

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AA2024/Cu-Ni-Cr TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Gül GEDİK GÜLTEKİN

KASIM 2023

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

AA2024/Cu-Ni-Cr TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN
ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Gül GEDİK GÜLTEKİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 /09 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 02 / 11 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

“AA2024/Cu-Ni-Cr Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen bilgi ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI’ya, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Hasan GEDİKLİ’ye ve Sayın Doç. Dr. Temel VAROL’a, tez çalışması süresinde hiçbir yardımdan kaçınmayan Öğr. Gör. Dr. Özlem CANPOLAT’a ve Arş.Gör. Serhatcan Berk AKÇAY’a, tez çalışmamı FAY-2023-10852 numaralı proje ile destekleyen Karadeniz Teknik Üniversitesi BAP birimine teşekkür ederim.

Her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan aileme minnettarlığımı sunarım.

Son olarak, yoğun çalışma sürecimde küçük olmalarına rağmen gösterdikleri büyük sabırdan dolayı çocuklarım Kıvanç, Ayçelen ve Nergis GÜLTEKİN’e teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Gül GEDİK GÜLTEKİN

Trabzon 2023

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “AA2024/Cu-Ni-Cr Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Üretimi Ve Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI’nın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/11/2023

Gül GEDİK GÜLTEKİN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Metal Matrisli Kompozitler	2
1.2.1. Alüminyum Matrisli Kompozitler.....	4
1.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler.....	5
1.3. Takviye Malzemesi.....	6
1.4. Matris Takviye Arası (İntermetalik) Bileşikler.....	8
1.4.1. Arayüzey Oluşumu.....	9
1.4.2. Metaller Arası Bileşikler (İntermetalikler).....	11
1.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri	12
1.5.1. Sıvı Hal Üretim	13
1.5.2. Katı Hal Üretim.....	14
1.6. Toz Metalurjisi.....	14
1.6.2. Toz Boyutu ve Şekilleri.....	16
1.6.3. Tozların Şekillendirilmesi	17
1.6.4. Sinterleme.....	18
1.7. Mekanik Alaşımlama/Mekanik Öğütme.....	19
1.8. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri.....	23
1.9. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışı	25
1.10. Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Korozyon Davranışları.....	25
1.10. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	27

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	30
2.1.Kullanılan Malzemeler	30
2.2. Kompozit Tozların Hazırlanması ve Öğütülmesi	31
2.3. Kompozit Üretimi	32
2.4. Metalografik İşlemler.....	33
2.5. Yoğunluk ve Gözeneklilik İncelemesi.....	33
2.6. XRD İncelemeleri	34
2.7. İç Yapı İncelemeleri.....	34
2.8. Mekanik Ölçümler	35
2.9.Korozyon Testleri	36
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
3.1. Öğütme Süresi ve İşlem Kontrol Katkısının Belirlenmesi	37
3.2. Kompozitlerin Yoğunluk ve Gözeneklilik Değerleri.....	42
3.3. Arafaz Bileşiklerin Belirlenmesi	46
3.4. İçyapı İncelemesi	54
3.5. Sertliklerin Belirlenmesi	66
3.6. Çekme Dayanımı	73
3.7. Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi.....	82
3.8. Korozyon Davranışlarının Belirlenmesi	92
4. SONUÇLAR.....	103
5. ÖNERİLER	105
6. KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

AA2024/ Cu-Ni-Cr TAKVİYELİ METAL MATRİSLİ KOMPOZİTLERİN ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ Gül GEDİK GÜLTEKİN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makina Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI
2023, 117 Sayfa

Yüksek dayanımlı malzemelere olan ihtiyacın artması, alaşımların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için metal matrise metal takviye kullanılarak, matrisin sünekliğini, tokluğunu düşürmeden daha iyi özelliklere sahip kompozitlerin üretilmesine neden olmuştur. Bu amaçla; AA2024 alaşımına ağırlıkça % 0, 0.5, 1, 2, 3 ve 5 oranlarında Ni, Cu ve Cr ilave edilerek; tek (AA2024/Cu, AA2024/Cr, AA2024/Ni), iki (AA2024/Cu-Ni, AA2024/Cu-Cr, AA2024/Cr-Ni) ve üç (AA2024/Cu-Ni-Cr) takviyeli kompozitler, toz metalurjisi yöntemi ile üretilmişlerdir. Kompozitlerin içyapı, mekanik, fiziksel, korozyon ve aşınma özellikleri ile ilgili incelemeler yapılmıştır.

Matris ve takviye arasında iyi arayüzey bağı oluşmuş bu da kompozitlerin sertlik, çekme, aşınma ve korozyon dayanımlarında iyileşmeye neden olmuştur. Ni, Cu ve Cr takviye edilen kompozitler de sırasıyla (Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3NiCu), Al_2Cu , (Al_7Cr , $Al_{11}Cr_2$) arafaz bileşikleri oluşmuştur. Ni ve Cr takviye edilen kompozitler de en yüksek sertlik ve çekme dayanımı % 0.5 oranında ölçülürken, Cu takviye edilen kompozitlerde % 5 oranında görülmüştür. İki takviyeli kompozitlerde en yüksek çekme dayanımı Ni-Cu takviyelilerde %2, Cu-Cr ve Ni-Cr takviyelilerde %5 oranlarında elde edilmiştir. Tüm kompozit gruplarında adhezif ve abrazif aşınma mekanizmalarına ve korozyon oluşumuna rastlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Metal takviyeli kompozit, Toz metalurjisi, Aşınma, Korozyon, Mekanik özellik

PhD. Thesis

SUMMARY

PRODUCTION AND INVESTIGATION OF THE PROPERTIES OF AA2024/ Cu-Ni-Cr REINFORCED METAL MATRIX COMPOSITES

Gül GEDİK GÜLTEKİN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Program
Supervisor: Prof. Aykut ÇANAKÇI
2023, 117 Pages

The increasing need for high-strength materials has led to the production of composites with better properties by using metal reinforcement in the metal matrix to improve the mechanical properties of alloys, without reducing the ductility and toughness of the matrix. For this purpose; by adding 0.5, 1, 2, 3 and 5 wt% Ni, Cu and Cr to the AA2024 alloy; single (AA2024/Cu, AA2024/Cr, AA2024/Ni), two (AA2024/Cu-Ni, AA2024/Cu-Cr, AA2024/Cr-Ni) and three (AA2024/Cu-Ni-Cr) reinforced composites were produced by powder metallurgy method. The internal structure, mechanical, physical, corrosion and wear properties of the composites were investigated.

A good interface was formed in metal reinforced composites as a result of wetting, which resulted in an improvement in the hardness, tensile, wear and corrosion resistance of the composites. In Ni, Cu and Cr reinforced composites, (Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3NiCu), Al_2Cu , (Al_7Cr , $Al_{11}Cr_2$) interphase compounds were formed, respectively. While the highest hardness and tensile strength were measured at 0.5% in Ni and Cr reinforced composites, it was observed at 5% in Cu reinforced composites. In double-reinforced composites, the highest tensile strength was obtained at 2% in Ni-Cu reinforced ones and 5% in Cu-Cr and Ni-Cr reinforced ones. Adhesive and abrasive wear mechanisms and corrosion formation were observed in all composite groups.

Key Words: Metal reinforced composite, Powder metallurgy, Abrasion, Corrosion, Mechanical property

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Matris, takviye ve kompozit malzemeler için mukavemet ve % uzama grafiği.	3
Şekil 2. Takviye elemanının şekilleri.	5
Şekil 3. ACu-ANi-ACr kompozitleri arayüzey görüntüleri	8
Şekil 4. Islatma temas açısı.....	10
Şekil 5. MMK üretim yöntemlerinin oranları.....	13
Şekil 6. Toz metalurjisinin ana safhaları	15
Şekil 7. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan toz şekilleri.	16
Şekil 8. Tek etkili ve çift etkili presleme.....	17
Şekil 9. Sinterlemede taneler arasında meydana gelen büzülme.....	18
Şekil 10. Bilyalı Öğütücü.	20
Şekil 11. Tozların temsili deformasyon özellikleri.	22
Şekil 12. Metal yüzeyinde oluşan anodik veya katodik bölgeler.	26
Şekil 13. Elek Sistemi (a) ve parçacık boyut ölçüm cihazı (b).....	30
Şekil 14. PM 200 Değirmen	32
Şekil 15. Presleme cihazı.....	32
Şekil 16. Kesme(a), zımparalama(b) ve parlatma makinaları(c).....	33
Şekil 17. XRD cihazı.....	34
Şekil 18. SEM cihazı	34
Şekil 19. Sertlik ölçüm cihazı(a), Çekme cihazı(b).....	35
Şekil 20. Aşınma deney düzeneği.....	36
Şekil 21. Korozyon test düzeneği	36
Şekil 22. Stearik asitle öğütülmüş ACu ² kompozit tozlarının SEM görüntüleri	37
Şekil 23. Metanol ile öğütülmüş ACu ² kompozit tozlarının SEM görüntüleri.....	38
Şekil 24. Ni takviyeli kompozit tozların küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	39
Şekil 25. Cu takviyeli kompozit tozların küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	40
Şekil 26. Cr takviyeli kompozit tozların küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	41
Şekil 27. Ni takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.....	43
Şekil 28. Cu takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri	43
Şekil 29. Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.....	44

Şekil 30. Ni-Cu takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.....	44
Şekil 31. Cu-Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri.....	45
Şekil 32. Ni-Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri	45
Şekil 33. Ni-Cu-Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri	46
Şekil 34. XRD analiz sonuçları a) ANi toz b) ANi kompozit	47
Şekil 35. XRD analiz sonuçları a) ACu toz b) ACu kompozit.....	48
Şekil 36. XRD analiz sonuçları a) ACr toz b) ACr kompozit	49
Şekil 37. XRD analiz sonuçları a) ANiCu toz b) ANiCu kompozit.....	50
Şekil 38. XRD analiz sonuçları a) ACuCr toz b) ACuCr kompozit.....	51
Şekil 39. XRD analiz sonuçları a) ANiCr toz b) ANiCr kompozit	52
Şekil 40. XRD analiz sonuçları a) ANiCuCr toz b) ANiCuCr kompozit.....	53
Şekil 41. Ni takviyeli kompozitlerin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri.....	55
Şekil 42. ANi ⁵ kompoziti EDS analizi	56
Şekil 43. Cu takviyeli kompozitlerin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	57
Şekil 44. ACu ^{0.5} kompoziti ait EDS analizi	58
Şekil 45. Cr takviyeli kompozitlerin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	59
Şekil 46. ACr ⁵ kompoziti EDS analizi.....	60
Şekil 47. ANiCu kompozitlerinin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	61
Şekil 48. ANiCu ³ kompoziti için EDS analizi.....	62
Şekil 49. ACuCr ³ kompoziti EDS analizi.....	62
Şekil 50. ACuCr kompozitlerinin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	63
Şekil 51. ANiCr kompozitlerinin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri	64
Şekil 52. ANiCr ⁵ kompoziti için EDS analizi	65
Şekil 53. ANiCuCr ³ kompoziti için EDS analizi.....	65
Şekil 54. ANiCuCr kompozitlerinin küçük büyütme SEM görüntüleri	66
Şekil 55. ANi kompozitlerinin sertlik değerleri	67
Şekil 56. ACu kompozitlerinin sertlik değerleri.....	68
Şekil 57. ACr kompozitlerinin sertlik değerleri	69
Şekil 58. ANiCu kompozitlerinin sertlik değerleri.....	70
Şekil 59. ACuCr kompozitlerinin sertlik değerleri.....	71
Şekil 60. ANiCr kompozitlerinin sertlik değerleri	71
Şekil 61. ANiCuCr kompozitlerinin sertlik değerleri.....	72
Şekil 62. ANi kompozitlerinin çekme dayanımı	73

Şekil 63. ANi kompozitlerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri a) ANi ^{0.5} , b) ANi ¹ , c) ANi ² , d) ANi ³ , e) ANi ⁵ , e ₁) ANi ⁵ backscatter görüntüsü.....	74
Şekil 64. ACu kompozitlerinin çekme dayanımı.....	75
Şekil 65. ACu kompozitlerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri a) ACu ^{0.5} , b) ACu ¹ , c)ACu ² , d) ACu ³ , c) ACu ⁵ , e ₁) ACu ⁵ backscatter görüntüsü.....	76
Şekil 66. ACr kompozitlerinin çekme dayanımı	77
Şekil 67. ACr kompozitlerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, a) ACr ^{0.5} , b) ACr ¹ , c)ACr ² , d) ACr ³ , c) ACr ⁵ , e ₁) ACr ⁵ backscatter görüntüsü	78
Şekil 68. ANiCu kompozitlerinin çekme dayanımı	79
Şekil 69. ACuCr kompozitlerinin çekme dayanımı	79
Şekil 70. ANiCr kompozitlerinin çekme dayanımı	80
Şekil 71. ANiCuCr kompozitlerinin çekme dayanımı	80
Şekil 72. En yüksek (a-d) ve en düşük (e-h) çekme dayanımı gösteren numunelerin kırılma yüzeyleri	81
Şekil 73. 8 saat öğütülmüş AA2024 alaşımının farklı yüklerde (2N ve 20N) aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	84
Şekil 74. ANi kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	85
Şekil 75. ACu kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	86
Şekil 76. ACr kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	87
Şekil 77. ANiCu kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	88
Şekil 78. ACuCr kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	89
Şekil 79. ANiCr kompozitlerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.....	90
Şekil 80. ANiCuCr kompozitlerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri	91
Şekil 81. ANi kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	95
Şekil 82. ACu kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	95
Şekil 83. ACr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	96
Şekil 84. ANiCu kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	96
Şekil 85. ACuCr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri.....	97
Şekil 86. ANiCr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	97
Şekil 87. ANiCr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri	98
Şekil 88. Takviyesiz alaşımın korozyon yüzeyi SEM görüntüleri	98
Şekil 89. a) ANi ¹ , b) ANi ² , c) ANi ³ , d) ANi ⁵ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri	99
Şekil 90. a) ACu ¹ , b) ACu ² , c) ACu ³ , d) ACu ⁵ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri	99

Şekil 91. a) ACr^1 , b) ACr^2 , c) ACr^3 , d) ACr^5 kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri	100
Şekil 92. a) $ANiCu^{0.5}$, b) $ANiCu^2$, c) $ANiCu^3$, d) $ANiCu^5$ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri.....	100
Şekil 93. a) $ACuCr^{0.5}$, b) $ACuCr^1$, c) $ACuCr^3$, d) $ACuCr^5$ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri.....	101
Şekil 94. a) $ANiCr^{0.5}$, b) $ANiCr^2$, c) $ANiCr^3$, d) $ANiCr^5$ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri.....	101
Şekil 95. a) $ANiCuCr^1$, b) $ANiCuCr^2$, c) $ANiCuCr^3$, d) $ANiCuCr^5$ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri.....	102



TABLÖLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Otomotiv endüstrisinde AMK'lerin uygulama alanları.	4
Tablo 2. Metallerarası bileşiklerin uygulama alanları.	12
Tablo 3. AA2024 başlangıç tozlarının kimyasal bileşimi	30
Tablo 4. AA2024 Alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	30
Tablo 5. Kompozit ve hibrit kompozitlerin kodlamaları	31
Tablo 6. Tek takviyeli kompozitlerin aşınma deney sonuçları.....	82
Tablo 7. Tek takviyeli kompozitlerin polarizasyon eğrilerine dayalı tafel sonuçları.....	92
Tablo 8. İki ve üç takviyeli kompozitlerin polarizasyon eğrilerine dayalı tafel sonuçları ..	94

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

γ_{kb}	: Katı-buhar arayüzey enerjisi
γ_{ks}	: Katı-sıvı arayüzey enerjisi
γ_{sb}	: Sıvı-buhar arayüzey enerjisi
θ	: Temas açısı
ρ_t	: Teorik yoğunluk
ρ_d	: Deneysel yoğunluk
ρ_n	: Takviye yoğunluğu
% W_n	: Takviyenin karışım içerisindeki ağırlıkça yüzdesi
İKK	: İşlem kontrol katkısı
MMK	: Metal matrisli kompozit
AMK	: Alüminyum matrisli kompozit
TM	: Toz metalurjisi
MA	: Mekanik alaşımlama
MÖ	: Mekanik Öğütme

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Teknolojinin gelişmesi ile yüksek kalitede malzemeye olan ihtiyacın karşılanabilmesi için kullanılan kompozitler, sürekli bir faz içerisinde dağılmış bir veya daha fazla süreksiz fazdan oluşan malzemelerdir. Süreksiz faz genellikle sürekli fazdan daha sert ve güçlü olduğu için takviye, sürekli faz ise matris olarak adlandırılır (Agarwal vd., 2015). Kompozitler kullanılan matris türüne göre sınıflandırılırlar. İçlerinden en çok kullanılanı, matris malzemesi olarak metal veya alaşımlarının kullanıldığı metal matrisli kompozitlerdir(MMK). Matrisin özelliklerini geliştirmek için yapıya düzenli yada düzensiz geometride takviye elamanlarının dağıtılmasıyla partikül takviyeli MMK'ler elde edilir. Seçilen takviyenin şekli, yapısı ve yapı içerisindeki yönelmesinin yanı sıra matris içindeki ağırlık oranı, matris ile arasındaki bağ gibi parametreler istenilen özelliklerin elde edilmesinde etkili olmaktadır (Kalemtaş, 2014). Bilindiği gibi, takviye faz ve matris arasında oluşacak iyi bağ sonucu meydana gelen ara yüzey kompozit malzemenin mukavemet, yoğunlu ve sertlik gibi özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle MMK üretiminde en büyük problem, takviye matris arasında meydana gelen ıslatma sorunlarından ortaya çıkan arayüzey problemleridir (Dikici, 2008). Bu problemler; MMK'lerin mukavemet, aşınma ve korozyon özelliklerini olumsuz yönde etkileyen bir takım kimyasal reaksiyonlar, gözenekler ve matris fazı içerisinde topaklanmalardır. MMK'lerin üretiminde katı ve sıvı faz olmak üzere temel iki yöntem kullanılır. Her yöntemin kendine has üstünlükleri olsa da, takviyenin matris içerisinde homojen dağılmasını sağlayan katı faz yöntemi ön plana çıkmaktadır (Kaçmış, 2022).

MMK sisteminde matris malzemesi olarak hemen hemen bütün metalleri seçmek mümkünken doğada çok bulunması, işleme kolaylığı, hafiflik, korozyon direnci ve takviye edilebilirlik gibi özellikleri nedeniyle Al ve alaşımları daha çok tercih edilmektedir (Kalemtaş, 2014). Takviye malzemesi olarak genellikle grafit, SiC, Al₂O₃, TiC, CNT gibi seramikler kullanılmaktadır. Seramiklerin üstün sertlik ve aşınma değerleri olsada matrisin sahip olduğu süneklik ve tokluk değerlerini karşılayamaması ve matris malzemesinin seramik takviyeyi başarılı bir şekilde ıslatamaması nedeniyle malzeme özelliklerinde tercih edilmeyen koşullar ortaya çıkarmaktadır (Bansal vd., 2022). Seramik takviye kullanımının

ortaya koyduğu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için alternatif yollar bulma konusunu gündeme gelmiştir. Ve son yıllarda takviye olarak perlitik çelikler, paslanmaz çelik, demir, bakır, nikel, krom, titanyum gibi metalik malzemelerin kullanımına başlanmıştır (Vishwanatha vd., 2020; Farajollahi vd., 2022)

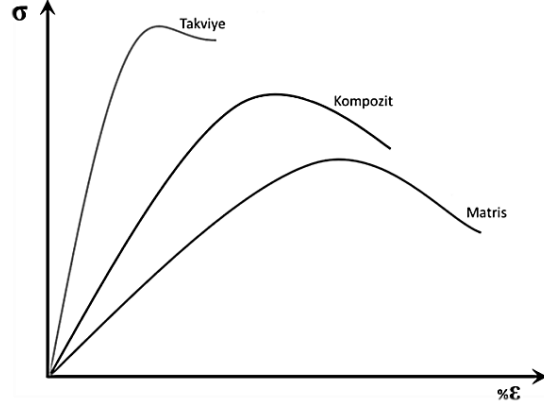
Metalik fazlar, doğal süneklikleri ve tokluklarının yanı sıra, metal matrislerle iyi ıslanabilirliğe sahiptirler. Bu özellikleri diğer mühendislik özelliklerinin yanı sıra sertlik, mukavemet ve süneklik gibi üstün mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına neden olan takviye ve matrisler arasında iyi bir ara yüzey bağı sağlamaktadır (Gecü, 2019; Farajollahi vd., 2022).

1.2. Metal Matrisli Kompozitler

Malzeme ve malzeme bilimi alanındaki gelişmeler, mühendislik bilimi ve teknolojisi alanında çeşitli uygulamalar için ileri malzemelerin geliştirilmesine yol açmıştır. Böylece her geçen gün yeni malzemeler ortaya çıkmıştır ve insan yaşamının her alanına yayılmıştır. Giyilebilir elektronikler, sensörler, cihazlar ve ekipmanlar malzeme bilimi alanındaki ilerlemeler olmadan mümkün olamazdı. Kompozit alanındaki gelişmeler, araştırmacıların geleneksel tek malzemelerden elde edilemeyen çeşitli özellikleri ikincil bir malzeme ekleyerek istenmeyen özellikleri bastırıp istenen özellikleri destekleyip, geliştirmelerini sağlamıştır. Bunun en iyi örneği; iyi uzamaya fakat düşük mukavemet ve sertliğe sahip matris fazına belirli bir oranda yüksek mukavemet ve sertliğe sahip takviye eklenmesi ile elde edilen malzemenin yüksek mukavemet, sertlik ve orta derecede uzama özellikleri sergilediğini gösteren Şekil 1'de verilmiştir (Bansal vd., 2022).

Matris malzemelerine göre kompozitler; metal matrisli (MMK), seramik matrisli (SMK) ve polimer matrisli (PMK), takviye geometrisine göre de parçacık, whisker ve fiber takviyeli olarak sınıflandırılırlar (Gecü, 2019). Matris malzemesi olarak metal ve/veya metal almasını kullanıldığında kompozit metal matrisli kompozit(MMK) olarak adlandırılır. MMK'lerin belirli alanlardaki kullanımı çok eskilere dayansa da yüksek performanslı kompozit malzeme olarak kabul edilmesi yirminci yüzyılın ikinci yarısına denk gelmiştir. Böylece günümüzde de yüksek performans gerektiren mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Örnek olarak; güç iletim hatlarında Al matrisli Al_2O_3 fiber takviyeli kompozitler, Cu matrisinde Nb-Ti filamanları içeren süperiletken mknatıslar, kesme takımlarında ve petrol sondajlarında kullanılan WC-Co parçacık

takviyeli kompozitler ve havacılık, otomotiv, termal yönetim gibi uygulamalarda kullanılan SiC parçacık takviyeli Al matrisli kompozitler verilebilir (Kaçmış, 2022; Bansal vd., 2022; Gecü, 2019; Gençer, 2020)



şekil 1. Matris, takviye ve kompozit malzemeler için mukavemet ve % uzama grafiği (Bansal vd., 2022).

Metal matrisli kompozitler (MMK), kimyasal ve fiziksel olarak birbirinden farklı metalik bir matris içerisine bir ya da daha fazla fiber veya partikül şeklindeki metal ya da seramik takviyenin, tek başlarına sağlayamadıkları özellikleri sağlamak için bir araya gelmesiyle oluşan malzemelerdir. Bu malzemeler geleneksel malzemelere kıyasla çeşitli avantajlara ve dezavantajlara sahiptirler.

Avantajları;

- Yüksek mukavemet ve sertlik,
- Mükemmel sürtünme ve aşınma özellikleri,
- Düşük termal genleşme katsayıları,
- İyi termal iletkenlik,
- Yüksek enerji emilimi ve sönümleme kapasitesi,
- Yüksek uygulama sıcaklığı,
- Genel olarak yüksek tokluk (Kalemtaş, 2014; Gecü, 2019).

Dezavantajları;

- Genel olarak metallerin yoğunluklarının yüksek olması,
- Farklı malzemelerin farklı termal genleşme katsayılarına sahip olması nedeniyle uygun bağlama teknikleri gerektirmesi,

- Diğer geleneksel malzemelere göre genellikle daha yüksek maliyetli olmaları (Kalemtaş, 2014; Gecü, 2019).

1.2.1. Alüminyum Matrisli Kompozitler

Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları, ucuzlukları (Mg ve Ti gibi diğer hafif metallerle karşılaştırıldığında), yüksek süneklikleri ve korozyon dirençleri nedeniyle MMK'lerin üretiminde hem ar-ge (araştırma geliştirme) hem de sanayi uygulamalarında en yaygın kullanılan matristir (Torralba vd., 2003; Lloyd, 1994). Bu alaşımlara, mukavemet, termal kararlılık, oksidasyon, aşınma ve sürünme direnci, tokluk gibi özelliklerini geliştirmek için genellikle dağılmış fazlar takviye edilir. Kompozitlerin nasıl kullanılacağına bağlı olarak takviye seçimi yapılır (Ujah & Kallon, 2022). Alüminyum matris kompozitler (AMK), otomotiv (Koli vd., 2015; Singh & Chauhan, 2014; Purohit et al., 2020), elektrik (Ujah vd., 2019; Ujah vd., 2020), havacılık (Kumar & Das, 2019; Suryanarayanan vd., 2013), denizcilik (Shibli vd., 2008; Vinod et al., 2019), savunma/askeri (Prasad Reddy vd., 2017; Mohanavel vd., 2020), tıbbi/cerrahi aletler (Talla vd., 2015; Singh & Belokar, 2021) vb. alanlarda geniş uygulamalar bulmuştur. Bunun nedeni, geliştirilmiş fiziksel, mekanik, tribolojik, termal ve korozyon özellikleridir. AMK'lar, yekpare Al alaşımlarından daha üstün mukavemete, iyi sürünme direncine, yüksek aşınma korozyon direncine, daha düşük ısıl genleşme katsayısına, yüksek elastisite modülüne ve iyi yorulma mukavemetine sahiptirler (Mavhungu vd., 2017; Macke vd., 2012). Kompozit ile geliştirilen çeşitli bileşenler için gerekli olan AMK'ların karakteristik özelliklerinin özeti Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Otomotiv endüstrisinde AMK'lerin uygulama alanları (Ujah & Kallon, 2022).

Endüstri	Ürünler	Özellikleri
Otomotiv	Piston ve biyel kolu, fren ve şasi, motor bloğu	Hafif, yüksek ısı iletkenliği, yüksek mukavemet, aşınma direnci
Savunma	Yönlendirilmiş bir silahın kanatcıkları	Hassasiyet ve yüksek rijitlik
Spor Dalları	Golf, beyzbol, kayak malzemeleri	Düşük maliyetli ve hafif
Bina inşaatı	Çatı kaplama levhası, kapı ve pencere panelleri, raflar	Mukavemet ve hafiflik

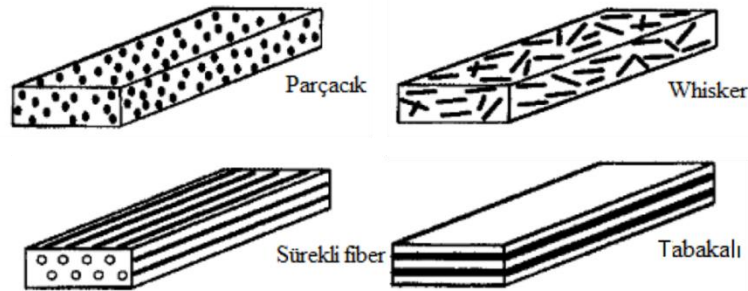
Tablo 1'in devamı;

Elektrik ve Elektronik	İletken, kondansatör, indüktör	Düşük termal genleşme katsayısı, yüksek termal iletkenlik
Havacılık	Kanatlar, dümenler, flaplar, gövde, fan çıkış kılavuz kanatları, hidrolik borular	İyi özgül sertlik, hafiflik ve düşük termal genleşme katsayısı
Demiryolu ve deniz	Raylı araç gövdesi, deniz taşıtı gövde parçaları	Hafif, yüksek korozyon direnci, yüksek yangın tehlikesi kontrolü

1.2.2. Parçacık Takviyeli Kompozitler

MMK'lara ilave edilen takviyelerin formu (tipi) ve dağılımları, niteliklerini belirleyen en mühim öğedir. MMK'larda takviye elemanları, parçacık, fiber, tabakalı ve whisker vb. şekilde olabilir. Sürekli takviyeler matris içerisindeki dağılımlarına bağlı olarak anizotropik, süreksiz takviyeler yönden bağımsız olarak izotropik özellik gösterirler (Diler, 2012). Takviye elemanının formuna göre MMK'ler genellikle üç gruba ayrılırlar (Şekil 2);

- Süreksiz takviyeli
 - Partikül
 - Kısa fiber ya da kılcal (whisker)
- Sürekli ya da uzun fiber takviyeli
- Tabakalı



Şekil 2. Takviye elemanının şekilleri (Gecü, 2019).

Takviyesi parçacık olarak sınıflandırılabilen kompozit, parçacık takviyeli kompozit olarak adlandırılır. Bu parçacık, tanımı gereği lifsizdir ve genellikle uzun bir boyuta sahip değildir. Takviyenin boyutları kompozite katacağı özelliklerin kapasitesini belirler. Uzun

boyuta sahip takviyeler, özellikle kırılma matrislerde, durdurulmadığı takdirde başarısızlığa yol açabilecek olan çatlakların büyümesini engeller. Bu nedenle lifler, matrisin kırılma direncini iyileştirmede çok etkilidir. Ancak seramik, metal veya inorganik parçacıklar gibi diğer parçacık türleri, kırılma direncini iyileştirmede çok etkili olmasalar da farklı güçlendirme mekanizmalarıyla metalik matrislerde kullanılırlar (Agarwal vd., 2015). Bu güçlendirme mekanizmaları; ısı ve elektrik iletkenliklerini değiştirmek, yüksek sıcaklık verimlerini, aşınma ve korozyon direncini, işlenebilirliği, yüzey sertliğini artırmak, sürtünme ve büzülmeyi azaltmak olarak sayılabilir (Agarwal vd., 2015). Parçacık takviyeli MMK'leri avantajlı yapan bir diğer özellik ise geleneksel üretim teknikleriyle kolaylıkla üretilbilmeleri ve ham madde, üretim işlemleri ve kontrol gibi üretim maliyetlerinin nispeten düşük olmasıdır (Diler, 2012).

1.3. Takviye Malzemesi

Metal matrisli kompozitlerin üstün özellikleri, onları kullanılmak istenen kaliteli malzemeler haline getirmiştir. Bu nedenle artık; spor, inşaat, elektrik, elektronik, bilgisayar sistemleri, güvenlik, endüstriyel ısının kurulumu ve nakliyesi dahil olmak üzere birçok uygulamada geleneksel metal alaşımlarının önüne geçmiştir (Miracle, 2005; Kumar vd., 2018). MMK'ler için alüminyum, magnezyum, titanyum, çinko ve bakır alaşımları metal matris olarak kullanılan malzemelerdir (Emara, 2017; Hassan & Gupta, 2002). Geleneksel olarak, bu metal matrisler, alüminyum oksit (Al_2O_3), silisyum karbür (SiC), titanyum oksit (TiO_2), grafit (C) ve boron karbür (B_4C) gibi seramik malzemelerle güçlendirilir (Ramnath vd., 2014; Salih vd., 2019). MMK'lerde seramik esaslı takviyelerin kullanılmasıyla özelliklerinde iyileşmeler elde edilmiştir. Fakat düşük süneklik ve kırılma tokluğu, yüksek aşındırıcılık, zayıf ıslanabilirlik/ara yüzey ayrışması, istenmeyen kimyasal reaksiyonlar, geri dönüşüm zorlukları ve bazı geleneksel seramik takviye malzemelerinin yüksek maliyeti gibi dezavantajları da vardır (Alaneme vd., 2017; El-Labban vd., 2016). Ayrıca, termal genişleme katsayısının yüksek uyumsuzluğu takviye ve matris arasında yükleme altında yüksek termal yorulma ve boyutsal kararsızlık ile sonuçlanır (Alaneme vd., 2019; Smagorinski vd., 1998). Seramik takviyeli MMK'lerin sınırlamalarına ilişkin endişeler MMK'lerin özelliklerini ve işlevselliğini geliştirmek için alternatif yollar bulma konusunu gündeme getirmiştir. Bunlar: MMK'lerin işleme tekniğinin değiştirilmesi (Bains vd., 2016), takviye parçacıklarının ön ısıtılması (Prasad vd., 2014), parçacıkların

kaplanması (Alaneme vd., 2018), hibrit parçacık takviyesi kullanımı (Alaneme et al., 2017; Lancaster vd., 2013), nano ve mikrometre altı parçacıkların kullanımı (Goussous vd., 2010). Son zamanlarda ise takviye olarak perlitik çelikler, paslanmaz çelik, demir, bakır, nikel, krom, titanyum gibi metalik malzemelerin kullanımına dikkat çekilmektedir (Iglesias vd., 2013; Sankaranarayanan vd., 2012; (Ye & Liu, 2005).

Sert metalik fazlar, doğal süneklikleri ve toklukları nedeniyle takviye olarak kabul edilir. Ayrıca, metal matrislerle iyi ıslanabilirliğe sahiptirler, bu da diğer mühendislik özelliklerinin yanı sıra sertlik, mukavemet ve süneklik gibi üstün mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına neden olan takviye ve matrisler arasında iyi bir ara yüzey bağı sağlar (Yadav & Bauri, 2010). Bazı takviye malzemelerinin özellikleri aşağıdaki gibidir.

❖ Bakır (Cu): Temel alaşım elementlerinden biridir ve alaşımların çeşitli özelliklerini iyileştirmek için %1 ila %12 aralığında katılır. Alüminyum alaşımındaki bakır (Cu) miktarı arttıkça alaşımın akıcılığı, çekme dayanımı ve sertliği de artar. Bakır, alüminyum alaşımının işlenebilirlik kabiliyetini artıran bir alaşım elementidir. Ancak, aynı zamanda sıcak yırtılmaya karşı mukavemeti azaltarak döküm işlemini zorlaştırabilir ve alaşımın korozyon direncini azaltabilir. (Gökçe vd., 2017).

❖ Magnezyum(Mg): Hafif bir element olması, alüminyum alaşımının genel yoğunluğunu düşürür ve alaşımın hafif olmasını sağlar. Ayrıca, Mg katkısı alüminyum alaşımının mekanik dayanıklılığını, sertliğini, korozyon direncini artırır. Alaşımının ısı iletkenliğini artırıp yüksek sıcaklık uygulamalarında iyi performans sergilemesini sağlar. Son olarak, alüminyum alaşımının işlenebilirliğini iyileştirerek çeşitli şekillerde kolayca şekillendirilebilmesine olanak tanır (Gökçe vd., 2017).

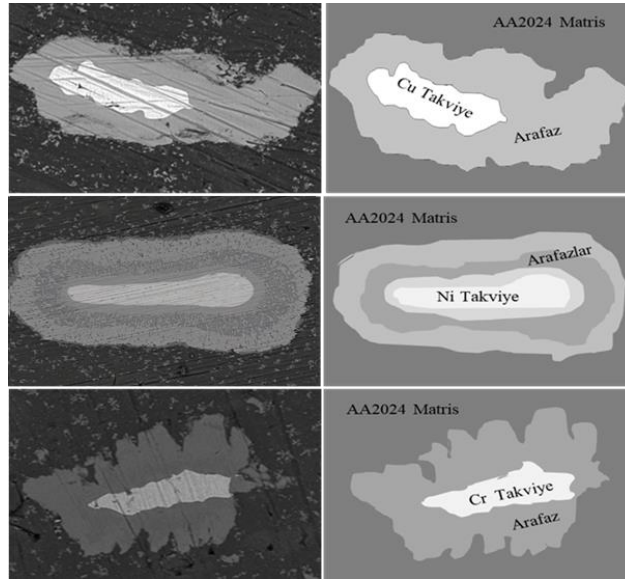
❖ Titanyum(Ti): Alüminyum alaşımlarında tane küçültücü bir etki gösterir. % 0,05-0,250 sınırları arasında ilave edilirler. Titanyum çekme mukavemeti ve sünekliği artırır, ısı iletkenliğini ise azaltır (Gençer, 2020).

❖ Nikel(Ni): Nikel alüminyum alaşımlarına düşük oranlarda katıldığında bakır gibi dayanım ve sertliği artırır. Alaşıma parlaklık vererek yüzey kalitesini iyileştirir. Genellikle yüksek sıcaklıklarda, yüksek dayanım ve sertlik istenen alaşımlara katılır. Alaşımlardaki nikel miktarı % 0.5-3.0 arasında değişir (Gökçe vd., 2017). Nikelin tane küçültme etkisi vardır, malzemenin mukavemetini ve tokluğunu artırır ve geliştirir. Krom ile birlikte kullanıldığında alaşımın sünekliğini, sertliğini ve yorulma direncini artırır. Nikel, yüksek sıcaklıklarda mukavemetini, sıfırın altındaki sıcaklıklarda ise tokluğunu ve sünekliğini korur. Bu nedenle hem sıcak hem de soğuk olarak kolayca işlenebilir (Rahman A., 2022).

❖ Krom(Cr): Genellikle % 0,1-0,6 oranlarında ilave edilir. Tane küçültücü rol oynadığı için sertlik ve dayanımı artırır. Kromun alüminyum içindeki çözünürlüğü çok düşüktür, bu nedenle ikinci faz çökmesi görülmez ve Al-Cr alaşımlarına ısıtıl işlem uygulanamaz. Bünyede oluşan Cr-Al bileşikleri yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artırıp, malzemeyi korozyona dayanıklı hale getirir (Rahman A., 2022).

1.4. Matris Takviye Arası (İntermetalik) Bileşikler

Üretim esnasında, takviye ve matris malzemesi arasında kimyasal etkileşime bağlı olarak intermetalik diye isimlendirilen ilave bir yapı oluşur. Arayüzün doğası, metal matrisli kompozitlerin özellikleri üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Kompozitlerde takviye ile güçlendirme, matris takviye arası yüzey bağının gücüne bağlıdır. Güçlü bir ara yüzey bağı, yükün matristen donatıya aktarılmasına ve dağıtılmasına izin verir. Sertlik, kırılma tokluğu, yorulma, ısı genleşme katsayısı, ısıl iletkenlik ve sürünme gibi özellikler de arayüzün doğasından etkilenir (Rajan vd., 1998).



Şekil 3. ACu-ANi-ACr kompozitleri arayüzey görüntüleri

Şekil 3’de gösterilen AA2024 metal matrisine ilave edilen Cu, Ni ve Cr takviyeleri arasında oluşan arayüzey kompozitin bir parçasıdır. Malzemeye iletilen dış kuvvet için matris ve takviye arasında köprü vazifesi olmak, çatlak yayılmasını engelleyip malzeme hasarını durdurmak, malzemenin kimyasal reaksiyonlara direncini arttırmak gibi işlevleri

vardır (Gençer, 2020). Bu işlevleri yerine getirebilmesi matris ve takviyenin karşılıklı birleşmeleri sonucu uygun bağ yüzeyi oluşturması ile mümkündür. Matris ve takviye fazları genel olarak, mekanik bağ ve kimyasal bağ olmak üzere iki grupta incelenmektedir.

Mekanik bağ; kimyasal bağlanma kaynaklarının yokluğunda matris ve takviyeler arasındaki mekanik kilitlemeden kaynaklanır. Mekanik bağlanmada, takviye yüzeyinin pürüzlülüğü önemli rol oynar. Bağ mukavemetinin artırabilmesi, bu pürüzlerin üretim sırasında matris tarafından etkili bir şekilde ıslatılabilmesine bağlıdır (Toptan, 2011). Ancak, kimyasal bağ dayanımı, mekanik bağ dayanımından daha yüksektir (Chawla vd., 1998). Mekanik bağlanma, soğuk presleme işleminde önemli bir göreve sahiptir. Malzemenin burada kazandığı dayanım taşınması sırasında hasara uğramasını engellemektedir. Esas dayanımını ise sinterleme sırasında oluşturduğu metalik veya kimyasal bağlarla kazanmaktadır (Diler, 2012).

Kimyasal bağ; takviye ve matris atomları doğrudan temas ettiğinde meydana gelir ve elektron alış verişi ile gerçekleşir. İyonik, kovalent veya metalik olabilir. Islatılabilirlik, mekanik bağda olduğu gibi kimyasal bağda da önemlidir (Rajan vd., 1998). Kuvvetli bağ oluşumu, arayüzeyin kimyasal reaksiyonuna da bağlıdır. MMK'lerin üretimi esnasında metalin yüksek reaktivitesi kalın arayüzeylerin oluşmasına yol açar. Buda kompozitlerin zayıflamasına ve gevrekleşmesine neden olur ve çekme dayanımı oluşan arayüzey tabaka kalınlığına bağlı olarak azalır (Gecü, 2019). Kimyasal tepkime ürünlerinin çeşidi ve kimyasal tepkimenin yoğunluğu; sinterleme sıcaklığı, presleme basıncı, atmosfer, matris alaşımının kimyasal bileşimi ve takviye fazının yüzey kimyasına bağlıdır (Rajan vd., 1998). Parçacık takviyeli MMK'ler de, oluşan intermetalik bileşiklerin kalınlığının yanı sıra uygulanan gerilme arttıkça takviyenin matrise uyguladığı baskı da artar ve matriste boşluk çekirdeklenmesine neden olur. Güçlü arayüzeye sahip kompozitte boşluklar matris tarafında büyürken, zayıf arayüzeyde takviye parçacık uçlarındadır (Gecü, 2019).

1.4.1. Arayüzey Oluşumu

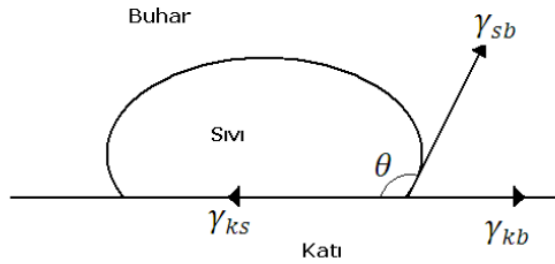
Islatma, bir sıvının katı bir yüzeyde yayılma kabiliyeti olarak tanımlanabilir ve sıvı-katı arasındaki etkileşim derecesini temsil eder (Bao vd., 2011). Katı maddelerin ıslanabilirlikleri sahip oldukları yüzey enerjisi, sıvıların ıslatabilirlikleri ise yüzey gerilimi terimleri ile tarif edilmektedir. Küresel şekildeki bir damlacığın yüzey gerilimi yüksektir ve bunu düşürmek için yüzey alanını arttırmak yani bulunduğu yüzeye dağılmak ister.

Yüzey enerjisi yüksek olan katı ise, ıslanma olayı ile yüzey enerjisini düşürmek ister. Bu sebeple, yüzey hazırlama işlemindeki temel amaç katının yüzey enerjisini mümkün olduğunca arttırmaktır (Osmanoğlu, 2018).

MMK yapılarda matrisin takviyeyi ıslatabilmesi, kompozit malzemelerin üretiminde önemli bir faktördür. Bu nedenle, takviye malzemelerinin önceden işlenmesi, yüzeylerindeki oksit tabakasının azaltılması, matrise uyumlu takviye seçilmesi veya yüzeylerinin kimyasal olarak işlenmesi gibi yöntemler kullanılarak matrisin takviyeyi ıslatabilme özelliği artırılabilir. Ayrıca, matrisin yüzey özelliklerinde yapılan değişiklikler de ıslatma özelliğini etkileyebilir. Şekil 4’de görüldüğü gibi ıslatma sıvı damlacığının katı madde yüzeyi ile oluşturduğu açıyla tanımlanabilir. Young-Dupré denklemine göre; katı-buhar arayüzey enerjisi (γ_{kb}), katı-sıvı arayüzey enerjisini (γ_{ks}) ve sıvı-buhar arayüzey enerjisi (γ_{sb}) ve temas açısı (θ) arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir (Toptan, 2011).

$$\gamma_{kb} = \gamma_{ks} + \gamma_{sb} \times \cos \theta \quad (1)$$

Şekil 4’de görülen düz katı yüzey üzerine küçük bir sıvı kütlesi(damlacık) koyulduğunda, damlacığın aldığı şekil temas açısına bağlıdır. Damlacık; temas açısı $\theta = 0^\circ$ ise katı üzerinde kendiliğinden yayılır ve katıyı kolayca ıslatılabilir, $0^\circ < \theta < 180^\circ$ arasında ise katıyı kısmen ıslatır, $\theta = 180^\circ$ ise ıslatamaz (Hashim vd., 2001).



Şekil 4. Islatma temas açısı (Toptan, 2011).

Difüzyon ise iki veya daha fazla metal arasında atomlar veya moleküllerin yayılma yoluyla hareket ettiği ve birbirlerine bağlandığı durumu ifade eder. Metallerin temas ettiği bir ara yüzey de malzemelerin yüksek sıcaklık ve basınç altında birleştirilmesi ile atomlar arasında difüzyon gerçekleşir. Bu difüzyon sonucunda, atomlar farklı metal kristal yapılarının içine girer ve karışır. Difüzyon sırasında, atomlar rastgele hareket eder ve enerji bariyerlerini aşarak birbirlerine bağlanırlar ve metal malzemelerin birleştirilmesine ve

metaller arası bileşiklerin oluşumuna olanak tanımış olurlar (Gecü, 2019). Bu bileşikler, sertlik, mukavemet, elektriksel iletkenlik ve korozyon direnci gibi özellikleri iyileştirebilir.

1.4.2. Metaller Arası Bileşikler (İntermetalikler)

Metal matrisli kompozit malzemelerin üretiminde sıkça kullanılan toz metalurjisi yönteminde, metal matris ve takviye malzemesi bir araya getirilerek sıkıştırılır ardından yüksek sıcaklıkta sinterlenir. Bu işlem, matris ve takviye malzemeleri arasındaki bağların oluşmasını sağlar. Bu bağlar, sinterleme işlemi sırasında oluşan difüzyon süreci nedeniyle oluşur. Yüksek sıcaklık ve basınç altında matris ve takviye malzemeleri arasındaki atomlar, difüzyon yoluyla birbirine karışır. Bu atomlar, takviye malzemesinin yüzeyindeki pasif bir oksit tabakasının kırılması sonucu oluşan açık boşluklara veya matris malzemesindeki gözeneklere geçerler. Difüzyon sonrasında, metal matris ve takviye malzemesi arasında interdifüzyon bölgesi oluşur. Bu bölge, matris malzemesinin ve takviye malzemesinin atomları arasında bir karışım bölgesi oluşturarak, matris ve takviye malzemeleri arasında bir ara yüzey oluşturur. Bu interdifüzyon bölgesi, matris ve takviye malzemeleri arasında mekanik bağın yanı sıra kimyasal bağ oluşmasına da neden olur ve intermetalik bileşikler oluşur (Rajan vd., 1998; Osmanoglu, 2018; Özdemir, 2023).

İntermetalik bileşiklerin, bir metal matris içinde (ana bileşen) farklı metal veya metal alaşımı parçacıklarının homojen bir şekilde dağılarak takviye edildiği malzemelerde önemi büyüktür (Özdemir, 2023). Bu bileşikler, düzenli yapıda ve değişik stokiometrik oranda, genellikle A ve B gibi iki elementten oluşur. A_3B , A_2B , A_5B_3 , A_7B_6 ve AB gibi farklı kristal yapıda 5 tane stokiometrik kombinasyonda sınıflandırılabilirler (Özdemir, 2023; Akkaş, 2013).

