
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

# EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti6AL4V ESASLI DESENLİ YAPILAR İÇERİSİNE TOZ METALURJİSİ İLE TAKVİYE EDİLEN SERAMİK KATKININ MEKANİK PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

**Hasan YALÇIN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**
**MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2023**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hasan YALÇIN
28/04/2023

# EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN Ti6AL4V ESASLI DESENLİ YAPILAR İÇERİSİNE TOZ METALURJİSİ İLE TAKVİYE EDİLEN SERAMİK KATKININ MEKANİK PERFORMANSA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Hasan YALÇIN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

## ÖZET

Günümüzde Eklemeli İmalat başlangıçta hızlı prototipleme amacıyla kullanılmaya başlamış bir teknolojidir. Ancak son zamanlarda geleneksel imalat yöntemlerine alternatif olan bir teknoloji olmaya başlamıştır. Özellikle metal eklemeli imalat teknolojileri ile üretilen parçalar medikal, uzay ve havacılık gibi önemli sektörlerde kullanılmaktadır. Metal eklemeli imalat yöntemlerinden elektron ışını ile ergitme metodunda metal tozları elektron ışını ile ergitilerek katman katman üretim yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında elektron ışını ergitmeli sistemlerde üretilen numunelerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla biyouyumlu Ti6Al4V malzemeden, eklemeli imalat ile boşluklu geometrik desenlere sahip kompakt matris yapılar içerisine toz metalurjisi tekniği ile seramik partiküller takviye edilerek kompozit yapılar elde edilmiştir. Elde edilen bu kompozit yapılar üzerinde sertlik ölçümü ve eğme mukavemeti testleri yapılmıştır. Üretilmiş olan kompozit yapıların, mikro yapısal analizleri SEM ve optik görüntüleme ve EDX elementel analiz yöntemleri ile birlikte değerlendirilmiştir. Kompozit malzeme üretimleri sonucunda matris ile seramik takviye arasındaki ara yüzeylere bakıldığında iyi bir sinterlemenin gerçekleştiği gözlenmiştir. Eklemeli imalat ile farklı geometrik desenlerin matris metali içerisinde yapısı içerisinde oluşturulan farklı geometrideki desenler içerisinde yer alan takviye elemanı seramiğin kompozit yapının performansına etkisi yapılan test ve görüntülemeler ile incelenmiştir. Sonuç olarak altı farklı geometrik desenlerde, genelde yuvarlak formlarda mekanik dayanımın daha yüksek elde edildiği görülmüştür. Geometrik desen yapısı içerisinde iyi bir sinterleme elde edilerek homojen bir sinterleme bandı elde edildiği mikro fotoğraflardan görülmüştür. Referans numuneye göre mekanik dayanımda en iyi iyileşme dairesel formlu B2 numunelerinde %21 artış ile gerçekleşmiştir.

| | | |
|---|---|---|
| Bilim Kodu | : | 91438 |
| Anahtar Kelimeler | : | Eklemeli imalat, elektron ışın demeti ile ergitme, metal matrisli kompozitler, Ti6AL4V |
| Sayfa Adedi | : | 79 |
| Danışman | : | Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK |

# THE EFFECT OF CERAMIC REINFORCEMENT PROCESSED BY POWDER METALLURGY ON MECHANICAL PERFORMANCE IN Ti6AL4V BASED PATTERNED STRUCTURES PRODUCED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD

(M. Sc. Thesis)

Hasan YALÇIN

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

## ABSTRACT

Nowadays, Additive Manufacturing is a technology that was initially used for rapid prototyping. However, it has recently started to be a technology that is an alternative to traditional manufacturing methods. Especially the parts produced with metal additive manufacturing technologies are used in important sectors such as medicine, aerospace and aviation. In the electron beam melting method, the metal powders are melted with the electron beam and the production is made layer by layer. In this thesis, a study was conducted on the improvement of the mechanical properties of the samples produced in electron beam melting systems. For this purpose, composite structures were obtained by reinforcing ceramic particles from biocompatible Ti6Al4V material with powder metallurgy technique into compact matrix structures with hollow geometrical patterns by additive manufacturing. Hardness measurement and bending strength tests were carried out on these composite structures. Microstructural analyses of the produced composite structures were evaluated with SEM and optical imaging, and EDX elemental analysis methods. As a result of the production of composite materials, when the interfaces between the matrix and the ceramic reinforcement were examined, good sintering was observed. The effect of the reinforcement element ceramic, which is included in the patterns in different geometries created in the structure of different geometric patterns in the matrix metal with additive manufacturing, on the performance of the composite structure has been examined with tests and visualizations. As a result, it was observed that the mechanical strength was higher in six different geometric patterns, generally in round forms. It has been seen from the microphotographs that a homogeneous sintering band was obtained by obtaining good sintering in the geometric pattern structure. Compared to the reference sample, the best improvement in mechanical strength was achieved in circular form B2 samples with an increase of 21%.

| | | |
|---|---|---|
| Science Code | : | 91438 |
| Key Words | : | Additive manufacturing, electron beam melting, metal matrix composites, Ti6AL4V |
| Page Number | : | 79 |
| Supervisor | : | Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK |

# TEŞEKKÜR

Eğitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen aileme, her konuda rahatça fikrini alabildiğim tez danışmanım sayın Prof. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK'e tezim ile ilgili her imkanı sağlayan Eklemeli İmalat Teknolojileri Uygulama ve Araştırma Merkezi (EKTAM) müdürü sayın Prof. Dr. Metin U. SALAMCI'ya, başta Yunus YILDIZ ve Can TOPRAK olmak üzere EKTAM ekibine, laboratuvar çalışmalarında tecrübesinden faydalandığım sayın Yusuf KARABULUT ve Yusuf ŞAHİNKAYA'ya, deneysel çalışmaların yapılmasında yardımcı olan Doç Dr. Muharrem PUL ve Öğr. Gör. Duran KAYA hocalarıma teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**

ÖZET ..... iv
ABSTRACT ..... v
İÇİNDEKİLER ..... vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ ..... ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ ..... x
SİMGELER VE KISALTMALAR ..... xiii
1. GİRİŞ ..... 1
2. EKLEMELİ İMALAT ..... 3
2.1. Eklemeli İmalatın Üretim Basamakları ..... 3
2.2. Eklemeli İmalatın Avantajları ve Dezavantajları ..... 5
2.2.1. Eklemeli imalatın avantajları ..... 5
2.2.2. Eklemeli imalatın dezavantajları ..... 6
2.3. Eklemeli İmalat Metotları ..... 7
2.3.1. Elektron ışını ile ergitme yöntemi ..... 7
2.3.2. Metal tozu ve özellikleri ..... 9
3. LİTERATÜR ..... 15
4. MATERYAL VE YÖNTEM ..... 23
4.1. Kompozit Üretimi Ön Deneme Çalışmaları ..... 24
4.2. Ti6AL4V -$ZrO_2$ kompozit üretimi ..... 25
4.2.1. Ti6AL4V matris numune üretimi ..... 25
4.2.2. Ti6AL4V matris içine $ZrO_2$'nin preslenmesi ve sinterlenmesi ..... 29
4.3. Mikro Sertlik Ölçümü ..... 32
4.4. Üç Nokta Eğme Testi ..... 32
5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 36
5.1. Optik Mikroskop İncelemesi ..... 36
5.2. Taramalı Elektron Mikroskopu ve Doğrusal Elementel Analiz İncelenmesi ..... 47
5.3. XRD Analizi Sonuçları ..... 60
5.4. Mikro Sertlik ..... 62

5.5. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları ..... 66
6. SONUÇ VE ÖNERİLER ..... 71
KAYNAKLAR ..... 73
ÖZGEÇMİŞ ..... 79

# ÇİZELGELERİN LİSTESİ

**Çizelge** **Sayfa**

Çizelge 4.1. Çalışma kapsamında kullanılan Ti6AL4V tozunun kimyasal bileşimi..... 23

Çizelge 4.2. Seramik tozların özellikleri ..... 23

Çizelge 4.3. ARCAM A2X üretim parametreleri..... 26

Çizelge 4.4. Sinterlemelere göre belirlenen numune numaraları ..... 34

Çizelge 5.1. Numunelerin ara yüzey kalınlıkları..... 36

Çizelge 5.2. Numunelerin ara yüzey köşeleri açısal artışı..... 46

Çizelge 5.3. Üç nokta eğme testi sonuçları ..... 67

# ŞEKİLLERİN LİSTESİ

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 2.1. Eklemeli imalat üretim basamakları ..... 3

Şekil 2.2. (a)Geleneksel üretim teknolojisi malzeme kullanımı (b)Eklemeli imalat teknolojisi malzeme kullanımı ..... 6

Şekil 2.3. EBM Sistemi ..... 8

Şekil 2.4. Toz Yatağı Ergitmeli Eklemeli İmalat Prosesi şematik gösterimi ..... 9

Şekil 2.5. EBM' de yığın halinde parça üretimi ..... 11

Şekil 2.6. Sinterlenme sırasında sıcaklığa göre tozların kurduğu bağ miktarları ..... 12

Şekil 2.7. Ön ısıtma 1 ve ön ısıtma 2 bölgelerinin şematik gösterimi ..... 12

Şekil 4.1. Toz sinterlemesinde kullanılacak olan deneme numunesi ANSYS analizi ve üretilmiş Ti6AL4V matris numune ..... 24

Şekil 4.2. Numunelere sıkıştırılmış tozların üstten görüntüsü ..... 24

Şekil 4.3. Isıl işlem sonrası elde edilen numuneler ..... 25

Şekil 4.4. Zirkonyum oksit doldurulacak matris test numuneleri için belirlenen tasarımlar ..... 25

Şekil 4.5. ARCAM A2X EBM Makinesi ..... 27

Şekil 4.6. Zirkonyum oksit doldurulacak test numunelerinin üretilmiş hali ..... 28

Şekil 4.7. Üretim sonrası temizlik süreci ve destek yapıların sökülmesi ..... 29

Şekil 4.8. Hidrolik preste $ZrO_2$ doldurulmuş numunelerin sıkıştırılması ..... 30

Şekil 4.9. Havada soğutma sinterlenme prosesi ..... 30

Şekil 4.10. Fırın içinde soğutma sinterlenme prosesi ..... 31

Şekil 4.11. Sinterleme sonrası üretilmiş kompozit numuneler, (a) havada soğutulmuş, (b) fırında soğutulmuş ..... 31

Şekil 4.12. Sertlik testi ölçümü yapılan noktaların doğrultusunun şematik gösterimi ... 32

Şekil 4.13. Toz sıkıştırılmış numunelerin eğilmesi ..... 33

Şekil 4.14. Mikro yapı görüntülemede kullanılan SEM cihazı ..... 34

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 5.1. A1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 37

Şekil 5.2. B1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 37

Şekil 5.3. A1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü ..... 37

Şekil 5.4. B1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü ..... 38

Şekil 5.5. A2 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 38

Şekil 5.6. B2 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 39

Şekil 5.7. A3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 39

Şekil 5.8. B3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 39

Şekil 5.9. A3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü ..... 40

Şekil 5.10. B3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü ..... 40

Şekil 5.11. A4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 41

Şekil 5.12. B4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 41

Şekil 5.13. A4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü ..... 41

Şekil 5.14. B4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü ..... 42

Şekil 5.15. A5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 42

Şekil 5.16. B5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 43

Şekil 5.17. A5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 43

Şekil 5.18. B5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 43

Şekil 5.19. A6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 44

Şekil 5.20. B6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 45

Şekil 5.21. A6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü ..... 45

**Şekil** **Sayfa**

Şekil 5.22. B6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü..... 45

Şekil 5.23. A1 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 48

Şekil 5.24. A2 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 49

Şekil 5.25. A3 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 50

Şekil 5.26. A4 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 51

Şekil 5.27. A5 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 52

Şekil 5.28. A6 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 53

Şekil 5.29. B1 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 54

Şekil 5.30. B2 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 55

Şekil 5.31. B3 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 56

Şekil 5.32. B4 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 57

Şekil 5.33. B5 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 58

Şekil 5.34. B6 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği 59

Şekil 5.35. A2,A4,B2,B4 numunelerine yapılan XRD analizi sonuçları ..... 61

Şekil 5.36. A1 numunesinin sertlik testi sonuçları ..... 62

Şekil 5.37. A2 numunesinin sertlik testi sonuçları ..... 63

Şekil 5.38. A3 numunesinin sertlik testi sonuçları ..... 63

Şekil 5.39. A4 numunesinin sertlik testi sonuçları ..... 64

Şekil 5.40. A5 numunesinin sertlik testi sonuçları ..... 64

Şekil 5.41. A6 numunesinin sertlik testi sonuçları ..... 65

Şekil 5.42. A1-A6 numunelerinin sertlik sonuçları ..... 66

Şekil 5.43. Üç nokta eğme testi sonuçları grafiği ..... 67

Şekil 5.44. Üç nokta eğme testi sonucunda kırılan B1 numunesinin üstten görüntüsü ve kesit görüntüsü ..... 69

# SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|---|---|
| **AM** | Additive Manufacturing |
| **ASTM** | American Society for Testing and Materials |
| **BCC** | Body Centered Cubic |
| **BJT** | Binder Jetting |
| **CAD** | Computer Aided Design |
| **CAM** | Computer Aided Manufacturing |
| **CNC** | Computer Numerical Control |
| **DED** | Direct Energy Deposition |
| **DEM** | Discrete Element Method |
| **DFAM** | Design for Additive manufacturing |
| **DLD** | Direct Laser Deposition |
| **DMD** | Direct Metal Deposition |
| **EBM** | Electron Beam Melting |
| **Eİ** | Eklemeli İmalat |
| **ELI** | Extra Low Interstitials |
| **FDM** | Fused Deposition Modeling |
| **HCP** | Hexagonal Close Packed |
| **HIP** | Hot Isostatic Pressing |
| **LMI** | Laser Melt Injection |
| **MJT** | Material Jetting |
| **MSD** | Magnetron Sputtering Deposition |
| **PBF** | Powder Bed Fusion |
| **SEM** | Scanning Electron Microscope |
| **SHL** | Sheet Lamination |
| **SLA** | Stereolithography Apparatus |
| **SLM** | Selective Laser Melting |
| **SPS** | Spark Plasma Sintering |

| Kısaltmalar | Açıklamalar |
|---|---|
| **STL** | Stereolithography |
| **TEM** | Transmission Electron Microscobe |
| **WAAM** | Wire Arc Additive Manufacturing |
| **VPP** | Vat Photopolymerization |

# 1. GİRİŞ

Eklemeli imalat, malzemelerin genellikle katman katman birleştirilerek üretimin yapıldığı bir imalat yöntemidir. Bu imalat türü son zamanlarda giderek birçok sektörde yaygınlaşmaya başlamıştır. Başlangıçta sadece hızlı prototipleme amacıyla kullanılan bu üretim yöntemi, özellikle uzay ve havacılık sektöründe birçok üründe kullanılmaya başlamıştır. Eklemeli imalat teknolojisi katmanların birleştirilme şekline, kullanılan malzemeye ve prosesin işleyişine göre farklı şekillerde adlandırılmaktadır. Eklemeli imalat yöntemlerinin dezavantajlarının önüne geçecek çözümler geliştirildikçe farklı sektörler tarafından tercih edilirliğinin artacağı ve imalat sektörüne bir sıçrama yaşatacağı düşünülmektedir.

Eklemeli imalatın terminolojisi ISO/ASTM 52900:2021 standardı ile belirlenmiştir. Ayrıca, ASTM F42 teknik komitesi eklemeli imalatı, eksiltmeli üretim metodolojilerinin tersine, genellikle katman katman, 3 boyutlu model verilerinden nesneler yapmak için malzeme birleştirme süreci, olarak tanımlamıştır. ASTM'ye göre eklemeli imalat, üretim yöntemlerinin içinde 3 ana gruptan biridir. Üretim yöntemlerinin diğer iki ana grubu ise geleneksel üretim yöntemleri ve geleneksel olmayan imalat yöntemleridir [1]. Eklemeli imalatta kullanılmakta olan malzemeler yöntem gereksinimleri ve üretim mekanizmaları göz önüne alındığında sınırlıdır. İstenilen mekanik ve mikro yapı özellikler bazı durumlarda sağlanamamaktadır. Bu sebeple istenilen özelliklerin sağlanabileceği malzemelerin eklemeli imalata uyarlanabilmesi üzerine çalışılmaktadır. Ayrıca eklemeli imalat ile geleneksel imalat metotlarının da entegre edilebildiği hibrit üretim sistemleri üzerine de çalışmalar yapılmaktadır.

Araştırmanın amacı

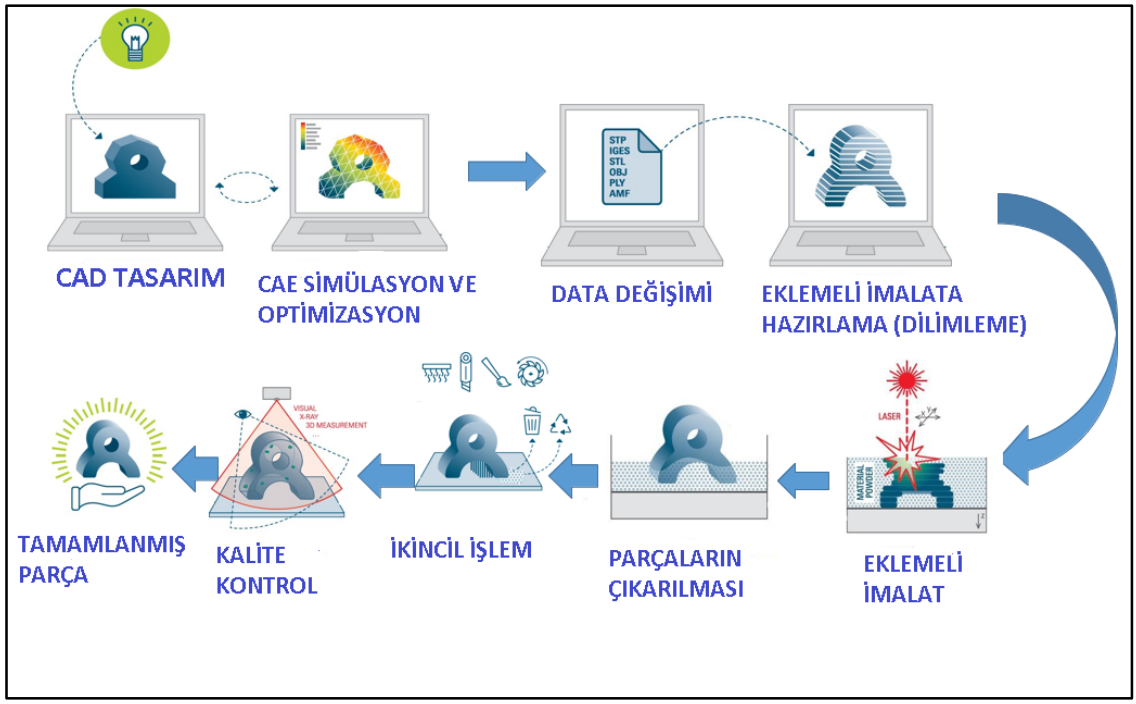
Eklemeli imalat yöntemlerinden olan toz yataklı ergitme tekniklerinin uygulandığı EBM yöntemi ile matris yapının üretilmesi, sonrasında toz metalurji teknikleri birlikte kullanılarak hibrit bir üretim yöntemi ile kompozit malzeme üretimi hedeflenmiştir. Çalışma çıktısı, eklemeli imalat yöntemleri ile karmaşık geometrilerin oluşturulması ve toz metalurjisi yardımıyla farklı seramik partikül takviyelerin yapı içerisine entegre edilerek yüksek mekanik performansı iyileştirilmiş malzemenin iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

# 2. EKLEMELİ İMALAT

Hayatımızı kolaylaştıran ve geleceğin teknolojisi olarak görülen üç boyutlu yazıcılar, bilgisayar ortamında parça modellenerek, kısa bir süre içinde elle tutulabilir somut nesnelere dönüştüren makinelerdir [2]. Geleneksel imalat yöntemlerinde, üretim adımlarının sayıca çok olması ve nihai ürünün oluşmasında atık malzeme miktarının yüksek olması nedenleriyle eklemeli imalat yöntemleri giderek önem kazanmaktadır.

## 2.1. Eklemeli İmalatın Üretim Basamakları

Eklemeli imalatta tasarım sürecinden nihai ürün üretilene kadar geçen süreç kendi içinde birçok adımdan oluşmaktadır. Bu süreçte istenilen parçanın malzemesi, mekanik özellikleri ve fiziksel özelliklerine göre adımların sayısı değişkenlik göstermektedir. İlk olarak bilgisayar ortamında herhangi bir bilgisayar destekli yazılım (CAD) kullanılarak tasarlanan katı model, standart üçgen dil (ing. Standard Tessellation Language, STL) adı verilen dosya formatında kaydedilmektedir. Bu format, üretilecek parçanın sadece dış geometrisi hakkında bilgi vermektedir. Birçok CAD yazılımında bu format uygulanabilir olması bu dosya formatını yaygın kılmıştır. Eklemeli imalat süreci Şekil 2.1'de sembolik olarak verilmiştir.




Şekil 2.1. Eklemeli imalat üretim basamakları

Eklemeli imalatın işlem basamakları aşağıda sıralanmıştır:

1. Üç boyutlu CAD modelinin oluşturulması
2. Tasarlanan modelin standart üçgen dil formatında kaydedilmesi
3. Standart üçgen dil formatının eklemeli imalat yazılımının tanıyacağı formata dönüştürmesi (dilimleme)
4. Eklemeli imalat üretimi
5. Son işlem uygulanması (destek yapıların sökülmesi, toz temizliği vb.)

Üç boyutlu CAD modelinin oluşturulması

Mühendislik veya herhangi bir üç boyutlu grafik tasarım programında (SolidWorks, Catia, Blender, 3DS Max, vb.) farklı formatlarda ürün tasarlanır. Tasarım yapılırken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisi eklemeli imalatta üretilebilmesine uygun geometriye sahip olmasıdır. Her ne kadar eklemeli imalat karmaşık geometri bakımından geleneksel üretim metodlarına göre avantajlı olsa da kendi içinde bir takım tasarım koşulları içermektedir. Tasarım konusunda bu koşullar dikkate alınmazsa istenilen parça hatalı olarak üretilebilmektedir.

Tasarlanan modelin standart  ügen dil (STL) formatında kaydedilmesi

Tasarımı yapılan parça standart üçgen dil formatına dönüştürülüp eklemeli imalat yazılımlarının okuyabileceği formata dönüştürülmektedir. Son zamanlarda özellikle mühendislik alanında kullanılan CAD yazılımlarında tıpkı CAM (in. Computer Aided Manufacturing) yazılımlarının entegre edilmesi gibi eklemeli imalat yazılımları da aynı şekilde entegre edilmeye başlamıştır. STL formatına alternatif olarak OBJ, 3MF ve AMF gibi dosya formatları da bulunmaktadır. Bu dosya formatları sadece geometriyi değil; doku, renk ve malzeme bilgisi gibi bilgileri de içerebildiği bilinmektedir.

STL formatının eklemeli imalat yazılımının tanıyacağı formata dönüştürmesi (Dilimleme)

Standart üçgen dil formatındaki parça eklemeli imalat cihaz yazılımına aktarılmaktadır. Materıalıse Magics, Netfabb, Voxeldance vb. eklemeli imalat yazılımlarında üretilecek parçanın üretim tablasında konumlandırılır ve gerek görüldüğünde uygun destek yapıları da

eklenerek üretilecek durumuna getirilmektedir. Ardından bu yazılımlarında parçalar dilimlenerek eklemeli imalat cihazlarının tanımlayacağı formata getirilmektedir.

Eklemeli imalat üretimi

Dilimleme işlemi yapılmış parçanın yazılımdan çıkan dosya formatı eklemeli imalatta kullanılan teknolojiye göre değişiklik göstermektedir. Örneğin lazer ergitmeli Concept Laser tezahı için bu format CLS iken elektron ışını ergitmeli Arcam marka cihaz için bu format ABP olmaktadır. Mevcut yazıcılar sadece kendi formatlarını tanımlayabilmektedir. Ardından parçaların eklemeli üretim süreci gerçekleştirilir.

Bitirme işlemleri ve ikincil işlemlerin uygulanması

Üretim tablasından çıkarılan parçalar gerektiğinde birtakım işlemlerden geçirildikten sonra son ürün haline gelebilmektedir. Kalıntı gerilmelere karşı ısıl işlem uygulanması, sıcak izostatik presleme ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirme gibi üretim sonrası son işlemler ile parçalara istenilen özellikler sağlanabilmektedir.

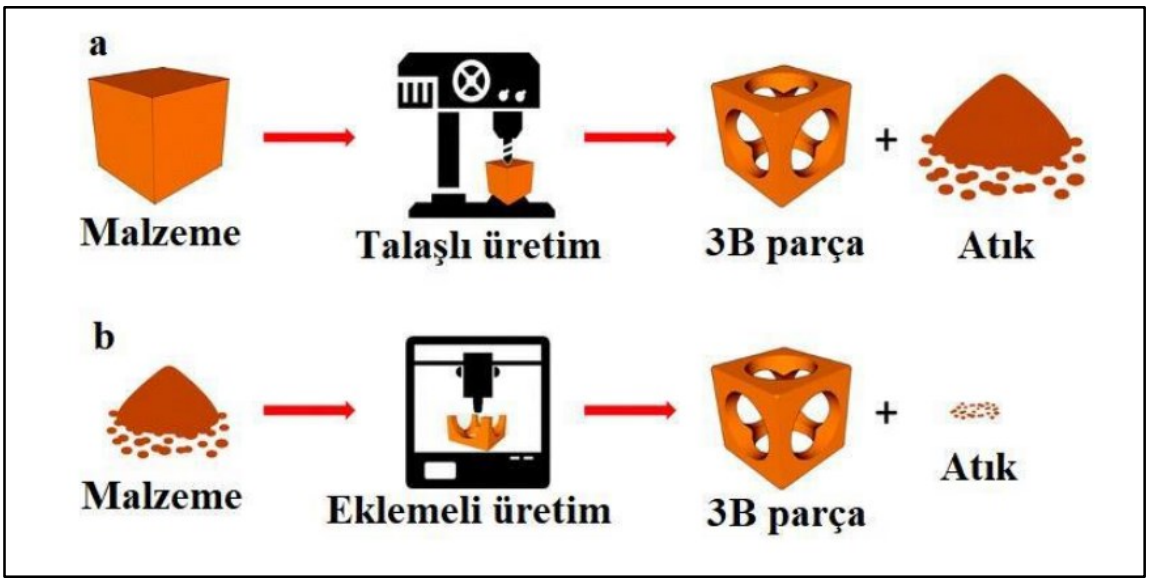
## 2.2. Eklemeli İmalatın Avantajları ve Dezavantajları

### 2.2.1. Eklemeli imalatın avantajları

Eklemeli imalat sayesinde geleneksel metotlarla üretilemeyen karmaşık geometriye sahip parçalar üretilebilmektedir. Özellikle CNC ile üretilemeyen karmaşık yapıdaki parçalar üretilebilmektedir. Ayrıca kaynaklı bağlantı, cıvatalı bağlantı gibi bağlantı elemanlarına gerek kalmadan bu parçalar yekpare bir şekilde üretilebilir.

Talaşlı imalat ile kıyaslandığında artık malzeme miktarı daha azdır. Herhangi bir tornalama veya frezeleme gibi malzeme işleme metotları kullanılmadığı için malzemeler oldukça verimli kullanılmaktadır. Yalnızca kullanılan destek yapıları için bir miktar malzeme kullanılmaktadır. Ayrıca toz yataklı üretim metotlarında da üretim sonrası toz yatağından alınarak elenen malzemede bir miktar metal toz kaybı yaşanmaktadır. Fakat talaşlı imalatta artan talaş miktarı ile kıyaslandığında bu çok düşük miktardadır. Özellikle talaşlı imalatta

malzemenin geometrisi karmaşık bir hal almaya başladığında malzemeden alınan talaş miktarı da bir o kadar artmaktadır.




Şekil 2.2. (a)Geleneksel üretim teknolojisi malzeme kullanımı (b)Eklemeli imalat teknolojisi malzeme kullanımı [3]

Yine karmaşık geometrili parçalar ele alındığında her bir talaşlı imalat prosesi zaman kaybına, maliyet artışına, fazladan iş gücüne gereksinim duymaktadır. Buna ek olarak CNC makineler için bile bu parçaların ayarlanıp işlenmesi çok zordur. Özellikle CNC de işlenecek malzemeye ve geometriye göre malzeme seçimi de çok geniş bir yelpazeye uzanan bir uzmanlık gerektirir [4].

Topoloji optimizasyonu ile ağırlığı azaltılmış parçaların üretilmesinde eklemeli imalat teknolojisi büyük fayda sağlamaktadır. Özellikle otomotiv, havacılık ve uzay teknolojilerinde bu parçaların üretilebilmesi çok önemlidir.

Eklemeli imalat teknolojileri, bulut tabanlı sistemlere entegre olabildiğinden endüstri 4.0 uygulamaları için oldukça avantajlıdır [5].

### 2.2.2. Eklemeli imalatın dezavantajları

Geleneksel metotlarla üretilen karmaşık olamayan yapılarda üretim hızı eklemeli imalata göre daha hızlı olduğu için geleneksel yöntemler tercih sebebi olabilmektedir.

Parçalar katman olarak üretildiği için yoğun parçaların üretimi çok uzun sürebilmektedir. Toz yataklı eklemeli imalat yöntemlerinde kullanılan tozlar tekrar tekrar kullanıldığı için yapısı bozulabilmekte ve oksidasyona uğrayabilmektedir. Üretilen parçalar istenilen fiziksel ve mekanik özellikler elde edilemediğinde son ısıl işlemler uygulanmaktadır. Ayrıca boyutsal doğruluk da bazı malzeme ve geometrilerde sorun teşkil edebilmektedir. Eklemeli imalatın üretim hacimleri sınırlı olduğundan büyük boyuttaki parçalar ve seri üretim için uygun değildir.

## 2.3. Eklemeli İmalat Metotları

Eklemeli imalat metotlarının sınıflandırılması kullanılan metoda veya malzemeye göre değişkenlik gösterebilmektedir. Kullanılan malzemeye göre sınıflandırılmak istendiğinde 7 ana başlıkta sınıflandırılabilir:

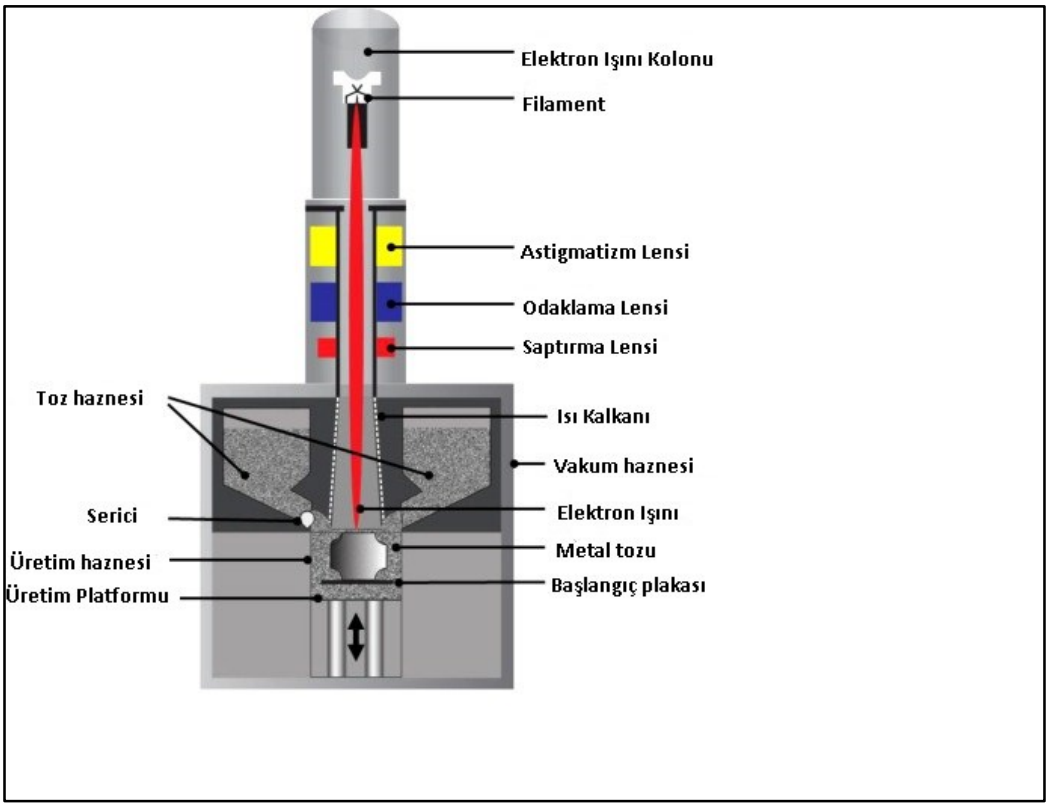
1. Toz yataklı ergitme (ing. Powder Bed Fusion, PBF)
2. Doğrudan enerji biriktirme (ing. Direct Energy Deposition, DED)
3. Ergiyik ekstrüzyonu (ing. Fused Deposition Modeling, FDM)
4. Bağlayıcı püskürtme (ing. Binder Jetting, BJT)
5. Malzeme püskürtme ile eklemeli imalat (ing. Material Jetting, MJT)
6. Levha/Sac Laminasyonu (ing. Sheet Lamination, SHL)
7. Fotopolimerleştirme metodu (ing. Vat Photopolymerization, VPP)

Bu tez için yapılan çalışmada metal toz yataklı ergitme teknolojilerden EBM yöntemi kullanılmıştır. Bu metot ile özellikle titanyum alaşımları, demir esaslı alaşımlar ve nikel bazlı süper alaşımlar vb. malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz yataklı ergitme teknolojisinde, hareketli ısı kaynağının toz malzemeyi ergitmesiyle istenilen parça elde edilmektedir. Burada ısı kaynağı olarak lazer ya da elektron ışını kullanılmaktadır.

