yan kesitten (x-z düzlemi), yatay olarak 1 mm aralıklarla, dikey olarak 0,5 mm aralıklarla ölçümler alınmıştır. Elde edilen ölçümlerin ortalaması alınarak ortalama mikrosertlik değeri elde edilmiştir. Standart sapma değeri elde edilerek hata çubukları ile grafikte belirtilmiştir.



Şekil 6.11. Mikrosertlik numunesi

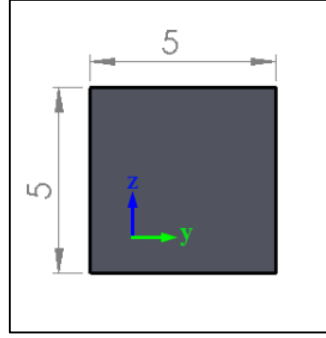
Future Tech FM 700 mikrosertlik ölçüm cihazı (Şekil 6.12) ile oda koşullarında, 10 s süre ve 100 gf ( $HV_{0,1}$ ) yük ile elde edilmiştir.



Şekil 6.12. Mikrosertlik ölçüm cihazı

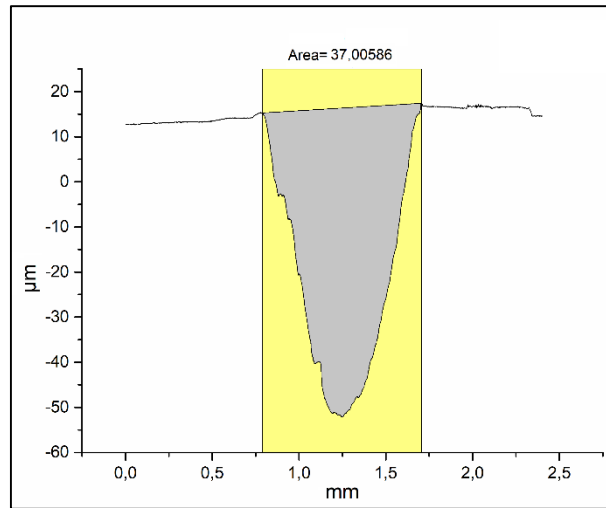
## 6.7. Aşınma Testleri

Plazma tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi ile üretilen malzemeler aşınma testleri tel erozyon ile kesilen numunelerin yüzeyinden (y-z düzlemi) yapılmıştır (Şekil 6.13). Aşınma testlerine başlamadan önce numuneler kalıplanmış ardından zımparalama ve parlatma işlemi yapılarak yüzey pürüzlülükleri  $0,2 \mu\text{m}$  olacak şekilde hazırlanmıştır.



Şekil 6.13. Aşınma testlerinin yapıldığı yüzey

Aşınma testleri küre disk geometrisinde, karşı cisim olarak 3 mm çapında sertifikalı bilyeler kullanılmıştır. Testler oda sıcaklığında kuru koşullarda 100 m aşınma mesafesi, 5 N yük ve 3 cm/s çevresel hız ile yapılmıştır. Oluşturulan aşınma izi çapı 3 mm'dir. Aşınma testleri ile sürtünme katsayıları ve aşınma oranları belirlenmiştir. Testlerin ardından numunede oluşan aşınma izi geometrisi profil ölçüm cihazı ile belirlenerek aşınma izi yan kesit alanı hesaplanmıştır. Örnek aşınma izi kesit alanı Şekil 6.14'da verilmiştir. Her numune için 4 aşınma izi alanı hesaplanmış, bu değerlerin ortalaması alınarak numunelerin aşınma oranları belirlenmiştir.

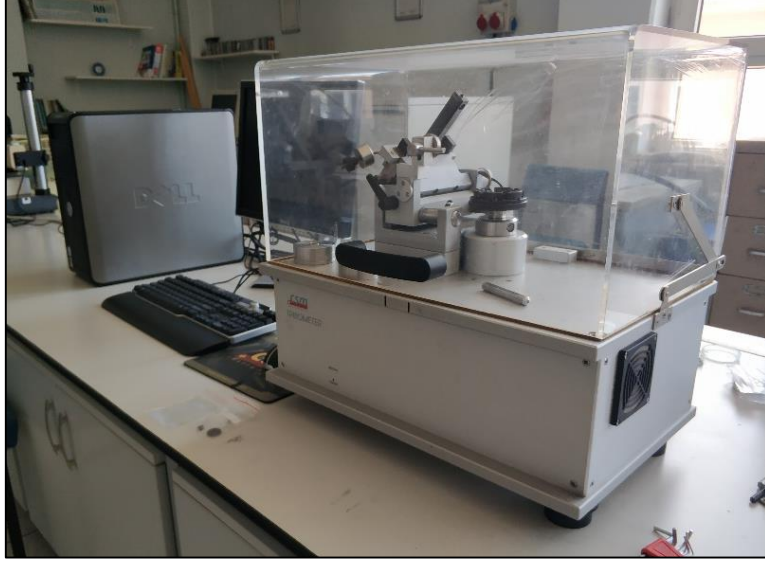


Şekil 6.14. Örnek aşınma izi kesit alanı

Aşınma testi sonrası numunelerin aşınmış yüzeyleri SEM mikroskobu EDS analizi ile incelenmiştir. Aşınma testleri ESOGÜ Makine mühendisliği bölümünde bulunan triboloji



laboratuvarında, CSM Tribometer aşınma testi cihazı (6.15) ve Mitutoyo SurfTest SJ-400 profil ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.15. Aşınma testi cihazı

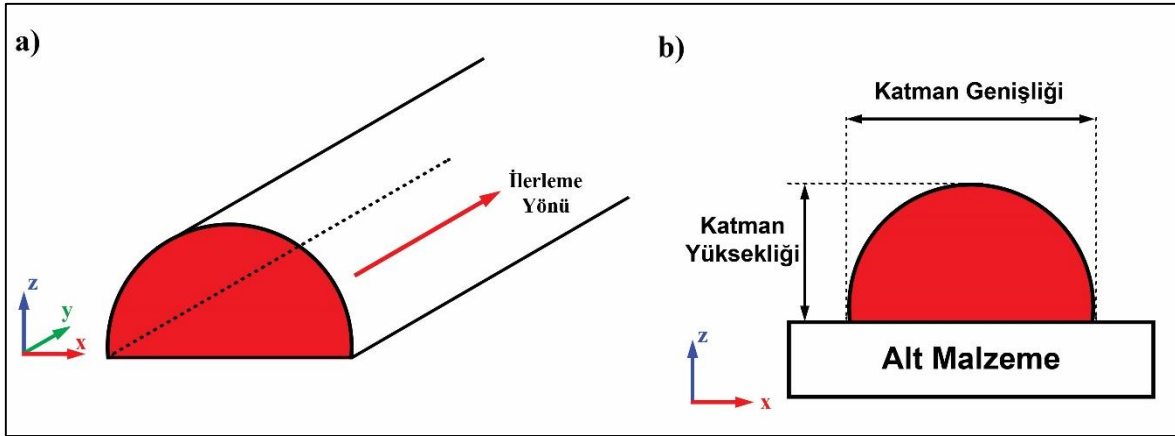
## 7. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde öncelikle ön deneyler ile deney parametrelerinin belirlenmesi çalışmaları anlatılmıştır. Daha sonra deneysel çalışmalar ile elde edilen sonuçların değerlendirilmesi yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri, aşınma testleri, mikrosertlik ölçümleri ve çekme testleri sonuçları farklı başlıklar altında yorumlanmıştır.

### 7.1. Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Deney parametrelerinin belirlenmesi ve kurulan deney sisteminin optimizasyonu için P-TAKİ yöntemi ile malzeme üretiminden önce ön deneyler yapılmıştır. Ön deneylerde üretilecek malzemelerin genişlik ve yüksekliğine doğrudan etki eden ark akımı, tel besleme hızı ve ilerleme hızı parametreleri farklı kombinasyonlarda denenmiştir. Üretilmesi planlanan malzemeler farklı ergime sıcaklıklarına sahip olduklarından her malzeme türü için ayrı parametre çalışması yapılmıştır. Bu ön çalışmalarda başarılı olarak değerlendirilen parametreler ile malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Ön deneylerde 3 mm çaplarında, 304 paslanmaz çelik tel, 304 paslanmaz çelik + B<sub>4</sub>C, 304 paslanmaz çelik + SiC ve 304 paslanmaz çelik + FeCrC kompozit teller ayrı ayrı kullanılmıştır. Numuneler tek katman olarak y yönünde 50 mm uzunluğunda üretilmiş, ardından katman yüksekliği ve katman genişliği değerleri belirlenerek değerlendirme yapılmıştır. Katman genişlik ve yükseklik ölçüleri, ilerleme yönüne göre Şekil 7.1'de gösterilen kısımlardan alınmıştır. Tek katman olarak numune üretimine uygun olmayan parametreler çalışmada değerlendirilmemiştir. Fakat deney parametrelerinin belirlenmesinde fikir sunmuştur.





Şekil 7.1. a) Üretim ilerleme yönü, b) Üretim ilerleme yönüne göre katman yükseklik ve genişliğinin belirlendiği bölgelerin şematik gösterimi

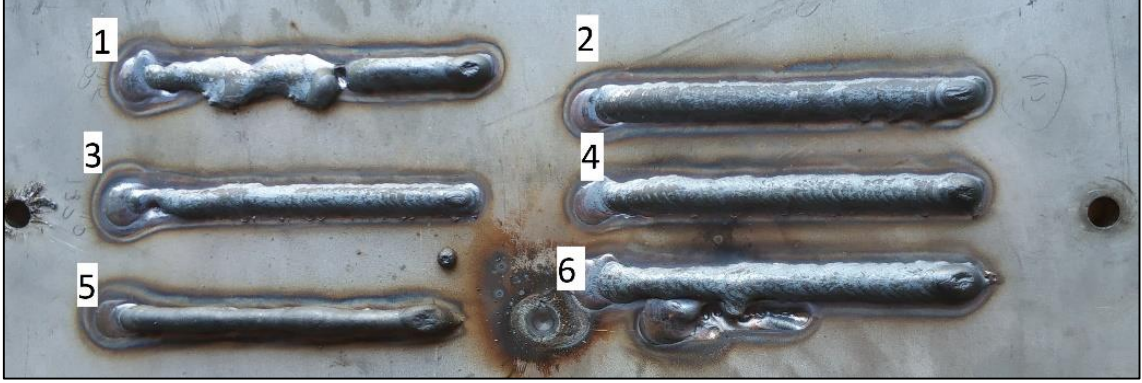
Ø3 mm AISI 304 paslanmaz çelik tel ile yapılan ön çalışmalarda altı adet numune üretilmiştir. Bu numunelerin üretiminde kullanılan parametreler çizelge 7.1’de verilmiştir. Ark akım değeri olarak 80 A, 90 A ve 100 A değerleri denenmiş fakat kullanılan tel besleme hızlarında ergime süresi yeterli olmamıştır. 110 A, 115 A ve 120 A akım değerlerinde uygun biriktirmeler elde edilmiştir. 120 A akım değerinin üzerindeki değerlerde ısı girdisinin fazla olması ve yeterli soğumanın olmaması nedeniyle ön çalışma yapılmamıştır.

Çizelge 7.1 AISI 304 paslanmaz çelik ile yapılan ön deney parametreleri

P-TAKİ Parametreleri	1	2	3	4	5	6	Birim
Ark akımı	115	115	110	110	120	120	A
Ark voltajı	25	25	25	25	26	26	V
İlerleme hızı	4	3	4	3	4	3	mm.s <sup>-1</sup>
Tel besleme hızı	9	9	9	9	9	9	mm.s <sup>-1</sup>
Koruyucu gaz akışı	10						L.dk <sup>-1</sup>
Plazma gazı akışı	0,5						L.dk <sup>-1</sup>

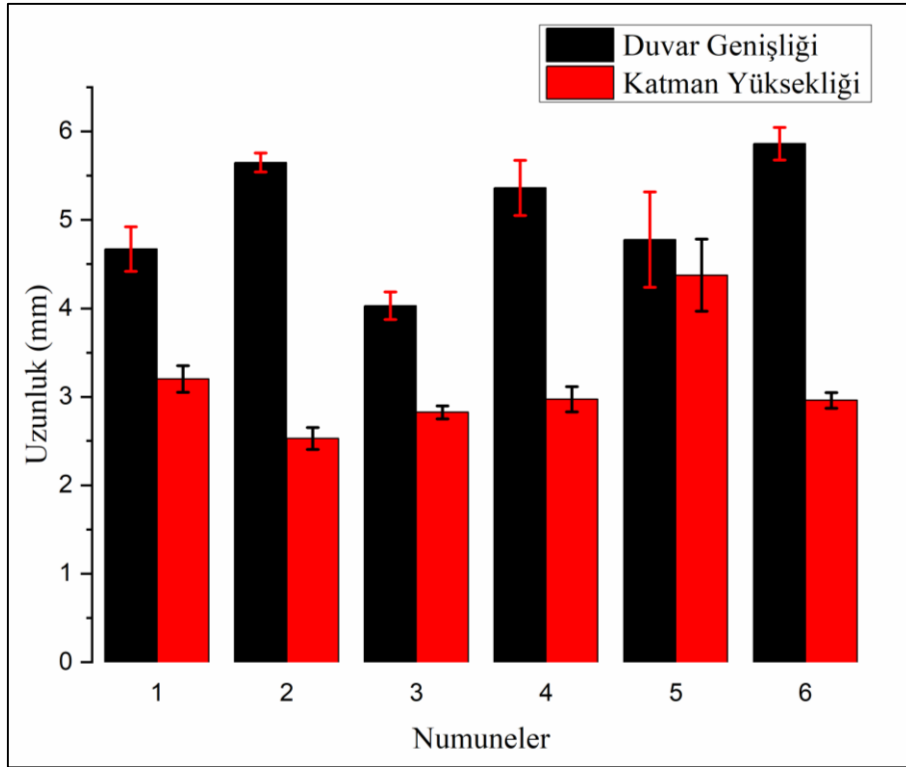
Mevcut tel besleme ünitesi ile en düşük tel besleme hızı 8 mm/s olarak oluşmaktadır, fakat bu hızla ilerlerken telde titreşim oluşmaktadır. Bu yüzden titreşimin olmadığı en düşük değer olan 9 mm/s tel besleme hızı kullanılmıştır. Bu hız değerinin (9 mm/s) üzerindeki tel besleme hızlarında ise yetersiz ergime (ergime için yeterli süre olmadığı için) oluşmuştur. Kullanılan akım değerlerinde, ilerleme hızı (torç hızı) olarak 2 mm/s’nin altındaki hızlarda

tel eriyip kenarlara taşmıştır. 5 mm/s'nin üzerindeki hızlarda ise eriyen damlalar arasında mesafeler oluşmuştur. Bu yüzden 3 ve 4 mm/s ilerleme hızında değerler ile çalışılmıştır.



Şekil 7.2. Ön deneylerde oluşturulan AISI 304 numunelerin üstten görünümü

Ön deneylerde oluşturulan numunelerin üstten görünümü Şekil 7.2'de, katman kalınlıkları ve duvar genişlikleri hata çubukları ile birlikte Şekil 7.3'de verilmiştir. Ölçüm değerleri 50 mm uzunluğunda üretilen numunelerden 5'er adet ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Hata çubukları ise 5'er adet ölçüm değerlerinin standart sapması alınarak belirlenmiştir. Hata çubuğunun miktarı, katman genişliğindeki veya yüksekliğindeki dalgalanmalar (farklılıklar) ile doğru orantılıdır.



Şekil 7.3. Ön deneylerde 304 paslanmaz çelik tel ile oluşturulan numunelerin katman kalınlıkları ve duvar genişlikleri

120 A akım değerine sahip 5 ve 6 nolu numuneler incelendiğinde 5 nolu numune yüksek katman kalınlığı ve düşük duvar genişliğine sahip olmasına rağmen ölçümlerde çok fazla dalgalanma görülmüştür. 110 A akım değerindeki 3 ve 4 nolu numuneler incelendiğinde katman kalınlığı ve duvar genişlikleri birbirine yakın olmasına rağmen 4 nolu numunenin ölçümlerinde daha fazla dalgalanma görülmüştür. Bu durumda 110 A akım değerindeki 3 nolu numunenin dalgalanmaları ve katman yükseklik ve duvar genişlikleri, biriktirme için 4 nolu numuneye göre daha uygundur. 110 A ve 120 A akım değerlerindeki numuneler karşılaştırıldığında 120 A numunelerin katman genişlikleri daha fazla, katman yüksekliği ise daha düşüktür, yani yüzeye yayılma olmuştur. Çok katmanlı üretim göz önüne alındığında yüzeye yayılmanın daha az olduğu 110 A akım değerleri uygun görülmüştür. 110 A ve 120 A akım değerlerinin denenmesinin ardından 1 ve 2 nolu numunelerde 115 A akım değeri, iki farklı ilerleme hızında denenmiştir. 1 ve 2 nolu numuneler incelendiğinde, 1 nolu numunenin daha uygun katman genişlik ve yüksekliğine sahip olmasına rağmen, 3 mm/s ilerleme hızındaki 2 nolu numuneye göre dalgalanmaları yüksek çıkmıştır.

TAKİ yöntemi ile çok katmanlı malzeme üretimi yapılırken biriktirmenin doğrusal olması için ölçüm dalgalanmalarının düşük olması gerekmektedir. 2 ve 3 nolu numuneler bu

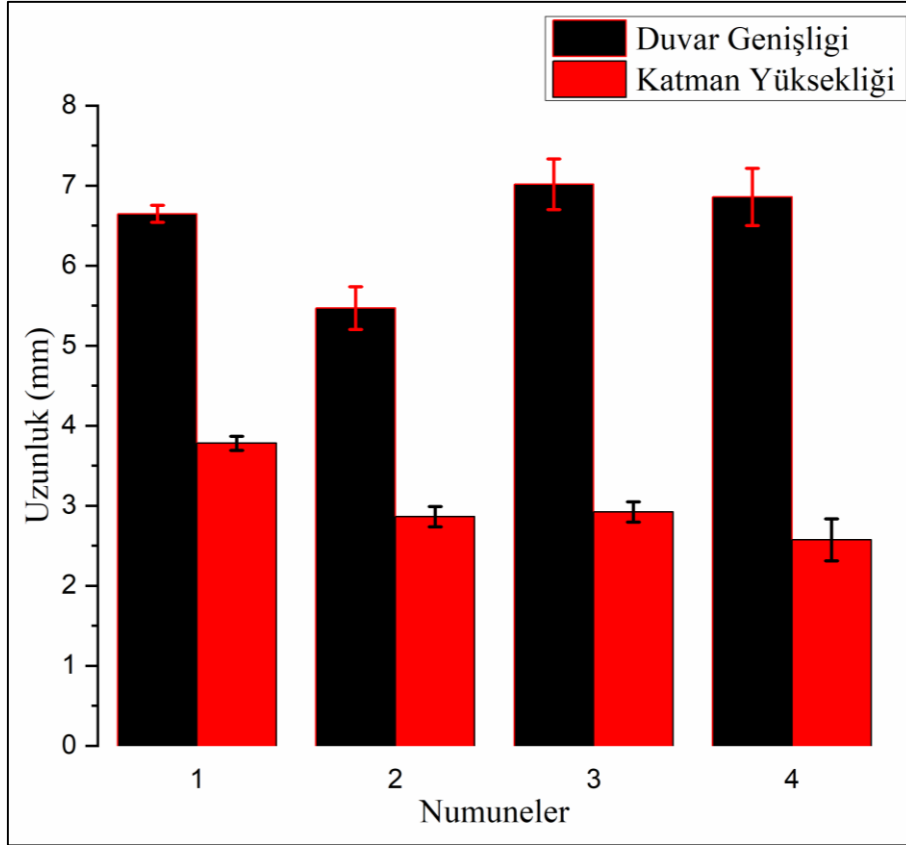
duruma daha uygundur. Katmanlar üst üste biriktirildikçe z yönünde de dalgalanmalar olacağı için katman genişliği fazla olan 2 nolu numunenin parametreleri (akım değeri 115 A, ilerleme hızı 3 mm/s, tel besleme hızı 9 mm/s ) tercih edilmiştir.

SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin deney parametrelerini belirlemek için öncelikle AISI 304 P-TAKİ malzemesi için kullanılan parametreler denenmiş fakat yeterli ergime elde edilememiştir. Bunun üzerine akım değeri yükseltilerek deneyler yapılmıştır. Çizelge 7.2’de verilen parametreler ile dört adet tek katman üretimi başarılı bir şekilde yapılmıştır.

Çizelge 7.2 SiC takviyeli tel ile yapılan ön deney parametreleri

P-TAKİ Parametreleri	1	2	3	4	Birim
Ark akımı	120	120	125	125	A
Ark voltajı	26	26	27	27	V
İlerleme hızı	3	4	3	4	mm.s <sup>-1</sup>
Tel besleme hızı	9	9	9	9	mm.s <sup>-1</sup>
Koruyucu gaz akışı	10				L.dk <sup>-1</sup>
Plazma gazı akışı	0,5				L.dk <sup>-1</sup>

SiC takviyeli tel ile oluşturulan ön deney numunelerin katman kalınlıkları ve duvar genişlikleri hata çubukları ile birlikte Şekil 7.4’de verilmiştir. 120 A akım değeri ile 3 mm/s ve 4 mm/s ilerleme hızlarında yapılan deneylerde, katman yüksekliği daha fazla ve dalgalanmanın daha az olduğu 3 mm/s ilerleme hızına sahip 1 nolu numunenin üretim için daha uygun olacağı düşünülmüştür. Ardından 125 A akım değeri ile denemeler yapılmıştır. Bu akım değerinde de 3 mm/s ve 4 mm/s ilerleme hızları kullanılmıştır. 120 A akım değerine göre katman yüksekliği bir miktar azalmış, katman genişliği bir miktar artmıştır, fakat dalgalanmalar daha fazla olmuştur. Tüm numuneler göz önünde bulundurulduğunda, SiC takviyeli tel ile üretilecek malzemelerde 1 nolu numunenin parametrelerinin (akım değeri 120 A, ilerleme hızı 3 mm/s, tel besleme hızı 9 mm/s) kullanılması uygun görülmüştür.