Alüminyum içerikli intermetalikler yani alüminidler; oksitleyici ortamda ve havada ısıtıldığında, yüzeyinde koruyucu Al_2O_3 tabakası oluşturarak korozyona karşı direnç oluştururlar. Ayrıca bu malzemelerin yoğunlukları düşüktür, ergime noktaları oldukça yüksektir ve yüksek dayanıma sahiptirler. Alüminidlerin çoğu belirtilen kompozisyon aralığının üzerinde oluşmakta ve stokiometriden sapma artarken düzen oranı da düşmektedir (Özdemir, 2023). AA2024 alaşımına farklı oranlarda takviye edilen Cu, Ni ve Cr elementleri ile oluşturulan kompozitlerin $560^{\circ}C$ 'de 3 saat sinterlenmesi sonucunda oluşabilecek Alüminyumca zengin intermetalik fazlara örnek vermek gerekirse; Al_2Cu ,

Al_2CuMg , Al_3Ni , Al_3NiCu , $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ ve Al_7Cr vb. sayılabilir. Bunların dışında AlCu , AlNi ve AlCr yapıda oluşabilecek intermetalik bileşikler arasındadır.

İntermetaliklerin sertlik, mukavemet, yoğunluk vb. özelliklerinin geliştirilmesi ile uygulama alanları genişletilebilmektedir. Bunlardan bazıları Tablo 2’de verilmiştir (Özdemir, 2023).

Tablo 2. Metallerarası bileşiklerin uygulama alanları (Özdemir, 2000).

Kaplamalar, Elektronik devreler
Otomotiv, Uzay, Manyetik
Enerji depolama, Piller, Hidrojen depolama
Isıtıcı elemanlar, Fırın donanımı
Takımlar ve kalıplar
Korozif ortamlar, Kimya endüstrisi için borular

1.5. Metal Matrisli Kompozitlerin Üretim Teknikleri

İmal edilecek olan kompozit malzemeden beklenen özellikler göz önünde bulundurularak, MMK üretim yöntemi belirlenir. Üretimde aşağıda sayılan maddelerin dikkate alınması gerekir.

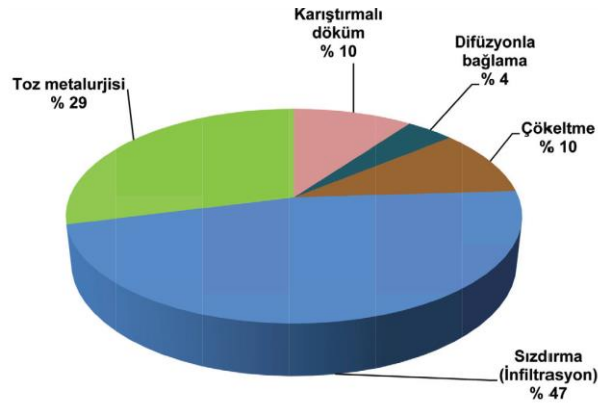
- Nihai ürünün olması gereken boyutu,
- Hangi sıcaklıklarda kullanılacağı,
- Takviyenin şekli,
- Takviye ve matrisin uyumu ve ek işlem gereksinimi,
- Matris malzemesi ile takviye malzemesi arasında olası olan tepkimeler,
- Matris içerisinde takviyenin homojen dağılmış olması,
- Takviye ve matris arasında iyi bir ara yüzey bağının sağlanması (Kalemtaş, 2014).

Takviye ve matris karışımından oluşan MMK’lerin üretimi için birçok farklı üretim tekniği geliştirilmiştir (Şekil 5). Çünkü geleneksel malzemelere kıyasla MMK’lerin üretim maliyetlerini düşürmek ve ürün kalitesini artırmak istenmiştir. Üretim yöntemi seçilirken; matrise, takviyenin çeşit ve şekline, beklenen fiziksel ve mekanik özelliklere ve üretilecek

parçanın hangi biçimde olacağına dikkat edilir. Tercih edilen her üretim yönteminin yararlı ve zararlı yönleri mevcuttur. Kompozitlerin imalatı, temel olarak iki ayrı kategori altında incelenebilir.

-Sıvı Hal Üretimi

-Katı Hal Üretim



Şekil 5. MMK üretim yöntemlerinin oranları (Kalemtaş, 2014).

1.5.1. Sıvı Hal Üretim

MMK'lerin sıvı faz işleminde, takviye fazı erimiş metale entegre edilir. Geliştirilmiş mekanik özellikler elde etmek için takviyelerin ve erimiş metalin ortasında ince arayüzey bağlantısı elde edilmelidir. Buda ıslatmanın iyi olmasına bağlıdır. Islatma artışı sağlamak için takviye parçacıklar kaplanabilir (Kayabaşı, 2016). Sıvı faz işlemlerinde kompozitin beklenen özellikleri sunabilmesi için malzeme belirleme çok önemlidir. Bunun için malzemeyi belirlerken takviyenin matris ile uyumlu olmasına dikkat etmek gerekir.

Sıvı hal tekniklerinde, matris ve takviye arasında istenmeyen kimyasal tepkimelerin oluşabilmesi ve uygulama basamaklarının kontrolünün zor olması nedeniyle, yeniden üretilbilmeleri zordur. Genellikle ergime derecesi düşük alaşımlarla uygulanabilmektedirler (Gecü, 2019). İnfiltrasyon, dispersiyon, püskürtme ve in-situ olmak üzere dört ayrı kategoride sıvı hal işleme yöntemleri incelenmektedir.

1.5.2. Katı Hal Üretim

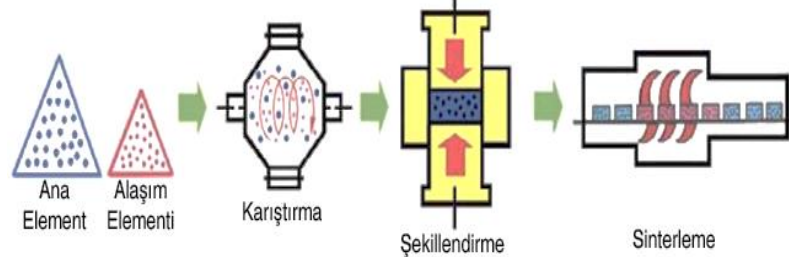
Bu yöntemde matris ve takviye, aralarında meydana gelen difüzyon sayesinde bağlanırlar. Bu bağlanma uygun sıcaklık ve basınç altında katı halde gerçekleşir. Sıvı hal üretimine göre daha düşük sıcaklıklarda çalışılması matris malzemesi ve takviye fazlar arasındaki istenmeyen tepkimelerin oluşmasını azaltır veya engeller. Bunun için metal matrisli kompozitlerin imalatında toz metalürjisi yöntemi yaygın olarak tercih edilmektedir (Solakoğlu, 2021). Katı hal üretiminin ana hedefi, malzemelerin istenen şekil, boyut ve özelliklerde katı halde elde edilmesini sağlamaktır. Bu süreçte malzemenin eritilmesi veya sıvı fazda olması gerekmez, bu nedenle enerji ve maliyet açısından da avantajlı bir yöntemdir.

1.6. Toz Metalurjisi

Toz metalurjisi (TM), metal ya da seramik tozları preslemek ve matrisin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta sinterlemek için kullanılan bir üretim tekniğidir. Bu teknik, parçaların nihai geometrisine yakın şekillerde üretilmesini sağlar. Uygun basınç altında saf metaller, alaşımlar, karbon, seramik ve polimer malzemelerden oluşan tozların karıştırılması ve şekillendirilmesi ile elde edilen üründe, geçirgenlik ve gözenek miktarı belirli düzeyde olur (Ekerer, 2007)

Yöntemin ilk aşaması toz üretimidir. Uygun yöntemlerle üretilen tozlar istenilen oranlarda homojen bir şekilde karıştırılıp bir kalıp içerisinde preslenir. Sonra uygun sıcaklıkta ve sürede bir fırında sinterlenir. Sinterleme ile tozların birbirleriyle bağ oluşturması sağlanır. Böylece değişik şekil ve büyüklükteki tozlar, elde edilmek istenen şekil ve oranda ürüne dönüşmüş olur. Farklı malzeme gruplarına uygulanabilmesi, kompleks şekilli parça üretme olanağı sağlaması, ürün kaybının az olması gibi sebeplerle toz metalurjisinin kullanılması yaygın hale gelmiştir. Otomotiv endüstrisindeki katalitik konvertör, subap yuvaları, buji gibi birçok parçada, uçak fren balatalarında, tungsten karbürden veya elmas kompozitlerden üretilmiş sert kesici takımlarda, nükleer güç yakıt çubuklarında, fonksiyonel tabakalı yapay kemiklerde, yüksek sıcaklık elemanlarında, kontak alaşımlarında ve zırh delici mermilerde toz metalurjisiyle üretilmiş birçok ürüne rastlanır (Topçu vd., 2022).

Metal matrisli kompozit üretiminde toz metalurjisinin tercih edilmesinin nedenlerini şöyle sıralayabiliriz. Takviyelerin matris içinde homojen dağılması, takviyenin boyutu ve oranının ayarlanabilmesi, düşük sıcaklıklarda çalışılabilmesi, yapının kontrolü ve ürün elde edilebilmesi. Bunlara ek olarak metal ergitme olmaması, takviye tozların ucuz olması gibi düşük maliyet sağlaması da sayılabilir. Hafif ve dayanıklı ürünlerin tercih edildiği havacılık ve savunma sanayinde bu yolla üretilen malzemelere olan ilgi artmıştır. Genel olarak alüminyum, nikel, çelik, magnezyum, titanyum ve bakır matris fazı olarak, SiC, grafit, grafen, alümina, CNT, Ni, Ti ve Mo ise takviye fazı kullanılır (Ramakrishnan, 2013; Biçer, 2015). Toz metalürjisi; toz üretimi, mekanik alaşımlama, presleme, sinterleme olmak üzere 4 aşamada gerçekleştirilir (Şekil 6).



Şekil 6. Toz metalurjisinin ana safhaları

Toz metalurjisi ile parça üretimi geleneksel üretim yöntemleri ile kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Bu avantajlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır (Kaya, 2021).

- Üretim seri ise maliyet düşük ve zaman kısa olur.
- Geleneksel yöntemlerde elde edilemeyen kimyasal bileşimler elde edilebilir.
- İlave işleme gerek kalmadan istenen şekilde parça üretilebilir.
- Boyut hassasiyeti oldukça yüksektir.
- Seri üretim yapılabilir.
- Nihai ürüne ulaşmak için uygulanan işlem basamakları azdır.
- Hasarlı parça üretimi azdır.
- Talaşlı imalata göre çok yüksek üretim gücü sağlar.
- Aşınma direnci yüksek malzemeler elde edilebilir.
- Oluşan intermetalik bileşikler çeşitli alanlarda sönümleme görevi yapabilir.
- İmalatı zor küçük parçalar üretilebilir.
- Üretim hassasiyetle yapılırsa döküme göre homojen mikroyapılar elde edilebilir.
- Gelişmiş teknolojiye uygun malzemeler üretilebilir.

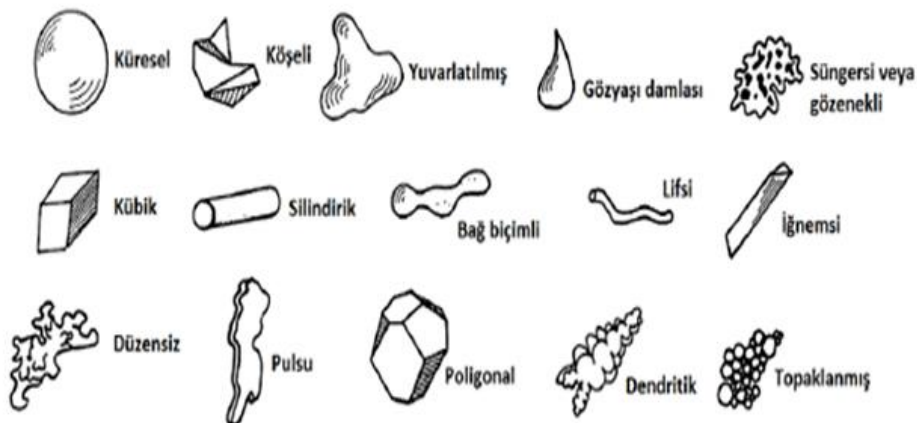
- Çoklu üretim yapılabildiği için birim parça maliyeti oldukça düşüktür (Kaya, 2021; Dinler, 2018).

Her üretim aşamasında olduğu gibi TM’de yüksek kalite ürünler elde etmek için üretim parametreleri hassasiyetle gerçekleştirilmelidir. Toz metalürjisinin avantajları olduğu gibi dezavantajları da vardır ve şöyle sıralanabilir (Kaya, 2021; Dinler, 2018).

- Tozların elde edilmesi veya üretimi maliyetli olabilir.
- Bazı durumlarda parça şekli sınırlı kalabilir.
- Tozlardan kaynaklanan atmosferik kirlenme iş sağlığı sorunları oluşturabilir.
- Tozlar cihazlarda kirlenmelere neden olabilir.

1.6.2. Toz Boyutu ve Şekilleri

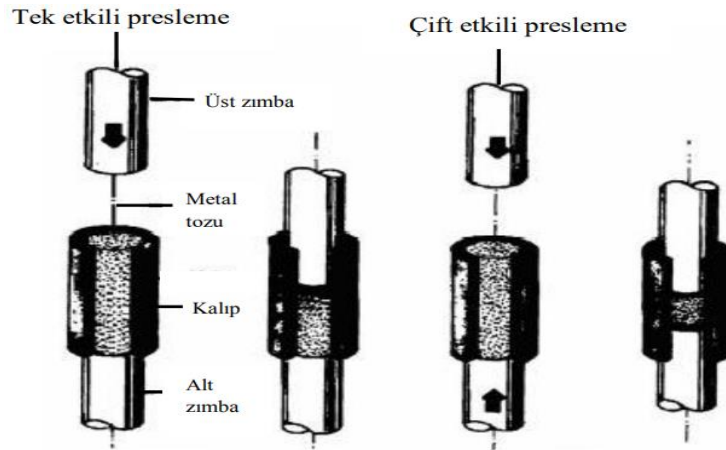
Toz metalürjisinde başlangıç malzemesinin özellikleri, nihai ürünün kalitesini etkiler. Nihai ürünün özellikleri, tozların kimyasal bileşimi ve saflığının yanı sıra parçacık boyutu, şekli, parçacık dağılımı ve yüzey yapısından önemli ölçüde etkilenir. Kullanılan tozlar tipik olarak 1-200 μm aralığındadır, ancak 1 mm’den büyük değildir. Tozların şekilleri, üretim yöntemine ve parametrelerine bağlı olarak küresel, dendritik, iğne şekilli, düzensiz, lifli, köşeli ve yumru olabilir (Şekil 7). Toz üretimi, mekanik küçültme, kimyasal indirgeme, elektrolitik biriktirme ve sıvı metal atomizasyonu yöntemleriyle gerçekleştirilir. Atomizasyon, bunlardan en yaygın olanıdır.



Şekil 7. Endüstriyel uygulamalarda kullanılan toz şekilleri (Kaya, 2021).

1.6.3. Tozların Şekillendirilmesi

Sıkıştırma veya presleme, belirli bir yük altında serbest yapıdaki toz partiküllerine arzu edilen şekli vermek ve yoğunluk kazandırmaktır. Tek eksenli kalıp ile presleme en yaygın yöntemdir. Toz kalıba sıkışırken alt zımba sabit kalırken üst zımba aşağı hareket eder. Bu nedenle tozlara sadece bir yönden baskı uygulanır. Bu, üst zımbanın alt yüzeyini çevreleyen basıncın uygulandığı tarafta en yüksek yoğunluğa neden olurken, alta doğru iletilen kuvvet azaldığı için düşük yoğunluğa neden olur. Yani, kalın parçaların üretiminde bu yöntem uygun olmayabilir, çünkü homojen bir yoğunluk elde edilemez (Babayev, 2007; Umutoğlu, 2008). Bu problem çift yönlü pres kullanılarak aşılabılır. Bu durumda, kalıp içindeki tozlara üst ve alt zımba aynı anda basınç uygular. Bu, daha homojen yoğunluğa sahip parçalar üretmek için kullanılır. Tek ve çift yönlü preslemenin şematik resmi Şekil 8'de gösterilmektedir.



Şekil 8. Tek etkili ve çift etkili presleme (Babayev, 2007).

Sıkıştırılabilirlik, malzemenin yumuşaklığına ve toz tanelerinin kalıp ile kendi aralarındaki sürtünmesine bağlıdır. Kalıp presleme süreci üç temel aşamadan oluşur:

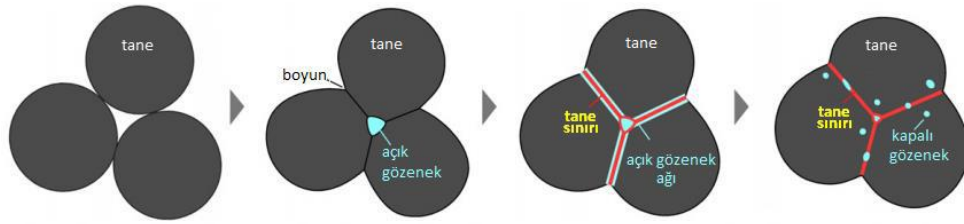
- Kalıp boşluğuna belirlenen miktarda metal tozu eklenmesi,
- Zımbalar kullanılarak tozun basınçla sıkıştırılması,,
- Şekillendirilen parçanın kalıptan çıkarılması.

Sıkıştırma sırasında toz üzerine uygulanan basınç 3-8 ton/cm²'dir. Basınç, hidrolik veya mekanik preslerle sağlanır (Babayev, 2007).

1.6.4. Sinterleme

Toz metalürjisinde, sinterleme ısı bir prosedürdür. Bu, metal, seramik ve preslenmiş tozları ana tozun ergime sıcaklığının altında bir sıcaklıkta tutmak anlamına gelir. Çoğu zaman, toz metalurjisi yönteminin son aşaması sinterleme olarak bilinir. Bu yöntem, tozların boyutlarını ve gözeneklerin şeklini değiştirerek tozların güçlü bir şekilde birleşmesini sağlar (Babayev, 2007).

Sinterlenme, yüksek sıcaklıklarda yüzey enerjisinde meydana gelen azalmadır. Yüzey enerjisinde azalma olduğunda, difüzyon hızı artar. Özellikle karşılıklı atomların difüzyonu gibi, birbirleriyle temas halinde olan tozlar arasında bir boyun bölgesi oluşur ve tozlar birbirlerine nüfuz eder [69]. Sinterleme sırasında partiküller arasında meydana gelen boyun oluşumu Şekil 9'da gösterilmektedir (Umutoğlu, 2008).



Şekil 9. Sinterlemede taneler arasında meydana gelen büzülme (Dinler, 2018).

Sinterleme prosesi temel olarak katı ve sıvı faz sinterleme olmak üzere iki gruba ayrılır. Katı faz sinterlemesi, toz halindeki malzemelerin yüksek sıcaklıkta preslenerek sıkıştırılmasıyla gerçekleştirilir. Malzemeler arasındaki boşluklar kapanır ve parçalar birleştirilir, bu da daha yoğun ve mukavemetli bir malzeme oluşturur. Sinterleme sırasında, malzeme sıcaklığı genellikle malzemenin erime sıcaklığından daha düşüktür, bu nedenle malzeme erimez. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıkta, malzemeler arasındaki yüzey enerjisi azalır ve atomlar arasındaki difüzyon gerçekleşir. Bu difüzyon süreci, malzemelerin sinterlenmiş bir yapı oluşturması için parçaların birbirine bağlanmasını sağlar (Kaya, 2021; Dinler, 2018; Umutoğlu, 2008).

Sıvı faz sinterlemesi ise, sinterleme sırasında ek bir sıvı fazın kullanıldığı yöntemdir. Sinterlenmeye tabi tutulan malzeme ve eklenen sıvı faz, belirli bir sıcaklıkta eriyebilen veya reaksiyona girebilen malzemelerden oluşur. Sıvı faz, malzemelerin daha iyi bir şekilde birleşmesini ve daha homojen bir yapı oluşturmasını sağlar. Sıvı faz, sinterleme sıcaklığında malzemeler arasında dağılır ve malzemelerin birbirine sıkıca bağlanmasını

sağlayan bir bağlayıcı görevi görür. Sıvı faz sinterlemesi, daha karmaşık şekillere sahip malzemelerin üretiminde ve daha yüksek yoğunluklu ve mukavemetli parçalar elde etmek için kullanılır (Kaya, 2021; Dinler, 2018; Umutoğlu, 2008).

1.7. Mekanik Alaşımlama/Mekanik Öğütme

1966 yılında John Benjamin ve ark. mekanik alaşımlama/öğütme (MA/MÖ) yöntemini geliştirdiler. MA, Ni bazlı yüksek sıcaklık dayanımlı oksit parçacıklarıyla takviye edilmiş Ni bazlı süper alaşımların oluşturulmasına yardımcı oldu. Uygulamanın ardından elde edilen malzemelerin gaz türbinlerine istenen özellikleri kazandırması amaçlamaktaydı. 1970'lerde, aynı ekip, bilyeli öğütme tekniği ile en iyi sonuçlara ulaştı. Çünkü bu yöntem, ince partiküllerin üretilmesine izin verir çünkü partiküllerin yüksek deformasyondan dolayı kırılması ve tekrar soğuk kaynaklanması işleminin ardışık bir sıralaması vardır. MA yöntemi geliştikçe kullanım alanları genişledi. Havacılık ve otomotiv endüstrisi ilk olarak bu değişikliğin öncüsü oldu (Suryanarayana, 2001).

Mekanik alaşımlama, paslanmaz çelik ve tungsten karbürden yapılmış değirmenler içinde tozların sürekli olarak kırılması ve soğuk kaynak işlemlerinin tekrarlanması yoluyla gerçekleşen katı hal alaşımlama işlemidir (Şekil 10). Bu işlemin sonunda tane boyutu küçülür, takviye malzemeleri matris içinde eşit bir şekilde dağılır, katı çözünürlüğü artar ve yarı kararlı ve amorf fazlar oluşur. Alaşımlama sürecinde, soğuk kaynak işlemi toz boyutunu artırır ve kırılma miktarını azaltır. Öğütme sırasında bilyelerin birbirlerine ya da öğütme potasının yüzeylerine çarpması, tozların plastik deformasyona uğramasına, birbirine kaynak olmasına ya da kırılmasına neden olur. Öğütme hızı, toz-bilye ağırlık oranı, işlem kontrol katkısı oranı, öğütme ortamı büyüklüğü, bilye çapı, öğütme ortamı sıcaklığı ve öğütme atmosferi gibi öğütme kinetiğini etkileyen birçok faktör vardır (Suryanarayana, 2001). Öğütücü kabın cinsi öğütme esnasında tozla etkileşime girmemesi, bilyelerin çarpması esnasında kırılma ve kopmalara dayanıklı olması açısından önemlidir. Toz: bilye ağırlık oranı doğru seçilmelidir, bu oran artıkça istenilen sonuca ulaşmak için gereken zaman da artar. Oksitlenmeyi önlemek için vakum, argon ve helyum gibi öğütücü atmosferler kullanılmalıdır. Kararlı hale ulaşma süresi ile öğütme süresi eşit olmalı fazla ya da az olmamalıdır. İşlem kontrol katkısı (İKK), soğuk kaynak ve kırılma arasındaki dengeyi sağlamak için gereklidir. İşlem kontrol katkısı, tozların öğütme potası ve bilye

yüzeylerine yapışmasını engelleyerek öğütme veriminin düşmesini önler (Fuentes vd., 2010).



Şekil 10. Bilyalı Öğütücü (Umutoğlu, 2008).

Mekanik alaşımlama işleminde işlem kontrol katkısı olarak metanol, stearik asit ve etanol en çok kullanılan yağlayıcılar ve yüzey aktif maddelerdir. Bu maddeler karışıma katı, sıvı veya gaz halinde dahil edilebilir. Yağlayıcıların mekanik alaşımlama üzerindeki etkilerini anlamak için, bu kimyasalların görevlerini anlamak gerekir. Bu görevler aşağıdaki gibidir:

- Soğuk kaynaklanma etkisini azaltmak.
- Partiküller arasındaki topaklanmayı engellemek.
- Yağlayıcının niteliği, miktarı ve öğütme şekli; tozların son tane boyutunu, şeklini ve saflık derecesini belirler.
- Birçoğunun kullanımı son tane boyutunu azaltır (Delibalta, 2016).

MA teknolojisi, mevcut üretim sistemleri ile elde edilen malzemelerden daha üstün özellikte malzemeler elde etme şansı verdiği için, metal matrisli kompozitlerin üretiminde uygun bir yöntemdir. Bu işlem, takviye parçacıklarının eşit bir şekilde dağılmasını sağlayarak topaklanmayı önlemektedir. Bu, diğer geleneksel imalat tekniklerinin karşılaştığı sorunları azaltır hatta ortadan kaldırır (Özkaya, 2014). Yöntemin genel avantaj ve dezavantajları aşağıdadır;

Avantajları:

- Gelişmiş malzemelerin tasarımında kullanılabilir.

- Ergitme teknikleri kullanılarak üretilmesi zor veya imkansız olan elementlerin (örneğin WC-Co) kullanılması mümkün hale gelir.
- Sıvı fazda (Cu-Pb) veya katı fazda (Fe-Cu) çözünmeyen elementler birbirleriyle alaşımlandırılabilir.
- İntermetallikler, erime sıcaklıkları çok farklı olan malzemelerden üretilir.
- Takviye parçacıklar dislokasyon hareketini engeller.
- Malzemelerin yüksek sıcaklıklarda kararlı olmasını sağlar.
- MA işleminden sonra iri, uzun ve birbirine kenetlenmiş taneler elde etmek mümkündür. -
- İkinci yeniden kristalleşme işleminden sonra iri taneli yapı ortaya çıkar ve tane sınırının kaymasını engeller.
- Segregasyon problemi ortadan kaldırılabilir.
- Dış etkilere daha az duyarlı malzemeler üretilir.
- Nano kristalli malzemeler yapmak için uygundur.
- Bir defada oldukça fazla toz alaşımlamak ve üretmek mümkündür.
- Ucuz malzeme üretimi mümkündür (Özkaya, 2014; Cebeci, 2008).

Dezavantajları;

- Tozlar öğütme süresi arttıkça gevrekleşir, çünkü çok fazla deformasyona uğrar. Bu nedenle, nihai ürün kırılgan hale gelir.
- Gevreklikten kaynaklı kırılganlığı önlemek için üretilen malzemeye ekstra bir ısıtma işlemi yapmak gerekebilir.
- Öğütme sırasında yeni yüzeylerin oluşması gibi nedenlerle tozun kirlenmesi.
- Enerji verimi düşüktür, çünkü toz çarpışmaları enerjinin çoğunu ısı olarak açığa çıkarır (Özkaya, 2014).

Mekanik alaşımlama gevrek-gevrek, sünek-gevrek, sünek-sünek alaşımlama sistemi olmak üzere üçe ayrılmaktadır.

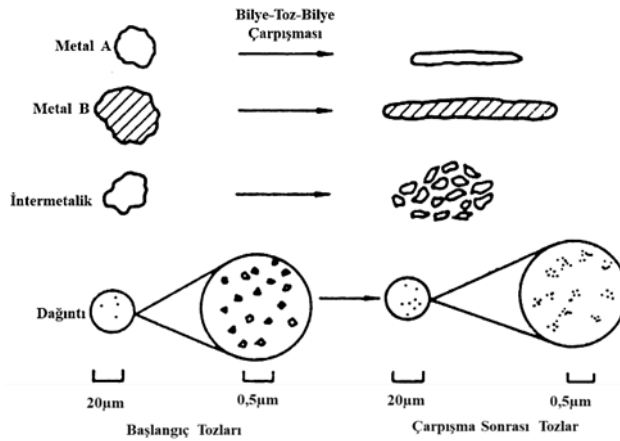
Gevrek-Gevrek Alaşımlama

Sünek bir bileşenin olmaması herhangi bir kaynaklanmaya yol açmayacağından gevrek-gevrek sistemlerde alaşımlanma beklenmeyebilir. Öğütme sırasında gevrek tozlar sürekli olarak küçülürler. Toz parçacıkları çok küçük boyutlara ulaştığında sünek hale gelir ve daha fazla parçalanmaz. Gevrek malzemelerin öğütülmesi sırasında malzemenin

taşınmasına yardımcı olan çeşitli mekanizmalar vardır. Bunlar arasında sıcaklık artışı, hatasız yapıda mikro deformasyon, yüzey deformasyonu ve/veya öğütme sırasında tozlarda hidrostatik gerilim meydana gelmesidir (Cebeci, 2008).

Sünek-Gevrek Alaşımlama

Bu sistemde bilye-toz-bilye çarpışmaları, sünek metal tozlarını pulsu hale getirir ve gevrek parçacıkları kırar. Kırılan gevrek tozlar sünek tozların arasındaki boşluklara yerleşir. Tozlar zaman içinde deformasyon sertleşmesine uğrar, tabakalar büyür ve boyutları küçülür, tabakalar arası boşluklar artar ve gevrek parçacıklar çözünmezse sünek matrise yayılır (Mertdinç, 2016). Böylece son safhaya gelindiğinde hem eş eksenli partiküller hem de homojen bir yapı elde edilir (Varol & Canakci, 2013).



Şekil 11. Tozların temsili deformasyon özellikleri (Suryanarayana, 2001).

Sünek-Sünek Alaşımlama

Alaşım elde etmek için en az %15 sünek bileşenin gerekli olduğunu MA için ideal malzeme kombinasyonudur. Çünkü gerçek alaşımlama tekrarlanan soğuk kaynak ve toz parçacıklarının kırılmasıyla meydana gelir. Eğer parçacıklar sünek değilse soğuk kaynak oluşamaz. MA'nın erken aşamalarında, sünek bileşenler bilyelerin birbirleriyle çarpışması sonucu bir mikro dövme işlemiyle yassı şekillere dönüşür. Bir sonraki aşamada, bu inceltirilmiş parçacıklar soğuk kaynakla birleşir. Bu aşamada partikül boyutunda da bir artış gözlemlenir. Kompozit toz partiküllerinin sertlik ve kırılabilirliği, MA süresinin artmasıyla

artar ve daha eş eksenli boyutlara sahip partiküller elde edilir. Belirli bir süre öğütmenin ardından, kaynaklanma ve kırılma arasında denge sağlanarak kararlı hal durumuna ulaşıldıktan sonra, kaynaklanma ve kırılma arasında denge sağlanır. Kararlı asamaya gelinceye kadar ağır bir deformasyona maruz kalan tozlarda dislokasyonlar, boşluklar ve tane sınırlarında artış gibi birçok kristal hata meydana gelir. Bu hataların varlığı, matris içine elementlerin difüzyonuna neden olur ve bu da alaşımlama olarak bilinir (Suryanarayana, 2001).

1.8. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Mekanik Özellikleri

Alüminyum matrisli kompozitlerin mekanik özellikleri, üretim yöntemi, uygulanan mekanik ve ısı işlemler, matris alaşımının kimyasal bileşimi, takviye fazının cinsi, şekli, miktarı, boyutu, matris içerisindeki dağılımı, matris/takviye fazı arasındaki bağ kuvvetinin durumu gibi etkenlere bağlı olarak değişir.

Üretim yöntemi, kompozitin özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çünkü takviyenin dağılımı, yüzey özellikleri ve matris malzemesiyle etkileşimini bu süreç belirlemektedir. Takviyenin, matris malzemesine göre daha yüksek mukavemet ve rijitliğe sahip olması kompozitin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir. Homojen dağılım göstermiş takviyeler kompozitin mekanik özelliklerindeki zayıf noktaları azaltır ve daha homojen bir yük dağılımı sağlar. Eğer takviyeler yetersiz veya heterojen bir şekilde dağılmışsa, kompozitin mekanik özellikleri farklı bölgelerde farklı olacaktır ve yük dağılımı da homojen olmayacaktır. Toz metalürjisi, partikül takviyeli alüminyum metal matrisli kompozitlerin üretimi için umut vaat eden yöntemlerden biridir. Çünkü bu kompozitlerin imalatında partiküllerin aglomerasyonu ana problemdir ve diğer imalat proseslerinin aksine, toz metalürjisi takviyenin matris içinde üniform dağılımını sağlamaktadır. Kompozit malzemede takviye elamanının yapı içerisinde homojen olarak dağılım göstermesi, %60'a kadar daha yüksek akma ve çekme mukavemeti sergilemektedir. Ayrıca matris ve takviyenin katı halde karıştırılması, preslenmesi ve matrisin ergime sıcaklığı altında bir sıcaklıkta sinterlenmesi ıslanma probleminin üstesinden gelinip iyi bir arayüzey elde edilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemle üretilen malzemelerin mekanik özellikleri, presleme basıncı ve süresi, sinterleme sıcaklığı ve süresi, malzeme bileşimi ve içyapısı gibi birçok faktöre bağlıdır (Vani & Chak, 2018).

Sıkıştırma (presleme) işleminin temel amacı, toz parçacıkları arasında bir kohezyon oluşturmak için parçacıkları basınçlandırmak ve bağlamaktır. İyi bir sıkıştırma için, daha iyi kenetlenme ve dolayısıyla yüksek mukavemet sağladıkları için düzensiz şekilli parçacıklar tercih edilir. Uygulanması gereken basınç miktarı, matrisin ve takviyenin şekline, malzemesine, karıştırma yöntemine, yağlayıcılara ve istenen ham kompakt yoğunluğuna bağlıdır. Yüksek presleme basınçlarında, malzeme daha homojen bir yapıya sahip olur ve bu da malzemenin mekanik özelliklerini artırır. Presleme süresi de malzemenin yoğunluğunu ve içyapısını etkileyerek, mekanik özelliklerin artmasına neden olur (Vani & Chak, 2018; Ravi Kumar vd., 2017; Chakrapani & Suryakumari, 2020).

Toz metalürjisinde kullanılan sinterleme işlemi, malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Sinterleme sırasında, kompozit tozların birbirine bağlanması için, erime noktalarının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılırlar. Bu işlem, malzemenin gözenekliliğini, yoğunluğunu, tane boyutunu ve mikro yapısını etkiler böylece mekanik özelliklerde etkilenir. Sinterlemenin mekanik özellikler üzerindeki etkisi, sinterleme sıcaklığı, sinterleme süresi ve sinterlenen malzemenin türü gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Genel olarak, sinterleme sıcaklığının veya süresinin arttırılması, malzeme yoğunluğunda artışa ve gözeneklilikte azalmaya yol açar, bu da mukavemet, tokluk ve aşınma direnci gibi mekanik özellikleri geliştirebilir. Bununla birlikte, çok yüksek sıcaklıkta veya uzun sürede sinterleme, tane büyümesine neden olarak mukavemet ve tokluğun azalmasına neden olabilir (Vani & Chak, 2018; Ravi Kumar vd., 2017; Chakrapani & Suryakumari, 2020).

Metal matrisli kompozitlerin mukavemet, sertlik, tokluk, yorulma, sürünme ve termal genleşme katsayısı gibi mekanik ve fiziksel özelliklerinin çoğu arayüzey davranışına bağlıdır. Yükün matristen donatıya verimli bir şekilde aktarılmasında, kompozitlerin güçlendirilmesi ve sertleştirilmesinde arayüzde oluşacak güçlü bağ kuvvetinin önemi büyüktür. Kompozit malzemeye uygulanan yük, zayıf bileşen olan matristen arayüzey aracılığıyla takviye malzemesine aktarılır. Bu nedenle, takviye malzemesi tipik olarak daha rijittir. Takviye malzemesinin uygulanan yükün büyük bir kısmını taşıması ile de mukavemet artışı gerçekleşir (Toptan, 2011). Eğer zayıf arayüzey bağı olursa matris ve takviye arasında ayrılmalar olur, buda kompozitin dayanımını azaltır. Kompozitlerin sünekliği de büyük ölçüde arayüzlerden etkilenir. Metal takviyeli kompozitler, metalik bağdan kaynaklanan daha iyi ara yüzey bağları nedeniyle seramik takviyelilere kıyasla daha sünektir (Rajan vd., 1998).

1.9. Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışı

Birbiriyle temas halinde olan parçaların hareketi sırasında mekanik veya kimyasal etkileşimler nedeniyle malzemenin kaybı (adhezif) ya da bir kuvvet etkisiyle katı bir yüzey üzerinde hareketli sert bir cisim aracılığıyla malzemenin yer değiştirmesi (abrasif) aşınma olarak bilinir.

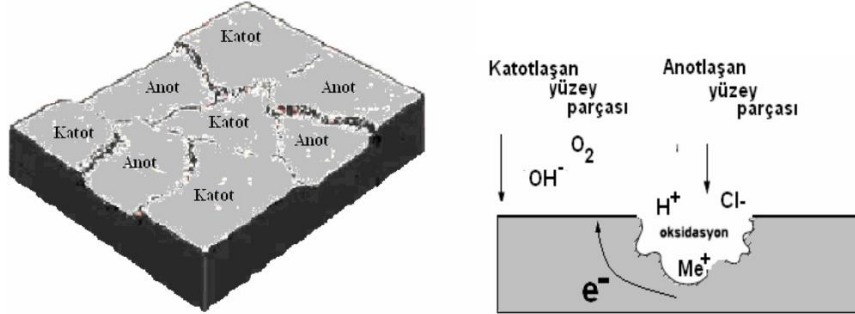
Bazı araştırmalara göre partikül takviyeli AMK'lerin aşınma direnci takviyesiz matris alaşımlarına göre daha yüksektir (Rajan vd., 1998; Ipek, 2005; Mondal & Das, 2006). Aşınma direncindeki bu artış, aşınma yüzeyindeki sert partiküllerin yük taşıma etkisiyle matrisi korumasına ve bazen aşınma arayüzeyinde oluşan tabakanın aşınma direncini artırmasına bağlanabilir (Mindivan, 2018; Kennedy & Wyatt, 2000). Bununla birlikte, bazı aşınma durumlarında, takviye elemanı ilavesinin aşınma direncini matrise yakın veya daha aşağıda kalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, bu konuda net bir değerlendirme yapabilmek için aşınma parametrelerinin anlaşılması ve özenle analiz edilmesi gerekir (Köz, 2021).

1.10. Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Korozyon Davranışları

Korozyon, çevredeki malzemeye verilen tepki süreci veya eylemidir. Korozyona maruz kalan malzemeler arasında polimerler, seramikler ve metaller bulunur. Metal korozyonunun çoğu örneği, oksijen veya su ile olan çekimi ile ilgilidir. Korozyon en çok metallerin elektrokimyasal veya kimyasal prosedürlerle oksidasyonunu ifade eder. Çeliğin suya veya nemli havaya maruz kalması nedeniyle paslanması, elektrokimyasal korozyon örneği olarak iyi bilinir. Metal su veya oksijen ile reaksiyona giriyor ve demir oksit oluşturuyor (Yang, 2008). Al alaşımlarının korozyon direnci, normal atmosferik koşullar altında alaşım yüzeyinde doğal olarak gelişen bir oksidasyon pasif filminin oluşumu ile ilgilidir. Bu nedenle, normal koşullar altında belirli seviyelerde koruma önemlidir (Ezuber vd., 2008). Korozyon bazı tipik şekillerde açıklanmakta ve ifadenin ortak yorumu, çevre ile reaksiyona girerek malzemelere saldırıdır. Korozyon kavramı, metalik olmayan malzemelere saldırıyı da içerdiği için daha geniş anlamda kullanılabilir (Bardal, 2007).

Elektrokimyasal korozyon sırasında MMK'lerin anodik bölgelerinde oksidasyon ve katodik bölgelerinde redüksiyon tepkimeleri meydana gelir (Şekil 12). Oksidasyon sırasında elektronlar anodik bölgelerden katodik bölgelere hareket ederler. Katodik ve

anodik bölgeler arasındaki potansiyel fark (mV), bu reaksiyonları başlatır. İyon hareketleri nedeniyle oluşan elektrik akımı korozyona yol açar (Erdemir vd., 2015).



Şekil 12. Metal yüzeyinde oluşan anodik veya katodik bölgeler (Saraloğlu, 2010).

Korozyon her yerde aynı hızda ilerlediğinde, metalin kalınlığı her yerde aynı oranda incelir. Birim zamanda birim yüzey alanına düşen ağırlık kaybı (mg/dm^2 günlük) veya ortalama penetrasyon (mpy veya mm/yıl) eşit korozyon hızını gösterebilir. Korozyon hızını hesaplamak için kullanılan bağıntılar, korozyonun aynı şekilde gerçekleştiği varsayımına dayanmaktadır (Saraloğlu, 2010; Salih, 2017).

Malzemenin pasif filmi sebebiyle oluşan korozyon çukurları genelde paslanmaz çelik, alüminyum, titanyum, bakır, magnezyum ve nikel alaşımları gibi malzemelerde gerçekleşmektedir. Anot bölgesi, malzemenin korozyona uğrayan yüzeyindeki herhangi bir bölgede açılan çukurun içerisindeki dar bir bölge olarak, katot bölgesi ise çukurun çevresindeki çok geniş bir bölge olarak ayrılır. Proses boyunca çukur giderek büyür, bu da o bölgede daha fazla deformasyona neden olur ve ince parçaların o bölgeden delinmesine neden olur (Fang vd., 2018; De Meo & Oterkus, 2017). Galvanik korozyon, iki farklı metalin veya alaşımın bir araya geldiği bir yapıda meydana gelir. Bu yapıda, metaller arasında elektrokimyasal bir potansiyel farkı vardır. Daha aktif olan metal, yani daha düşük elektrokimyasal potansiyele sahip olan metal, anot olarak işlev görür ve korozyona uğrar. Daha soy olan metal, yani daha yüksek elektrokimyasal potansiyele sahip olan metal, katot olarak işlev görür ve korozyon sürecinde korunur. Metallerin bulunduğu ortamların koroziflik dereceleri, metaller arası mesafe, katot ve anot yüzey oranı galvanik korozyonu oluşturan nedenlerden birkaçıdır (Saraloğlu, 2010; Yalçın, 2018).

1.10. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Al alaşımları havacılık, otomotiv ve yapısal uygulamalarda geniş bir kullanım alanına sahiptir (Yan vd., 2018). AA2024, iyi işlenebilirlik, iyi özgül mukavemet ve iyi ısıya dayanıklılık özelliği nedeniyle en yaygın kullanılan Al alaşımlarından biridir (Gopalakrishna vd., 2010). Bununla birlikte, düşük mukavemet, zayıf şekillendirilebilirlik ve korozyona karşı direnç gibi bazı dezavantajları vardır (Özbeyaz vd., 2019). Birçok araştırmacı bu dezavantajların üstesinden gelmek için çeşitli çalışmalar yürütmüştür (Kök, 2006; Carreño-Gallardo vd., 2014; Shin et al., 2014). Seramik takviyeli metal matrisli kompozitlerin geliştirilmesi bu çalışmaların bazılarına konu olmuştur. AA2024'ün özelliklerinde önemli bir iyileştirme yapılmış olmasına rağmen (Carreño-Gallardo vd., 2012; Zheng vd., 2013; Sameezadeh vd., 2011; Bekheet vd., 2002), matris ve seramik takviye arasındaki ıslanabilirlik sorunları, gözeneklilik ve zayıf arayüzey bağı (Yazdipour & Heidarzadeh, 2016; Shayan vd., 2019) gibi bazı sorunlar daha düşük mekanik özelliklere neden olmuştur. Yukarıda belirtilen zorlukları ortadan kaldırma potansiyelleri nedeniyle araştırmacılar, metal/metal kompozitlerle giderek daha fazla ilgilenmektedir. Kompozitlerde matris ve takviye olarak farklı metaller kullanıldığında, iyi çözünürlük sayesinde üniform ve uyumlu bir arayüz elde edilebileceği iddia edilmektedir (Gopi Krishna vd., 2017). Bazı gruplar, metalik takviyelerin, matris ve takviye arasında intermetalik bileşiklerin oluşumu sayesinde mekanik özellikleri iyileştirdiğini bildirmiştir.

-Sankaranarayanan vd., (2011), alüminyum (Al), titanyum (Ti) ve ile güçlendirilmiş, magnezyum (Mg) temelli malzemeleri sıvı hal üretim tekniği ile üretmişlerdir. Üretilen malzemeleri mikroyapısal ve mekanik özellikleri açısından incelemişlerdir. Sonuçlar; saf magnezyum ile karşılaştırıldığında, tüm Mg temelli malzemelerin mikrosertlik, çekme ve sıkışma özelliklerinde önemli bir gelişme olduğunu göstermiştir. Mg-3Al ve Mg-5.6Ti'nin oluşumu, özellikle Mg ile yapısal uyumluluk ve Ti ve Mg'nin iyi ıslanabilirliği nedeniyle mekanik özellikleri iyileştirmiştir.

-Hassan & Gupta (2002), bakır takviyeli magnezyum matrisli kompozitleri parçalanmış eriyik biriktirme tekniği ile imal ettiler ve bakırın varlığının (elemental/metaller arası formda) magnezyumun sertlik, akma mukavemeti ve nihai gerilme mukavemetinde bir iyileşmeye yol açtığını bildirdiler.

-Mani Kumar & Neelima Devi (2014), Al6061 alaşımına ağırlıkça değişen oranlarda Cu ilave ederek basınçlı döküm yöntemi ile üretilen kompozitlerin mekanik davranışını

incelemişlerdir. Sonuçlar, bakır parçacıklarının Al6061 matrisinde düzgün bir şekilde dağıldığını ortaya çıkarmıştır. Takviye oranı %8'e kadar arttıkça kompozitlerin sertlik ve çekme dayanımı değerleri de artmış fakat %10 takviye için azalmıştır.

-Saf bakır ilaveli A356 alaşım matrisli kompozitler, karıştırmalı döküm tekniği ile Swapna ve diğerleri tarafından üretilmiştir (Naga Swapna & Chittaranjan Das, 2018). Sonuçlar, kompozitlerin alaşımın matrisine kıyasla geliştirilmiş sertlik sergilediğini gösterdi. Nihai çekme mukavemeti, akma mukavemeti ve sünekliği alaşıma kıyasla gelişmiş özellikler göstermiştir.

-Farajollahi vd. (2021), Ni ile güçlendirilmiş AA2024 matrisli kompozitin mikro yapısını, mekanik ve tribolojik özelliklerini incelemiştir. Karıştırmalı döküm işlemi sırasında Nikel ilave edilen ve ardından homojenizasyon uygulanan kompozitlerde, Al_3NiCu intermetalik fazlar oluşmuştur. AA2024 alaşımına kıyasla, ağırlıkça %3 nikel ilavesi, sürtünme katsayısını ve aşınma oranını sırasıyla yaklaşık %13 ve %12 azaltırken, mukavemeti yaklaşık %42 artırmıştır.

- Medrano-Prieto vd. (2020), ağırlıkça %1-2 oranında Ni ilavesinin ve sıcak deformasyonun A356 yaşlandırılmış alaşımın mikro yapısı ve sertliği üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuçlar, bu elementin eklenmesinin yüksek termal kararlılığa sahip $Ni_{31}Si_{12}$ ve $NiFe$ fazlarının oluşumunu sağladığını göstermiştir.

-Kumar vd. (2020), kontrollü bir ortamda karıştırmalı döküm teknikleri ile farklı ağırlık yüzdelerinde (ağırlıkça %0-2) nikel tozu dolgulu alüminyum alaşımlı kompozitler üretmişlerdir. Üretilen kompozitlerin fiziksel, mekanik ve tribolojik özelliklerini deneysel olarak incelemişlerdir. Kompozitlerin boşluk içeriği, vickers sertliği, basınç ve darbe dayanımı, dolgu içeriğinin artmasıyla artarken, eğilme dayanımı azalmıştır.