### 2.3.1. Elektron ışını ile ergitme yöntemi

Elektron ışını; kaynak, lehimleme, delme, kesme gibi işlemler için uzun yıllardan beri kullanılmaktadır. Arcam AB firması, döküm parçalarınkine benzer özelliklere sahip özel parçaların ve karmaşık şekilli nesnelerin üretiminde kullanılan Seçici Elektron Işını Ergitme (SEBM) veya Elektron Işını Ergitme (EBM) adı verilen yeni bir üretim süreci geliştirmiştir

[6]. Yöntemin patentinin almasının ardından Arcam Spectra H, Arcam Q10plus, Arcam Q20plus, Arcam A2X ürünlerini piyasaya sürmüştür. EBM cihaz görseli şematik olarak Şekil 2.3.'de gösterilmektedir.




Şekil 2.3. EBM Sistemi [7]

Elektron ışını ile ergitme sisteminde metal tozlarını ergitmek için enerji kaynağı olarak elektron ışını kullanılmaktadır. Konvansiyonel üretim metotlarına göre kıyaslandığında üretim hacmi çok düşük olmasına rağmen, karmaşık yapıdaki geometrilerin üretilmesinde öne çıkmaktadır. Sistem, filamentten yayılan çok yüksek hızdaki elektronların sahip olduğu kinetik enerjinin metal tozlarına aktarılması sonucunda oluşan ısı ile bu tozların ergitilmesi esasına dayanmaktadır. Elektron ışını, bir anot, bir katot ve elektromanyetik alan oluşturarak odaklanmayı sağlayan bobin sistemlerinden oluşmaktadır. Bu sistemde filament malzemesi olarak tungsten filament kullanılmaktadır. Tungsten filament (katod) üzerinden elektrik akımı geçtiğinde ısınır ve elektron yayar. Bu aşamada anoda 60.000 V gerilim uygulanır. Yüksek potansiyel farkı, istenilen yönde filamentten elektronların hızlandırmasına yardımcı olur. Ortaya çıkan ışın demeti, daha sonra odaklama bobini, saptırma bobini, astigmat bobin gibi manyetik bobinler yardımıyla ışın demeti arzu edildiği şekilde kontrol edilebilmektedir.

Böylelikle ayarlanabilen kontrol parametreleri ile farklı ışın yoğunluklarında üretimler gerçekleştirilebilir [8].

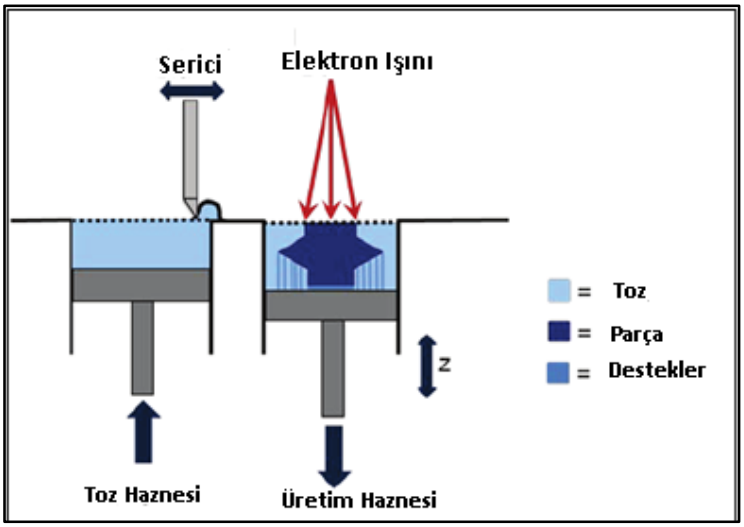
### 2.3.2. Metal tozu ve özellikleri

Ti6Al4V alaşımının diğer alternatif metalik malzemelere göre üstün özelliklerinden medikal endüstrisinin yanı sıra uzay ve havacılık alanında da yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Çelikten daha dayanıklı olan bu malzemenin, % 60 oranında daha düşük yoğunluğunun olmasının yanı sıra yüksek tokluk ve biyo-uyumluluk özellikleri de bu malzemeyi cazip kılmaktadır. Özellikle biyouyumlu olması bu malzemenin biyomedikal alanda implant ve kemik plakası olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır [9].

### 2.4.4. EBM Prosesi ve parametreleri

Proses Adımları

EBM üretim prosesi her katmana bir metal serici ile toz serilmesiyle başlar. Ardından odaklanmış elektron ışınları tozun bulunduğu bölgeye odaklanarak tozların ergimesi sağlanır. Üretim tablası katman kalınlığı kadar aşağı indikten sonra yeniden toz serimi yapılarak proses devam eder. Şekil 2.4'de bu proses şematik olarak gösterilmiştir.




Şekil 2.4. Toz Yatağı Ergitmeli Eklemeli İmalat Prosesi şematik gösterimi

İstenilen ergiyik havuzunun oluşabilmesi için gerekli enerji yoğunluğunun verilmesi gerekmektedir. Bu hacimsel enerji yoğunluğunun oluşabilmesi için gerekli birçok parametre bulunmaktadır. Bu parametreler aktarılan güç, kullanılan tarama stratejisi, katman kalınlığı ile doğrudan bağlantılıdır.

ARCAM A2X EBM cihazında bulunan parametreleri şunlardır:

Güç: 60 kV luk gerilimde mA seviyesinde değiştirilen akımla elde edilen güçtür. Örneğin 15mA akım için bu gerilimde ayarlanan güç 900W olmaktadır.

Tarama hızı: Metal tozlarına gönderilen elektronların oluşturduğu ısının üretim tablası üzerinde mm/s üzerinden ışın demetinin toz yatağı yüzeyinde gezdirilme hızıdır.

Katman kalınlığı: Üretim tablasının tarama sonrası aşağıya indiği miktar olarak oluşan kalınlıktır. Standart ayarlarda 50 µm olup isteğe bağlı değiştirebilir.

Odak çapı: Elektronların odaklanması için verilen mA seviyesindeki akım değeridir. Bu değerin mikrometre türünden karşılığı vardır. Diğer toz yataklı sistemler lazer kullanıldığı için galvano aynalar ile odaklanmakta ve odak çapı değeri µm türünden verilmektedir.

Tarama yolunda odaklar arası uzaklık (ing. hatch distance): İki ayrı tarama vektörü arasında olan mikrometre mertebesinde olan mesafedir.

Tarama stratejisi: Vektörlerin tarama yaparken kullanılan stratejiye denir. Kendi içinde adacık taraması, kontur taraması, hatch taraması gibi farklı türleri vardır. İyi bir ergiyik havuzu oluşabilmesi için tarama stratejisi çok önemlidir.

Destek yapıları: Katmanlar halinde üretimde, parçanın aşağıya doğru akmasını engellemek adına belirli bölgelerde destek yapıları kullanılmaktadır. EBM prosesinde parçalar her katmanda ön ısıtma ile ısıtıldığından parçalar sinterlenmiş tozdan üretim sonrası proses ile çıkarılmaktadır. Bu durumda parçaların üretim tablasına destek yapıları ile bağlanmasına gerek kalmamaktadır. Parçalar üst üste istiflenerek üretilebilmektedir. Destek yapıları sadece ısının atılması için kullanılmaktadır. Şekil 2.5'de görüldüğü üzere parçalar birbirine temas etmeden altlarına destek yapıları atılarak yığın olarak üretilebilmektedir [6].



Şekil 2.5. EBM' de yığın halinde parça üretimi [6]

Kullanılan bu parametreler toz boyutu, toz dağılımı, toz serim hızı, kullanılan destek yapıları gibi çeşitlendirilebilir.

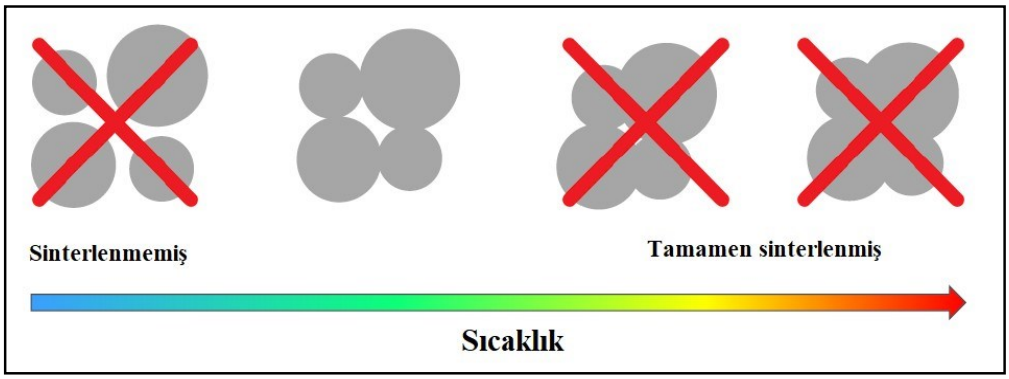
EBM prosesi ısı modeli ile kontrol edilmektedir. Isı modeli her katmanda gerekli ısının tarama stratejisi ile ayarlanabilmesini sağlar. Prosesi sağlayan bu ayar demetlerine (ing. Theme) adı verilmektedir [6].

EBM her bir proses için 5 farklı ayar demetinden oluşmaktadır. Yukarıda bahsedilen ana parametreler bu ayar demetlerinde değer olarak farklılık göstermektedir.

1. Ön ısıtma (ing. preheating)
2. Ergitme (ing. melt)
3. Net
4. Point net
5. Gofret destek yapı (ing. wafer support)

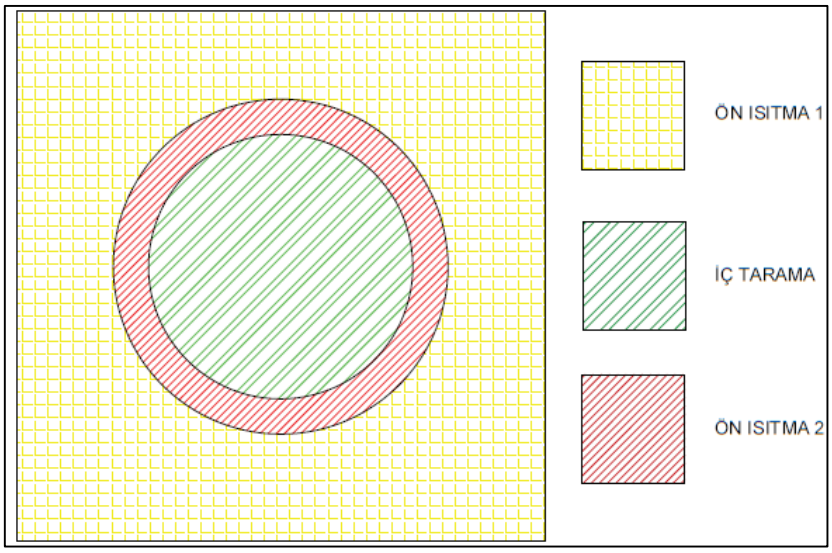
Ön ısıtma: EBM sisteminde elektron ışını hem tablayı ısıtıp katman üzerindeki tozları sinterlemek için hem de tozu ergiterek parçayı üretmek için kullanılmaktadır. Ön ısıtma prosesi EBM de iki adımda yapılmaktadır. İlk ön ısıtmada tabla üzerindeki tüm tozlar sinterlenir. Ön ısıtmada kullanılan parametrenin tarama hızı yüksek olup verilen güç düşüktür. Yapılan bu ön ısıtma ile prosesin sıcaklığı her katmanda sabit tutlmaya çalışılmaktadır. EBM prosesi vakum altında gerçekleştiği için taşınım ile ısı transferi çok azdır. Lazer ergitmeli toz yataklı sistemlerde ise üretimin z ekseninde yükselikği arttıkça alt

katmanlar ile üst katmanlar arasında sıcaklık farkı oluşmaktadır. Bu sıcaklık farkından ötürü hızlı soğuma olan bölgelerde kalıntı gerilmeler oluşmaktadır. Fakat EBM teknolojisinde ön ısıtma ile sıcaklık her katmanda dengelendiğinden kalıntı gerilmeler en aza indirilmektedir. EBM 'de ön ısıtma ile sinterlenen tozlar gereğinden fazla sinterlenirse parça sinterlenirnmiş tozlardan çıkarılamaz. Bu yüzden sinterleme tozlar arasında boyun verecek kadar olmalıdır (Şekil 2.6).




Şekil 2.6. Sinterlenme sırasında sıcaklığa göre tozların kurduğu bağ miktarları

Ön ısıtmanın diğer faydası elektronların toza temas etmesi sonucunda oluşan toz saçılımını engellemektir. Yüksek akım değeri ile odaklanmış elektronlarda toz saçılımı daha fazla olmaktadır. İkincil ön ısıtma ise ergitme sonrası olan ön ısıtmadır. Bu ön ısıtmada ergiyik havuzun çevresinde olan ısıtmadır. Bu ön ısıtma sayesinde ise ergiyik havuzu kontrol altında tutulmaktadır (Şekil 2.7).




Şekil 2.7. Ön ısıtma 1 ve ön ısıtma 2 bölgelerinin şematik gösterimi

Şekil 2.7'de incelendiğinde birinci ön ısıtma sarı renk ilegösterilen alana uygulanır. Bu alan tabla kenarlarından beşer milimetre içeride kalan bölgeyi kapsayacak şekilde taranır.

Ergitme: Ergitme genel olarak kontur taraması ve İngilizce hatch adı verdiğimiz iç tarama olmak üzere iki şekilde olmaktadır. Hatch taraması ile parçanın dolu iç kısmı oluşturulurken kontur taraması ile de geometrik doğrusallık ve düşük yüzey pürüzlülüğü için yapılan sınır taramasıdır. Ayrıca kontur taraması parça ile sinterlenmiş toz arasında bariyer etkisi oluşturmaktadır.

Net: Bu parametre seti ile kafes yapıları gibi düşük malzeme yoğunluğuna sahip parçaların üretimi yapılmaktadır. Focus offset parametresi ile elektron ışınının defokus olması engellenmektedir. Yani oldukça keskin bir odaklanma elektron ışını oluşur. Bu sayede ufak boyutlardaki kafes yapıları üretilebilmektedir.

Point Net: Bulut tabanlı bir ayar demeti olup EBM 'de yaygın olarak kullanılmamaktadır.

Gofret Destek Yapısı: Destek yapısı için kullanılan parametre setidir. Burada destek yapının kullanılma sebebi daha önce de bahsedildiği gibi fazla ısının atılarak parçada akma oluşmasını engellemektedir. Katının ısı iletkenlik katsayısı, tozun ısı iletkenlik katsayısından fazladır. Sebebi sinterlenmiş tozda boşluklu yapılar bulunmaktadır. Bu sebeple destek yapıları kullanılarak ergiyik havuzunun soğuma hızı kontrol altında tutulur.

# 3. LİTERATÜR

Seramikler ve seramikle güçlendirilmiş metal matrisli kompozitler (MMK) zorlu çalışma koşullarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek aşınma direnci, kimyasal kararlılık ve yüksek sıcaklıklarda özelliklerini koruyabilmesi sebebiyle biyomedikal, havacılık, elektronik ve yüksek donanımlı mühendislik endüstrilerinde uygulanmaktadır. Öte taraftan bu üstün özellikli malzemelerin üretimi, geleneksel üretim metotlarıyla özellikle az sayıda parça üretiminde yüksek maliyet ve enerji tüketimiyle sonuçlanmaktadır [10].

Attar ve arkadaşları (2014), metal malzemelerde bu çalışmalarında Ti-TiB kompozit malzemesini orijinal olarak Ti-$TiB_2$ tozlarını karıştırarak elde etmiş ve toz yataklı seçici lazer ergitmeli eklemeli imalat yöntemi (SLM) ile optimize edilmiş üretim parametreleri kullanılarak %99,5 yoğunluklu parçalar üreterek sertlik ve mekanik özelliklerin iyileştiğini açıklamışlardır [10]

Attar ve arkadaşlarının (2014) diğer bir çalışmasında, SLM'de farklı enerji yoğunlukları için ürettikleri numunelerde uygun enerji yoğunluğunun 120 $J/mm^3$ olduğu görmüş aynı şekilde lazer gücü 180 W olduğunda en yüksek bağıl yoğunluğu elde etmişlerdir. Sertlik değerleri kıyaslaması yapıldığında ise farklı teknolojiler ile üretilen titanyumda üretilen metal matrisli kompozitin diğer malzemelere göre sertlik değerinin çok yüksek çıktığı görmüşlerdir [11].

Kumar ve arkadaşları (2015), yaptıkları çalışmalarda toz metalürjisi metodunu kullanarak saf Alüminyum tozu içerisine SiC ve $TiO_2$ farklı oranlarda karıştırarak aşınma ve mikro sertlik karakteristiklerini inceliyorlar. Bu çalışmalarında Al-%15SiC toz karışımına $TiO_2$) (rutil) ile güçlendirme yaptıklarında hibrit kompozit yapının yoğunluğu ve mikrosertliğinin arttığını gözlendiği rapor edilmiştir . Aşınma direnci de benzer şekilde Al-SiC kompoziti ile Al-SiC-$TiO_2$ kompoziti ile kıyaslandığında sürtüne katsayısının $TiO_2$ eklenmesi ile arttığı ve buna paralel olarak aşınan malzeme kaybında da azalma olduğu açıklanmıştır [12].

Ivasishin ve arkadaşları (2019), yaptıkları çalışmada Ti6AL4V malzemesinin üzerine TiC and TiB %5-10 oranında malzemesini kullanarak çok katmanlı metal matrisli kompozit oluşturmuşlardır. Bu yapıyı oluştururken element katkılı toz metalürjisi (ing, elemental

blended powder metallurgy) metodu kullanmışlardır. Alaşım ve kompozitin çok yakın büzüşme değerinin olması bu çok katmanlı kompozitin oluşmasına olanak sağlamıştır [13].

Jin ve arkadaşları (2022), çalışmalarında titanyum matrisli kompozitlerde takviye elemanı olarak seçilen seramik malzeme türünün mikro yapı ve korozyon davranışını incelemişlerdir. Saf titanyum tozunun yanında TiB ve TiN seramik tozlarını da karıştırarak SLM ile test numuneleri üretiliyor. Ardından bu numunelere farklı sürelerde 0 gün, 5 gün ve 10 gün olacak şekilde korozyon testi uygulamışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda Ti-2.5TiN kompozit malzemesinin bağıl yoğunluğu (%99,2), Ti-2.5TiB kompozit malzemesine göre (% 98,6) daha yüksek elde etmişlerdir. Ayrıca iyi korozyon direnci gösterdiğini açıklamışlardır [14].

Huang ve arkadaşları (2009), Ti6AL4V metal tozuna $TiB_2$ ve C tozu katarak 800 °C ile 1200°C arasında sinterleyerek kompozit bir yapı oluşturma çalışması yapmışlardır. Çalışma için 10-40 μm boyutlarındaki Ti6AL4V tozu, 1-8 μm boyutlarındaki $TiB_2$ tozu ve 0,5 μm boyutlarındaki pul halindeki C parçacıkları 8 saat blenderde geçirildikten sonra 800 °C ile 1200°C arasında 20 MPa basınç altında sıkıştırılarak mikroyapı numuneleri elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışma sonucunda şekil 3.16 de de görüldüğü üzere en yüksek bağıl yoğunluk ve mikro sertlik değerlerinin optimal sinterleme sıcaklığında yani 1100°C de olduğu anlaşılıyor. TiC parçacıklarının oluşması Ti6AL4V nin sınır koşullarındaki Ti ile C arasında oluştuğu ayrıca TiB whisker takviye elemanlarının Ti matriksi içerisinde büyüyerek çevresindeki Ti6AL4V parçacıkları arasında güçlü bir bağ oluşturduğunu göstermiştir [15].

Yu ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada eklemeli imalat metotlarından direkt enerji depolama (ing, Direct Laser Deposition, DLD) metodunu kullanarak ağırlıkça %20 oranında saf TiC tozu ile %80 oranında Ti6AL4V tozunun karıştırılması sonucunda mikro yapı ve performansını incelemişlerdir. Çalışmada mekanik özelliklerin incelenmesi için mikro sertlik numuneleri ve çekme testi numuneleri üretiliyor. Mikro yapıda bağ ara yüzeyinin incelenmesi için numuneler üretilerek, geçirimli elektron mikroskobu (ing, Transmission Electron Microscobe, TEM) ile kırılma yüzeyinin incelenmesi için taramalı elektron mikroskobu ile incelemelerde bulunmuşlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda 400 W-600 W arasındaki lazer gücü ile makro boyutlarda bir bozukluk görülmediği bildirilmiştir. Lazer gücü arttıkça ergimemiş TiC içeriği ve zayıf ergime bozuklukları önemli derecede azalmış, bununla birlikte ince kalınlıklı duvarların kalınlığı artmıştır [16]. Yu ve arkadaşlarının

(2021), yaptıkları çalışmaların mekanik sonuçlarında 450 W lazer gücü ile üretim yapıldığında en yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir. Mikro sertlik değerinde en yüksek mikro sertlik değeri 550 W lazer gücü ile elde edilmiştir.

Yuan ve arkadaşları (2022), çalışmalarında saf titanyum matriksli $CoCrFeNiMo_{0.2}$ takviye elemanlı metal matrisli kompozitlerde ısıl işlemin mikro yapı üzerindeki etkileri üzerine çalışmışlardır. Hacimce ağırlığı %7 $CoCrFeNiMo_{0.2}$ olan toz karışımı ile saf titanyum tozu bilyeli karıştırıcı ile 200 devir/dakika da üniform karıştırıldıktan sonra vakum ortamında 800 °C de 120 MPa altında 1 saat sinterlemişlerdir. Sonra bu numuneler 770°/2sa, 830°/2sa, 830°/4sa, 830°/8sa ve 890°/2sa olacak şekilde farklı ısıl işlemlere tabi tutulmuşlardır. Isıl işlemin mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde ısıl işlem sıcaklığı 830°C ye kadar arttırıldığında arayüz katman sertliğinin arttığı ancak 890 °C de düştüğü görülmüştür ve 830°C de farklı sürelerde ısıl işlem uygulandığında başlangıçta sertliğin arttığı fakat devamında azalarak değişken değerler elde edilmiştir. Ayrıca sertliğin ara yüz bölümünde ara yüz katmanındaki sertlik değerinin matris içerisindeki ve parçacık içerisindeki sertlik değerinden daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Isıl işlem sıcaklığı arttığında Elastisite modülünün arttığı görülmüştür [17].

Chen ve arkadaşlarının (2008) benzer çalışmasında, Lazer Ergitme Enjeksiyonu (ing, Laser Melt Injection, LMI) teknolojisi ile Ti6AL4V tozuna tungsten karbür tozu ekleyerek oluşturdukları toz karışımını kullanarak kompozit numuneler üretmişlerdir. Chen ve arkadaşları yaptıkları çalışmada uzunlamasına farklı eksenlerde aldıkları kesitler incelendiğinde tungsten karbürün homojen bir dağılımı olduğunu görmüşlerdir. Tarama hızının artması ile daha düşük sertlik değerleri elde edilmiştir [18].

Anandajothi ve arkadaşları (2016), çalışmalarında direk toz metalürjisi ile $Ti6Al4V/TiB_2$–TiC toz karışımlarından MMK elde etmişlerdir. Ağırlıkça % 2,5, 5 ve 7,5 $TiB_2$-TiC olacak şekilde ayarlanan toz karışımları 950 MPa altında sıkıştırılıp 1250 °C de 2 saat sinterlemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda eşit ve ağırlıkça % 5 oranında bulunan $TiB_2$ ve TiC içeren MMK için en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir. Takviye elamanı miktarı arttıkça yoğunluk da artmıştır [19].

Hu ve arkadaşları (2010), yaptıkları çalışmada Ti6AL4V altlık üzerine toz sinterleme metodu uygulayarak malzemenin aşınma direnci ve sertliğini iyileştirme üzerine çalışma

yapmışlardır. Ti6AL4V tozu ile TiN tozunu (ağırlıkça %5, 10 ve olacak şekilde farklı karışımlar için) bilyeli karıştırıcıda 24 saat karıştırdıktan sonra 380 MPa basınçla sıkıştırılmıştır. Sonrasında 1.250 °C ye 3 saatte çıkarılmış, 4 saat bu sıcaklıkta sabit tutulmuş sonrasında oda sıcaklığına 2 saatte indirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen numunelerin Rockwell ve Vickers sertlik değerlerine bakıldığında TiN oranı arttırıldığında sertlik değerlerinin de arttığı görülmüştür [20].

Tsumakoto ve arkadaşları (2012) yaptıkları çalışmada Ti-$ZrO_2$ kompozitinin kıvılcım plazma sinterleme (ing, spark plazma sintering, SPS) metodu ile üretilen kompozit malzemenin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Hacimsel oranla eklenen $ZrO_2$ arasına molar oranda Yttrium oksit eklenerek farklı numuneler kıvılcım plazma sinterleme metodu ile hazırlanmıştır. Zirkonyum oksit oranının artması titanyum sertlik değerlerini yüksek oranlarda arttırmıştır. Ayrıca fonksiyonel derecelendirilmiş malzemeler istiflenmiş katmanlarla oluşmuş olmasına rağmen kompozit yapı nispeten düzgün bileşim dereceleri göstermiştir [21].

Metal matrisli seramik kompozitlerde metaller ile seramikler arasında bağ oluşumu da önemli faktörlerden biridir. Özellikle malzemeler arasında oluşacak malzeme difüzyonu büyük önem teşkil etmektedir.

Barenna ve arkadaşları (2009) yaptıkları çalışmada Ti6AL4V malzemesi ile $Al_2O_3$ malzemesinin bağ oluşturabilmesi için ara yüzeyde Ag ve Cu malzemelerini kullanarak bağ oluşumu oluşturmaya çalışmışlardır. Bunun için difüzyon kaynağı ile parçalar birbirine sıkıştırılarak yüksek sıcaklıklarda bekletilmiştir. 750°C ve 3 MPa altında farklı sürelerde bekletilen numuneler kademeli olarak soğutulmuş ve malzeme difüzyonü ile bağ oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca sertlik değeri de Ti6AL4V malzemesinden $Al_2O_3$ e doğru geçerken arttığı görülmüştür [22].

Benzer şekilde, Silva ve arkadaşları (2021), Ti6AL4V ile $Al_2O_3$ malzemesini difüzyon kaynağı ile birleştirmek için araya Ti ve Cu film tabakaları ekleyerek malzeme difüzyonu oluşturmaya çalışmışlardır. Burada magnetron saçtırma biriktirme (ing, magnetron sputtering deposition, MSD) yöntemi ile vakum altında kaplama ile birleştirilme yapılmıştır. 800 °C de 50 MPa basınç altında 60 dak proses hem Ti ve Cu film tabakaları hem de film kullanılmayan birleştirilme yapılmış ve kıyaslaması yapılmıştır. Yapılan çalışmada

bağlayıcı film kullanıldığında çok katmanlı yapı oluşumu başarılı olmuştur. Diğer şekilde bağlayıcılı film kullanılmadığında $Al_2O_3$ hattı boyunca çatlaklar oluşmuştur. Çalışmada özellikle ısıtma ve soğutma hızlarının önemine vurgu yapılmış, soğutma hızının yüksek olması durumunda malzemede oluşan artık gerilme ve gevrek fazlardan ötürü istenilen bağ oluşumunun olamayacağından bahsedilmiştir [23] .

Silva ve arkadaşları (2021) benzer şekilde adezyon kuvvetiyle ince Ti film tabaka ile birleştirme yaptıklarında farklı sıcaklıklarda bekletilen numunelerde aynı çalışmayı yapmışlardır. Çalışmada 900, 950 ve 1.000℃ sıcaklıklarda 10 dk ve 60 dk sürelerde numunelerde bekletilmiştir. Soğutma süreleri de 5℃/dk ve 3℃/dk olacak şekilde ayarlanmış ve mekanik özelikleri incelenmiştir. Yaptıkları çalışmada malzeme difüzyonu ile bağ oluşturmak için Ti film tabakası kullanılmadan yapıldığında 1.000 ℃ sıcaklıkta 60 dak bekletildiğinde oluşmuştur. Ancak bazı seramik bölgelerde bozukluklar oluşmuştur. Bağlayıcı kullanıldığında daha düşük sıcaklıklarda sürede bağ oluşumu oluştuğu gözlenmiştir [23, 24].

Wang ve arkadaşları (2018), farklı boyutlardaki TiC tozlarını Ti6AL4V ile karıştırarak MMK elde etmek istemişlerdir. Burada kullandıkları TiC toz boyutları küçük boyutta (TiC: < 10 μm), orta boyutta (TiC: 25-45 μm) ve büyük boyutta (TiC: 75-100 μm) olmak üzere üç farklı boyutta seçilmiştir. Kullanılan bu toz karışımları ile lazer ergitme biriktirme (ing, Laser meting deposition) teknolojisi kullanılarak metal matrisli kompozit çekme numuneleri üretilerek mekanik özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca farklı toz boyutlarının mikroyapıya etkisi araştırılmıştır. Üretilen kompozitlerin çekme özellikleri küçük ve orta boyuttaki TiC bulunan numunelerde benzer iken büyük boyuttaki numunelerden daha iyi olduğu görülmüştür. Fakat büyük TiC toz boyutu olan numunelerde daha iyi kaplama olduğu görülmüştür. Büyük boyutlu karışık tozlarla kıyaslandığında çekme mukavemeti (1231,3 MPa) ve uzama (% 2,12) olarak hesaplanmış ve yaklaşık olarak % 4,6 ve % 259,3 olarak iyileşmiştir [25].

Pouzet ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada Ti6AL4V tozu ile farklı hacimsel oranlarda TiB ve TiC tozlarını karıştırarak doğrudan metal yığma (ing, Direct Metal Deposition, DMD) metodu ile Ti6AL4V matrisli kompozit üretme çalışması yapmışlardır. Çalışmada DMD ile üretilen Ti6AL4V ile kıyaslamalarda DMD duvarlarına titanyum matris kompozitler üzerinde önemli tanecik iyileşmesi oluşmuştur. Sebebinin düşük $B_4C$ içeriğine

rağmen TiB wiskerleri üzerindeki çekirdekleşme olduğu belirtilmiştir [26].

Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda (2015), Ti6AL4V malzemesi üzerine $ZrO_2$ kaplanmasının oksidasyon ve aşınma direncine incelemişleridir. Mikro ark oksidasyon metodunu kullanmışlardır. Farklı konsantrasyonlardaki $ZrO_2$ parçacıkları fosfat elektroda eklenerek manyetik karıştırma aparatı ile dağıtılmıştır. Oluşturulan kaplama X Ray Difraksiyonu ve enerji dağıtım spektrumda karakterize edilmiştir. SEM görüntülerinde de yüzey morfolojisi incelenmiştir. Kaplanan numunenin 700°C yüksek sıcaklık oksidasyon direnci incelenmiştir. Aşınma direnci de aşınma testi ile test edilmiştir. Ve yaptıkları bu çalışma gösterdi ki kaplanan yüzeyde bulunan $ZrTiO_4$, $ZrO_2$ ve $TiO_2$ bulunmuştur. Çalışma sonucunda 700°C de çok yüksek oksidasyon ve aşınma direnci elde etmişlerdir [27].