Şekil 7.4. n deneylerde SiC takviyeli tel ile oluşturulan numunelerin katman kalınlıkları ve duvar genişlikleri

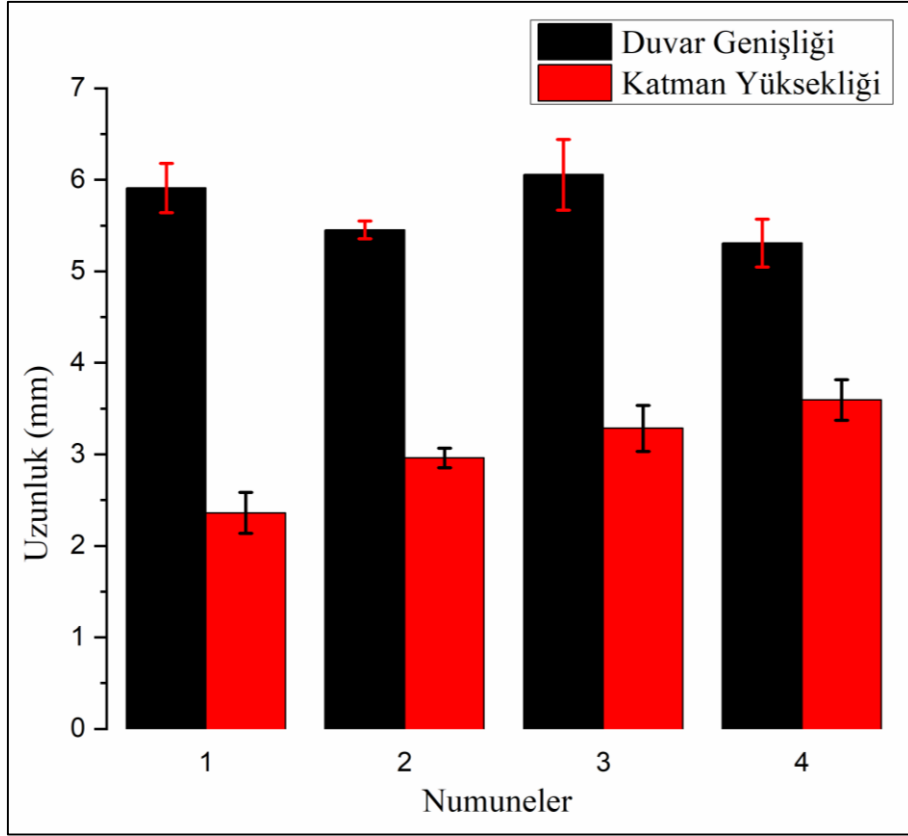
FeCrC takviyeli tel ile üretilen malzemenin deney parametrelerinin belirlenmesi için SiC takviyeli P-TAKİ malzemesi için kullanılan deney parametreleri ile deneme yapılmış fakat uygun tek katman numune retilenmemiştir. Farklı kombinasyonlarda yapılan çalışmalarda tel besleme hızının 12 mm/s olarak kullanılması ile tek katman numuneler üretilmiştir. Çizelge 7.3’de tek katman numune üretim yapıldığı parametreler verilmiştir.

Çizelge 7.3 FeCrC takviyeli tel ile yapılan ön deney parametreleri

P-TAKİ Parametreleri	1	2	3	4	Birim
Ark akımı	120	115	115	110	A
Ark voltajı	25	24	24	23	V
İlerleme hızı	3	3	2	3	mm.s <sup>-1</sup>
Tel besleme hızı	12	12	12	12	mm.s <sup>-1</sup>
Koruyucu gaz akışı	10				L.dk <sup>-1</sup>
Plazma gazı akışı	0,5				L.dk <sup>-1</sup>

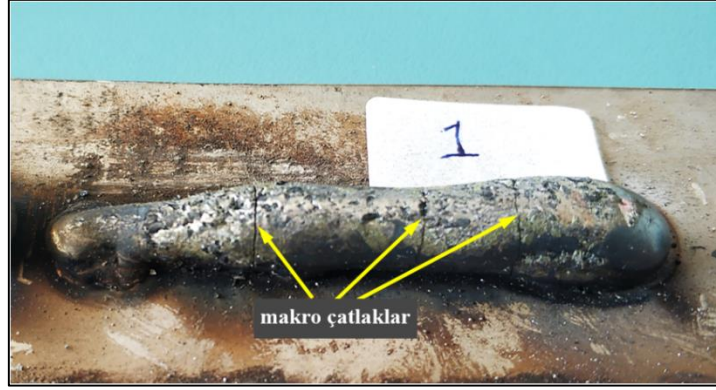
FeCrC takviyeli tel ile üretilen ön deney numunelerin katman kalınlıkları ve duvar genişlikleri hata çubukları ile birlikte Şekil 7.5’de verilmiştir. FeCrC tozunun ergime sıcaklığının SiC tozundan düşük olması ve ince borulara toz doldurulması sırasında oluşan boşlukların ergime süresini değiştirmesi nedeniyle tel hızı arttırılmıştır. 1 nolu numunede ölçü boyutlarındaki dalgalanmalarının fazla olması nedeniyle 2 nolu numunede aynı koşullarda 115 A akım değeri ile tek katman numune üretilmiştir. 1 nolu numuneye göre daha küçük katman genişliği ve daha yüksek katman kalınlığına sahip olması ve dalgalanmaların çok küçük olması nedeniyle 1 nolu numuneye göre tercih sebebi olmuştur. Daha sonra düşük ilerleme hızı (3 nolu numune) ve daha düşük akım değeri ile (4 nolu numune) tek katman numune üretilmiştir. 3 nolu numunede ilerleme hızının yavaş olmasından dolayı katman genişliği ve yüksekliği artmış aynı zamanda dalgalanmalar da artmıştır. 4 nolu numune 2 nolu numune ile kıyaslandığında akım değerinin azalması nedeniyle katman genişliği azalmış katman kalınlığı artmıştır. Bu durumda 4 nolu numune daha uygundur fakat dalgalanmaların fazla olması nedeniyle FeCrC takviyeli tel ile üretilen numunelerde 2 nolu numunenin parametreleri ( akım değeri 115 A, ilerleme hızı 3 mm/s, tel besleme hızı 12 mm/s) kullanılmıştır.

Parametrelerin belirlenmesinin ardından tüm malzeme türlerinde 5 katmanlık malzeme üretimi yapılmıştır. Üretilen bu 5 katman malzemelerin z doğrultusunda geometrik doğruluğunun yüksek olmasının ardından asıl malzeme üretimine geçilmiştir. Üretilen 5 katman numunelerde z doğrultusunda istenilen geometrik doğruluğun olmaması durumunda parametreler değiştirilerek yapılan işlemler tekrarlanmıştır.



şekil 7.5. Ön deneylerde FeCrC takviyeli tel ile oluşturulan numunelerin katman kalınlıkları ve duvar genişlikleri

B<sub>4</sub>C takviyeli tel ile farklı ilerleme hızı, tel besleme hızı ve akım değerlerinde tek katman üretmek için deneyler yapılmıştır. Fakat numune üretiminin hemen ardından hızlı soğumanın etkisi ile şekilde görülen makro çatlaklar oluşmuştur. Tel ile tozların yüksek enerji girdisi ile erimesinin ardından katılaşma sırasında, ergime sıcaklıkları farkı yüksek olan malzemeler çatlama göstermiştir. Oluşan çatlaklardan dolayı malzeme üretimi yapılmamıştır. 110 A akım değeri, 3mm/s ilerleme hızı ve 9 mm/s tel besleme hızı ile üretilen tek katman numune şekil 7.6'da verilmiştir.



Şekil 7.6. B<sub>4</sub>C Takviyeli tel ile oluşturulan tek katman numune

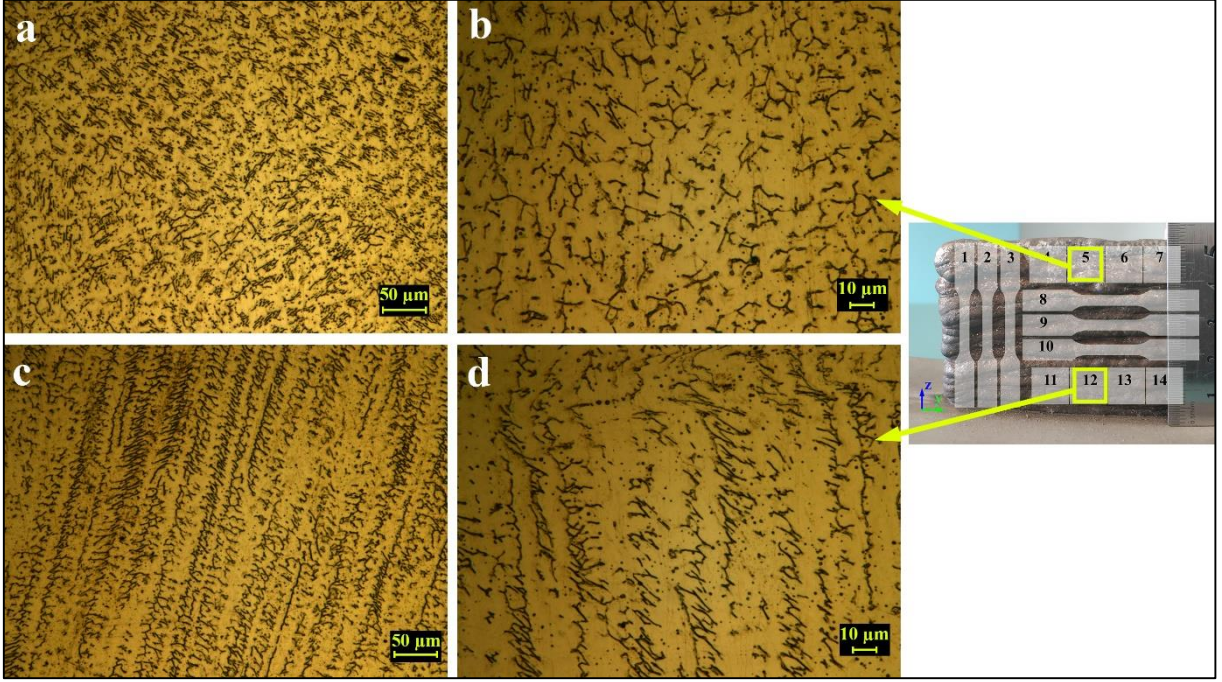
## 7.2. Mikroyapı İncelemeleri

Bu kısımda plazma-tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi ile üretilen 3 farklı malzemeden elde edilen 6 numunenin mikroyapıları incelenmiştir. Mikroyapı görüntüleri için optik mikroskop (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM), mikroyapı üzerindeki element ve faz analizleri için enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisi (EDS) kullanılmıştır. Ayrıca X-ışını kırınım (XRD) analizleri ile mevcut fazlar belirlenmiştir. P-TAKİ yöntemi ile üretilen 304 paslanmaz çelik numunelerinin optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.7'de verilmiştir. 304 P-TAKİ numunesinin mikroyapısı genel olarak östenitik faz (açık renkli) ve östenit faz sınırında kalan ferritik (koyu renkli) yapıdan oluşmaktadır. Östenitik fazlar çoğunlukla sütunlu yapılar (Şekil 7.7.c) ve eş eksen tanelerden (Şekil 7.7.a) oluşmuştur. Ferrit fazlarının ise ince, uzun veya iskelet şeklinde yer aldığı görülmektedir.

Östenitik paslanmaz çeliğin katılaşması sırasındaki faz dönüşümü, büyük ölçüde alaşımın kimyasal bileşimine bağlıdır. Alaşımın kimyasal bileşimindeki Cr<sub>es</sub>/Ni<sub>es</sub> oranına göre dört farklı moda ayrılır. Bu konu hakkında detaylı bilgi 2. Bölümde östenitik paslanmaz çelikler kısmında verilmiştir. Deneyde kullanılan AISI 304 paslanmaz çelik telin kimyasal bileşimine göre Cr<sub>es</sub> değeri 19,92 ve Ni<sub>es</sub> değeri 11,76'dır. Hesaplamalar sonucunda Cr<sub>es</sub>/Ni<sub>es</sub> oranı 1,69 olmaktadır. Elde edilen değer 1,48, <Cr<sub>es</sub>/Ni<sub>es</sub><1,95 arasında olduğu için ferrit-östenit (FA) moduna sahiptir.

$$\text{FA modu} = L \rightarrow (L + \delta) \rightarrow (L + \delta + \gamma) \rightarrow (\gamma + \delta) \quad (7.1)$$





Şekil 7.7. 304 paslanmaz çelik numunelerinin OM görüntüleri a) 200x büyütme üst numune, b) 500x büyütme üst numune, c) 200x büyütme alt numune, d) 500x büyütme alt numune

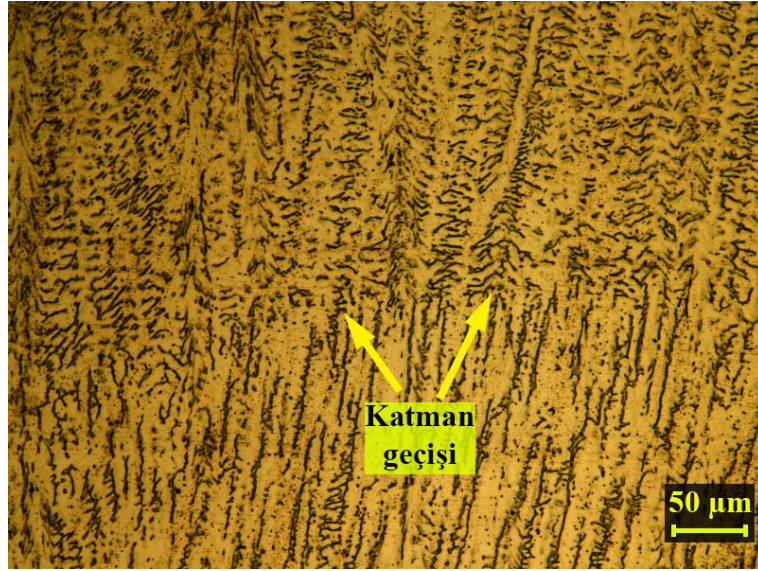
FA modunun oluşumu Denk 7.1de belirtilmiştir. Denk. 7.1'e göre katılaşma sırasında birincil ferrit fazları ( $\delta$ ) ilk önce sıvı fazdan (L) üretilmiştir. Daha sonra hızlı soğumanın etkisi ile östenit fazlar ( $\gamma$ ) oluşmaya başlamış ve gelişmiştir. Son olarak östenit dendritler oluşmuş ve östenit fazın tane sınırlarında ince, uzun veya iskelet şeklinde ferrit faz oluşmuştur.

Genel olarak P-TAKİ ile üretilen tüm malzemelerde üretilen ilk katmanlar ile son katmanlar arasında farklı ısı miktarları ve sıcaklıklar ortaya çıkmaktadır. Bu durum farklı soğuma hızları ve katılaşma süreleri ortaya çıkararak mikroyapıyı etkilemektedir. Bu yüzden P-TAKİ ile üretilen tüm numunelerinin mikroyapıları üst ve alt olarak iki grupta incelenmiştir. 304 P-TAKİ alt numunede ince ve sütunlu yapılar üst katmanlara doğru neredeyse dik bir şekilde uzanmıştır (Şekil 7.7.c,d). Bu durum biriktirme esnasında, ilk katmanlar biriktirildiğinde sıcaklığın hızlı bir şekilde oda sıcaklığında olan alt malzemeye yayılmasından dolayıdır. Alt malzeme ile ilk katman arasındaki ara yüzeyde sıcaklık farkı çok yüksektir. Bu yüzden yüksek bir soğutma hızı oluşmuştur.

304 P-TAKİ üst numunesinin (son biriktirilen katmanlarda) OM görüntüleri incelendiğinde, östenit yapı alt numuneye baskın olarak eş eksenli ve daha kaba tanelerden

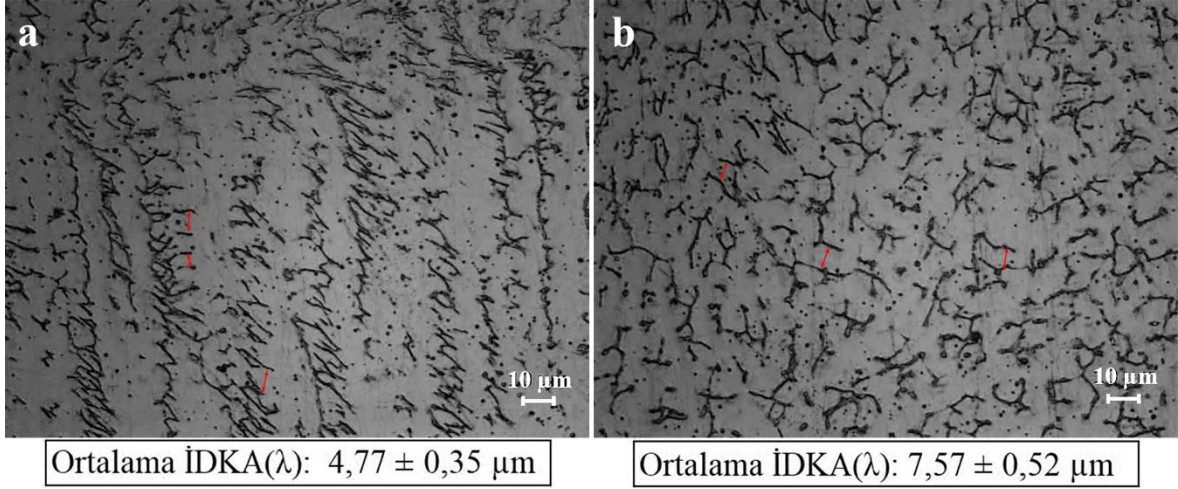
oluşmuştur. Üst numunedeki katmanlar biriktirilirken, biriktirilen yüzey daha sıcak olduğu için, katmanlar arası yüzeyde sıcaklık farkı daha düşüktür ve düşük bir soğutma hızı oluşmuştur. Üst numunedeki östenit yapının farklı olması bu soğutma hızı farkından dolayıdır. Direk hava ile soğuma olduğu için üst numunede bir katmanın son katılaştığı kısım orta bölgesidir. Bu yüzden taneler eş eksenli ve daha kaba şekilde oluşmuştur (Şekil 7.7 b).

Şekil 7.8’de 304 P-TAKİ numunesinin üst katmanlarından alınan OM mikroyapı görüntüsünde, katman geçiş bölgesi verilmiştir. Bu görüntüde mikroyapı geçişi net bir şekilde görülmektedir. Üstteki katmanın alt kısmında (katman geçişinin üstü) hücreli yapılar görülmektedir. Katman geçişinin altında ise sütunsal yapılar bulunmaktadır.



Şekil 7.8. 304 P-TAKİ numunesinin katman geçiş bölgesinin OM görüntüsü

Katman geçişlerindeki bu döngü, ortalama 3. ve 4. katmandan itibaren benzer şekilde devam etmektedir, üst katmanlara çıkıldıkça, sadece dendrit kollar arasındaki mesafe küçük miktarlarda artmıştır. Katmanın üstündeki sütunsal tanelerin daha iri olması, bir sonraki katman ısıtısının neden olduğu yeniden ısıtma ve kısmen yeniden ergitmenin bir sonucudur. İlk üretilen 3 – 4 katmanda ise sütunsal yapı devam ettiği için katman geçişleri net değildir.



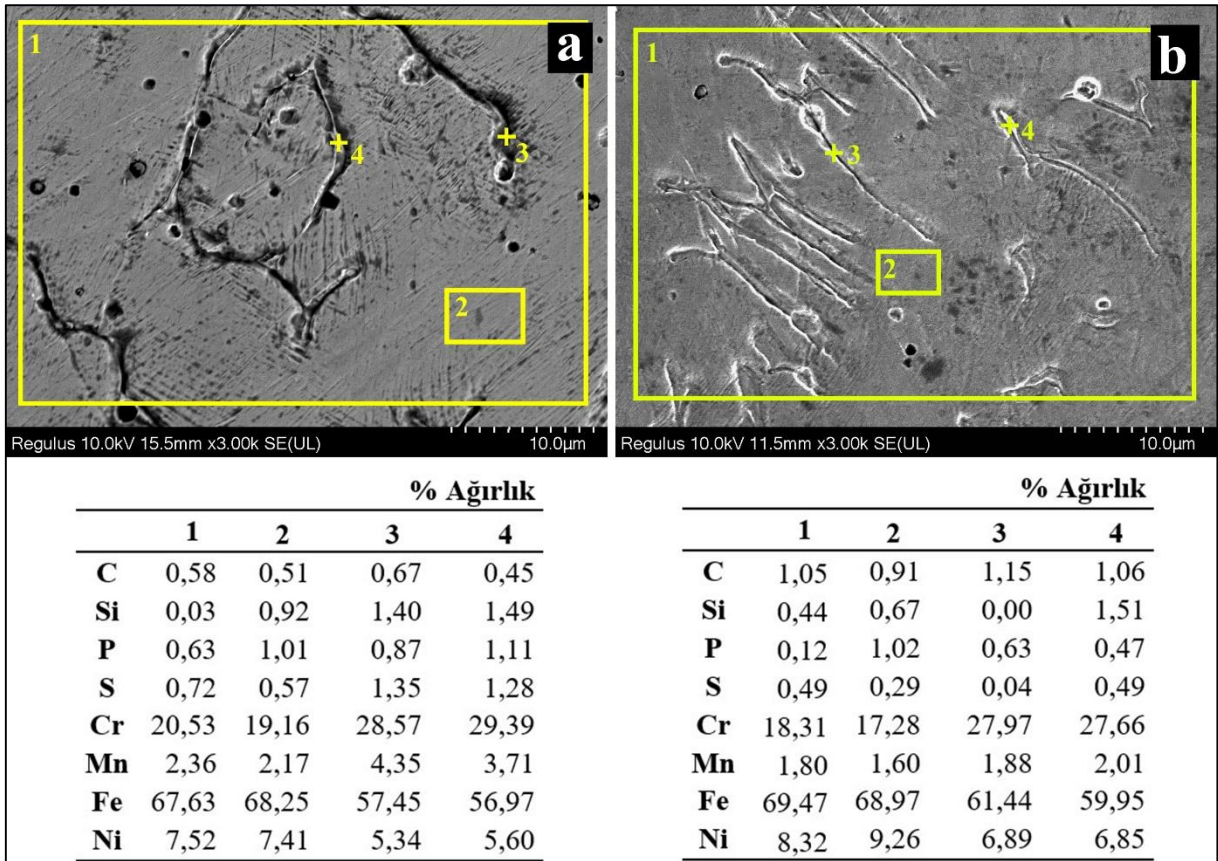
Şekil 7.9. Ortalama İDKA mesafelerinin belirlendiği OM görüntüleri, a) alt numune, b) üst numune

Katılaşma zamanı dendritlerin boyutlarını etkiler (Askeland, 1996). Üretilen malzemelerin farklı kısımlarındaki katılaşma zamanlarını anlayabilmek için ikincil dendrit kolları arasındaki (İDKA) mesafeler belirlenmiştir. 304 P-TAKİ üst ve alt numunelerin İDKA mesafeleri Şekil 7.9'daki gibi ImageJ yazılımı kullanılarak ölçülmüştür. Ortalama İDKA ( $\lambda$ ) mesafesi alt ve üst bölge için sırasıyla  $4,77 \pm 0,35 \mu\text{m}$  ve  $7,57 \pm 0,52 \mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Ortalama İDKA mesafeleri üst numunede daha büyük çıkmıştır. Yapılan çalışmalarda İDKA mesafesi ile soğutma hızı arasında bir bağıntı elde edilmiştir. Bu bağıntı aşağıda verilmiştir.

$$\lambda = 50.(CR)^{-0,4}$$

burada CR, soğutma hızıdır ve birimi K/s'dir (L. Wang vd., 2019; Yin ve Felicelli, 2010). Bağıntıya göre soğutma hızı ile İDKA mesafesi arasında ters orantı bulunmaktadır. Alt numunelerden üst numunelere doğru soğutma hızının azaldığını açıklamıştık. Bu bağıntı açıklanan durumu doğrulamaktadır.