-Nath Op & Arul (2020), alüminyum alaşımlarının güçlendirilmesi için karıştırmalı döküm yöntemi kullanılarak Al7075 alaşımına farklı ağırlık yüzdelerinde (%1, %5, %10 ve %15) Nikel takviye ederek dört farklı kompozit üretmişlerdir. Sonuçlara göre; baz alaşımın mikro sertliği, %15 nikel takviyesi ve ardından ısıtılma işlemi uygulanarak %146'ya kadar iyileştirildi. Ayrıca baz alaşımının Ni ilavesi ile aşınma direnci de artmıştır.

-Ravikumar vd. (2016), Al-4.5Cu alaşımına Cr ilavesinin sertliğe, çekme özelliklerine ve aşınmaya etkisini araştırmışlardır. Numuneler karıştırmalı döküm tekniği ile üretilip, 540°C'de 4 saat çözelti ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından 170°C'de 17 saat ve 20 saat yaşlandırılmıştır. Bulgular; düzensiz dağılmış çokyüzlü yapıların varlığını, sertliğin, nihai

çekme dayanımının ve akma dayanımının arttığını, fakat daha fazla krom ilavesiyle azaldığı göstermiştir. Aşınma direnci ise sertlik artışı ile azalmıştır.

-Liao vd. (2020), Cr ilavesinin Al-Zn-Mg-Cu-Zr alaşımının mekanik ve korozyon özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Cr ilavesinin ağırlıkça %0,1 olduğu numunelerde mukavemet, tokluk ve korozyon direncinde artış olduğu belirtilmiştir. Cr oranı %0,18 olunca alaşımlar üzerinde olumsuz etkiler yaptığı vurgulanmıştır.

-Günen vd., (2023), kimyasal bileşimi Fe-0.4C-2.0Cu-0.5Mn olan Distaloy NC 100.24 tozlarına %0, %3, %6, %9, %12 oranlarında Cr ilave ederek 6 saat mekanik alaşım uygulamışlardır. Toz karışımını 200Mpa basınçta soğuk preslemiş, ardından 1100°C’de sinterlemişlerdir. Cr ilavesinin ağırlıkça %6’ya kadar alaşımın mikrosertliği, kırılma tokluğu ve aşınma direnci üzerinde iyileştirici bir etkiye sahipken, ağırlıkça %9-12 Cr ilavesi durumunda kötü etki yaratmıştır.

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda AA2024 matrisli metal takviyeli kompozitlerin toz metalürjisi ile üretildiği çalışmaların az olduğu görülmüştür. Bu konuyla ilgili altyapı oluşturmak için AA2024 alaşımına ağırlıkça % 0, 0.5, 1, 2, 3 ve 5 Cu, Ni ve Cr ilave edilerek; tekli (AA2024/Cu, AA2024/Cr, AA2024/Ni) kompozitler ve ikili (AA2024/Cu-Ni, AA2024/Cu-Cr, AA2024/Cr-Ni), üçlü (AA2024/Cu-Ni-Cr) hibrit kompozitler, toz metalürjisi yöntemi ile 500MPa basınç ve 560°’de sıcak preslenerek üretilmişlerdir. Üretilen kompozit ve hibrit kompozitlerin içyapı, mekanik, fiziksel, korozyon ve aşınma özellikleri ile ilgili incelemeler yapılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1.Kullanılan Malzemeler

Matris malzemesi olarak AA2024 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. İki El Metal Tozlar'dan temin edilen alaşım tozları 2.8gr/cm^3 yoğunluğundadır. Matris malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 3, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 4'de verilmiştir. Metal takviye olarak Alfa Aesar'dan $8,93\text{ gr/cm}^3$ yoğunluğunda Cu, Umicore Precious Metals'dan $8,9\text{ gr/cm}^3$ yoğunluklu Ni ve Alfa Aesar'dan $7,19\text{ gr/cm}^3$ yoğunluğunda Cr tozları kullanılmıştır.

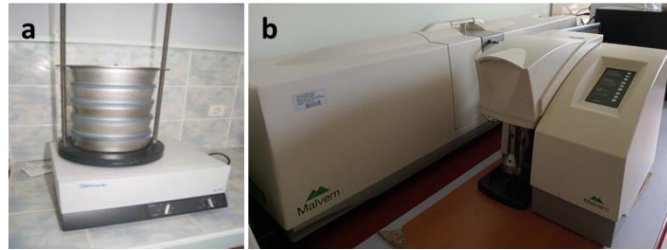
Tablo 3. AA2024 başlangıç tozlarının kimyasal bileşimi

Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Cr	Ti	Al
4.85	1.78	0.312	0.374	0.385	0.138	0.042	0.005	92.114

Tablo 4. AA2024 Alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri (Özkaya, 2014).

Yoğunluk (gr/cm^3)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Sertlik (BSD)
2,8	75	185	55

Başlangıç olarak, AA2024 alaşım tozları elekten geçirilerek (Şekil 13.a) ortalama tane boyutu $96.9\text{ }\mu\text{m}$ olan başlangıç tozları elde edildi ve bunlar daha sonra çalışmanın matris malzemesi olarak kullanıldı.



Şekil 13. Elek Sistemi (a) ve parçacık boyut ölçüm cihazı (b)

Öğütme sonrası tozların boyutu lazer parçacık boyut ölçüm cihazı Malvern InstrumentsTM-Mastersizer 2000e'de (Şekil 13.b) saf su ortamında yapılmıştır.

2.2. Kompozit Tozların Hazırlanması ve Öğütülmesi

Cu, Ni ve Cr parçacık ve hibrit parçacık takviyeleri % ağırlıkça 0, 0.5, 1, 2, 3 ve 5 oranlarında AA2024 matrisi içerisine katılarak kompozit tozlar üretilmiştir. Üretilen kompozit ve hibrit kompozitlere ait kodlamalar Tablo 5’de belirtilmiştir.

Tablo 5. Kompozit ve hibrit kompozitlerin kodlamaları

Matris	Takviye	Takviye Oranı (%ağ.)		Sembol
AA2024	Yok	0		A
	Cu	0,5		ACu ^{0,5}
		1		ACu ¹
		2		ACu ²
		3		ACu ³
		5		ACu ⁵
	Ni	0,5		ANi ^{0,5}
		1		ANi ¹
		2		ANi ²
		3		ANi ³
		5		ANi ⁵
	Cr	0,5		ACr ^{0,5}
		1		ACr ¹
		2		ACr ²
		3		ACr ³
		5		ACr ⁵
	Ni-Cu	0,5	(0.25Ni-0.25Cu)	ANiCu ^{0,5}
		1	(0.5Ni-0.5Cu)	ANiCu ¹
		2	(1Ni-1Cu)	ANiCu ²
		3	(1.5Ni-1.5Cu)	ANiCu ³
		5	(2.5Ni-2.5Cu)	ANiCu ⁵
	Cu-Cr	0,5	(0.25Cu-0.25Cr)	ACuCr ^{0,5}
		1	(0.5Cu-0.5Cr)	ACuCr ¹
		2	(1Cu-1Cr)	ACuCr ²
		3	(1.5Cu-1.5Cr)	ACuCr ³
		5	(2.5Cu-2.5Cr)	ACuCr ⁵
	Ni-Cr	0,5	(0.25Ni-0.25Cr)	ANiCr ^{0,5}
		1	(0.5Ni-0.5Cr)	ANiCr ¹
		2	(1Ni-1Cr)	ANiCr ²
		3	(1.5Ni-1.5Cr)	ANiCr ³
		5	(2.5Ni-2.5Cr)	ANiCr ⁵
	Ni-Cu-Cr	0,5	(0.16Ni-0.16Cu-0.16Cr)	ANiCuCr ^{0,5}
		1	(0.33Ni-0.33Cu-0.33Cr)	ANiCuCr ¹
		2	(0.66Ni-0.66Cu-0.66Cr)	ANiCuCr ²
		3	(1Ni-1Cu-1Cr)	ANiCuCr ³
		5	(1.66Ni-1.66Cu-1.66Cr)	ANiCuCr ⁵

Belirtilen oranlarda oranlarda hazırlanan tozlara topaklanmayı önlemek adına %2 oranında işlem kontrol katkısı olarak metanol ilavesi yapılmış 400 dev/dk’da Retsch PM

200 (Şekil 14) markalı gezegen tipi bilyeli öğütücüde 8 saat öğütülmüştür. Değirmen 125 ml hacminde 2 adet tungsten karbür hazneye sahiptir. Her bir hazneye 30 gr toz koyulmuştur. Öğütmede kullanılan bilyeler ise 10 mm çapındadır ve bilye: toz ağırlık oranı 6:1 olarak seçilmiştir.



Şekil 14. PM 200 Değirmen

2.3. Kompozit Üretimi

Elde edilen kompozit tozlar çinko stearat ile yağlanmış kalıp içerisine yerleştirilmiştir. 500MPa'da ön preslemeye tabi tutulmuştur (Şekil 15), ardından 560°C'de 3 saat sinterlenerek kompozit numuneler elde edilmiştir.



Şekil 15. Presleme cihazı

2.4. Metalografik İşlemler

Mikroyapı, yoğunluk ve sertlik ölçümleri için numunelerin kesilme, zımparalama ve parlatma metalografik işlemleri sırayla yapılmıştır (Şekil 16). Zımparalama işleminde 400, 600, 800, 1000 ve 1500 numaralı zımparalar kullanılmış ve ardından alümina ile parlatılmıştır.



Şekil 16. Kesme (a), zımparalama (b) ve parlatma makinaları (c)

2.5. Yoğunluk ve Gözeneklilik İncelemesi

Metalografik olarak hazır olan numunelerin geometrik yapısı ile deneysel yoğunlukları, karışımlar kuralı ile de teorik yoğunlukları hesaplanmıştır. Bu iki yoğunluk değeri kullanılarak da numunelerin gözeneklilik durumu belirlenmiştir. Teorik yoğunluk ve gözeneklilik hesaplarında kullanılan bağıntılar aşağıdaki gibidir.

$$\rho_t = (\%w_1 \times \rho_1) + (\%w_2 \times \rho_2) + \dots + (\%w_n \times \rho_n) \quad (2)$$

$$\% \text{ Gözeneklilik} = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_t}\right) \times 100 \quad (3)$$

Burada ;

ρ_t : kompozitin teorik yoğunluğu

ρ_d : kompozitin deneysel yoğunluğu

ρ_n : her bir takviyenin yoğunluğu

$\% W_n$: takviyenin karışım içerisindeki ağırlıkça yüzdesi

2.6. XRD İncelemeleri

Matris ve takviye arasında oluşması muhtemel bileşikler, Cu-K α radyasyonlu (1.541874 Å) X-ışını difraktometresi (XRD, PANalytical - X'Pert³ Pro) ile incelenmiştir. İkincil fazların 10-90° arasında görünebilir olmasından dolayı XRD analizleri bu aralıkta adım boyutu 0.01° ve adım başına 1s ile kaydedilmiştir. XRD cihazı Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. XRD cihazı

2.7. İç Yapı İncelemeleri

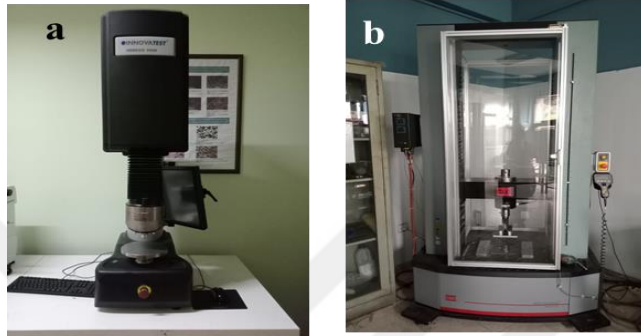
Takviye partiküllerinin matris içerisindeki dağılımı ve genel içyapı incelemeleri ve EDS analizleri ZEISS marka LS 10 (Şekil 18) model taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.



Şekil 18. SEM cihazı

2.8. Mekanik Ölçümler

Üretilen kompozitlerin sertlik ölçümleri Innovatest Nemesis 9000 (Şekil 19.a) cihazında Brinell sertlik ölçümü ile yapılmıştır. Brinell sertlik ölçümü 2,5 mm çapında batıcı uç, 31.25 kgf yük ve 10 s bekleme süresi şartları altında gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden üç ayrı ölçüm alınmış ve bu değerlerin ortalaması kullanılmıştır.



Şekil 19. Sertlik ölçüm cihazı (a), Çekme cihazı (b)

Kompozit numunelerin çekme deneyi MTS 45 model test cihazında yapılmıştır (Şekil 19.b). Numunelerin aşınma dirençleri UTS Tribolog (Şekil 19) marka ball-on-disk tipi aşınma deney düzeneğinde incelenmiştir. Aşındırıcı olarak çapı 6 mm olan 100Cr6 çeliği kullanılmıştır. Test numuneleri 2N ve 20N olmak üzere iki farklı yük altında yaklaşık 40 dakika süreyle 200rpm hızda 100m aşınmaya tabi tutulmuşlardır. Aşınma miktarını belirlemek için test öncesi ve sonrasında numunelerin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Aşınma oranı (W) aşağıdaki formül ile belirlenmiştir.

$$W = \frac{\Delta m}{d \times s}; \text{ mm}^3/\text{m} \quad (4)$$

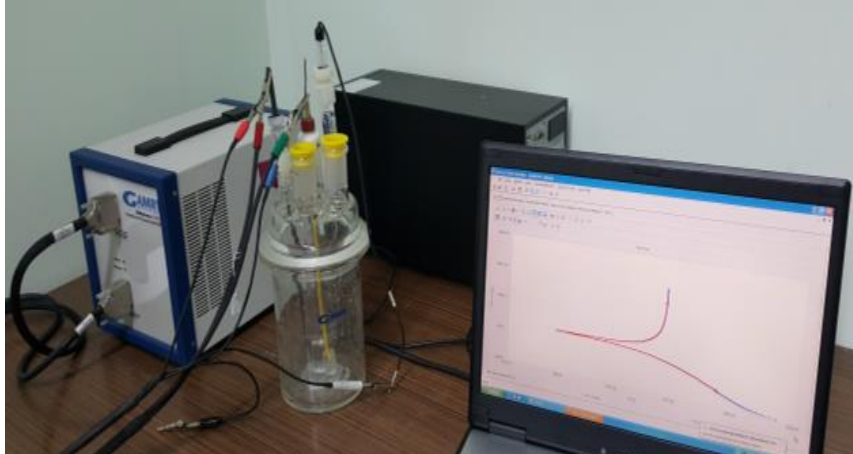
Burada; Δm : Ağırlık kaybı (gr), d : yoğunluk (gr/mm^3), s : Aşınma mesafesi (m)



Şekil 20. Aşınma deney düzeneği

2.9.Korozyon Testleri

Üretilen kompozit ve hibrit kompozitlerin korozyon davranışlarını belirlemek için Tafel Ekstrapolasyon testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 21). Testlerde Gamry Reference 3000 cihazı potansiyostat, kompozitler çalışma elektrotu, doymuş kalomel elektrot (SCE) referans elektrot ve grafit çubuk ise karşı elektrot olarak kullanılmıştır. Elektrolit olarak %3,5 oranında NaCl çözeltisi kullanılmıştır.

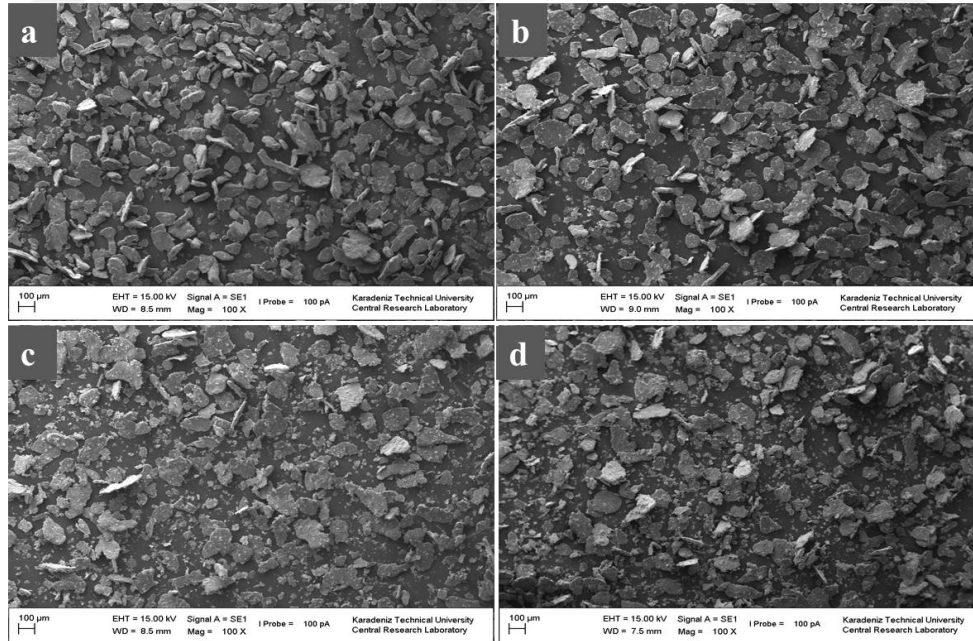


Şekil 21. Korozyon test düzeneği

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Öğütme Süresi ve İşlem Kontrol Katkısının Belirlenmesi

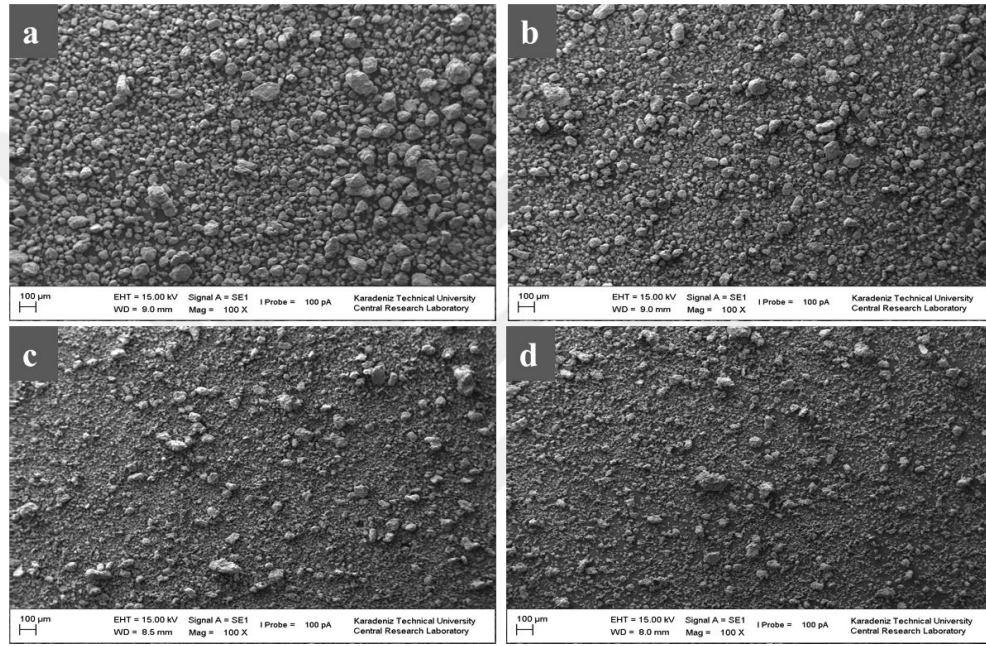
Çalışmanın başlangıcında, öğütme saatini ve uygun işlem kontrol katkısını (İKK) belirlemek için % 2 Cu takviye edilen AA2024 tozları, metanol ve stearik asit kullanılarak 2, 4, 6 ve 8 saatlik öğütmeye tabi tutulmuştur. Kompozit toz parçacıkları öğütme esnasında yüksek enerjili çarpışmalara maruz kalır, bu da toz parçacıklarının soğuk kaynaklanmasına ve kırılmasına neden olur. Kırılma ve soğuk kaynak arasındaki dengeyi sağlayan ise işlem kontrol katkı maddesidir (Shaw vd., 2003). Seçilen İKK'ların fiziksel koşulları farklıdır. Oda sıcaklığında metanol sıvıdır, oysa stearik asit katıdır; bu nedenle metanol, partiküller arasında ince homojen bir sıvı tabakası oluşturur ve bir toz karışımında stearik asitten daha fazla difüze olur. Sonuç olarak metanol, soğuk kaynak için gerekli olan temiz toz-toz temasını stearik asitten daha iyi engelleyerek küçük parçacık boyutuna neden olmuştur (Hosseini-gourajoubi vd., 2015; Gültekin vd., 2023).



Şekil 22. Stearik asitle öğütülmüş ACu² kompozit tozlarının SEM görüntüleri
a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat, d) 8 saat

Şekil 22' de stearik asitle öğütülen numunelerin pul yapısı gösterdiği gözlenmiştir. Bu durum, sünek metal tozlarının, toz parçacıklarının kırılmasını önleyen soğuk kaynak

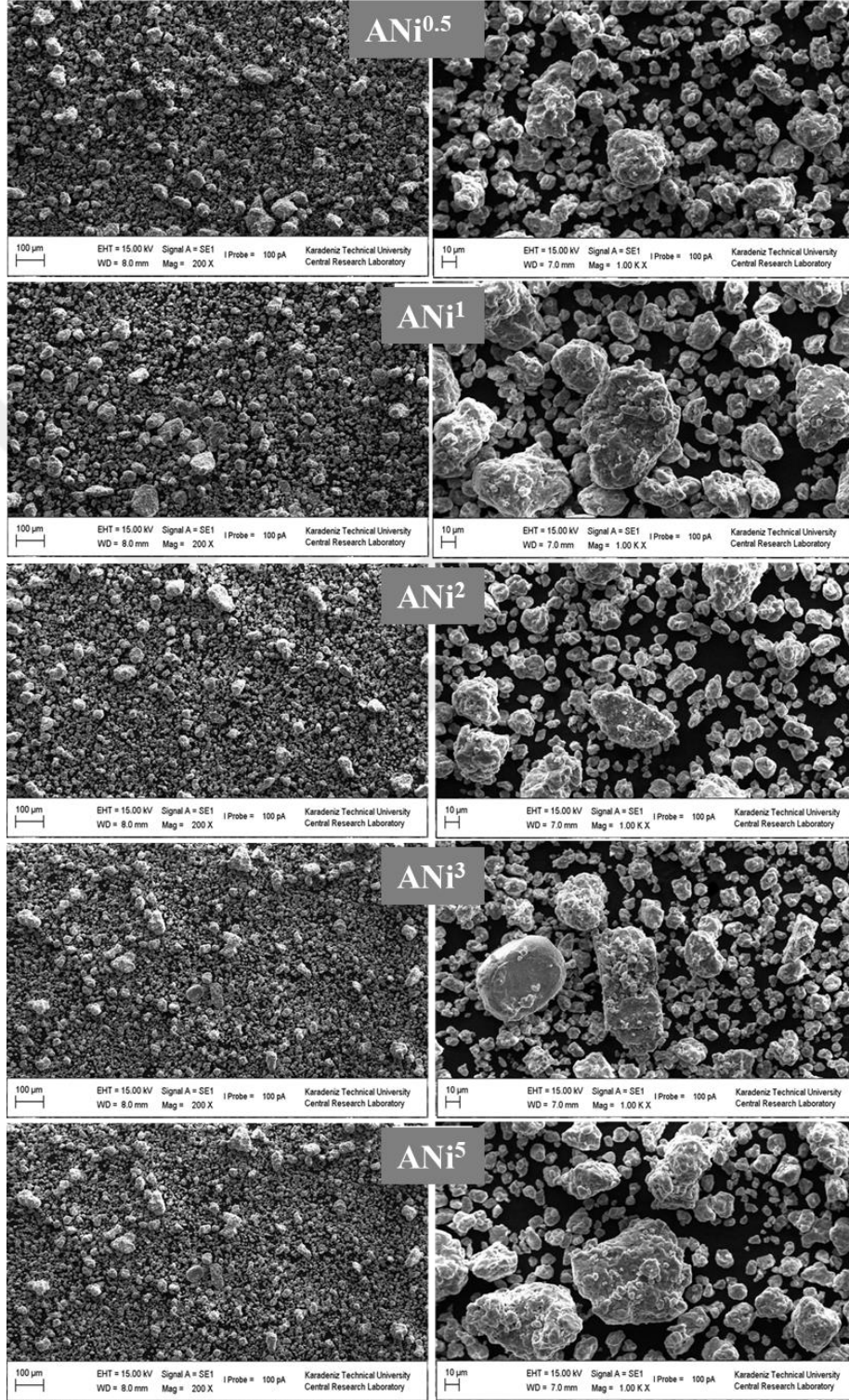
eğilimi ile açıklanabilir. Başka bir deyişle, stearik asit çok fazla yağlama özelliği göstermiş ve tozlar kırılma için yeterli deformasyon sertleşmesine ulaşamamıştır. Şekil 23’de öğütme süresinin artmasıyla birlikte iki bilyenin çarpışması sonucu oluşan darbe kuvveti ile tanecikler plastik olarak deforme olmuş ve deformasyon sertleşmesinin etkisiyle ince taneli tanecikler haline dönüşmüştür. Bu, metanol katkılı öğütmede kırılmanın soğuk kaynağa göre baskın olduğunu göstermektedir (Gültekin vd., 2023). Şekiller karşılaştırıldığında, metanol ilavesinin tozlar üzerindeki etkisinin net olduğu anlaşılmaktadır.



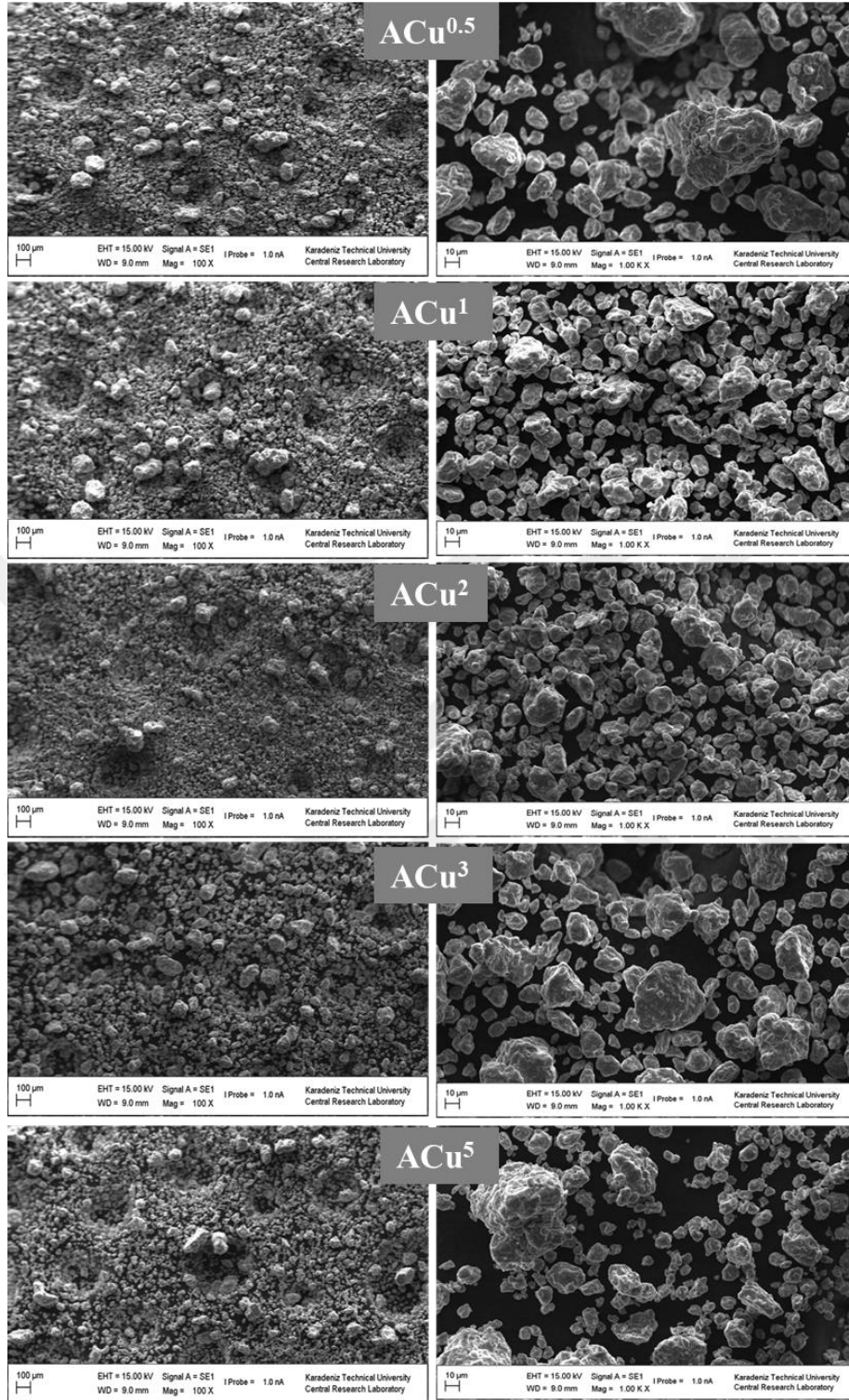
Şekil 23. Metanol ile öğütülmüş ACu^2 kompozit tozlarının SEM görüntüleri
a) 2 saat, b) 4 saat, c) 6 saat, d) 8 saat

Yapılan bu ön çalışma sonuçlarına dayanarak işlem kontrol katkısı olarak metanol, öğütme süresi olarak da 8 saate karar verilmiştir. Ağırlıkça 0, 0,5, 1, 2, 3 ve 5 oranlarında Ni, Cu ve Cr takviyeli kompozit tozlar morfolojik olarak tüm karışımlarda benzer değişimleri göstermiştir ve morfoloji görüntüleri sırasıyla Şekil 24-26’da verilmiştir. Şekiller incelendiğinde hem büyük hem de küçük patiküllerden oluşan morfolojilerde tozlar bilye toz bilye çarpışmaları sonucu sertleşmiş ve kırılmanın soğuk kaynağa üstün olduğu durumlarda kırılıp küçülmüştür. Soğuk kaynağın ve kırılma direncinin yüksek olduğu partiküller ise büyümüştür. Ayrıca öğütme işlemi sırasında toz partiküllerinin kırılarak daha küçük parçalara ayrılması hem küçük hem de büyük partiküllerin

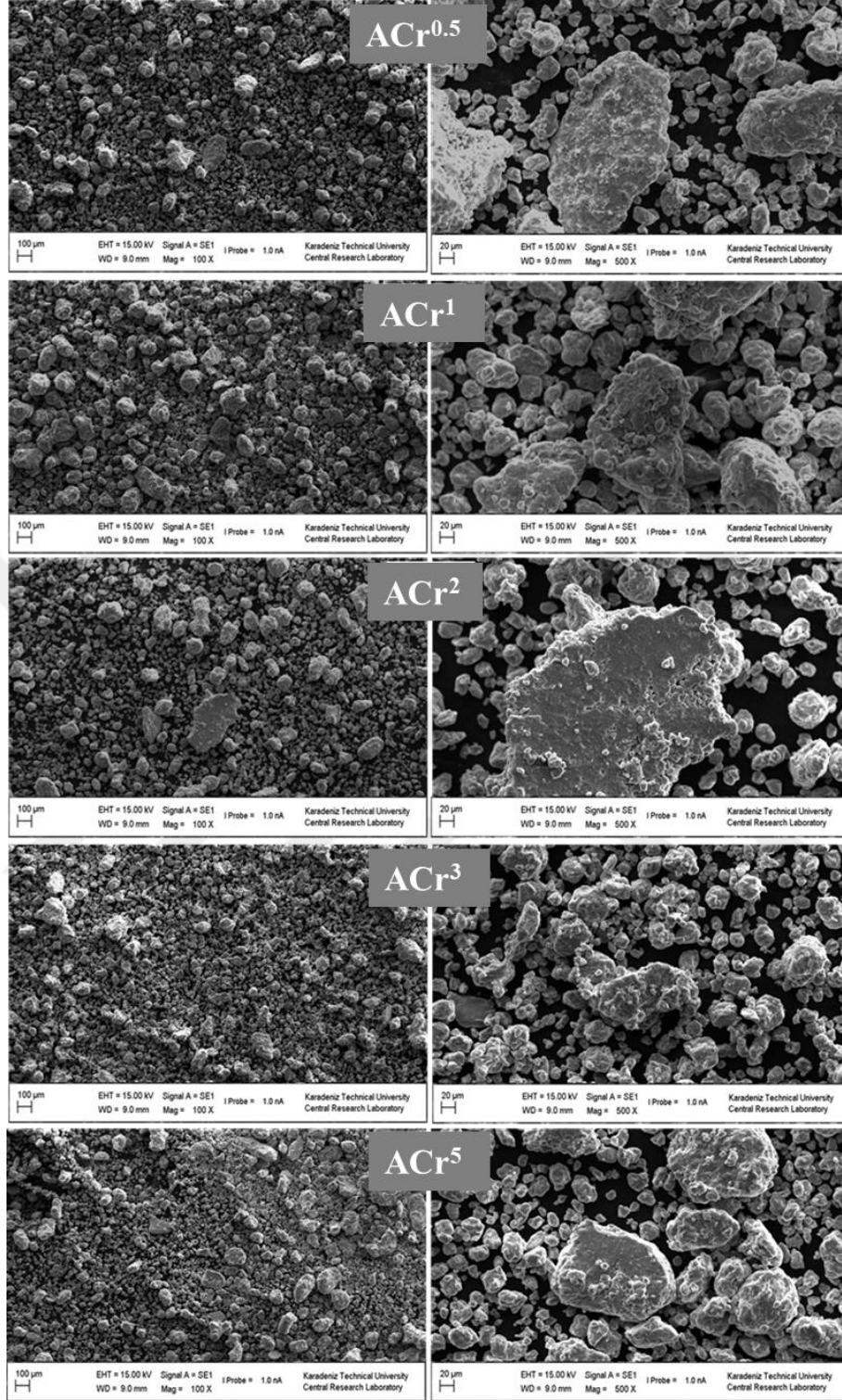
oluşmasına neden olmuştur. Sonuç olarak başlangıçta ortalama toz boyutu yaklaşık 96 μm iken 8 saatlik öğütme sonrası 21 μm 'ye kadar düşmüştür.



Şekil 24. Ni takviyeli kompozit tozların küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri



Şekil 25. Cu takviyeli kompozit tozların küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri



Şekil 26. Cr takviyeli kompozit tozların küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri

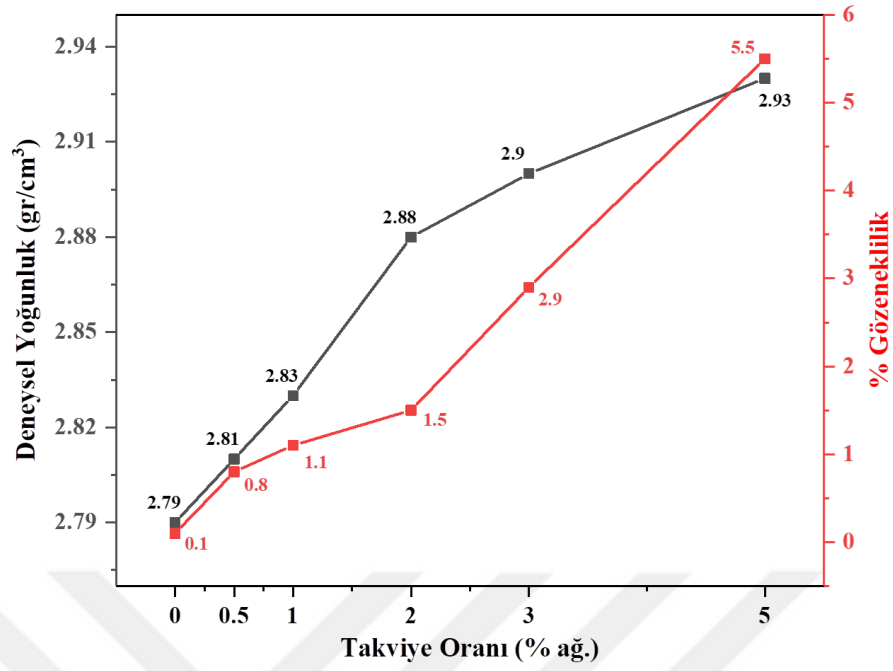
Yukarıda resimleri verilen tozlar, belirlenen optimum parametreler ardından belirli miktarlarda kapalı metal kalıp içerisine yerleştirilerek 500 MPa basınç ve 560°C’de sıcak

preslenerek kompozitler üretilmiştir. Üretilen kompozitlerin sonuçları AA2024 ve takviyesiz öğütölmüş AA2024 (A) ile karşılaştırılmıştır.

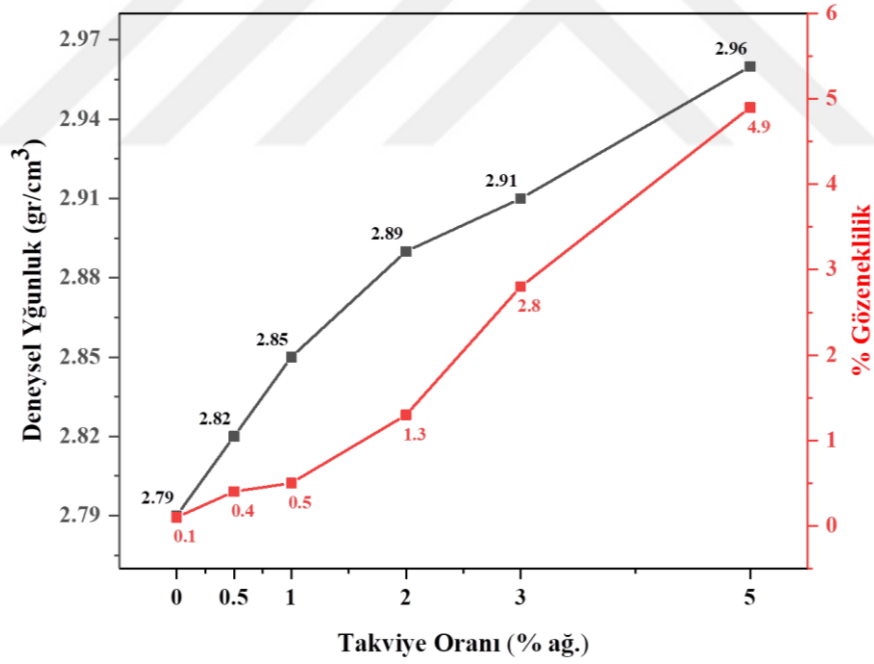
3.2. Kompozitlerin Yoğunluk ve Gözeneklilik Değerleri

Değişen takviye türleri ve miktarları ile 8 saat öğütölen kompozit tozların, 500 MPa basınç ve 560 °C sıcaklıkta preslenmesi ile üretilen kompozitlerin fiziksel, mekanik ve yapısal özellikleri farklılık göstermektedir. Yoğunluk ve porozite bunlardan bazılarıdır. Çalışmada matris malzemesi olarak kullanılan AA2024 alaşımının yoğunluğu 2,8 gr/cm³, takviye olarak kullanılan Ni, Cu ve Cr'nin yoğunlukları ise sırası ile 8,9 gr/cm³, 8,96 gr/cm³, 7,2 gr/cm³'tür. Kompozitin yoğunluğu, birleştirme işlemi sırasında uygulanan sıkıştırma basıncı ve sıcaklık gibi faktörlere bağlı olduğu gibi takviye oranına ve yoğunluğuna bağlı olarak da değişebilir. Yüksek sıcaklık ve basınç, malzemelerin daha sıkı bir şekilde birleştirilmesini sağlar ve sonuçta daha yüksek bir yoğunluk elde edilir. Takviye oranı artışı ise matris miktarının azalmasına, takviye miktarının artmasına neden olur. Matris malzemesine göre daha yüksek yoğunluğa sahip takviye oranındaki artış durumunun yoğunluğa olan etkisinin, matris miktarındaki azalmayı aşması ile de kompozit malzemenin yoğunluğu artmaktadır (Ravi Kumar vd., 2017; Gopi Krishna vd., 2017; Gültekin vd., 2023). Gözeneklilik durumu ise kompozit tozların şekline, sinterleme sıcaklığı ve basıncına, uygulanan sıkıştırma basıncına ve hızına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bunların yanı sıra mekanik öğütme süreci ile sertleşen partiküllerin aynı zamanda matris malzemesinden daha sert olması ve artan takviye oranı ile yapıda sert partikül sayısının artması; kompozit tozların paketlenmesini etkilemekte ve daha gözenekli bir yapıya sebep olmaktadır (Özkaya, 2014; Ravi Kumar vd., 2017).

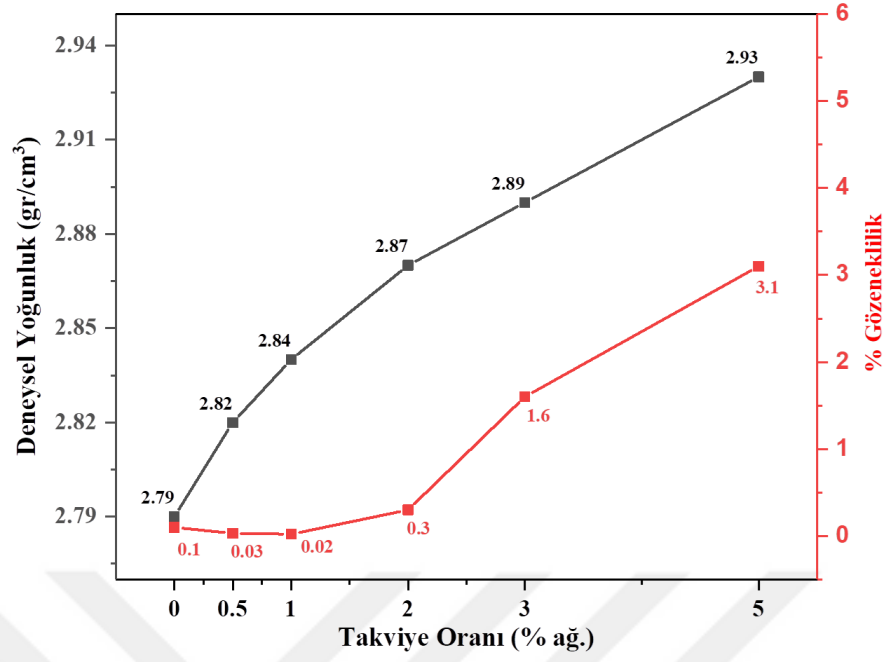
AA2024 alaşımına ağırlıkça 0.5, 1, 2, 3 ve 5 oranlarında takviye edilen Ni, Cu ve Cr tozları ile elde edilen kompozit ve hibrit kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değişimleri tek takviyeli kompozitler için Şekil 27-29'da, iki takviyeli kompozitler için Şekil 30-32'de ve üç takviyeli kompozitler için Şekil 33'te verilmiştir.



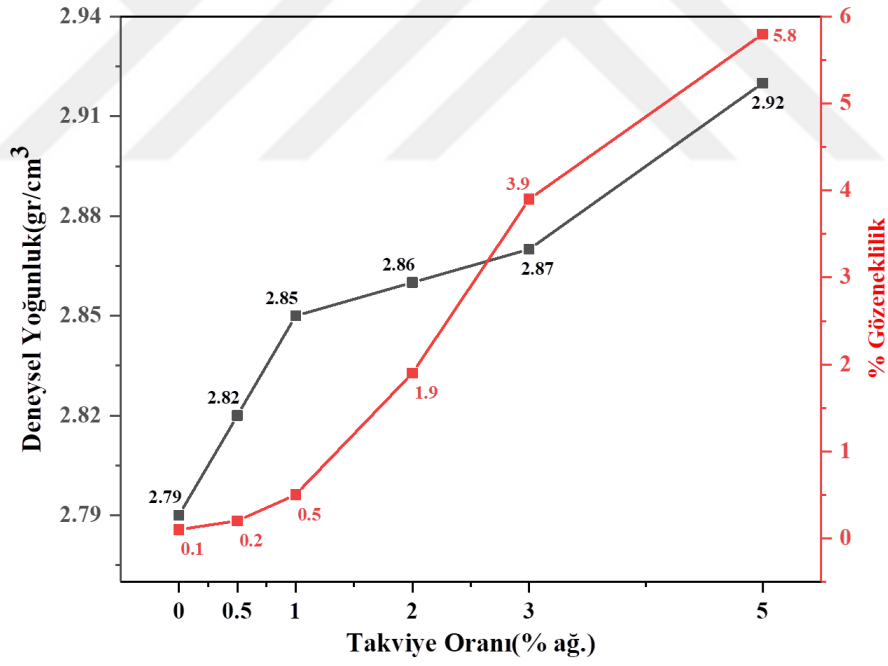
Şekil 27. Ni takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri



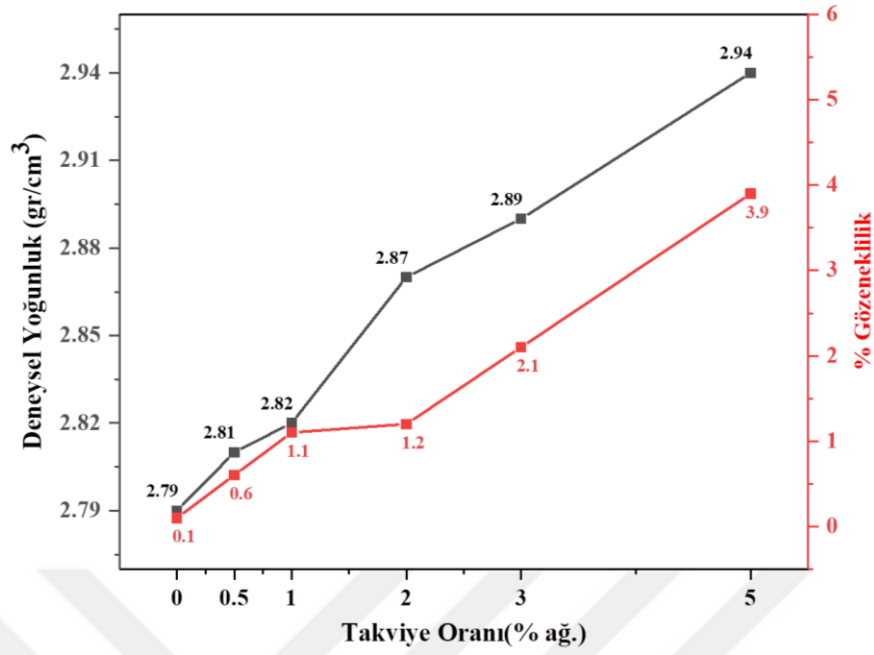
Şekil 28. Cu takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri



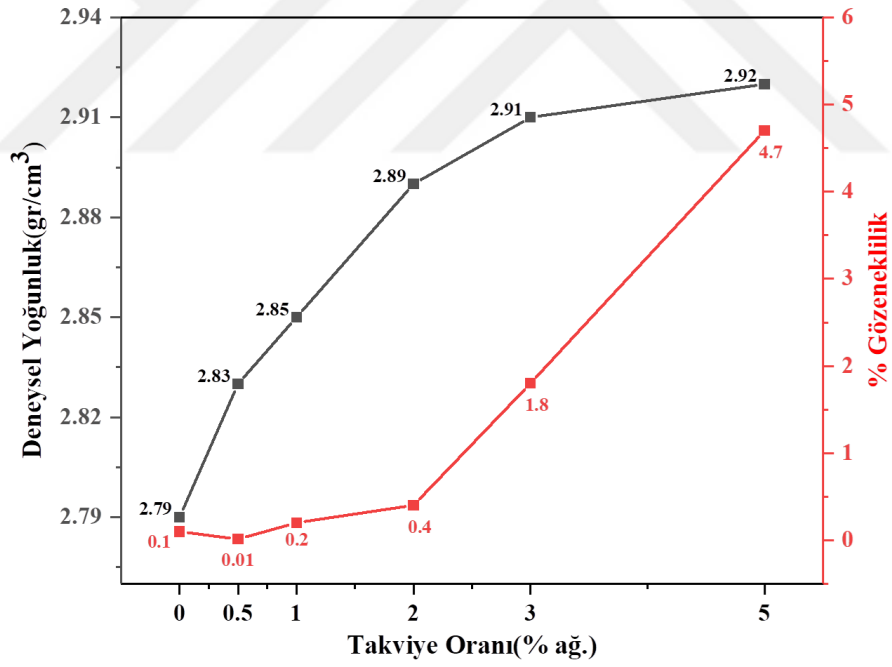
Şekil 29. Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri



Şekil 30. Ni-Cu takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri



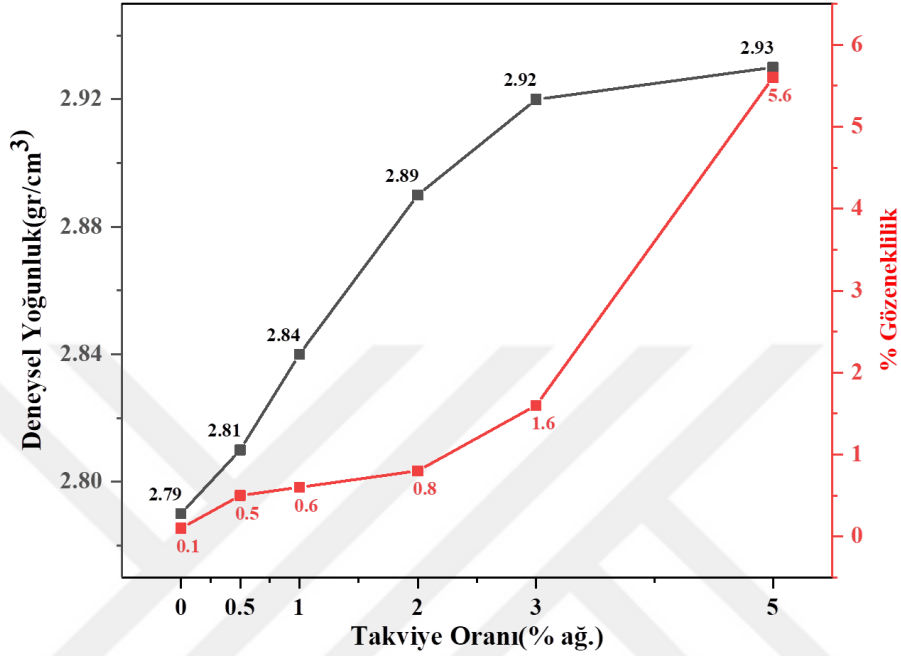
Şekil 31. Cu-Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri



Şekil 32. Ni-Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

Grafikler incelendiğinde yoğunluğun arttığı görülmektedir. Bunu yukarıda açıkladığımız gibi matris içerisine daha yüksek yoğunluğa sahip takviyelerin eklenmesi neden olmuştur. Gözeneklilik durumu incelendiğinde Cr takviye edilen kompozitlerde gözenek miktarının diğerlerine göre daha düşük olduğu görülmektedir. Kromun yüksek

sertliğine rağmen daha az gözenekli bir yapı sergilemesi; matris malzemesiyle daha iyi bir uyum sağlamasına, daha az deformasyona yol açarak sıkıştırma sırasında gözeneklerin daha az oluşmasına bağlanabilir.