Rong ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada seçici lazer ergitme ile Tungsten karbür ile Inconel 718 malzemesi ile kompozit malzeme oluşturmuşlardır. Burada uyguladıkları lazer parametrelerinin oluşturulan kompozit malzemenin özelliklerine etkisini görmüşlerdir. Ve bu sayede 350mm/s tarama hızı ile %97,8 yoğunlukta numuneler üretmişlerdir. 450mm/s olan optimal tarama hızında kompozit malzemenin mikro sertliğini 393.2 $HV_{0.1}$ olacak şekilde arttırmayı başarmışlardır. Aynı zamanda 0,27 μm olan düzenli ve sıralı bir difüzyon katmanını gradyan arayüzü boyunca elde etmişlerdir. Dahası gradyan ara yüzü ve difüzyon katmanı boyunca kimyasal reaksiyon sonucu $X_3C17$ ve $XC_4$ (X = W, Ni, Cr,Fe) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu esnada kompozit malzemede 0,37 düşük sürtünme katsayısı ile 2.5 × 10−4 mm3 N−1 m−1 aşınma oranının yanında aşınma testi sonucunda yüzeyde dalgalanma ve birikme oluşmamıştır. Aşınma mekanizması da devamlı olarak abrasif aşınmadan adhesiv aşınmaya dönüştüğü açıklanmıştır [28].

AlMangour ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada TiC malzemesi ile 316L malzemesini seçici lazer ergitme ile paslanmaz çelik matrisli nano kompozit malzeme üretmişlerdir. Bunu yaparken parametre olarak başlangıç TiC boyutları ve hacimsel içeriğini değiştirerek mekanik özelliklere ve mikro yapıya etkisini incelemişlerdir. Genelde TiC malzemesinin artışının sertliği ve sürtünme katsayısını arttırdığını ve aşınma oranının azalttığını görmüşlerdir. Bunun sebebi olarak da tanecik iyileşmesi ve tanecik sınırı güçlenmesi olduğunu göstermişleridir [29].

AlMangour ve arkadaşları (2019) daha sonra yaptıkları çalışmada yeni $TiB_2$ ile

güçlendirilmiş 316L malzemesinin eklemeli imalat ile üretilen nano kompozit malzemenin mükemmel oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıkta akma dayanımının geliştirilmesini çalışmışlardır. Üretim metodu olarak önceki çalışmalarındaki gibi seçici lazer ergitme metodu kullanışlarıdır. Çalışma sonucunda nano kompozitlerin oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda (600 °C hariç) yüksek sıkıştırılabilir akma mukavemeti ve tokluğu olduğunu gözlemlemişlerdir. 700 °C ve 800 °C de nano kompozitlerin mikro yapı ve gerilme akışındaki deformasyonun gözlemlenmesini dinamik iyileşme ve dinamik yeniden kristalleşme fenomeni ile açıklamışlardır [30].

Wang ve arkadaşları (2017), atmosferik plazma spreyleme metodu ile 316L paslanmaz çeliğe $A_{l2}O_3$ ve $TiO_2$ malzemelerini kaplayarak süper kritik su ortamında korozyon direncini incelemişlerdir. Test koşulları 500 °C sıcaklık ve 500Mpa basınç altında 1000 mg/L oksijen konsantrasyonu ile 80 saat sürecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Kaplanmış numunelerin adhesiv kuvveti test edildi. Ağırlık değişimi ile aşınmış numunelerin elemenet dağılımı ve yüzey morfolojisi analiz edildi. Sonuçlarda $TiO_2$/316L numunelerinin adhesiv kuvettinin $A_{l2}O_3$/316L numunelerine göre 1,5 kat fazla olduğu bildirilmiştir [31].

Cree ve arkadaşları (2010), yaptıkları çalışmada üç boyutlu hücresel metal dolgulu seramik kompozitlerinin üretimini araştırmışlardır. Çalışma için köpük formundaki Silisyum karbür malzemesi Alüminyum A356 malzemesi ile vakum sızdırılması sonucunca kompozit malzeme elde etmişlerdir. Köpük bir kere ikinci fazı ile infiltre edildikten sonra iki yollu, devamlı, üç boyutlu ağ yapılarının oluştuğu kompozit yapılara dönüşmüştür. Bu metal matrisli kompozitin avantajı yüksek ağırlık-kuvvet oranı ile elektronik ekipmanların paketlenmesi gibi düşük ağırlıklı uygulamalarda kullanılmasıdır. Kompozitin malzeme karakterizasyonu mikroyapısal ve bileşimsel çözümleme, yoğunluk, boşluk ve nanoiz ölçümleri ile hesaplanmıştır. Yaptıkları çalışmanın sonuçları gösterdi ki kompozitin güçlendirilmemiş alaşıma göre elastisite modülü ve eğilme mukavemetinin arttığı öte yandan % 50-70 SiC içeren kompozitler ile % 12 SiC içeren kompozitin kıyaslanabilir çarpma tokluğuna sahip olduğu rapor edilmiştir [32].

Shen ve arkadaşları (2019), yaptıkları çalışmada Ti6AL4V ile metalik cam malzemesini kompozitini seçici lazer ergitme ile birleştirerek oluşturmuşlardır. Oluşturdukları bu kompozitin mikro yapı, mekanik özellikler ve aşınma direncini incelemişlerdir. Takviye elemanı olarak zirkonyum tabanlı metalik cam kullandıkları bu çalışmada hibrit nano yapı

ve arttırılmış mekanik özelliklerin yanı çatlakların olmadığı Ti bazlı kompozit üretmişlerdir. Burada metalik cam sıvı faza geçmiş titanyumun katılaşmasına önemli derece etki ettiğini bulmuşlardır. Nano yapısal iyileştirmede gelişmiş akma mukavemeti ( > 1 GPa ) yeteri miktarda tokluk ve kırılma tokluğu gözlemlemişleridir. Aşınma direnci için nano yapısal iyileştirmenin getirmiş olduğu sertlik artışının yanında arttığını ayrıca gözlemişlerdir [33].

Auger ve arkadaşları (2011) ise yaptıkları çalışmada 316L paslanmaz çelik ile alümina malzemesini sinterleme sinterleyip birleştirme üzerine çalışmışlardır. Çalışma sonucunda atmosfer ayrıştırmasının artık karbon malzemesine neden olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu negatif etki alüminanın sinterleme ile yoğunlaşmasına olumsuz etki yapmıştır [34].

Yapılan literatür çalışmaları neticesinde, sinterleme ara bağlantı yerlerinde bir takım defektlerin olması, mekanik mukavemeti azaltıyor olsa bile genel anlamda iyileşme sağladığı anlaşılmıştır. Takviye malzemesi olarak kullanışan malzemeler incelendiğinde farklı seramiklerin kullanıldığı ancak $ZrO_2$ nin (zirkonya) Ti6AL4V ile birlikte kullanıldığı çalışmaların yeterince olmadığı tespit edilmiştir. Bu malzeme çiftinin biyouyumlu olması ise önemli bir parametre olduğu değerlendirilmiştir.

# 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez kapsamında yapılan çalışmada, Ti6AL4V Metal Matrisli ve $ZrO_2$ takviyeli kompozitin eklemeli imalat ve toz metalurjisi yöntemleri birlikte hibrit bir şekilde kullanılarak üretilen farklı formdaki numuneler üzerinde mekanik testler ve mikroskop görüntülemeleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında matris malzemesi olarak Ti6AL4V ELI (Grade 23) tozu kullanılmıştır. Ti6AL4V ELI tozuna ait özellikler Çizelge 4.1 ile verilmiştir. İsimlendirmede yer alan ELI (ing, Extra Low Interstitials) kodlaması, tozu diğer Ti6AL4V tozlarına göre daha düşük oksijen, karbon, nitrojen ve demir içerdiği anlamına gelmektedir [35].

Çizelge 4.1. Çalışma kapsamında kullanılan Ti6Al4V tozunun kimyasal bileşimi

| Malzeme | % |
|---|---|
| Titanyum, T | Denge* |
| Alüminyum, Al | 6,0 |
| Vanadyum, V | 4,0 |
| Demir, Fe | 0,1 |
| Karbon, C | 0,03 |
| Oksijen, O | 0,1 |
| Nitrojen, N | 0,01 |
| Hidrojen, H | 0,003 |
| *Yüzde olarak kalan kısmı tamamlar | |

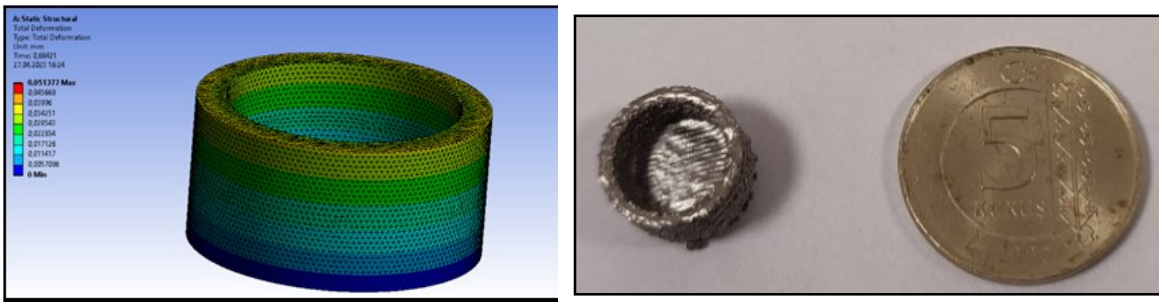
Çalışma kapsamında ön denemelerde kullanılan seramik takviye malzemeler ve malzeme özellikleri Çizelge 4.2 ile verilmiştir.

Çizelge 4.2. Seramik tozların özellikleri

| Özellikler | $Al_2O_3$ | $TiB_2$ | $TiO_2$ | $SiO_2$ |
|---|---|---|---|---|
| Ergime sıcaklığı (°C) | 2040 | 2980 | 1830 | 1710 |
| Yoğunluk ($g/cm^3$) | 3,8 | 4,5 | 4 | 2,4 |
| Isı iletim katsayısı (W/mK) | 24 | 25 | 8,3 | 1,4 |
| Termal genleşme katsayısı (µm/mK) | 7,2 | 7 | 10 | 0,65 |
| Özgül ısı (J/kgK) | 890 | 577 | 690 | 700 |

Ön deneme çalışmaları matris malzemesi ile kullanılacak olan en uygun seramik türünün belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Çalışmada, uygun seramik tozu seçebilmesi için 4 farklı seramik tozunun sıkıştırılabileceği 5 mm çaplı içi boş silindirik numuneler üretilmiştir

Şekil 4.1.'de Seçilen seramik tozlar kullanılarak sinterlenebilecek toz üzerinden çalışmaya devam edilmiştir. Bu kapsamada $Al_2O_3$, $SiO_2$, $TiO_2$, $TiB_2$ kimyasal seramiklerin Ti6AL4V ile uyumluluğunun denenmesi için prototip numunelerin hazırlanmasına karar verilmiştir.



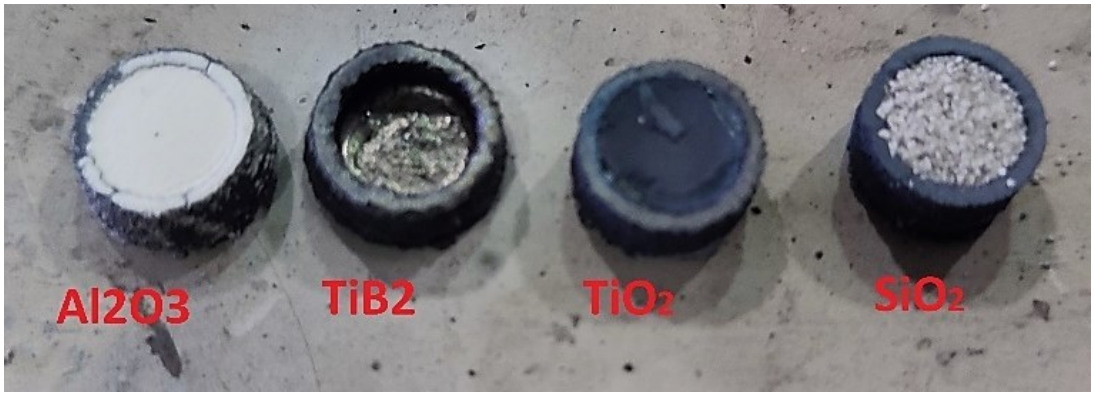
Şekil 4.1. Toz sinterlemesinde kullanılacak olan deneme numunesi ANSYS analizi ve üretilmiş Ti6AL4V matris numune

## 4.1. Kompozit Üretimi Ön Deneme Çalışmaları

Elde edilen numuneler görsel olarak kontrol edildiğinde matris malzemesi Ti6AL4V ile içerisine yerleştirilmiş olan farklı seramiklerin istenilen seviyede bağ oluşturmadığı, uygulanan sinterleme prosesindeki sıcaklığın yeterli olmadığına karar verilmiştir. Dolayısıyla, literatürde araştırılmasına daha az yer verilmiş olan $ZrO_2$'nin takviye malzemesi olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Bundan sonra yapılacak olan deneysel çalışmalar bu plan doğrultusunda devam ettirilmiştir. Numunelere sıkıştırılmış ve ısıl işlem fırınına koyulmadan önce çekilen görsel Şekil 4.2 ile ısıl işlem fırınında işlem gören numuneler ise Şekil 4.3 ile verilmiştir.




Şekil 4.2. Numunelere sıkıştırılmış tozların üstten görüntüsü

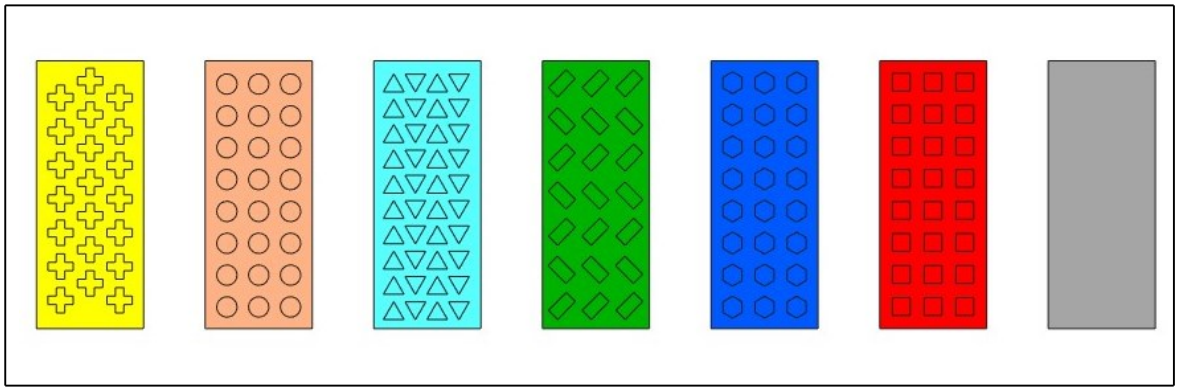



Şekil 4.3. Isıl işlem sonrası elde edilen numuneler

## 4.2. Ti6AL4V-$ZrO_2$ kompozit üretimi

### 4.2.1. Ti6AL4V matris numune üretimi

Bu çalışmada altı farklı geometrik yapıda Ti6AL4V alaşımından eklemeli imalat yöntemiyle deney numuneleri üretimine başlanmıştır. Tasarımların belirlenmesinde, temel geometrik şekillerin yapıya etkisinin incelenmesi esas alınmıştır. Belirlenen geometrik tasarımlar Şekil 4.4 ile verilmiştir. Numunelerin içi %20 boşluk olacak şekilde farklı geometrilerde tasarlanmıştır. Bu sayede seramik toz miktarı aynı tutularak farklı geometrilerde toz sıkıştırılabilme kabiliyeti üzerine karşılaştırma yapılmıştır.



Şekil 4.4. Zirkonyum oksit doldurulacak matris test numuneleri için belirlenen tasarımlar

Şekil 4.4 ile kıt model tasarımı verilmiş ve oryantasyonu yapılan parçalar daha sonra Magics yazılımı aracılığı ile dilimleme işlemi yapılarak ARCAM A2X cihazının tanıyabileceği olan.abp (ing, ARCAM BUILD PROJECT) formatına getirilmiştir. Seçilen geometrik desen hacimlerinin aynı hacimde $ZrO_2$ doldurulacak şekilde tasarlanmıştır. Ardından cihazın

üretim hazırlık süreci yapılmıştır. Bu süreçte üretim tablasının sıfır konuma getirilmesi, toz miktarının kontrol edilmesi, sericinin ayarlanması, serilen toz miktarının ayarlanması gibi ön hazırlık ayarlamaları yapılarak üretime hazır hale getirilmiştir. Ti6AL4V matris numunelerinin üretimine ait ARCAM A2X standart üretim parametreleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. ARCAM A2X üretim parametreleri

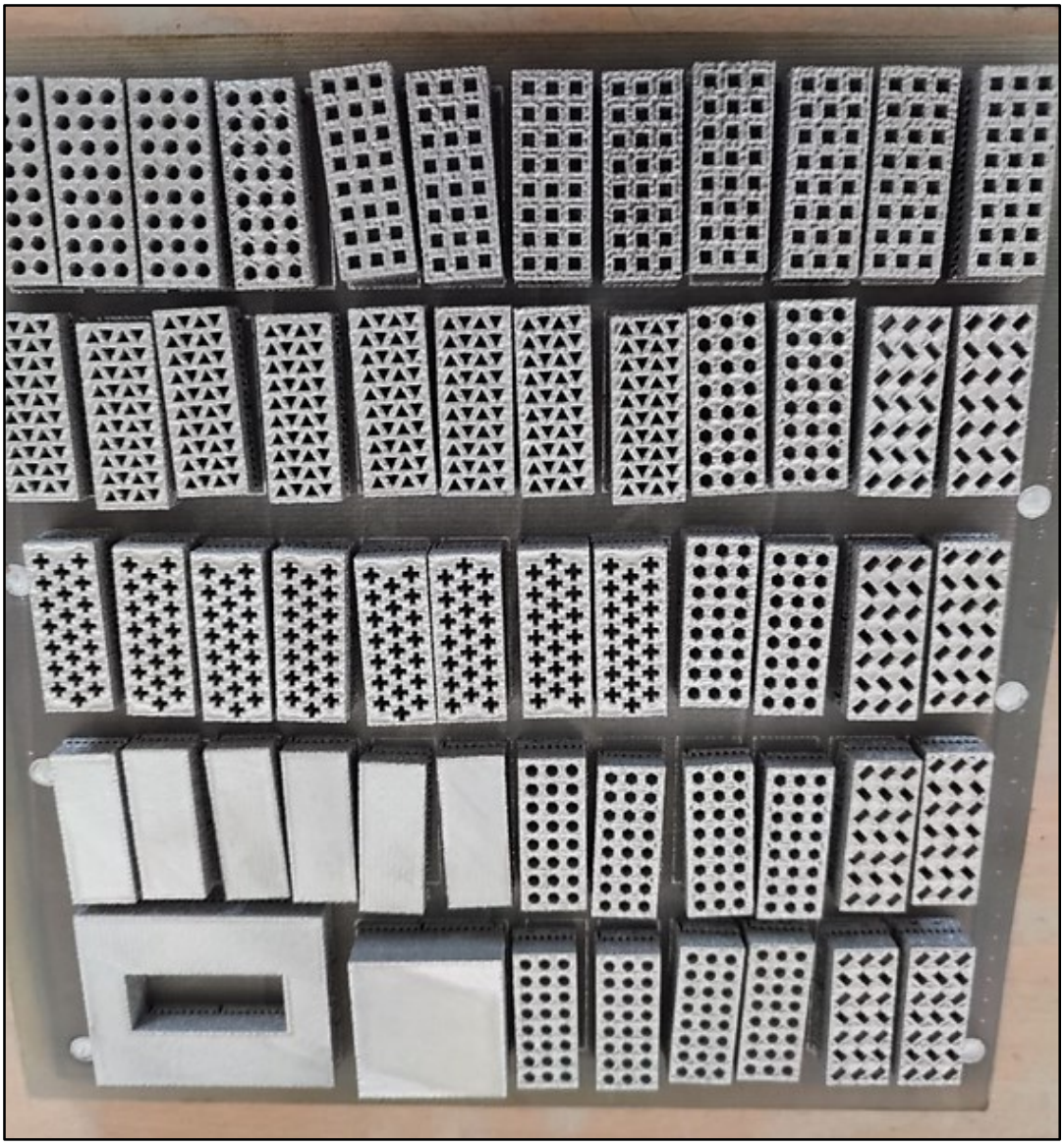
| A2X Parametreler | Katman kalınlığı (µm) | Akım (mA) | Tarama hızı (mm/s) | Tarama odakları arası uzaklık (µm) | Gerilim (kV) |
|---|---|---|---|---|---|
| Ergitme | 50 | 15 | 4530 | 200 | 60 |
| İç kontur | 50 | 10,2 | 800 | - | 60 |
| Dış kontur | 50 | 5 | 440 | - | 60 |
| Ön ısıtma 1 | 50 | 30 | 10000 | 1200 | 60 |
| Ön ısıtma 2 | 50 | 38 | 13000 | 1200 | 60 |

Tez çalışmasında kullanılmak üzere deney tekrarları da dikkate alınarak her geometrik yapıdaki deney numunesinden altışar adet (6x6=36 adet) üretilmiştir. Üretimin yapılmış olduğu üretim cihazı Şekil 4.5'te verilmiştir. Ayrıca üretilmiş olan Ti6AL4V deney numunelerinin toplu olarak gösterildiği görüntü Şekil 4.6.6'da verilmiştir.



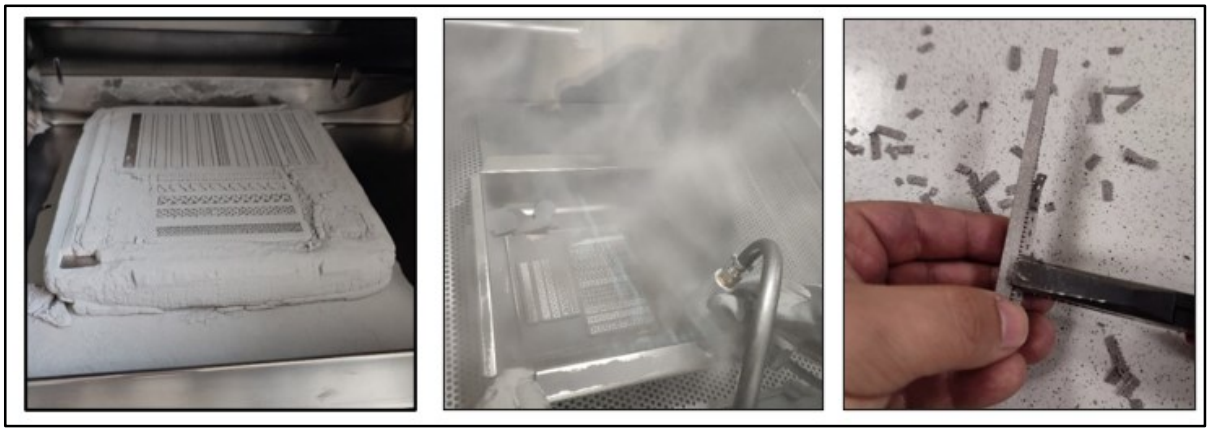

Şekil 4.5. ARCAM A2X EBM Makinesi

EBM ile yapılan üretim 15 saat 33 dakika sürmüştür. Üretim süresince bir problem yaşanmamak ile beraber parçalar istenilen boyutsal toleranslarda üretilmiştir. Üretim süresince EBM makinesinde gerçekleşen tüm elektriksel ve mekaniksel olayların log verisi makine tarafından alınmaktadır. Bu veriler üretim sonrasında Log Studio yazılımı ile incelenerek üretimde bir sorun olup olmadığı kontrol edilmektedir. Bu verilerden en önemlisi sıcaklık ve basınç değerleridir. Sıcaklık değerleri üretim tablası altına yerleştirilmiş olan termokupl ile ölçülmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere EBM cihazı sistemi atmosferik oksijenden uzak tutmak için vakum altında çalışmaktadır. Bu üretimde, sistem $10^{-3}$ mbar negatif basınç altında gerçekleşmiştir. Bu vakum değeri de EBM için ideal bir değerdir.



Şekil 4.6. Zirkonyum oksit doldurulacak test numunelerinin üretilmiş hali

Üretilen parçalar A2X cihazından sinterlenmiş toz içerisinden çıkarılarak toz geri dönüşüm ünite sinde sinterlenmiş tozlardan arındırılarak üretim süreci tamamlanmıştır. Şekil 4.7. seramik tozu ile doldurmaya başlamadan önce toz temizlik işlemleri ve parçaların destek yapıları sökülmesiyle üretim süreci tamamlanmıştır.

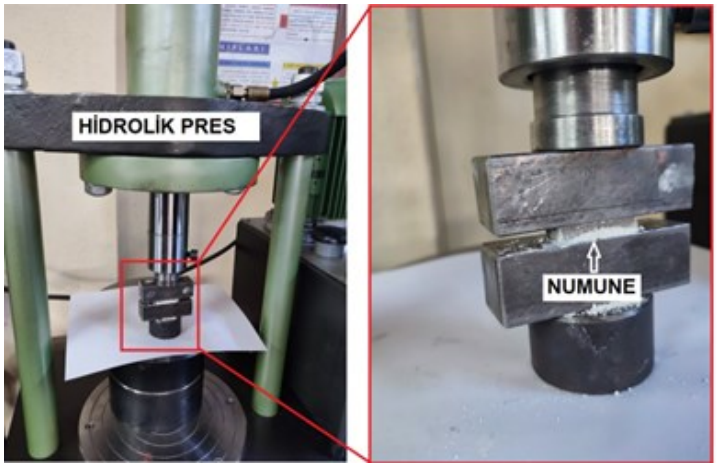


Şekil 4.7. Üretim sonrası temizlik süreci ve destek yapıların sökülmesi

### 4.2.2. Ti6AL4V matris içine $ZrO_2$'nin preslenmesi ve sinterlenmesi

Üretilen numunelerin bir seti için daha önceki denemelerde olduğu gibi seramik tozu kullanılarak sinterleme yapılmıştır. Seramik tozu olarak ise $ZrO_2$ tozu kullanılmıştır. Toz 325 mesh elekten geçecek boyutlarda (44 μm) boyutlarda tedarik edilmiştir. Ayrıca doğada üç farklı kafes yapısı halinde bulunabilmektedir. Bunlar monoklinik, tetragonal ve kübik yapılardır. Monoklinik 1170 °C 'ye kadar stabildir ve bu dereceden sonra tetragonal yapıya dönüşür. $ZrO_2$ sıcaklığı 1170 °C 'den düşük olduğu durumlarda monolitik iken 1170-2370 °C sıcaklık aralığında tetragonal yapıda ve 2370-2680 °C aralığında ise kübik yapıda bulunmaktadır [36-37]. Zirkonyanın elastik modülü 200 MPa ve sertliği ise 1300-1500 HV arasındadır [38-39]. Ayrıca yapılan başka çalışmalarda zirkonyumun eğme mukavemeti ortalama 900 – 1200 MPa arasında değişmektedir [40-41]ve kırılma dayanımı ise 9-10 $MPa \cdot m^{1/2}$ olarak malzeme özelliği bilinmektedir. [42-43]

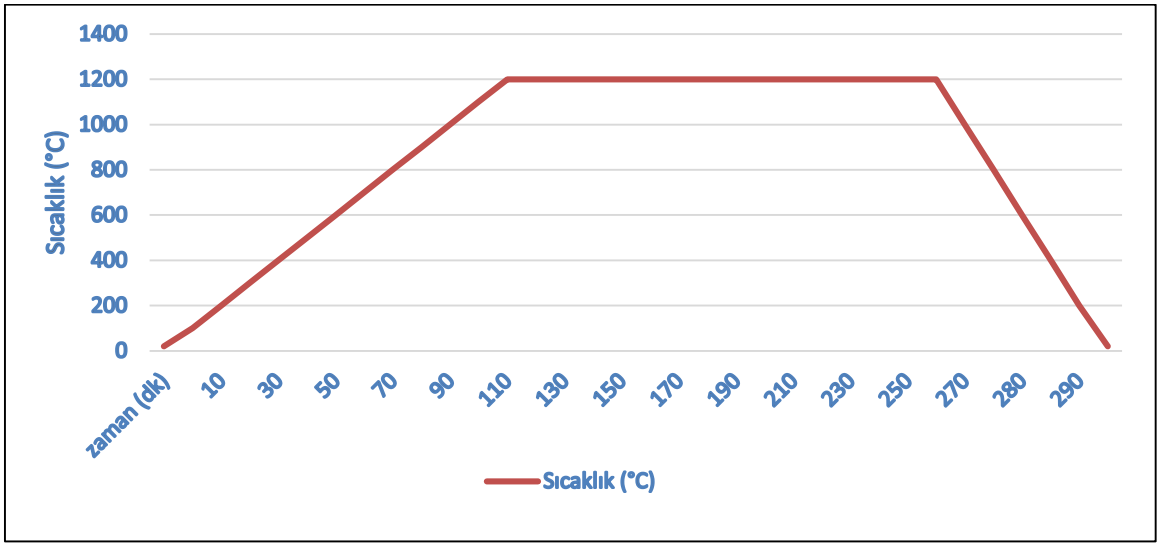
Üretilen parçalar daha sonra içerisine $ZrO_2$ tozu boşluklara doldurularak presleme aşamasına geçilmiştir. Presleme işlemi 15 tonluk hidrolik pres kullanılarak 750 MPa basınç altında gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi sırasında çekilen görsel Şekil 4.8 ile verilmiştir.



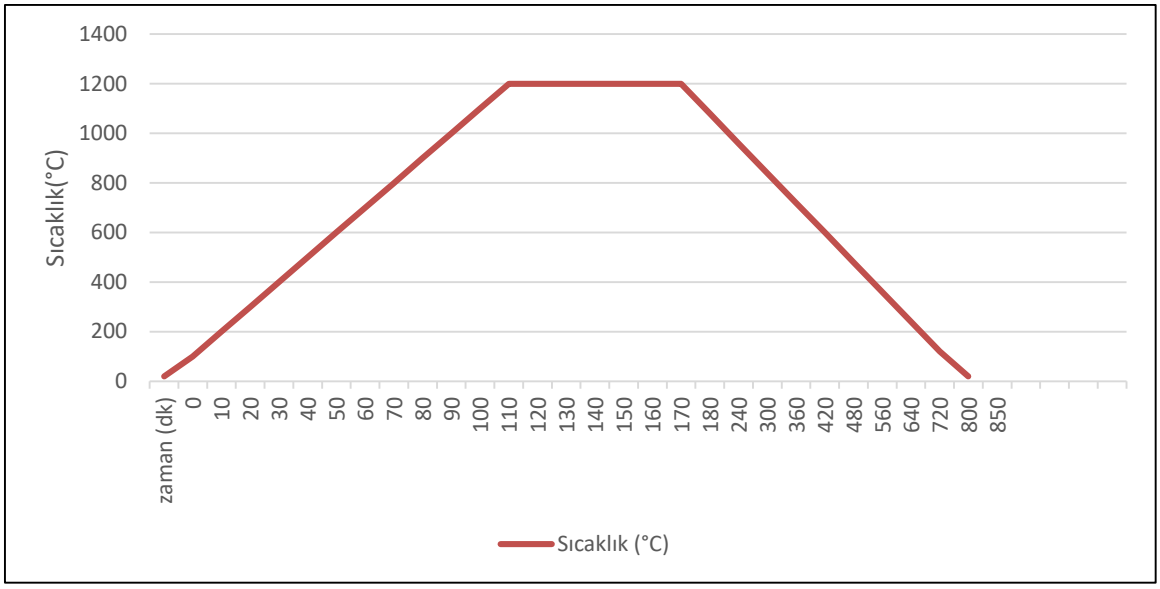

Şekil 4.8. Hidrolik preste $ZrO_2$ doldurulmuş numunelerin sıkıştırılması

Toz sıkıştırma işleminden sonrasında parçalar ısıl işlem fırınına alınarak 1.200 °C'de iki farklı sinterleme ve soğutma süresi uygulanarak sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme prosesi.

Şekil 4.9. ve Şekil 4.10. ile verilmiştir. Uygulanan sabit sinterleme süresinden sonra sinterleme prosesindeki soğuma hızlarının etkisini görmek amacıyla ilk olarak numuneler havada soğutma işlemine tabii tutulmuştur. İkinci proseste ise sinterleme sonrası fırın kapatılarak numuneler fırın içerisinde kapalı ortamda soğumaya bırakılmıştır.