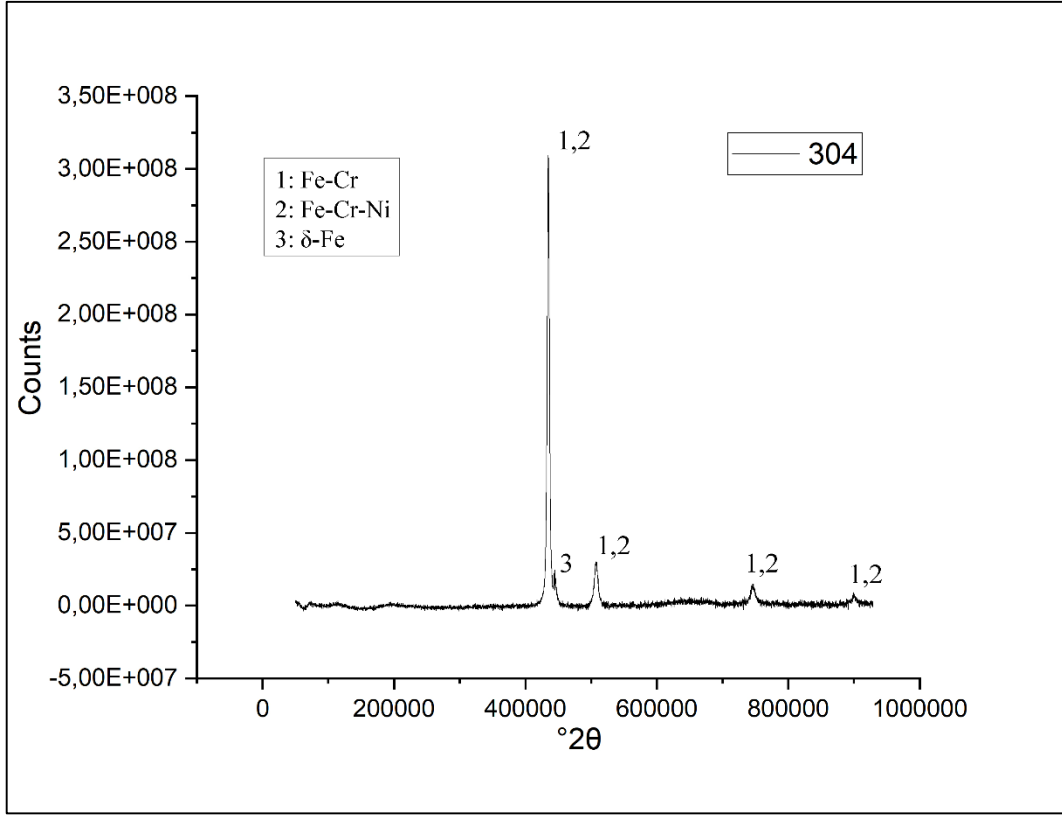




Şekil 7.10. 304 P-TAKİ numunelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri a) Üst numune, b) Alt numune

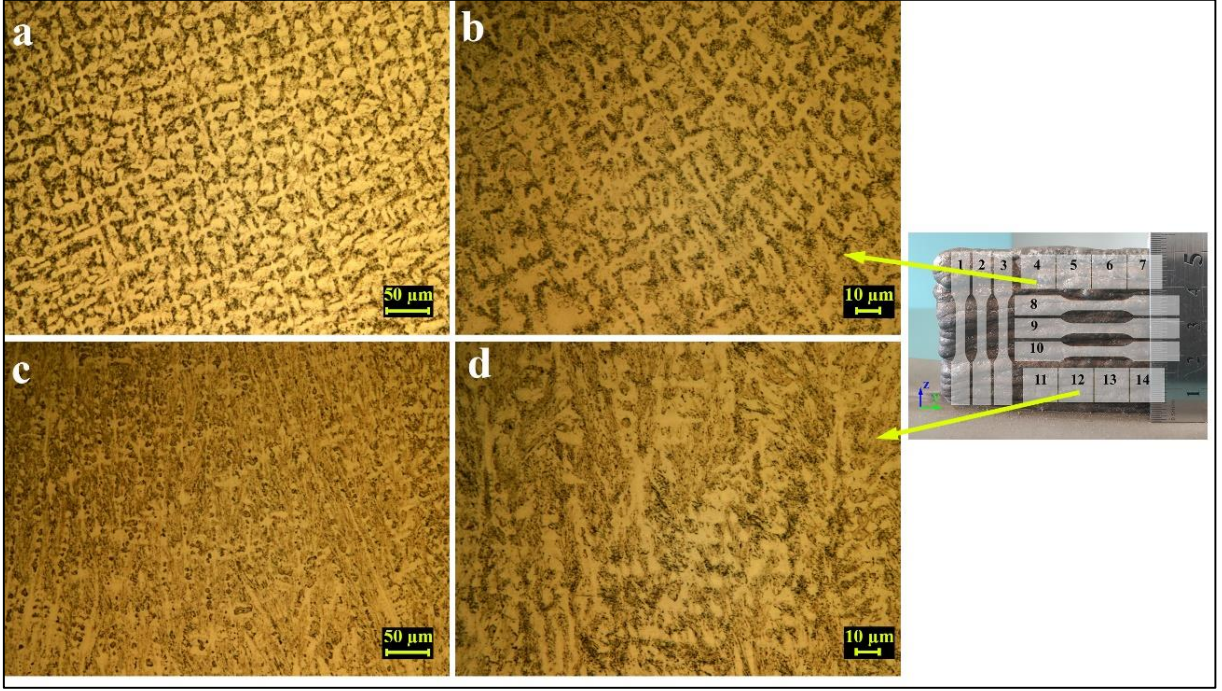
304 P-TAKİ numunelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.10'da verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde 3000x büyütmede OM görüntülerinde olduğu gibi dendrit ve östenit yapılar açıkça görülmektedir. EDS analizleri incelendiğinde hem alt numunenin hem de üst numunelerin östenit bölgesinde, ağırlık olarak Fe ve Ni miktarları, dendrit bölgeye göre daha azdır, Cr miktarı ise daha fazladır. Bu durum katılaşma esnasında, dendrit kollar oluşurken meydana gelen ayrışma ile oluşmuştur. Üst numune ile alt numunelerde benzer bölgelerdeki Fe ve Cr yüzdelikleri birbirine yakın çıkmıştır.

304 P-TAKİ numunesinin XRD analizi incelendiğinde (Şekil 7.11), östenit yapı (Fe-Cr, Fe-Cr-Ni) ve  $\delta$ -Fe fazları elde edilmiştir. Bu sonuç EDS sonuçları ile uyumludur.



Şekil 7.11. 304 P-TAKİ malzemesinin XRD analizi

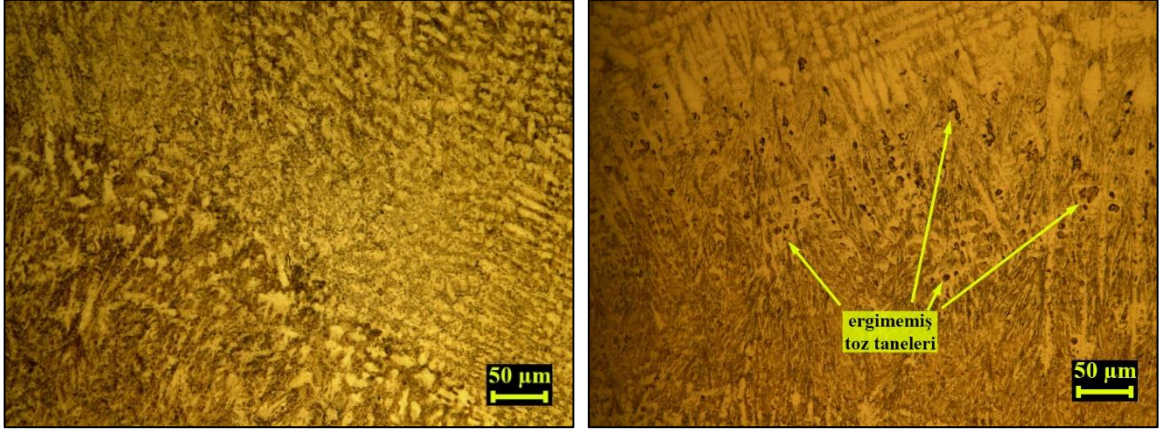
P-TAKİ yöntemi ile üretilen SiC takviyeli alt ve üst numunelerin OM görüntüleri Şekil 7.12’de verilmiştir. Görüntüler katmanların orta bölgelerinden alınmıştır. Görüntülerde alt ve üst numunelerin mikroyapıların genel olarak dendrit kollardan ve dendritler arası ötektik bölgeden oluşmaktadır. Alt ve üst numuneler benzer yapılardan oluşmasına rağmen morfoloji tamamen farklıdır. Alt numunede dikey olarak yönlenmiş dendrit kollar görülmektedir (Şekil 7.12.c,d). 304 P-TAKİ malzemesinin alt numunesinde olduğu gibi bu numunede de, ilk katmanların biriktirilmesinin ardından tüm ısı hızlı bir şekilde alt malzemeye, kalan ısı da katmanın üst kısmından havaya yayılmıştır. Yayılmanın etkisi ile katılma hızlı bir şekilde olmuş ve ısının yayılma yönünün de etkisiyle birlikte dikey yönlenmiş dendrit kollar oluşmuştur. Üst numunede ise katmanlar biriktikçe soğutma hızının azalmasından dolayı daha geniş ve eşit eksenli dendritler arası ötektik yapılar elde edilmiştir.



Şekil 7.12. SiC takviyeli numunelerinin OM görüntüleri a)200x büyütme üst numune, b)500x büyütme üst numune, c)200x büyütme alt numune, d)500x büyütme alt numune

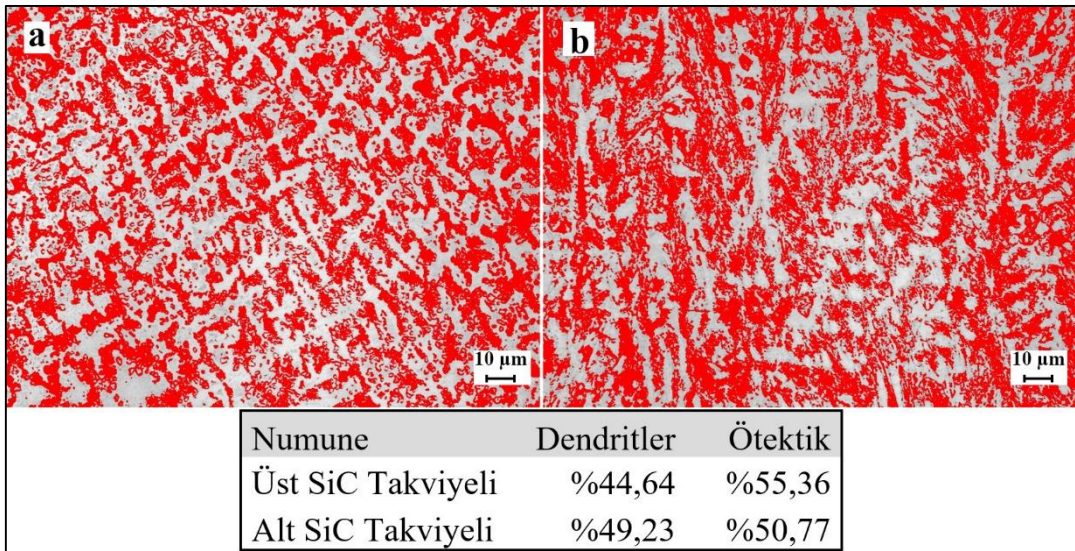
Şekil 7.13'de SiC takviyeli malzemede katmanın geçiş bölgesinin farklı bölgelerinden OM görüntüleri verilmiştir. Alttaki katman biriktirilirken katmanın üst kısımları hava ile temastan dolayı daha hızlı katılaşmıştır ve dikey olarak ince uzun dendritler oluşmuştur. Katman geçişinin üstündeki katmanda ise bu katmanın alt kısımları katılırken, alttaki katmanın sıcaklığında dolayı soğuma hızı azalmıştır ve yatay ve daha iri boyutlu dendritler oluşmuştur (Şekil 7.13.a). Katman geçişinin olduğu bölgede 304 P-TAKİ numunesindeki gibi net bir geçiş olmamış bir ara geçiş bölgesi oluşmuştur. Bu ara geçiş bölgesi, alt katman oluşurken ergimeyen bazı SiC tozlarının, üstteki katman biriktirilirken sonradan ergimesi ile farklı bir yapıda oluşmuştur. Ayrıca bazı katmanların geçiş bölgelerinde düşük miktarda ergimeyen tozların kaldığı belirlenmiştir. (Şekil 7.13.b).





Şekil 7.13. SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin katman geçiş bölgesinin OM görüntüleri

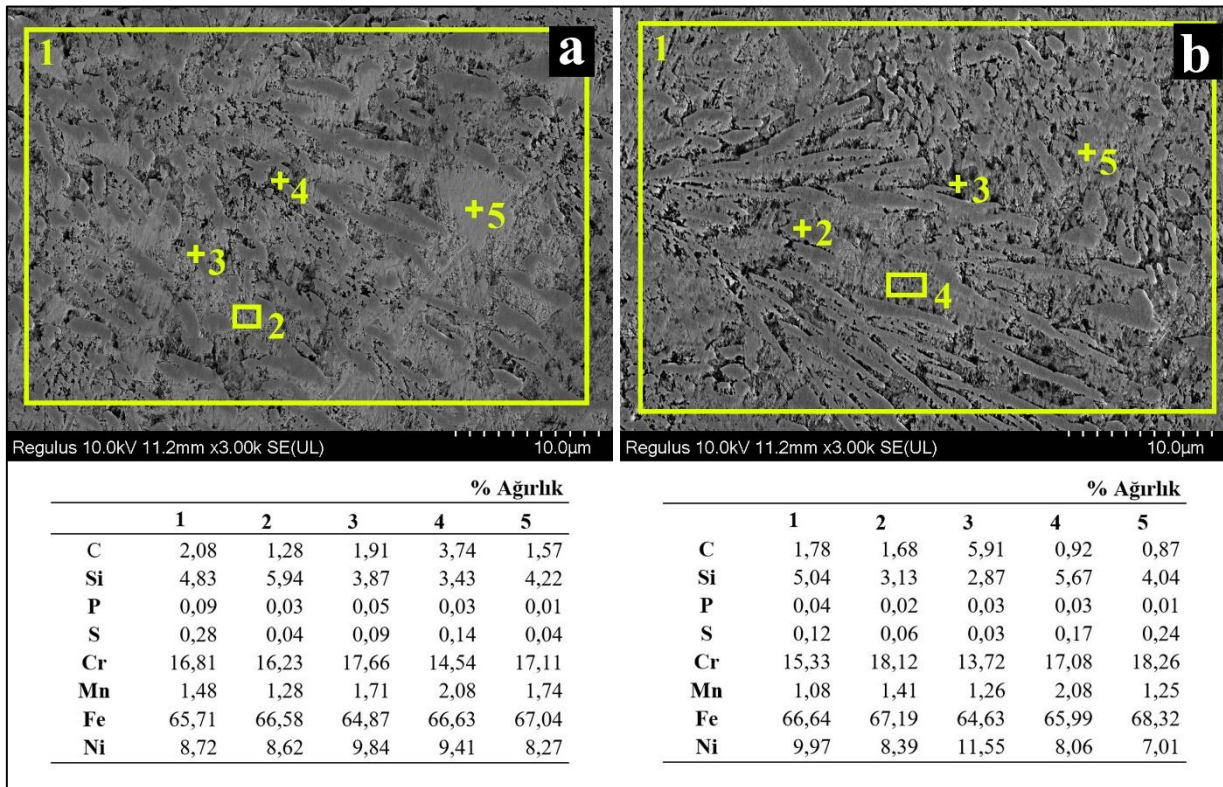
SiC takviyeli numunelerin dendrit ve ötektik bölgelerin yüzdesel dağılımı ImageJ programı ile belirlenmiş ve Şekil 7.14’de verilmiştir. Kırmızı olarak işaretlenen bölgeler dendrit bölgelerdir, hesaplamalar yüzdelik alan yöntemi ile yapılmıştır. Beklenildiği gibi, üst numunenin dendrit miktarı alt numuneden yaklaşık %5 daha düşüktür. Katmanlar üretildikçe soğutma hızının azalmasından dolayı dendritler arası ötektik yapı daha fazla büyümek için zaman bulmuştur.



Şekil 7.14. SiC takviyeli numunelerin dendrit ve ötektik bölgelerin yüzdesel dağılımı, a) üst numune, b) alt numune

SiC takviyeli P-TAKİ malzemelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri Şekil 7.15’de verilmiştir. Element dağılımları incelendiğinde C ve Si elementlerinin yapı içerisinde, sadece 304 paslanmaz çelik tel ile üretilen 304 P-TAKİ malzemesine göre daha

fazla olduğu belirlenmiştir. Bu durum ince boru içine doldurulan SiC tozun genel olarak ergiyip ayrılarak yeni fazlar oluşturduğunu göstermektedir. Dendrit yapıların EDS analizlerine göre üst ve alt numunelerde (Şekil 7.15 a.3 ve b.2 nolu nokta), C, Si ve Fe elementleri sırasıyla %3,74 - %5,91, %3,43 - %2,83 ve %66,63 - %64,63 yüzdeler oranlarda tespit edilmiştir. Dendritler arası ötektik bölgelerde ise (Şekil 7.15 a.2 ve b.4 nolu alan) element ağırlık oranları üst ve alt numunelerde sırasıyla %1,57 - %0,87 C, %4,22 - %4,04 Si ve %67,04 - %68,32 Fe olarak belirlenmiştir. Karbon elementinin dendritik yapılarda yoğunlaştığı görülmektedir. Diğer elementlerin dağılımı dendritik yapılarda ve dendritler arası bölgede genel olarak benzerdir. Yüksek enerji girdisi ile Si ve C elementleri çözünmüş ve yeniden katılaşma ile farklı fazlar oluşmuştur. Dendrit yapılar bu yeni fazların ergime noktasındaki yüksek farklar nedeniyle oluşmuştur.