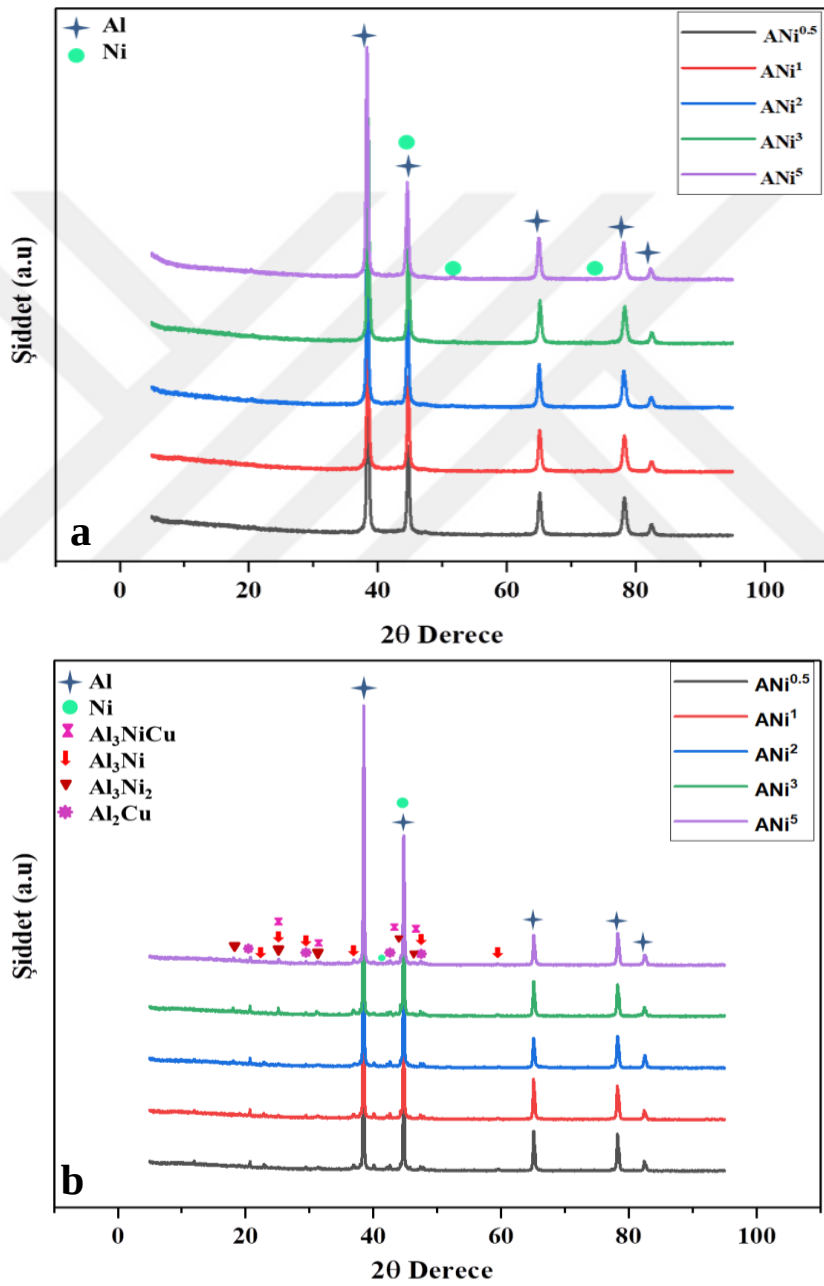
Şekil 33. Ni-Cu-Cr takviyeli kompozitlerin yoğunluk ve gözeneklilik değerleri

3.3. Arafaz Bileşiklerin Belirlenmesi

Toz ve kompozit numunelerin XRD analiz sonuçları incelendiğinde genel olarak her üç grupta ve farklı ağırlık oranlarında takviyeye sahip numunelerde benzer piklerin oluştuğu görülmektedir. Ayrıca toz ve kompozit grafikleri arasındaki pik farklılıkları intermetalik bileşiklerin sıcak presleme sonrası oluştuğunu göstermektedir. Matrisin temel elementi olan Al hem toz hem de kompozit grafiklerinde keskin pikler, takviyeler (Cu, Ni ve Cr) ve intermetalik bileşikler ise daha küçük pikler halinde görülmektedir. Matris malzemesi olan AA2024 içerisinde bulunan Cu oranına bağlı olarak her numunede Al_2Cu fazına rastlanılmıştır. Bütün numune gruplarında ortak olan bu faz dışında çeşitli fazlara rastlanmıştır. XRD sonuçları; tek takviyeli kompozitler için Şekil 34-36, iki takviyeli kompozitler için Şekil 37-39 ve üç takviyeli kompozitler için Şekil 40'da verilmiştir.

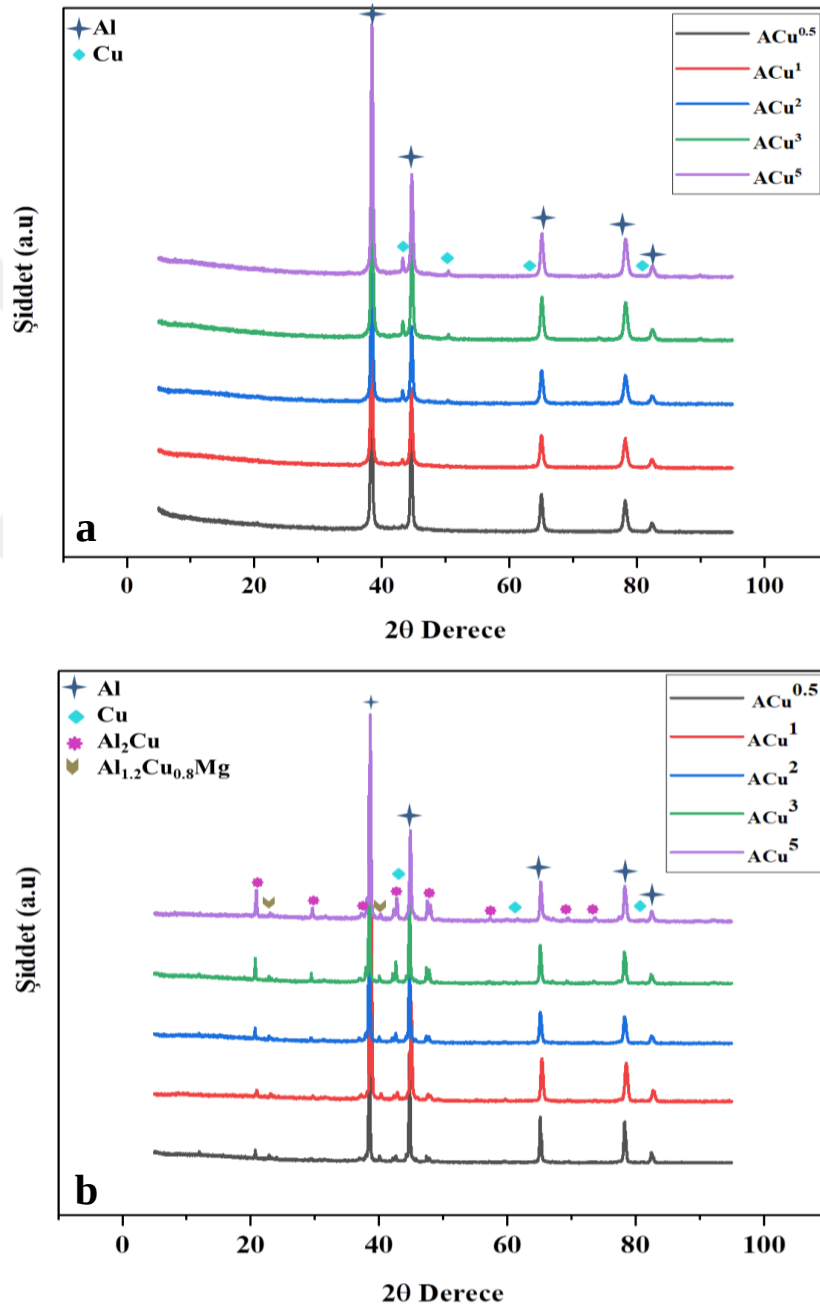
Şekil 34, farklı oranlarda Nikel içeren ANi kompozit tozlarının (a) ve kompozitlerinin (b) X-Işını Kırınım analizini göstermektedir. Sonuçlar, elementel formda

Ni, Al ve intermetalik bileşikler halinde Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3NiCu , Al_2Cu varlığını göstermektedir. Nikel, alüminyumda daha az çözünürlüğe sahiptir ve alüminyum alaşım matriste alüminyumca zengin intermetalik bileşikler oluşturmuştur (Nath Op & Arul, 2020). Alüminyumca zengin bu fazların oluşumu XRD analizlerinde tespit edilmiş ayrıca literatürde yapılan çalışmalarla da benzerlik göstermiştir (Yan vd., 2018; Farajollahi vd., 2021; Nath Op & Arul, 2020; Matsumuro & Kitsudo, 2006).



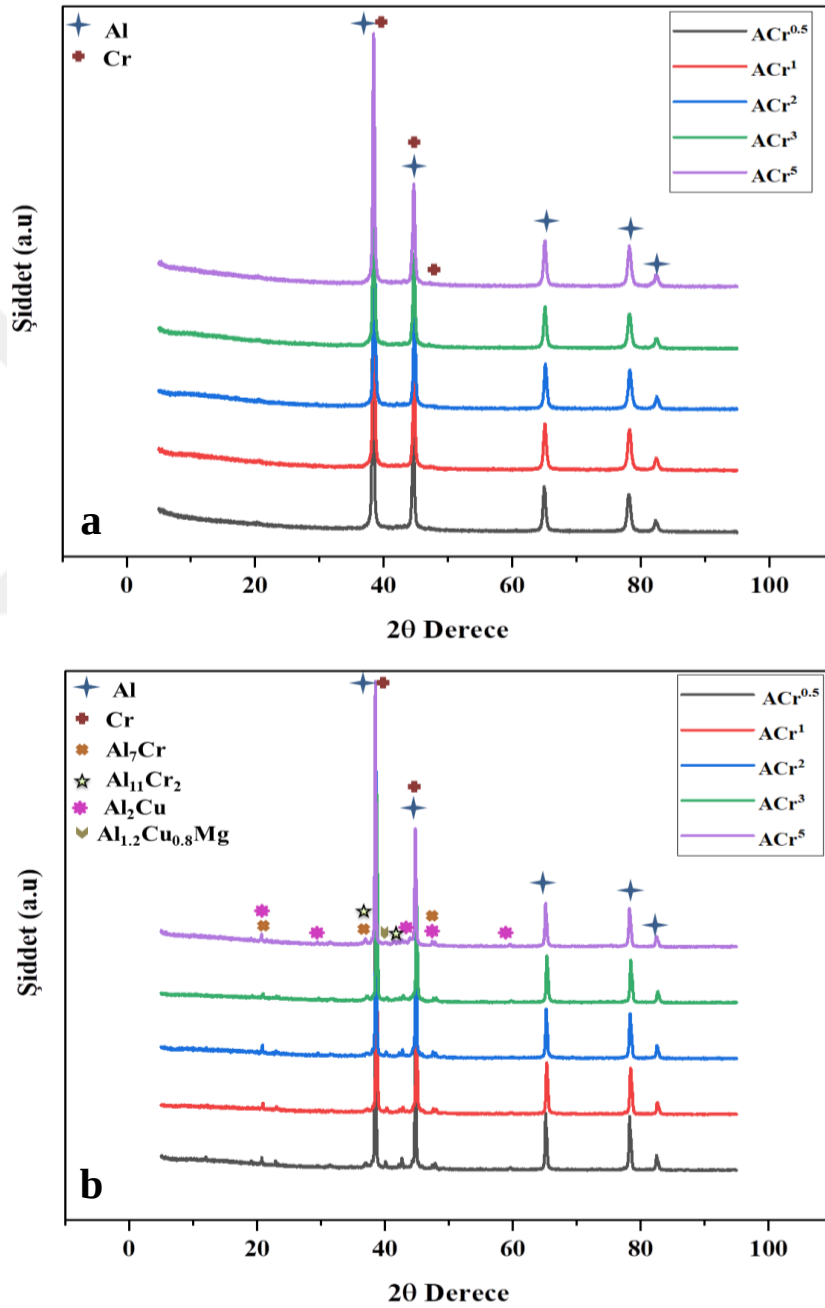
Şekil 34. XRD analiz sonuçları a) ANi toz b) ANi kompozit

Al-Cu faz diyagramına göre, 1073K'nin altındaki sıcaklıklarda birkaç çeşit intermetalik bileşik oluşabilir. Bu bileşikler Al_2Cu , AlCu , Al_4Cu_9 ve Al_2CuMg olabilir. Oluşumları ise kimyasal potansiyellerine, difüzyon işleminin başlangıcındaki çekirdeklenme koşullarına ve matris elementlerinin hareketliliğine bağlı olarak gelişir (Liu vd., 2016; Aravind vd., 2004; Arpat, 2011). Farklı oranlarda Cu takviyeli kompozit tozların (a) ve kompozitlerin (b) XRD grafikleri Şekil 35'te verilmiştir.



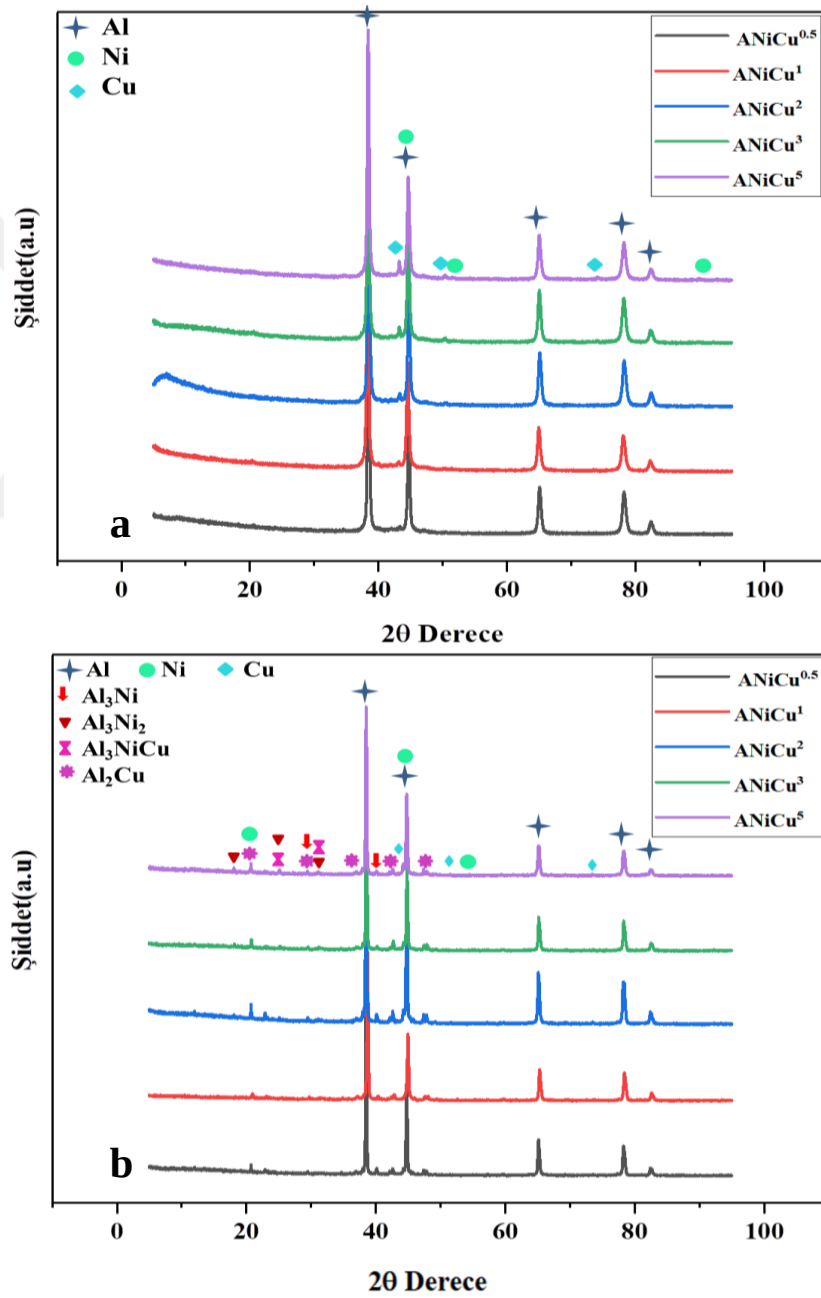
Şekil 35. XRD analiz sonuçları a) ACu toz b) ACu kompozit

Şekil incelendiği zaman intermetalik bileşiklerin kompozit numunelerde oluştuğu ve şiddetlerinin takviye oranı artışı ile arttığı görülmektedir. Buna göre 560° de sıcak preslenen kompozit yapıdaki katı Al eriyiği ile takviye arasındaki difüzyon sonucu Al_2Cu arafazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir (Arpat, 2011). Ayrıca matris malzemesi içerisinde bulunan Cu ve Mg çözünmesi sonucu $\text{Al}_{1.2}\text{Cu}_{0.8}\text{Mg}$ çökelti fazına da rastlanmıştır.



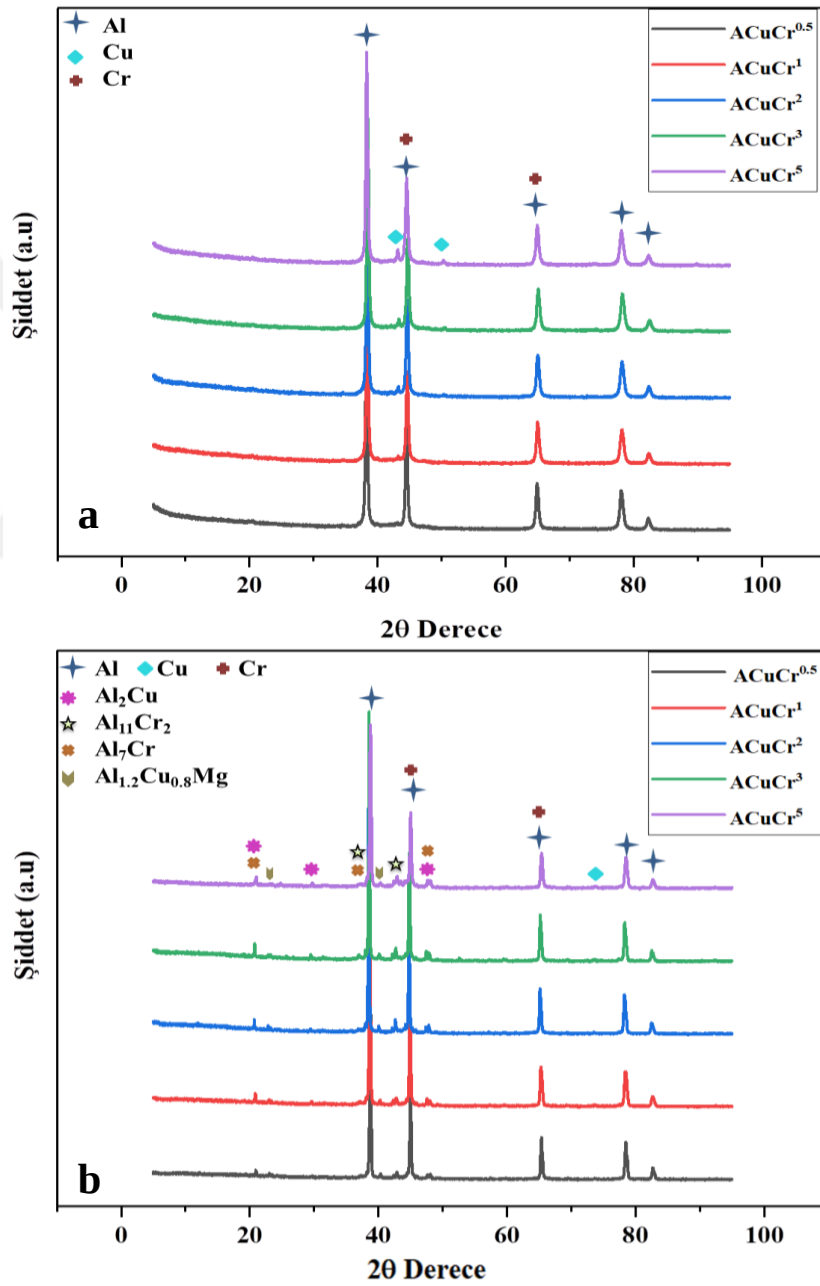
Şekil 36. XRD analiz sonuçları a) ACr toz b) ACr kompozit

Şekil 36'da ACr kompozitlerinin sıcak presleme öncesi ve sonrası XRD analiz sonuçları verilmiştir. Grafikler arasındaki belirgin farklılık, oluşan intermetalik bileşik pikleridir. Şekil 36(b)'de ACr kompozitlerinde değişkenlerden bağımsız olarak ortaya çıkan fazların XRD analiz sonucu gösterilmiştir. Üretim sonrası yapıda, Al, Cr, Al_7Cr (Yousefi & Doostmohammadi, 2021; Ribeiro vd., 2020; Malekan vd., 2020), $\text{Al}_{11}\text{Cr}_2$ (Chen et al., 2016) ve Al_2Cu (Ribeiro vd., 2020) fazları oluşmaktadır. Farklı oranlarda Cr ihtiva eden numunelerin XRD pikleri, genel hatlarıyla aynı kalmaktadır.

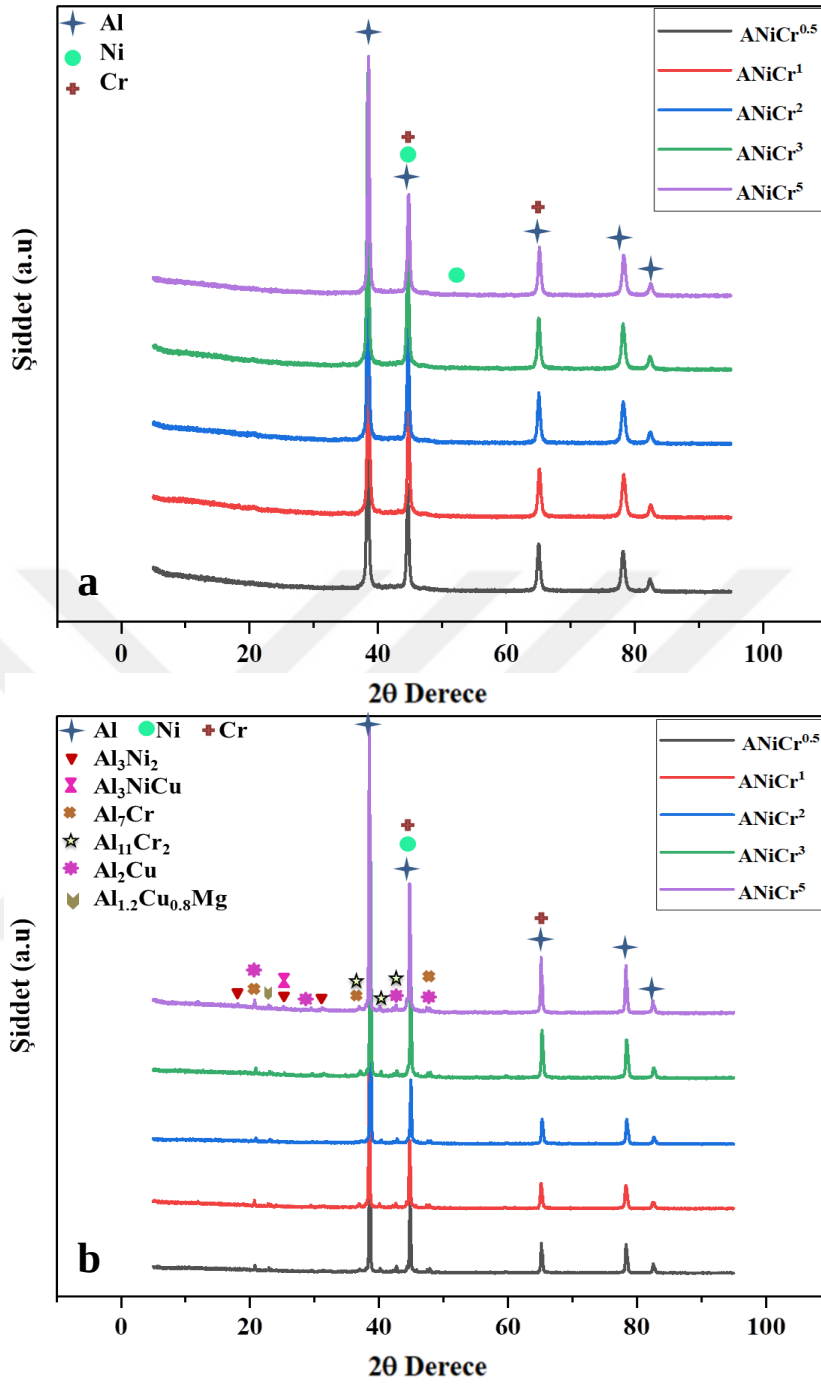


Şekil 37. XRD analiz sonuçları a) ANiCu toz b) ANiCu kompozit

AA2024 alaşımına takviye edilen Ni, Cu ve Cr elementlerinin Al ile olan faz diyagramlarına uygun olarak Al'ca zengin intermetalik bileşikler oluşturduğu yukarıda verilen XRD sonuçlarında görülmüştür. Bununla bağlantılı olarak iki takviyeli kompozitlerin XRD sonuçları tek takviyeli kompozitleri içine alan ve benzer piklerden oluşan görüntüler sergilemiştir.

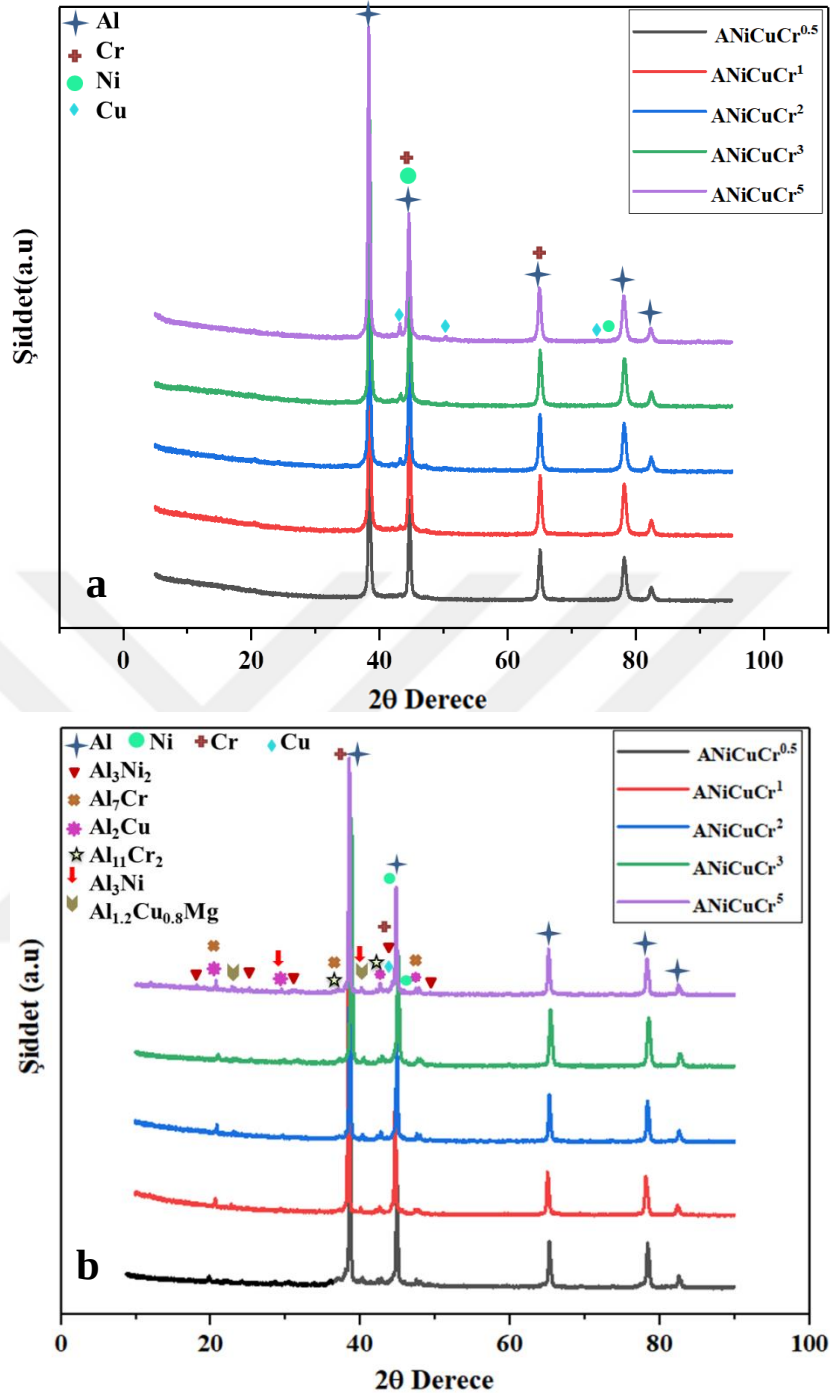


Şekil 38. XRD analiz sonuçları a) ACuCr toz b) ACuCr kompozit



Şekil 39. XRD analiz sonuçları a) ANiCr toz b) ANiCr kompozit

Şekil 40’da üç takviyeli kompozitlerin XRD grafiği verilmiştir. Grafiğe göre çökelti fazları Al₂Cu ve Al_{1.2}Cu_{0.8}Mg fazlarının yanı sıra matris ve takviyeler arasında yukarıda bahsi geçen intermetalik bileşiklerin pikleri görülmektedir.



Şekil 40. XRD analiz sonuçları a) ANiCuCr toz b) ANiCuCr kompozit

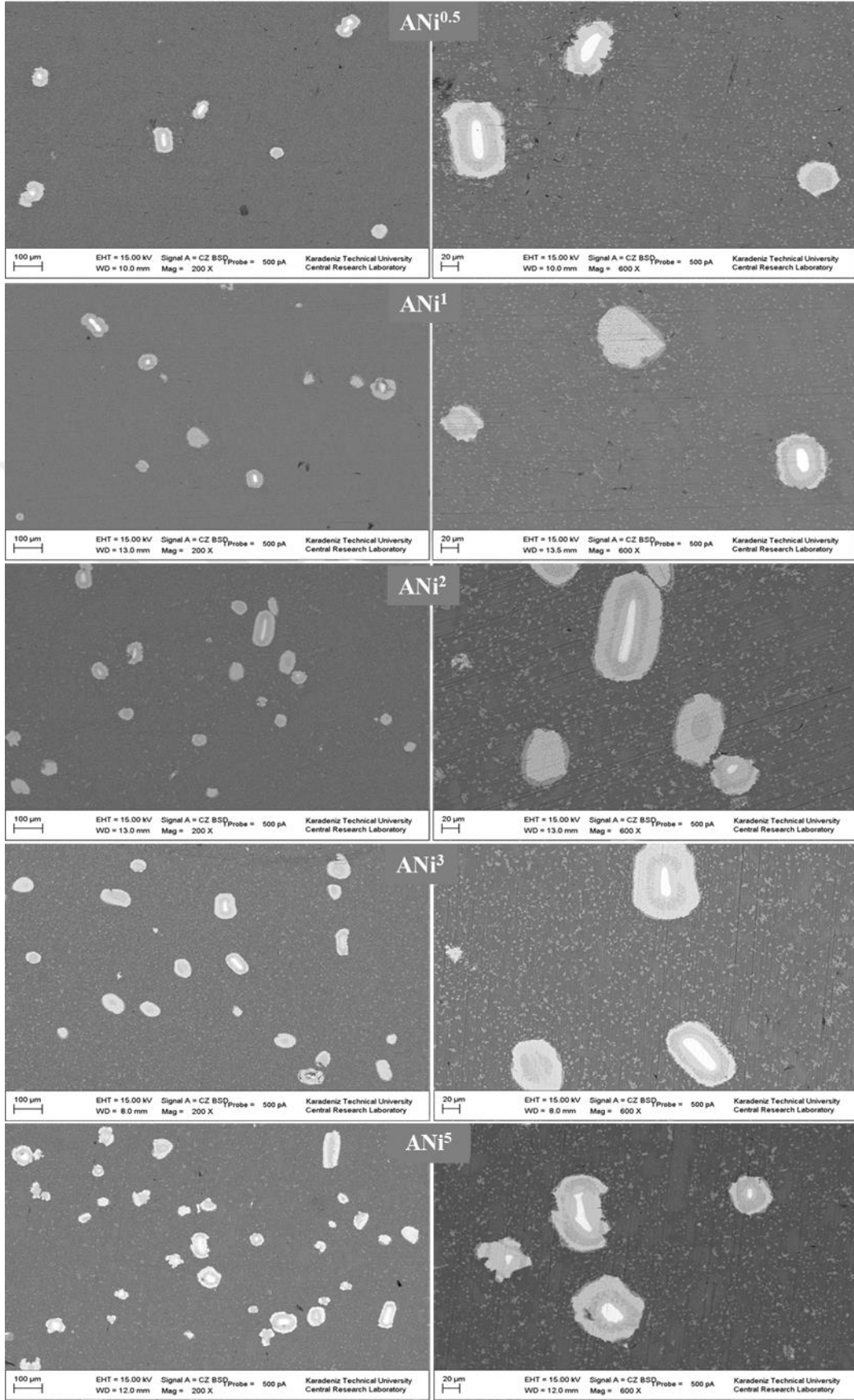
Bütün numuneler için XRD sonuçları ele alındığında, matris ve takviye etkileşimi için sinterleme süresinin yeterli olduğu ve hemen hemen bütün takviye oranlarında intermetalik bileşiklerin oluştuğu anlaşılmaktadır.

3.4. İçyapı İncelemesi

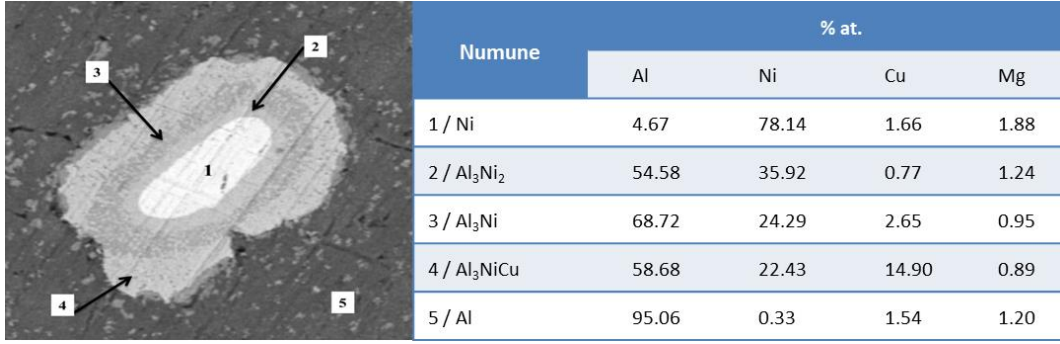
Ni, Cu ve Cr takviyeli AA2024 matrisli kompozitlerin SEM görüntüleri incelendiğinde yapı içerisinde farklı renk tonları olduğu görülmüştür. Bunun nedeni kompozit yapıdaki kimyasal bileşim farklılıklarıdır. Ağır elementler ikincil elektron görüntülerinde daha açık renkli göründüğünden, Ni, Cu ve Cr içeren bölgeler görüntülerde daha açık, oluşan içyapılar ise hafif koyulukta çıkmıştır. Koyu renkli bölgeler ise AA2024 alaşımını temsil emektedir.

şekil 41’de Ni takviyeli kompozitlerin içyapı görüntüleri verilmiştir. Küçük büyütme görüntülere bakıldığında zaman matris ve takviye arasında oluşan intermetalik yapıların sayısının takviye oranı artışı ile arttığı ve homojen dağılım gösterdiği görülmektedir. Matris takviye arası oluşan arayüzey ve intermetalik bileşikler ise büyük büyütme görüntülerinde net olarak ayırt edilebilmektedir (Matsumuro & Kitsudo, 2006; Ke vd., 2010). Bazı görüntülerde Ni tozlarının yani beyaz bölgelerin büyük olması; öğütme sırasında bilye toz bilye çarpışması sonucu soğuk kaynak olmuş tozların bir göstergesidir. Matrisin büyük tozlara difüzyon yolu daha uzun olduğu için bu yapılarda beyaz bölgeler daha belirgindir (Gecü, 2019; Ke vd., 2010). Küçük tozlarda ise matris takviyeye tamamen difüze olarak intermetalik bileşikler oluşturduğu için beyaz bölge görünmektedir. Ayrıca görüntülerde takviye, intermetalik bileşikler ve matris katmanlı bir görüntü sergilemektedir (Ke vd., 2010). Buda arafazların sürekliğini ve oluşumu için yeterli süreyi bulduğunu göstermektedir.

ANi⁵ kompozitine yapılan EDS analizi (şekil 42 ve Tablo 6) XRD sonuçlarını ve yukarıda bahsedilen renk farklılıklarını desteklemektedir. AA2024 alüminyum alaşımı, Al₂CuMg ve Al₂Cu çökeltilerinin ana güçlendirme faktörleri olduğu bir Al-Cu-Mg alaşımıdır. Bu alaşım grubuna Nikel eklenmesi, yüksek sertlik ve mukavemete sahip fazların oluşturulmasına yardımcı olmaktadır (Farajollahi vd., 2021). Ni takviye edilen AA2024 matris reaksiyonu, Ni tozunun merkezine doğru kademeli olarak ilerlemiştir. Bu durumda oluşan intermetalik bileşikler Ni’in merkezinden dışa doğru, şekil 42’de EDS analizi görüntüsüne göre Ni, Al₃Ni₂, Al₃Ni ve Al₃NiCu olarak sıralamak mümkündür (Matsumuro & Kitsudo, 2006; Ke vd., 2010).



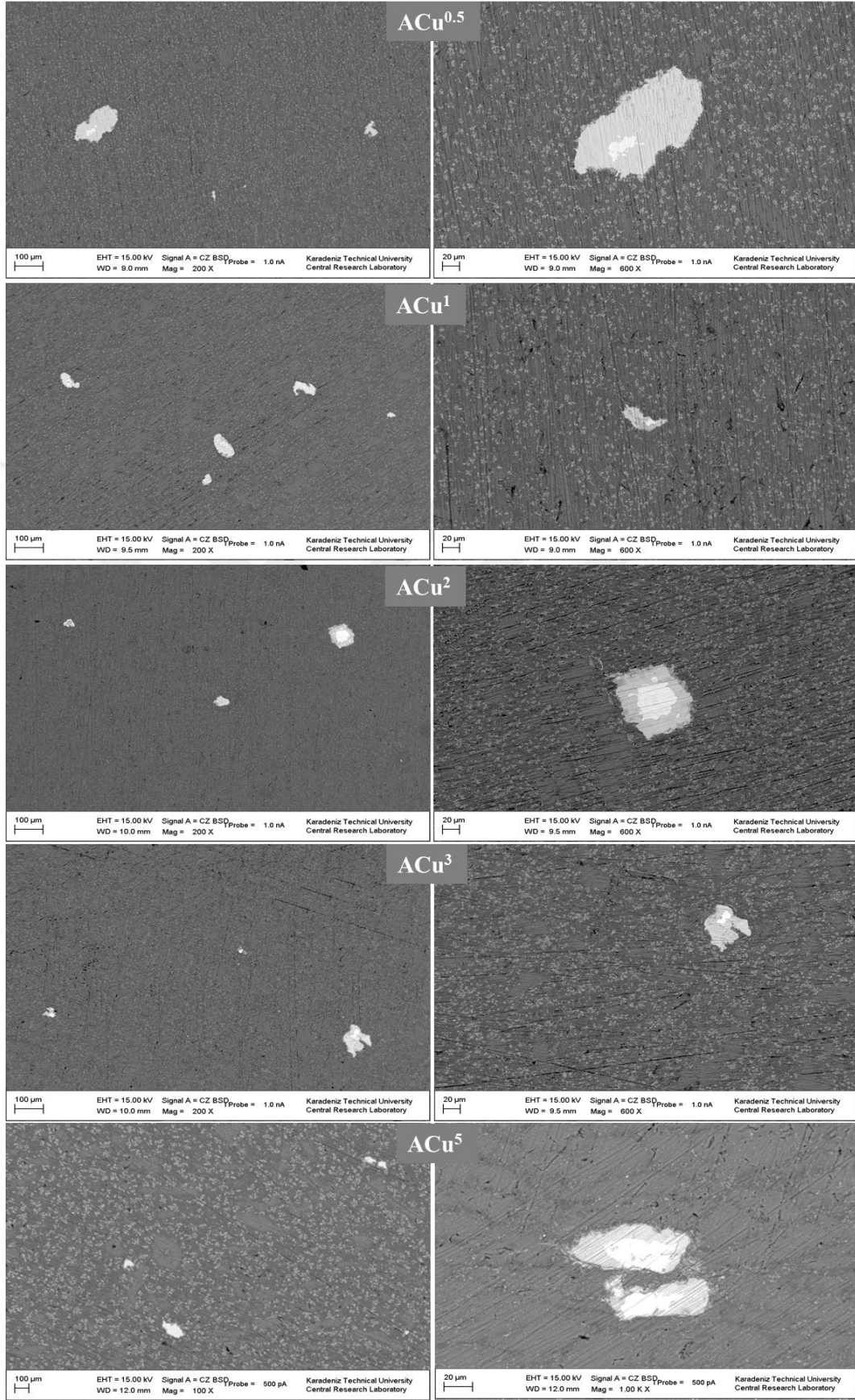
Şekil 41. Ni takviyeli kompozitlerin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri



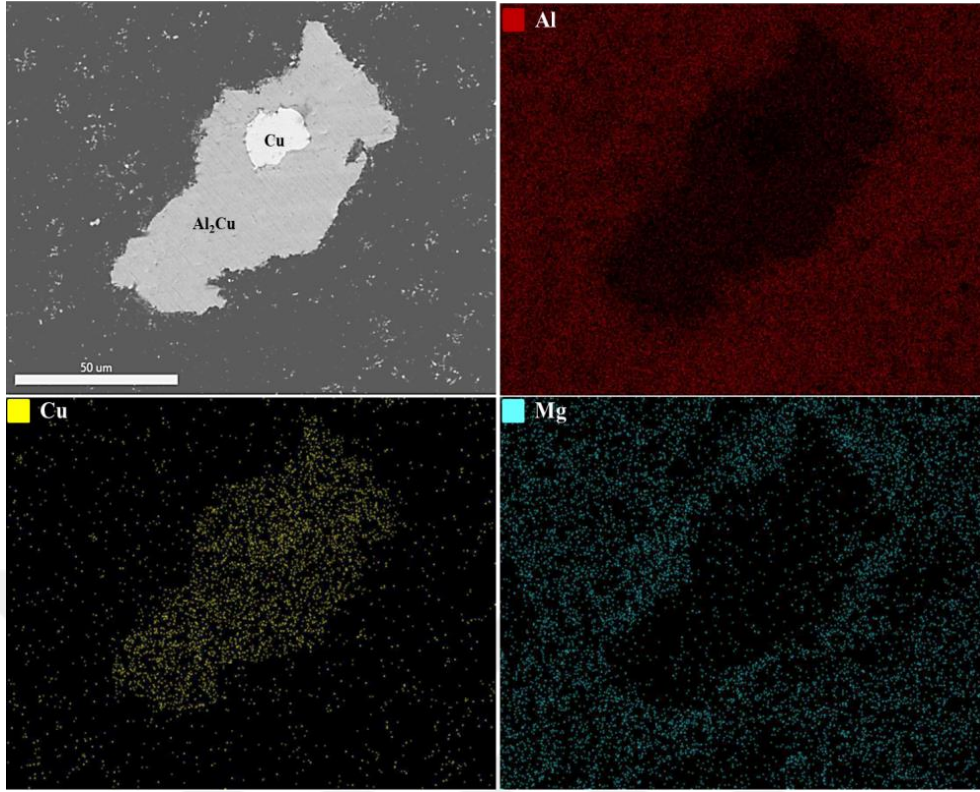
Şekil 42. ANi⁵ kompoziti EDS analizi

Şekil 43'te Cu takviyeli AA2024 alaşımının SEM görüntüleri verilmiştir. Görüntüler incelendiği zaman takviye Cu beyaz, intermetalik bileşikler açık gri renk olarak kendini göstermektedir. Öğütme sırasında soğuk kaynak nedeni ile büyüyen Cu tanecikleri ve onu çevreleyen arafaz, büyük partiküller olarak görülmektedir. Matris içerisindeki küçük açık gri bölgeler ise küçük Cu partikülleri ve matris içerisindeki Cu oranına bağlı olarak sıcak presleme sonucu oluşan Al₂Cu fazını ifade etmektedir (Liu vd., 2016; Aravind vd., 2004). Oluşan içyapı ve arafazların daha iyi anlaşılması için küçük ve büyük büyütmelemlerde görüntüler tanımlanmıştır. ACu^{0.5} kompozitine ait EDS analiz sonuçları oluşan arafaz etkileşimlerini, XRD sonuçları da desteklemektedir (Şekil 44). EDS sonucuna göre oluşan Al₂Cu metaller arası bileşikler, alaşımın Cu konsantrasyonuna ve katılma koşullarına bağlı olarak tane sınırları boyunca veya tanelerin içinde çökelmiş olarak bulunabilir (Ribeiro vd., 2020) .