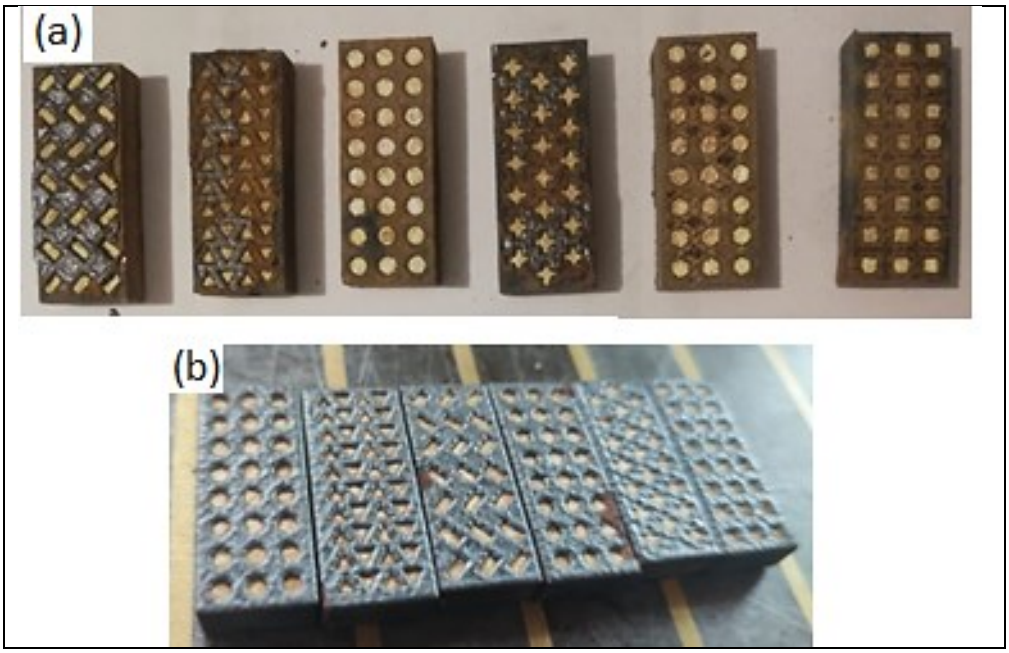



Şekil 4.9. Havada soğutma sinterlenme prosesi




Şekil 4.10. Fırın içinde soğutma sinterlenme prosesi

Sinterleme prosesi sonrasında üretilen kompozit numunelere ait görüntüler Şekil 4.11 ile verilmiştir.



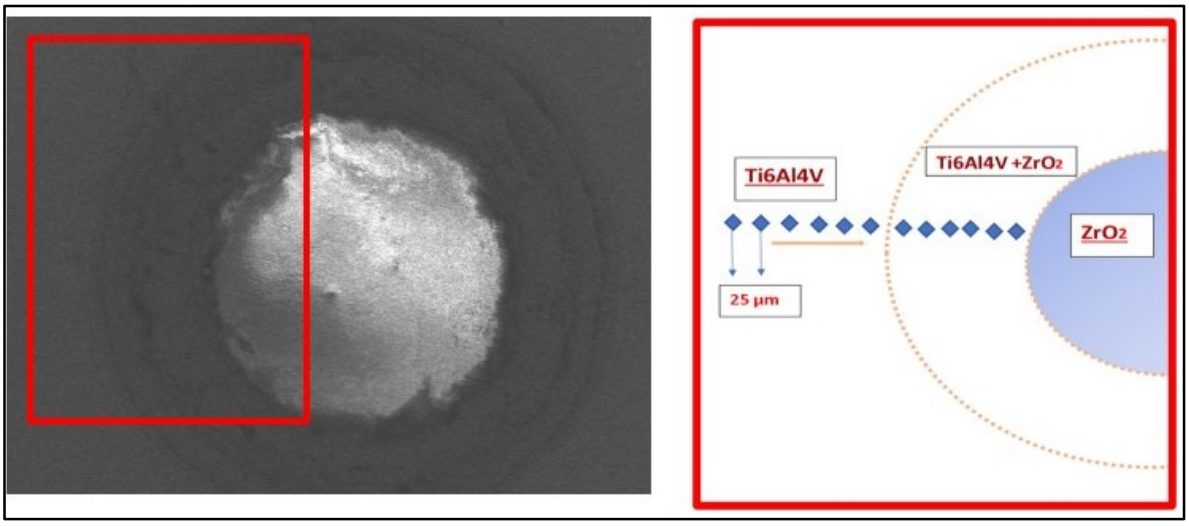

Şekil 4.11. Sinterleme sonrası üretilmiş kompozit numuneler, (a) havada soğutulmuş, (b) fırında soğutulmuş

Havada ve fırında gerçekleşen soğuma sonrasında numunelerin yüzeyinde ince bir oksit yüzeyi oluşmuştur. Bu oksit tabaka, yüzey taşlama tezgahı ile alınıp daha sonra zımpara makinesi ile zımparalama işlemi yapılmıştır. Bu zımparalama işleminde başlangıçta 220

kum ile kaba zımpara sonrasında 800 kum ve 1200 kum zımpara ile kademeli olarak yüzeyler kademeli olarak zımparalanmıştır.

### 4.3. Mikro Sertlik Ölçümü

Sinterleme sonrası numunelerin mikro sertlik değerinin ölçülmesi için Vickers sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik testi, 200 g ağırlık ile 10 saniyelik uygulama süresi parametrelerinde yapılmıştır. Sertlik ölçümünde hem matris hem de matris takviye ara yüzeyinden belirli aralıklarla yapılarak kaydedilmiştir. Yönteme ait şematik gösterim
Şekil 4.12'de verilmiştir.



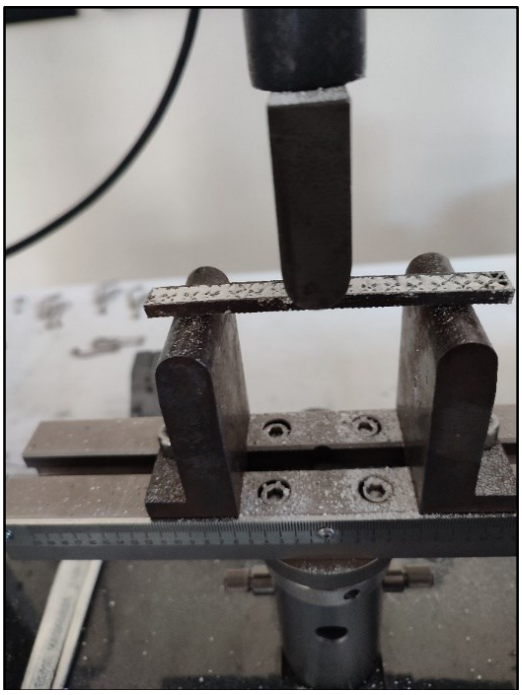

Şekil 4.12. Sertlik testi ölçümü yapılan noktaların doğrultusunun şematik gösterimi

Sertlik ölçümü iki farklı bölgede yapılmıştır. Seramik tozlarının bulunmadığı delikler arası yüzeyde Ti6AL4V için sertlik ölçümü ve Ti6AL4V dan $ZrO_2$ tozuna geçiş yapılan ara yüzeyde sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu sayede sertliğin ara yüzeyde arttığını gözlemlemek amaçlanmıştır. Sertlik ölçümü yapılırken doğrusal bir hat boyunca sertlik ölçümü yapılmış ve ölçüm alınan noktalar arası 25 µm olarak ayarlanmıştır.

### 4.4. Üç Nokta Eğme Testi

Üç nokta eğme testinde dikdörtgensel ya da dairesel kesitte parçalar kullanılarak deney yapılır. Eğme testinde, test parçasına bir kuvvet uygulandığında, parça kesitinin belli bir

bölümünde basma gerilmesi, kesitin diğer bölümündeki kısmında ise çekme gerilmesi ortaya çıkmaktadır [44]. Şekil 4.13 ile eğme testi sırasında alınan fotoğraf sunulmuştur.



Şekil 4.13. Toz sıkıştırılmış numunelerin eğilmesi

Deneysel çalışmada bundan sonraki bölümlerde, gerek metin içerisinde gerekse şekil ve grafiklerde kullanılacak olan numune kodları Çizelge 4.4. ile verilmiştir.

Yüzeyleri hazırlanan numunelerin daha sonra ZEISS marka optik mikroskop ve HITACHI SU5000 marka taramalı elektron mikroskopu (Şekil 4.14) ile farklı büyütmelerde görüntüleri alınarak incelenmiştir. İlk olarak cihazın vakuma alınabilmesi adına 150 °C sıcaklıkta 24 saat boyunca kurutma fırınında bekletilip numune iç kısımlarında oluşan nemim giderilmesi de sağlanmıştır.

Çizelge 4.4. Sinterlemelere göre belirlenen numune numaraları

| ISIL İŞLEM TÜRÜ | A | | | | | | B | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMUNE NO | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 |
| BOŞLUK ŞEKLİ | ✚ | ● | ▲ | ◆ | ⬢ | ■ | ✚ | ● | ▲ | ◆ | ⬢ | ■ |
| EĞME TESTİ SONUÇLARI (kN) | | | | | | | 4,53 | 6,36 | 5,55 | 2,72 | 5,62 | 5 |
| BASMA DAYANIMI (kN) | | | | | | | 97 | 113 | 102 | 120 | 109 | 107 |
| Ara Yüzey Kalınlığı (mm) | 0,3 | 0,26 | 0,27 | 0,3 | 0,27 | 0,3 | 0,4 | 0,425 | 0,4 | 0,425 | 0,475 | 0,425 |
| Açıklama | ZrO2 doldurulmuş numuneler<br>1200 °C ye 10°C /dk hızla çıkarılmış<br>1200 °C de 150dk bekletilmiş<br>40 °C/dk hızla havada soğutulmuştur. | | | | | | ZrO2 doldurulmuş numuneler<br>1200 °C ye 10°C /dk hızla çıkarılmış<br>1200 °C de 60dk bekletilmiş<br>2 °C/dk hızla fırın içerisinde soğutulmuştur. | | | | | |

| ISIL İŞLEM TÜRÜ | C |
|---|---|
| NUMUNE NO | C1 |
| BOŞLUK ŞEKLİ | - |
| EĞME TESTİ SONUÇLARI (kN) | 5,25 |
| BASMA DAYANIMI (kN) | 227 |
| Ara Yüzey Kalınlığı (mm) | - |
| Açıklama | ZrO2 bulunmayan boşluksuz numune<br>1200 °C ye 10°C /dk hızla çıkarılmış<br>1200 °C de 60dk bekletilmiş<br>2 °C/dk hızla fırın içerisinde soğutulmuştur. |




Şekil 4.14. Mikro yapı görüntülemede kullanılan SEM cihazı

# 5. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMA

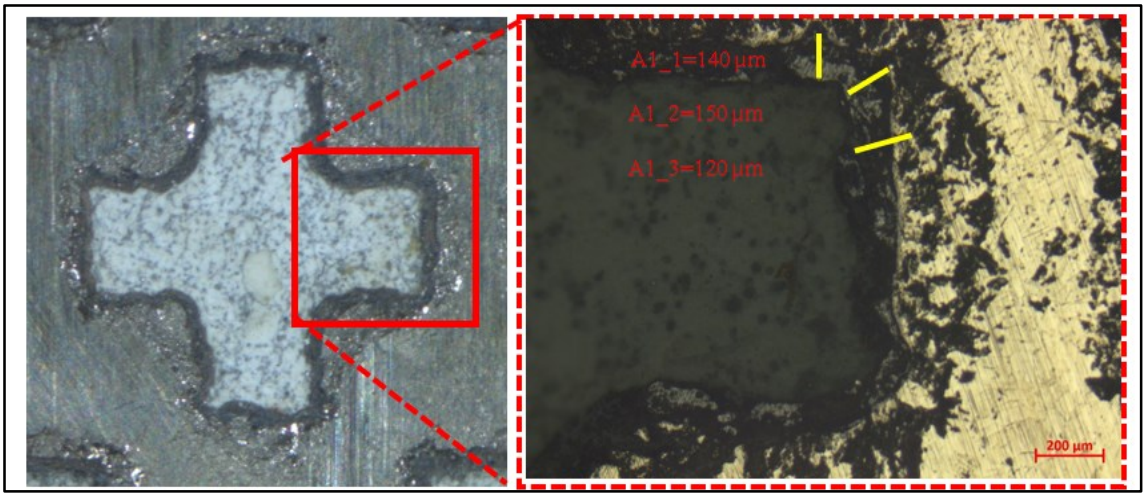
## 5.1. Optik Mikroskop İncelemesi

Optik mikroskop ile elde edilen mikro fotoğraflar, sinterlenmiş ara yüzey kalınlıklarının ölçülmesinde kullanılmıştır. Her bir desen için üç farklı noktadan ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.1 ile verilmiştir. Her bir geometrik desenden alınan ölçümler ise Şekil 5.1ve Şekil 5.22 ile gösterilmiştir.

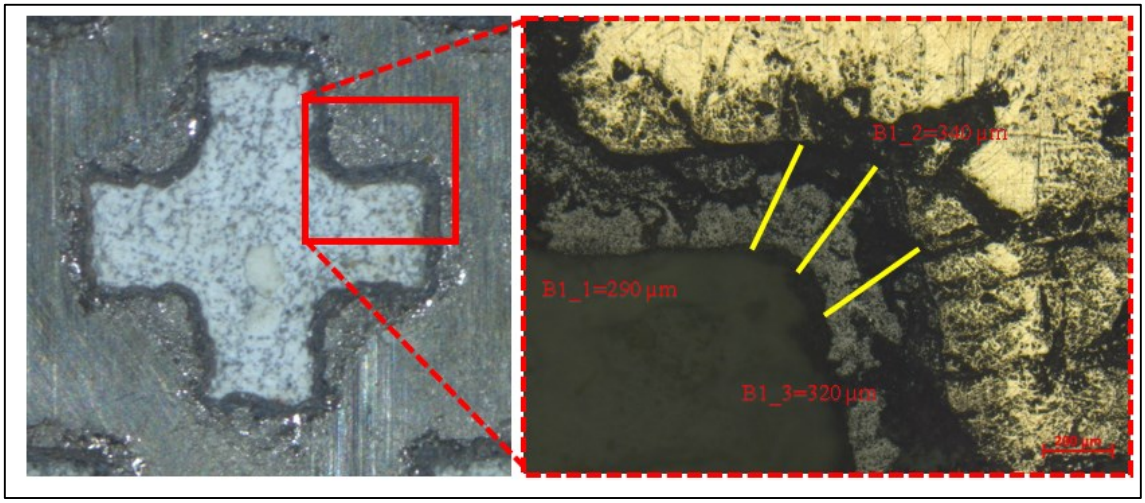
A grubu numuneler havada, B grubu numuneler ise fırında soğutulmuştur. A numuneleri 1.200 °C de 150 dk bekletilmiş, 40 °C/dk hızla havada hızlı bir şekilde soğutulmuştur. B numuneleri ise 1200 °C de 60 dk kaldıktan sonra fırın içerisinde 2 °C/dk soğuması hızı ile yavaş bir soğumaya maruz kalmıştır. A ve B grubu numuneleri aynı basınçta preslenmesinden ötürü (750 MPa) bu kalınlık farkları soğuma hızları ile ilişkilendirilmektedir. Ölçüm sonuçlarında yavaş soğuma gerçekleşen B grubu numunelerde daha geniş yüzey oluştuğu görülmüştür. Aynı tür geometrik desene sahip numunelerde fırında soğutmada havada soğutmaya göre sırasıyla % 132, % 74, % 111, % 31, % 182, % 128 oranlarında daha kalın ara yüzey oluştuğu hesaplanmıştır. Soğuma hızı daha yavaş olması tüm numunelerde ara yüzey kalınlığını artırmıştır. En büyük oranda genişleme altıgen desende gerçekleşirken en düşük oranda dikdörtgen geometrili desende gözlenmiştir.

Çizelge 5.1. Numunelerin ara yüzey kalınlıkları

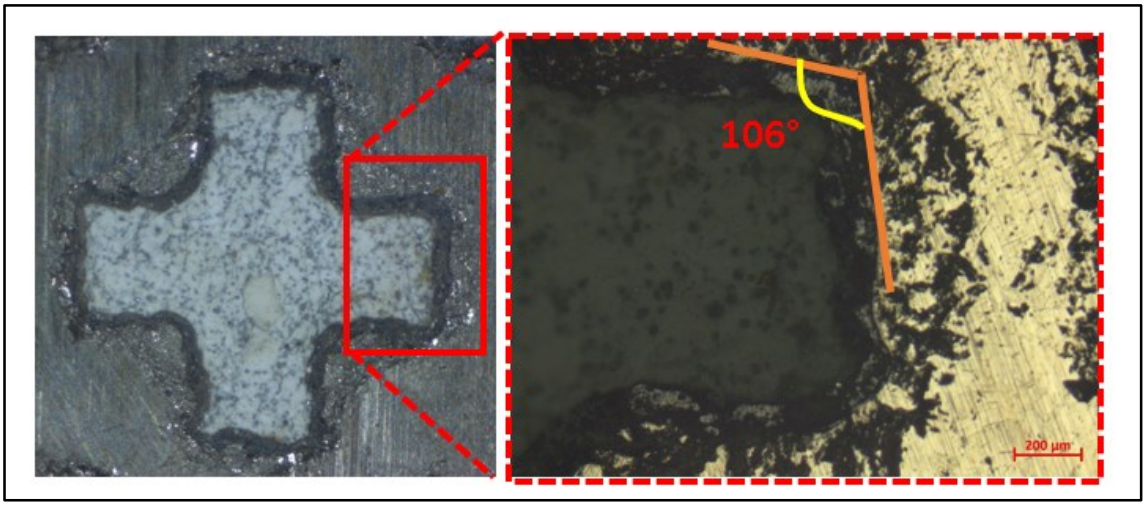
| Desen | Numune | Ölçümler (µm) | | | Ortalama (µm) | Numune | Ölçümler (µm) | | | Ortalama (µm) | Yüzdesel artış (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | | | 1 | 2 | 3 | | |
|  | A1 | 140 | 150 | 120 | 136,67 | B1 | 290 | 340 | 320 | 316,67 | 132% |
|  | A2 | 230 | 280 | 300 | 270,00 | B2 | 470 | 470 | 470 | 470,00 | 74% |
|  | A3 | 220 | 190 | 150 | 186,67 | B3 | 380 | 440 | 360 | 393,33 | 111% |
|  | A4 | 280 | 260 | 300 | 280,00 | B4 | 370 | 350 | 380 | 366,67 | 31% |
|  | A5 | 220 | 220 | 220 | 220,00 | B5 | 640 | 610 | 610 | 620,00 | 182% |
|  | A6 | 220 | 180 | 200 | 200,00 | B6 | 430 | 500 | 440 | 456,67 | 128% |



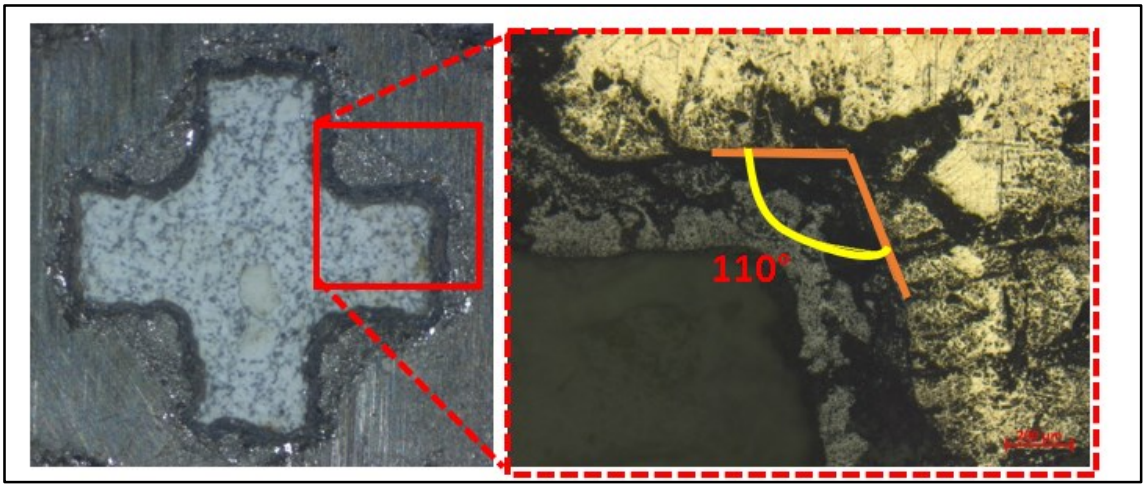

Şekil 5.1. A1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü




Şekil 5.2. B1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü

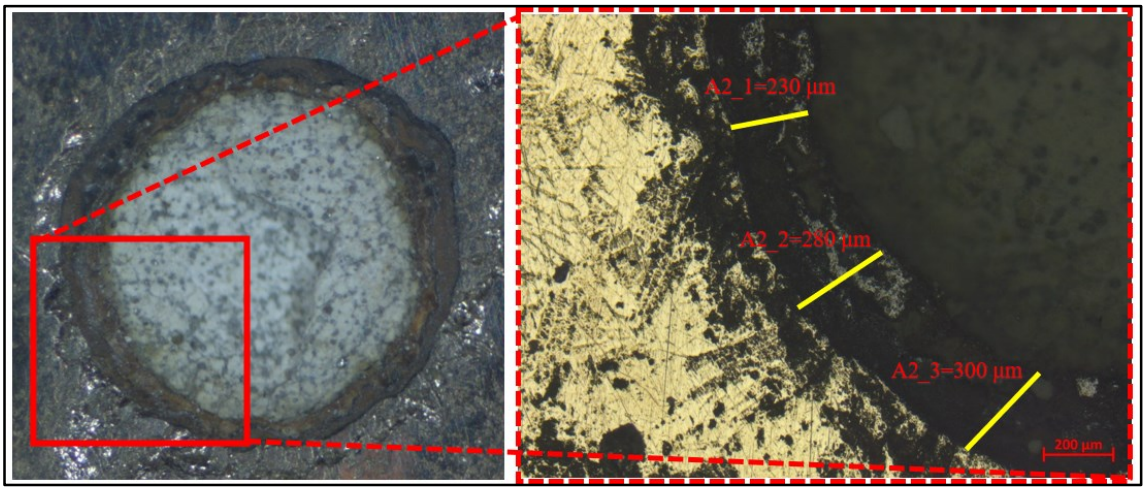



Şekil 5.3. A1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü

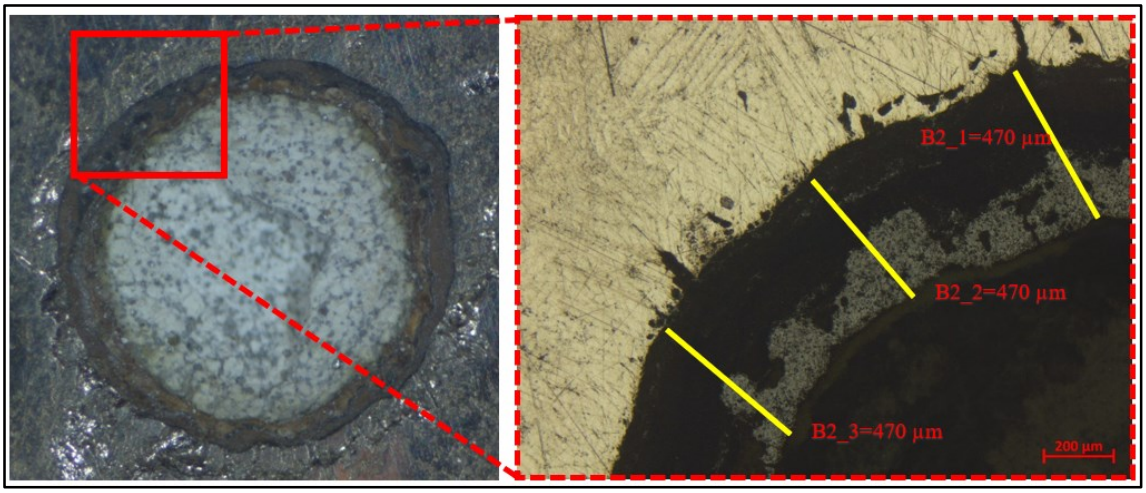



Şekil 5.4. B1 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü

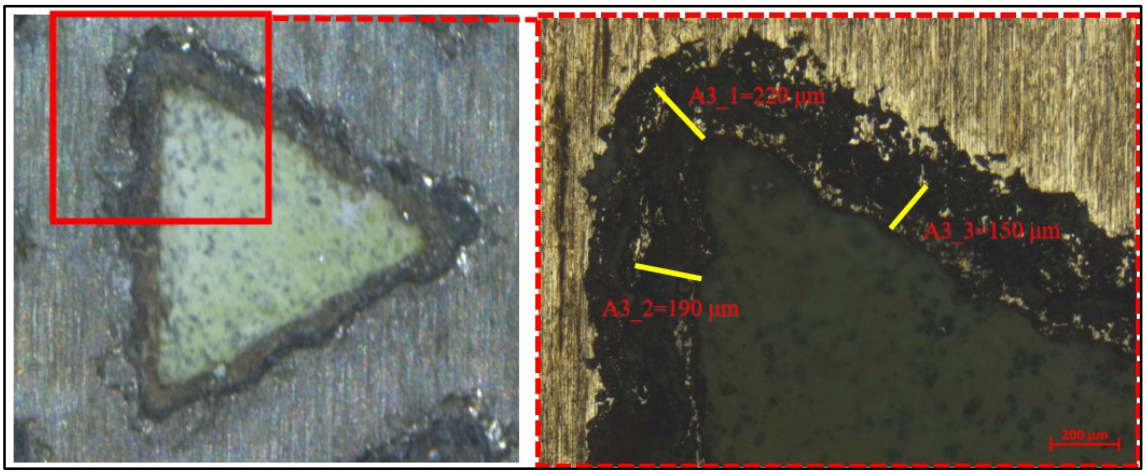
Numunelerin ara yüzey kalınlık ölçümlerinin yanı sıra keskin kenarlı numunelerin açılarının değişimi incelenmiştir. $ZrO_2$ tozu sıkıştırılıp sinterlenmesi sonucunda kesin köşelerin açısal değişimi gözlemlenmiştir. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 (A1 ve B1) numuneleri açıkça göstermektedir ki en çok keskin köşeye sahip artı şeklinin sırasında ideal ölçülerden ($90^o$) saparak yuvarlaklaşma yani radyüsünde büyüme olduğu görülmüştür. 90° köşe açısına sahip parçalarda A1 sinterlenmesinde açı 106° ve B sinterlemesinde 110° olarak ölçülmüştür. Bu durumda havada soğutulan A numunelerinde %17 lik bir artış, B numunelerinde ise %22'lik bir artış olduğu görülmüştür.