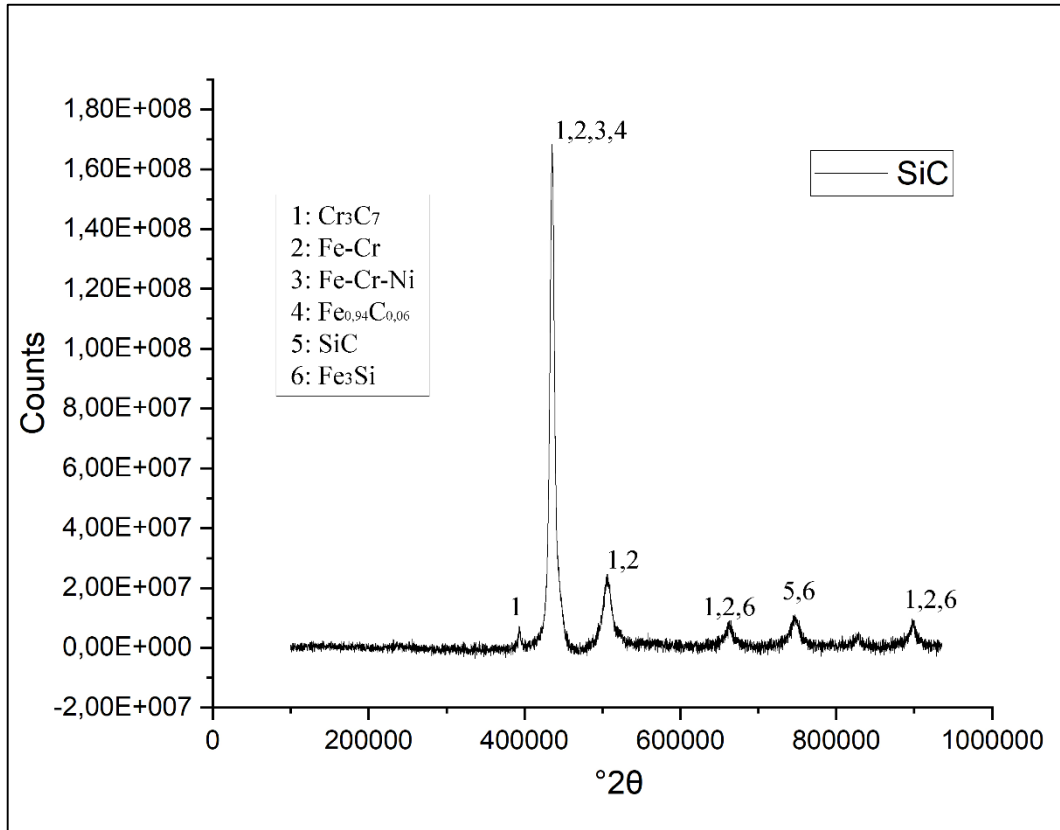


Şekil 7.15. SiC takviyeli P-TAKİ malzemelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri, a) üst numune, b) alt numune

SiC takviyeli P-TAKİ numunesinin XRD analizleri incelendiğinde (Şekil 7.16), demir silisyum, demir karbür, krom karbür bileşikleri oluşmuştur. Eklenen SiC tozu yüksek enerji girdisi ile ayrılmış ardından 304 paslanmaz çelikteki Fe ve Cr elementleri ile bileşik oluşturmuştur. EDS sonuçlarından (Şekil 7.15) da belirlendiği gibi demir içeriği oldukça

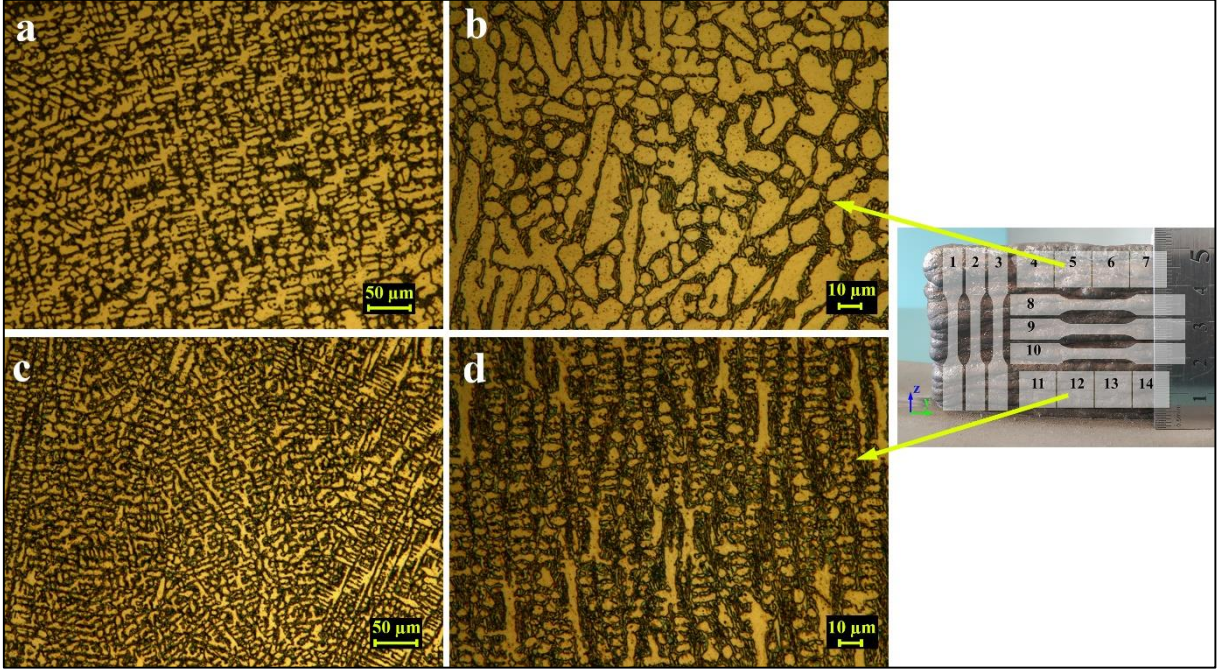


yüksek çıkmıştır. EDS analizindeki nokta ve alan analizlerini referans olarak dendrit bölgelerin  $\text{Cr}_3\text{C}_7$ ,  $\text{SiC}$  ve  $\text{Fe}_{0,94}\text{C}_{0,06}$  oluştuğunu dendritler arası ötektik bölgenin ise  $\text{Fe}_3\text{Si}$  ve  $\text{Fe-Cr-Ni}$  fazlarından oluştuğu değerlendirilmiştir.



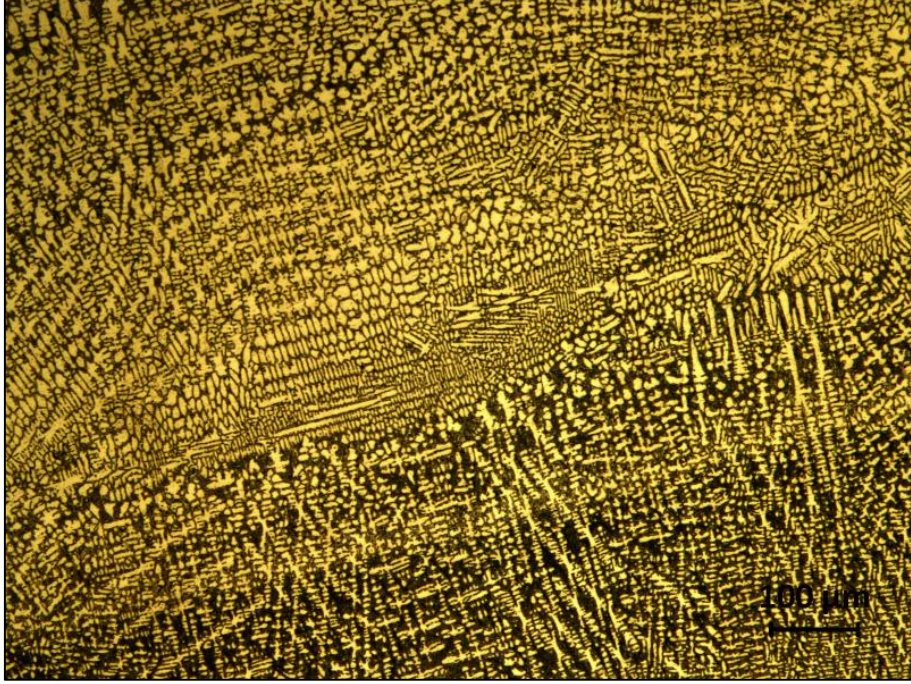
Şekil 7.16. SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin XRD analizi

$\text{FeCrC}$  tozu eklenerek üretilen P-TAKİ malzemesinden çıkarılan numunelerin OM görüntüleri Şekil 7.17’de verilmiştir. İlk biriktirilen katmanların yer aldığı alt numunenin mikroyapısı genellikle dikey yönlü dendrit kollardan oluşmaktadır. Üretilen diğer P-TAKİ malzemelerinde açıklanan durum burada da geçerlidir. Alt malzemenin ısıl iletkenliğinin etkisi ile ilk biriktirilen katmanlarda sonraki katmanlara göre soğutma hızı yüksektir. Bu durum dikey yönlü dendrit yapıların ve daha ince ve küçük taneli dendritler arası ötektik bölgenin oluşmasına yol açmıştır. Üst katmanlarda ise soğutma hızının göreceli olarak yavaş olması ile dendrit yapılar daha iri taneli daha kısa boylu olmuştur. Dendritler arası bölgede ise ince ve uzun ötektik karbürler yer almaktadır.



Şekil 7.17. FeCrC takviyeli malzemenin OM görüntüleri a) 200x büyütme üst numune, b) 500x büyütme üst numune, c) 200x büyütme alt numune, d) 500x büyütme alt numune

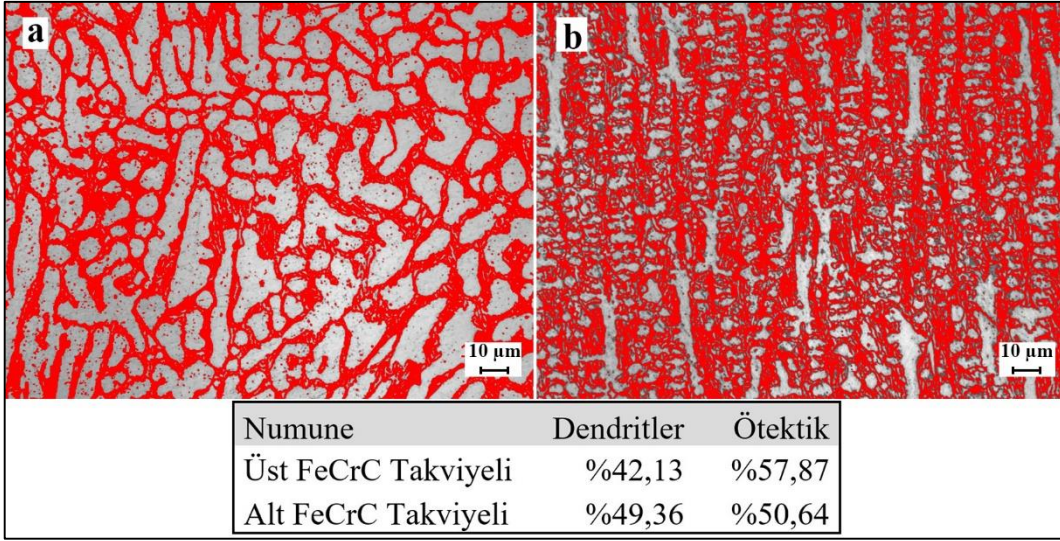
FeCrC takviyeli P-TAKİ ile üretilen malzemede katmanlar arası geçiş bölgesi Şekil 7.18’de verilmiştir. Geçiş bölgesinin altında kalan katman doğrudan hava ile temas ettiği için dikey yönlü dendritler arası ötektik yapıdan oluşmuştur. Geçiş bölgesi net bir şekilde görülmektedir ve geçiş bölgesinin yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  üzerindeki alanda yatay yönlü ince taneler oluşmuştur, bu bölge üst katman biriktirilirken yeniden ergimenin etkisi ile elde edilmiştir. Bu alanın üzerindeki kısımda ise bir süre devam eden sıcaklığın etkisi ile eş eksenli dendritler arası ötektik taneler oluşmuştur.



Şekil 7.18. FeCrC takviyeli numunenin katman geçiş bölgesinin OM görüntüsü

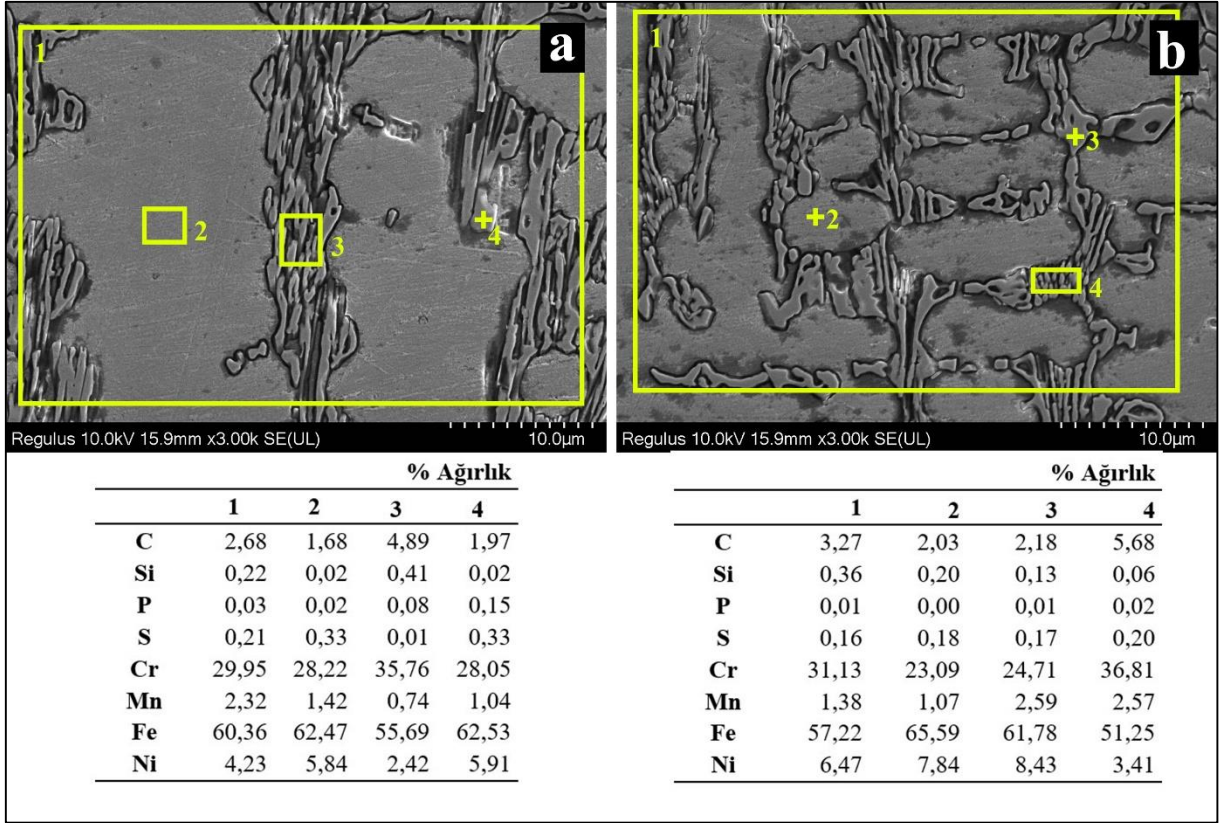
FeCrC takviyeli malzemelerdeki dendrit ve ötektik bölgelerin yüzdesel dağılımı Şekil 7.19’da verilmiştir. 304 P-TAKİ üst numunesindeki İDKA mesafelerinin ve SİC takviyeli üst P-TAKİ numunesindeki dendritler arası ötektik bölgenin, alt numunelere daha yüksek olduğunu açıklamıştık. Benzer bir durum FeCrC takviyeli üst P-TAKİ numunesinde de görülmektedir. Soğuma hızının yavaşlaması ile üst numunede yaklaşık %7 daha fazla ötektik alan oluşmuştur.





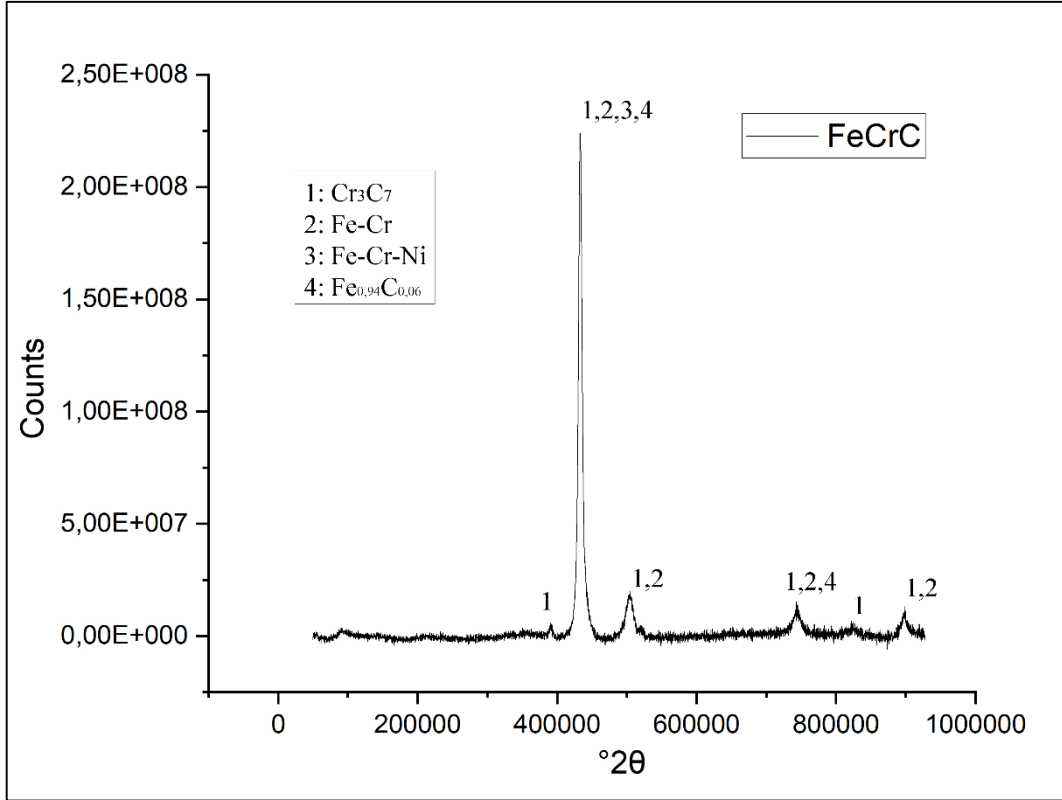
Şekil 7.19. FeCrC takviyeli numunelerinin dendrit ve ötektik bölgelerin yüzdesel dağılımı, a) üst numune, b) alt numune

FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemesinin SEM görüntüleri EDS analizleri incelendiğinde (Şekil 7.20), dendrit bölgedeki C ve Cr elementlerinin ağırlıkça oranı, dendritler arası östenit bölgeye göre daha fazladır. Paslanmaz çelik yapısında bulunan Ni elementi ise ağırlık olarak dendritler arası östenit bölgede daha fazla görülmüştür. Cr ve C oranlarının, 304 P-TAKİ malzemesindeki oranlarından fazla olması, FeCrC tozunun ergiyerek metalurjik olarak iyi bir yapı oluşturduğunu göstermektedir.



Şekil 7.20. FeCrC takviyeli numunelerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri,  
a) Üst numune, b) Alt numune

Şekil 7.21’de FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemesinin XRD analizi verilmiştir. FeCrC tozundan gelen karbonun ayrışması ile demir karbür ( $Fe_{0,94}C_{0,06}$ ) ve krom karbür ( $Cr_3C_7$ ) bileşikleri oluşmuştur. Oluşan bileşikler EDS analizlerinde dendrit ve dendritler arası östenit bölgedeki element oranları ile karşılaştırarak, dendrit bölgelerin  $Cr_3C_7$  ve  $Fe_{0,94}C_{0,06}$  bileşiklerinden östenit bölgenin ise Fe-Cr-Ni bileşiklerinden oluştuğu açıklanabilir.



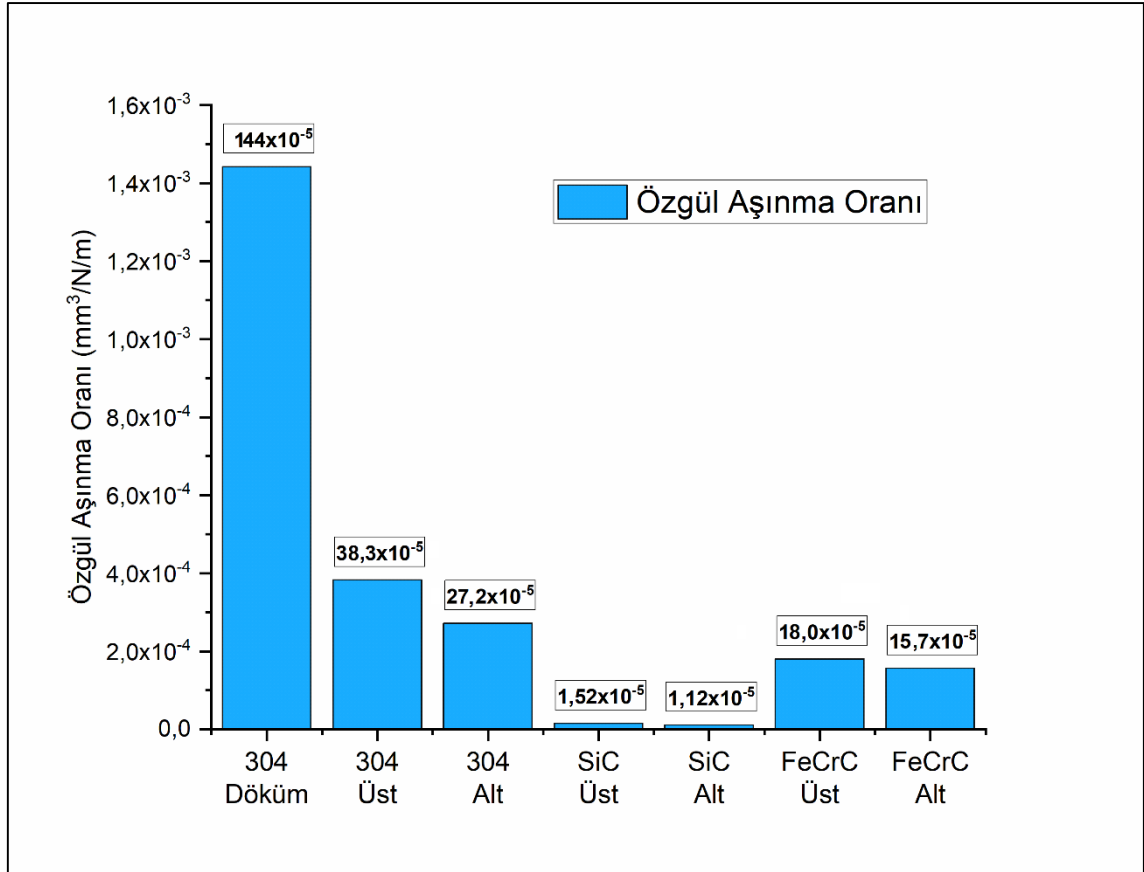
Şekil 7.21. FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemesinin XRD analizi

### 7.3. Aşınma Testi Sonuçları

Bu kısımda P-TAKİ yöntemi ile üretilen numunelerin tribolojik davranışlarını belirlemek için küre- disk aşınma düzeneği kullanılarak, kuru kayma koşullarında Ø3mm WC-Co (%94 WC) malzemeye karşı aşınma testleri yapılmıştır. Üretilen ilk katmanlar ile son katmanlar arasında oluşan olası aşınma davranışı farklılıklarını belirlemek için her malzemenin alt ve üst kısımlarından numune alınmıştır. Döküm yöntemi ile üretilen ticari AISI 304 paslanmaz çelik malzemenin de aşınma testleri yapılarak sonuçlar P-TAKİ malzemeleri ile karşılaştırılmıştır. Aşınma testlerinden sonra yüzey profilometresi ile aşınmış kanal derinlikleri ölçülerek belirlenmiş ve böylece aşınma oranları hesaplanmıştır. Tüm numunelerin ortalama sürtünme katsayıları elde edilmiştir. Aşınmış yüzeylerin SEM görüntüleri ve EDS analizleri de elde edilerek, bu veriler birlikte değerlendirilmiştir.