Bakır, takviye edilen kompozitlerin içyapı görüntülerinde arafazların sayıca az olması bu elementin Alüminyum matris içinde çözünebilir olması ile alakalıdır. Çözünen bakır, alüminyum atomları arasına yerleşerek malzemenin kristal yapısını etkiler. Buda alaşımın mukavemetini, sertliğini ve ısıl işlem kabiliyetini artırabilir. Çözünmeyen Cu partikülleri ise sinterleme sıcaklığına ve soğuma hızına bağlı olarak katı çökelti şeklinde matris ile intermetalik fazlar oluşturarak yine sertlik ve dayanımı artırmaktadır. Bakırın hem çözünen hem de çözünmeyen formlardaki varlığı, alaşımın tasarımı ve sıcak işlem parametrelerinin seçimi ile dengelenmelidir. İdeal olarak, homojen bir mikroyapı oluşturmak ve malzemenin istenen mekanik özelliklerini elde etmek için çökelti ve intermetalik fazların optimum seviyede olması gerekir.



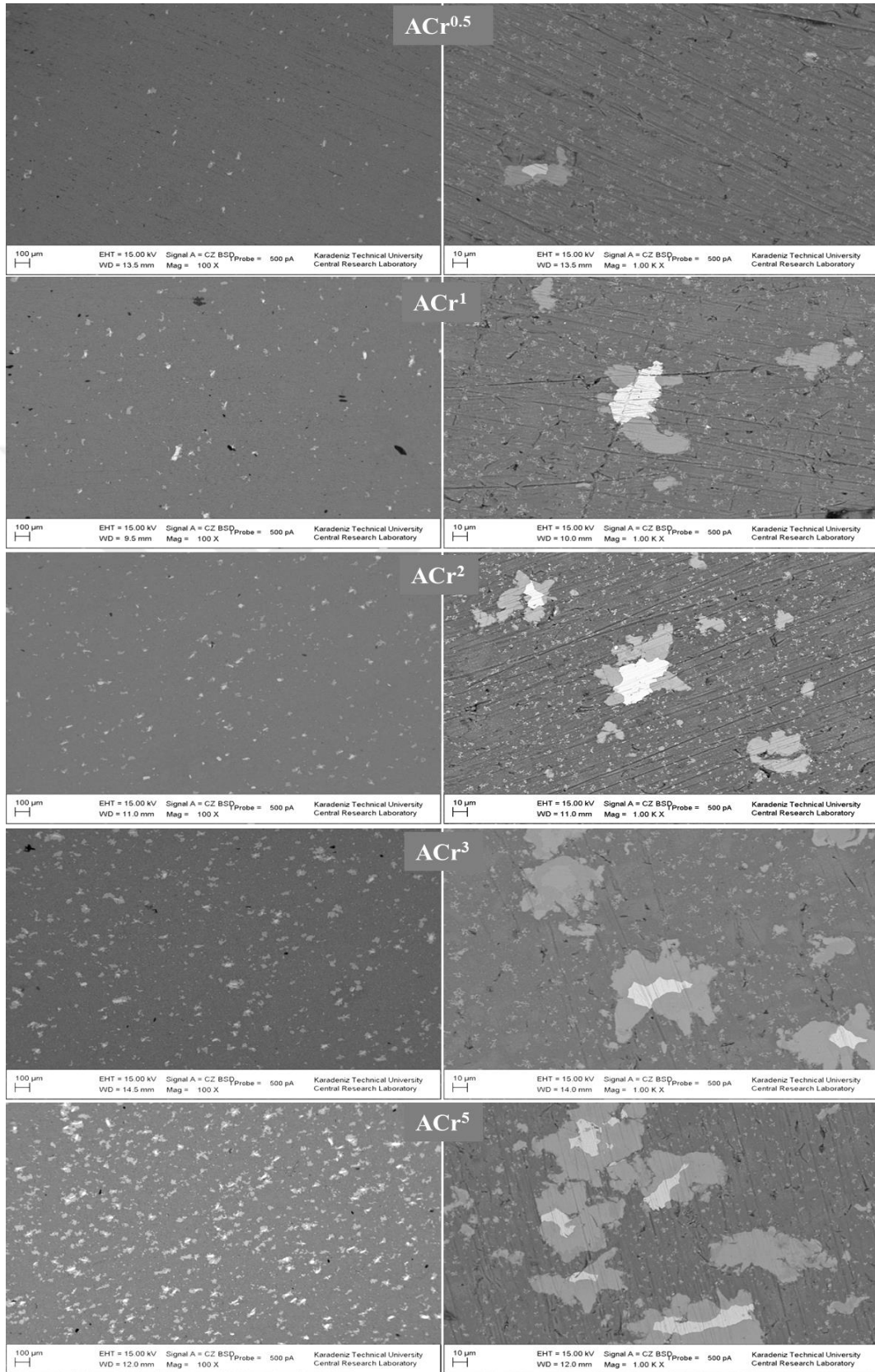
Şekil 43. Cu takviyeli kompozitlerin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri



Şekil 44. ACu^{0.5} kompoziti ait EDS analizi

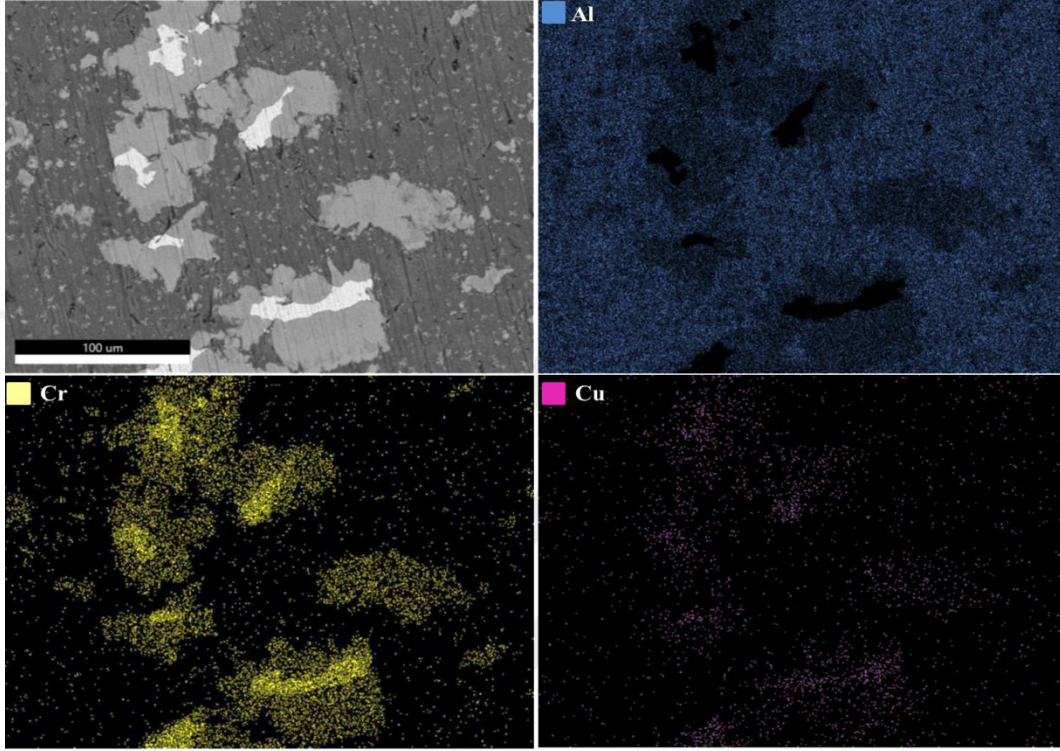
Cr, Al matrisinde düşük çözünürlüğe sahiptir ve Al, Cu ve diğer elementlerle intermetalik bileşikler oluşturma eğilimi gösterir (Farajollahi vd., 2021). Bu bağlamda Şekil 45'te verilen ACr kompozitlerine ait küçük büyütme SEM görüntüleri incelendiğinde takviye oranı artışı ile intermetalik yapılarda ve dağılımında artış olduğu görülmektedir. Büyük büyütme görüntülerde ise matrisin takviyeye her noktada difüze olamadığı görülmektedir.

Bu durum; düşük takviye oranlarında uzun difüzyon yolunun matris takviye etkileşim süresini kısaltması nedeniyle arafaz oluşmadan katılaşmanın tamamlanması ile açıklanabilir (Gecü, 2019). Difüzyonun gerçekleştiği bölgelerde ise oluşumu için yeterli süreyi bulamayan arafazların süreksizliği dikkat çekmektedir. Diğer yapılarda olduğu gibi yine takviye beyaz, arafazlar açık gri renk ile kendilerini göstermektedir. XRD analizinde piklerine rastlanan yapıların varlığı literatürde yapılan çalışmalarla (Yousefi & Doostmohammadi, 2021; Ribeiro vd., 2020; Malekan vd., 2020; Chen vd., 2016) ve Şekil 46'da verilen EDS analizi ile desteklenmektedir.



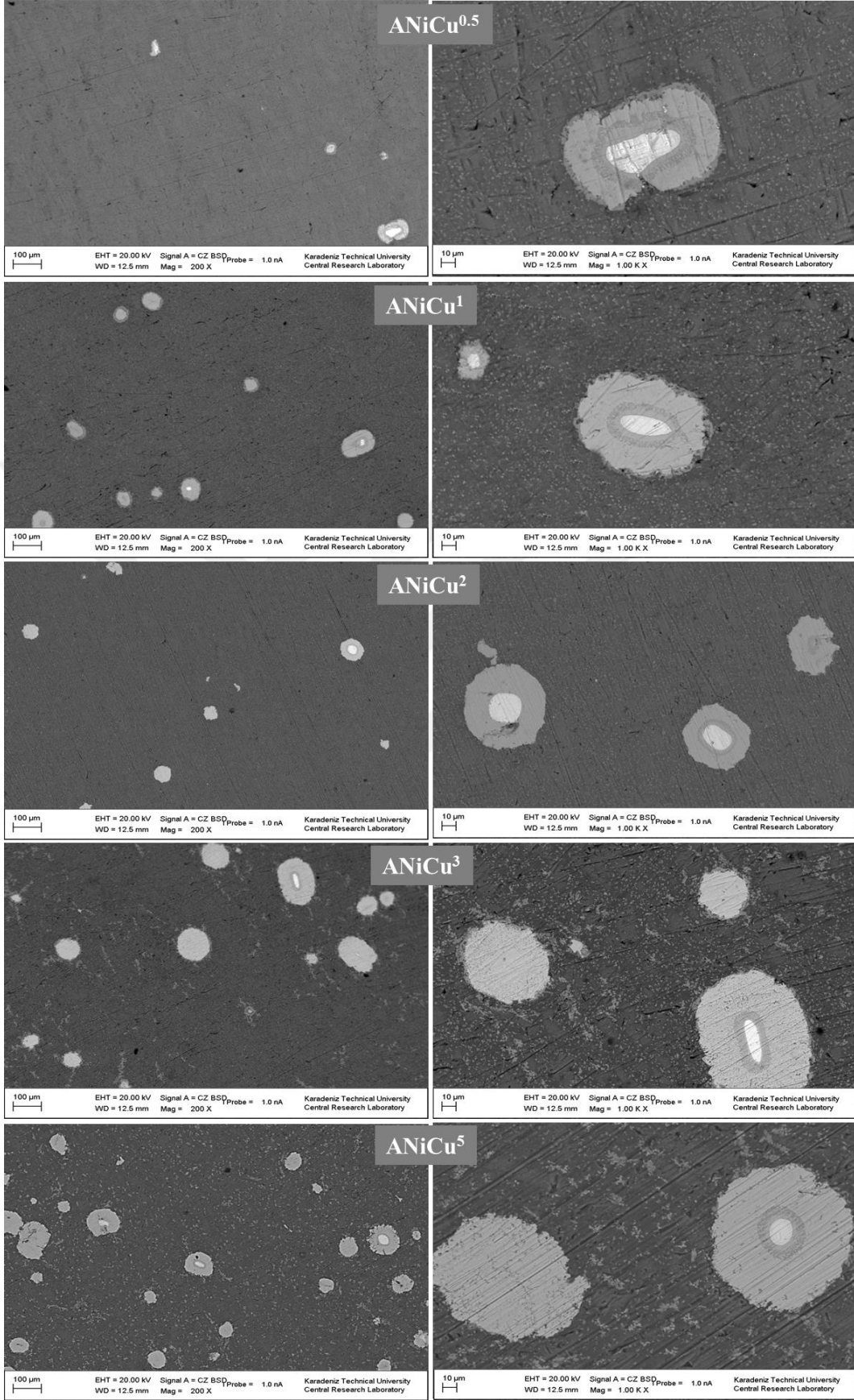
Şekil 45. Cr takviyeli kompozitlerin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri

Şekil 45 Cr ve AA2024 etkileşimi sonucu oluşan intermetalik birleşiklerin yapı içerisindeki konumlarını göstermektedir. Beyaz bölgelerin olmadığı yapılar farklı boyuttaki partikül varlığının göstergesidir.

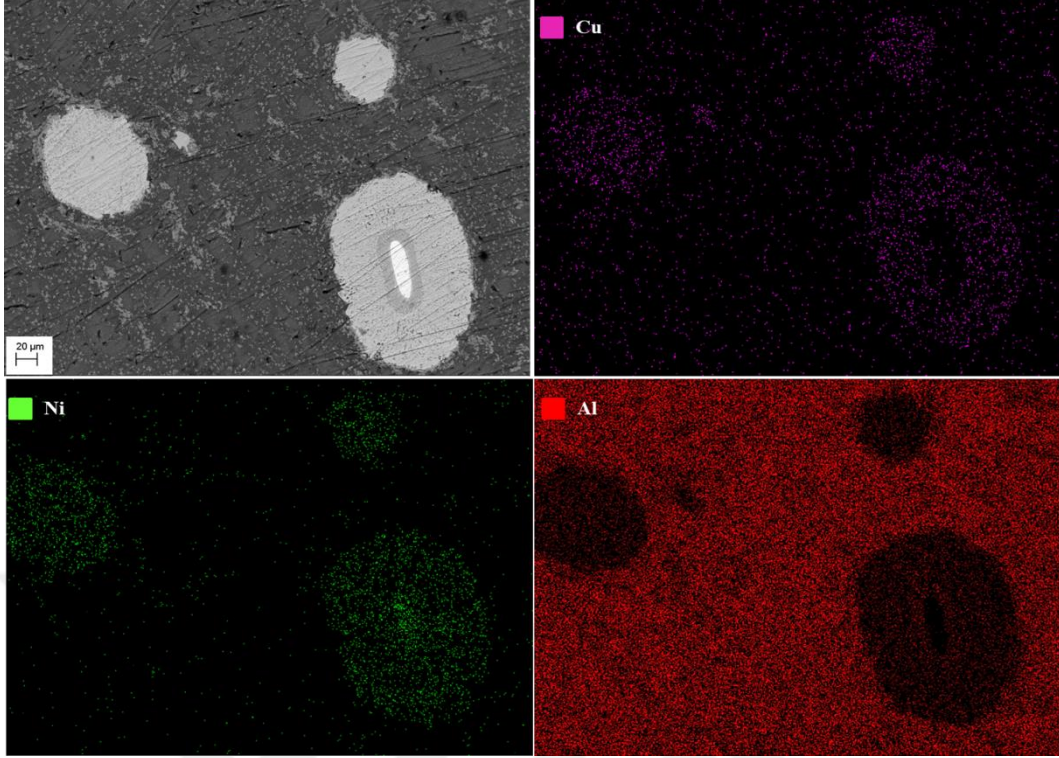


Şekil 46. ACr⁵ kompoziti EDS analizi

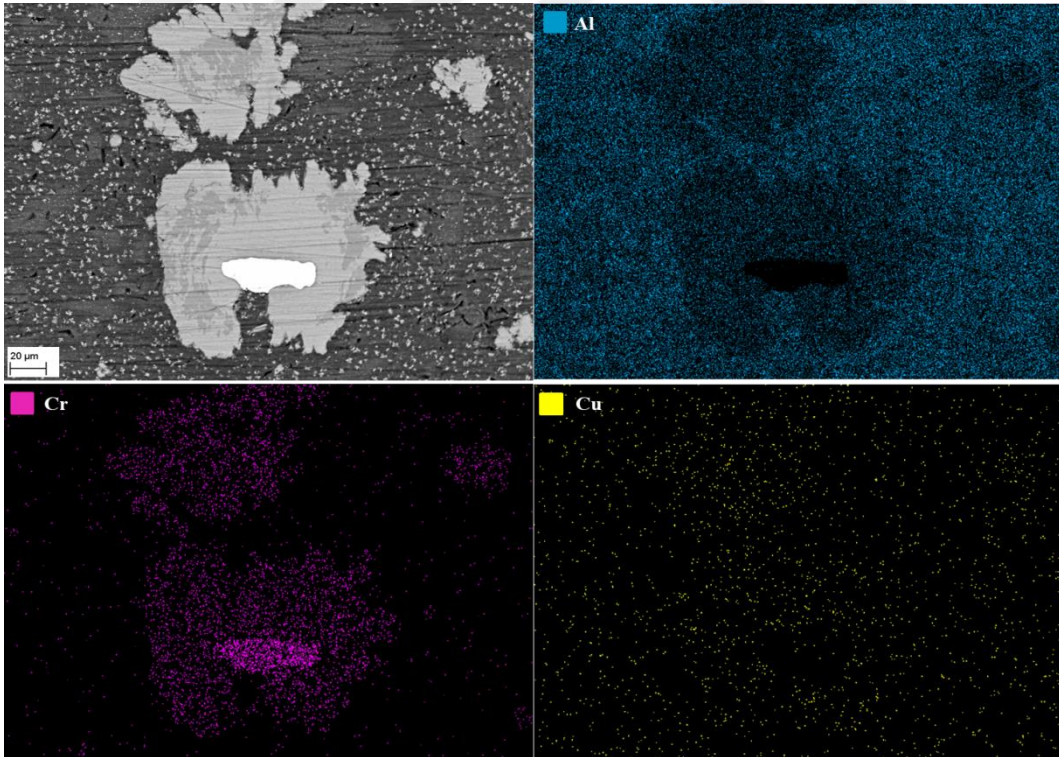
İki takviyeli kompozitlerin içyapı görüntüleri; ANiCu kompozitleri için SEM Şekil 47, EDS Şekil 48, ACuCr kompozitleri için EDS ve SEM Şekil 49 ve 50, ANiCr kompozitleri için SEM Şekil 51, EDS analizleri Şekil 52’de verilmiştir. Üç takviyeli ANiCuCr kompozitleri için EDS ve SEM görüntüleri ise Şekil 53 ve 54’de görülmektedir. Küçük büyütme SEM görüntüleri, elde edilen kompozitlerin genel morfolojisi hakkında bilgiler içermektedir. Sıcak preslemeye tabi tutulan tüm numunelerde reaksiyon ürünü oluşumlarının başarıyla gerçekleştiği büyük büyütme görüntülerde görülmektedir. Her bir kompozit için oluşan intermetalik bileşiklerin karakteristik bir şekli olduğu, tek takviyeli kompozit görüntülerinde anlaşılmıştır. Bu nedenle iki ve üç takviyeli kompozit görüntülerine bakıldığı zaman şekil olarak hangi takviyeye ait içyapı olduğu anlaşılmaktadır.



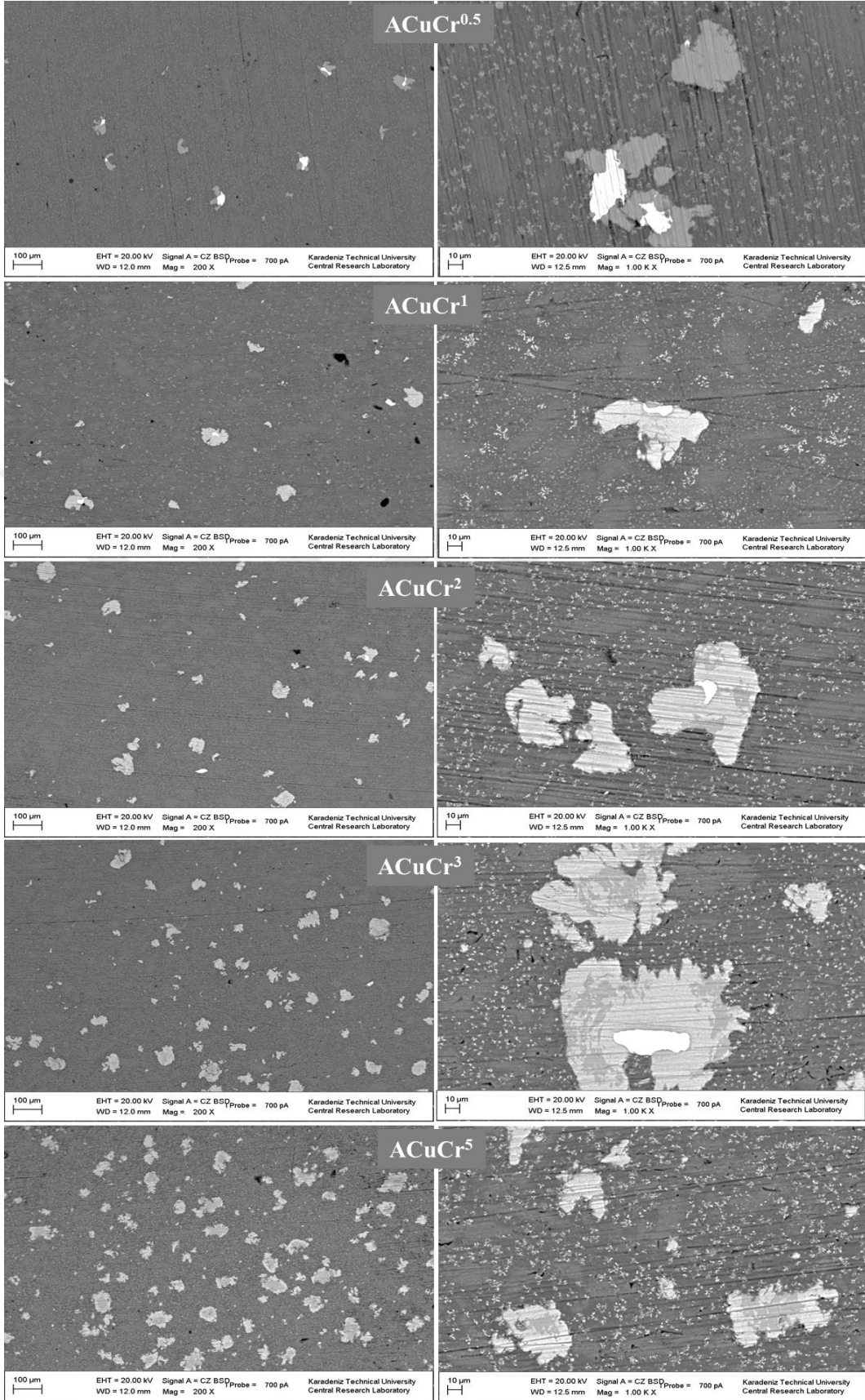
Şekil 47. ANiCu kompozitlerinin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri



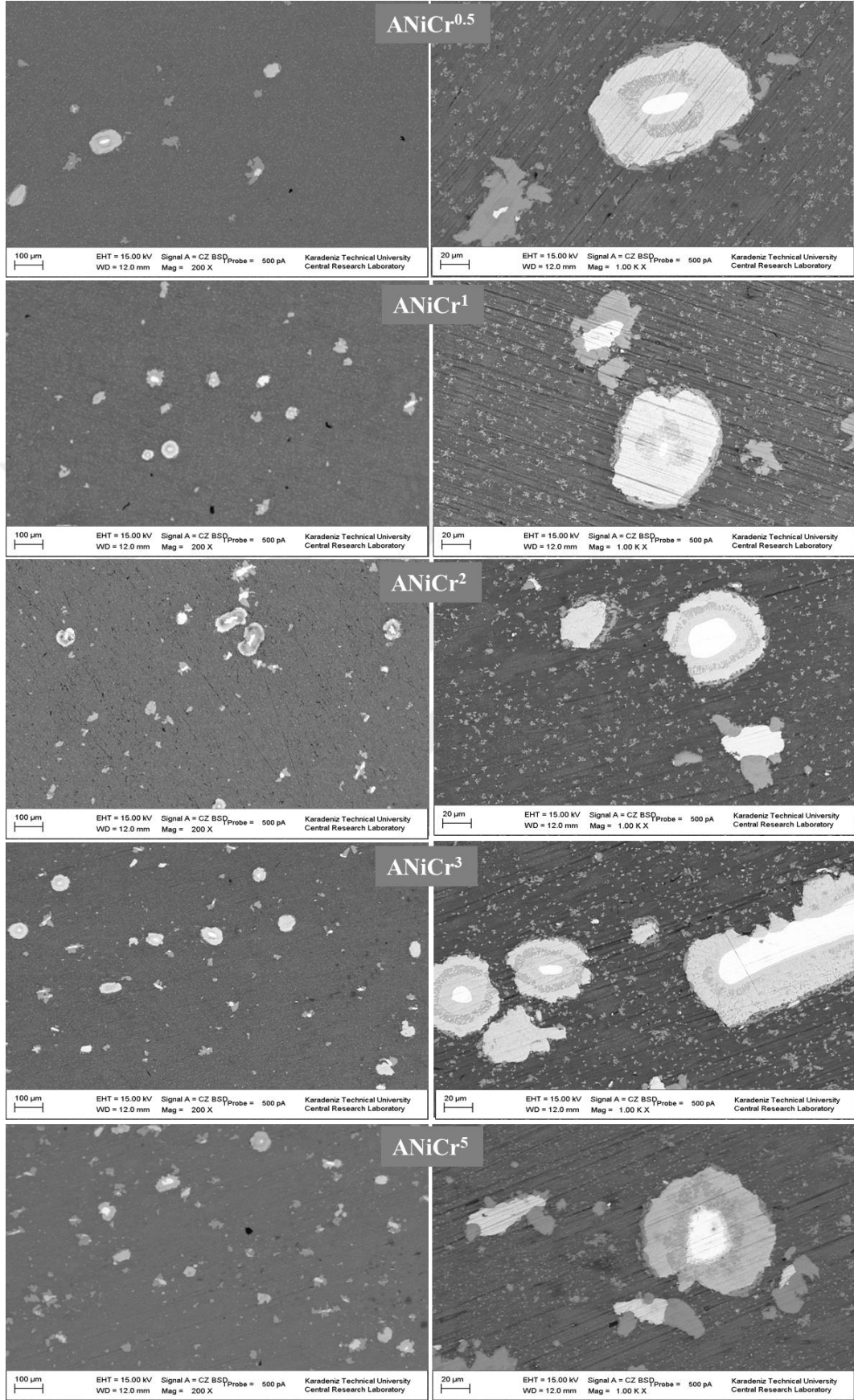
Şekil 48. ANiCu³ kompoziti için EDS analizi



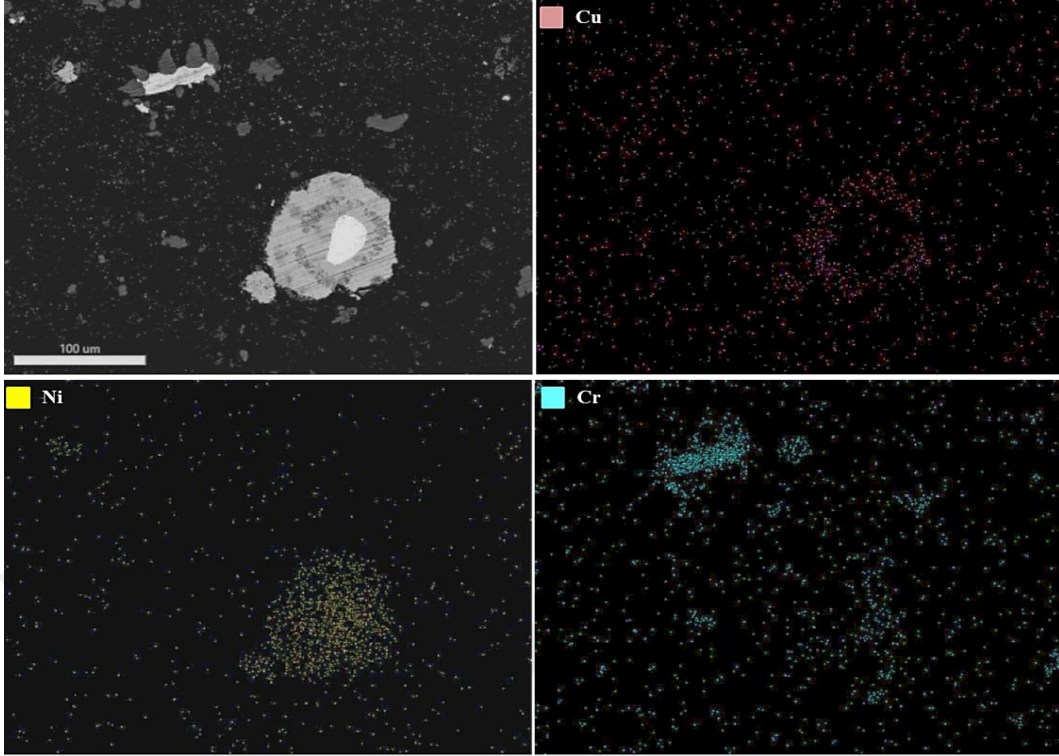
Şekil 49. ACuCr³ kompoziti EDS analizi



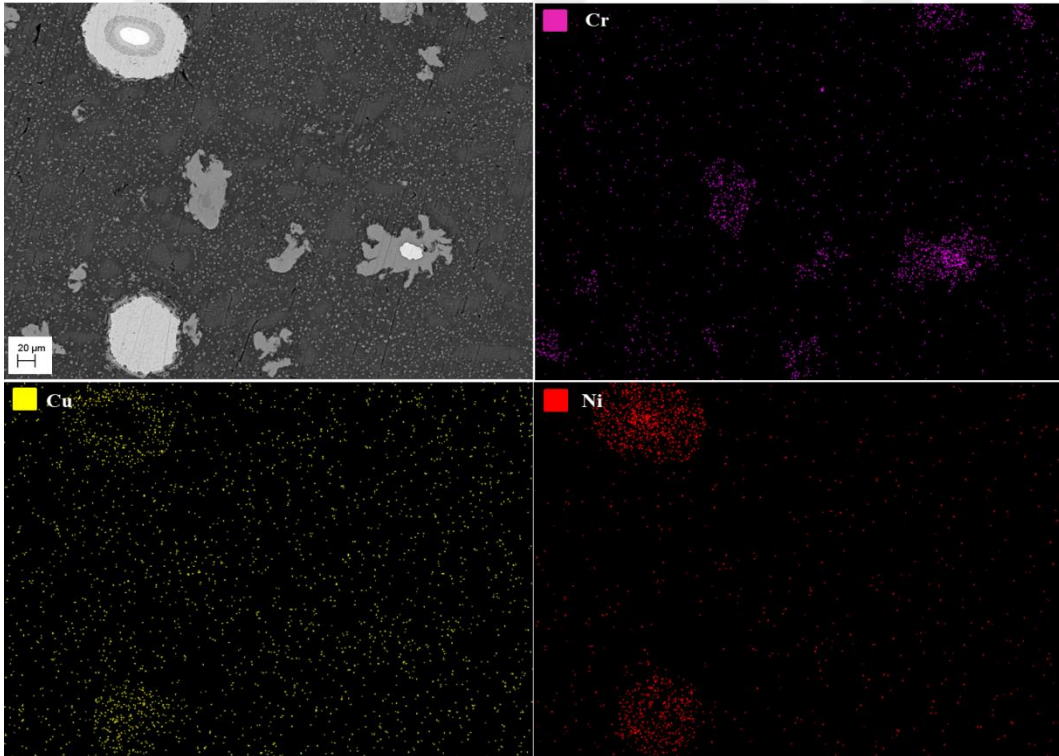
Şekil 50. ACuCr kompozitlerinin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri



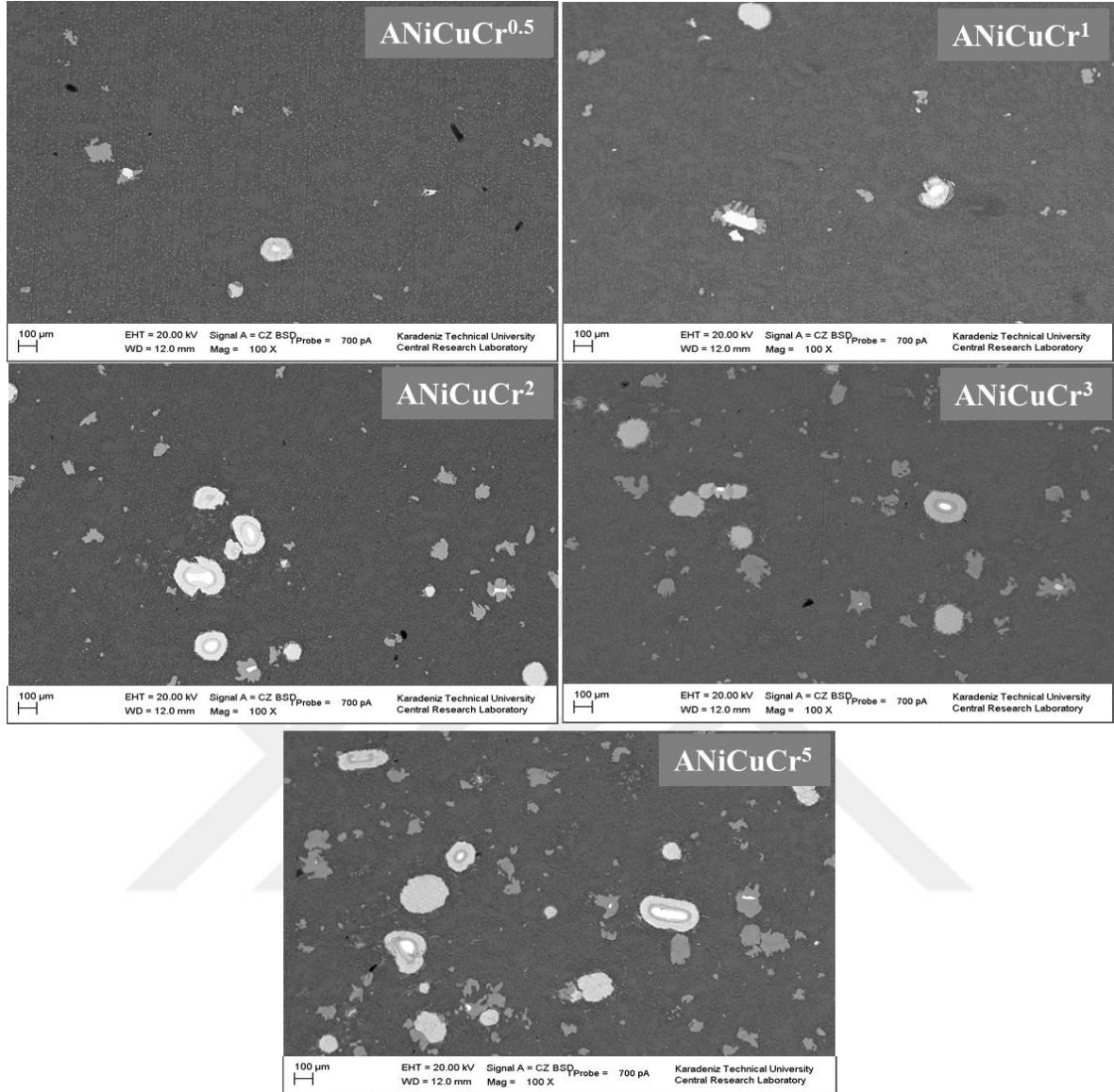
Şekil 51. ANiCr kompozitlerinin küçük ve büyük büyütme SEM görüntüleri



Şekil 52. ANiCr⁵ kompoziti için EDS analizi



Şekil 53. ANiCuCr³ kompoziti için EDS analizi

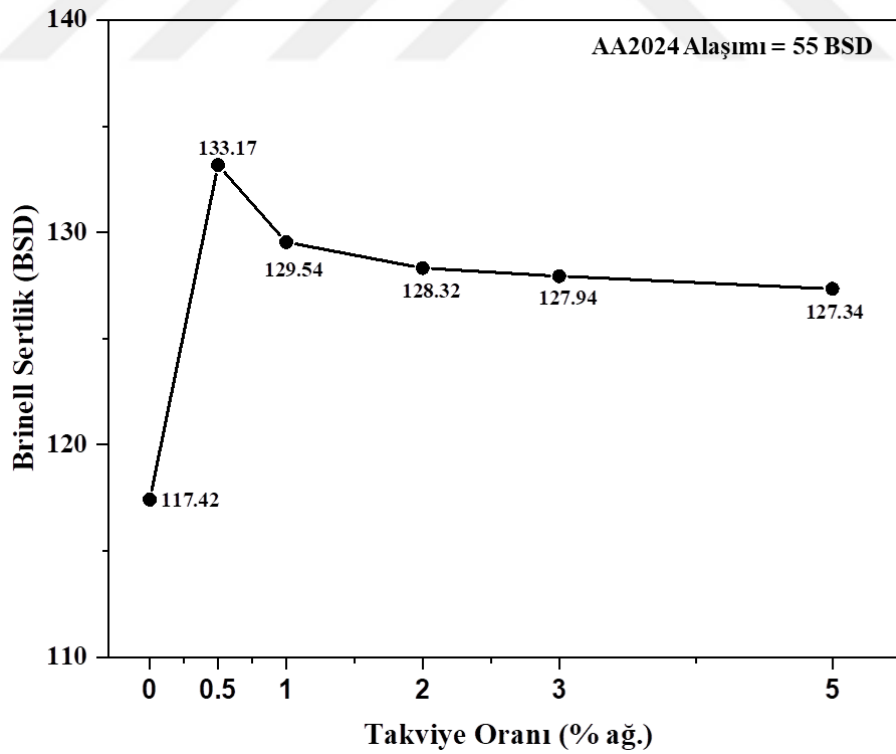


Şekil 54. ANiCuCr kompozitlerinin küçük büyütme SEM görüntüleri

3.5. Sertliklerin Belirlenmesi

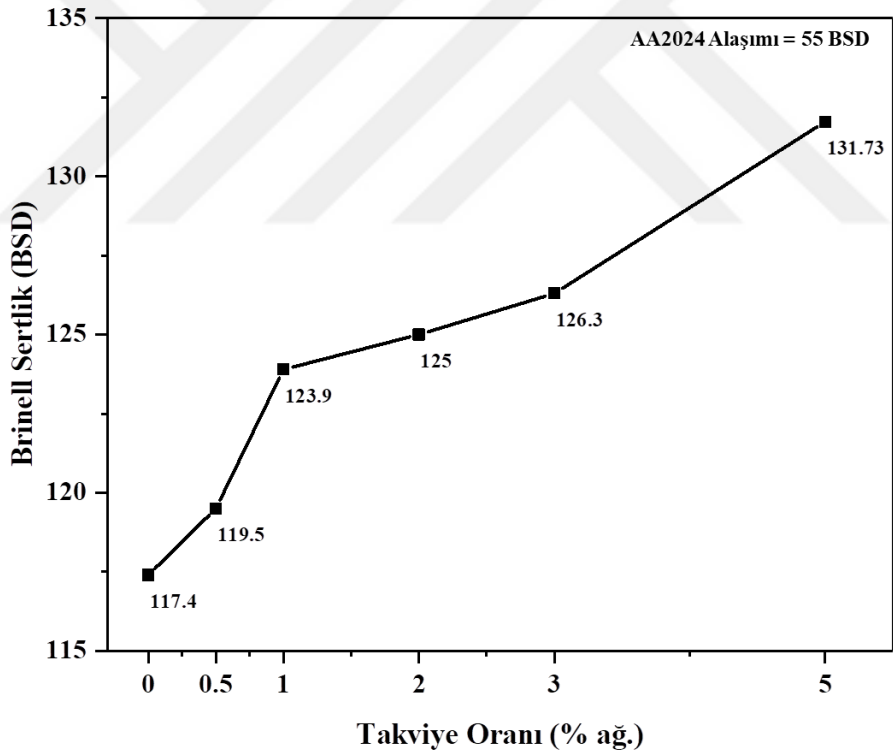
Ni, Cu, Cr takviyeli kompozitlerin sertlikleri Brinell sertlik ölçüm yöntemiyle ölçülmüştür. Kompozitlerin sertlikleri sırasıyla Şekil 55-57'de gösterilmiştir. Kompozit sertliğini; gözenek miktarı, partikül boyutu, takviyelerin sertliği ve matris içinde dağılımı, matris ve takviye arasında oluşan bileşikler etkilemektedir. Ni takviyeli kompozitlerin sertlik değerleri Şekil 55'de verilmiştir. Sertlik değerlerine göre tüm numunelerin sertliği AA2024 alaşımına ve "A" etiketli numuneye göre artmıştır. Çünkü karışımlar kuralına göre takviyesiz olan numunelerin sertliğinin, sert takviyeli kompozitlerin sertliğine kıyasla

düşük olması beklenir. AA2024 alaşımlarında, takviye çökelti fazlarının mikro yapısının yanı sıra üniform dağılımı, sertlikteki artışın nedeni olabilir. Benzer şekilde, Al-Ni bazlı intermetalik bileşikler, alüminyum alaşımlarının sertliğini artırır (Ravi Kumar vd., 2017; Kumar vd., 2020; Nath Op & Arul, 2020). Maksimum sertlik $ANi^{0.5}$ kompozitinde elde edilmiştir. Ağırlıkça %1 Nikel takviyesi ile birlikte, takviye artışı sertlikte hafif düşüslere neden olmuştur. Sertlikteki küçük düşüş, takviye elemanının matris fazına kıyasla daha fazla birikmesiyle ve artan gözeneklilik miktarı ile açıklanabilir (Gecü, 2019; Farajollahi vd., 2021). Ayrıca Cu, Al bazlı alaşımların katı çözelti sertleştirmesinde kullanılan elementlerden biridir. Dolayısıyla alüminyum matriste bakır çözünürlüğünün azalması da sertliğin azalmasına neden olmaktadır (Farajollahi vd., 2021; Mani Kumar & Neelima Devi, 2014). Yapıda oluşan Al_3NiCu intermetalik bileşiği için matristen çekilen Al ve Cu, matriste çökelme sertleşmesi oluşturacak Al_2Cu çökeltilerinin sayısının azalmasına neden olmaktadır. Bu da %1 takviye oranından sonra sertlikte düşüşe neden olmuştur. Bu düşüş alaşımda bulunan bakır miktarı ile orantılı olarak %3 oranından sonra, oran artışı sertliği daha fazla düşürememiştir.

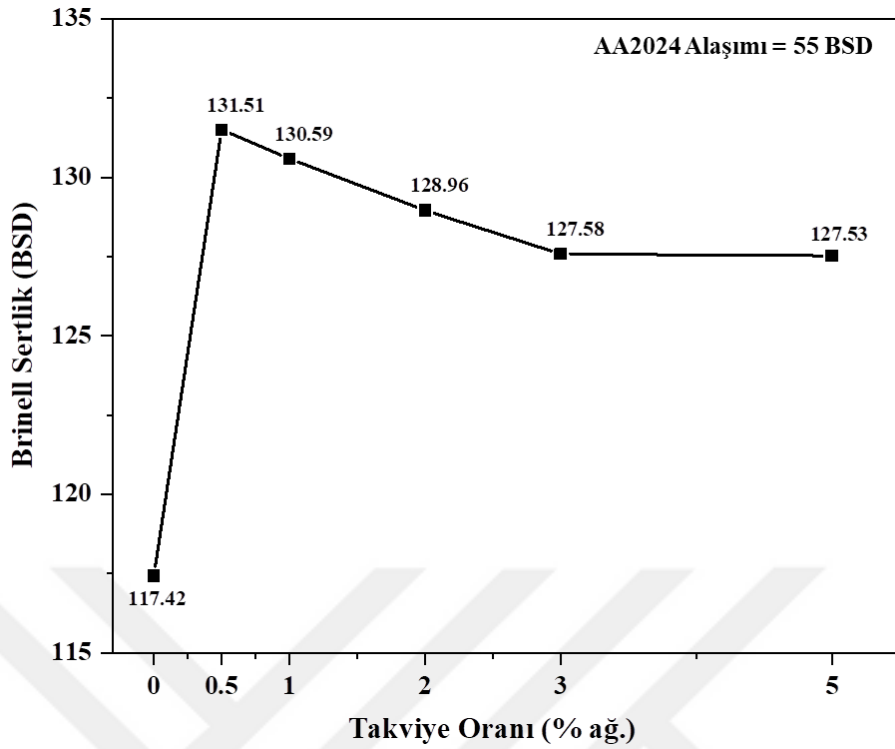


Şekil 55. ANi kompozitlerinin sertlik değerleri

Şekil 56’da Cu takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerinin artan takviye içerikleri ile arttığı görülmüştür (Gopi Krishna vd., 2017; Mani Kumar & Neelima Devi, 2014; Naga Swapna & Chittaranjan Das, 2018). Bu durum matrise daha sert takviye eklenmesi ve Al_2Cu ve Al_xCu_yMg çökelti fazlarının varlığına bağlanabilir (Gopi Krishna vd., 2017; Naga Swapna & Chittaranjan Das, 2018). İçyapı görüntülerine bakılınca Cu takviyeli kompozitlerde takviye oranı artışı ile yapıdaki intermetalik bileşiklerin sayısı Cr ve Ni takviyeli kompozitlere nazaran oldukça azdı. Bu durumu takviye bakırın matris içerisinde çözünerek çökelti fazları oluşumuna imkân sağlaması ile açıklamak mümkündür. Ayrıca oluşturduğu arafazlar ile de sertliğe katkıda bulunmuştur. Arafazların varlığı çökelti fazları gibi sertliği ve dayanımı olumlu yönde etkilemektedir. Ancak tabaka kalınlılarının ve sayılarının belirli seviyede olması gerekir aksi takdirde özellikleri olumsuz etkileyebilir (Lee vd., 2005).