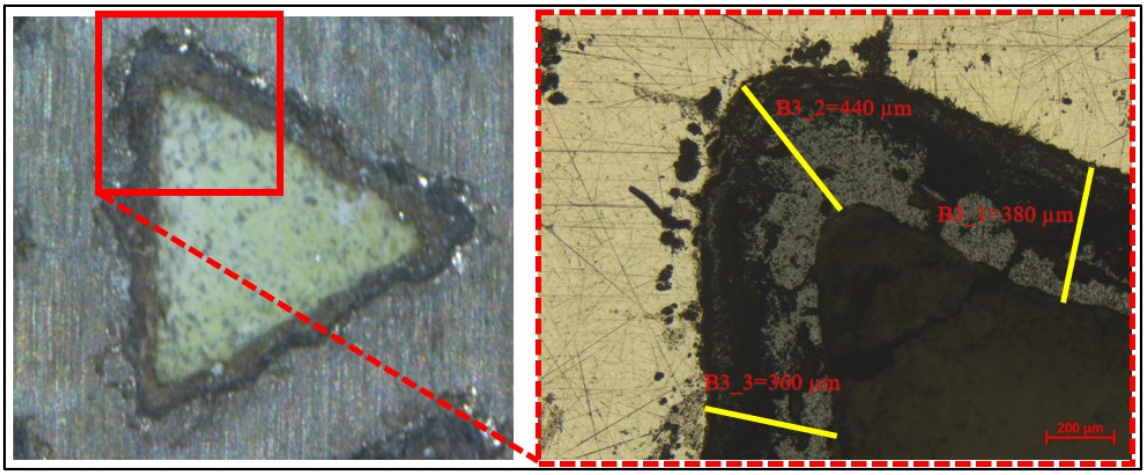

Şekil 5.5. A2 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü



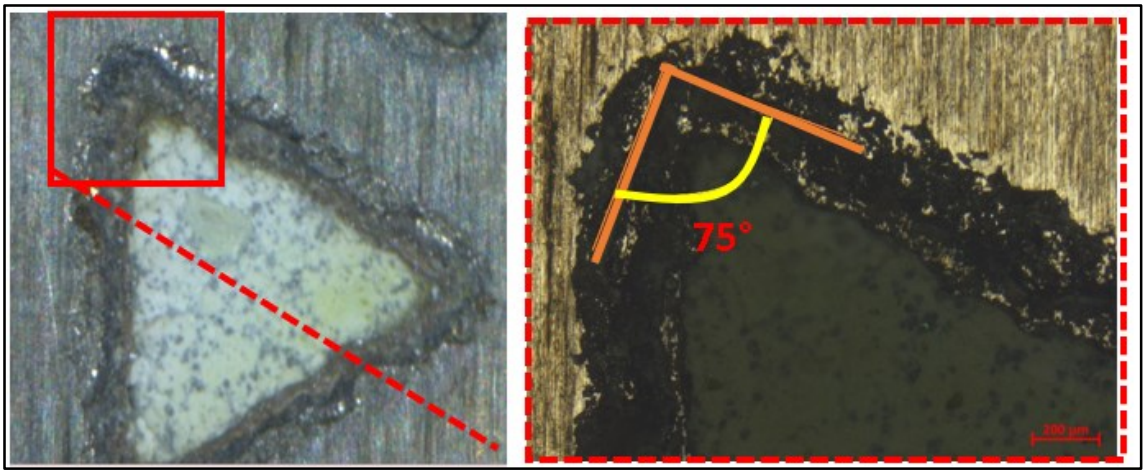

Şekil 5.6. B2 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü



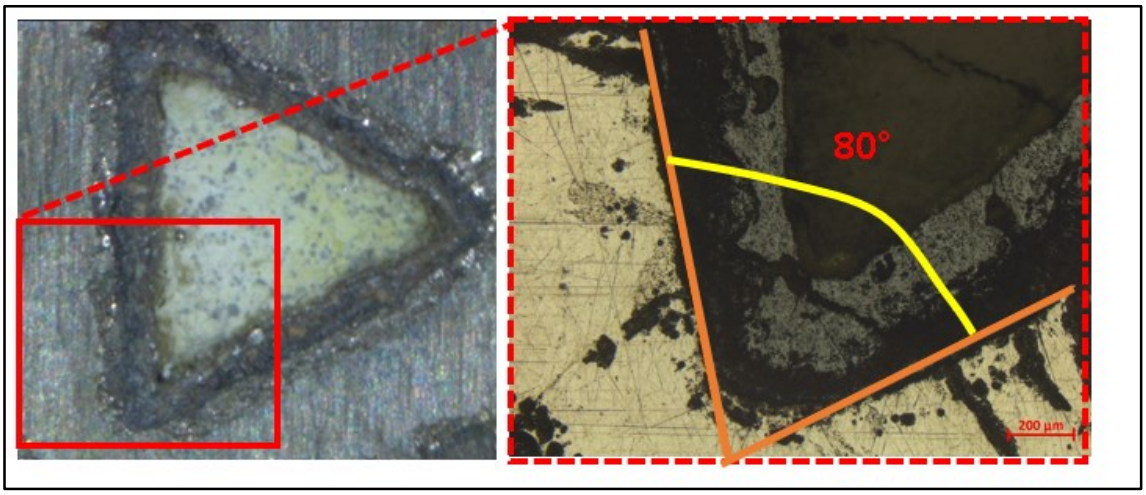

Şekil 5.7. A3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü




Şekil 5.8. B3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü

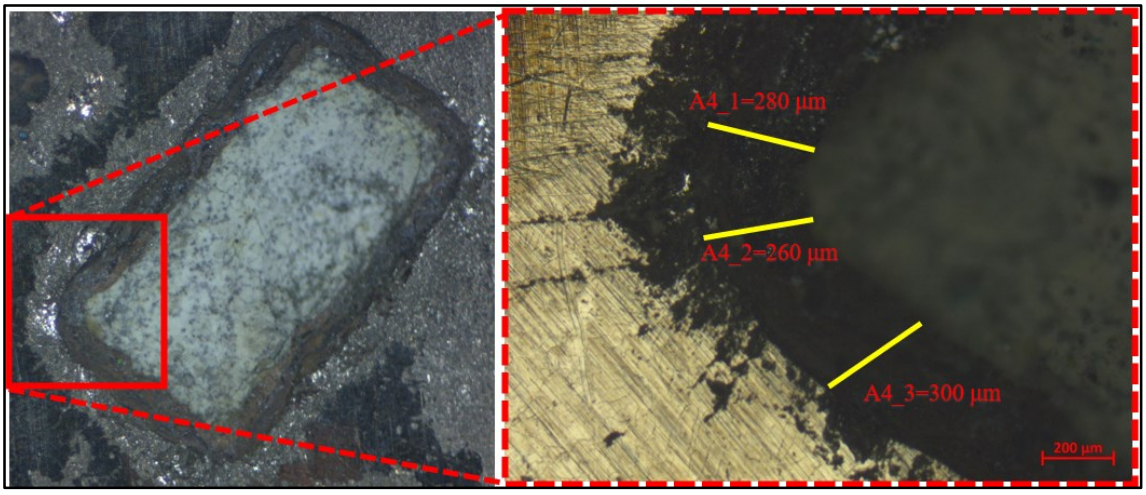



Şekil 5.9. A3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü

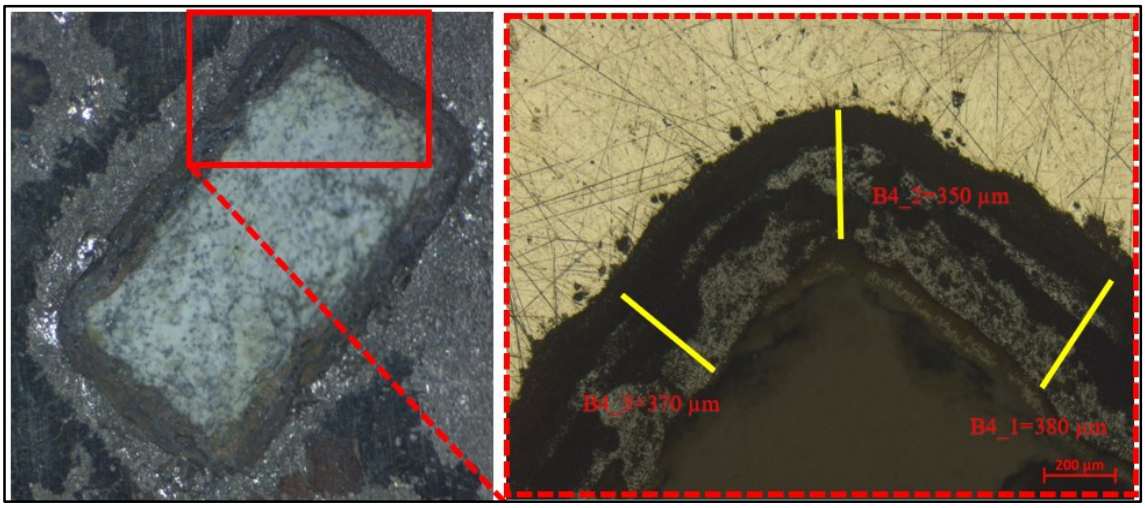



Şekil 5.10. B3 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü

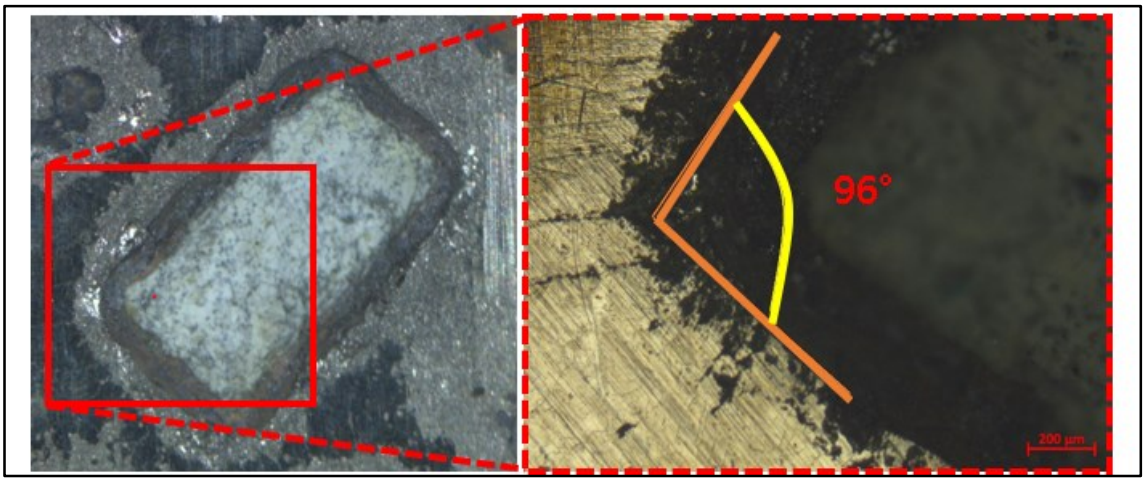
A1 ve B1 numunesine benzer şekilde keskin köşelere sahip bu geometride de ideal açılardan (90°) sapma yani burun radyüsünde artış olduğu (A3=75 ° ve B3=80°) açıkça görülmektedir. B2 ve B3 ait ölçümlerde görüldüğü gibi sırasıyla B2 için 190 µm ve 150 µm değerleri kenarlarda ölçülürken burun kısmında bu değer dramatik bir artışla 220 µm değerine ulaşması ve B3 için kenar ölçüleri 360 µm ila 380 µm gibi birbirine yakın bir değerle ölçülürken bu burun kısmında 440 µm olarak ölçülmüş olması bu geometrik değişimi açıklamaktadır.



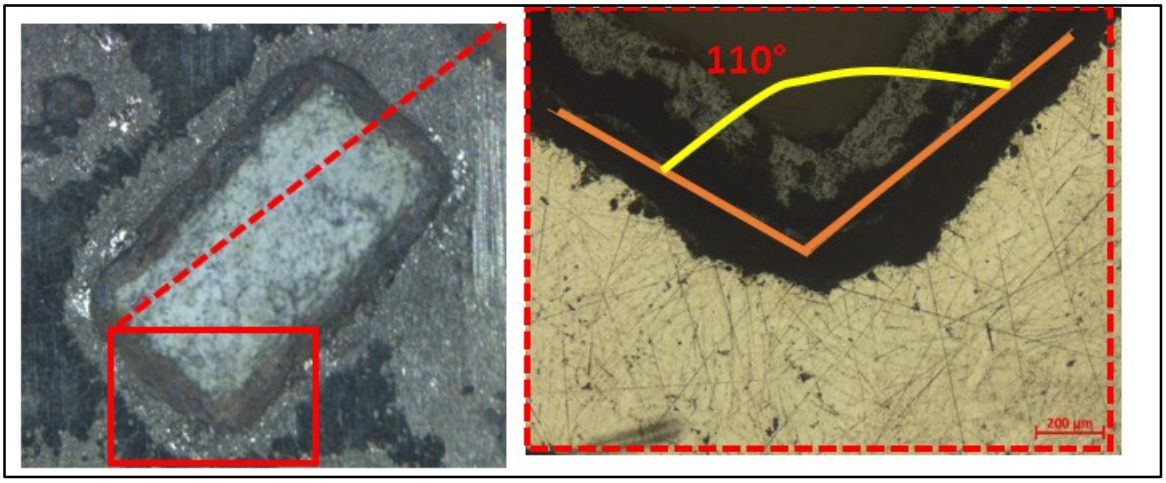

Şekil 5.11. A4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü




Şekil 5.12. B4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü

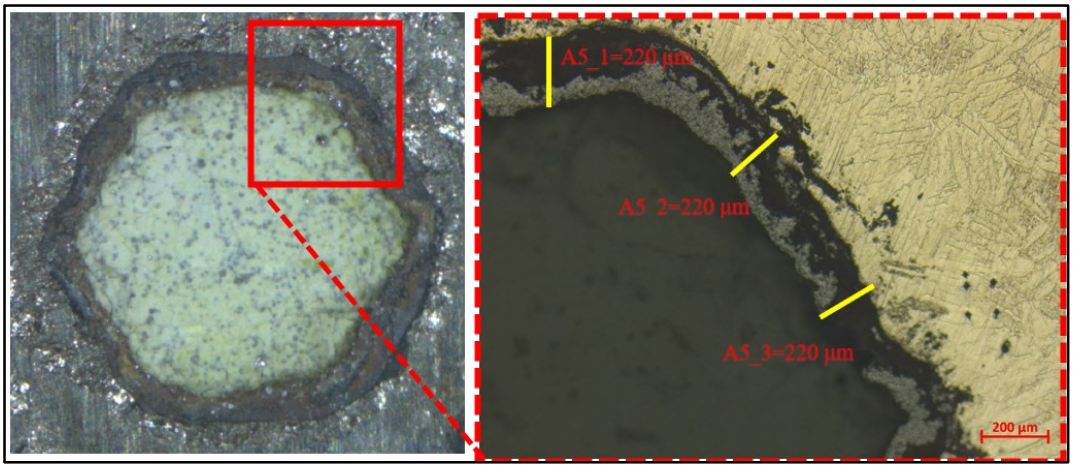



Şekil 5.13. A4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü

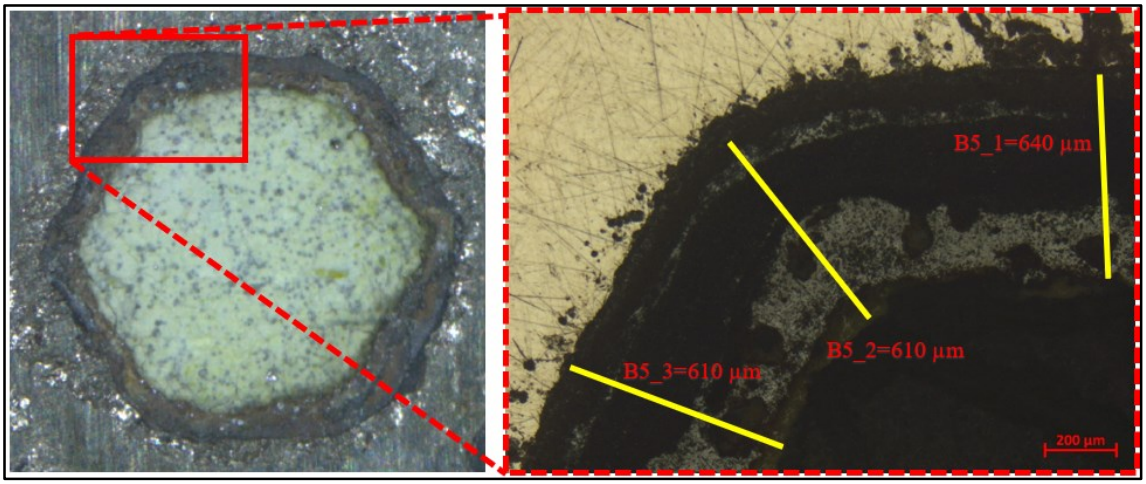



Şekil 5.14. B4 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey köşe açısal büyüklüğü

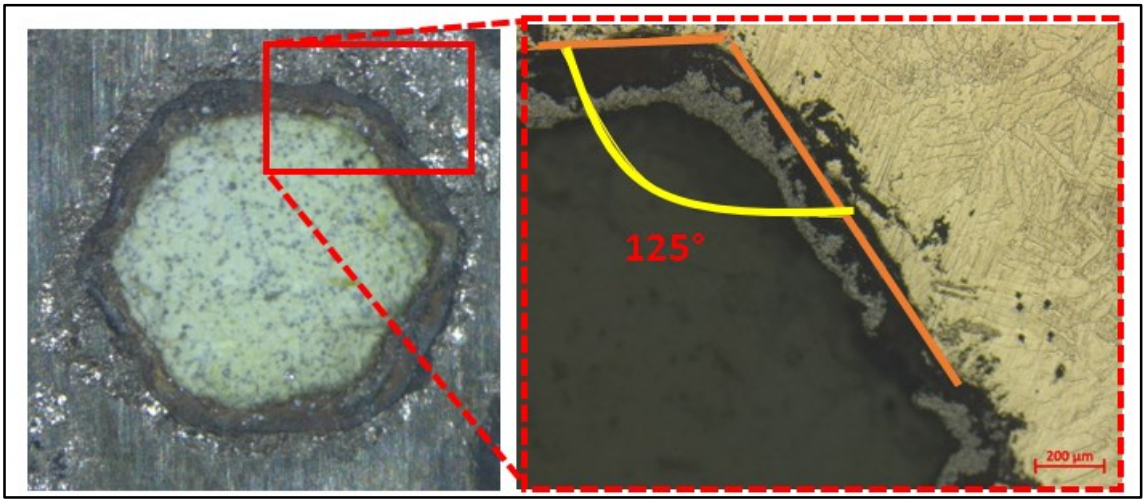
Gerek hızlı soğuma gerekse yavaş soğuma sonrası elde edilen sinterleme sonrası ara faz kalınlıklarındaki artış homojen olarak görülmektedir. Kenarlara göre köşelerde ara yüzeyde artışı diğer desenlerdeki daha fazla olmak yerine daha düşük ya da neredeyse aynı çıkmıştır. Keskin kenarda ideal değerden (90°) sapma yani ovalleşme olsa da bu değer artışı (A4=96° ve B4=110°) çok da olmamıştır.



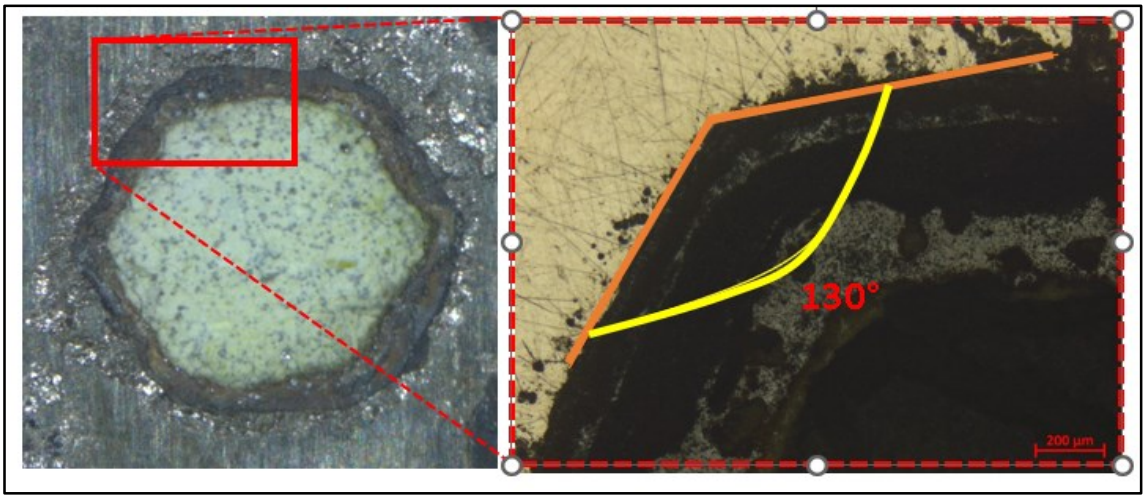

Şekil 5.15. A5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü




Şekil 5.16. B5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü



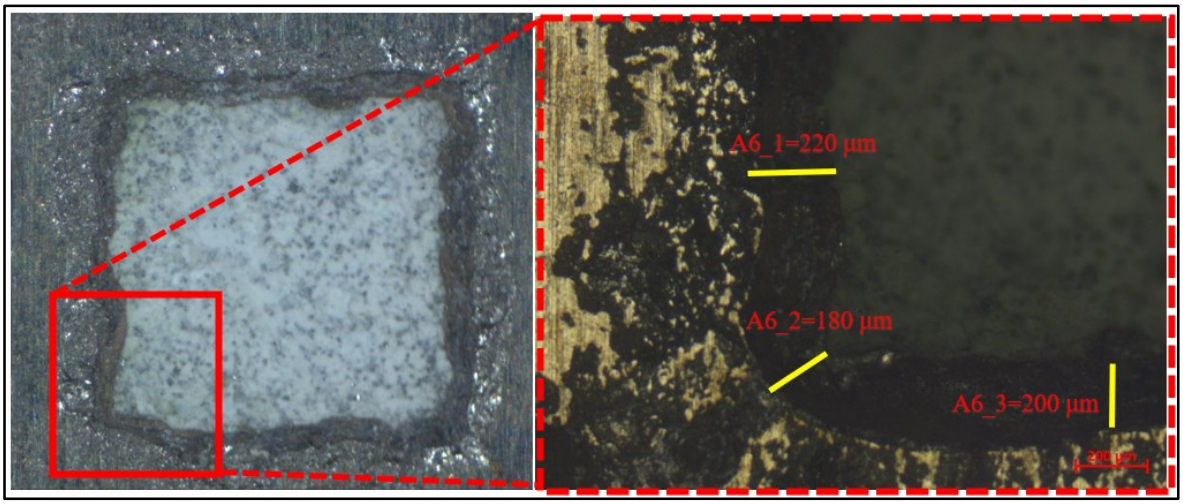

Şekil 5.17. A5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü



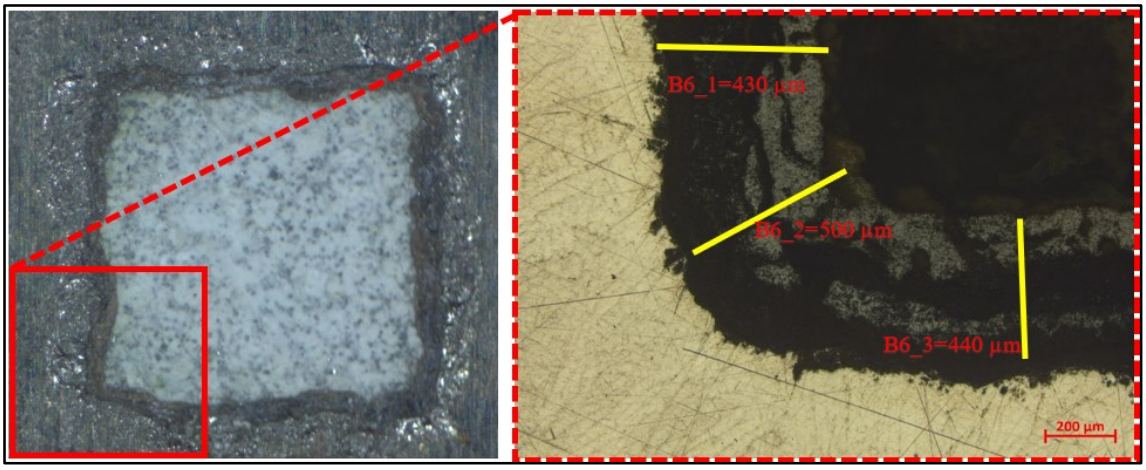

Şekil 5.18. B5 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü

Şekil 5.17. ve Şekil 5.18 (A5 ve B5) numuneleri de incelendiğinde altıgen boşluklu üretilen numunelerin köşe açıları 120° olup geniş açılı bu numunelerde de aynı şekilde $ZrO_2$ tozu sıkıştırılıp sinterlenmesi sonucunda oluşan radyüsleşmede A5 numunesinin açısı 126° ye yükselmiştir. Aynı şekilde B5 numunesinde de açı 130° olmuştur. Bu durumda havada A5 numunesinde %5 lik bir artış, B numunesinde ise %8 lik bir artış olduğu görülmüştür. Bu durum geniş açılı köşelerde radyüsleşme sonucu açı artışının düşük açılı radyüsleşmeye sonucu oluşan açı artışının daha az olduğunu gösterir.

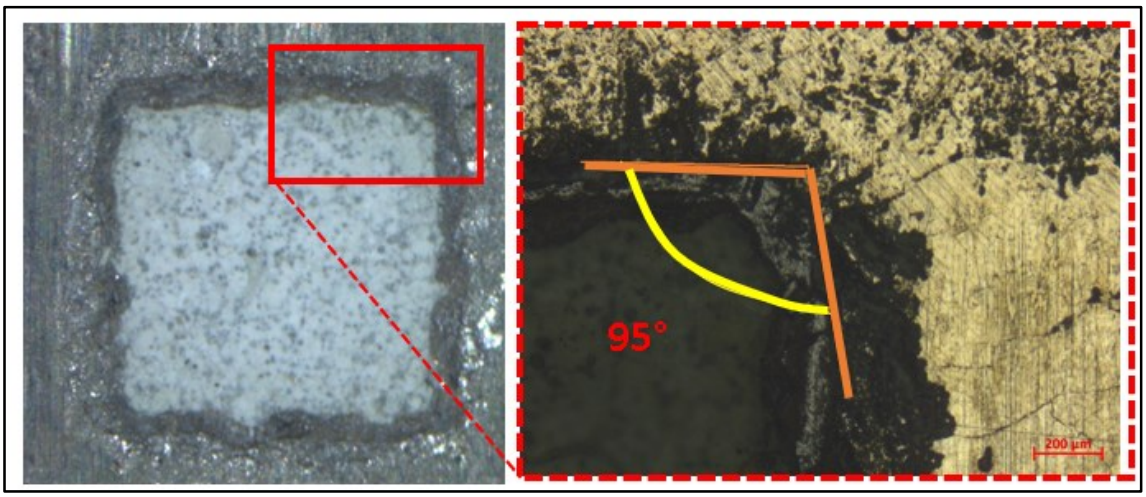
Altıgen desenine ait mikro yapılar incelendiğinde elde edilen ideal açı 120 º'den sinterleme sonrası A5 değerine 126° ve B5 değerine 130° lik değişim söz konusu olmuştur. Ölçülen kalınlık değerleri de göstermektedir ki kalınlık değerlerinin köşelere gelindikçe çok olmadığı ve çok az değişim gösterdiği 610 – 640 µm arasında ki değerlerde olmuştur. Sinterleme sonrası altıgen geometrik formu hem seramik yapıda hem de onu çevreleyen ara yüz yapısında neredeyse dairesel yapıya doğru dönüşmüştür.



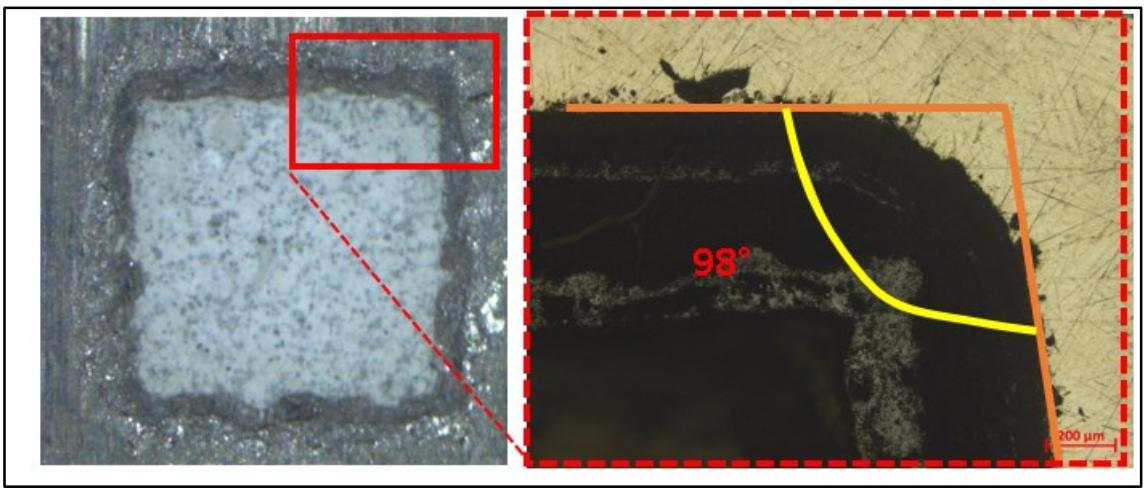

Şekil 5.19. A6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü




Şekil 5.20. B6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü




Şekil 5.21. A6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü




Şekil 5.22. B6 numunesi optik mikroskop mikro fotoğrafı ve ara yüzey ölçümü

Şekil 5.21. ve Şekil 5.22. (A6 ve B6) numuneleri de incelendiğinde kare boşluklu üretilen numunelerin köşe açıları 90° olup dar açılı bu numunelerde de aynı şekilde $ZrO_2$ tozu sıkıştırılıp sinterlenmesi sonucunda oluşan radyüsleşmede A numunesinin açısı 95° ye yükselmiştir. Aynı şekilde B3 numunesinde de açı 98° olmuştur. Bu durumda havada A numunelerinde %5 lik bir artış, B numunelerinde ise %8 lik bir artış olduğu görülmüştür. Bu durumda kare ve dikdörtgen boşluklarında ortak olarak dik açıları eşit olmakla beraber A numunelerinde benzer artış oranı görülmüştür. Tüm numunelerin 5 olarak genel artışları Çizelge 5.2. de toplu halde verilmiştir.

Çizelge 5.2. Numunelerin ara yüzey köşeleri açısal artışı

| Desen | Numune | Ölçümler (°) | Numune | Ölçümler (°) | Başlangıç Tasarım Açısı (°) | Yüzdesel artış A Numuneleri (%) | Yüzdesel artış B Numuneleri (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
|  | A1 | 106 | B1 | 110 | 90 | 15% | 18% |
|  | 71 | 75 | B3 | 80 | 60 | 20% | 25% |
|  | A4 | 96 | B4 | 110 | 90 | 6% | 18% |
|  | A5 | 126 | B5 | 130 | 120 | 5% | 8% |
|  | A6 | 95 | B6 | 98 | 90 | 5% | 8% |

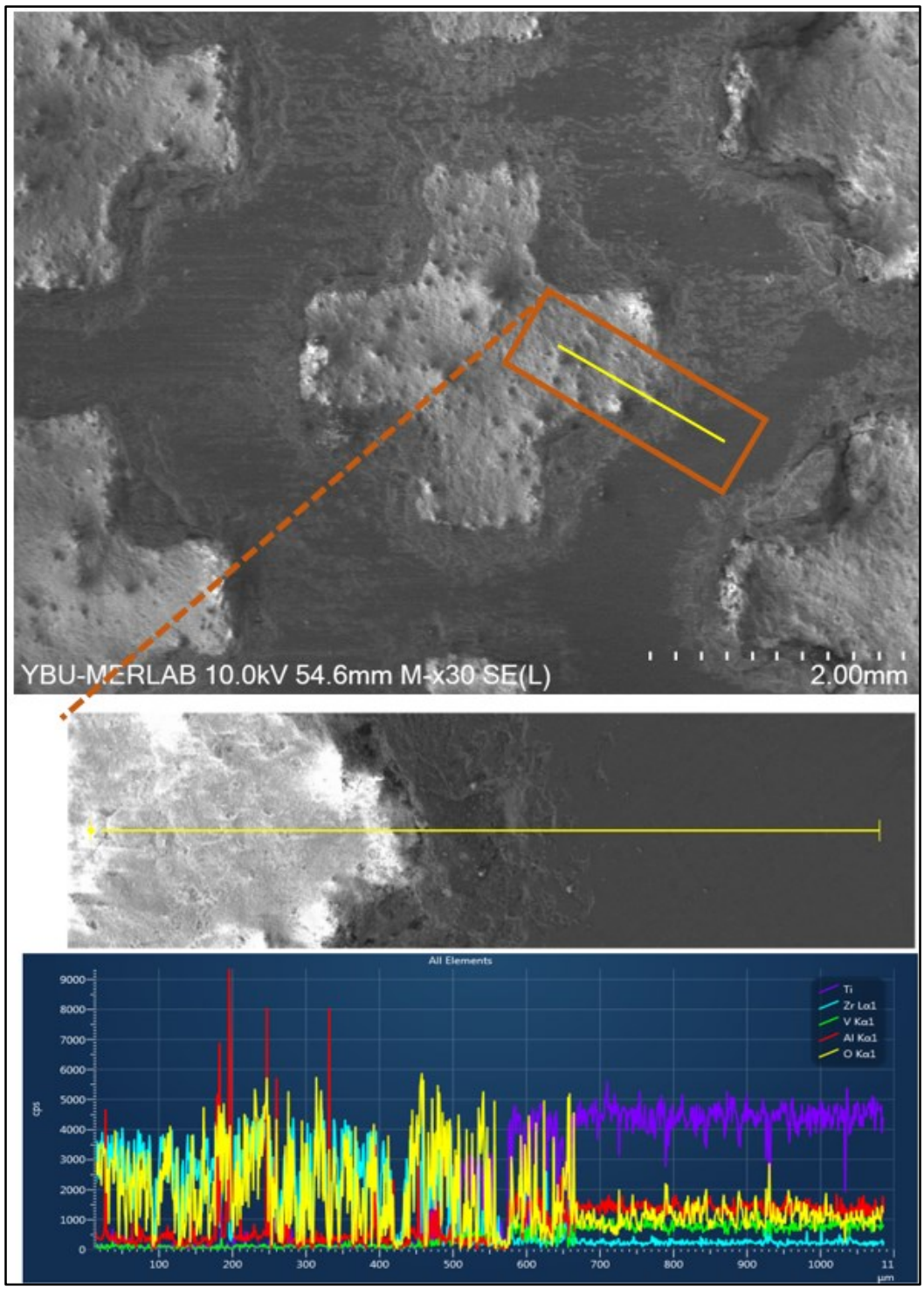
Ara yüzey kalınlıkları incelendiğinde A numuneleri içerisinde en az ara yüzey kalınlığına sahip üçgen geometrili numunede (A3=186µm) olduğu görülmüştür. Aynı sinterleme koşullarında farklı ara yüzey kalınlıklarının oluşumuna etken olan parametrenin kalıp üzerindeki seçilen geometrinin kalınlığı olduğu daha önceki çalışmalarda belirtilmiştir. Ferri ve arkadaşları (2008) yaptıkları çalışmada toz metalürjisi ve metal enjeksiyon kalıplama (MIM) yöntemleri kullanılarak üretilen $Ti\text{-}_6A_{l4}V$ alaşımlarının farklı sinterleme sıcaklıklarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmişlerdir. Ayrıca, kalıp geometrisinin sinterleme davranışı üzerindeki etkisi de araştırılmışlardır ve yaptıkları çalışmada sinterleme sıcaklığının yoğunluğu, sertliği ve çekme dayanımını artırdığını göstermişlerdir [45].

Mevcut çalışmada toz sıkıştırılan numunelerden fırında soğumaya bırakılan numuneler (B) ile havada soğumaya bırakılan numuneler (A) incelendiğinde en yüksek artışın %182 artış ile altıgen şeklinde olduğu görülmektedir. Bu durum Ferri ve arkadaşlarının yaptığı çalışma

ile desteklenmektedir. Ayrıca Velmurugan ve arkadaşları (2016) yaptıkları çalışmada Ti-$_6$A$_{l4}$V ve çift fazlı paslanmaz çelik arasında düşük sıcaklıkta difüzyon bağlanması işleminin incelenmesini konu almaktadır. Makalede, farklı bağlama sıcaklıkları ve süreleri kullanılarak yapılan deneyler sonucunda, en yüksek mukavemetini en yüksek sıcaklık değeri olan 900°C'de 1 saat boyunca yapılan bağlama işlemi ile elde etmişlerdir [46]. Bu çalışma sonucu da sinterleme süresinin de doğrudan ara yüzey bağına etki ettiğini göstermektedir. Bu durumda fırında soğumaya bırakılan numunelerde ara yüz mesafesinin daha yüksek olması dolayısıyla mekanik özelliklerin daya yüksek olması beklenilen bir durumdur. Buna ek olarak en düşük ara yüz kalınlığına sahip üçgen şekline sahip numune (A3) fırında soğutulduğunda da ara yüzey kalınlığında ciddi bir artış (% 111) gözlemlenmiştir.