Aşınma testleri sonrasında hesaplanan karşılaştırmalı özgül aşınma oranları şekil 7.22’de verilmiştir. En yüksek aşınma beklenildiği gibi AISI 304 döküm numunesinde elde

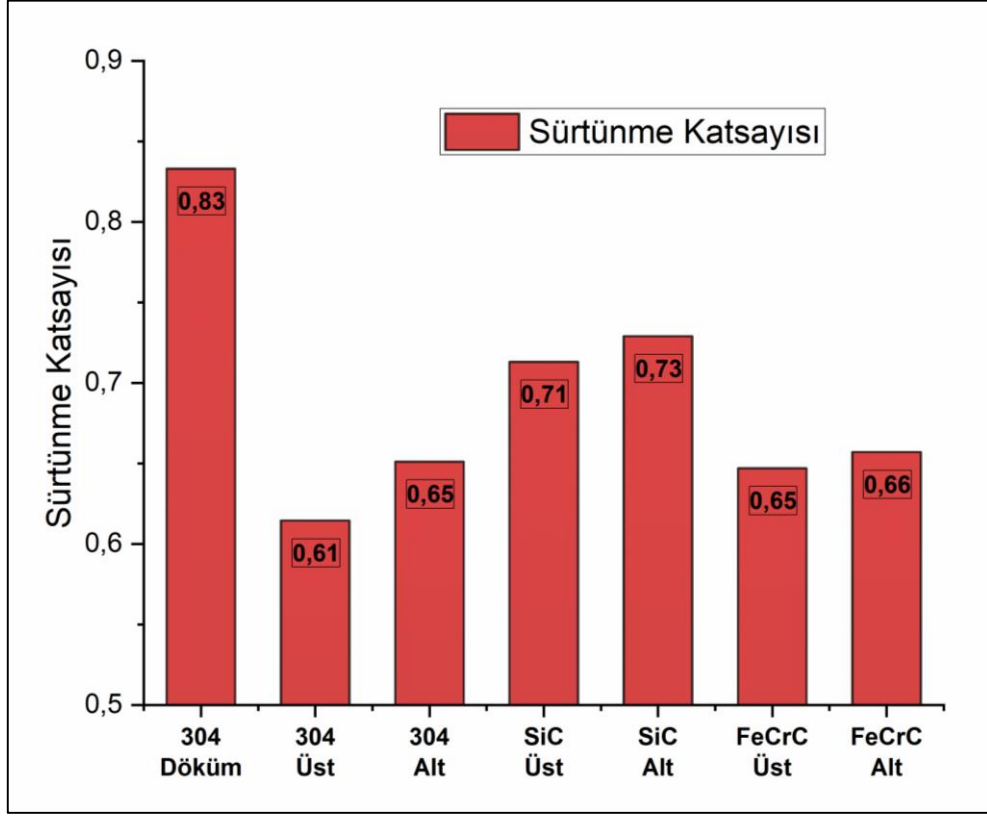
edilmiştir. Hızlı soğutmanın ve takviye edilen tozların etkisi ile P-TAKİ ile üretilen malzemelerin özgül aşınma oranları azalmıştır. Üretilen malzemelerin üst ve alt numuneleri karşılaştırıldığında tüm malzemelerde alt numunelerin özgül aşınma oranları bir miktar daha düşük çıkmıştır, fakat bu oranlar birbirine yakındır. SiC ve FeCrC takviyeli üst P-TAKİ numuneleri, üst 304 P-TAKİ numunesi ile karşılaştırıldığında aşınma oranları sırasıyla 25,2 ve 2,12 kat azalmıştır. Alt numunelerde bu oranlar sırasıyla 24,2 ve 1,7 kat olarak edilmiştir. Bu sonuçlar, toz takviyeli olarak üretilen P-TAKİ malzemelerinin 304 P-TAKİ malzemeye göre ve 304 P-TAKİ malzemenin AISI 304 döküm malzemeye göre aşınma dirençlerinin önemli ölçüde geliştiğini göstermektedir.



Şekil 7.22. Numunelerin özgül aşınma oranları

Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları grafiği Şekil 7.23'de verilmiştir. En yüksek ortalama sürtünme katsayısı AISI 304 döküm numunede (0,83) elde edilmiştir. Aynı malzemedен elde edilen numunelerin ortalama sürtünme katsayıları birbirine yakın değerlerde elde edilmiştir. Daha fazla ısıl çevrime maruz kalan alt numunelerde, her malzeme grubu için ortalama sürtünme katsayısı küçük bir miktar yüksek çıkmıştır. Üretilen

numunelerden en yüksek sürtünme oranı SiC takviyeli numunelerde (0,71 - 0,73) görülmüştür.

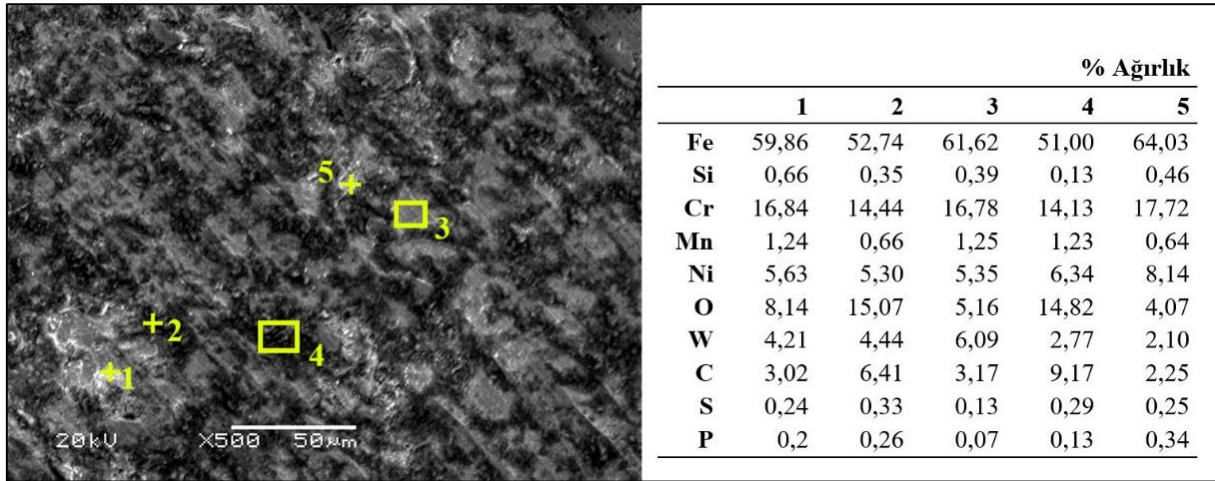


Şekil 7.23. Numunelerin ortalama sürtünme katsayıları

Numunelerin aşınma mekanizmaları ve tribolojik davranışlarının incelenmesi için aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri elde edilmiştir. Şekil 7.24’de AISI 304 döküm numunesinin aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi verilmiştir. SEM görüntüsünde çok fazla kopmanın ve abrasif izlerin olduğu pürüzlü bir yapı görülmektedir. Veri alınan tüm bölgelerde karşı malzemedeki bir miktar W elementinin aşınma yüzeyinde bulunduğu görülmektedir. 3 ve 4 nolu bölgelerde (Şekil 7.24) diğer bölgelere göre daha fazla Oksijen elementi tespit edilmiştir. Aşınma devam ederken Fe ve O elementlerinin oluşturduğu oksit tabaka, sertliği yüksek olan karşı malzemenin aşındırıcı etkisi ile yüzeyden kopmuştur. Yüzeyden kopan ve karşı malzemedeki gelen parçalar, ara bölgede üçüncü cisim olarak abrasif etkiyi şiddetlendirmiştir. Bu durum aşınma oranının artmasına neden olmuştur. 304 döküm numunesinin sürtünme katsayısı / mesafe grafiği (Şekil 7.28.a) incelendiğinde sürtünme katsayısının yaklaşık 20. metreye kadar şiddetle arttığı ve sonrasında

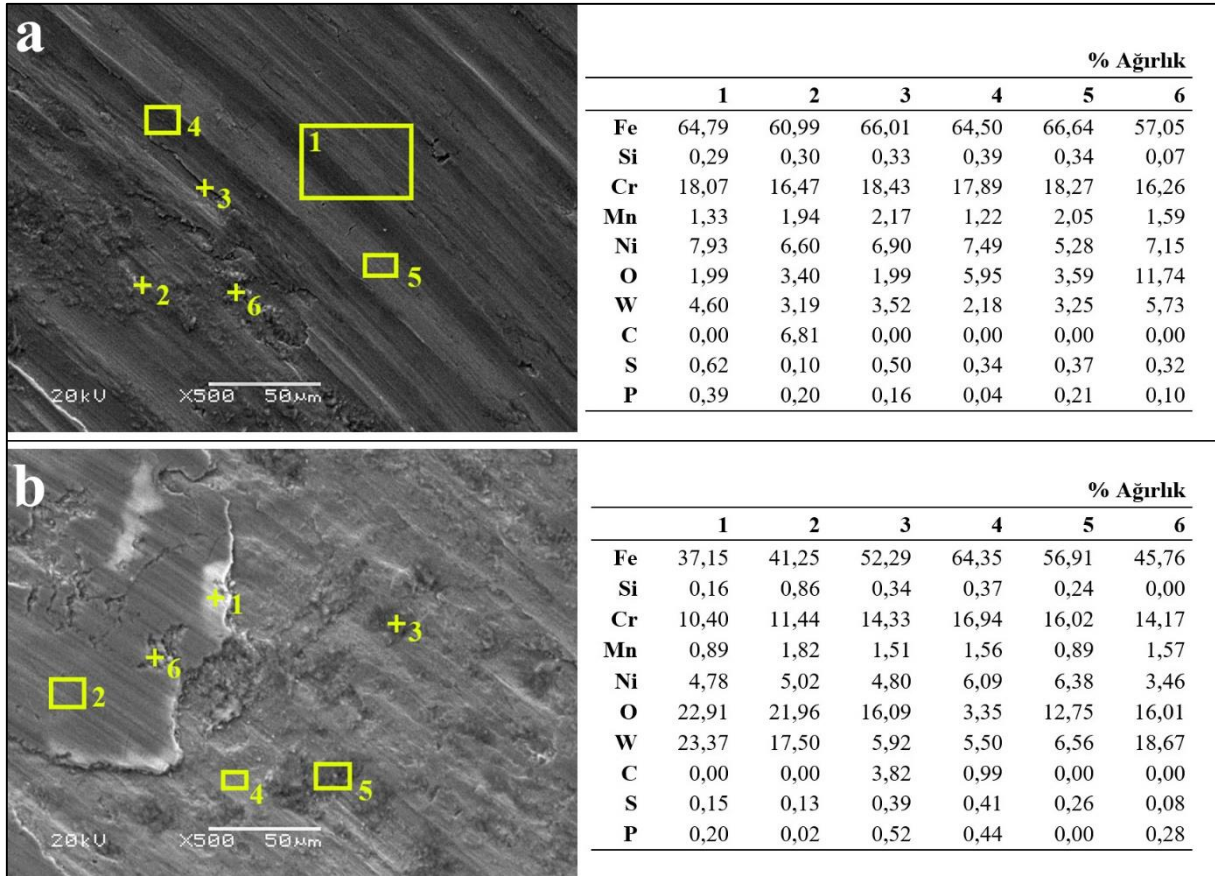


n ~0,8 değerinde sabit kaldığı görülmektedir. Bu artış yüzeyden kopan oksit tabakaların sürtünmeyi arttırmasından dolayıdır.



Şekil 7.24. AISI 304 döküm malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

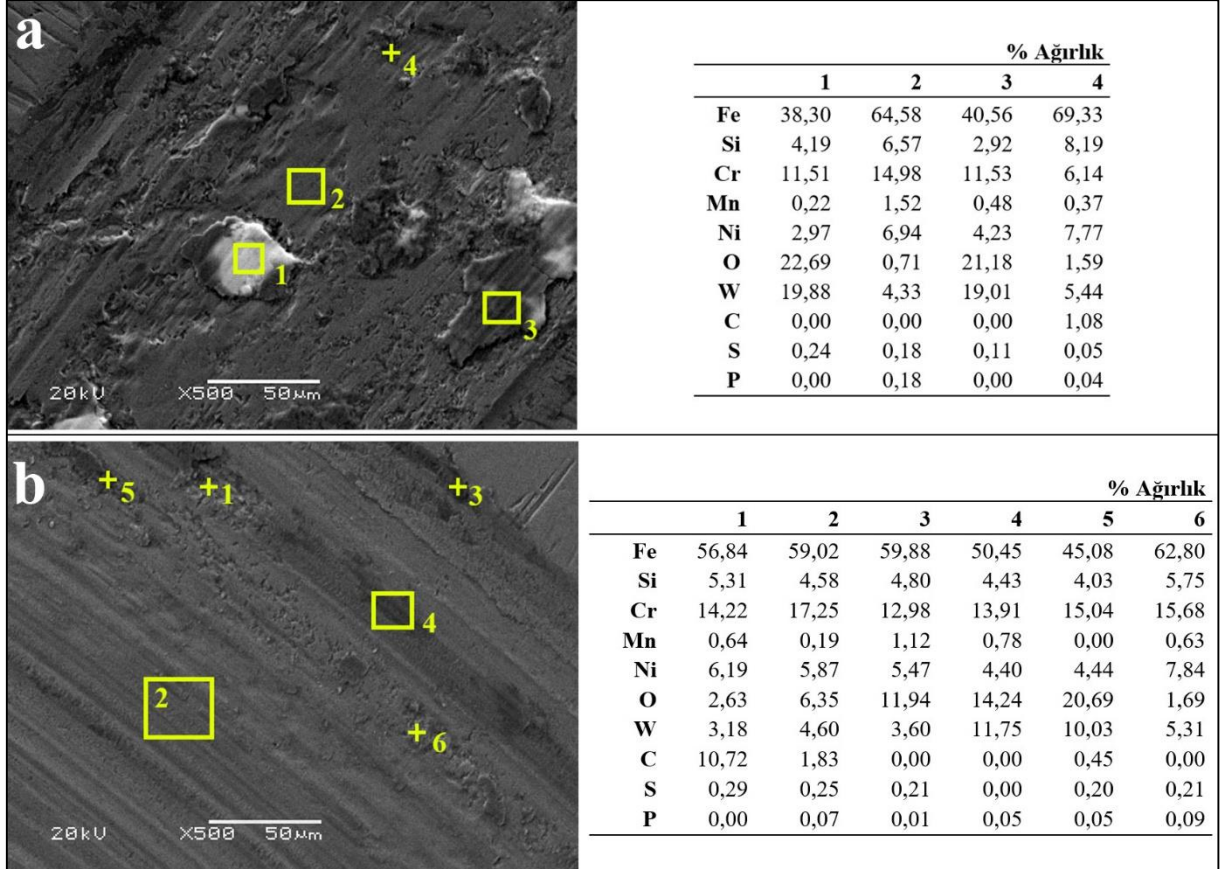
304 P-TAKİ numunelerinin mikroyapısında ısıl döngü neticesinde dendrit yapılar ve  $\delta$ -Fe fazının oluştuğu belirlenmiştir. Bu dendrit yapı ve  $\delta$ -Fe fazının etkisi, 304 P-TAKİ malzemesinin AISI 304 döküm malzemesine göre aşınmaya karşı daha dirençli olmasını sağlamıştır. Alt numunede daha fazla sert olan dendrit yapının bulunması, alt numunenin aşınmaya karşı daha dirençli olmasını sağlamıştır. 304 P-TAKİ numunelerinin aşınmış yüzeylerinin SEM ve EDS görüntüleri Şekil 7.25’de verilmiştir. EDS sonuçlarına göre bazı kısımlarda Oksijen elementi görülmüştür. Test sırasında karşı malzeme ile sürtünmeden dolayı yüksek sıcaklıklarda demir oksit tabakalar oluşmuştur. Test ilerledikçe sert karşı cismin etkisi ile yüzeye daha fazla tutunamayıp kırılan oksit tabakalar arada üçüncü cisim olarak hareket ederek aşınma oranının artmasını sağlamıştır. Aşınma oranındaki bu artış, yapı içerisindeki  $\delta$ -Fe içerikli dendrit yapıların etkisi ile AISI 304 döküm malzemenin aşınma oranı kadar yüksek olmamıştır.



Şekil 7.25. 304 P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizi, a) üst numune, b) alt numune

En iyi aşınma direnci SiC takviyeli malzemede gerçekleşmiştir. Mikroyapı sonuçları incelendiğinde dendritler ve dendritler arası bölgede demir, silisyum krom karbürlerinin olduğu belirlenmiştir. Yüzeydeki yükü taşıyıcı cisim olarak hareket eden bu sert karbürler karşı malzeme ile temas alanını azaltır. SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 7.26'de verilmiştir. Üst numunedeki 1 ve 3 nolu bölgeler ile alt numunedeki 4 ve 5 nolu bölgelerde karşı malzemedan gelen Wolfram elementi ile aşınma sırasında oluşan Oksijen elementi, diğer bölgelere göre yoğun olarak bulunmaktadır. Aşınma oranının düşük olmasının diğer bir nedeni ise, bu bölgelerde W içerikli oksitler ve demir oksitler yüzeyde bir tribo tabaka oluşturarak temas yüzeyini azaltması ve aşınma oranının artmasını engellemesidir. W içerikli oksit tabaka aşınma ilerledikçe bazı kısımlarda yüzeyden kopmuş ve aşınma oranının bir miktar artmasına sebep olmuştur (Şekil 7.26.a).

SiC takviyeli üst ve alt numuneler incelendiğinde, üst numunenin aşınma oranı daha yüksek olarak elde edilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, alt ve üst numunelerde farklı katılaşma süresinin etkisi ile alt numune daha yoğun dendritlerden oluştuğu belirtilmiştir. Bu dendrit bölgedeki sert karbürlerin etkisi ile alt numunenin aşınma direnci daha yüksek olmuştur.