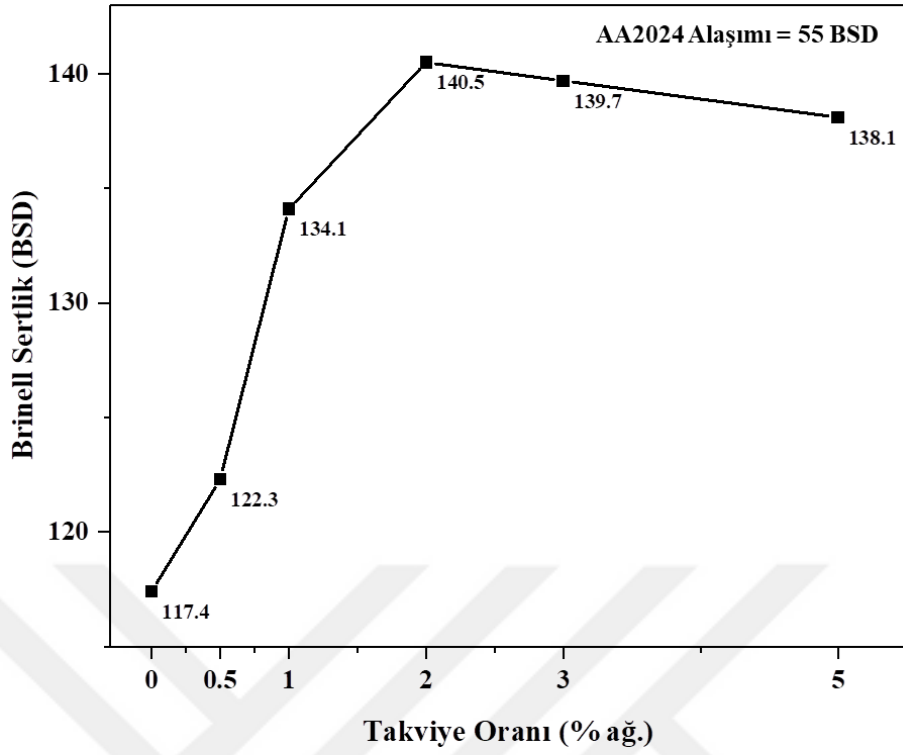
Şekil 56. ACu kompozitlerinin sertlik değerleri



Şekil 57. ACr kompozitlerinin sertlik değerleri

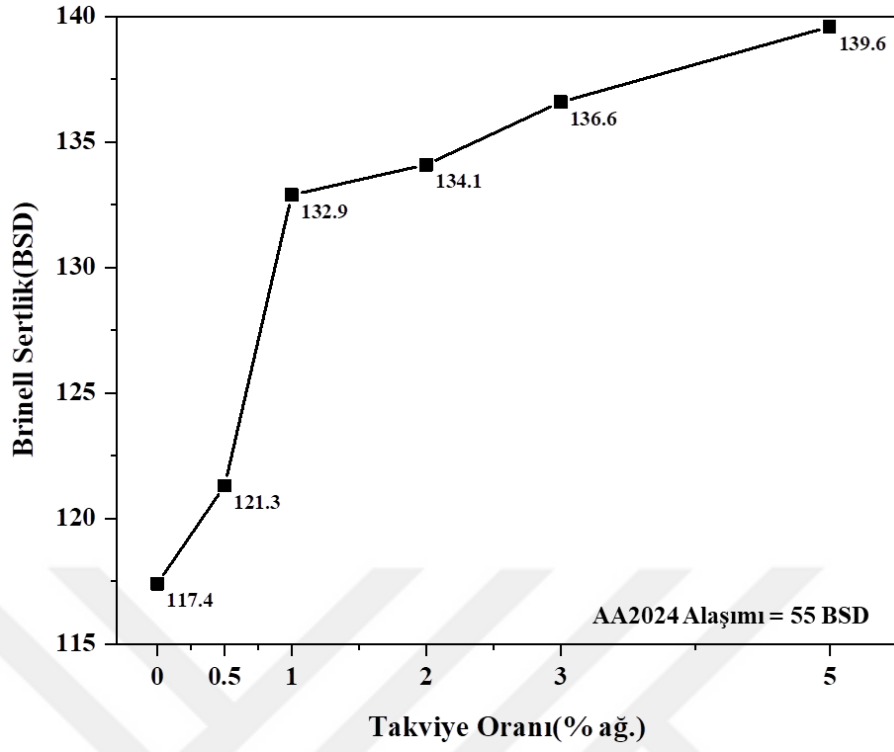
ACr kompozitlerinin sertlik ölçümlerine göre (Şekil 57), %0.5 Cr ilavesinin sıcak presleme koşuluna göre en yüksek sertliği sağladığı ve daha fazla Cr ilavesinin sertliği biraz azalttığı görülmektedir. Sertliğin artması Cr'nin katı çözelti güçlendirici olarak davranmasıyla tutarlıdır (Ravikumar vd., 2016). Ağırlıkça %1'den %5'e çıkan krom içeriği ile sertlikteki azalış; oluşan büyük, düzensiz ve köşeli intermetalik bileşik parçacıkların alaşımın homojen bir yapıya sahip olmasını engelleyip plastik deformasyonu ve çatlak oluşumunu kolaylaştırması ile açıklanabilir. Literatürde de benzer durumlarla karşılaşılmıştır (Ravikumar vd., 2016; Liao vd., 2020; (Malekan vd., 2020).

Şekil 58 ANiCu kompozitlerinin sertlik değerlerini göstermektedir. Grafik incelendiği zaman maksimum sertlik değerinin %2 oranında elde edildiği görülmektedir. Genel olarak takviye oranı artışı ile sertlik artmıştır. % 2 ve 5 oranlarındaki farkın küçük oluşu takviye edici parçacıkların kompozit içindeki dağılımı ile ilgilidir (Farajollahi vd., 2021). Bu iki takviyenin beraber alaşıma kattıkları sertlik değeri tek başlarına kattıkları sertlik değerinden fazladır. Bu nedenle, bu numunelerin çökelme sırası önemli ölçüde farklı değildir ve sertlikteki küçük farklılıklar, takviye edici parçacıkların kompozit içindeki dağılımı ile ilgilidir.

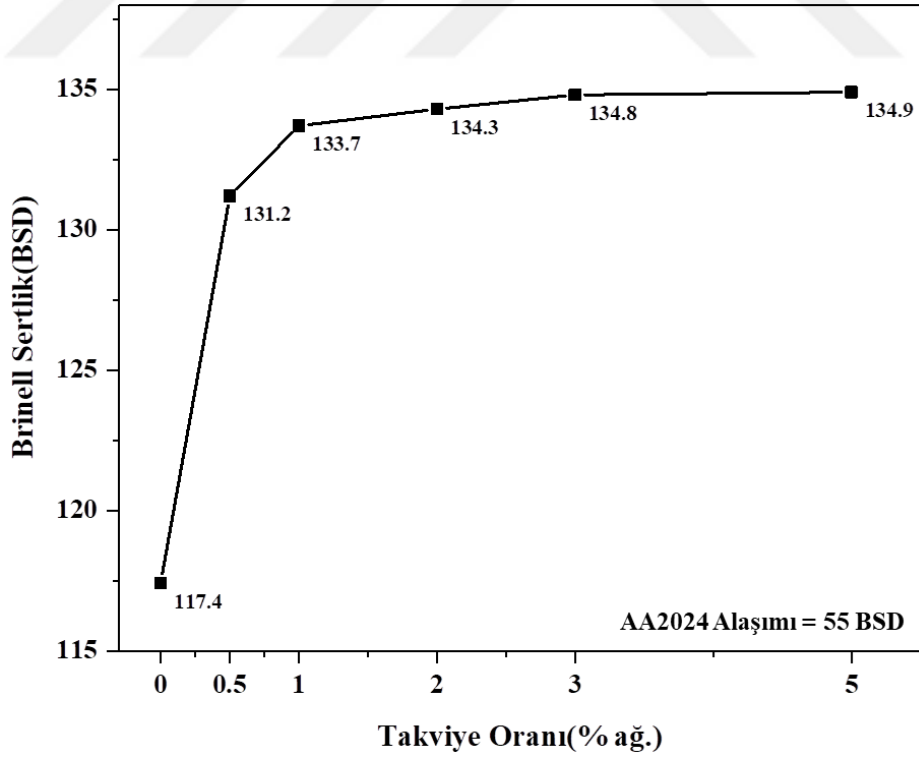


Şekil 58. ANiCu kompozitlerinin sertlik değerleri

ACuCr kompozitlerinin sertlik değerlerini gösteren grafik Şekil 59’da verilmiştir. Sertlik değeri takviye oranı artışıyla artmış ve en yüksek değerini %5 takviye oranında göstermiştir. Tek takviyeli grafiklerle kıyaslandığında Cu’nun Cr’un sertlik değerini yukarı çektiği görülmektedir. Matris takviye arası kuvvetli bağ, oluşan intermetalik bileşikler ve çökelti fazlar sertlik değerlerini artırmıştır.



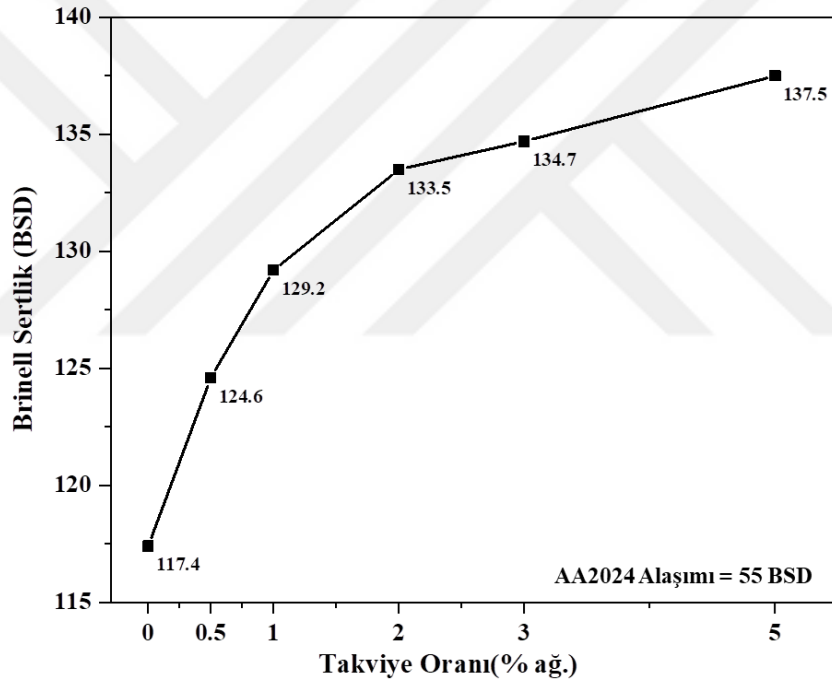
Şekil 59. ACuCr kompozitlerinin sertlik değerleri



Şekil 60. ANiCr kompozitlerinin sertlik değerleri

ANiCr kompozitlerinin sertlik değerleri Şekil 60’da sunulmuştur. Bu grafikte de diğer iki takviyeli kompozit grafiklerinde olduğu gibi takviyelerin birlikte kullanılması tek takviyeli grafikte düşük olan sertlik değerlerini yükseltmiştir. Ni ve Cr takviyeli kompozitlerin sertlik değerlerinde %1 oranıyla azda olsa düşüş gözlenmiştir. Takviyelerin birlikte olduğu kompozitlerde bu düşüş ortadan kalkmıştır. İki takviyeli kompozitlerin sertlik grafikleri takviye elemanlarının birlikte daha etkili olduklarını göstermiştir.

Ni ve Cr alüminyum içinde fazla çözünmediği için matris içerisinde daha çok çökelti faz oluşmasına neden olarak yüksek sertlik değerleri sergilemişlerdir. Cu ise matris içerisinde çözünerek arafazlar oluşturmuştur. Takviyeler arasında sertliğinin daha düşük olmasına bağlı olarak diğer takviyelerden düşük sertlik değerleri sergilemiştir.



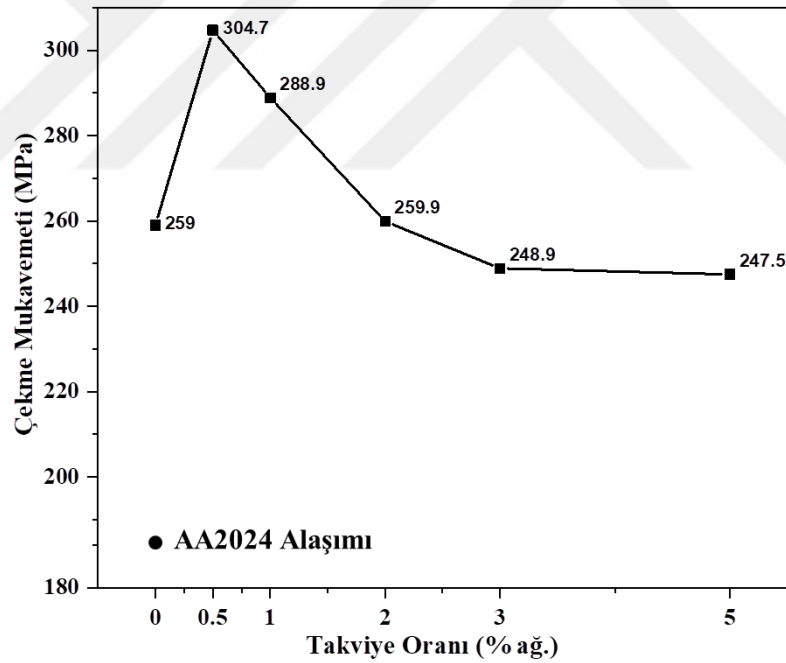
Şekil 61. ANiCuCr kompozitlerinin sertlik değerleri

Şekil 61 incelendiğinde matrise takviye edilen tozların belirli bir oranın üstüne çıkmadığı sürece sertliğe olumlu etki sağladığı anlaşılmaktadır. Bu da en yüksek sertlik değerine sahip olan ağırlıkça %5 takviyeli kompozitte her bir takviyeden ağırlıkça yaklaşık %1.6 bulunması ile açıklanabilir. Genel olarak bakıldığında bütün kompozitlerin sertlik değerleri AA2024 alaşımından daha yüksek değerler vermiştir.

3.6. Çekme Dayanımı

Çalışmanın bu kısmında numunelerin çekme dayanımları ve takviye miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. AA2024 alaşımında Cu, atomik yarıçaptaki nispeten önemli farklılıktan dolayı alaşımın katı çözelti sertleşmesi için kullanılan elementlerden biridir (Draissia & Debili, 2005). Katı çözelti sonucu oluşan çökelti hareketli dislokasyonlara engel teşkil eder ve mukavemeti artırır (Dixit vd., 2008). Ayrıca matris ve takviye arası iyi bir arayüzey oluşması kompozit malzemeye uygulanan yükü matristen arayüzey aracılığıyla takviye malzemesine aktarır. Takviye malzemesinin uygulanan yükün büyük bir kısmını taşıması ile de mukavemet artışı gerçekleşir (Toptan, 2011).

ANi kompozit malzemelere yapılan çekme testi sonuçları Şekil 62’de verilmiştir. Görüldüğü gibi Nikel yüzdesi ağırlıkça %0,5’e çıkarıldığında numunelerin mukavemeti artmaktadır. Çünkü yapıda hem iyi bir ara yüzey bağı hem de çökelti fazları mevcuttur.



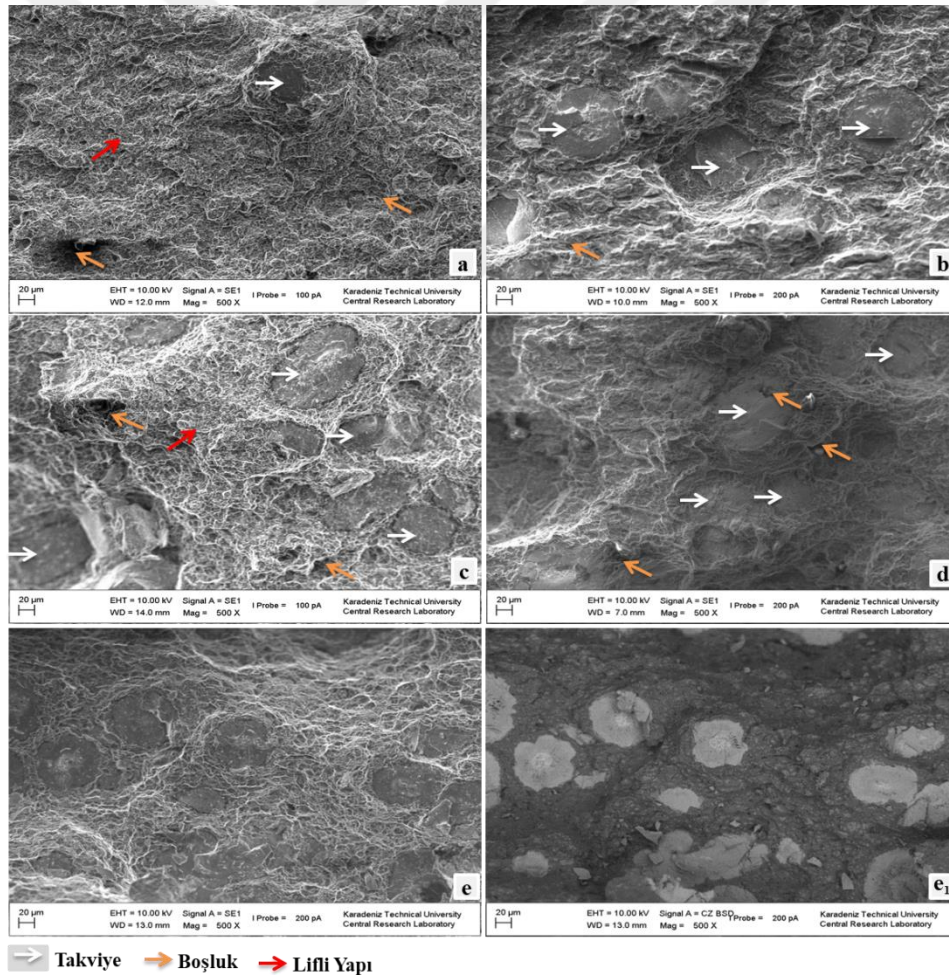
Şekil 62. ANi kompozitlerinin çekme dayanımı

Mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde önemli olan Al-Ni intermetalik bileşikleri oluşmuştur (Farajollahi vd., 2021). Bununla birlikte, nikelin ağırlıkça %1’e çıkarılması mekanik özellikleri bir miktar azaltmıştır. %1 Ni takviyesi sonrası artan takviye oranı ile çekme mukavemeti düşmüştür (Şekil 62). Bu düşüş; artan intermetaliklerin etkin çentik

etkisi oluşturarak kompoziti gevrekletirmesi, gözenekliliğin artması ve sertliğin azalması ile açıklanabilir (Kaçmış, 2022; Alaneme vd., 2014; Farajollahi vd., 2021).

Ayrıca, Ni ilavesinin süneklik üzerindeki olumsuz etkisinin nedeni, daha sert Al_3Ni_2 partikülünün, termal stresin varlığından dolayı yükün etkisi altında mikro çatlak çekirdeklenme bölgeleri olarak hareket etmesi ile açıklanabilir (Liu vd., 2021).

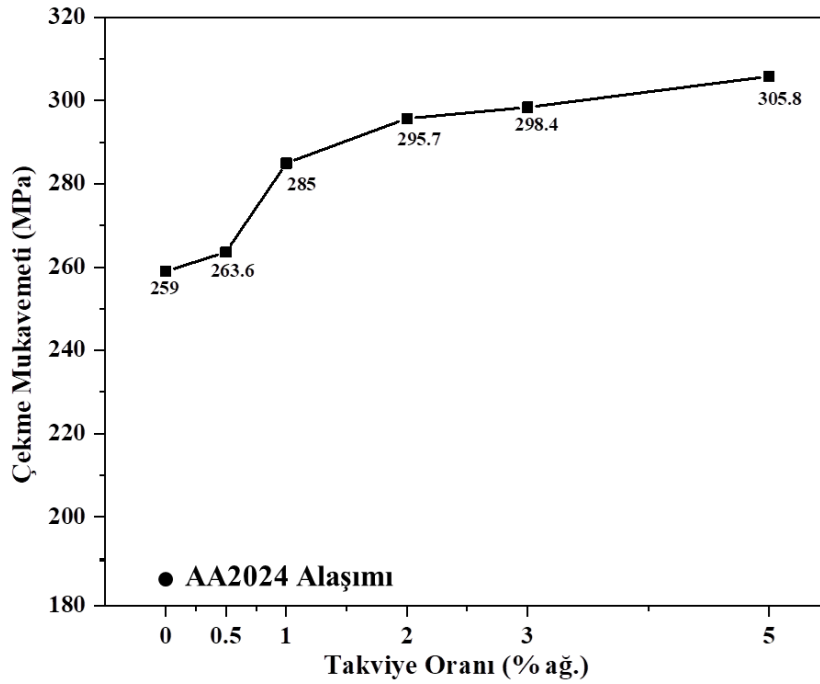
Şekil 63'de Ni takviyeli kompozit numunelere ait kırılma yüzeyi resimleri verilmiştir. Şekil 63-a'da verilen kırılma yüzeyi daha çok lifli yapı sergileyerek sünek kırılmaya daha yakın bir görünüm sergilemiştir. Bu resim %0,5 Ni içeren kompozite ait olup, oluşan intermetalik yapılar fazla değildir. Dolayısıyla süneklik azalmamıştır. Kompozitin mukavemeti hem iyi bir arayüzey bağı hem de çökelti fazları ile desteklenmiştir.



Şekil 63. ANi kompozitlerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri a) $ANi^{0.5}$, b) ANi^1 , c) ANi^2 , d) ANi^3 , e) ANi^5 , e1) ANi^5 backscatter görüntüsü

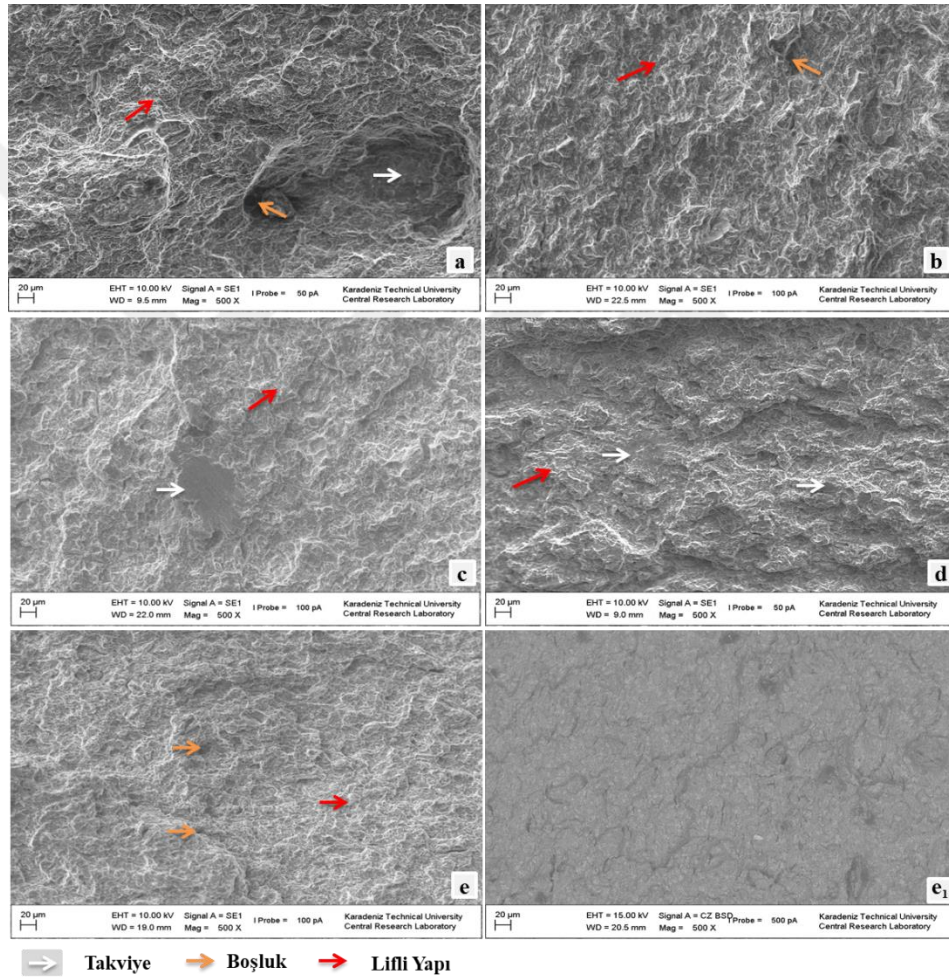
Şekil 63-b, c, d, e ise sırasıyla ANi^1 , ANi^2 , ANi^3 , ANi^5 kompozitlerinin kırılma yüzeyi verilmiştir. Takviye oranı artışı ile kompozitlerin kırılma yüzeyinde Nikel'ce zengin intermetalik bileşikler gözlenmektedir. Nikel açısından zengin parçacıkların kırılması ve bunların ara yüzeyinde bağın ayrılmaması parçacıklar ve alüminyum matris arasında çok güçlü bir bağ olduğunu gösterir (Farajollahi vd., 2021). Sertlik ve dayanım sonuçlarına göre, Ni'in ağırlıkça %0.5 oranına kadar katıldığı numunede güçlendirmenin etkisi baskınken, katkı oranı arttıkça katı çözelti ve çökelme güçlendirme mekanizmaları kompozit sertliğini ve dayanımını düşürmektedir (Sankaranarayanan vd., 2011; Farajollahi vd., 2021; Liu vd., 2021).

Cu takviye edilen kompozitlerin artan takviye oranı ile artan çekme dayanımı sonuçları Şekil 64'te verilmiştir. Matris alaşımı AA2024'e kıyasla bütün numuneler yüksek dayanım sergilemiştir. Cu takviyeli kompozit grubunda, hem matris malzemesi içerisinde hem de takviye olarak Cu bulunmaktadır. Bu da çökeltili fazların ve intermetalik bileşiklerin kompozit mukavemetine katkıda bulunacağını göstermektedir. ACu kompozitlerinin çökeltili fazlarından ve iyi bir ara yüzey bağından kaynaklanan ve takviye oranı ile artan sertliğine bağlı olarak çekme dayanımları da artış göstermiştir (Mani Kumar & Neelima Devi, 2014; Naga Swapna & Chittaranjan Das, 2018).



Şekil 64. ACu kompozitlerinin çekme dayanımı

Cu'ın matris içerisinde çözünmesi ile büyük arafaz partiküllerinin Ni ve Cr takviyeli kompozit yapılarda olduğu gibi takviye artışı ile yoğunlaşmadığı içyapı görüntülerinde verilmişti. Buna bağlı olarak oluşan arafazlar, sertliği ve mukavemeti artıracak oranda kalmış yapıyı gevrekleştirmemiştir. Matris içerisinde bulunan ve takviye olarak eklenen Cu matris içerisinde çözünerek çökeltme sertleşmesi oluşturan yapılar meydana getirmiştir. Yani yapı hem arafazlar hem de çökelti fazlarla desteklenmiştir. Böylece takviye artışı ile çekme dayanımı da artmıştır.

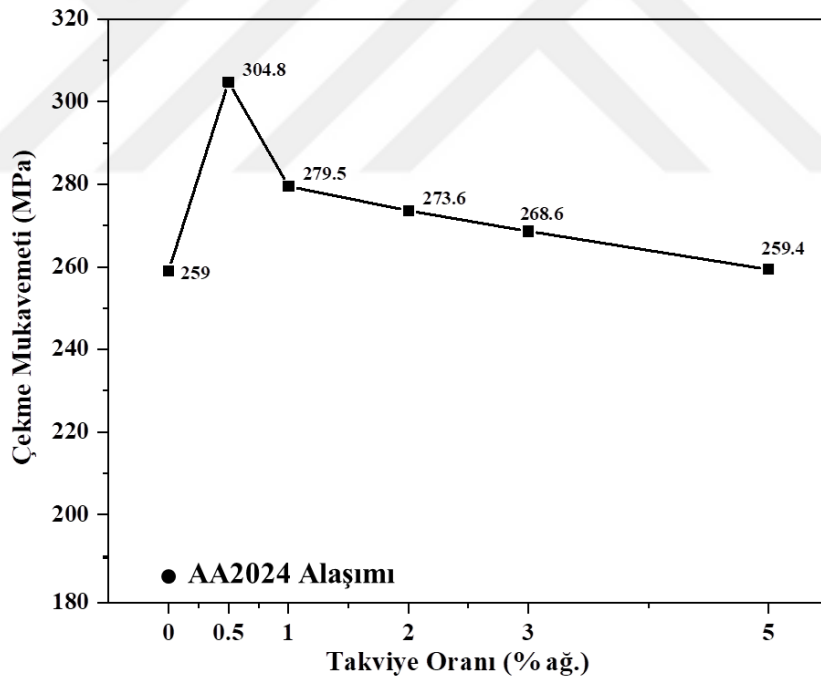


Şekil 65. ACu kompozitlerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri a) ACu^3 b) $ACu^{0.5}$, c) ACu^2 , d) ACu^3 , e) ACu^5 , e1) ACu^5 backscatter görüntüsü

Kırılma yüzeyleri incelendiğinde; $ACu^{0.5}$ kompozitin de (Şekil 65-a) büyük ve uniform olmayan çukurcuklar olduğu görülmüştür. Şekil 66-b, c, d ve e de ise sünek kırılma sonucu küçük ve uniform çukurcuklar oluşmuştur. Kırılma yüzeylerinin görüntüsü kırılma davranışını belirlemede önemli rol oynamaktadır (Özkaya, 2014). Şekil 65'de

kırılma yüzeyi görüntüleri incelendiğinde yüksek dayanım gösteren ACu^3 kompozitinde sünek kırılma oluşurken, düşük dayanım gösteren $ACu^{0.5}$ kompozitinde parçacık-matris ayrılması olduğu görülmektedir.

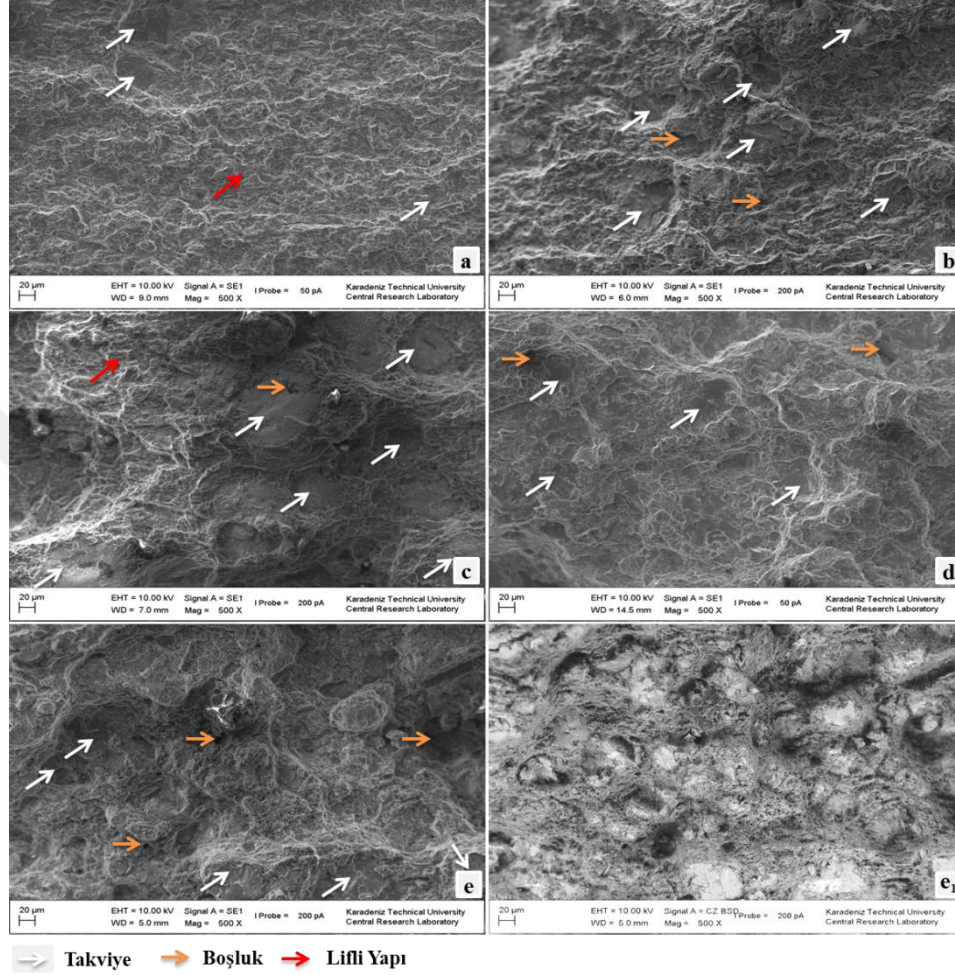
Şekil 66’da değişen Cr takviye oranı için çekme mukavemetindeki değişimi gösteren grafik, sertlik davranışına benzer bir model göstermiştir. Çekme dayanımı en yüksek numune en sert olan $ACr^{0.5}$ kompozitinde ölçülmüş, takviye oranı artışı ile çekme dayanımı azalmaya başlamıştır (Ravikumar vd., 2016; Liao vd., 2020; Ribeiro vd., 2020). Çünkü Al_7Cr parçacıkları ağırlıkça %0,5’ten ağırlıkça %5 Cr’a ulaşırken çok sayıda keskin uçlu büyük düzensiz çokgenler şeklinde görünür hale gelmektedir. Bu parçacıkların morfolojileri ve boyutları nedeniyle çekme özelliklerinin bozulduğu sonucuna varılabilir (Malekan vd., 2020). Keskin uçlu yapılar veya düzensiz şekiller, gerilme yoğunlaşmalarını artırabilir ve çatlak oluşumuna zemin hazırlayabilir. Ayrıca gerilme dağılımını homojen olmayan hale getirerek, çekme sırasında malzemenin yük taşıma kapasitesini azaltabilir.



Şekil 66. ACr kompozitlerinin çekme dayanımı

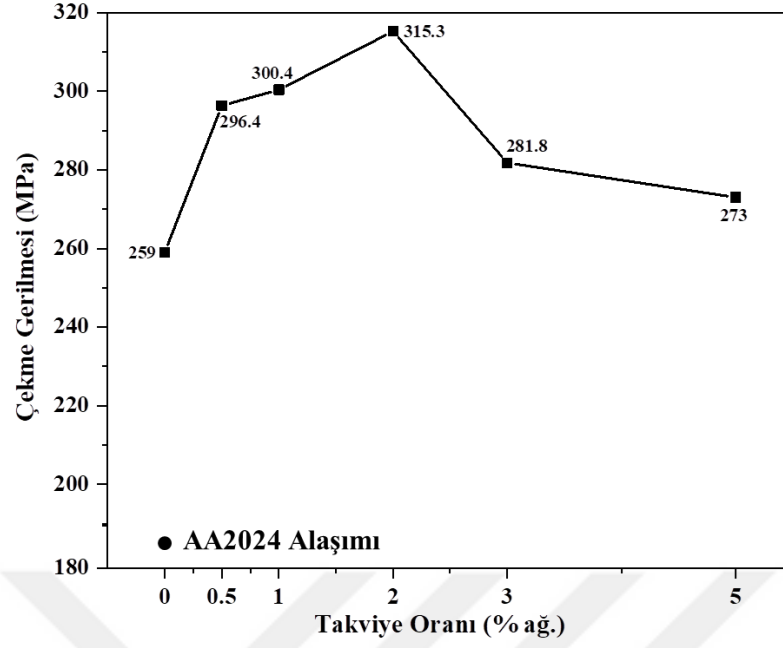
Şekil 67’de Cr takviyeli kompozitlere ait kırılma yüzeyi görüntüleri verilmiştir. En yüksek dayanıma sahip kompozitin kırılma yüzeyi lifli yapıda ve az sayıda intermetalik bileşik ile sünek kırılma sergilemektedir (Şekil 67-a). Buna karşın takviye oranı artışı ile artan takviye matris etkileşim yüzeyleri yapıyı gevrekletirmiş ve bu bölgelerde matris

takviye kırılmaları şeklinde görülmüştür (Sankaranarayanan vd., 2011; (Ravikumar vd., 2016). Bu durum çekme dayanımında azalmaya neden olmuştur.

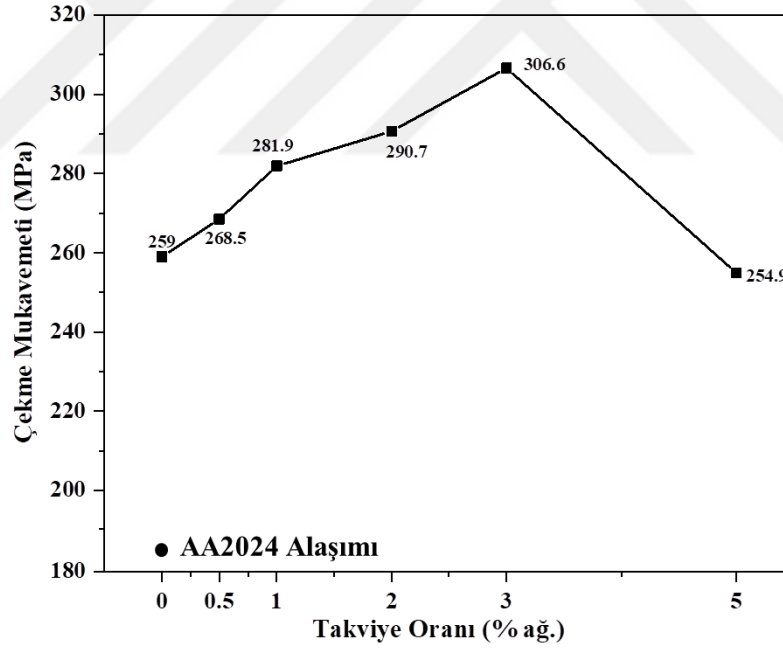


Şekil 67. ACr kompozitlerinin kırılma yüzeyi SEM görüntüleri, a) $ACr^{0.5}$, b) ACr^1 , c) ACr^2 , d) ACr^3 , e) ACr^5 , e1) ACr^5 backscatter görüntüsü

İki ve üç takviyeli kompozitlere ait çekme mukavemeti grafiği Şekil 68-71’de verilmiştir. Şekiller incelendiğinde kompozitlerin belirli bir orana kadar dayanımlarının arttığı sonrasında azaldığı buna rağmen matris alaşımının dayanımından yüksek dayanım sergiledikleri anlaşılmaktadır. ANiCu kompozitlerinde maksimum dayanım %2 oranında elde edilmiştir. Bahsedildiği gibi Ni yapıda Al_3NiCu intermetalik bileşiğini oluşturmak için matris alaşımından Cu alır, bu nedenle tek takviye edildiğinde maksimum dayanım %0.5 oranında elde edilmişti. Bu kompozite Cu da ilave edildiği için matriste eksik olan Cu miktarı %2 oranına kadar karşılanmıştır.



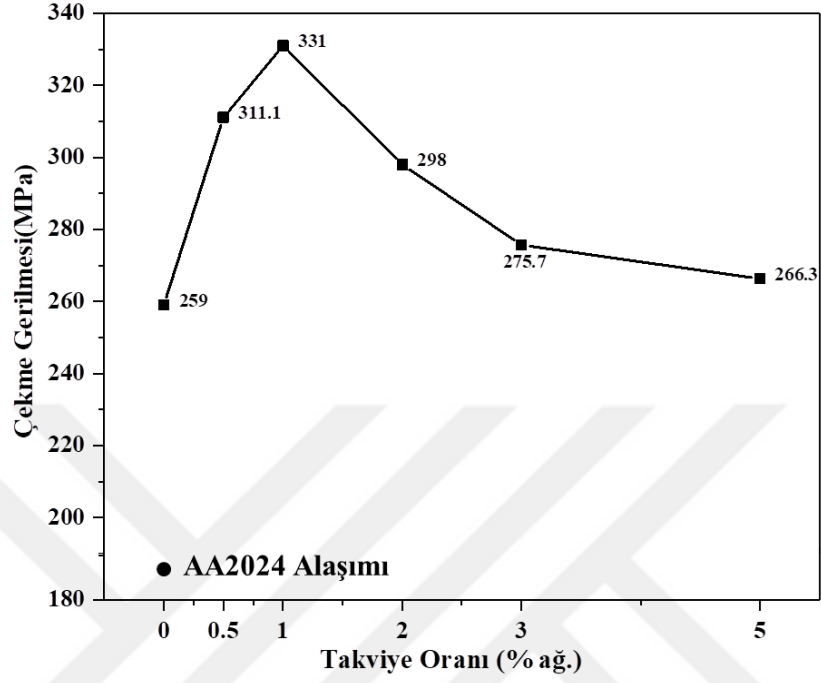
Şekil 68. ANiCu kompozitlerinin çekme dayanımı



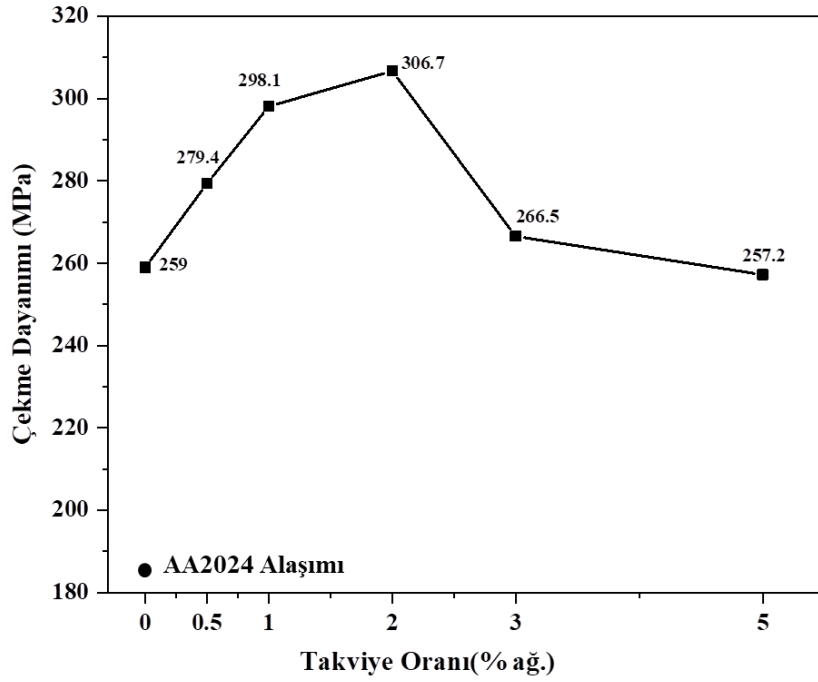
Şekil 69. ACuCr kompozitlerinin çekme dayanımı

ACuCr kompozitlerinde; Cu matrisin dayanımını sürekli artırırken, Cr %0.5 oranına kadar artırmıştır. İkisi bir arada olunca dayanım diğer kompozitlere oranla düşük değerlerde olsa da %3 oranına kadar artış göstermiştir. Cr oranının artışı büyük ve düzensiz

şekilli arafaz oluşumu ile dayanımı azalttığı için bu kompozitte de dayanım %3 oranından sonra düşmüştür.



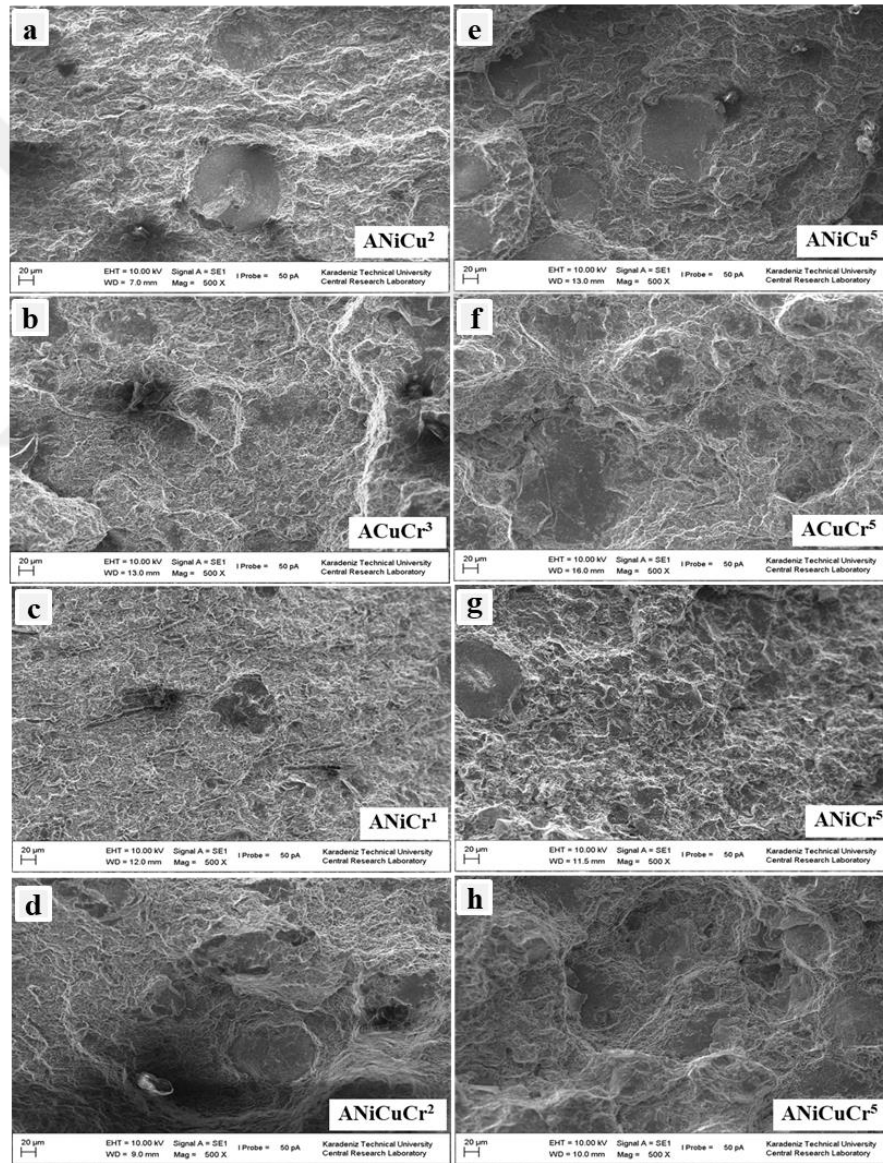
Şekil 70. ANiCr kompozitlerinin çekme dayanımı



Şekil 71. ANiCuCr kompozitlerinin çekme dayanımı

Ni ve Cr %0.5 oranına kadar matrisin özelliklerinde maksimum iyileşme sağlamıştır. Bu diğer oranlarda kötü sonuçlar alındığı anlamına gelmemektedir. Zira bütün oranlarda matrise oranla yüksek değerler elde edilmiştir. Fakat oranlar arasında kıyaslama yapılırca maksimum değerlerin alındığı oran %0.5'dir. Buna göre bu iki takviye bir arada olunca maksimum dayanım %1 oranında elde edilmiştir.

Hibrit kompozitlerin kırılma yüzeyi resimleri Şekil 72'de verilmiştir. Yüzeyler incelendiğinde, yüksek dayanım sergileyen kompozitlerde sünek kırılma, nispeten düşük gerilme sergileyen kompozitlerde ise takviye matris kırılması görülmektedir.



Şekil 72. En yüksek (a-d) ve en düşük (e-h) çekme dayanımı gösteren numunelerin kırılma yüzeyleri

3.7. Aşınma Davranışlarının Belirlenmesi

Aşınma mekanizması, çatlakların oluşumu ve büyümesi ile ilgili bir olaydır. Bu nedenle, çatlak büyümesini engelleyen herhangi bir şey aynı zamanda aşınma miktarını da azaltabilir. Matris ve takviye arasında iyi bir bağ, çatlak büyümesini engelleyebilir ve aşınma direncini artırabilir. Ayrıca sertlikteki artışın da aşınma direncini arttırdığını belirtmekte fayda var. Çalışmanın bu kısmında A alaşımı aşındırılarak, Ni, Cu, Cr takviyesinin alaşımın aşınma davranışına etkisi incelenmiştir. Tablo 6’da bütün numunelerin iki farklı yük için kütle kaybı ve aşınma dirençleri verilmiştir. Tablo genel anlamda A kodlu numuneye göre aşınma direnci yükselmiş değerler sergilemektedir. Numuneler arasında aşınma açısından çok büyük farklar yoktur fakat takviyenin aşınma direncini artırdığı verilerden anlaşılmaktadır.