## 5.2. Taramalı Elektron Mikroskopu ve Doğrusal Elementel Analiz İncelenmesi

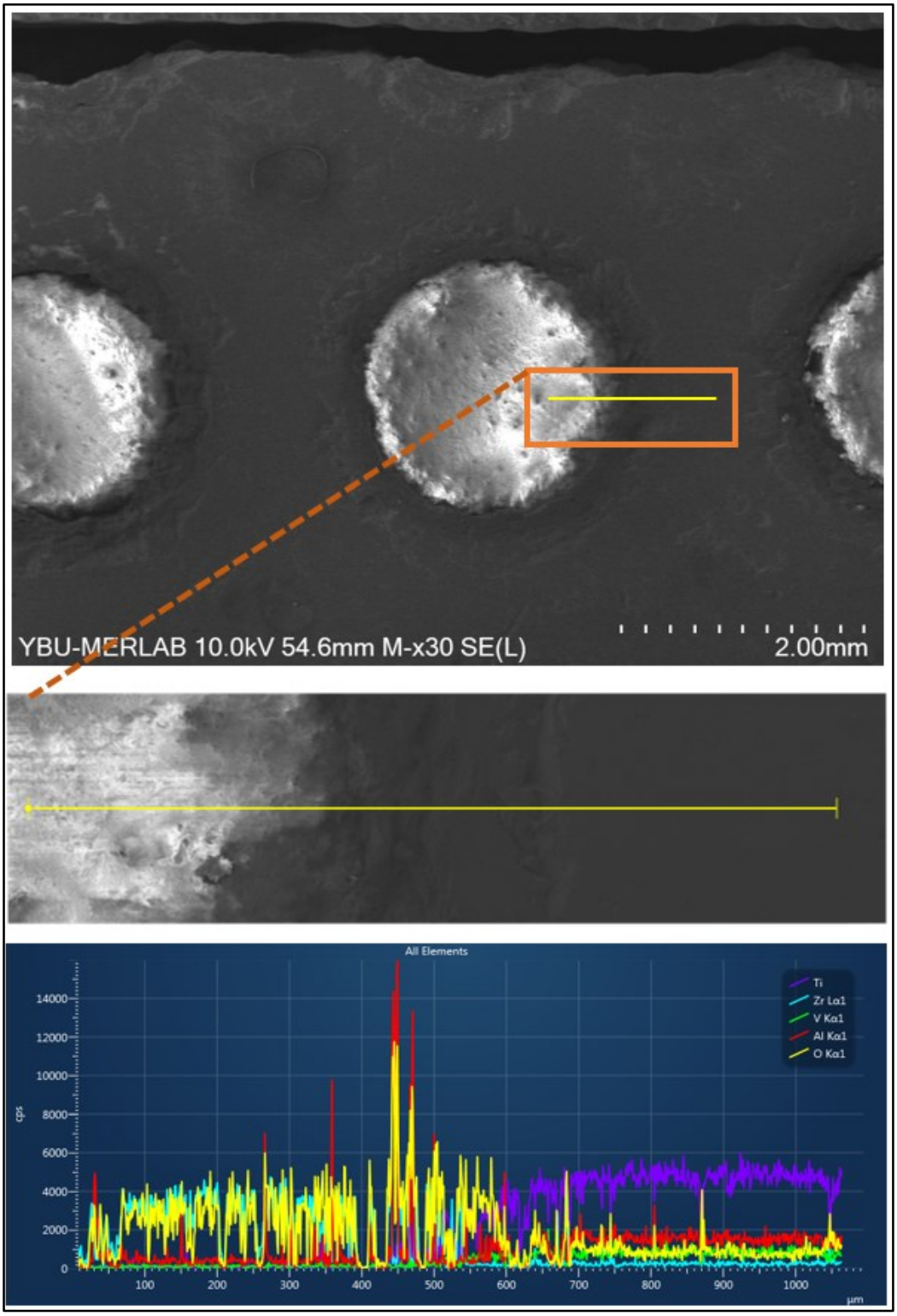
Taramalı elektron mikroskobu ile elde edilen görüntülerde özellikle takviye seramik ile Ti6AL4V malzemesi arasında bağ oluşup oluşmadığı gözlenmiştir. Doğrusal elementel analiz grafikleri ile matris malzemesi ve takviye elemanlarının dağılımı görülmektedir. SEM ve EDX verileri Şekil 5.23 – Şekil 5.34 ile verilmiştir.




Şekil 5.23. A1 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

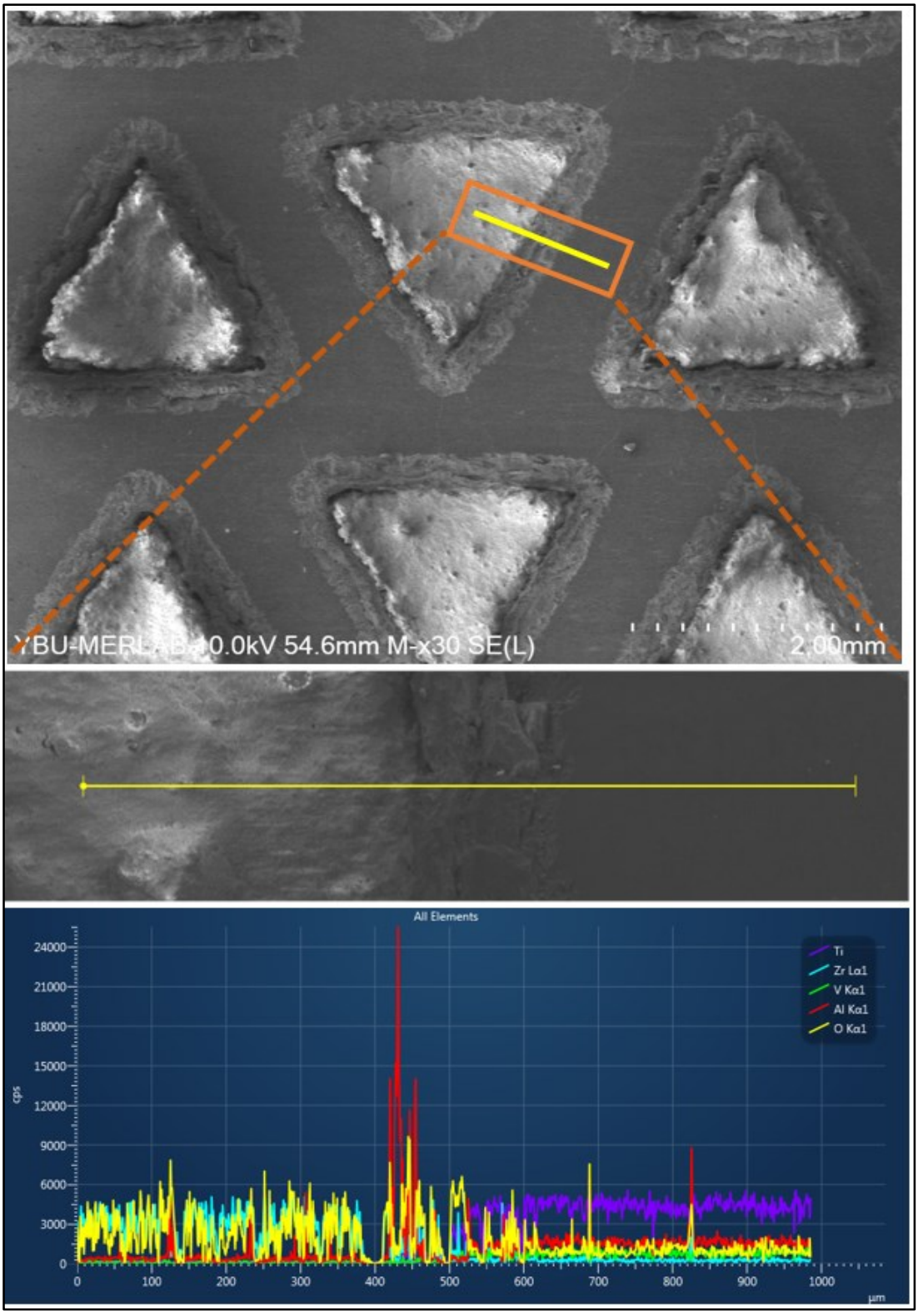
A1 numunesinin EDS görüntüleri incelendiğinde dış yüzeyde başlayan Ti yoğunluğu ara yüzeye geldiği anda azalmaya başlamaktadır. Ara yüzeyde oksijen yoğunluğu da artmaya başlamaktadır. Bunun sebebi difüzyon ile $ZrO_2$ deki oksijenin ara yüzeye gelip burada Ti ile tepkimeye girip rutil oluşturmasıdır. EDS grafikleri incelendiğinde ara yüzey başlangıç ve bitiş noktalarında element bulunmayan 10µm boyutlarındaki bölgelerde boşluklar olduğu

düşünülmektedir. Ayrıca $ZrO_2$ bölgesinde Al malzemesi için pikler oluştuğu görülmektedir. Bunun sebebi kısmı bölgelerde Al topaklanması olduğu düşünülmektedir.



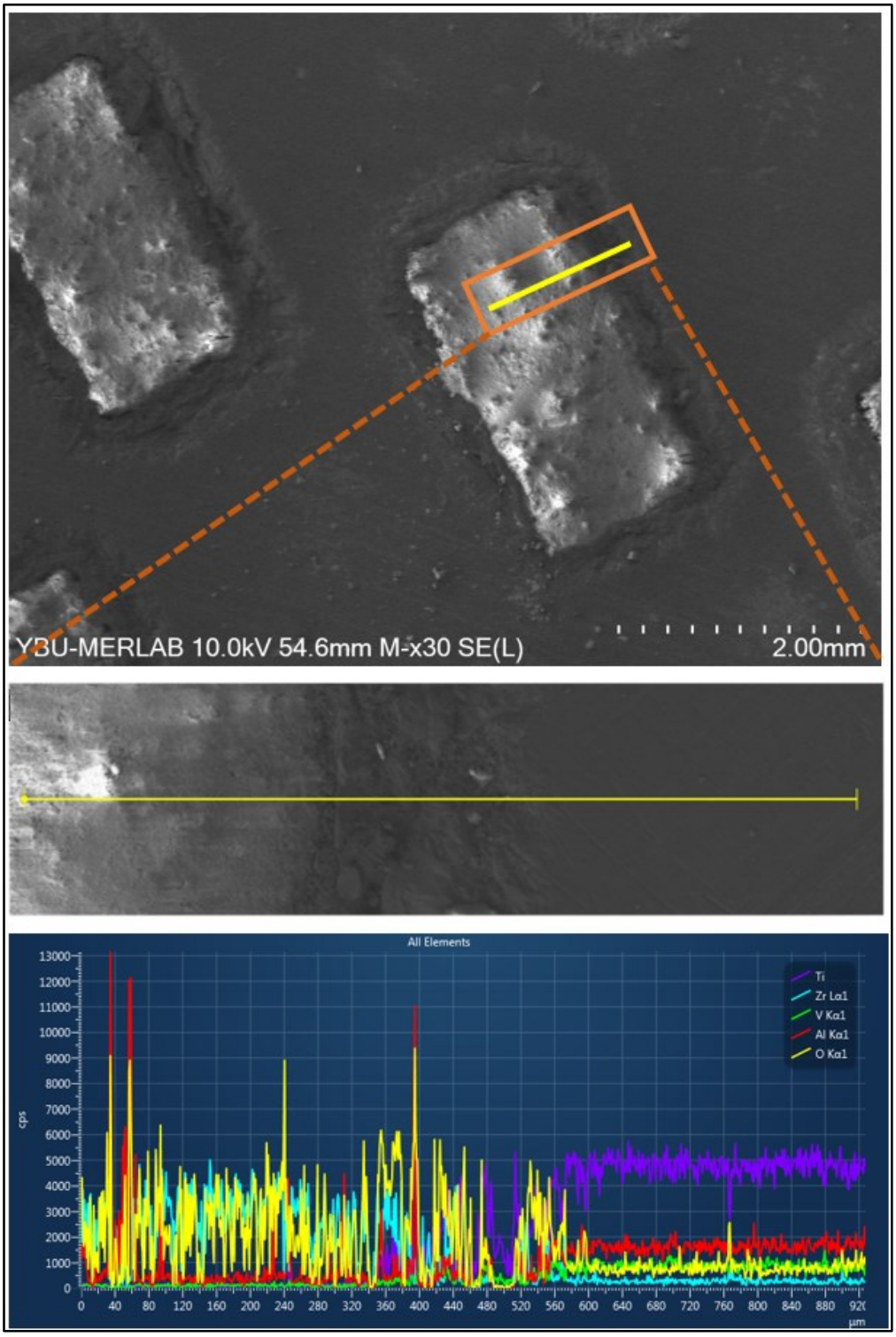

Şekil 5.24. A2 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

Buna ek olarak $ZrO_2$ bölgesinde Al malzemesi pik oluşturmamış yani boşluklar oluşmadığından malzemeler homojen olarak dağılmıştır. Bu durum B2 numunesinde sıkıştırma ve sinterleme proseslerinin daha efektif bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir.



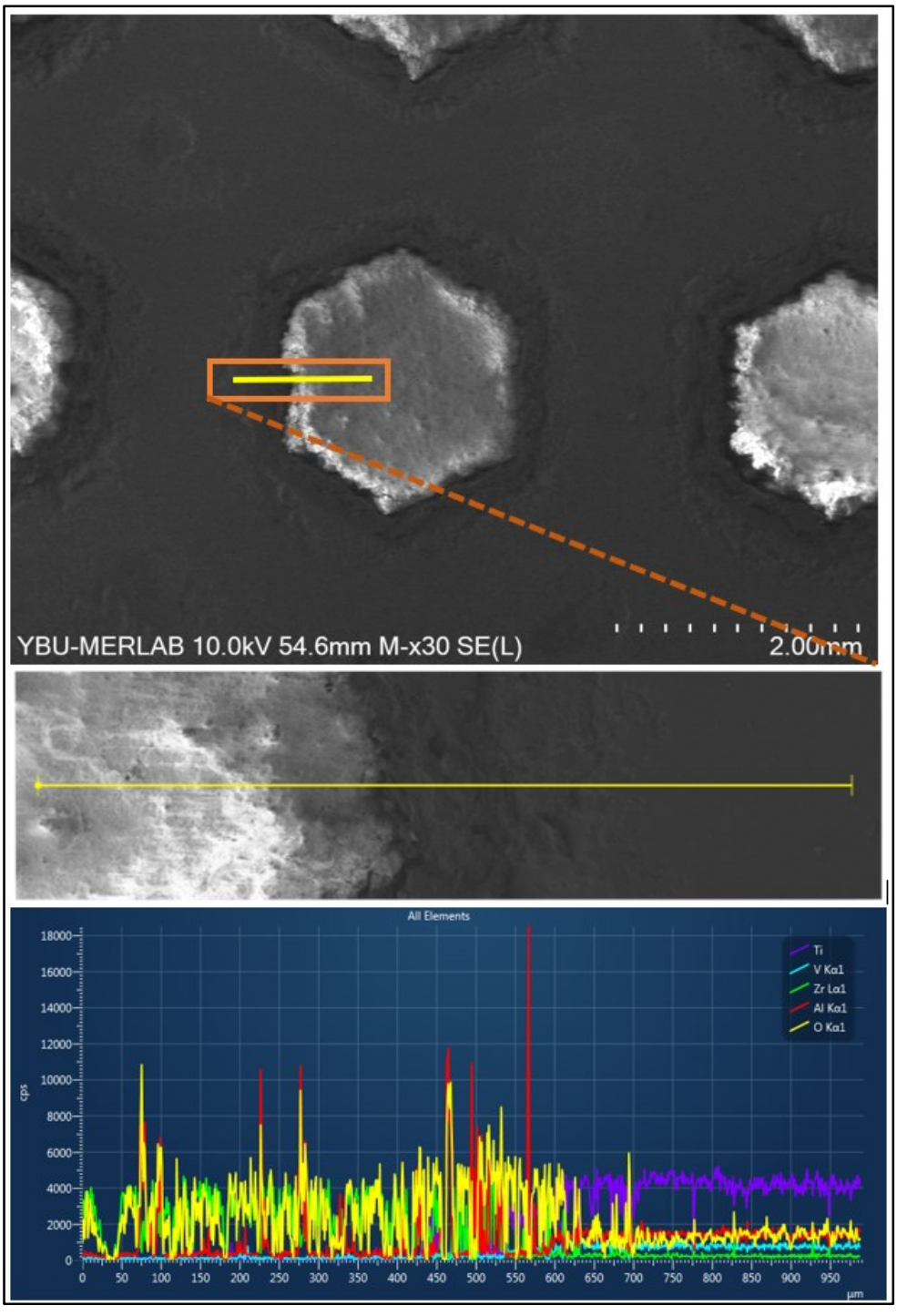

Şekil 5.25. A3 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

A3 numunesi EDS grafiği incelendiğinde pik yapan Al değerinin ara yüzey arasındaki boşlukta görüldüğü bu durumun topaklanma sonucunda oluştuğu anlaşılmaktadır.



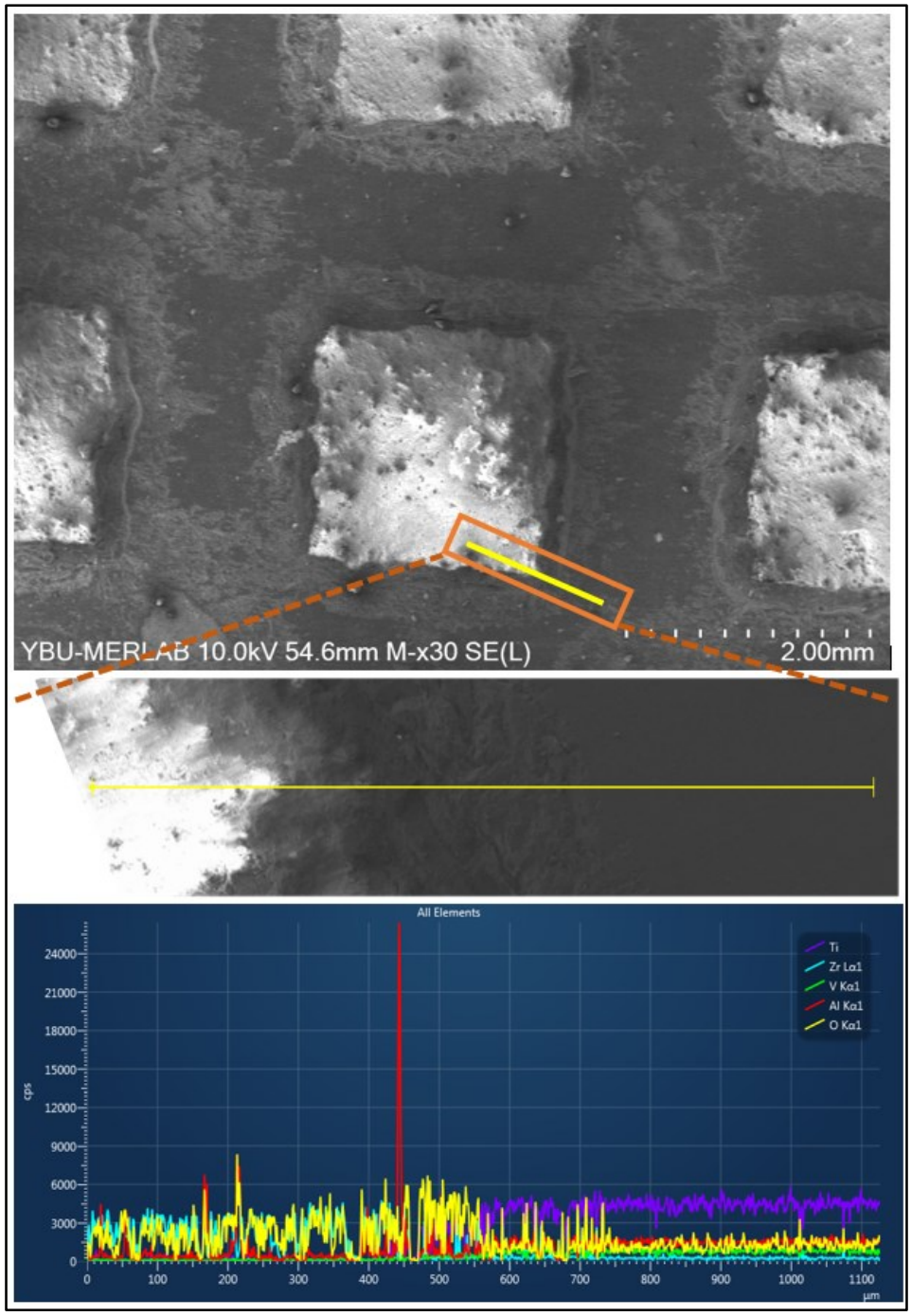

Şekil 5.26. A4 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

A4 numunesi incelendiğinde A1 numunesinde olduğu gibi $ZrO_2$ tarafında bölgesel Al ve O pikleri görülmektedir. Yetersiz sinterlenmeye bağlı bu oluşan boşluklara malzemenin topaklanması sonucu bu pikler oluşmaktadır. Ayrıca A1 numunesi EDS grafiğinde 10 µm olan ara yüzey geçişi arasındaki boşluk A4 numunesinde 40 µm ye ulaşmaktadır. Bu durum A4 numunesi için yetersiz sinterleme olduğunun bir göstergesidir.



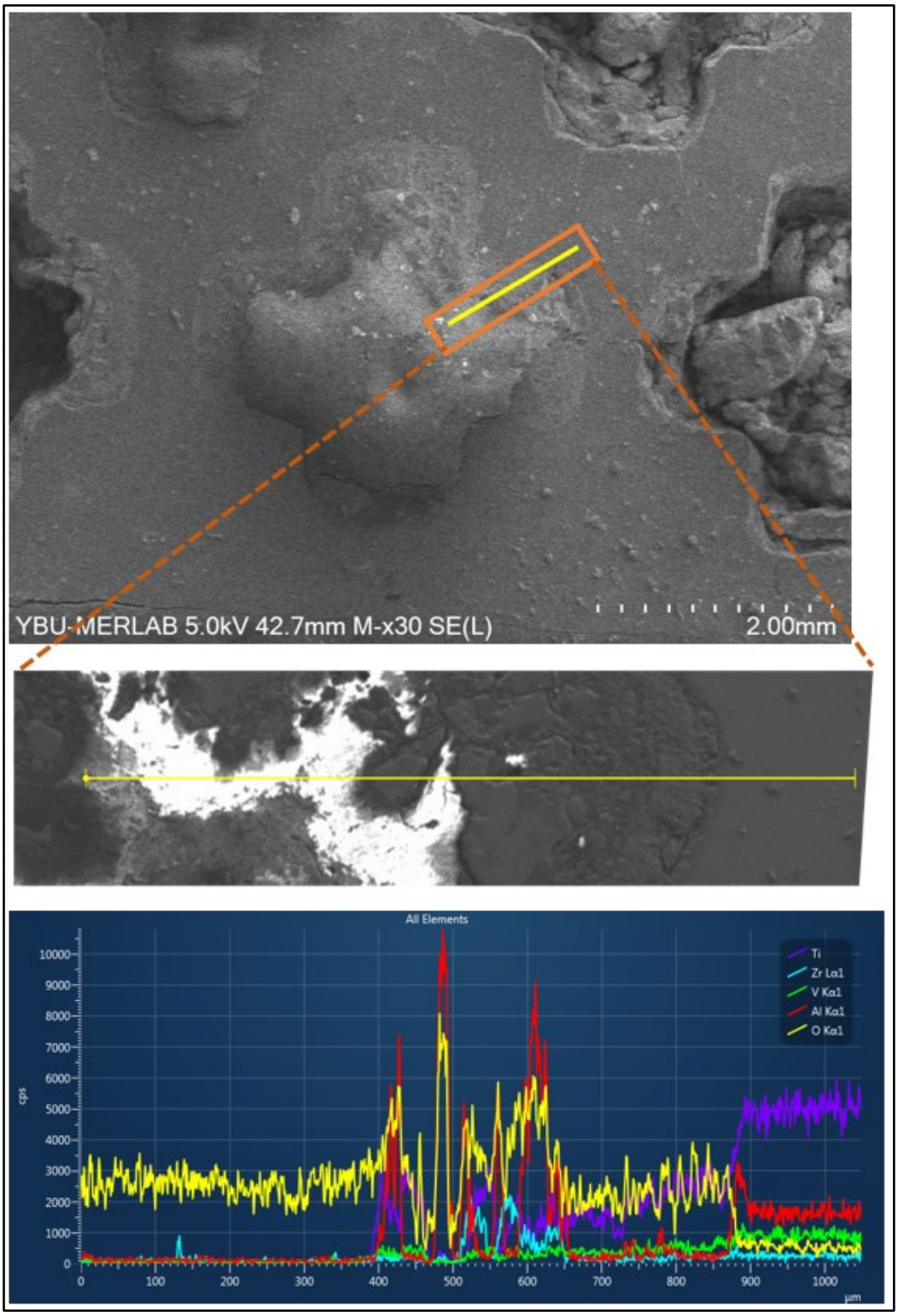

Şekil 5.27. A5 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

A5 numunesinin EDS grafiği incelendiğinde ara yüzey geçişlerinde hiç boşluk olmadığı açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum altıgen şeklindeki numunenin diğer numunelere göreçok daha iyi sinterlendiğini göstermektedir. Diğer numunelerde olduğu gibi bölgesel Al ve O pikleri oluşmaktadır.



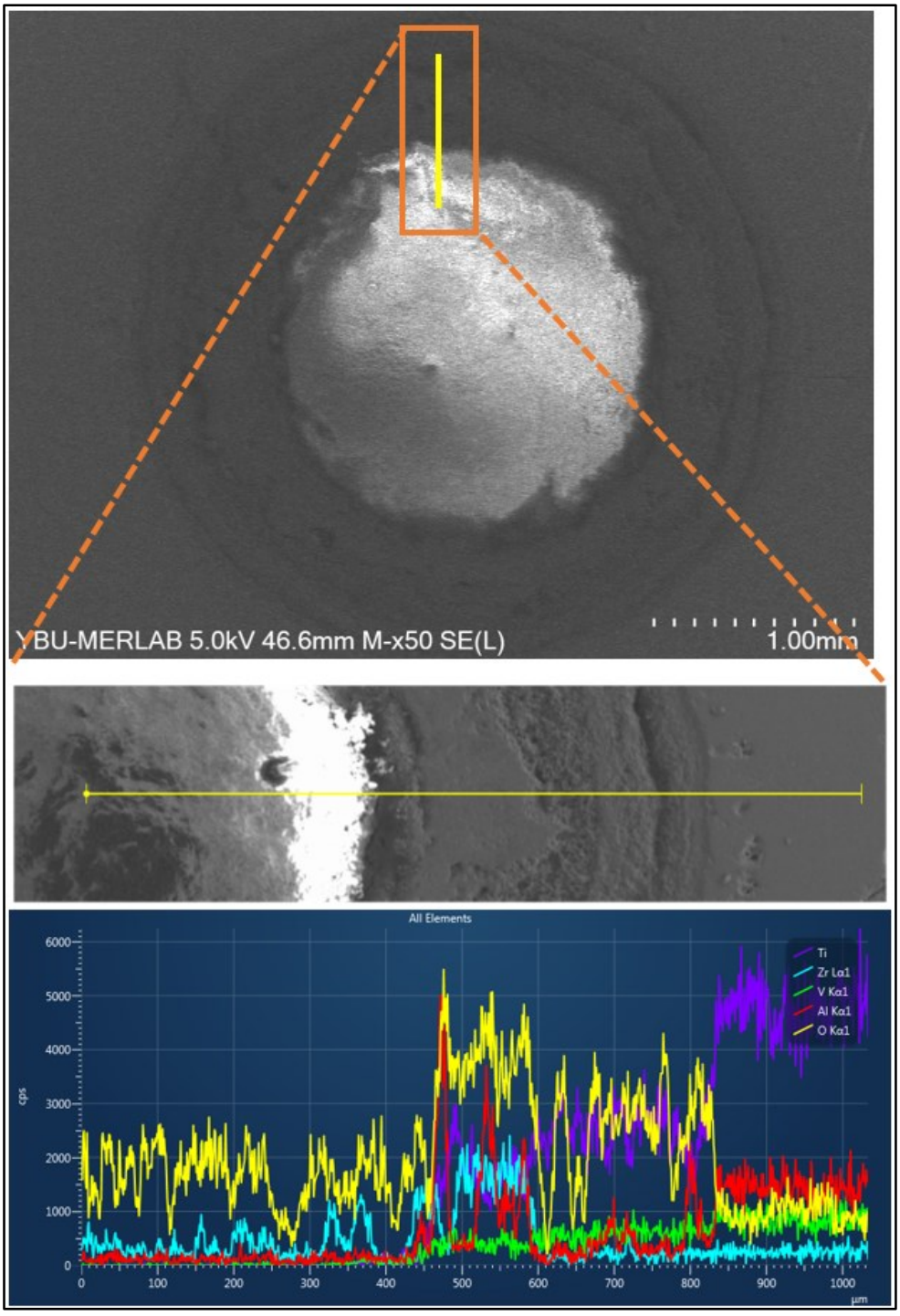

Şekil 5.28. A6 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

A6 numunesi incelendiğinde malzemelerin homojen olarak dağıldığı görülmüştür. Fakat diğer numunelerde olduğu gibi ara yüzey geçişlerinde 10 µm lik boşluklar da göze çarpmakta ve bu durum yeterince bir sinterlenme oluşmadığını göstermektedir.



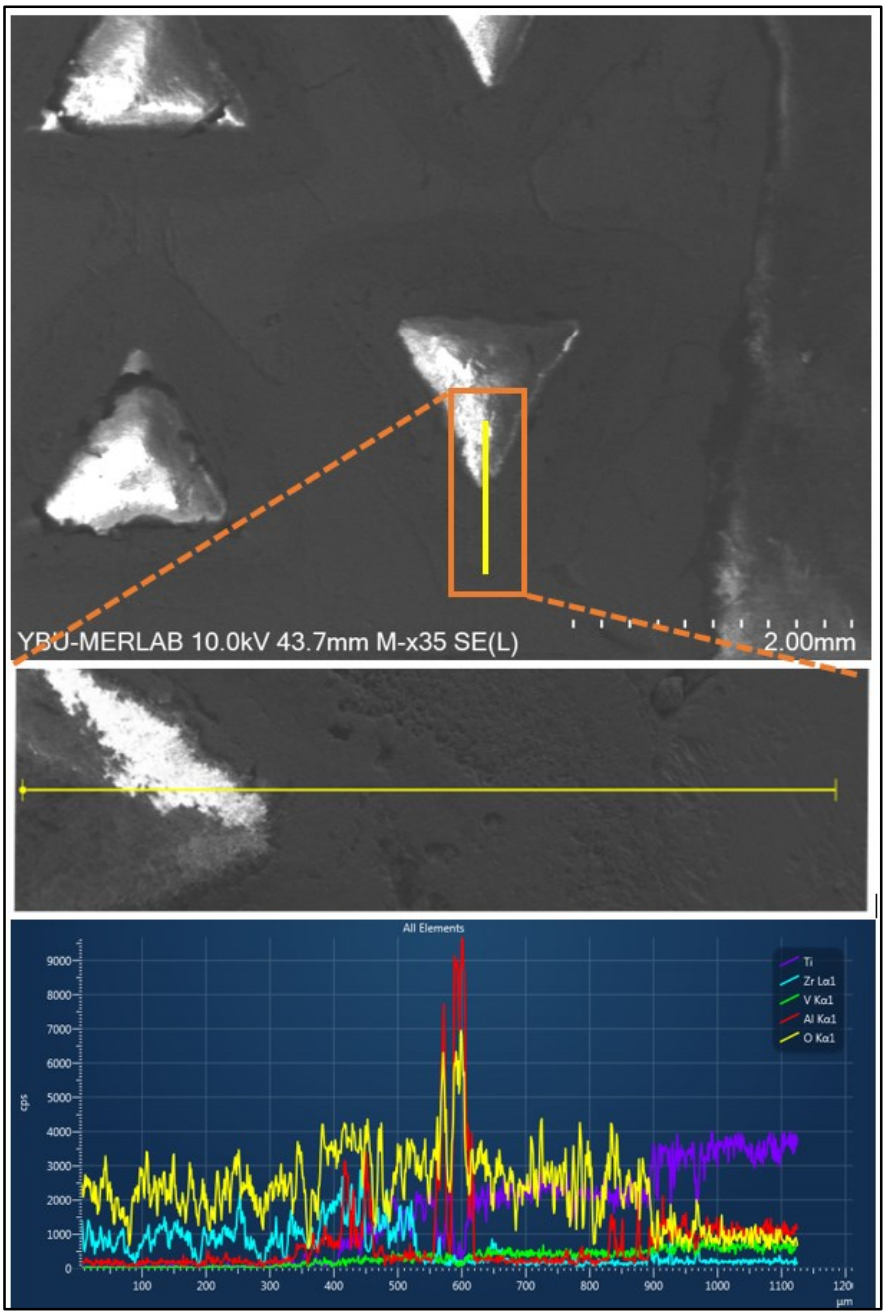

Şekil 5.29. B1 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

B1 numunesi incelendiğinde iyi sinterlenmeme sonucunda yüzey üzerindeki boşluklar EDS grafiğinde görülmektedir. Ayrıca bu bölgelerde boşluklara malzeme birikmesi de göze çarpmaktadır. 4,53 kN luk en düşük ikinci eğme direnci olması geometriden kaynaklı yeterince sinterlenmeme durumunun da başka bir göstergesidir.