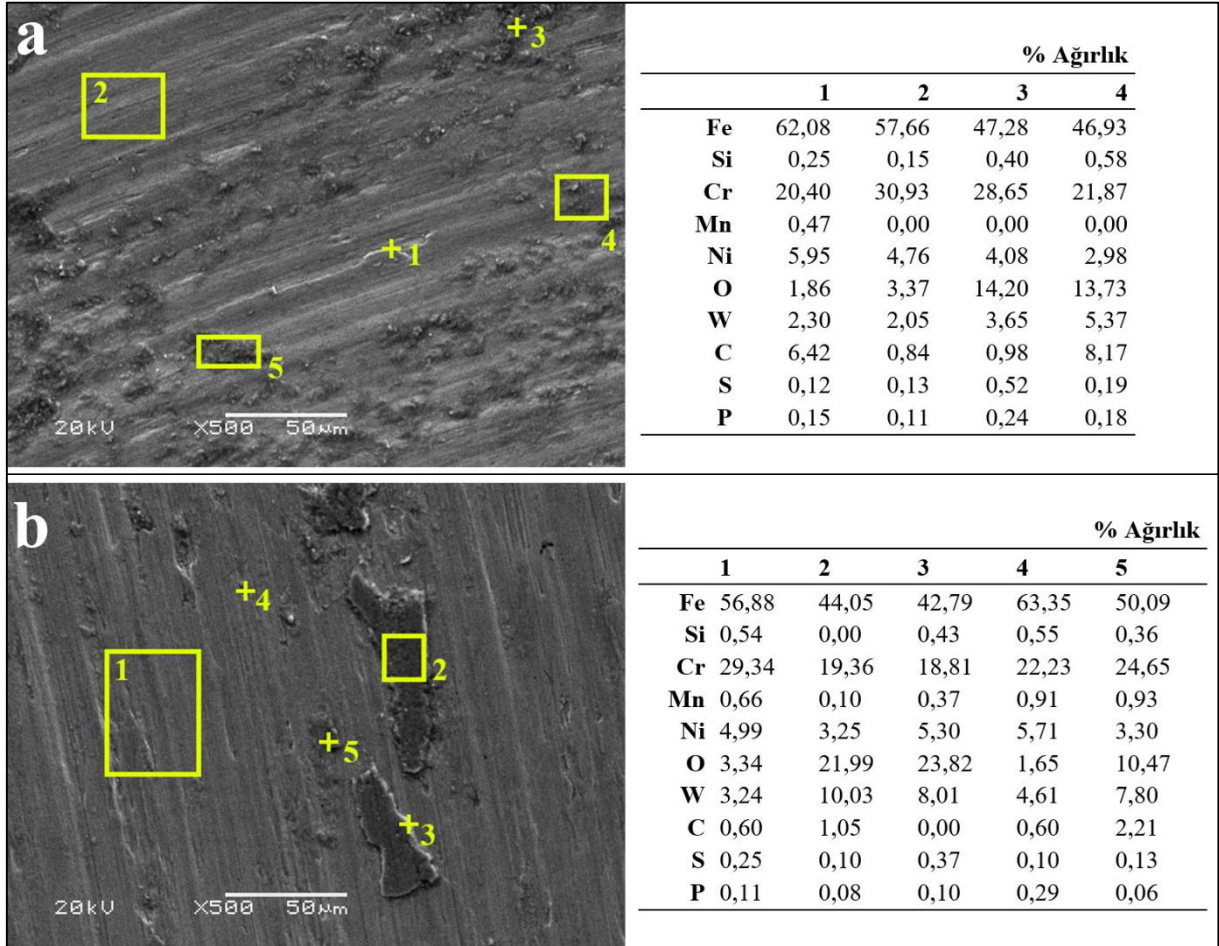


Şekil 7.26. SiC takviyeli P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüleri ve EDS analizleri, a) üst numune, b) alt numune

FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 7.27’de verilmiştir. FeCrC takviyeli malzemelerin aşınma oranı 304 P-TAKİ malzemelerine göre 2,12 kat daha düşük çıkmıştır. Aşınma direncindeki bu iyileşme sert yapılu FeC ve Cr<sub>3</sub>C<sub>7</sub> bileşiklerinin etkisi ile olmuştur. Metal-metal teması azaltan bu sert karbürler, test devam ederken bir seviyeye kadar aşınma oranının artmasını engellemiştir. Diğer aşınma testlerinde olduğu gibi FeCrC takviyeli malzemede de Demir, Krom ve Tungsten içerikli oksit tabakalar oluşmuştur (Şekil 7.27 a.3 ve 4 numara, 7.27 b.2 ve 3 numara). Oluşan oksit tabakalar sert karşı cismin etkisi ile yüzeyden kopmuştur. Yüzeyden

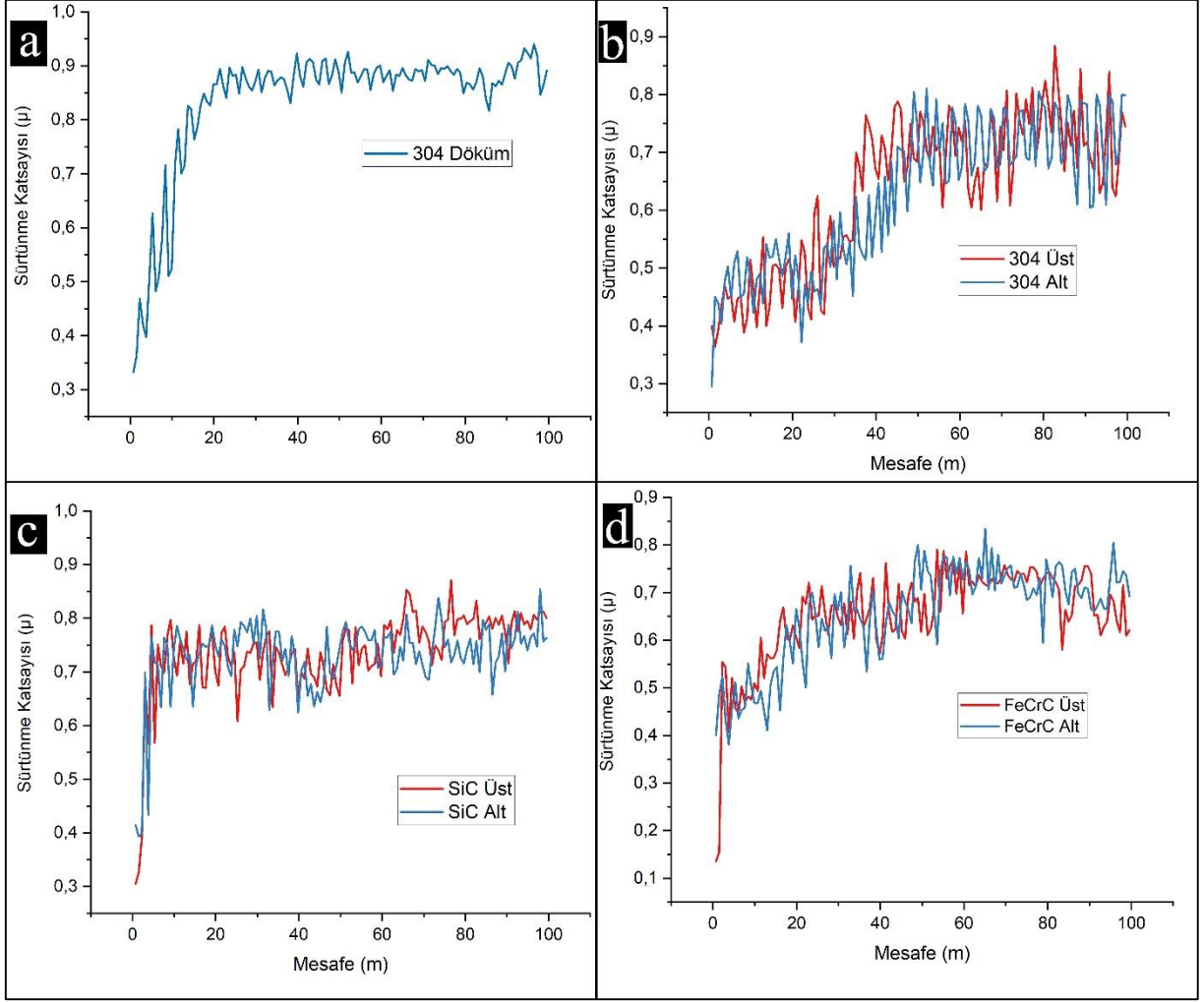


kopan partiküllerin bir kısmı uzaklaşırken bir kısmı ara bölgede kalarak aşınma miktarının bir miktar daha artmasına neden olmuştur.



Şekil 7.27. FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemesinin aşınma izlerinin SEM görüntüsü ve EDS analizi, a) üst numune, b) alt numune

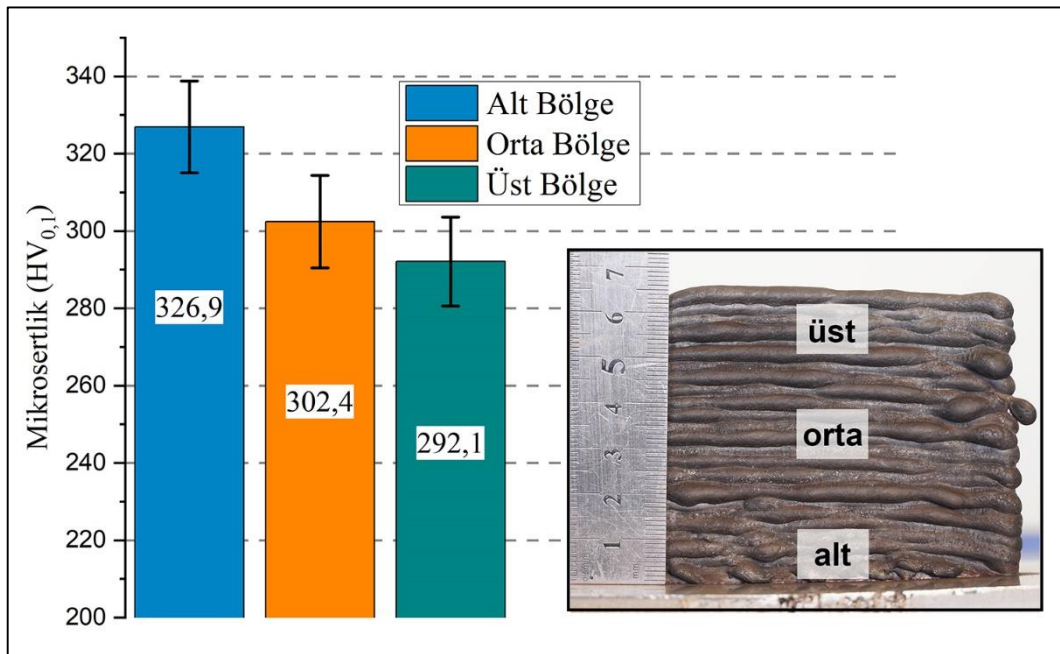
Farklı numunelerin aşınma testlerinden elde edilen test mesafesi ile sürtünme katsayısının değişimi grafiği Şekil 7.28’de verilmiştir. Tüm numunelerin kuru kayma aşınma koşulları başlangıcında bir alıştırmaya periyodu sergilediği görülebilir. Alıştırma döneminde, tüm numunelerin sürtünme katsayıları hızla yükselmektedir.



Şekil 7.28. Numunelerin sürtünme katsayısı/ aşınma mesafesi grafikleri, a) 304 döküm, b) 304 P-TAKİ, c) SiC takiyeli P-TAKİ, d) FeCrC takiyeli P-TAKİ numuneleri

#### 7.4. Mikrosertlik Sonuçları

Plazma tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yöntemi ile üretilen 3 farklı malzemeden elde edilen 9 adet numunenin sertlikleri Vickers mikrosertlik yöntemi ile ölçülmüştür. Sertlik değerleri, numunelerin ön yüzey ve yan kesitlerinden dikey olarak 0,5 mm aralıklarla alınan ölçümlerin ortalamasıdır. Grafiklerde gösterilen hata çubukları ortalama alınırken standart sapma hesabı ile yapılmıştır. Üretilen malzemelerin ortalama sertlik değerleri AISI 304, SiC takviyeli ve FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemeleri için sırasıyla 307 HV<sub>0,1</sub>, 662 HV<sub>0,1</sub> ve 425 HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir. Sertlik açısından bakıldığında, üretilen P-TAKİ malzemelerine toz takviye etmek başarılı bir şekilde sertlik değerlerini arttırmıştır.

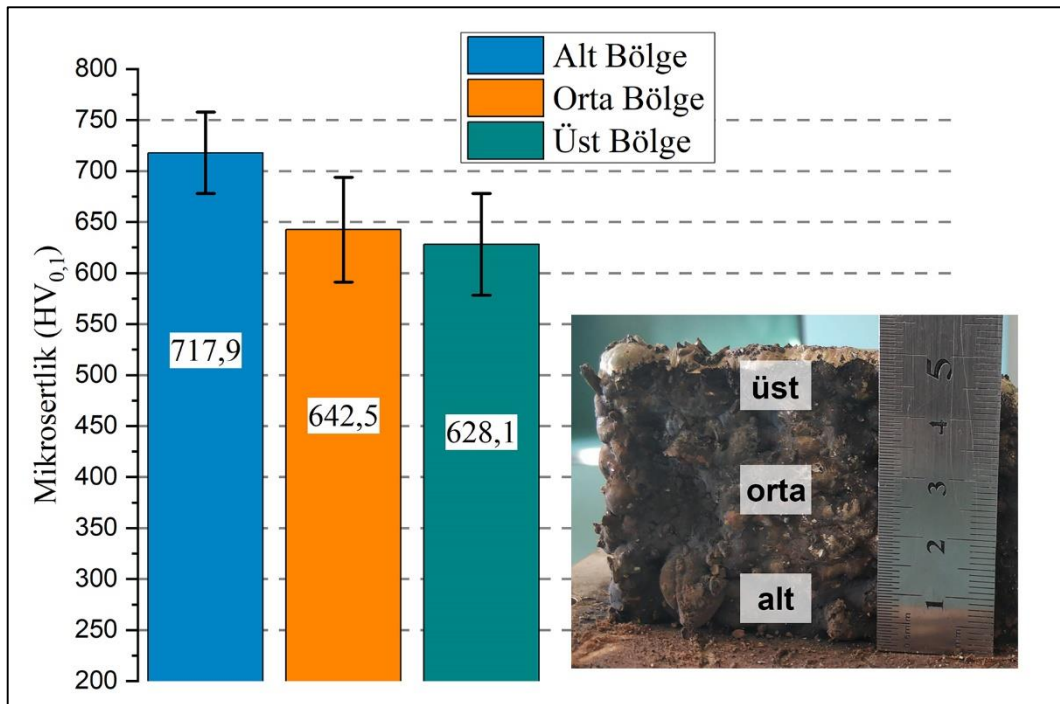


Şekil 7.29. P-TAKİ 304 numunesinin ortalama mikrosertlik değerleri

304 P-TAKİ numunesinin ortalama mikrosertlik sonuçlarına (Şekil 7.29) göre alt, orta ve üst bölgelerin sertlik sonuçları sırasıyla 326,9±11 HV<sub>0,1</sub>, 302,4±13 HV<sub>0,1</sub> ve 292,1±10 HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir. 304 döküm malzemenin sertlik değeri 201 HV'dir. P-TAKİ ile üretilen malzemenin sertliği döküm malzemeye göre ~105 HV<sub>0,1</sub> artmıştır. Bu durum oluşan ısıl döngülerin ve hızlı soğutmanın etkisi ile olmuştur. Üretilen tüm P-TAKİ malzemelerinin alt bölgeleri, orta ve üst bölgeye göre yüksek sertlik değeri gösterir. Bu durum malzeme üretim sırasında tekrar tekrar ısıtma ve ilk hızlı soğutma hızı nedeniyle oluşur. Bu mikrosertlik sonuçları bölüm 7.2'de açıklanan mikroyapı incelemeleri

ile uyum içindedir. 304 P-TAKİ malzemesinin alt mikroyapı numunesi daha ince tane ve ikincil dendrit kollar arası mesafeye sahiptir. Mikroyapısında daha ince taneli bölgelere sahip malzemelerin sertlik ve akma dayanımı gibi mekanik özellikleri yüksektir (Le vd., 2021). Benzer durum SiC ve FeCrC takviyeli P-TAKİ malzemeleri için de geçerlidir. Her iki malzemenin alt numune mikroyapılarının daha ince tanelere sahip olduğu mikroyapı incelemeleri bölümünde açıklanmıştır.

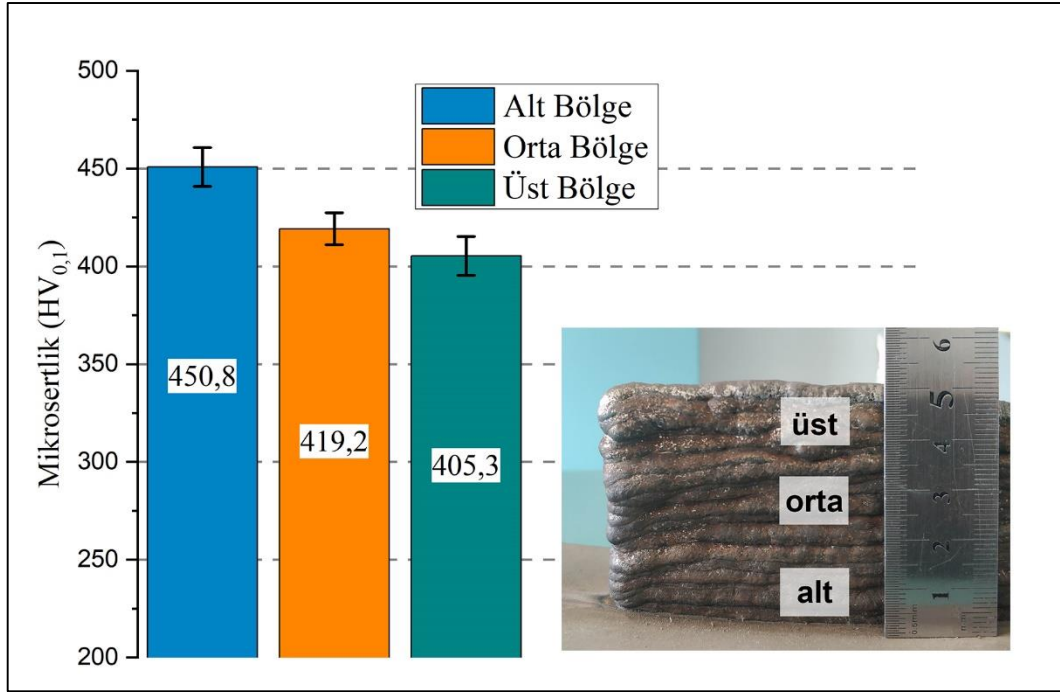
SiC takviyeli malzemenin ortalama mikrosertlik değerleri Şekil 7.30’da verilmiştir. Alt orta ve üst bölgelerin sertlik sonuçları sırasıyla  $717,9 \pm 39$  HV<sub>0,1</sub>,  $642,5 \pm 51$  HV<sub>0,1</sub> ve  $628,1 \pm 49$  HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir. SiC tozu takviye edilmesi ile ortalama sertlik değeri, 304 P-TAKİ malzemesine göre 2 katından daha fazla ( $\sim 355$  HV<sub>0,1</sub>) artmıştır. En yüksek sertlik değeri SiC takviyeli malzemede görülmüştür. Malzemenin hızlı bir şekilde katılaşması ve katılaşıırken oluşan sert karbürler (Cr<sub>3</sub>C<sub>7</sub>, SiC ve Fe<sub>0,94</sub>C<sub>0,06</sub>) sertliğin artmasını sağlamıştır.



Şekil 7.30. SiC takviyeli P-TAKİ numunesinin ortalama mikrosertlik değerleri

FeCrC takviyeli malzemenin ortalama sertlik değerleri üst, orta ve alt kısımda sırasıyla  $450,8 \pm 9$  HV<sub>0,1</sub>,  $419,2 \pm 10$  HV<sub>0,1</sub> ve  $450,3 \pm 12$  HV<sub>0,1</sub> olarak belirlenmiştir (Şekil 7.31). SiC takviyeli malzemede olduğu gibi FeCrC tozunun eklenmesi ile de ortama sertlik

değeri artmıştır. Bu artış 304 P-TAKİ malzemesine göre  $\sim 118 \text{ HV}_{0,1}$  olarak belirlenmiştir. Mikroyapı sonuçları ile belirlenen  $\text{Cr}_3\text{C}_7$  ve  $\text{Fe}_{0,94}\text{C}_{0,06}$  bileşiklerinin sert etkisi, FeCrC takviyeli malzemelerin ortalama sertlik değerinin artmasında etkili olmuştur.



Şekil 7.31. FeCrC takviyeli P-TAKİ numunesinin ortalama mikrosertlik değerleri

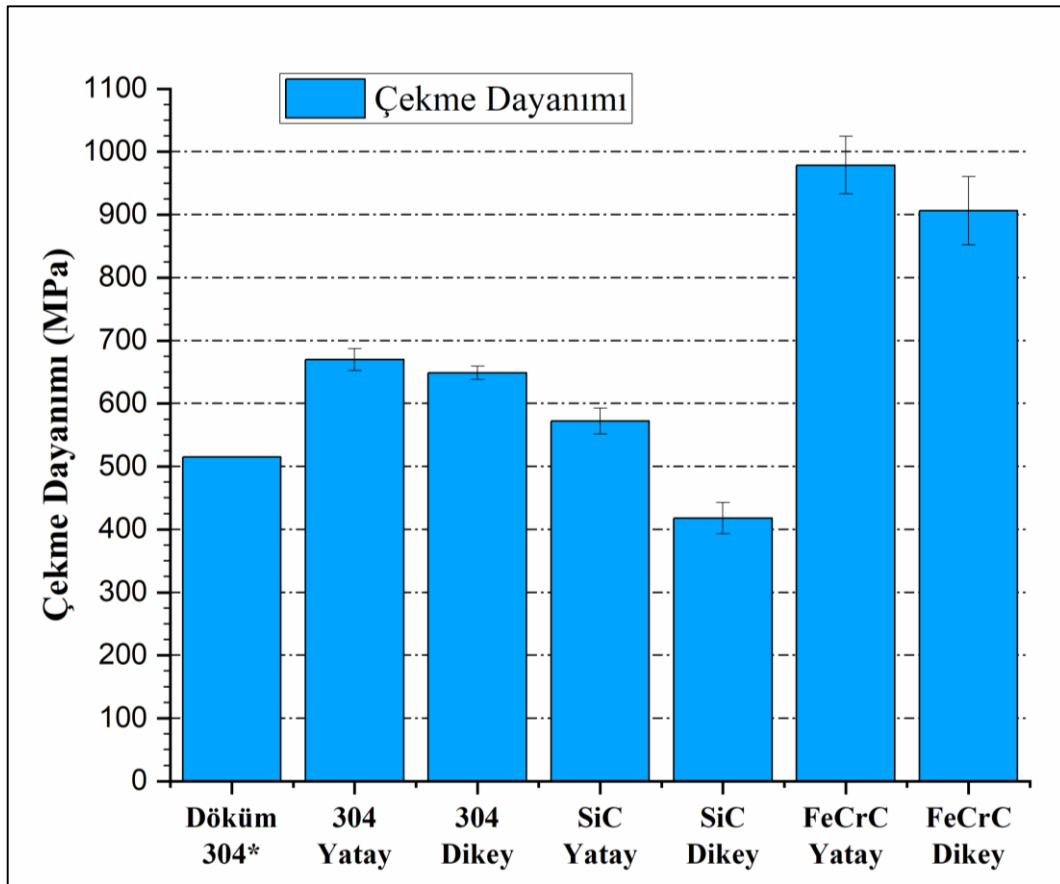
## 7.5. Çekme Testi Sonuçları

Çekme deneyleri ile üretilen malzemelerin akma ve çekme dayanımları ve yüzde olarak uzama miktarları belirlenmiştir. Her malzeme grubu için üç adet dikey, üç adet yatay çekme numunesi hazırlanmıştır. Bu üç adet numunelerin ortalama değerleri alınarak ortalama akma, çekme dayanımları ve uzama miktarları belirlenmiştir. Yatay numuneler üretilen malzemelerin orta kısmından alınmıştır. Ortalama alınırken standart sapma hesabı yapılarak, elde edilen değerler hata çubukları ile verilmiştir.