Tablo 6. Tek takviyeli kompozitlerin aşınma deney sonuçları

Numune	Kütle Kaybı (mg)		Aşınma Oranı (W) mm^3/m	
	2N	20N	2N ($\times 10^{-3}$)	20N ($\times 10^{-3}$)
A	1,52	6,53	5,4	23,21
ANi ^{0.5}	0,41	1,67	1,45	5,94
ANi ¹	0,82	2,61	2,85	9,22
ANi ²	0,65	2,35	2,24	8,15
ANi ³	0,55	2,27	1,87	7,82
ANi ⁵	0,51	1,97	5,41	6,72
ACu ^{0.5}	0,31	6,5	1,09	23,05
ACu ¹	0,225	6,3	0,79	22,34
ACu ²	0,220	5,1	0,76	17,64
ACu ³	0,210	4,2	0,72	14,48
ACu ⁵	0,205	3	0,69	10,13
ACr ^{0.5}	0,23	2,1	0,82	7,45
ACr ¹	0,32	2,4	1,13	8,45
ACr ²	0,34	2,8	1,18	9,76
ACr ³	0,44	3,2	1,52	11,07
ACr ⁵	0,47	3,4	1,60	11,60

Tablo 6'nın devamı,

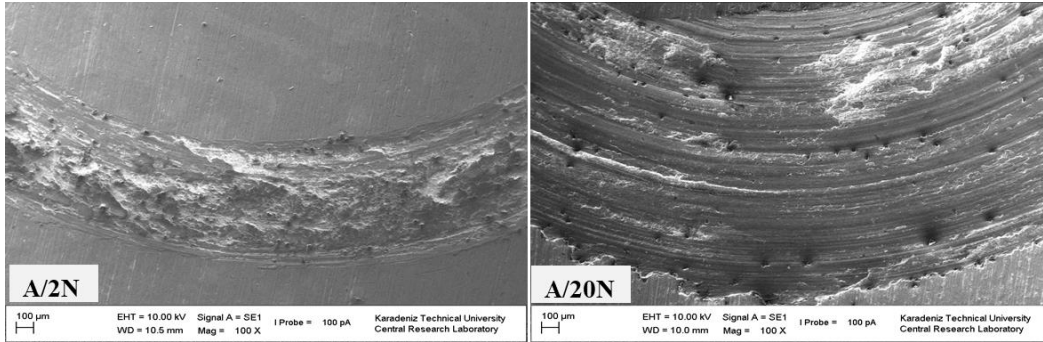
Numune	Kütle Kaybı (mg)		Aşınma Oranı(W) mm ³ /m	
	2N	20N	2N($\times 10^{-3}$)	20N($\times 10^{-3}$)
ANiCu ^{0.5}	0,3	3,9	1,06	13,83
ANiCu ¹	0,22	3,7	0,77	12,98
ANiCu ²	0,215	3,3	0,75	11,54
ANiCu ³	0,209	2,5	0,73	8,71
ANiCu ⁵	0,205	2,3	0,70	7,88
ACuCr ^{0.5}	0,225	3,8	0,80	13,5
ACuCr ¹	0,222	3,6	0,79	12,76
ACuCr ²	0,215	2,9	0,75	10,10
ACuCr ³	0,205	2,5	0,71	8,65
ACuCr ⁵	0,2	2,3	0,69	7,90
ANiCr ^{0.5}	0,342	5,1	1,21	18,02
ANiCr ¹	0,274	3,6	0,96	12,63
ANiCr ²	0,258	2,9	0,89	10,03
ANiCr ³	0,215	2,4	0,74	8,30
ANiCr ⁵	0,194	2,2	0,67	7,56
ANiCuCr ^{0.5}	0,31	6,2	1,10	22,06
ANiCuCr ¹	0,285	5,4	1,00	19,01
ANiCuCr ²	0,265	5	0,92	17,30
ANiCuCr ³	0,235	2,5	0,80	8,56
ANiCuCr ⁵	0,2	1,5	0,68	5,12

Tablo 6'dan, alüminyum alaşımlarına nikel, bakır ve krom ilavesinin alüminyum matrisinde sert intermetalik bileşiklerin oluşmasına ve matrisin aşınma davranışlarının iyileşmesine neden olduğu anlaşılmaktadır. Aşınma sonucu meydana gelen kütle kaybı; düşük yüklemde daha az olurken yük artışı ile artmıştır. Düşük yükler hafif basınçla uygulanır, bu da minimum malzeme kaldırma ile sonuçlanır. Artan yük, bilya ve numune

arasında daha yüksek temas basıncı ve sıcaklığına neden olur böylece daha fazla aşınmış malzeme çıkarılmasına yol açar (Kumar vd., 2017; Nath Op & Arul, 2020).

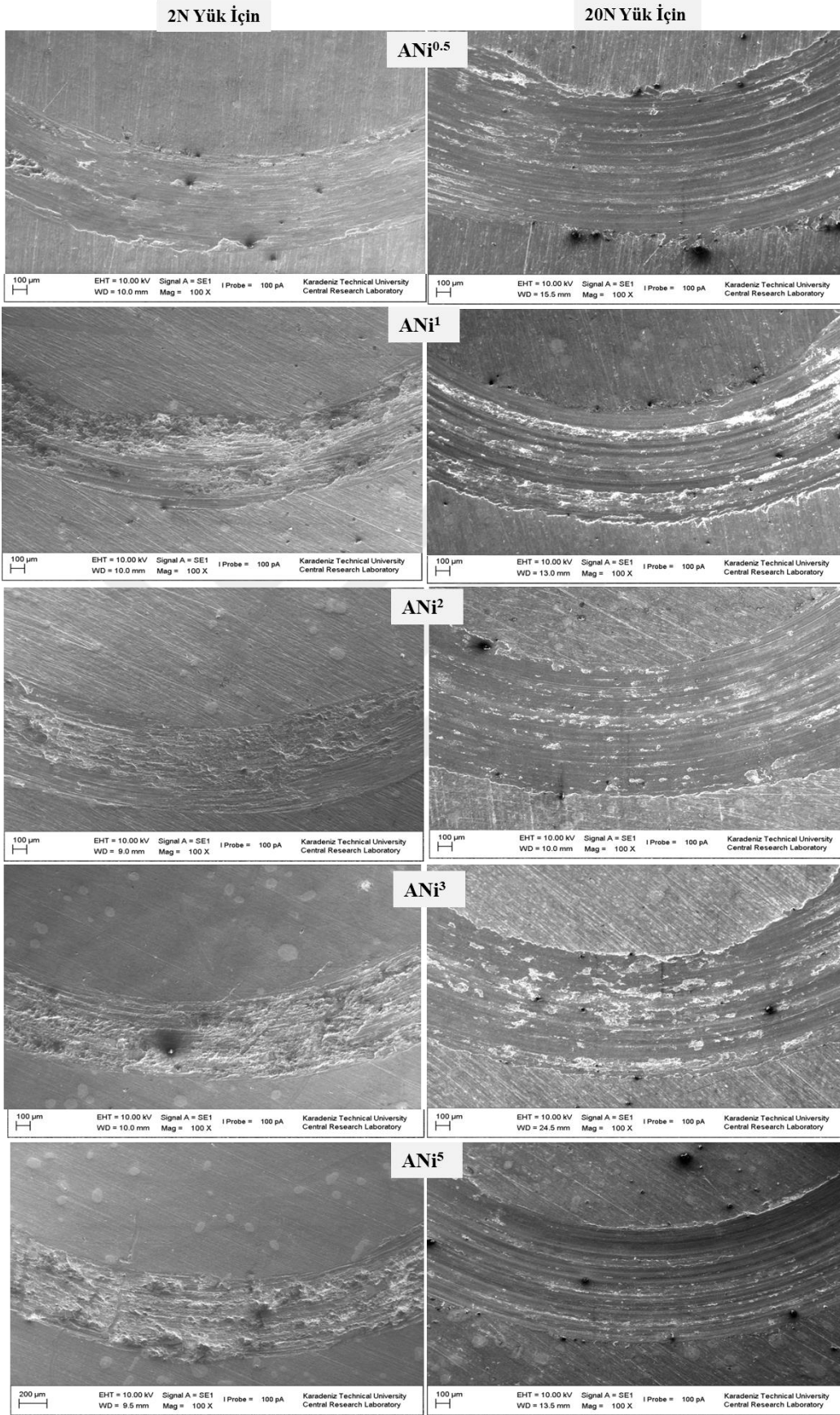
Kompozit, hafif yükleme altında minimum aşınma gösterir. Yapıştırıcı ve aşındırıcı etkilerin yanı sıra bu aralıktaki yüksek temas basıncı nedeniyle yük 20 N'a çıktıkça aşınma oranı artmıştır. Her bir kompozit grubu kendi içerisinde sertlik değerleri ile bağlantılı aşınma direnci sergilemiştir (Farajollahi vd., 2022).

Şekil 73'de verilen takviyesiz 8 saat öğütülmüş tozlardan üretilen kompozite ait aşınma yüzeyi SEM görüntülerinde, kayma yönüne paralel geniş yivler, plastik deformasyon izleri, tepeler ve çeşitli boyutlarda kraterler bulunmaktadır. Uzun ve sürekli yivlerin varlığı abrazif aşınmanın, tepeler ve kraterlerin varlığı ise adhezif aşınmanın etkin olduğunu göstermektedir (Gecü, 2019; Ipek, 2005; Mondal & Das, 2006; (Erdemir vd., 2015; Farajollahi vd., 2022). Aşınma testi süresince yüzeyden kopan sert takviye parçalar malzemeyi abrazif olarak aşındırırken, sertliği daha düşük olan matrisinden kopan parçaların sert bilyeye tutunmasıyla malzeme yüzeyinde adhezif aşınma meydana gelmektedir. Kopan bu parçalar ya bilyede kalmakta ya da tekrar yüzeye yapışmaktadır. Koptukları yerde krater, yapıştıkları yerde de tepeler oluşturmaktadırlar. Aşınma yüzeylerinde görülen tepe ve kraterler, bu nedenle adhezif aşınmanın bir işareti sayılmaktadır (Gecü, 2019; Ipek, 2005; Mondal & Das, 2006; (Erdemir vd., 2015; Farajollahi vd., 2022).

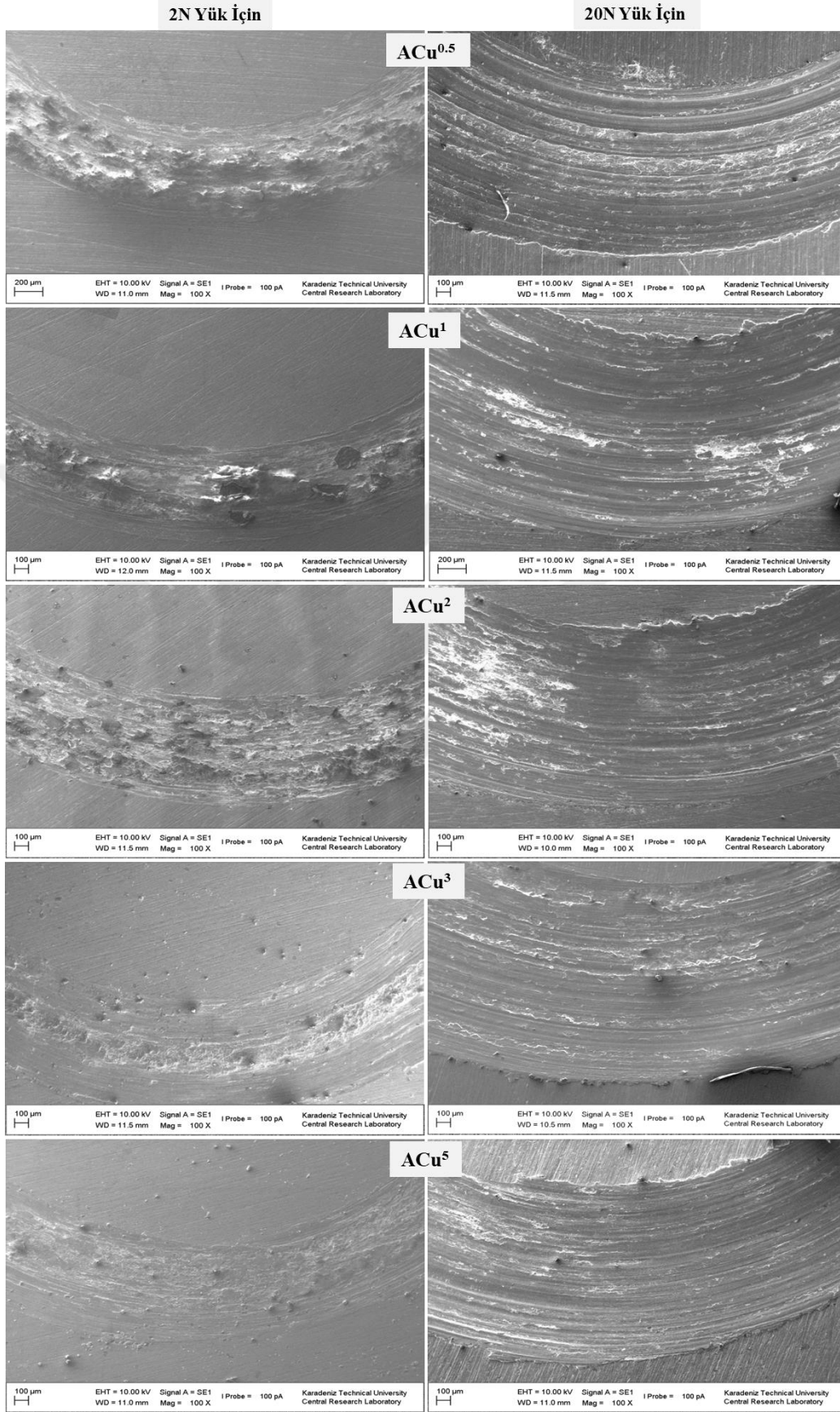


Şekil 73. 8 saat öğütülmüş AA2024 alaşımının farklı yüklerde (2N ve 20N) aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

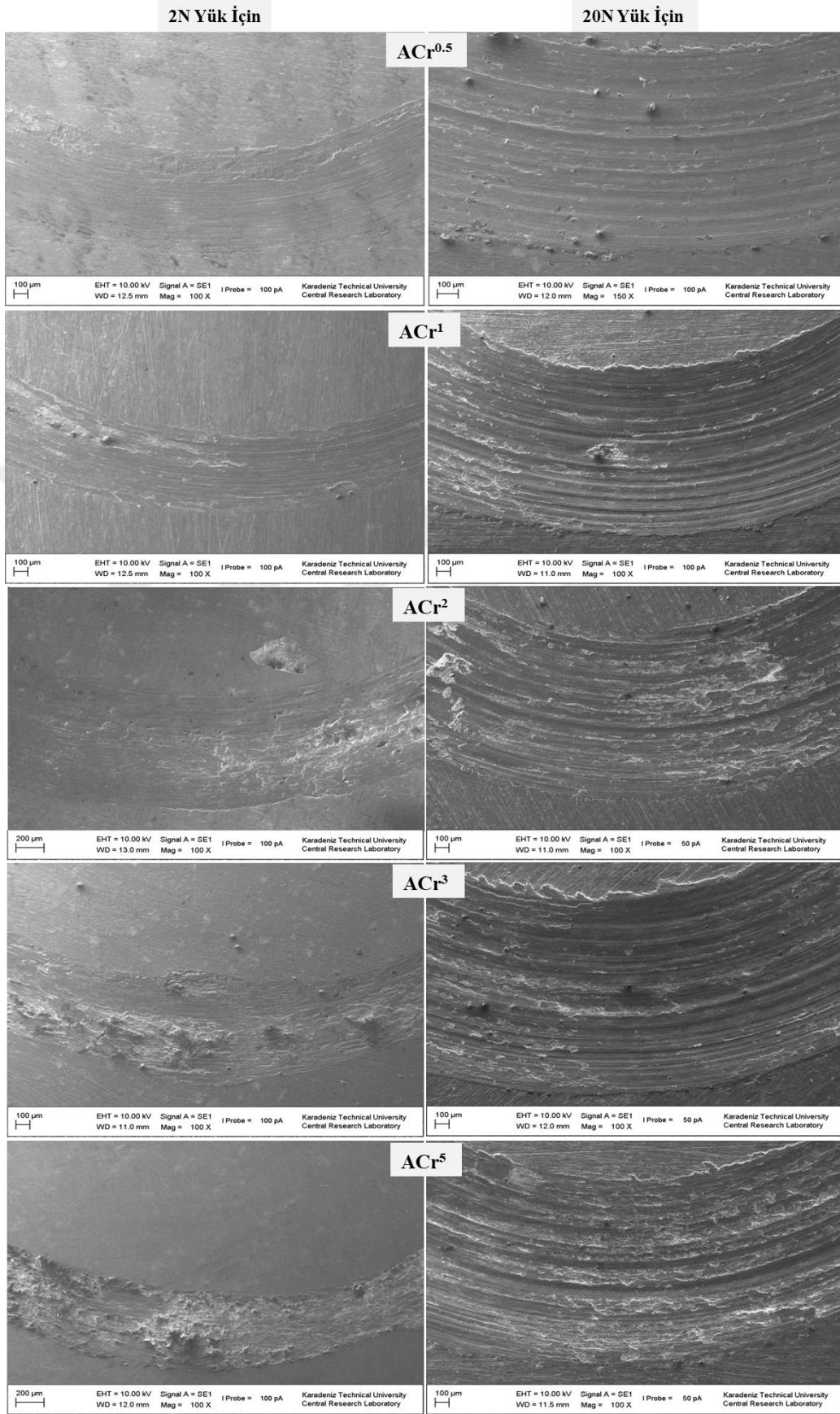
Tekli kompozitlere ait aşınma yüzeyi SEM görüntüleri 2N ve 20N yükleme için Şekil 74-76'da verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde; A kodlu numunenin aşınma yüzeylerine benzer şekilde uzun ve sürekli yivler, tepeler ve kraterler görülmektedir. Bu durum tekli kompozitlerde de abrazif ve adhezif aşınmanın etkin olduğunu göstermektedir.



Şekil 74. ANi kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

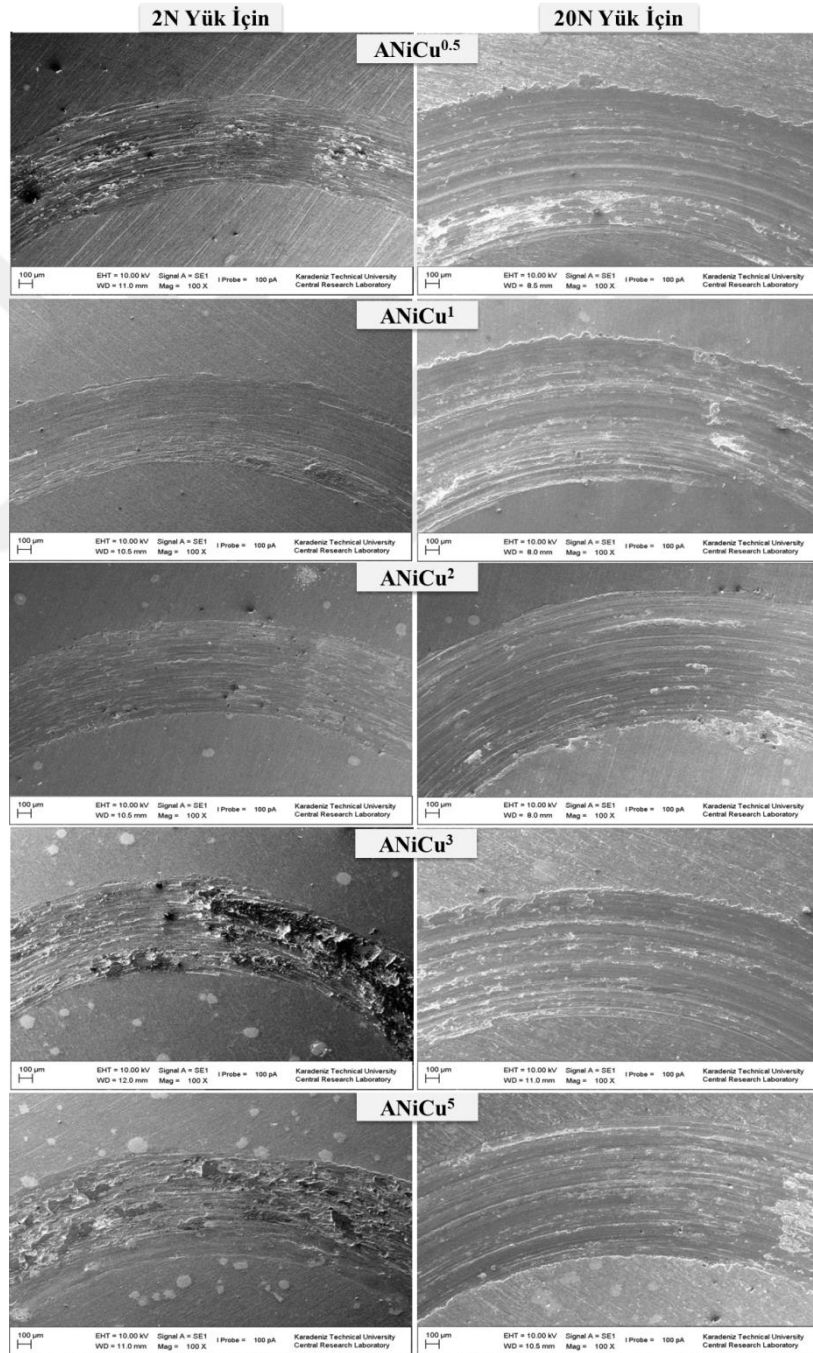


Şekil 75. ACu kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

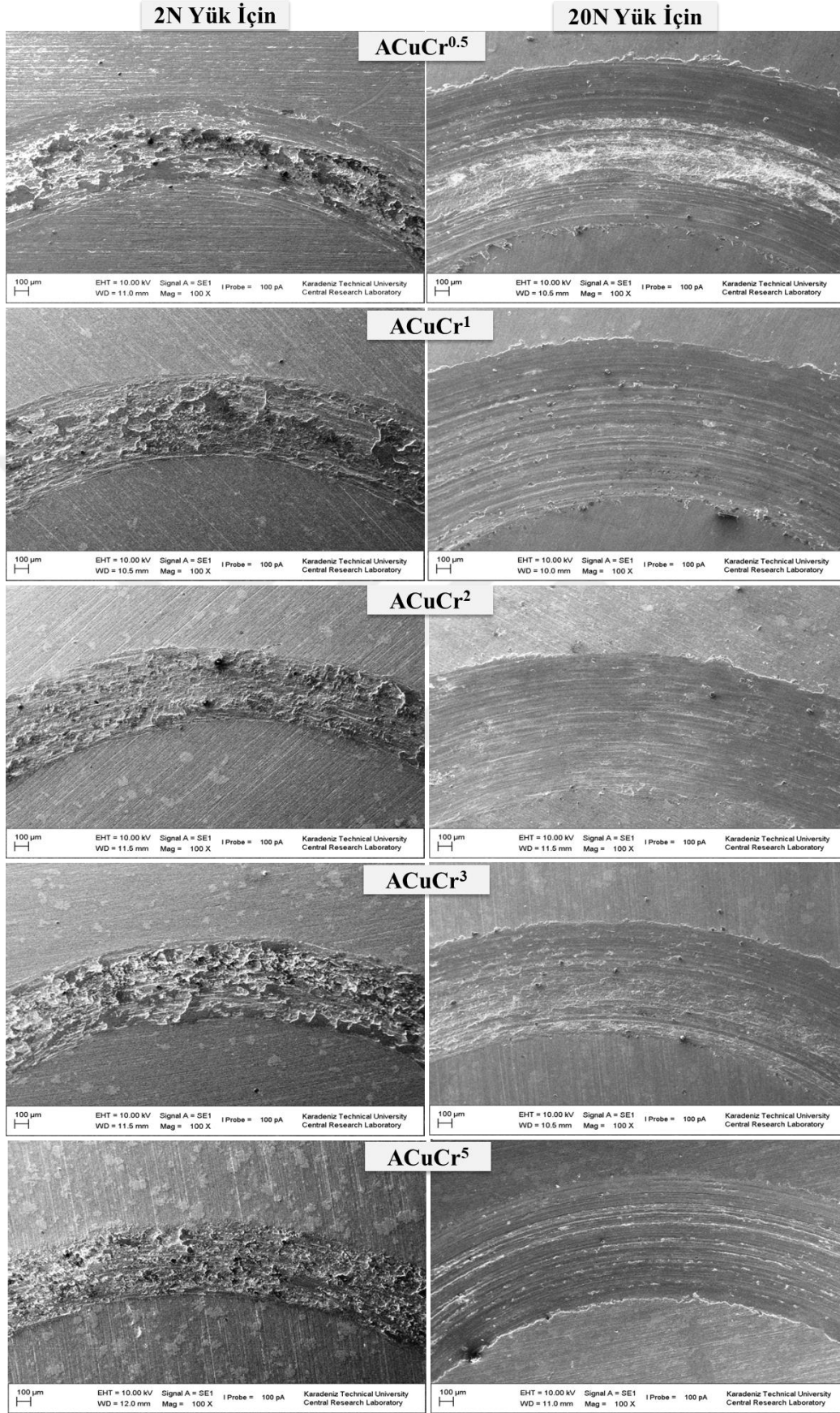


Şekil 76. ACr kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

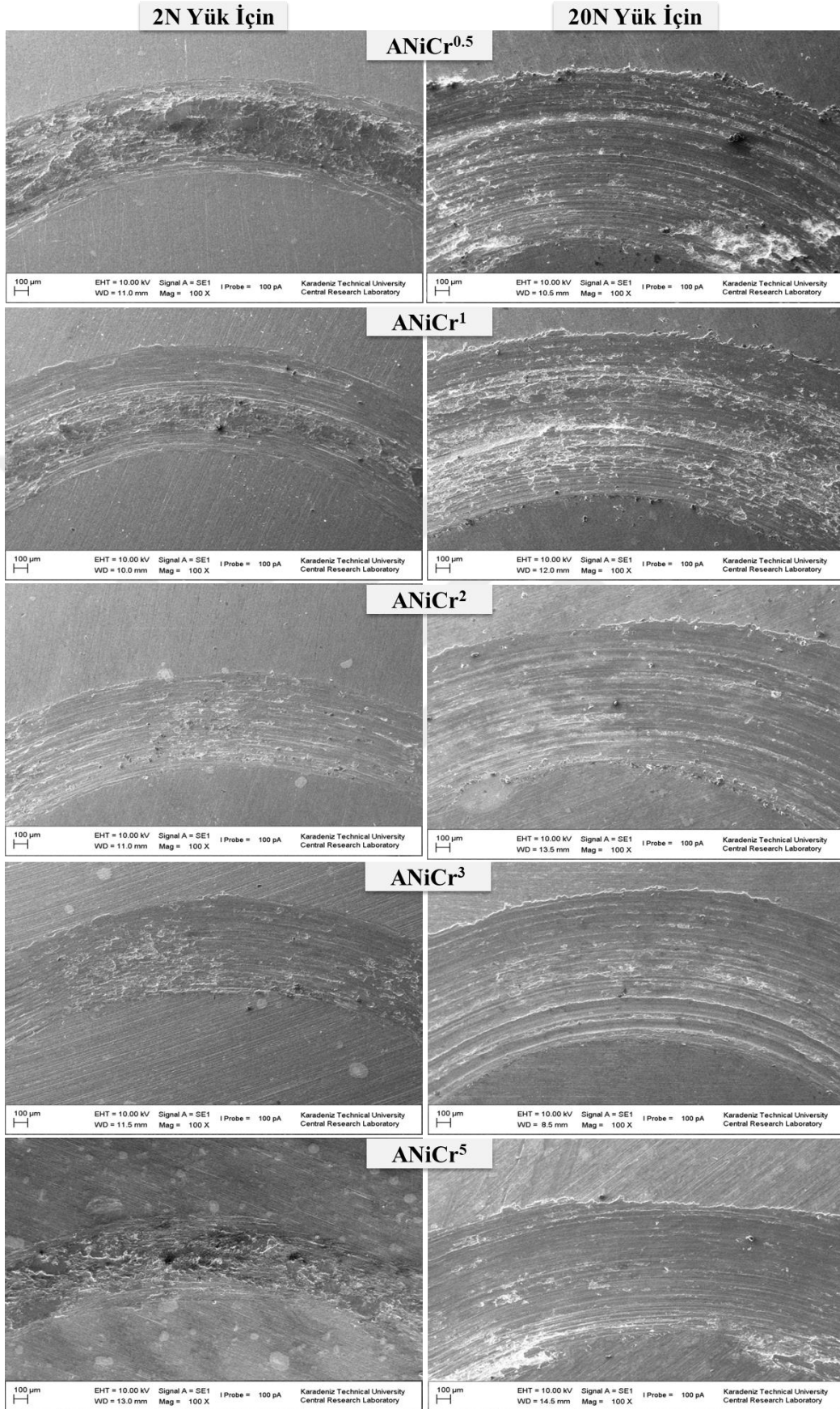
İki ve üç takviyeli kompozitlere yapılan aşınma deney sonuçları Tablo 6'da verilmişti. Tablo değerleri; takviye oranı artışı ile kütle kaybında azalma, aşınma direncinde ise artış olduğunu göstermektedir. Takviye elemanları matrise birlikte katıldığı zaman sertliklerde artış gözlenmişti, buna bağlı olarak takviye oranı artışı ile aşınma azalış göstermiştir. Aşınma yüzeyi olarak temelde yine abrasif ve adeziv aşınma türleri oluşmuş ve aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 77-80'de verilmiştir.



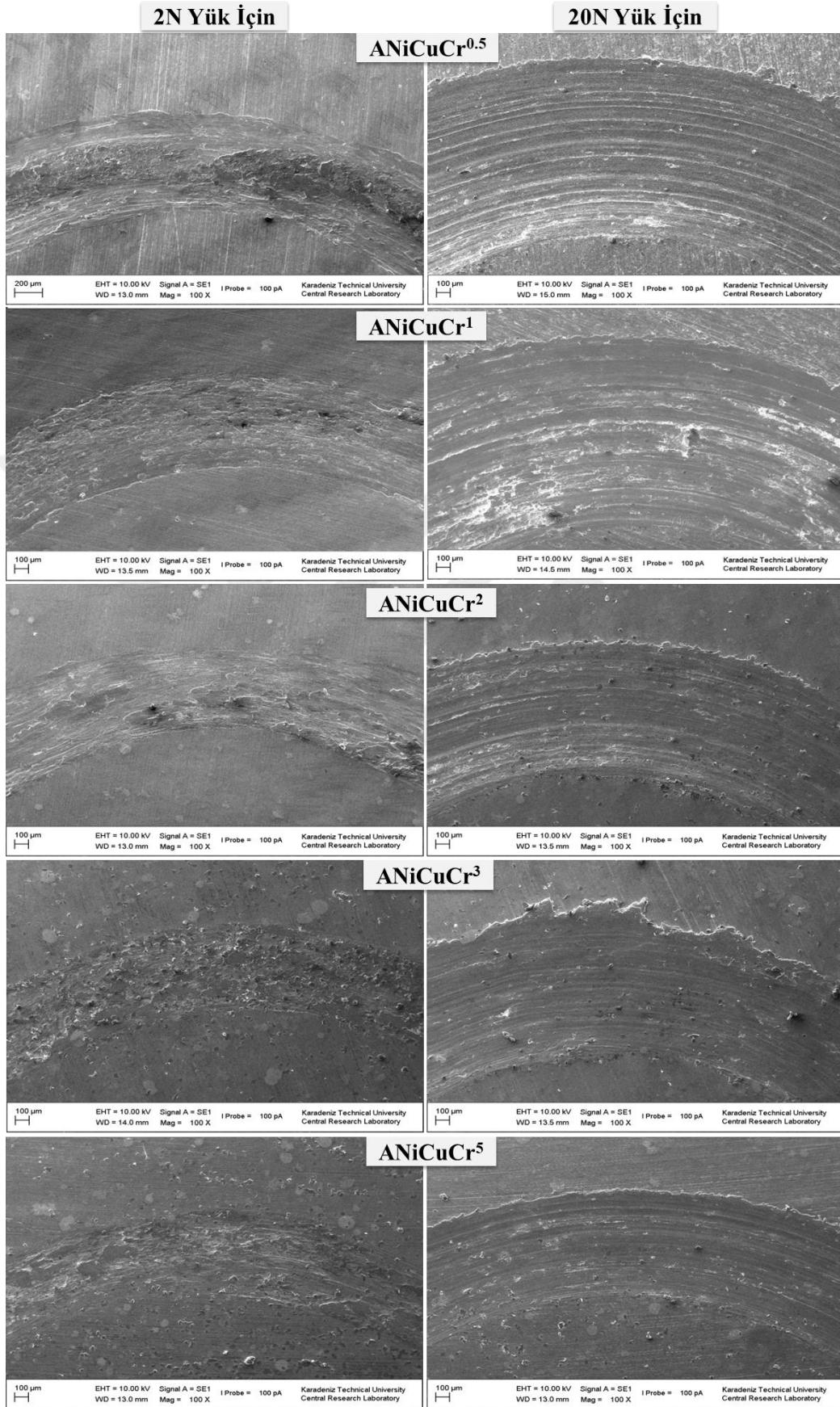
Şekil 77. ANiCu kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 78. ACuCr kompozitlerinin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 79. ANiCr kompozitlerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 80. ANiCuCr kompozitlerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri

3.8. Korozyon Davranışlarının Belirlenmesi

Metal takviyeli metal matrisli kompozitlerde korozyon, potansiyel farktan ötürü galvanik korozyon şeklinde olur. Metal takviyeli kompozit iletken ortamda elektrik akımına tabi tutulunca oluşan potansiyel fark, elektron akışına neden olur ve düşük potansiyele sahip metal korozyona uğrar. Yüksek potansiyele sahip metal ise katot gibi davranarak, anot haline gelen daha negatif metal tarafından korozyondan korunabilir.

Alüminyum ve alaşımlarının korozyon direnci, yüzeylerinde oluşan doğal koruyucu oksit tabakasına (pasif film) bağlanabilir. Bu koruyucu oksit film, alt katmanda oyuklaşma ve çatlak korozyonuna izin verecek şekilde lokalize olarak bozulabilir. Bir takviye fazının eklenmesi, filmde daha fazla süreksizliklere yol açarak, korozyonun başlatılabileceği bölgelerin sayısını artırabilir ve kompoziti şiddetli korozyon saldırılarına maruz bırakabilir (Bobić vd., 2010).

Tablo 7. Tek takviyeli kompozitlerin polarizasyon eğrilerine dayalı tafel sonuçları

Numune	E_{kor} (V)	i_{kor} ($\mu A/cm^2$)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
A	-1,160	129	2,4
ANi ^{0.5}	-1,080	69,4	1,34
ANi ¹	-1,240	109	2,11
ANi ²	-1,210	84,4	1,62
ANi ³	-1,190	82,7	1,58
ANi ⁵	-1,180	79,8	1,55
ACu ^{0.5}	-1,150	63,80	1,3
ACu ¹	-1,130	82,80	1,5
ACu ²	-1,110	86	1,6
ACu ³	-1,180	91,50	1,7
ACu ⁵	-1,130	131	2,4
ACr ^{0.5}	-1,200	72,50	1,35
ACr ¹	-1,230	78,30	1,52
ACr ²	-1,230	79,90	1,51
ACr ³	-1,270	86,30	1,62
ACr ⁵	-1,220	108	2,08

Bu kısımda numunelere korozyon deneyi yapılmış, korozyon akım yoğunluğu (i_{kor}), korozyon potansiyelleri (E_{kor}) ve korozyon hızı tafel ekstrapolasyon yöntemi kullanılarak bulunmuş ve Tablo 7 ve 8'de listelenmiştir. Tabloya göre her grup kompozit için en yüksek korozyon direncine sahip numune %0.5 takviye oranına sahip kompozitlerdir. Tablo genelinde takviyeli kompozitler alaşıma göre korozyona daha dayanıklı gibi görünmektedir. Bu durum kompozit yapısında katot gibi davranacak intermetalik

bileşiklerin oluşumuna bağlanabilir. Her bir takviyenin matris içerisinde oluşturduğu Al_2Cu , Al_3Ni_2 , Al_7Cr vb. intermetalik bileşiklerin yapı içerisinde varlıkları XRD ve EDS analizleri ile belirlenmiştir.

Al_2Cu ve Al_2CuMg gibi fazların, AA2024 matrisinde katot gibi davrandıkları ve bazı çalışmalarda galvanik çift oluşumuna neden oldukları için Al alaşımlarında çukurlaşma korozyonuna neden olabilecekleri bildirilmiştir (Vieira vd., 2011; De Salazar vd., 1998). Ayrıca Al matrisine takviye edilen Ni ile arasında oluşan Al_3Ni_2 ve Al_3Ni intermetalik bileşikler katot görevi görerek korozyon hızını artırır. Takviye oranının artması ile intermetalik bileşik sayısındaki artışa bağlı olarak korozyon ve bozunma hızı artmaktadır (Liu vd., 2021; Arthanari vd., 2018). Buna göre takviyesiz A numunesine uygulanan sıcak presin etkisiyle oluşan Al_2Cu ve Al_2CuMg çökelme fazları korozyon hızını artırmıştır. Böylece en yüksek i_{corr} değeri ve korozyon hızı bu numunede ölçülmüştür (Tablo 7). Ağırlıkça % 0,5 Ni takviye ile matris arasında oluşan intermetalik fazlar (Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3NiCu) için matristen alınan Al ve Cu, çökelti fazların (Al_2Cu , Al_2CuMg) hacim fraksiyonunu düşürmüş böylece korozyon üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmıştır (Liu vd., 2021). Ağırlıkça %1 Ni ilavesi ile Al_3Ni_2 ve Al_3Ni fazlarının korozyon üzerindeki hızlandırıcı etkisi baskın çıkmış, bu da hem korozyon potansiyelinin hem de hızın artmasıyla sonuçlanmıştır. Ağırlıkça %2 Ni ilavesinden sonra ise çökelti fazlarının indirgenmesinin korozyon üzerindeki azaltıcı etkisi yine baskın olmuştur ve korozyon hızı azalmaya başlamıştır.

Tablo 7 ve 8’de Cu takviye edilerek hazırlanan kompozitler de oluşan intermetalik bileşiklerin ve çökeltilerin Al alaşımının korozyon direncini düşürdüğünü gösteren veriler vardır. Korozyon süreci, Cu’nun mikro yapıdaki dağılımından etkilenir. Çukurlaşma korozyonunun başlaması genellikle Al matrisinin yüzeyindeki Cu bakımından zengin çökeltilerin yakınında meydana gelir, çünkü bu parçacıkların matris ile potansiyel farkı vardır. Aralarındaki galvanik reaksiyon lokalize oyuklaşma korozyonunu hızlandırır (Wang vd., 2023).

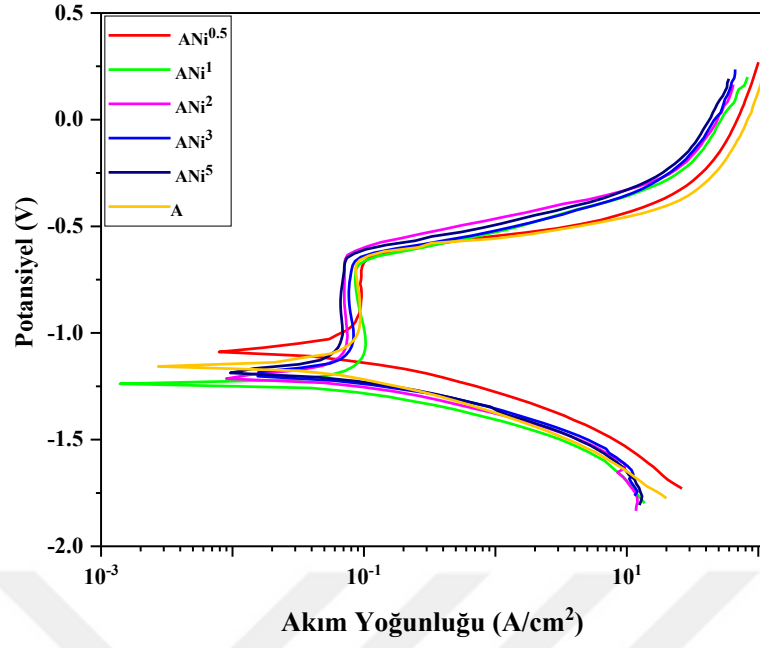
Cr’nin elektrokimyasal reaksiyon hızı yüksek olduğu için korozyon ortamında malzemeler üzerinde olumsuz ve korozyonu destekleyen özel bir etkiye sahiptir. Çünkü, NaCl, Cr’nin korozyonunu önemli ölçüde hızlandırabilir (Li vd., 2012). Elektrolit çözelti ile Cr arasında CrCl_3 gibi uçucu Cr klorürler oluşabilir ve alaşımın içine nüfuz edebilir (Shu vd., 2000; Yu vd., 2023). Klorürlerin döngüsel olarak oluşmaya devam etmesi

korozyonu daha da hızlandırır (Wang & Shu, 2003). Cr miktarı artışı da bu reaksiyonları destekleyeceği için takviye artışı ile korozyon hızı ve oranı artmıştır (Tablo 7).

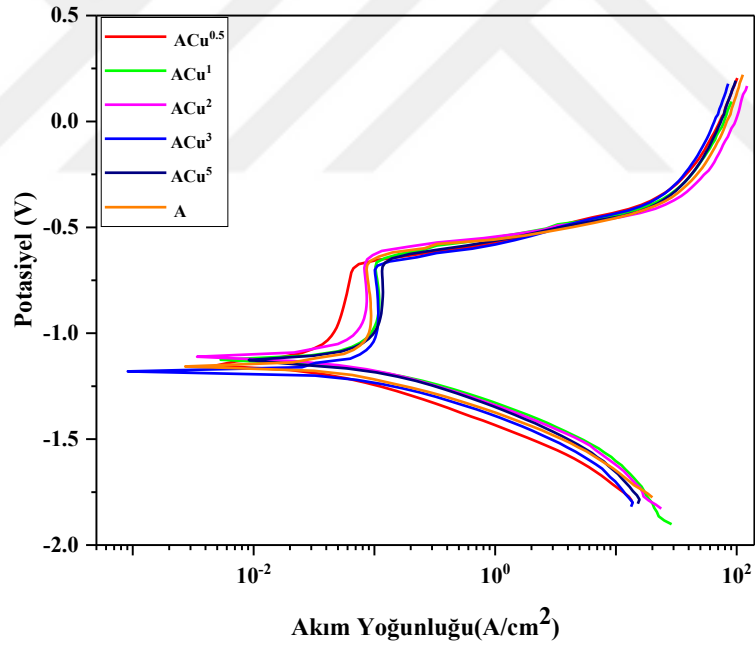
Tablo 8. İki ve üç takviyeli kompozitlerin polarizasyon eğrilerine dayalı tafel sonuçları

Numune	E_{kor} (V)	i_{kor} ($\mu A/cm^2$)	Korozyon Hızı (mm/yıl)
ANiCu ^{0.5}	-1,230	81,90	1,575
ANiCu ¹	-1,260	93,30	1,796
ANiCu ²	-1,230	93,90	1,799
ANiCu ³	-1,170	94,20	1,785
ANiCu ⁵	-1,130	99,70	1,895
ACuCr ^{0.5}	-1,230	46,30	0,87
ACuCr ¹	-1,230	72,60	1,39
ACuCr ²	-1,260	46,30	0,88
ACuCr ³	-1,240	26,20	0,49
ACuCr ⁵	-1,220	68,50	1,32
ANiCr ^{0.5}	-1,310	49,40	0,93
ANiCr ¹	-1,300	55,60	1,06
ANiCr ²	-1,280	51,50	0,98
ANiCr ³	-1,170	70,40	1,34
ANiCr ⁵	-1,220	79,90	1,51
ANiCuCr ^{0.5}	-1,210	4,54	0,08
ANiCuCr ¹	-1,240	95	1,82
ANiCuCr ²	-1,240	77,30	1,48
ANiCuCr ³	-1,190	4,82	0,09
ANiCuCr ⁵	-1,170	68,70	1,33

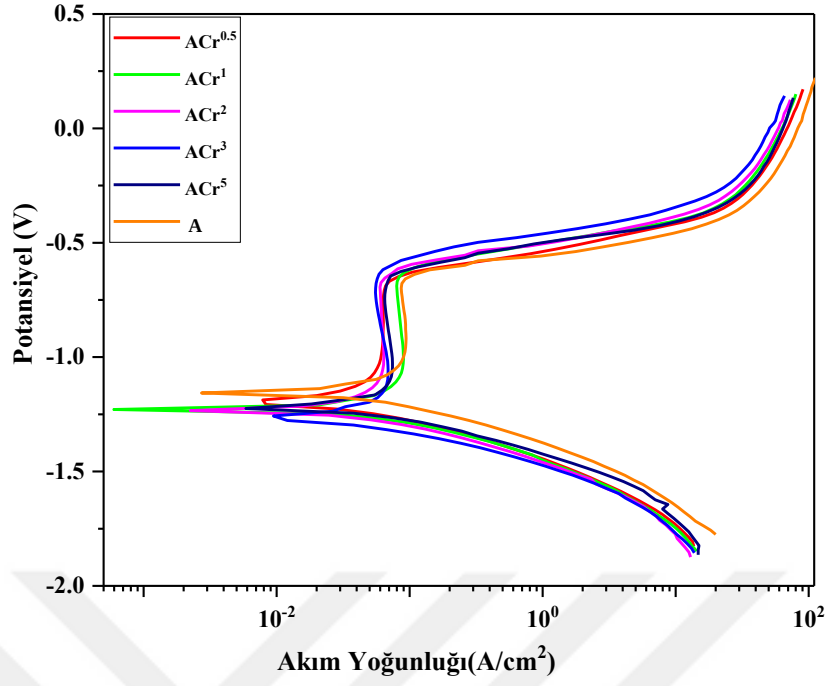
Tafel grafiği, her malzeme için korozyon potansiyeli (E_{corr}) ve korozyon akımı yoğunluğu (i_{corr}) arasındaki ilişkiyi, katodik ve anodik rejimleri içererek gösterir. Katodik polarizasyon eğrileri, numunelerin katodik hidrojen çıkışını gösterirken, anodik polarizasyon eğrileri, numunelerin anodik çözünmesinin bir sonucudur. E_{corr} ve i_{corr} değerlerinin doğru bir şekilde değerlendirilmesi, her bir tafel eğrisi için çok önemlidir. Daha iyi korozyon özelliklerinin göstergesi daha düşük i_{corr} ve daha yüksek E_{corr} değerleridir. Yapılan çalışmada kompozit numunelere uygulanan korozyon testi sonucunda elde edilen polarizasyon eğrileri tek takviyeli kompozitler için Şekil 81-83'te, iki takviyeli kompozitler için Şekil 84-86'de ve üç takviyeli kompozitler için Şekil 87'de verilmiştir. Şekilden görüleceği üzere tüm numunelerin anodik ve katodik polarizasyon eğrileri benzer olup hepsinde pasifleşme bölgesi mevcuttur.