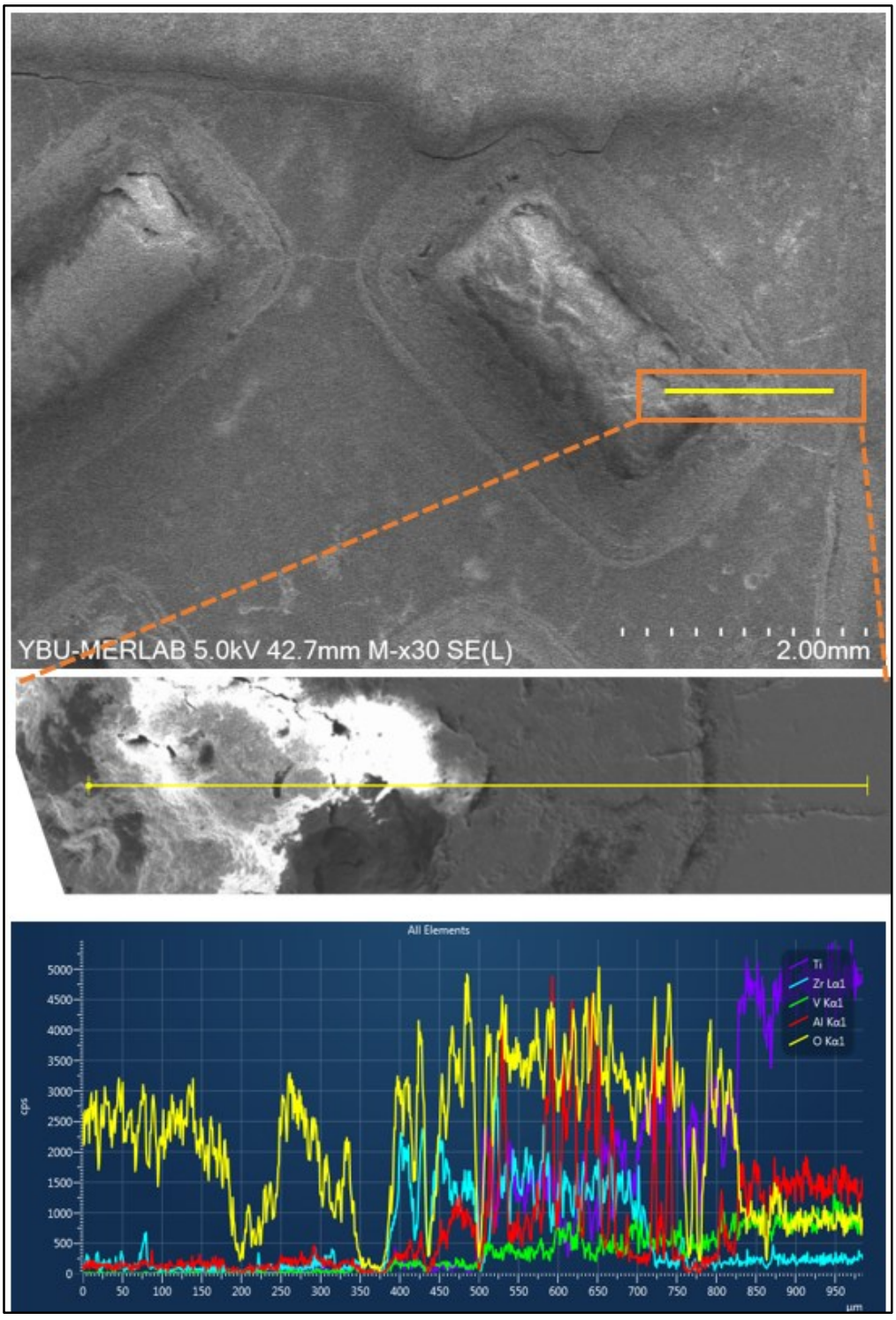

Şekil 5.30. B2 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

B2 numunesi incelendiğinde malzemelerin homojen bir dağılım sergilemediği görülmektedir. Ancak ara yüzey geçişlerinde boşluk olmaması iyi bir sinterleme olduğunu göstermektedir. Bu durum ara yüzey kalınlığının B2 numunesinde A2 numunesine göre daha fazla olması ile ilişkilidir. B numunelerinin fırın içerisinde yavaş bir şekilde soğumaya bırakılması A numunelerine göre daha iyi bir sinterleme olmasını desteklemektedir.



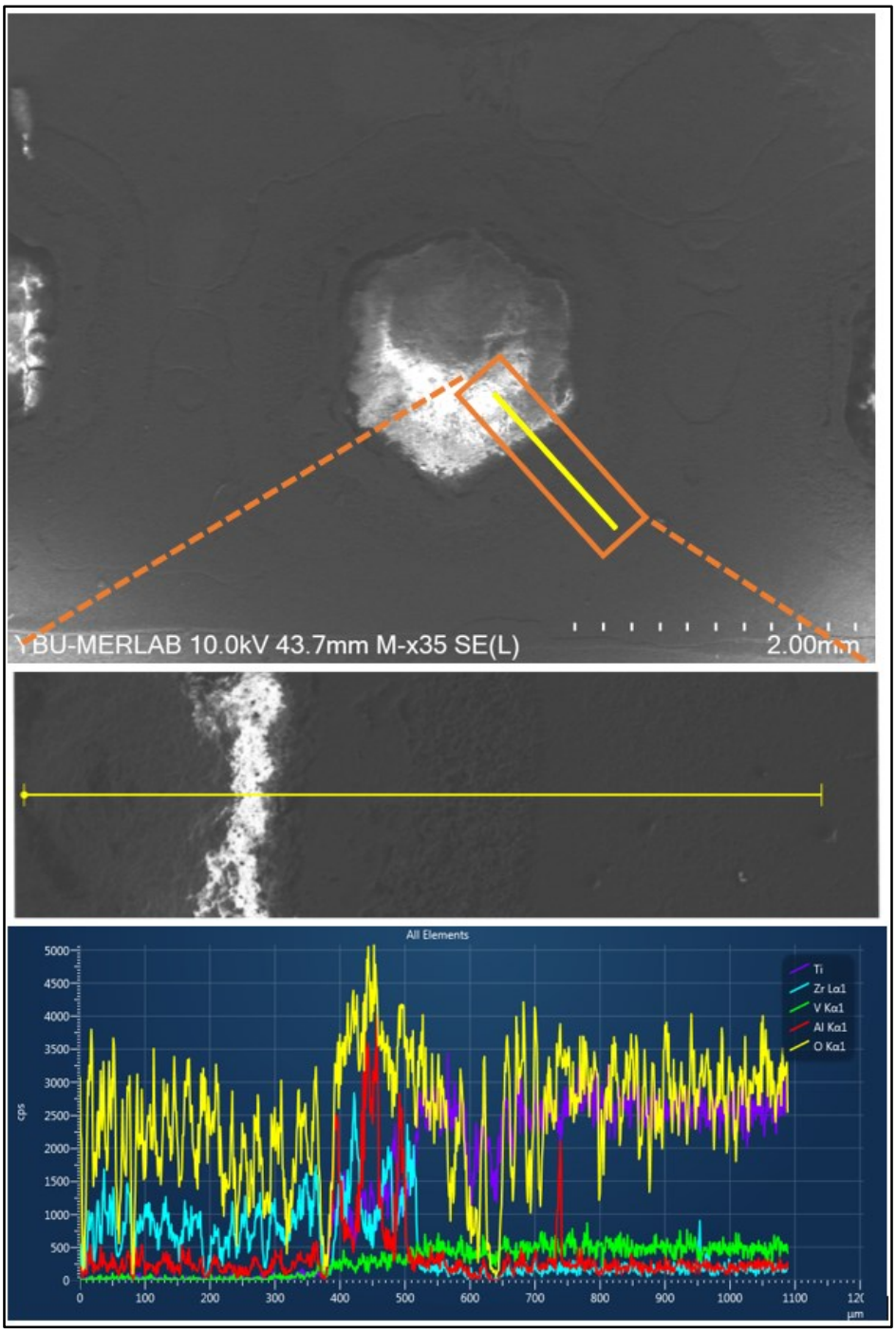

Şekil 5.31. B3 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

Üçgen şeklinde B3 numunesi de B1 ve B2 numunelerinde olduğu fırında soğuması sebebi ile ara yüz geçişlerinde boşlukların olmadığı kısmen daha iyi bir sinterlemenin olduğu bir yüzey görülmektedir.



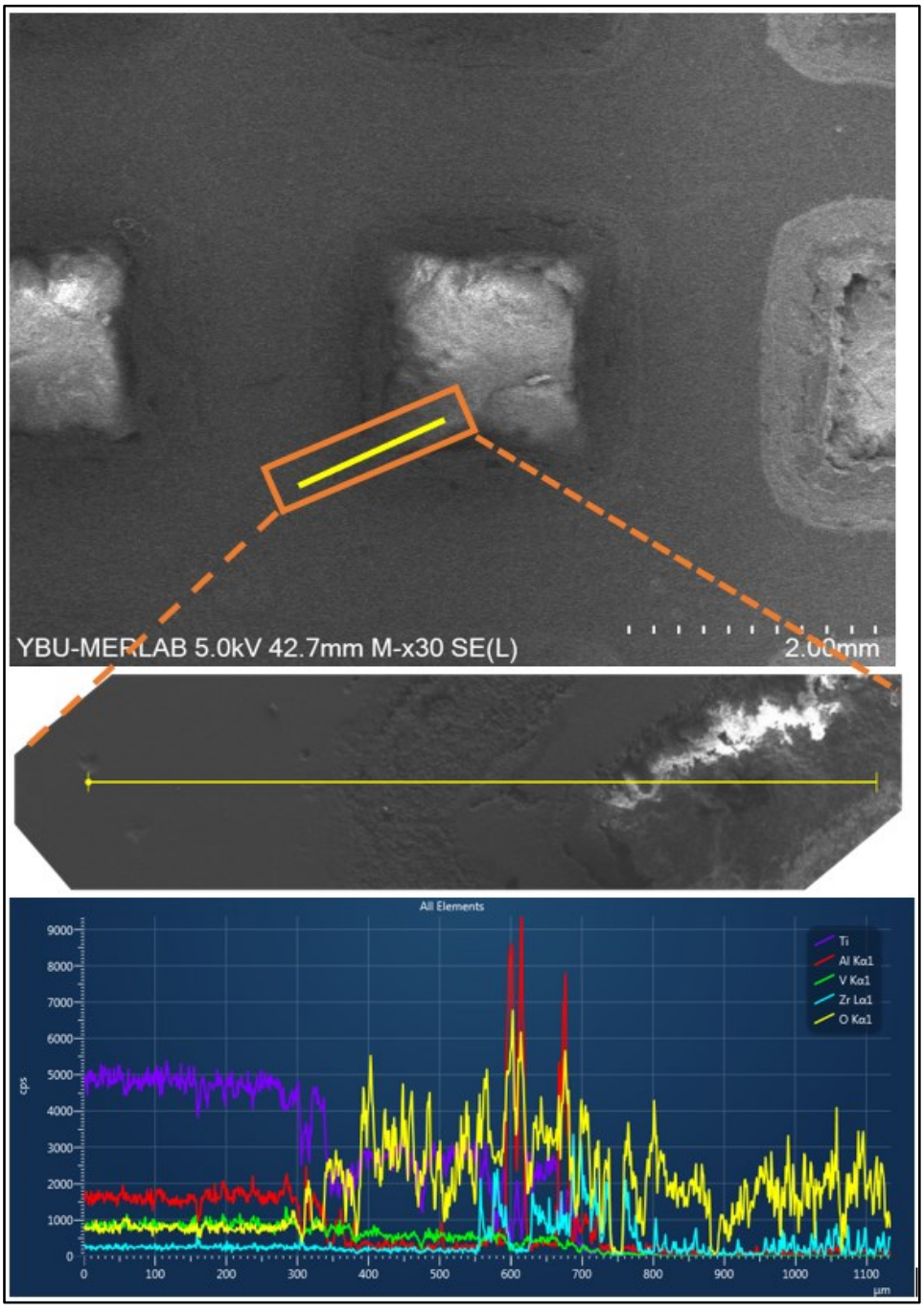

Şekil 5.32. B4 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

B4 numunesi incelendiğinde homojen olmayan bir dağılım yanında ara yüzey üzerinde boşlukların oluştuğunu göstermektedir. Burada dikdörtgen geometrisinin keskin köşegeni $ZrO_2$ tozunun sıkıştırılıp sinterlenmesine engel olmakla beraber elde edilen eğme testi sonucu da (2,27 kN) B numuneleri içerisinde an az sinterlemenin bu numunede oluştuğunu açıkça göstermektedir.




Şekil 5.33. B5 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

B5 numunesi olan altıgen şeklindeki numune gerek geometrik yapısı gerekse de fırında soğuması sonucunda tüm numuneler arasında en iyi sinterlemenin oluşması beklenmiştir. Gerek malzeme yoğunluğu, gerek homojen dağılım, gerekse de eğme testi sonucu (5,62 kN) bu numunenin diğer numunelerden ayrılarak en iyi sinterlemeye sahip olduğunu açıkça göstermektedir. Bu durum en iyi kompozit malzeme oluşumunun bu geometriye sahip numunede oluşmasını göstermektedir.



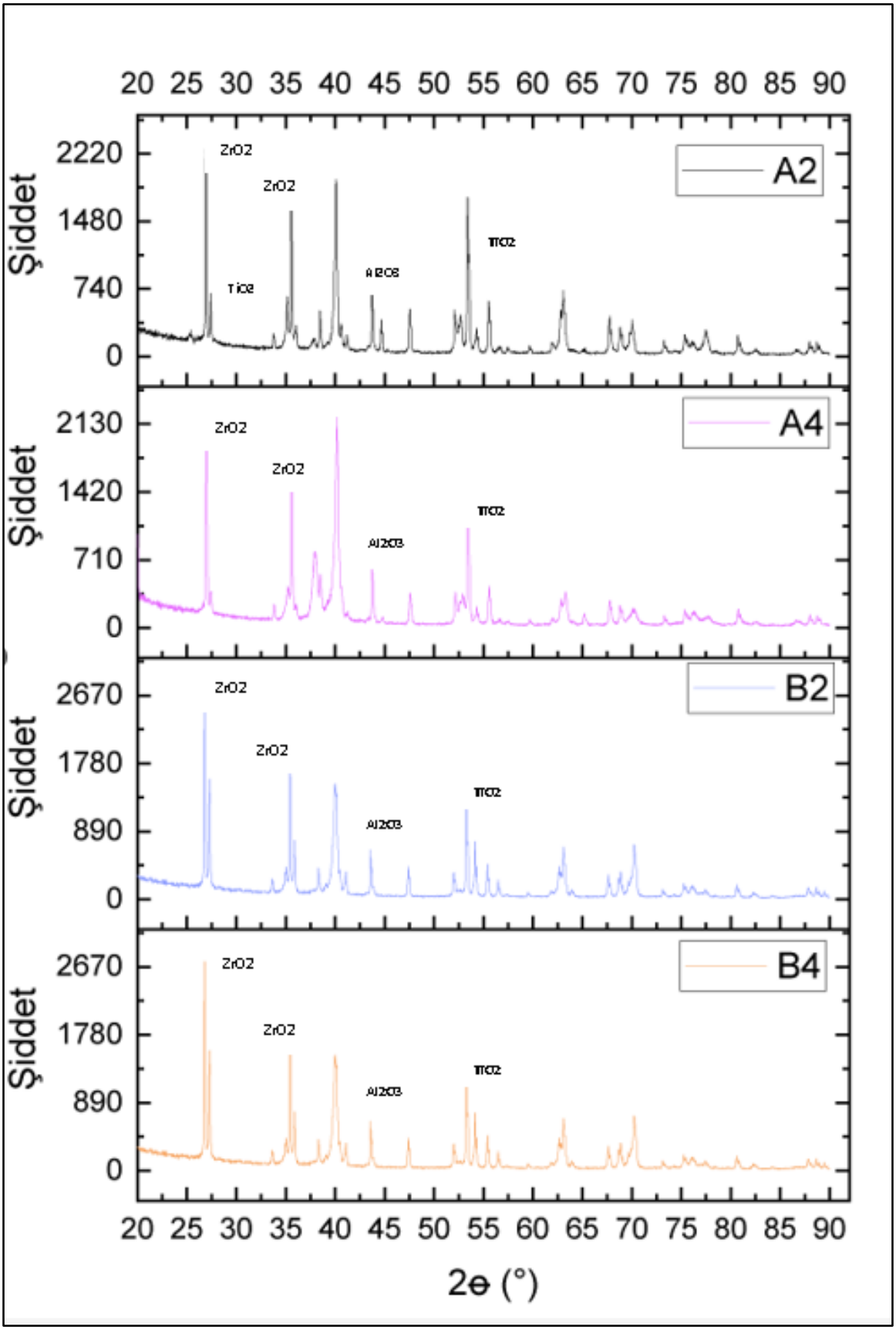

Şekil 5.34. B6 numunesinin SEM mikrofotoğrafı ve ara yüzeyin doğrusal EDS grafiği

B6 numunesinde de ölçüm yönünün ters olduğu dikkate ara yüzey geçişlerinde Ti miktarının ani şekilde azalması ve homojen bir dağılımın olmaması diğer B numunelerine göre daha düşük bir sinterleme gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde Ti6AL4V malzemesine $ZrO_2$ eklendiğinde fırında soğutulan ısıl işlem sonucunda elde edilen numunelerde sinterlemenin daha etkili bir şekilde gerçekleştiğidir. EDS grafikleri de incelendiğinde özellikle Al ve O malzemelerinin aynı bölgelerde pik yapmasının o bölgede oksitlenme sonucu ile $A_{l2}O_3$ oluştuğunu göstermektedir. Özellikle A2, A5, B3 ve B6 numunelerinde bu durum açıkça görülmektedir. Buna ek olarak B2 numunesinin matris kısmında Al, O ve Ti malzemelerinin yoğunluklu olarak pik yapması bu bölgelerde hem rutil hem de $Al_2O_3$ faz oluşumu sonucu oluştuğu düşünülmektedir. Benzer şekilde Li ve arkadaşları (2015) da yapıkları çalışmada ara yüzey SEM görüntüleri hakkında detaylı bilgi verilmektedir. Çalışmada, Ti6AL4V yüzeylerine uygulanan mikro-ark oksidasyon işlemi sonrası oluşan kaplamaların ara yüzeylerindeki yapısal özellikler SEM görüntüleri ile incelenmişlerdir [27]. Makalede, farklı oranlarda $ZrO_2$ katkısı yapılan kaplamaların ara yüzeylerindeki SEM görüntüleri sunulmuştur. Görüntülerde, $ZrO_2$ parçacıklarının kaplamalardaki dağılımı ve kaplama yüzeyine olan tutunması gibi yapısal detaylar açıkça görülmüştür. Mevcut çalışma da ise farklı geometriler için aynı oranda $ZrO_2$ kullanımı farklı geometriler için değerlendirilmiştir olup $ZrO_2$ nin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Özellikle altıgen ve daire şekli ile yapılan fırında soğumaya bırakılmış sinterleme işleminde (B5 be B2) en iyi sinterleme sonucu elde edilmiş olup eğme testi sonuçlarında en iyi sonuçlar bunlarda elde edilmiştir.

### 5.3. XRD Analizi Sonuçları

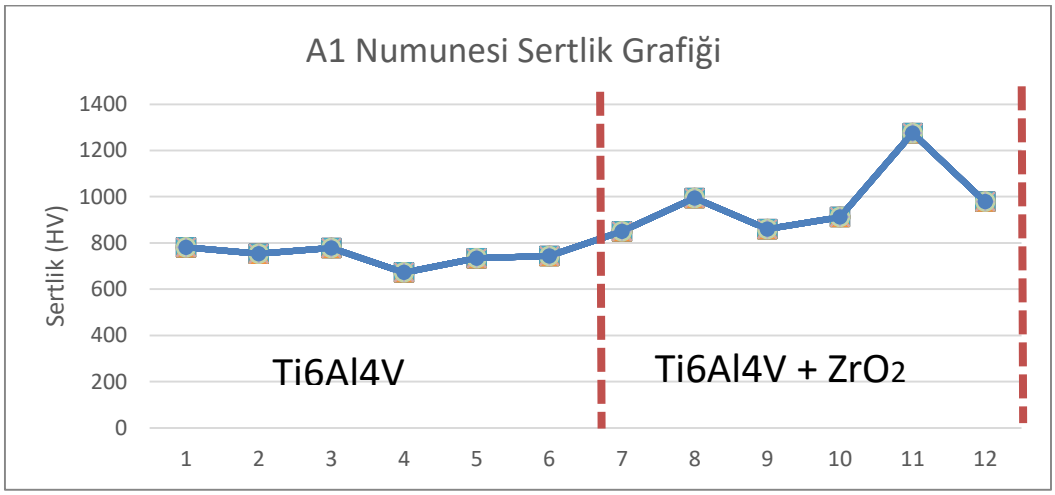
XRD analizi BRUKER marka D8 ADVANCE model cihaz ile yapılmıştır. Bu analiz ile sinterlenme sonucunda yüzeyde oluşan fazların belirlenmesi sağlamıştır. XRD analizi A2, A4, B2 ve B4 numunelerinin XRD numunelerine yapılmıştır. Yapılan XRD analizlerinde pik değerleri ile eşleştirme yapıldığında Rutil ($TiO_2$), $A_{l2}O_3$, ve $ZrO_2$ malzemeleri gözlemlenmiştir. Bu durum EDS görüntülerindeki Al ve O piklerinin aynı bölgede bulunup $A_{l2}O_3$ oluşturmasını açıklamaktadır. Öte yandan sinterleme sonrasında hem havada soğutulan hem de fırında soğutulan numunelerde atmosferik ortamdan kaynaklanan oksijen sonunda oksitleşme olduğunu kanıtlamaktadır.



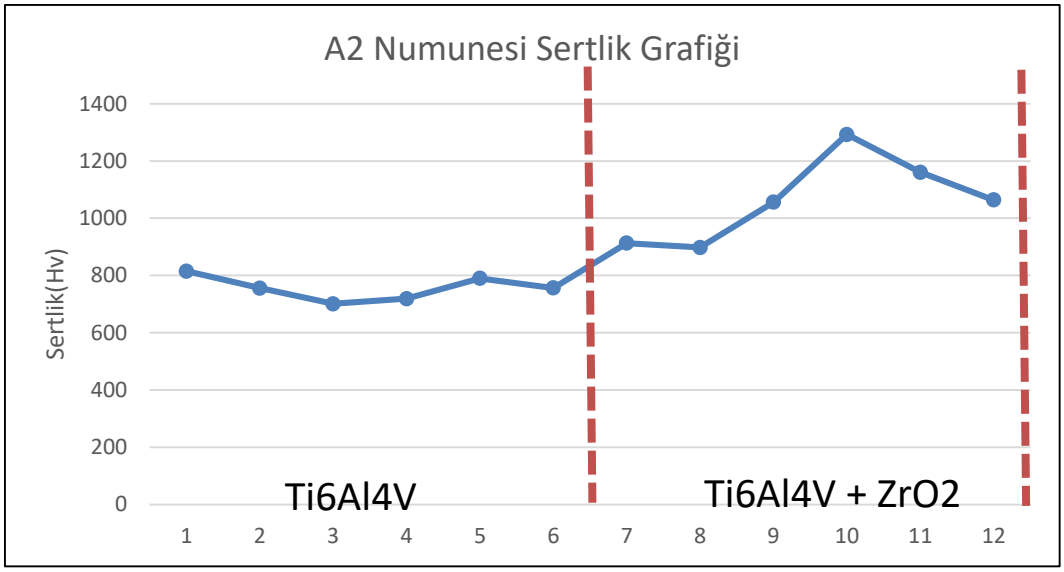

Şekil 5.35. A2, A4, B2, B4 numunelerine yapılan XRD analizi sonuçları

## 5.4. Mikro Sertlik

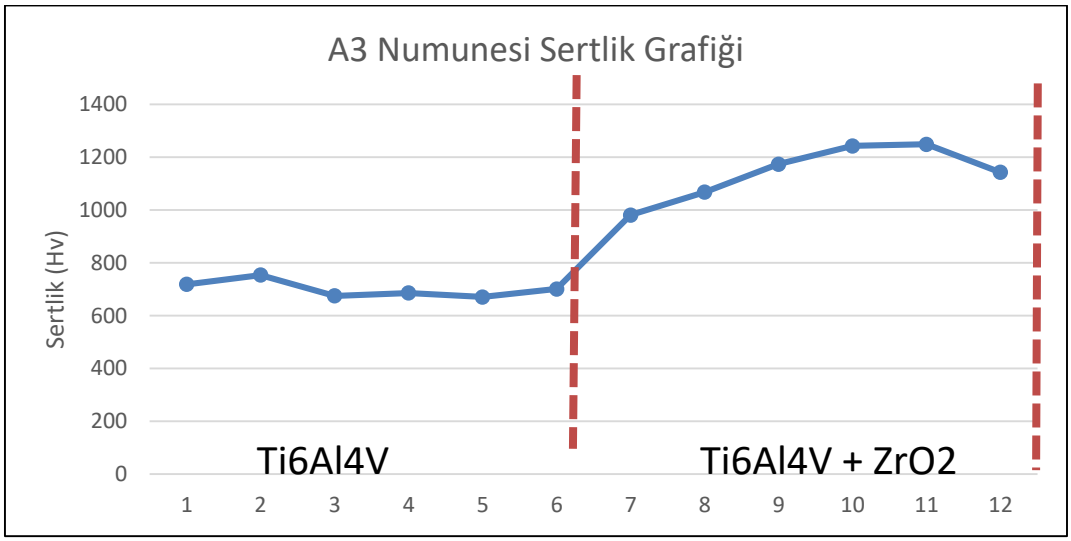
Sertlik testi sonuçları incelendiğinde ilk olarak $ZrO_2$ tozu kullanılmadan ve herhangi bir ısıl işlem uygulanmadan Ti6AL4V numunenin sertlik değeri 352 HV olarak ölçülmüş ve literatür ile uyumludur [47]. $ZrO_2$ tozu sıkıştırılıp sinterlenmiş numunelerin Vickers mikro sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümü yapılırken doğrusal hat boyunca matris malzemesi olan Ti6AL4Vmalzemesinden ölçüm alınmıştır. Ayrıca bunun devamı olan takviye elemanı $ZrO_2$ ye geçiş ara yüzünde de sertlik ölçümü alınmıştır. Bu ara yüzde hem Ti6AL4V hem de $ZrO_2$ bulunmaktadır. Yapılan bu sertlik ölçümlerinin şematik görüntüsü Şekil 4.11 de verilmiştir. Farklı tasarlanan boşluk yapısına sahip geometrilerin mikro sertlik test sonuçları  Şekil 5.36-Şekil 5.41'e kadar olan grafiklerde verilmiştir.



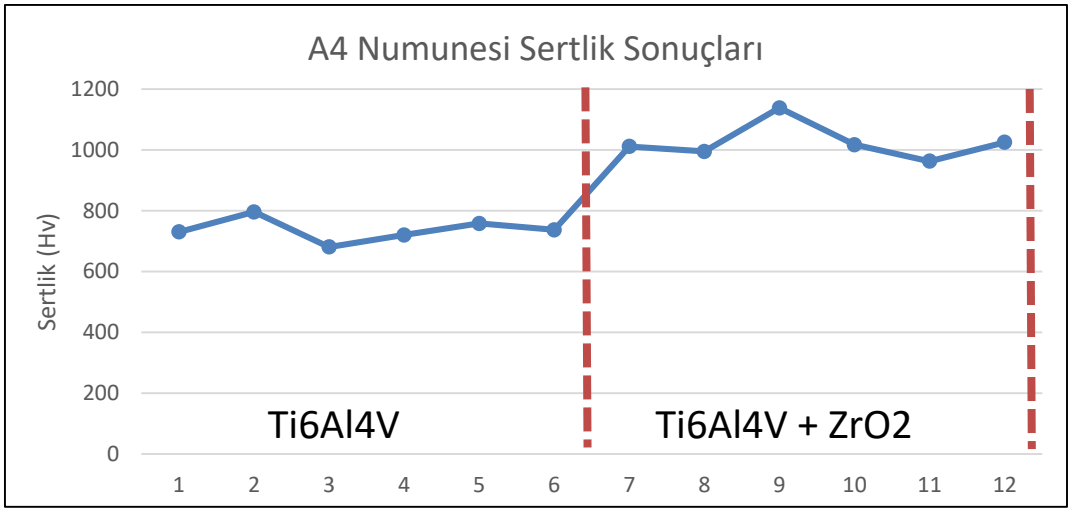

Şekil 5.36. A1 numunesinin sertlik testi sonuçları



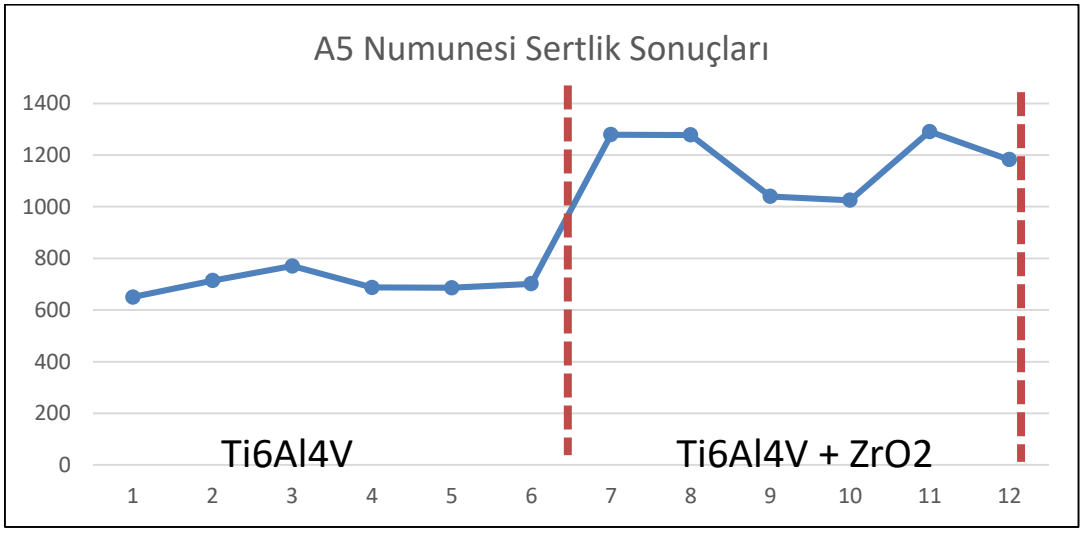

Şekil 5.37. A2 numunesinin sertlik testi sonuçları



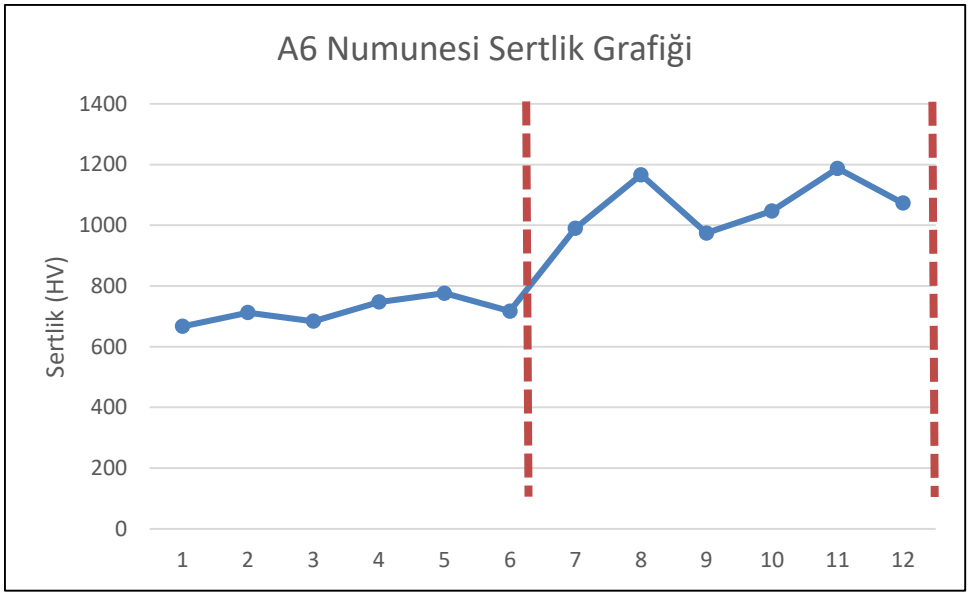

Şekil 5.38. A3 numunesinin sertlik testi sonuçları




Şekil 5.39. A4 numunesinin sertlik testi sonuçları



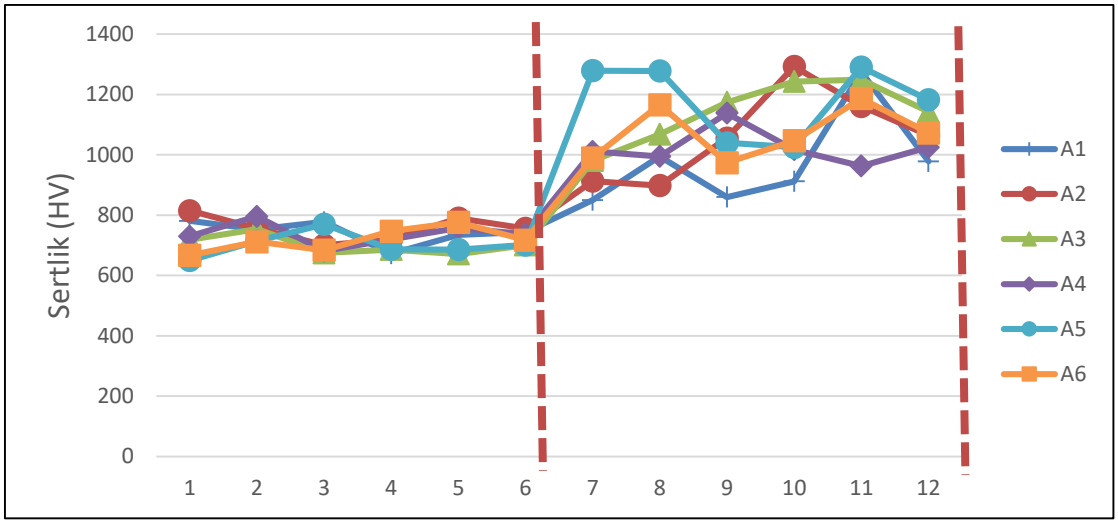

Şekil 5.40. A5 numunesinin sertlik testi sonuçları




Şekil 5.41. A6 numunesinin sertlik testi sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde, matris yapıda, yani seramik tozlarının bulunmadığı dış yüzeyde Ti6AL4V malzemesinin sertlik değeri artış göstermiştir. Çünkü seramik tozları sinterlenirken 1.200 °C ye hızlı bir şekilde çıkılmış ve havada soğutulmuştur. El-Hadad ve arkadaşlarının 2017 yılında yaptıkları çalışmada farklı ısıl işlem uygulamalarında sıcaklığın 970 °C ye çıkarılmış Ti6AL4V numunelerinin havada soğutma sonrasında sertlik değeri de maksimum 750 HV çıkmış ve elde ettiğimiz sonuçlar ile örtüşmüştür [48].