Numunelerin çekme dayanımları Şekil 7.32’de verilmiştir. En iyi çekme dayanımı ortalama  $978,7 \pm 45 \text{ MPa}$  değeri ile FeCrC yatay numunelerde elde edilmiştir. Bu değer 304 döküm ve 304 P-TAKİ yatay numuneden sırasıyla 463 MPa ve 309 MPa daha yüksektir. FeCrC dikey numune ise ortalama  $906,2 \pm 54 \text{ MPa}$  değer ile dikey numuneler arasında en çekme dayanımı performansına sahiptir. SiC tozu takviye edilerek üretilen malzemelerin



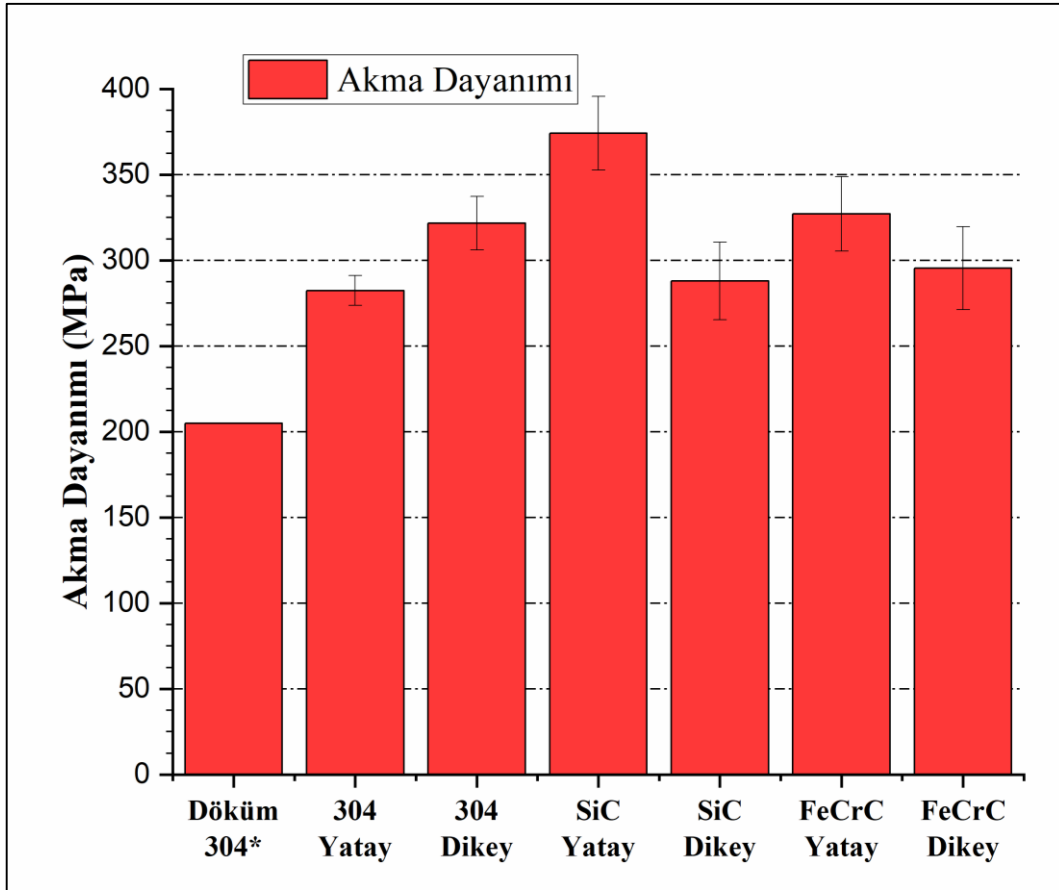
aşınma direnci ve sertlik değerleri FeCrC takviyeli malzemelerden daha yüksek olarak belirlenmiştir. Bu özelliklerinden dolayı çekme dayanımlarının da yüksek olması beklenmiştir. Fakat SiC dikey ve yatay numunelerinin çekme dayanımları sırasıyla  $417,9 \pm 24$  MPa ve  $572,2 \pm 20$  MPa değerleri elde edilmiştir. Bu değer ile 304 P-TAKİ numunelerinin çekme dayanımından daha düşüktür. SiC takviyeli numunelerin mikroyapıları incelenirken bazı katman geçiş sınırlarında ergimeyen tozlardan dolayı düzensiz ergimeler olduğu görülmüştür. Bu düzensiz ergimeler mekanik özellikleri olumsuz olarak etkilemiş ve çekme dayanımının düşük olmasına neden olmuştur. Yapılan bir çalışmada (C. Sun vd., 2011) kümelenmiş SiC parçacıklarının kompozitlerin mekanik özelliklerini önemli ölçüde azalttığı belirtilmiştir. 304 P-TAKİ yatay ve dikey numunelerinin çekme dayanımları sırasıyla  $669,8 \pm 17$  MPa ve  $648,7 \pm 10$  MPa olarak belirlenmiştir. Yatay ve dikey numunelerin çekme dayanımlarında, AISI 304 döküm numuneye göre sırasıyla 154 MPa ve 133 MPa bir artış olmuştur. Çekme dayanımındaki bu artış ısıl döngülerin oluşan ve  $\delta$ -Fe fazının etkisi ile olmuştur.



Şekil 7.32. Numunelerin çekme testi ile elde edilen çekme dayanımları

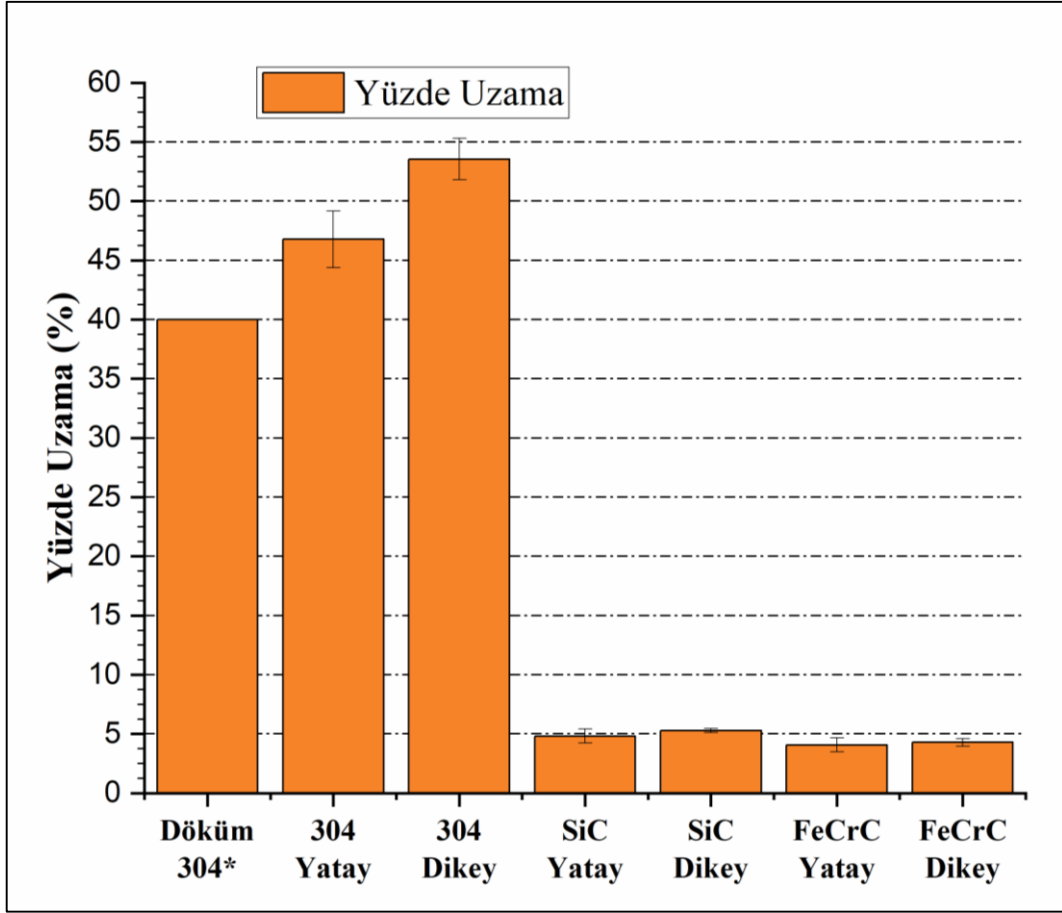
Üretilen tüm malzemelerde yatay numunelerin çekme dayanımları dikey numunelerden iyidir. Bu durum üretilen numunelerde anizotropi olduğunu göstermektedir. Genel olarak malzemelerin mekanik özellikleri tane sınırları ile ilgilidir. Tane sınırı dislokasyon hareketini doğrudan etkileyen, farklı iki tane arasındaki sınırdır. Numunelerin mikroyapıları incelendiğinde genelde üretim yönüne doğru (aşağıdan yukarıya) uzayan dendritlerden oluştuğu görülmüştür. Bu durumda dikey numunelerde, uzayan dendrit yapıların yönü ile çekme kuvveti yükleme yönü paralel olduğu için, dikey numunelerin dayanımlarının daha yüksek olması gerektiği düşünülebilir. Fakat dikey numunelerde yükleme yönü ile katmanlar arası sınır bölgesi dik olarak çakıştığı için dikey numunelerin dayanımları yatay çekme numunelerine göre daha düşük olmuştur. P-TAKİ ile üretilen malzemelerin katmanlar arası geçiş bölgelerinde mikroyapıların değiştiği 7.1. bölümde belirtilmiştir.

Numunelerin akma dayanımları Şekil 7.33'de verilmiştir. Genel olarak çekme dayanımlarında olduğu gibi yatay numunelerin akma dayanımları dikey numunelerden daha yüksek olarak elde edilmiştir. Akma dayanımları, 304 P-TAKİ yatay ve dikey numunelerinin sırasıyla  $282,4 \pm 8$  MPa ve  $321,6 \pm 15$  MPa olarak, SiC takviyeli yatay ve dikey numunelerinin sırasıyla  $374,2 \pm 21$  MPa ve  $287,8 \pm 22$  MPa olarak, FeCrC takviyeli yatay ve dikey numunelerinin sırasıyla  $327,0 \pm 21$  MPa ve  $295,4 \pm 24$  MPa olarak belirlenmiştir.



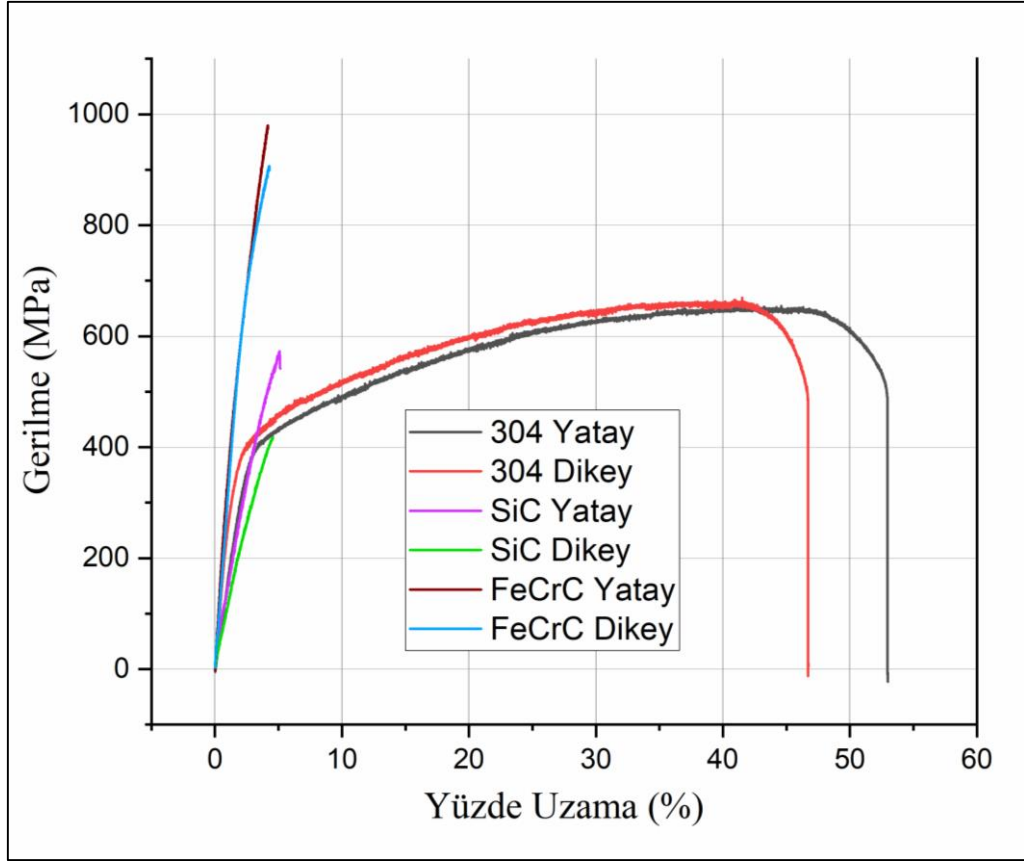
Şekil 7.33. Numunelerin çekme testi ile elde edilen akma dayanımları

Numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen ortalama yüzde uzama miktarları Şekil 7.34'de verilmiştir. 304 P-TAKİ numuneleri oldukça sünek bir yapıya sahiptir, yatay ve dikey uzama miktarları sırasıyla  $\%46,78 \pm 2,3$  v  $\%53,56 \pm 1,7$  olarak belirlenmiştir. Toz takviye edilen P-TAKİ malzemelerinin ortalama uzama miktarları döküm ve P-TAKİ yöntemiyle üretilen 304 paslanmaz çelik malzemeye göre oldukça düşüktür. SiC ve FeCrC takviyeli malzemelerin sert karbürlere ve sık dendrit yapıya sahip olması sünekliği azaltmaktadır. Yatay ve dikey SiC takviyeli numunelerin ortalama yüzde uzamaları sırasıyla  $\%4,82 \pm 0,59$  ve  $\%5,29 \pm 0,17$  olarak belirlenmiştir. FeCrC takviyeli yatay ve dikey numunelerde ise bu değerler sırasıyla  $\%4,08 \pm 0,5$  ve  $\%4,29 \pm 0,3$  olarak belirlenmiştir.



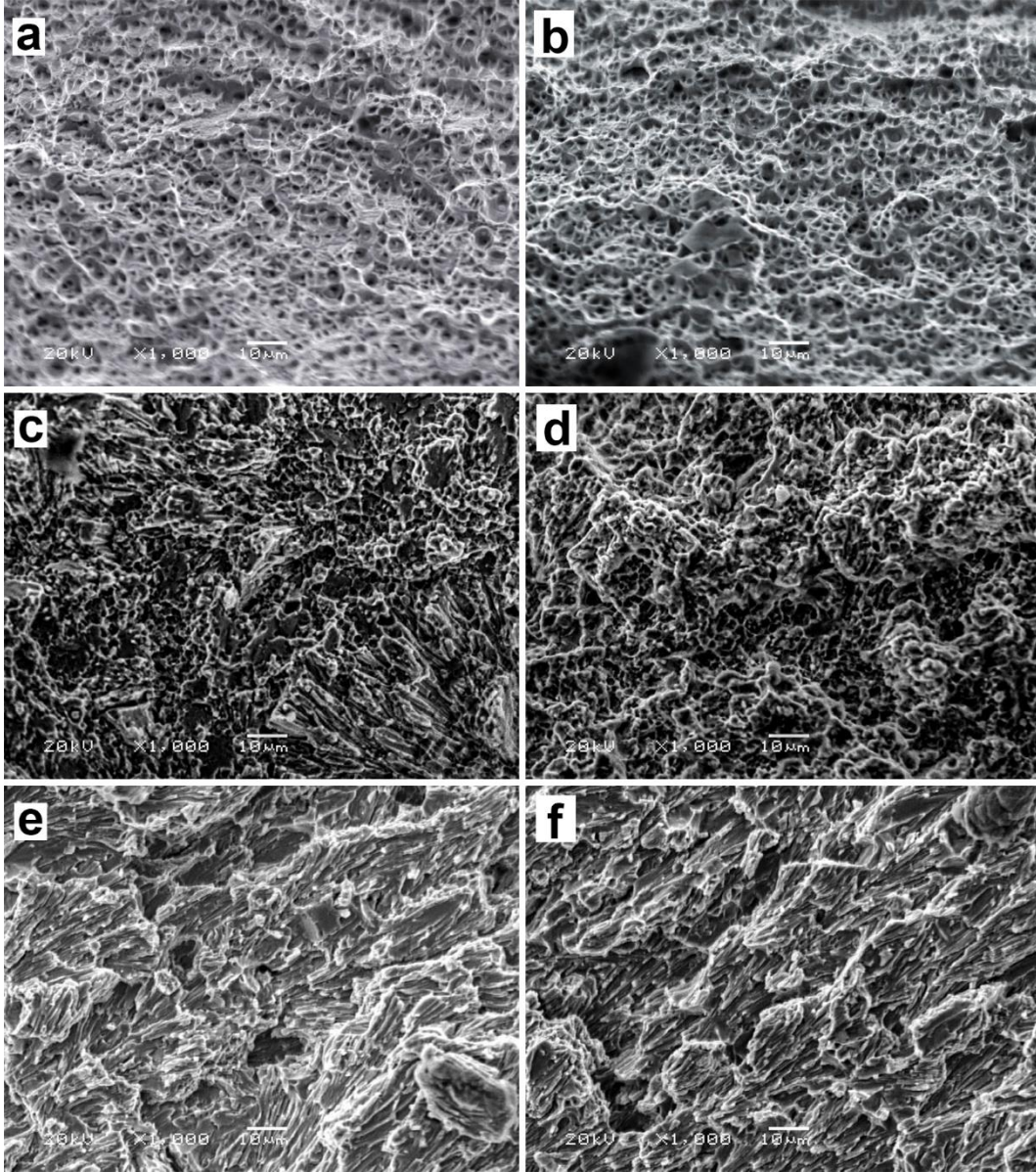
Şekil 7.34. Numunelerin çekme testi ile elde edilen yüzde uzama miktarları

Tüm numunelerin gerilme/yüzde uzama grafiği Şekil 7.35’de verilmiştir. 304 P-TAKİ numunelerinde kırılmadan önce elastik deformasyon ve plastik deformasyon görülmüştür. 304 P-TAKİ numuneleri sünek özelliğe sahiptir ve tokluğu yüksektir. FeCrC takviyeli ve SiC takviyeli numunelerin gerilme/yüzde uzama incelendiğinde ise plastik deformasyon görülmemiştir. Gevrek bir kırılma gerçekleştiği açık bir şekilde grafikten anlaşılmaktadır.



Şekil 7.35. Numunelerin gerilme/Yüzde uzama grafiği

Şekil 7.36’de çekme deneyi yapılan numunelerin kırık kesitlerinin 1000X büyütmede iki boyutlu SEM görüntüleri verilmiştir. 304 P-TAKİ yatay ve dikey numunelerinin kırılma yüzeylerinde çukurlar görülmektedir. 304 P-TAKİ malzemesinin boyun vermesi sırasında bu çukurlar oluşmuştur. Sünekliliği düşük olan toz takviyeli numunelerin kırılma yüzeyleri açık bir şekilde gevrek kırılma olduğunu gösterir. FeCrC takviyeli numunelerde, gerilmenin etkisi ile oluşan mikro çatlaklar düz bir çizgi şeklinde uzayarak kırılmıştır. SiC takviyeli numunelerde ise hem mikro çatlaklardan uzayarak kırılma olmuş aynı zamanda tanelerden ayrılarak kopmalar olmuştur. SiC takviyeli numunelerdeki bu tanelerin birbirinden ayrılarak kopması mekanik özellikleri zayıflatmıştır. SiC ve FeCrC takviyeli malzemelerin dikey ve yatay numunelerinin kırık yüzeyleri arasında önemli farklılıklar görülmemiştir.



Şekil 7.36. Çekme deneyi numunelerin kırık kesitlerinin SEM görüntüleri,  
 a) 304 P-TAKİ yatay, b) 304 P-TAKİ dikey, c) SiC takviyeli yatay, d) SiC takviyeli dikey,  
 e) FeCrC takviyeli yatay, d) FeCrC takviyeli dikey numuneler

## 8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan tez çalışmasında plazma tel ark katmanlı imalat (P-TAKİ) yönteminde kullanılan tellere toz takviye ederek yeni bir kompozit uygulama ile malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada AISI 304 paslanmaz çelik ince borulara bor karbür ( $B_4C$ ), silisyum karbür ( $SiC$ ) ve ferrokrom ( $FeCrC$ ) karbür tozları takviye edilerek ve sade AISI 304 paslanmaz çelik tel kullanılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiş, üretilen malzemelerin mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- P-TAKİ yöntemi ile plazma ark kaynağı kullanılarak yapılan deneysel çalışmada sade 304 P-TAKİ,  $SiC$  takviyeli ve  $FeCrC$  takviyeli P-TAKİ malzemeleri, düz duvar şeklinde başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretilen bu malzemelerin mikroyapıları incelendiğinde boşluk, porozite ve çatlak görülmemiştir.  $B_4C$  takviyeli malzeme üretiminde ise ilk katmanlarda makro çatlaklar oluştuğu için çalışmaya devam edilmemiştir.
- AISI 304 tel ve P-TAKİ yöntemi ile üretilen malzemenin mikroyapısı östenit ( $\gamma$ ) ve ferrit ( $\delta$ ) fazlardan oluşmaktadır. Östenit fazlar sütunlu yapı ve eş eksenli tanelerden ferrit fazlar ise ince, uzun veya iskelet şeklinde yer olmaktadır.  $SiC$  ve  $FeCrC$  takviyeli malzemelerin mikroyapısı hızlı soğumanın etkisi ile genel olarak dendrit kollardan ve dendritler arası ötektik bölgeden oluşmaktadır.  $SiC$  ve  $FeCrC$  takviyeli alt numuneler dikey olarak yönlendirilmiş dendrit yapıya, üst numuneler ise eşit aralıklı yapılara sahiptir.
- Üretilen tüm malzemelerin alt numuneleri daha yoğun dendrit yapı içermektedir. Bu durum ilk katmanlar biriktirilirken alt malzemenin soğuk olmasından dolayı ani bir soğumaya maruz kalmasındandır. Üst katmanların sıcak bir zemin üzerine biriktirilmesi eş eksenli tanelerin oluşmasını sağlar.
- Katmanlar arası geçiş 304 P-TAKİ ve  $FeCrC$  malzemelerinde net bir geçiş görülmektedir.  $SiC$  malzemesinde ise geçiş bölgesi bir miktar daha fazladır. Katman



geçiş bölgesinde, üretim esnasında bir katman üretilirken erimeyen SiC taneleri bir sonraki katman üretilirken yüksek yoğunluklu arkin etkisi ile ergimektedir. Bundan dolayı SiC takviyeli malzemelerde geçiş bölgesi geniş olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca SiC takviyeli malzemelerin bazı katman geçiş bölgelerinde ergimemiş SiC taneleri görülmüştür.