Aynı şekilde ara yüzey sertlik değerleri incelendiğinde sertlikte önemli düzeyde artış olduğu ölçülmüştür. Özellikle, $ZrO_2$ seramiğinin sertlik değeri 1.300-1.500 HV arasında olduğu literatürde bilindiğinden [49], ara geçiş yüzeyinde 1.100 HV'lere varan sertlik değerleri başarılı bir sinterlemenin olduğunu göstermiştir. Deneylerde farklı geometrik desenler kullanılmış ve geometrik desenlerin sertlik değişimine etkisinin incelenmesi için tüm sertlik sonuçları 5.31 ile verilen grafikte birleştirilerek incelenmiştir. Grafik incelendiğinde matris yapıdan takviye elemanı yüklenen bölge arasındaki sertlik değişimlerinde, geometrinin sertliğe etkisi üzerinde bir bağlantı bulunamamıştır. Seramik takviye bölgelerinde, seramik malzemelerin sertlik ölçümünde farklı cihazların kullanımı gerektirdiğinden sertlik ölçümü yapılamamıştır.




Şekil 5.42. A1-A6 numunelerinin sertlik sonuçları

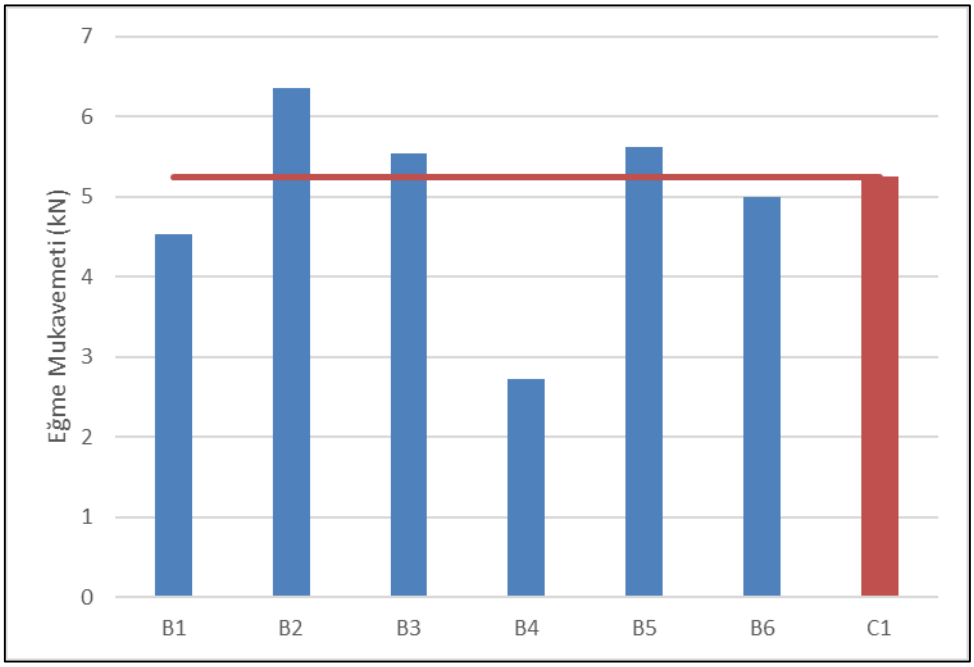
Şekil 5.42 ile verilen toplu sertlik değişimleri incelendiğinde, matristen geometrik desene doğru giden doğrultuda yapılan ölçümler görüntülenmektedir. Seramik takviyeli bölgeye geçildiğinde grafik ortasında altıncı ölçüm noktası geçildiğinde bazı değerlerde düşüş ölçülse de seramik yapıya yaklaşıldıkça sertlikte artma eğiliminin olduğu gözlenmiştir. Yükselme eğiliminde bazı noktalarda düşüşün olmasının boşluklu yapılardan kaynaklandığı düşünülmüştür. Sertlik değerlerinden tespit edilen önemli bir husus ise arayüzeyden sonra seramiğe geçiş bölgesine yaklaştıkça bütün desenlerdeki sertlik değerlerinde (on ikinci ölçüm değerinde) 1.300 HV değerlerinde veya üzerinde olması beklenirken ani bir düşüş gözlenmiştir. Bunun nedeni ise soğuma sırasında farklı faz yapılarının oluşması ile iki bölge arasında belirgin boşluklar meydana gelebilmektedir. Benzer şekilde hem eklemeli imalat sonrası üretilen pürüzlü yüzey hem de ısıl işlem fırınında geçirilen sürede boşluklu bir yüzey oluştuğu ilerleyen bölümlerde verilecek taramalı elektron mikroskopu ve optik mikroskop mikro fotoğraflarından da görülmektedir.

## 5.5. Üç Nokta Eğme Testi Sonuçları

Üç nokta eğme testi, fırında soğutulmuş olan B ve C grubu numunelere uygulanmıştır. Test sonuçları numunelere göre sınıflandırılarak Çizelge 5.3 ve Şekil 5.1 ile verilmiştir. B grubu numuneleri geometrik desen içerisinde $ZrO_2$ takviye bulunmaktayken C numunesinde herhangi bir takviye elamanı bulunmamaktadır. C numunesi sonuçları referans olarak kullanılmıştır.

Çizelge 5.3. Üç nokta eğme testi sonuçları

| ISIL İŞLEM TÜRÜ | B | | | | | | C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| NUMUNE NO | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | C1 |
| BOŞLUK ŞEKLİ |  |  |  |  |  |  | - |
| EĞME TESTİ SONUÇLARI (kN) | 4,53 | 6,36 | 5,55 | 2,72 | 5,62 | 5,00 | 5,25 |
| Ara Yüzey Kalınlığı (mm) | 0,40 | 0,43 | 0,40 | 0,43 | 0,48 | 0,43 | - |
| Açıklama | ZrO2 doldurulmuş numuneler<br>1200 °C ye 10°C /dk hızla çıkarılmış<br>1200 °C de 60dk bekletilmiş<br>2 °C/dk hızla fırın içerisinde soğutulmuştur. | | | | | | ZrO2 bulunmayan boşluksuz numune<br>1200 °C ye 10°C /dk hızla çıkarılmış<br>1200 °C de 60dk bekletilmiş<br>2 °C/dk hızla fırın içerisinde soğutulmuştur. |




Şekil 5.43. Üç nokta eğme testi sonuçları grafiği

Şekil 5.43 ile verilen grafikte eğme testi sonuçlarından B2, B3 ve B5 numunelerinin daha yüksek eğme mukavemetine sahip olduğu görülmektedir. Bu numunelerde eğme testi sonuçlarının daha yüksek çıkmasının nedeni takviye elemanı ile iyi bir ara yüzey bağlantısı oluşturduğu ve böylelikle eğme mukavemetinde de artış meydana geldiği gerek optik gerekse SEM fotoğraflarından görülmüştür. Eğme mukavemetinde çentik etkisinin önemli bir etkisi olduğu değerlendirildiğinde, numune üzerindeki geometrinin keskin köşeli olup olmaması sonuçları etkilemektedir. En yüksek eğme mukavemetine sahip olan B2 numunesinin eğme mukavemeti referans malzemeye göre % 21 oranında yüksek elde

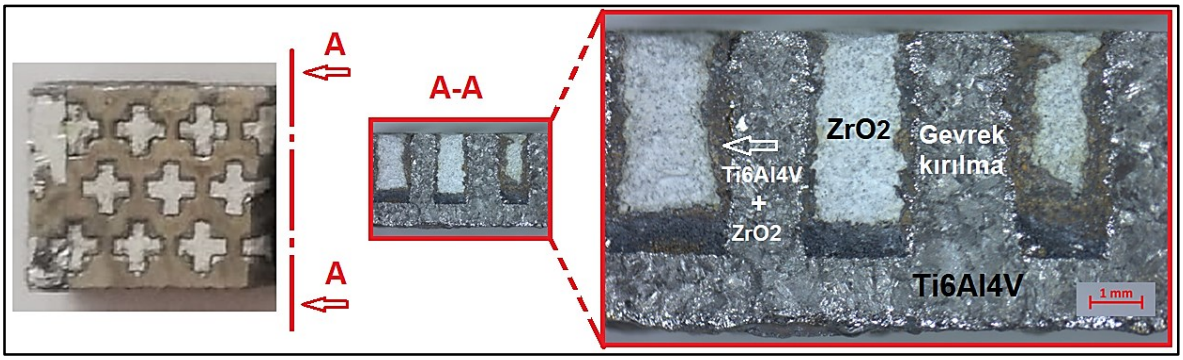
edilmiştir. B3 ve B5 geometrilerinde de referans malzemeye göre daha iyi eğilme direncinin oluştuğu görülmüştür. Bunun sebebi radyuslu yüzeyde toz sıkıştırılmasının daha etkili olacağı bu sebeple sinterleme sonrası malzemeler arası bağ oluşumunun daha iyi olacağı durumuna bağlanmıştır. Bununla birlikte sinterleme sonrası keskin köşe açılarının dramatik şekilde artışı ve daha geniş radyüslü formlara gelmesi eğme sırasında stres, çatlak oluşumu ve ilerlemesini tetikleyecek bölgeleri azaltmıştır. Bunun etkisini özellikle üçüncü sırada en iyi sonucu veren B3 yapısında görmekteyiz. En düşük eğme mukavemetine sahip B4 numunesinde ise matris yüzeyine yerleşimleri de göz önüne alındığında çok sayıda keskin köşenin numune üzerinde komşu olması ve önceki bölümlerde gösterilen ara bağlantı yüzeylerinde boşlukların olması gözetildiğinde çentik etkisinin yoğun bir şekilde etkilediği düşünülmüştür. . Diğer bir hususta üç nokta eğme testinde eğme ekseni doğrultusunda yerleşen her bir elemanda mevcut iki köşenin bu numunenin eğme mukavemetini düşürdüğü de diğer bir sonuç olarak ortaya konulmaktadır.

Toz metalürjisinde sinterleme sıcaklığının mekanik özelliklere etkisi incelendiğinde benzer şekilde sinterleme sıcaklığının mekanik özelliklere doğrudan etki ettiğini göstermektedir. Kurgan (2013) yılında yaptığı çalışmada toz metalürjisi yöntemiyle üretilen 316L paslanmaz çelik numunelerinin sinterleme sıcaklığının üç nokta eğme test sonuçları üzerindeki etkisini incelemiştir. Makalede, farklı sinterleme sıcaklıklarında (1100-1300°C) üretilen numunelerin mekanik özellikleri (yükseklik kaybı, eğilme gerilmesi, maksimum yük, kırılma yükü vb.) ölçülmüş ve sonuçlar analiz etmiştir. Numunelerin yoğunluğu artan sinterleme sıcaklıkları ile artmıştır. Ayrıca numunelerin basınç dayanımı ve eğilme dayanımı artan sinterleme sıcaklıkları ile artmıştır, ancak sinterleme sıcaklığı 1300 °C'nin üzerine çıktığında dayanım değerlerinde azalma gözlemlemiştir. Numunelerin darbe dayanımı ise sinterleme sıcaklığı arttıkça artmıştır [50]. Bu durum mevcut çalışmamızda olduğu gibi fırında soğumaya bırakılan numunelerin daha iyi sinterlendiğini ve eğme testi sonuçlarının iyileştiğini desteklemektedir. Scudino ve arkadaşları (2009) da yaptıkları çalışmada da kalıp geometrisinin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Çalışmalarında farklı kalıp geometrileri (disk, silindir ve kare prizma) ve farklı toz partikül boyutları kullanılarak alüminyum-magnezyum ve alüminyum-silikat kompozitleri üretilmişlerdir. Daha sonra, numunelerin sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikleri ölçmüşleridir. Yaptıkları çalışma sonucunda kalıp geometrisi ve toz partikül

boyutunun kompozitlerin mekanik özellikleri üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu göstermiştir. Özellikle, disk silinir kalıp geometrisi kullanılarak üretilen kompozitlerin kare ve prizma kalıp geometrisi kullanılarak üretilenlere göre daha yüksek sertlik, çekme dayanımı ve akma dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, daha küçük toz partikül boyutları kullanılarak üretilen kompozitlerin daha yüksek sertlik ve çekme dayanımına sahip olduğu bulmuşlardır [51]. Bu durumda mevcut çalışmamızda da daire ve altıgen şeklindeki numunelerin (B2 ve B5) eğme testi sonuçları (6,36 ve 5,52 kN) diğer numunelere göre yüksek çıkmış olup mevcut çalışmamızı aynı şekilde desteklemektedir.

Üç nokta eğme testi sonucunda kırılan B2 numunelerinin kırılma yüzeyleri incelendiğinde kesit yüzeylerde sinterlenmenin başarılı bir şekilde gerçekleştiği görülmektedir.

Şekil 5.44'te B1 numunesinin kesit yüzeyinin optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde Ti6AL4V malzemesinin sinterlenme sonucunda gevrek bir yapıya geçtiği ve plastik deformasyona uğramadan boşluklu bölgelerden kırıldığı görülmektedir.




Şekil 5.44. Üç nokta eğme testi sonucunda kırılan B1 numunesinin üstten görüntüsü ve kesit görüntüsü

Çentikli bir parça zorlandığı, zaman çentiğin tabanına dik bir gerilme meydana gelir. Kırılmanın, başlaması bu gerilmenin etkisiyle olur. Aynı şekilde kırılan numunenin üstten görüntüsüne bakıldığında boşluklu bölgeden çentik etkisi ile kırıldığı görülmektedir. Oluşan kırıkların şekli geometrinin merkez bölgesinde tasarıma bağlı olarak üniform olmayan bir şekilde değişiklik göstermektedir. Ti6AL4V malzemesine zirkonya eklenmesi özellikle mikroyapı karakteristiğine ve mekanik özelliklerine önemli oranda etki etmektedir. Masooth ve arkadaşları (2022) yılında yaptıkları çalışmada $ZrO_2$ takviyesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi incelenmişlerdir. Mekanik test sonuçları, $ZrO_2$ takviyesinin

kompozitlerin sertliğini, çekiş mukavemetini ve kırılma tokluğunu arttırdığını göstermiştir. Kırılma yüzeyi analizi sonuçları, $ZrO_2$ takviyeli kompozitlerin kırılma yüzeylerinin daha düzgün ve homojen olduğunu göstermiştir. Bu sonuçlar, $ZrO_2$ parçacıklarının matris malzemeden farklı davrandığını ve kırılmayı engelleyici bir rol oynadığını düşündürmektedir [52]. Bu durum mevcut çalışmamızdaki $ZrO_2$ seramiğinin sıkıştırılıp sinterlemesinin B2 ve B5 numunelerinde %21 ve % 6 lık eğilme direnci artışıyla kendini göstermektedir.

# 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışmasında Ti6AL4V malzemesine farklı desen formları oluşturulması ve seramik takviye ilavesi ile elde edilen kompozit yapıların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Malzemenin mekanik özelliklerinin geliştirilmesi için ısıl işlem, alaşımlama ya da başka malzemelerle birleştirip kompozit yeni malzemeler üretilebilir. Bu çalışmada eklemeli imalatta yaygın olarak kullanılan Ti6AL4V malzemesinin sertlik ve eğilme direncinin arttırılabilmesi için toz metalürjisi metodu ile seramik tozlarını mevcut malzemenin içindeki boşluklu yapılara 750 MPa basınçta sıkıştırıp sinterlenmiştir.

Sinterlenme esnasında iki ayrı parametre kullanılarak 1200 °C ye kadar 10 °C/s hızla çıkarılmış, ilk parametrede havada soğutma ve ikinci parametrede suda soğutma yapılmıştır. Oda koşullarında α+β fazında bulunan Ti6AL4V malzemesinin hızlı soğuma ile sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Oda sıcaklığında 350 HV olan sertlik 750 HV' lere kadar yükselmiştir.

Aynı şekilde bu koşullarda sinterlenen $ZrO_2$ tozu ile sertlik ara yüzeyde 1000 – 1300 HV' lere kadar çıkmıştır. Farklı geometrilerdeki boşluklar değerlendirildiğinde tozun sıkıştırılabilirliğinin köşeli yapılarda daha az olması beklenmektedir. Fakat sertlik sonuçlarında geometriye bağlı sertlik değişimi gözlemlenmemiştir. Öte yandan her bir numunenin ara yüzeyinde sertlik ölçümü yapılırken noktalar rastgele seçilip ortalaması alınmıştır. Bunun sonucunda geometri ile sertlik sonuçları arasında bir ilişki bulunamamıştır.

Optik mikroskop incelendiğinde ise fırın içerisinde yavaş bir şekilde soğumaya bırakılan malzemelerde ara yüz kalınlığının havada soğumaya göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumda fırın içerişimde yavaş soğumaya bırakılan numunelerin yüksek sıcaklıklarda daha uzun süre bulunmasına bağlanmıştır.

SEM görüntüleri de incelendiğinde aynı ısıl işleme uğramış farklı geometrilere sahip numunelerde (A1 ve A2) köşe geometrisine sahip A1 numunesi için ara yüzey boşlukları sıkıştırılma esnasında sorun oluşturduğundan yer yer boşlukların oluştuğu görülmüştür. Bu durum toz metalürjisinde keskin kenarlı geometriler yerine radyuslu kalıp geometrilerinin

seçilmesi gerektiği durumunu desteklemektedir. Öte yandan farklı ısıl işlemlerin aynı geometrilerinin SEM görüntüleri incelendiğinde ise yavaş soğumaya bırakılmış B numunelerinde boşlukların daha az oluştuğu görülmüştür.

Üç nokta eğme testi sonuçlarına bakıldığında ise kalıp geometrisinin sıkıştırılmaya etki ettiği keskin köşeli geometrilerde eğilme direncinin diğer geometrilere göre daha düşük çıktığı görülmüştür. Özellikle altıgen ve daire şekilli boşluklarda sıkıştırılabilme kabiliyetinin yüksek olması ile gerçekleşen sinterlemede eğilme testinde kırılması sonrası oluşan kuvvet değeri daha yüksek çıkmıştır. Kırılma yüzeyinin kesit görüntüsüne de bakıldığında bu durumun desteklendiği görülmüştür.

Tasarımsal olarak incelendiğinde ilk numunelere nazaran sade bir tasarım yapılmıştır. Sebebi kafes yapı geometrilerinde $ZrO_2$ tozunun istenilen şekilde sıkıştırılıp sinterlenememesidir. Bu yüzden sonradan tasarlanan parçalar eklemeli imalata özel bir şekilde tasarlanamamıştır. Ayrıca bu farklı geometriler tasarlanırken hepsinde boşluk hacimleri eşit olarak tasarlanmıştır. İlerleyen çalışmalarda bu tasarınlar değiştirilerek sadece eklemeli imalata uygun efektif parçalar tasarlanabilir.

# KAYNAKLAR


1. Astm, I. (2015). ASTM52900-15 standard terminology for additive manufacturing—general principles—terminology. *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 3(4), 5.

2. Özsoy, K., Duman, B. (2017). Eklemeli İmalat (3 Boyutlu Baski) Teknolojilerinin eğitimde kullanilabilirliği. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 1(1), 36-48.

3. Gökhan, Ö., (2020). Eklemeli üretim teknolojileri üzerine bir derleme. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 606-621.

4. Sürmen, H. K. (2019). Eklemeli İmalat (3b Baskı): Teknolojiler Ve Uygulamalar. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), 373-392.

5. Attar, E. (2011). *Simulation of selective electron beam melting processes*. Friedrich-Alexander-Universitaet Erlangen-Nuernberg (Germany).

6. İnternet:Ti6Al4V metal tozunun özellikleri , URL:https://www.advancedpowders.com/powders/titanium/ti-6al-4v-23/Son Erişim Tarihi: 04.11.2022

7. Odenberger, E. L. (2005). *Material characterisation for analyses of titanium sheet metal forming,* Doktora Tezi, Luleå tekniska universitet.

8. Ece, R. E. (2011). *Titanyum sac malzemelerin elektrikli ısıtma yöntemi ile şekillendirilebilme kabiliyetinin iyileştirilmesi* , Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.

9. Titanium review, in Encyclopedia Britannica. (2007). 485-553.

10. Calin, M., Gebert, A., Ghinea, A. C., Gostin, P. F., Abdi, S., Mickel, C., Eckert, J. (2013). Designing biocompatible Ti-based metallic glasses for implant applications. *Materials Science and Engineering: C*, 33(2), 875-883.

11. Attar, H., Bönisch, M., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S., Eckert, J. (2014). Selective laser melting of in situ titanium–titanium boride composites: processing, microstructure and mechanical properties. *Acta* Materialia, 76, 13-22.

12. Attar, H., Calin, M., Zhang, L. C., Scudino, S., Eckert, J. (2014). Manufacture by selective laser melting and mechanical behavior of commercially pure titanium. *Materials Science and Engineering: A*, 593, 170-177.

13. Kumar, C. A. V., Rajadurai, J. S. (2016). Influence of rutile (TiO2) content on wear and microhardness characteristics of aluminium-based hybrid composites synthesized by powder metallurgy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(1), 63-73.

14. Ivasishin, O. M., (2019). "Multi-layered structures of Ti-6Al-4V alloy and TiC and TiB composites on its base fabricated using blended elemental powder metallurgy." *Journal of Materials Processing Technology* 269 172-181.

15. Jin, J.B. (2022). Effect of ceramic types on the microstructure and corrosion behavior of titanium matrix composites produced by selective laser melting. *Journal of Alloys and Compounds*,. 918:165704.

16. Huang, L., Yang, F., Guo, Y., Zhang, J., Geng, L. (2009). Effect Of Sintering Tepmerature On Microstructure Of Ti 6 Al 4 V Matrix Composites. *International Journal of Modern Physics B*, 23, 1444-1448.

17. Yu, C., Liu, X., Li, Y., Song, C., Ma, G., Niu, F., Wu, D. (2021). Investigations of the microstructure and performance of TiCp/Ti6Al4V composites prepared by directed laser deposition. *International Journal of Mechanical Sciences*, 205, 106595.

18. Yuan, Z., Liu, H., Ma, Z., Ma, X., Wang, K., Zhang, X. (2022). Effect of heat treatment on the microstructure and properties of CoCrFeNiMo0. 2 particles reinforced titanium matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 928, 166985.

19. Chen, Y., Liu, D., Li, F., Li, L. (2008). WCp/Ti–6Al–4V graded metal matrix composites layer produced by laser melt injection. *Surface and Coatings Technology*, 202(19), 4780-4787.

20. Anandajothi, M., Ramanathan, S., Ananthi, V., Narayanasamy, P. (2017). Fabrication and characterization of Ti6Al4V/TiB 2–TiC composites by powder metallurgy method. *Rare Metals*, 36, 806-811.

21. Hu, R. H., Lim, J. K. (2010). Hardness and wear resistance improvement of surface composite layer on Ti–6Al–4V substrate fabricated by powder sintering. *Materials Design* (1980-2015), 31(5), 2670-2675.

22. Tsukamoto, H., Kunimine, T., Yamada, M., Sato, H., Watanabe, Y. (2012). Microstructure and mechanical properties of Ti-ZrO2 composites fabricated by spark plasma sintering. In *Key Engineering Materials* (Vol. 520, pp. 269-275). Trans Tech Publications Ltd.

23. Barrena, M. I., Matesanz, L., de Salazar, J. G. (2009). Al2O3/Ti6Al4V diffusion bonding joints using Ag–Cu interlayer. *Materials Characterization*, 60(11), 1263-1267.

24. Silva Jr, M., Ramos, A. S., Simões, S. (2021). Joining Ti6Al4V to alumina by diffusion bonding using titanium interlayers. *Metals*, 11(11), 1728.

25. Silva, M., Ramos, A. S., Vieira, M. T., Simões, S. (2021). Diffusion bonding of Ti6AL4V to $Al_2O_3$ using Ni/Ti reactive multilayers. *Metals*, 11(4), 655.

26. Wang, J., Li, L., Lin, P., Wang, J. (2018). Effect of TiC particle size on the microstructure and tensile properties of TiCp/Ti6AL4V composites fabricated by laser melting deposition. *Optics & Laser Technology*, *105*, 195-206.

27. Pouzet, S., Peyre, P., Gorny, C., Castelnau, O., Baudin, T., Brisset, F., Gadaud, P. (2016). Additive layer manufacturing of titanium matrix composites using the direct metal deposition laser process. *Materials Science and Engineering: A*, 677, 171-181.

28. Li, H., Sun, Y., Zhang, J. (2015). Effect of $ZrO_2$ particle on the performance of micro-arc oxidation coatings on Ti6AL4V. *Applied Surface Science*, 342, 183-190.

29. Rong, T., Gu, D., Shi, Q., Cao, S., Xia, M. (2016). Effects of tailored gradient interface on wear properties of WC/Inconel 718 composites using selective laser melting. *Surface and Coatings Technology*, 307, 418-427.

30. AlMangour, B., Grzesiak, D. (2016). Selective laser melting of TiC reinforced 316L stainless steel matrix nanocomposites: Influence of starting TiC particle size and volume content. *Materials and Design*, 104, 141-151.

31. AlMangour, B., Kim, Y. K., Grzesiak, D., Lee, K. A. (2019). Novel TiB2-reinforced 316L stainless steel nanocomposites with excellent room-and high-temperature yield strength developed by additive manufacturing. *Composites Part B: Engineering*, 156, 51-63.

32. Wang, Y., Gao, F., Yang, J., Zhu, Y., Fang, C., Wang, S., Zhao, G. (2017). Comparative study on corrosion characteristics of $Al_2O_3$/316L and $TiO_2$/316L stainless steel in supercritical water. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(31), 19836-19842.

33. Cree, D., Pugh, M. (2010). Production and characterization of a three-dimensional cellular metal-filled ceramic composite. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(14), 1905-1917.

34. Shen, X. J., Zhang, C., Yang, Y. G., Liu, L. (2019). On the microstructure, mechanical properties and wear resistance of an additively manufactured Ti64/metallic glass composite. *Additive Manufacturing*, 25, 499-510.

35. Auger, J. M., Saunier, S., Valdivieso, F. (2011). Characterisation of sintering of alumina matrix–stainless steel dispersion composite and interaction between chromium, carbon and alumina during powder metallurgy process. *Powder Metallurgy*, 54(4), 522-528.

36. Zhang, C., Yang, F., Chen, C., Guo, Z. (2021). The microstructure and mechanical properties of extra low interstitials (ELI) Ti-6Al-4V alloys manufactured from hydride–dehydride (HDH) powder. *Journal of Alloys and Compounds*, 873, 159757.

37. Piconi, C., Maccauro, G. (1999). Zirconia as a ceramic biomaterial. Biomaterials, 20(1), 1-25.

38. Bultan, Ö., Öngül, D., Türkoğlu, P. (2010). Zirkonyanin Mikroyapilarina Ve Üretim Şekillerine Göre Siniflandirilmasi. *Journal of Istanbul University Faculty of Dentistry*, 44(3), 197-204.

39. Guazzato, M., Albakry, M., Ringer, S. P., Swain, M. V. (2004). Strength, fracture toughness and microstructure of a selection of all-ceramic materials. Part II. Zirconia-based dental ceramics. *Dental Materials*, 20(5), 449-456.

40. Lüthy, H., Loeffel, O., Hammerle, C. H. (2006). Effect of thermocycling on bond strength of luting cements to zirconia ceramic. *Dental Materials,* 22(2), 195-200.

41. Kosmač, T., Oblak, C., Jevnikar, P., Funduk, N., Marion, L. (1999). The effect of surface grinding and sandblasting on flexural strength and reliability of Y-TZP zirconia ceramic. *Dental Materials*, 15(6), 426-433.

42. Christel, P., Meunier, A., Heller, M., Torre, J. P., Peille, C. N. (1989). Mechanical properties and short-term in vivo evaluation of yttrium-oxide-partially-stabilized zirconia. *Journal of Biomedical Materials Research*, 23(1), 45-61.

43. Lin, J. D., Duh, J. G. (2003). Fracture toughness and hardness of ceria-and yttria-doped tetragonal zirconia ceramics. *Materials Chemistry and Physics*, 78(1), 253-261.

44. Guazzato, M., Albakry, M., Quach, L., Swain, M. V. (2004). Influence of grinding, sandblasting, polishing and heat treatment on the flexural strength of a glass-infiltrated alumina-reinforced dental ceramic. *Biomaterials*, 25(11), 2153-2160.

45. URL:https://depo.btu.edu.tr/dosyalar/makine/Dosyalar/3%20Nokta%20Egme%20Deneyi%20Foyu(1).pdf/Son Erişim Tarihi: 18.12.2022

46. Ferri, O. M., Ebel, T., Bormann, R. (2009). High cycle fatigue behaviour of Ti–6Al–4V fabricated by metal injection moulding technology. *Materials Science and Engineering: A*, 504(1-2), 107-113.

47. Velmurugan, C., Senthilkumar, V., Sarala, S., Arivarasan, J. (2016). Low temperature diffusion bonding of Ti-6Al-4V and duplex stainless steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 234, 272-279.

48. Poondla, N., Srivatsan, T. S., Patnaik, A., Petraroli, M. (2009). A study of the microstructure and hardness of two titanium alloys: Commercially pure and Ti–6Al–4V. *Journal of Alloys and Compounds*, 486(1-2), 162-167.

49. El-Hadad, S., Nady, M., Khalifa, W., Shash, A. (2018). Influence of heat treatment conditions on the mechanical properties of Ti–6Al–4V alloy. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 57(2), 186-193.

50. Bordin, A., Bruschi, S., Ghiotti, A., Bucciotti, F., Facchini, L. (2014). Comparison between wrought and EBM Ti6AL4V machinability characteristics. In *Key Engineering Materials* (Vol. 611, pp. 1186-1193). Trans Tech Publications Ltd.

51. Kurgan, N. (2013). Effects of sintering atmosphere on microstructure and mechanical property of sintered powder metallurgy 316L stainless steel. *Materials and Design* (1980-2015), 52, 995-998.

52. Scudino, S., Liu, G., Prashanth, K. G., Bartusch, B., Surreddi, K. B., Murty, B. S., Eckert, J. (2009). Mechanical properties of Al-based metal matrix composites reinforced with Zr-based glassy particles produced by powder metallurgy. *Acta Materialia*, 57(6), 2029-2039.

53. Masooth, P. H. S., Bharathiraja, G., Jayakumar, V., Palani, K. (2022). Microstructure and mechanical characterisation of $ZrO_2$ reinforced Ti6AL4V metal matrix composites by powder metallurgy method. *Materials Research Express*, 9(2), 020003.



*Gazili olmak ayrıcalıktır*