- XRD ve EDS analizlerine göre, 304 P-TAKİ malzemesinde Fe-Cr, Fe-Cr-Ni ve  $\delta$ -Fe fazları oluştuğu belirlenmiştir. SiC takviyeli malzemedeki dendrit bölgelerin  $Cr_3C_7$ , SiC ve FeC oluştuğu dendritler arası ötektik bölgenin ise  $Fe_3Si$  ve Fe-Cr-Ni bileşiklerinden oluştuğu görülmüştür. FeCrC takviyeli malzemedeki dendrit bölgeleri  $Cr_3C_7$  ve  $Fe_{0,94}C_{0,06}$  bileşiklerinden östenit bölgeleri ise Fe-Cr-Ni bileşiklerinden oluşmuştur.
- Toz takviyesi aşınma direncinde olumlu etki göstermiştir. Üst numuneler karşılaştırıldığında, SiC takviyeli ve FeCrC takviyeli malzemelerin aşınma direnci, 304 P-TAKİ malzemesine göre sırasıyla  $\sim 25,2$  ve  $\sim 2,12$  kat artmıştır. Yapısındaki sert SiC ve  $Cr_3C_7$  bileşiklerinin etkisi ile özellikle SiC takviyeli malzemenin aşınma direnci önemli ölçüde artmıştır. Genel olarak P-TAKİ ile üretilen tüm malzemelerin aşınma oranları, hızlı soğumanın neticesinde, 304 döküm malzemesinin aşınma oranından daha düşük çıkmıştır. 304 döküm malzemesine göre aşınma dirençleri 304 P-TAKİ, SiC takviyeli ve FeCrC malzemeler için sırasıyla  $\sim 3,7$ ,  $\sim 95$  ve  $\sim 8$  kat artmıştır. Üretilen tüm malzemelerde alt numunelerin, aşınma dirençleri, daha yoğun dendrit yapıya sahip oldukları için, üst numunelerden daha yüksektir.
- Mikroyapı incelemeleri ile elde edilen sert karbür ve yoğun dendrit yapılar beklenildiği gibi sertlik artışında etkili olmuştur. En iyi ortalama sertlik değeri ( $717,9 HV_{0,1}$ ) SiC üst kısmında görülmüştür. P-TAKİ ile üretilen tüm malzemelerin ortalama mikrosertlik değerleri 304 döküm malzemesinden yüksektir. Toz takviyesi sertlik değerlerini arttırmıştır. SiC takviyeli ve FeCrC takviyeli malzemelerin ortalama sertlik değerleri üretilen 304 P-TAKİ malzemesinden  $\sim 2,2$  ve  $\sim 1,4$  kat yüksektir. Üretilen malzemelerin mikrosertlik değerleri alt, orta ve üst kısımdan değerlendirilmiştir. Dendrit yoğunluğundan dolayı beklenildiği gibi üst kısımdan alt kısma doğru sertlik değerleri artmıştır.



- En iyi çekme dayanımı  $978,7 \pm 45$  MPa değeri ile FeCrC takviyeli yatay numunesinde edilmiştir. SiC takviyeli malzemenin çekme dayanım değeri dikey ve yatay numuneler için sırasıyla ortalama  $417,9 \pm 24$  MPa ve  $572,2 \pm 20$  MPa olarak çıkmıştır. Bu malzemenin mikroyapı incelemelerinde belirlenen düzensiz katılaşmalar SiC takviyeli malzemenin çekme dayanımının düşük olmasına neden olmuştur. 304 P-TAKİ malzemesinin çekme dayanımı, döküm 304 malzemesine göre  $\sim 1,2$  kat artmıştır. En iyi süneklik değerleri 304 P-TAKİ numunesinde, dikey ve yatay numunelerde sırasıyla  $\%53,56 \pm 1,7$  ve  $\%46,78 \pm 2,3$  olarak elde edilmiştir. Toz takviyeli malzemeler ise gevrek kopma göstermiştir.
- Genel olarak toz takviyesi sertlik ve aşınma direncini arttırmıştır, fakat SiC takviyeli malzemede çekme dayanımı istenildiği ölçüde iyileştirilememiştir. FeCrC takviyeli malzemede çekme dayanımı, sertlik ve aşınma direnci özelliklerinde sade 304 P-TAKİ malzemesine göre oldukça iyi sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen 304 P-TAKİ malzemesinin çekme dayanımı, sertlik, aşınma direnci ve tokluk değerleri döküm 304 malzemesine göre gelişme göstermiştir. Bu durum bu yöntemle yapılacak olan parça üretimlerinde olumlu sonuçlar alınacağını göstermektedir.

**KAYNAKLAR DİZİNİ**

- Abe, T., Sasahara, H., 2016, Dissimilar metal deposition with a stainless steel and nickel-based alloy using wire and arc-based additive manufacturing, *Precision Engineering*, 387-395
- Alam, M. K., Mehdi, M., Urbanic, R. J., Edrisy, A., 2020, Mechanical behavior of additive manufactured AISI 420 martensitic stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*,
- Alberti, E. A., Bueno, B. M. P., D'Oliveira, A. S. C. M., 2016, Additive manufacturing using plasma transferred arc, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 9-12, 1861-1871
- Alonso, U., Veiga, F., Suárez, A., Artaza, T., 2020, Experimental Investigation of the Influence of Wire Arc Additive Manufacturing on the Machinability of Titanium Parts, *Metals*, 1, 24
- Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I. vd., 2020, Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres, *Journal of Materials Research and Technology*, 6, 15454-15466
- Askeland, D. R., 1996, Principles of Solidification Strengthening and Processing. In D. R. Askeland (Ed.), *The Science and Engineering of Materials* (pp. 216-248). Boston, MA: Springer US.
- Baddoo, N. R., 2008, Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities, *Journal of Constructional Steel Research*, 11, 1199-1206
- Badiru, A. B., Liu, D., Valencia, V. V., 2017, Additive manufacturing handbook : product development for the defense industry,
- Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C. vd., 2018, Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 504-516
- Beddoes, J., Parr, J. G., 1999, Introduction to stainless steels, ASM International
- Benakis, M., Costanzo, D., Patran, A., 2020, Current mode effects on weld bead geometry and heat affected zone in pulsed wire arc additive manufacturing of Ti-6-4 and Inconel 718, *Journal of Manufacturing Processes*, 61-74
- Bhadeshia, H. K. D. H., Honeycombe, R. W. K., 2006, *Steels : microstructure and properties*, Elsevier, Butterworth-Heinemann

- Brandl, E., Schoberth, A., Leyens, C., 2012, Morphology, microstructure, and hardness of titanium (Ti-6Al-4V) blocks deposited by wire-feed additive layer manufacturing (ALM), *Materials Science and Engineering: A*, 295-307
- Busachi, A., Erkoyuncu, J., Colegrove, P., Martina, F., Ding, J., 2015, Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, *Procedia CIRP*, 48-53
- Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W., Le masson, P., 2020, 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam), *Additive Manufacturing*, 101541
- Chen, S., Zhang, S., Huang, N., Zhang, P., Han, J., 2016, Droplet transfer in arcing-wire GTAW, *Journal of Manufacturing Processes*, 149-156
- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., Li, H., 2015, Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1, 465-481
- Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P. M. vd., 2011, Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts, *Computational Materials Science*, 12, 3315-3322
- Dinovitser, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., Frei, H., 2019, Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure, *Additive Manufacturing*, 138-146
- Duarte, V. R., Rodrigues, T. A., Schell, N., Miranda, R. M., Oliveira, J. P. vd., 2020, Hot forging wire and arc additive manufacturing (HF-WAAM), *Additive Manufacturing*, 101193
- Duraisamy, R., Kumar, S. M., Kannan, A. R., Shanmugam, N. S., Sankaranarayanan, K. vd., 2020, Tribological performance of wire arc additive manufactured 347 austenitic stainless steel under unlubricated conditions at elevated temperatures, *Journal of Manufacturing Processes*, 306-321
- Dutta, B., 2020, Directed Energy Deposition (DED) Technology Reference Module in *Materials Science and Materials Engineering*: Elsevier.
- Feng, Y., Zhan, B., He, J., Wang, K., 2018, The double-wire feed and plasma arc additive manufacturing process for deposition in Cr-Ni stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 206-215
- Frazier, W. E., 2014, Metal Additive Manufacturing: A Review, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 6, 1917-1928
- Fu, J. W., Yang, Y. S., Guo, J. J., 2009, Formation of a blocky ferrite in Fe-Cr-Ni alloy during directional solidification, *Journal of Crystal Growth*, 14, 3661-3666

- Gasik, M., 2013, Handbook of ferroalloys : Theory and technology, Butterworth-Heinemann Ltd : [distributor] Elsevier Books Customer Services : [distributor] Elsevier Australia : [distributor] Elsevier Australia : [distributor] Elsevier Science B V : [distributor] Elsevier Publishing Company
- Ghosh, N., Pal, P. K., Nandi, G., 2017, GMAW dissimilar welding of AISI 409 ferritic stainless steel to AISI 316L austenitic stainless steel by using AISI 308 filler wire, Engineering Science and Technology, an International Journal, 4, 1334-1341
- Gibson, I., Rosen, D. W., Stucker, B., 2016, Additive manufacturing technologies : 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing,
- Gokhale, N. P., Kala, P., 2020, Thermal analysis of TIG-WAAM based metal deposition process using finite element method, Materials Today: Proceedings,
- González, J., Rodríguez, I., Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., Pereira, A., 2017, Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology, Procedia Manufacturing, 840-847
- Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Bai, J. vd., 2016, The strengthening effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on the additively manufactured Al-6.3Cu alloy, Materials Science and Engineering: A, 18-26
- Hauser, T., Silva, A. D., Reisch, R. T., Volpp, J., Kamps, T. vd., 2020, Fluctuation effects in Wire Arc Additive Manufacturing of aluminium analysed by high-speed imaging, Journal of Manufacturing Processes, 1088-1098
- Hedström, P., 2007, Deformation and Martensitic Phase Transformation in Stainless Steels, Doctoral Thesis, Luleå University of Technology
- Hornung, J., Zikin, A., Pichelbauer, K., Kalin, M., Kirchgaßner, M., 2013, Influence of cooling speed on the microstructure and wear behaviour of hypereutectic Fe-Cr-C hardfacings, Materials Science and Engineering: A, 243-251
- Jafari, D., Vaneker, T. H. J., Gibson, I., 2021, Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts, Materials & Design, 109471
- Jhavar, S., Jain, N. K., Paul, C. P., 2014, Development of micro-plasma transferred arc ( $\mu$ -PTA) wire deposition process for additive layer manufacturing applications, Journal of Materials Processing Technology, 5, 1102-1110
- Jia, C., Liu, W., Chen, M., Guo, M., Wu, S. vd., 2020, Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM, Additive Manufacturing, 101235
- Jiang, Q., Zhang, P., Yu, Z., Shi, H., Li, S. vd., 2021, Microstructure and Mechanical Properties of Thick-Walled Inconel 625 Alloy Manufactured by Wire Arc Additive

- Manufacture with Different Torch Paths, *Advanced Engineering Materials*, 1, 2000728
- Kisielewicz, A., Thalavai Pandian, K., Sthen, D., Hagqvist, P., Valiente Bermejo, M. A. vd., 2021, Hot-Wire Laser-Directed Energy Deposition: Process Characteristics and Benefits of Resistive Pre-Heating of the Feedstock Wire, *Metals*, 4, 634
- Kotecki, D. J., Siewert, T. A., 1992, Wrc-1992 Constitution Diagram for Stainless-Steel Weld Metals - a Modification of the Wrc-1988 Diagram, *Welding Journal*, 5, S171-S178
- Laghi, V., Palermo, M., Gasparini, G., Girelli, V. A., Trombetti, T., 2019, Experimental results for structural design of Wire-and-Arc Additive Manufactured stainless steel members, *Journal of Constructional Steel Research*, 105858
- Le, V. T., Mai, D. S., Doan, T. K., Paris, H., 2021, Wire and arc additive manufacturing of 308L stainless steel components: Optimization of processing parameters and material properties, *Engineering Science and Technology, an International Journal*,
- Leite, A. M. d. S., Terada, M., Pereira, V. F., Fonseca, E. B. d., Lima, N. B. d. vd., 2019, On the pitting resistance of friction stir welded UNS S82441 lean duplex stainless steel, *Journal of Materials Research and Technology*, 3, 3223-3233
- Lin, J. J., Lv, Y. H., Liu, Y. X., Xu, B. S., Sun, Z. vd., 2016, Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing, *Materials & Design*, 30-40
- Lippold, J. C., Kotecki, D. J., 2005, *Welding metallurgy and weldability of stainless steels*, Wiley-VCH
- Lo, K. H., Shek, C. H., Lai, J. K. L., 2009, Recent developments in stainless steels, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 4-6, 39-104
- Ma, T., Ge, J., Chen, Y., Jin, T., Lei, Y., 2019, Observation of in-situ tensile wire-arc additively manufactured 205A aluminum part: 3D pore characteristics and microstructural evolution, *Materials Letters*, 266-269
- Majid, A., 2018, A perspective on non-stoichiometry in silicon carbide, *Ceramics International*, 2, 1277-1283
- Marinelli, G., Martina, F., Ganguly, S., Williams, S., 2019, Development of Wire + Arc additive manufacture for the production of large-scale unalloyed tungsten components, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 329-335
- Marinelli, G., Martina, F., Lewtas, H., Hancock, D., Mehraban, S. vd., 2019, Microstructure and thermal properties of unalloyed tungsten deposited by Wire + Arc Additive Manufacture, *Journal of Nuclear Materials*, 45-53

- Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G. vd., 2019, Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel, *Additive Manufacturing*, 545-550
- Martina, F., Mehnen, J., Williams, S. W., Colegrove, P., Wang, F., 2012, Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 6, 1377-1386
- Martina, F., Roy, M. J., Szost, B. A., Terzi, S., Colegrove, P. A. vd., 2016, Residual stress of as-deposited and rolled wire+arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components, *Materials Science and Technology*, 14, 1439-1448
- McGuire, M. F., 2008, *Stainless steels for design engineers*, ASM International
- Messler, R. W., 1999, *Principles of welding : processes, physics, chemistry and metallurgy*, Wiley
- Milewski, J. O., 2019, *ADDITIVE MANUFACTURING OF METALS : from fundamental technology to rocket nozzles, medical implants, . and custom jewelry*, SPRINGER
- Mukherjee, T., Zhang, W., DebRoy, T., 2017, An improved prediction of residual stresses and distortion in additive manufacturing, *Computational Materials Science*, 360-372
- Nikam, P. P., Arun, D., Ramkumar, K. D., Sivashanmugam, N., 2020, Microstructure characterization and tensile properties of CMT-based wire plus arc additive manufactured ER2594, *Materials Characterization*, 110671
- O'Brien, R. L., American Welding, S., 1991, *Welding handbook. Volume 2, Volume 2*, American Welding Society
- Oliveira, J. P., Santos, T. G., Miranda, R. M., 2020, Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice, *Progress in Materials Science*,
- Pierson, H. O., 1996, *Handbook of refractory carbides and nitrides : properties, characteristics, processing, and applications*, Noyes Publications
- Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., Oliveira, J. P., 2019, Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), *Materials*, 7,
- Rund, M., Procházka, R., Konopík, P., Džugan, J., Folgar, H., 2015, Investigation of Sample-size Influence on Tensile Test Results at Different Strain Rates, *Procedia Engineering*, 410-415
- Sames, W. J., Medina, F., Peter, W. H., Babu, S. S., Dehoff, R. R. (2014). *Effect of process control and powder quality on inconel 718 produced using electron beam melting*. Paper presented at the 8th International Symposium on Superalloy 718 and Derivatives 2014.

- Shipley, H., McDonnell, D., Culleton, M., Coull, R., Lupoi, R. vd., 2018, Optimisation of process parameters to address fundamental challenges during selective laser melting of Ti-6Al-4V: A review, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1-20
- Shukla, P., Dash, B., Kiran, D. V.,Bukkapatnam, S., 2020, Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process, *Procedia Manufacturing*, 725-729
- Singh, S., Sharma, S. k.,Rathod, D. W., 2021, A review on process planning strategies and challenges of WAAM, *Materials Today: Proceedings*,
- Singh, S. R.,Khanna, P., 2021, Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials, *Materials Today: Proceedings*, 118-128
- Skarvelis, P., Rokanopoulou, A.,Papadimitriou, G. D., 2013, Formation of TiS and Ti<sub>4</sub>C<sub>2</sub>S<sub>2</sub> in steel matrix composites prepared by the plasma transferred arc (PTA) technique using TiS<sub>2</sub> and TiC powders, *Tribology International*, 44-48
- Steels, A., 2013, *Technical Handbook of Stainless Steels*, Atlas Steels
- Sun, C., Song, M., Wang, Z.,He, Y., 2011, Effect of Particle Size on the Microstructures and Mechanical Properties of SiC-Reinforced Pure Aluminum Composites, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 9, 1606-1612
- Sun, Y.,Bell, T., 2013, Low Temperature Plasma Nitriding Characteristics of Precipitation Hardening Stainless Steel, *Surface Engineering*, 5, 331-336
- Suri, A. K., Subramanian, C., Sonber, J. K.,Murthy, T. S. R. C., 2013, Synthesis and consolidation of boron carbide: a review, *International Materials Reviews*, 1, 4-40
- Syed, A. K., Zhang, X., Caballero, A., Shamir, M.,Williams, S., 2021, Influence of deposition strategies on tensile and fatigue properties in a wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V, *International Journal of Fatigue*, 106268
- Syed, W. U. H., Pinkerton, A. J.,Li, L., 2005, A comparative study of wire feeding and powder feeding in direct diode laser deposition for rapid prototyping, *Applied Surface Science*, 1-4, 268-276
- Tan, J. H. K., Sing, S. L.,Yeong, W. Y., 2019, Microstructure modelling for metallic additive manufacturing: a review, *Virtual and Physical Prototyping*, 1, 87-105
- Tanure, L., Alcântara, C. M. d., Santos, D. B., Oliveira, T. R. d., Gonzalez, B. M. vd., 2019, Microstructural characterization and mechanical behavior during recrystallization annealing of Nb-stabilized type ASTM 430 and Nb-Ti-stabilized ASTM 439 ferritic stainless steels, *Journal of Materials Research and Technology*, 5, 4048-4065
- Vahedi Nemani, A., Ghaffari, M., Salahi, S.,Nasiri, A., 2021, Effects of post-printing heat treatment on the microstructure and mechanical properties of a wire arc additive

- manufactured 420 martensitic stainless steel part, *Materials Science and Engineering: A*, 141167
- Wang, C., Suder, W., Ding, J., Williams, S., 2021, Wire based plasma arc and laser hybrid additive manufacture of Ti-6Al-4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 117080
- Wang, F., Williams, S., Colegrove, P., Antony, S. A., 2013, Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Ti-6Al-4V, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2, 968-977
- Wang, J., Pan, Z., Wang, L., Su, L., Carpenter, K. vd., 2020, In-situ dual wire arc additive manufacturing of NiTi-coating on Ti6Al4V alloys: Microstructure characterization and mechanical properties, *Surface and Coatings Technology*, 125439
- Wang, K., Liu, Y., Sun, Z., Lin, J., Lv, Y. vd., 2019, Microstructural evolution and mechanical properties of Inconel 718 superalloy thin wall fabricated by pulsed plasma arc additive manufacturing, *Journal of Alloys and Compounds*,
- Wang, L., Xue, J., Wang, Q., 2019, Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel, *Materials Science and Engineering: A*, 183-190
- Wang, T., Zhang, Y., Wu, Z., Shi, C., 2018, Microstructure and properties of die steel fabricated by WAAM using H13 wire, *Vacuum*, 185-189
- Wang, Y., Ji, L., Lu, J., Liu, C., Jing, C. vd., 2017, Microstructure and mechanical properties of 304L steel fabricated by arc additive manufacturing, *MATEC Web of Conferences*,
- Westin, E. M., 2010, Microstructure and properties of welds in the lean duplex stainless steel LDX 2101, *Doctoral Thesis Royal Institute of Technology*
- Wu, B., Ding, D., Pan, Z., Cui, D., Li, H. vd., 2017, Effects of heat accumulation on the arc characteristics and metal transfer behavior in Wire Arc Additive Manufacturing of Ti6Al4V, *Journal of Materials Processing Technology*, 304-312
- Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cui, D., Li, H. vd., 2018, A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement, *Journal of Manufacturing Processes*, 127-139
- Wu, Q., Lu, J., Liu, C., Shi, X., Ma, Q. vd., 2017, Obtaining uniform deposition with variable wire feeding direction during wire-feed additive manufacturing, *Materials and Manufacturing Processes*, 16, 1881-1886
- Wu, Q., Mukherjee, T., De, A., DebRoy, T., 2020, Residual stresses in wire-arc additive manufacturing – Hierarchy of influential variables, *Additive Manufacturing*, 101355



- Yangfan, W., Xizhang, C., Chuanchu, S., 2019, Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 fabricated by wire-arc additive manufacturing, *Surface and Coatings Technology*, 116-123
- Yin, H., Felicelli, S. D., 2010, Dendrite growth simulation during solidification in the LENS process, *Acta Materialia*, 4, 1455-1465
- Zhang, K., Xiong, J., Ke, Y., 2020, Effect of latter feeding wire on double-wire GTA-AM stainless steel, *Materials and Manufacturing Processes*, 1-10
- Zhang, X. C., Xu, B. S., Tu, S. T., Xuan, F. Z., Wang, H. D. vd., 2009, Fatigue resistance and failure mechanisms of plasma-sprayed CrC–NiCr cermet coatings in rolling contact, *International Journal of Fatigue*, 5, 906-915