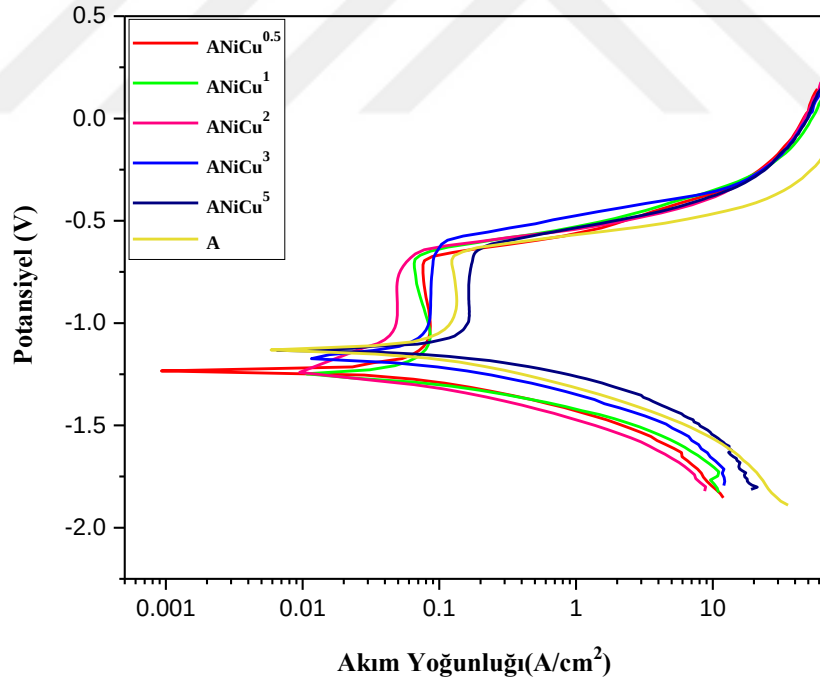
Şekil 81. ANi kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



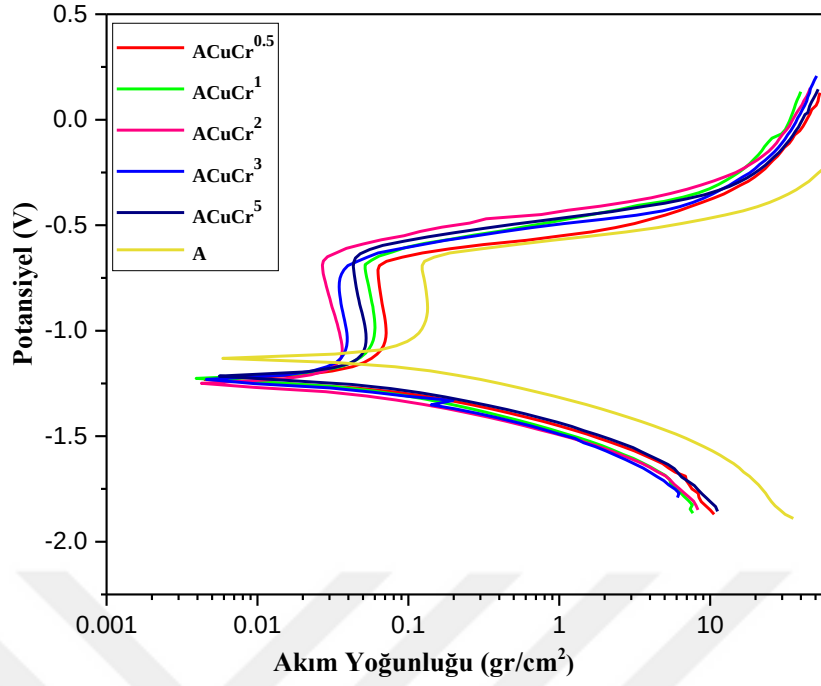
Şekil 82. ACu kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



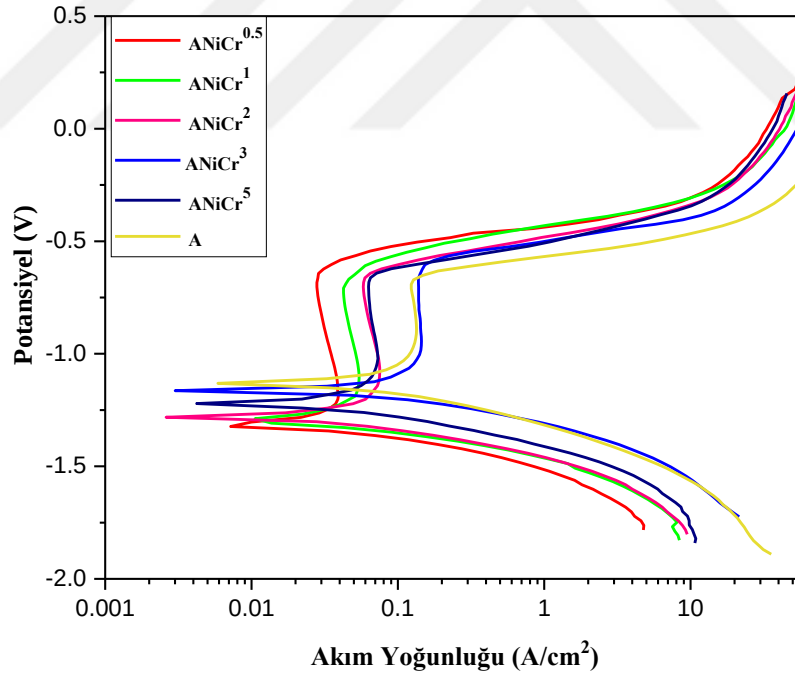
Şekil 83. ACr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



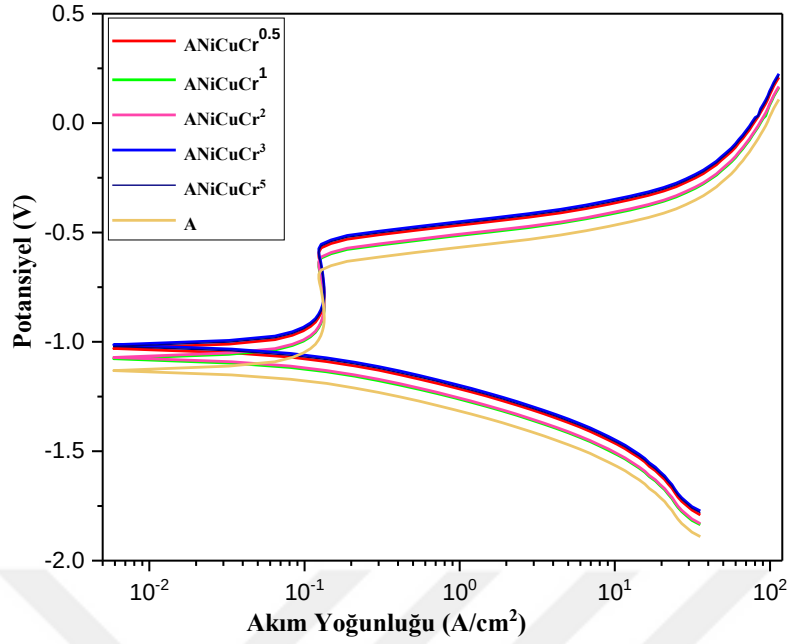
Şekil 84. ANiCu kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri



Şekil 85. ACuCr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

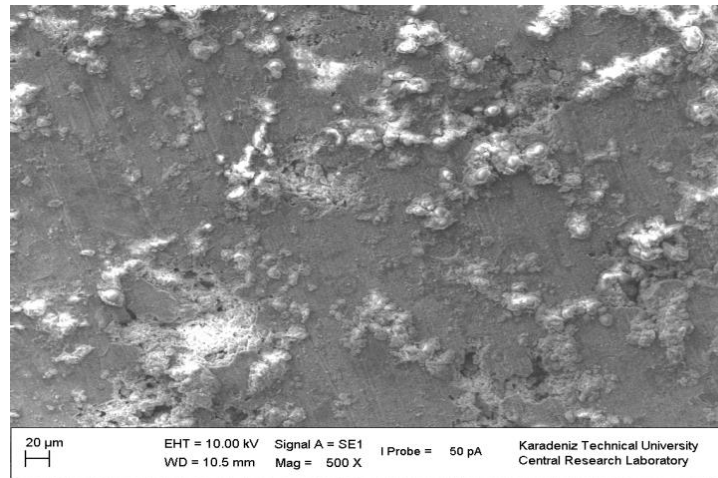


Şekil 86. ANiCr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

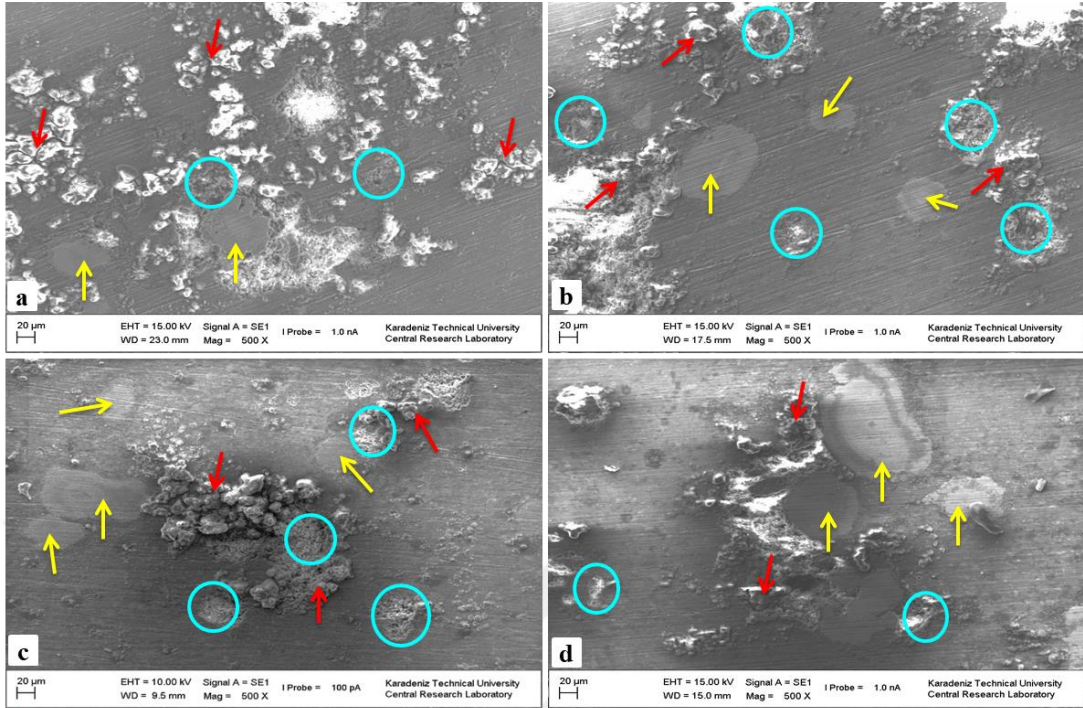


Şekil 87. ANiCr kompozitlerine ait potansiyodinamik polarizasyon eğrileri

Elektrokimyasal korozyon testlerinden sonra takviyesiz, tek takviyeli, iki takviyeli ve üç takviyeli kompozitlerin korozyon yüzeyi görüntüleri, sırası ile Şekil 88-95’de verilmiştir. Tüm numunelerde korozyon gerçekleşmiştir. Bunun nedeni; matris ve takviye arasındaki elektrokimyasal farklardır. Bu farklar, bir bölgedeki metalin daha aktif hale gelmesi ve orada çukurların oluşmasına neden olmuştur. Ni takviyeli kompozitin korozyon yüzeyi görüntülerinde korozyon daha çok matris tarafında gerçekleşmiş, intermetalik bileşik bölgesinde korozyon görülmemiştir. Cr takviyeli kompozitler de ise hem matris hem de intermetalik bileşik bölgelerinde korozyon gerçekleşmiştir.

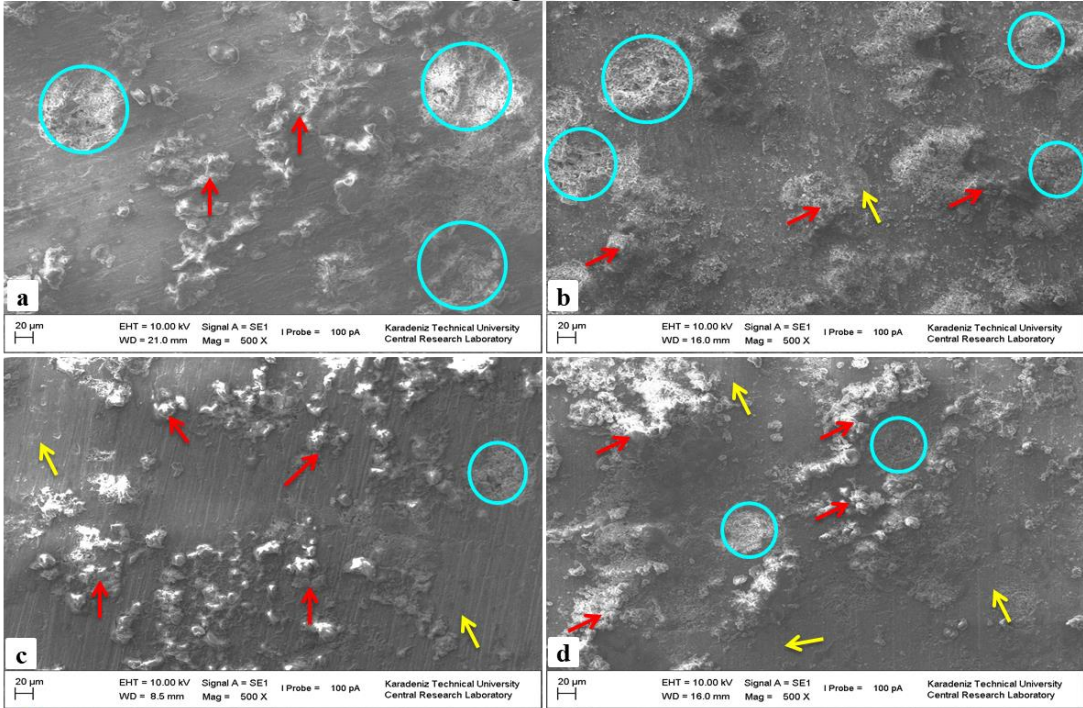


Şekil 88. Takviyesiz alaşımın korozyon yüzeyi SEM görüntüleri



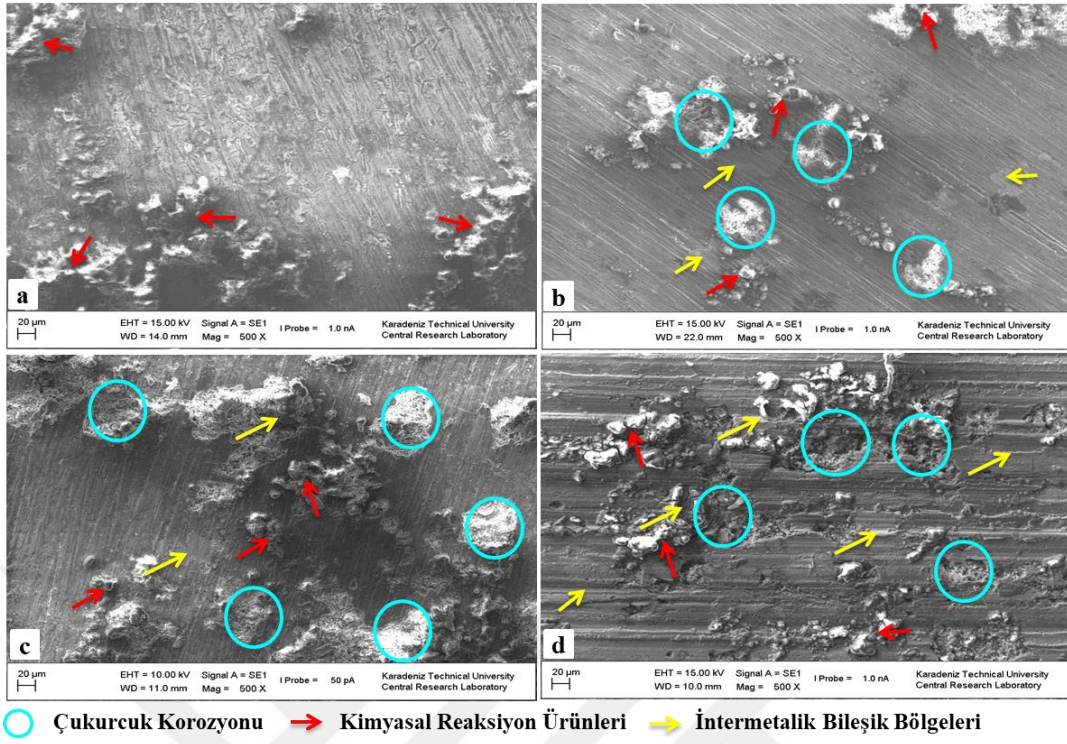
○ Çukurcuk Korozyonu → Kimyasal Reaksiyon Ürünleri → İntermetalik Bileşik Bölgeleri

Şekil 89. a) ANi¹, b) ANi², c) ANi³, d) ANi⁵ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri

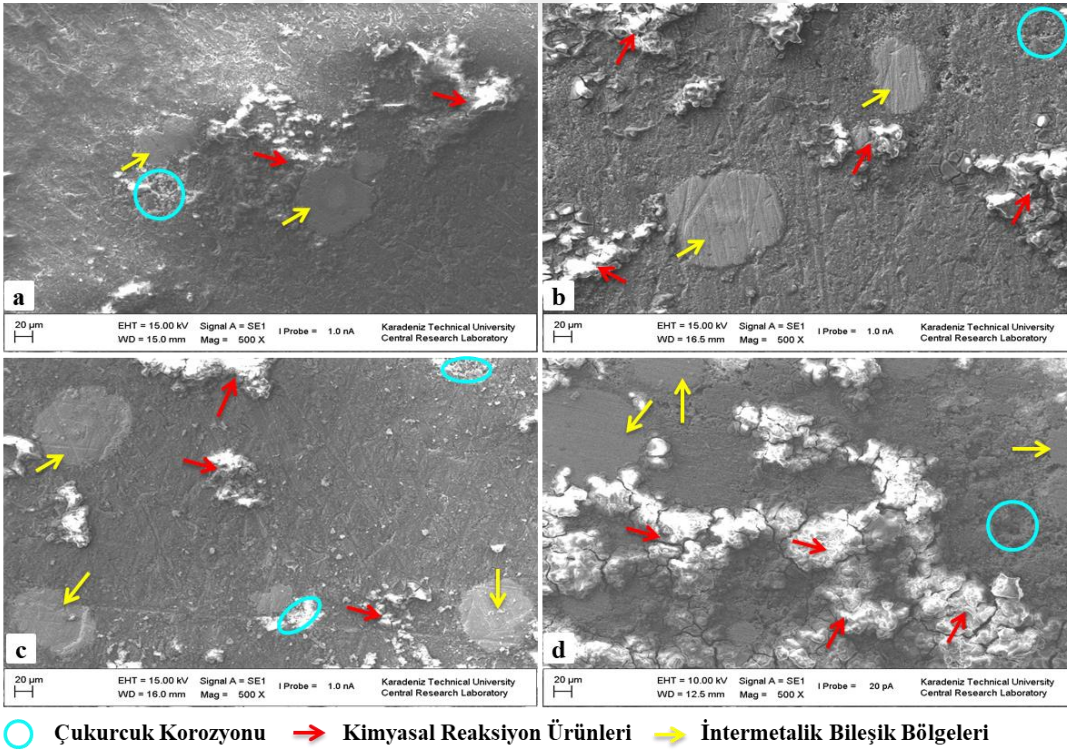


○ Çukurcuk Korozyonu → Kimyasal Reaksiyon Ürünleri → İntermetalik Bileşik Bölgeleri

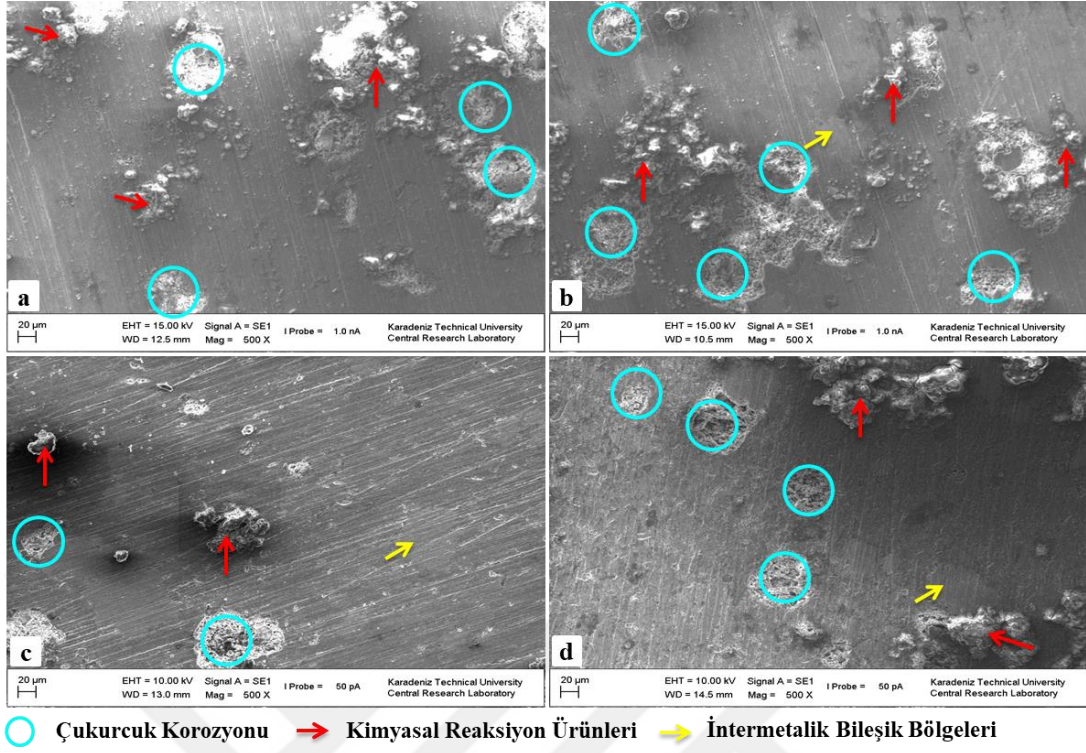
Şekil 90. a) ACu¹, b) ACu², c) ACu³, d) ACu⁵ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri



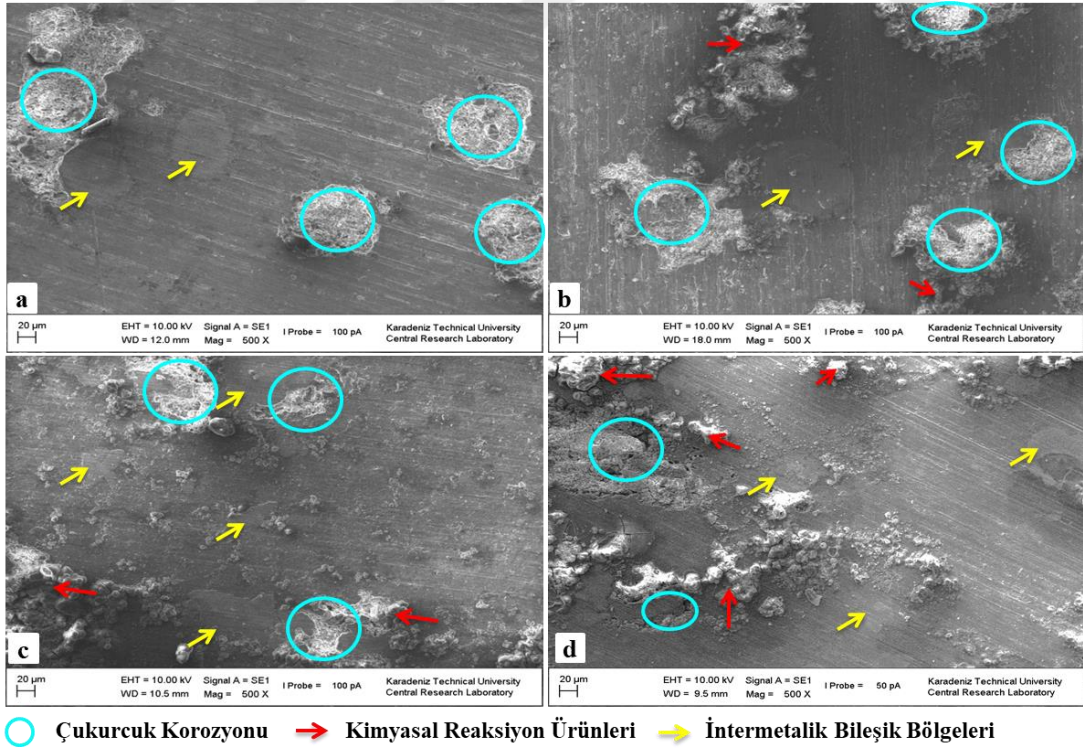
Şekil 91. a) ACr¹, b) ACr², c) ACr³, d) ACr⁵ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri



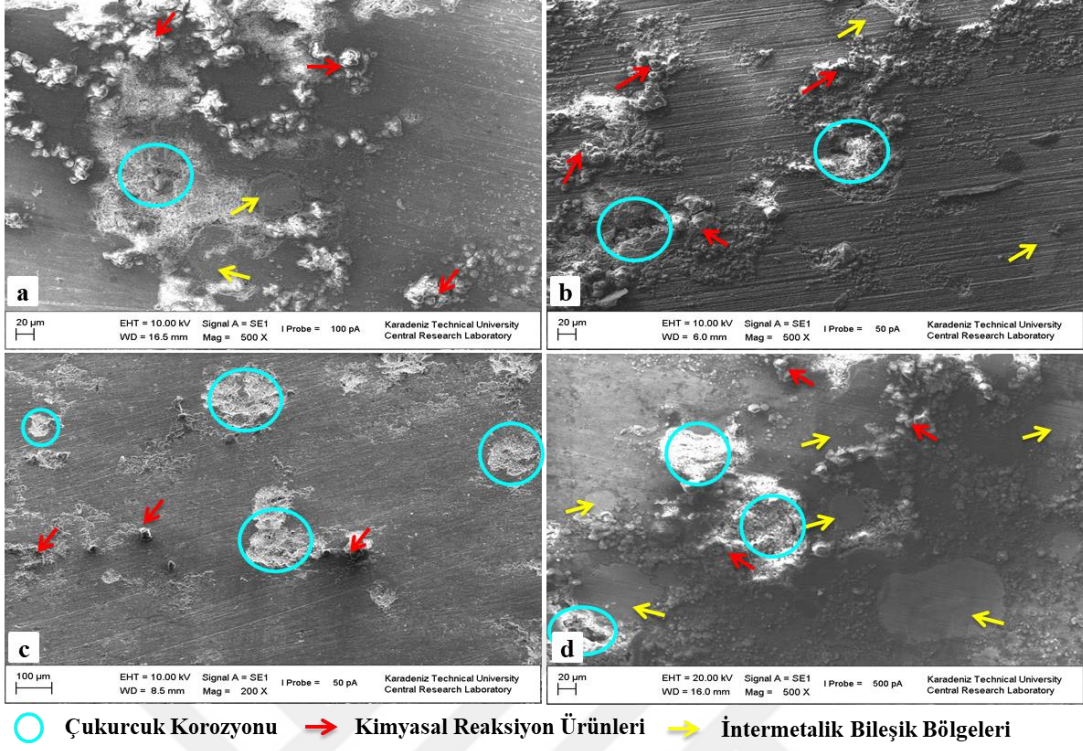
Şekil 92. a) ANiCu^{0.5}, b) ANiCu², c) ANiCu³, d) ANiCu⁵ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 93. a) $ACuCr^{0.5}$, b) $ACuCr^1$, c) $ACuCr^3$, d) $ACuCr^5$ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 94. a) $ANiCr^{0.5}$, b) $ANiCr^2$, c) $ANiCr^3$, d) $ANiCr^5$ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri



Şekil 95. a) ANiCuCr¹, b) ANiCuCr², c) ANiCuCr³, d) ANiCuCr⁵ kompozitlerinin korozyon yüzeyi SEM görüntüleri

4. SONUÇLAR

Ni, Cu, Cr takviyelerinin matrise ağırlıkça farklı oranlarda katılması ile takviye türü ve takviye miktarının, ürünlerin içyapısına, mekanik, fiziksel, korozyon ve aşınma özelliklerine etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir.

1. Kompozit toz karışımlarına uygulanan 8 saatlik öğütme sonucunda ortalama çapı 21 µm olan tozlar irili ufaklı bir görünüm sergilemiştir.
2. Üretilen kompozitlerin yoğunluğu, matrise göre daha yüksek yoğunluğa sahip takviyelerin katılmasına bağlı olarak, takviye oranı artışı ile artmıştır.
3. Daha sert partikül takviyesi ve öğütme işlemi paketlemede zorluklara neden olmuştur. Bunun sonucunda takviye oranı artışı ile her grup kompozitte gözeneklilik artmıştır.
4. Metal matris ve metal takviye arasındaki uyum iyi bir ara yüzeye neden olmuştur. Böylece her grup kompozitte, yapıyı güçlendirecek intermetalik bileşikler oluşmuştur.
5. Tozlara yapılan XRD analizlerinde takviye ve matrise ait karakteristik pikler oluşurken, sıcak presleme ile üretilen kompozitlerin analizinde arafaz bileşiklerin piklerine rastlanmıştır.
6. İntermetalik bileşiklerin sayıları takviye oranı artışı ile artmış, öğütmenin etkisiyle homojen olarak dağılmışlardır. Ni, Cu ve Cr takviye edilen kompozitler de sırasıyla (Al_3Ni , Al_3Ni_2 , Al_3NiCu), Al_2Cu , (Al_7Cr , $Al_{11}Cr_2$) arafaz bileşikleri oluşmuştur.
7. Ni, Cu, Cr tozlarının matrise tekli, ikili ya da üçlü katılması matris alaşımının (AA2024) sertliğini (55 BSD) artırmıştır. Takviyeli kompozitler, takviyesiz 8 saat öğütülüp sıcak preslenmiş alaşıma (A kodlu numune = 117.4 BSD) göre de genel olarak yüksek sertlik değerleri sergilemiştir. Ni takviyeli kompozitler de en yüksek sertlik %0.5 takviye oranında 133.17 BSD, Cu takviyeli kompozitler de %5 takviye oranında 131,73 BSD, Cr takviyeli kompozitler de %0.5 oranında 131.51 BSD, Ni-Cu takviyeli kompozitler de %2 takviye oranında 140.5 BSD, Cu-Cr, Ni-Cr, Ni-Cu-Cr takviyeli kompozitler de %5 takviye oranında sırasıyla 139.6, 134.9 ve 137.5 BSD olarak ölçülmüştür.
8. Matrise metal takviye edilmesi çekme dayanımı üzerinde de olumlu etkiler oluşturmıştır. Kompozitlerin çekme dayanımı A numunesine göre yaklaşık %17, AA2024 alaşımına göre yaklaşık %65 artış göstermiştir. En yüksek çekme dayanımı %1 Ni-Cr takviyeli kompozitte 331 MPa olarak ölçülmüştür.

9. Ball-on-disk aşınma deneyi sonucunda, artan aşınma yükü ile kütle kayıpları artmıştır. A kodlu numuneye göre aşınma direnci artmıştır. Kütle kaybı ve aşınma oranı değerleri açısından tekli, ikili ve üçlü kompozitler yakın değerler sergilemiştir. Ancak Ni takviyeli kompozitler diğerlerine nazaran daha yüksek aşınma direnci, Cu takviye edilen kompozitler ise düşük aşınma direnci göstermişlerdir.

10. Aşınma yüzeyi incelendiği zaman abrazif ve adhezif aşınma mekanizmalarının baskın olduğu görülmüştür.

11. Tüm numunelere uygulanan korozyon testi sonucunda elde edilen polarizasyon eğrilerinde numunelerin anodik ve katodik polarizasyon eğrileri benzer olup hepsinde pasifleşme bölgesi mevcuttur.

12. Takviyeli kompozitler A kodlu numuneye göre daha yüksek korozyon direnci sergilemişlerdir. Cu ve Cr takviyeli kompozitler de takviye oranı artışı ile korozyon hızı artmıştır. En yüksek korozyon direnci ANiCuCr^{0.5} kompozitin de 0.08 mm/yıl olarak ölçülmüştür.

5. ÖNERİLER

1. Kompozit ve hibrit kompozit tozların öğütme süresi artırılarak nano boyutta tozlar elde edilip üretilen kompozitlerin özellikleri incelenebilir.
2. Farklı sinterleme ve soğutma koşullarında metal takviyeli kompozit ve hibrit kompozitlerin davranışları incelenebilir.
3. Farklı aşınma düzeneklerinde aşınma davranışları incelenebilir.
4. Farklı elektrolit sıvılarda kompozit ve hibrit kompozitlerin korozyon davranışları incelenebilir.



6. KAYNAKLAR

- Agarwal, B. D., Broutman, L. J., & Chandrashekhara, K. (2006). *Analysis and Performance of Fiber Composites*. New Delhi: Authorized Reprint by Wiley India Pvt. Ltd.
- Akkaş M. (2013). *Östenitik Paslanmaz Çeliğin Bor Katkılı Ni₃Al İle Kaplanabilirliğinin Araştırılması*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Alaneme, K. K., Ajibuwa, O. A., Kolawole, I. E., & Fajemisin, A. V. (2017). Mechanical, Corrosion and Wear Behaviour of Steel Chips and Graphite Reinforced Zn-27Al Alloy Based Composites. *Acta Metallurgica Slovaca*, 23(2), 171–181. <https://doi.org/10.12776/ams.v23i2.865>
- Alaneme, K. K., Bodunrin, M. O., & Awe, A. A. (2018). Microstructure, Mechanical and Fracture Properties of Groundnut Shell Ash and Silicon Carbide Dispersion Strengthened Aluminium Matrix Composites. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 30(1), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.01.001>
- Alaneme, K. K., Fajemisin, A. V., & Maledi, N. B. (2019). Development of Aluminium-Based Composites Reinforced with Steel and Graphite Particles: Structural, Mechanical and Wear Characterization. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 670–682.
- Alaneme, K. K., Ajibuwa, O. A., Kolawole, I. E., & Fajemisin, A. V. (2017). Mechanical, Corrosion and Wear Behaviour Of Steel Chips and Graphite Reinforced Zn-27Al Alloy Based Composites. *Acta Metallurgica Slovaca*, 23(2), 171–181. <https://doi.org/10.12776/ams.v23i2.865>
- Aravind, M., Yu, P., Yau, M. Y., & Ng, D. H. L. (2004). Formation Of Al₂Cu And AlCu Intermetallics In Al(Cu) Alloy Matrix Composites By Reaction Sintering. *Materials Science and Engineering A*, 380(1), 384–393. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.04.013>
- Arpat, E. (2011). *Bakırın Katodik Ark Alüminyum Plazma İşlemi İle Al-Cu Bileşiklerinin Üretimi*. İ.T.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Arthanari, S., Jang, J. C., & Shin, K. S. (2018). Corrosion Studies of High Pressure Die-Cast Al-Si-Ni and Al-Si-Ni-Cu Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 749, 146–154. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.246>
- Babayev, Y. (2007). *Bir Kompresör Gövdesi İmalatının Toz Metalurjisi Ve Difüzyon Kaynağı Yöntemleri Uygulanarak Optimizasyonu*. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora tezi, İzmir.
- Bains, P. S., Sidhu, S. S., & Payal, H. S. (2016). Fabrication and Machining of Metal

- Matrix Composites: A Review. *Materials and Manufacturing Processes*, 31(5), 553–573. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1025976>
- Bao, S., Tang, K., Kvithyld, A., Tangstad, M., & Engh, T. A. (2011). Wettability of Aluminum on Alumina. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 42(6), 1358–1366. <https://doi.org/10.1007/s11663-011-9544-z>
- Bansal, S.A., Khanna, V., & Gupta, P. (2023). *Metal Matrix Composites; Properties and Applications* (Vol. 2, Issue June). <https://doi.org/10.1201/9781003194910>
- Bardal, E. (2007). Corrosion and Protection. *Springer Science & Business Media*.
- Bekheet, N. E., Galderab, R. M., Salah, M. F., & Abd El-Azim, A. N. (2002). The Effects of Aging on The Hardness and Fatigue Behavior of 2024 Al Alloy/SiC Composites. *Materials and Design*, 23(2), 153–159. [https://doi.org/10.1016/S0261-3069\(01\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0261-3069(01)00072-3)
- Biçer, A. (2015). *Toz Metalurjisi İle Üretilen Ni₃Al Partikülleriyle Pekiştirilmiş Metal Matrisli Kompozitlerin Sürtünme ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir.
- Bobić, B., Mitrović, S., Babić, M., & Bobić, I. (2010). Corrosion of Metal-Matrix Composites with Aluminium Alloy Substrate. *Tribology in Industry*, 32(1), 3–11.
- Carreño-Gallardo, C., Estrada-Guel, I., López-Meléndez, C., & Martínez-Sánchez, R. (2014). Dispersion of Silicon Carbide Nanoparticles in a AA2024 Aluminum Alloy by a High-Energy Ball Mill. *Journal of Alloys and Compounds*, 586(SUPPL. 1), 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.03.232>
- Carreño-Gallardo, C., Estrada-Guel, I., Romero-Romo, M., Cruz-García, R., López-Meléndez, C., & Martínez-Sánchez, R. (2012). Characterization of Al₂O₃NP-Al₂₀₂₄ and Ag_CNP-Al₂₀₂₄ Composites Prepared by Mechanical Processing in a High Energy Ball Mill. *Journal of Alloys and Compounds*, 536(SUPPL.1), 26–30. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2011.12.010>
- Cebeci, H. A. (2008). *Mekanik Alağımlama Yöntemi ile Üretilen SiC Takviyeli Alüminyum Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilim Uzmanlığı Tezi, Karabük.
- Chakrapani, P., & Suryakumari, T. S. A. (2020). Mechanical Properties of Aluminium Metal Matrix Composites-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 45, 5960–5964. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.247>
- Chawla, N., Andres, C., Jones, J. W., & Allison, J. E. (1998). Effect of SiC Volume Fraction and Particle Size on The Fatigue Resistance of A2080 Al/SiC_p Composite. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 29(11), 2843–2854. <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0325-5>

- Chen, K. M., Tsai, D. A., Liao, H. C., Chen, I. G., & Hwang, W. S. (2016). Investigation of Al-Cr Alloy Targets Sintered by Various Powder Metallurgy Methods and Their Particle Generation Behaviors In Sputtering Process. *Journal of Alloys and Compounds*, 663, 52–59. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2015.11.231>
- De Salazar, J. M. G., Ureña, A., Manzanedo, S., & Barrena, M. I. (1998). Corrosion Behaviour of AA6061 and AA7005 Reinforced with Al₂O₃ Particles in Aerated 3.5% Chloride Solutions: Potentiodynamic Measurements and Microstructure Evaluation. *Corrosion Science*, 41(3), 529–545. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(98\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00135-8)
- Delibalta, C. G. (2016). *Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Al Esaslı İntermetalik Fazların Mekanokimyasal Sentezlenmesine Yağlayıcı Türünün Etkisi*. Gazi Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Dikici, B. (2008). *Al/TiC Metal Matrisli Nano Kompozitlerin Sıcak Pres Yöntemiyle Üretilmesi Ve Karakterizasyonu*. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Erzurum.
- Diler, E. A. (2012). *Toz Metalurjisiyle Üretilen Al-SiC_p Metal Matrisli Kompozitlerde Faktör Etkileşimlerinin Partikül Dağılımı, Eğme Dayanımı ve Aşınma Özelliklerine Etkileri*. Ege Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir.
- Dinler, İ. (2018). *Wc Takviye Edilmiş Kobalt Esaslı Süperalaşım Matrisli Kompozit Malzemelerin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu*. Bingöl Üniversitesi, FEN Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bingöl.
- Dixit, M., Mishra, R. S., & Sankaran, K. K. (2008). Structure-Property Correlations in Al 7050 and Al 7055 High-Strength Aluminum Alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 478(1–2), 163–172. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.116>
- Draissia, M., & Debili, M. Y. (2005). Study of Solid-Solution Hardening in Binary Aluminium-Based Alloys. *Central European Journal of Physics*, 3(3), 395–408. <https://doi.org/10.2478/bf02475646>
- Ekerer, F.A., (2007). *Aluminwa-SiC Parçacık Destekli T/M Al-Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- El-Labban, H. F., Abdelaziz, M., & Mahmoud, E. R. I. (2016). Preparation and Characterization of Squeeze Cast-Al-Si Piston Alloy Reinforced by Ni And Nano-Al₂O₃ Particles. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 28(2), 230–239. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2014.04.002>
- Emara, M. M. (2017). Enhanced Tensile, Hardness and Wear Behaviors of Pure Aluminum Matrix Reinforced with Steel Chips Via Powder Metallurgy Technique. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 191(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/191/1/012041>
- Erdemir, F., Canakci, A., Varol, T., & Ozkaya, S. (2015). Corrosion and Wear Behavior of

- Functionally Graded Al2024/SiC Composites Produced by Hot Pressing and Consolidation. *Journal of Alloys and Compounds*, 644, 589–596. <https://doi.org/10.1016/j.jall-com.2015.04.216>
- Ezuber, H., El-Houd, A., & El-Shawesh, F. (2008). A Study on The Corrosion Behavior of Aluminum Alloys in Seawater. *Materials and Design*, 29(4), 801–805. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2007.01.021>
- Fang, L., Zhang, X., Ren, L., Hu, H., Nie, X., & Tjong, J. (2018). Effect of Ni Addition On Tensile Properties Of Squeeze Cast Al Alloy A380. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 4(2), 200–209
- Farajollahi, R., Jamshidi Aval, H., & Jamaati, R. (2021). Effects of Ni on The Microstructure, Mechanical and Tribological Properties of AA2024-Al₃NiCu Composite Fabricated By Stir Casting Process. *Journal of Alloys and Compounds*, 887, 161433. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161433>
- Farajollahi, R., Jamshidi Aval, H., & Jamaati, R. (2022). Effect of Friction Surfacing Parameters on The Microstructural, Mechanical Properties, and Wear Characteristic of Al-Cu-Mg Alloy Coating Reinforced By Nickel Aluminide. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(2). <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00383-y>
- Fuentes, J. J., Rodriguez, J. A., & Herrera, E. J. (2010). Processing of mechanically alloyed aluminum powder: A metallographic study. *Materials Characterization*, 61(4), 386–395. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.01.002>
- Gecü, R. (2019). *Bimetal Kompozitlerin Metal Talaşlarıyla Üretimi ve Karakterizasyonu*. Y.T.Ü., Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Gültekin, G. G., Çanakçı, A., & Canpolat, Ö. (2023). Effect of Milling Time and Process Control Agent on Microstructure and Mechanical Properties of AA2024-2 wt.% Cu Metal–Metal Composites Produced by Mechanical Alloying. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 12(3), 444–454. <https://doi.org/10.1007/s13632-023-00962-2>
- Gençer, K. (2020). *Alüminyum Titanyum Bimetal Kompozit Üretiminde En Uygun Şartların Belirlenmesi*. Y.T.Ü., Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans Tezi, İstanbul.
- Gopalakrishna, H. D., Narasimha Murthy, H. N., Krishna, M., Vinod, M. S., & Suresh, A. V. (2010). Cold Expansion Of Holes And Resulting Fatigue Life Enhancement And Residual Stresses In Al 2024 T3 Alloy - An experimental study. *Engineering Failure Analysis*, 17(2), 361–368. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.08.002>
- Gopi Krishna, M., Praveen Kumar, K., Naga Swapna, M., Babu Rao, J., & Bhargava, N. R. M. R. (2017). Metal-Metal Composites-An Innovative Way for Multiple Strengthening. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 8085–8095. <https://doi.org/10.1016/j.mat-pr.2017.07.148>
- Goussous, S., Xu, W., & Xia, K. (2010). Developing Aluminum Nanocomposites Via

- Severe Plastic Deformation. *Journal of Physics: Conference Series*, 240. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/240/1/012106>
- Gökçe, A., Fındık, F., & Kurt, A. O. (2017). Alüminyum ve Alaşımlarının Toz Metalurjisi İşlemleri - Powder Metallurgy Processing of Aluminum Alloys. *Engineer&Machinery*, 58(686), 21–47.
- Günen, A., Bölükbaşı, Ö. S., Özgürlük, Y., Özkan, D., Odabaş, O., & Somunkıran, İ. (2023). Effect of Cr Addition on Properties and Tribological Behavior at Elevated Temperature of Boride Layers Grown on Borosintered Powder Metallurgy Alloys. *Metals and Materials International*, 29(3), 748–766. <https://doi.org/10.1007/s12540-022-01251-3>
- Hassan, S. F., & Gupta, M. (2002). Development of a Novel Magnesium-Copper Based Composite with Improved Mechanical Properties. *Materials Research Bulletin*, 37(2), 377–389. [https://doi.org/10.1016/S0025-5408\(01\)00772-3](https://doi.org/10.1016/S0025-5408(01)00772-3)
- Hosseini-gourajoubi, F., Pourabdoli, M., Uner, D., & Raygan, S. (2015). Effect of Process Control Agents on Synthesizing Nano-Structured 2Mg–9Ni–Y Catalyst by Mechanical Milling and Its Catalytic Effect on Desorption Capacity of MgH₂. *Advanced Powder Technology*, 26(2), 448–453. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.11.017>
- Iglesias, P., Jiménez, A. E., Bermúdez, M. D., Rao, B. C., & Chandrasekar, S. (2013). Steel Machining Chips as Reinforcements to Improve Sliding Wear Resistance of Metal Alloys: Study of a Model Zn-Based Alloy System. *Tribology International*, 65(2013), 215–227. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.03.004>
- Ipek, R. (2005). Adhesive Wear Behaviour of B₄C And SiC Reinforced 4147 Al Matrix Composites (Al/B₄C-Al/SiC). *Journal of Materials Processing Technology*, 162–163(SPEC. ISS.), 71–75. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.207>
- Kaçmış, M. V. (2022). AA2024 Matrisli Al₂O₃-SiC Takviyeli Hibrit Nanokompozitlerin T/M Yöntemi İle Üretilmesi Ve Balistik Performansının İncelenmesi. Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech&Composites*, 22(December), 18–30.
- Kayabaşı, İ. (2016). *Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretim Sistemi İmalatı Ve Performansının İncelenmesi*. Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Kaya, E. (2021). *Farklı Alternatif Bağlayıcı Metal Matrisli Kompozitlerin Üretilmesi ve Mekanik Davranışları*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi. Eskişehir.
- Ke, L., Huang, C., Xing, L., & Huang, K. (2010). Al-Ni Intermetallic Composites Produced in Situ By Friction Stir Processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 503(2), 494–499. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.05.040>

- Kennedy, A. R., & Wyatt, S. M. (2000). The Effect of Processing on the Mechanical Properties and Interfacial Strength of Aluminium/TiC MMCs. *Composites Science and Technology*, 60(2), 307–314. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(99\)00125-6](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(99)00125-6)
- Koli, D. K., Agnihotri, G., & Purohit, R. (2015). Advanced Aluminium Matrix Composites: The Critical Need of Automotive and Aerospace Engineering Fields. *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), 3032–3041. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.290>
- Kök, M. (2006). Abrasive Wear of Al₂O₃ Particle Reinforced 2024 Aluminium Alloy Composites Fabricated by Vortex Method. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 37(3), 457–464. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.05.038>
- Köz, F. (2021). *SiC Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Farklı Ortamlardaki Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Kumar, R. V., Keshavamurthy, R., Perugu, C. S., Koppad, P. G., & Alipour, M. (2018). Influence Of Hot Rolling On Microstructure and Mechanical Behaviour of Al6061-Zrb₂ İn-Situ Metal Matrix Composites. *Materials Science and Engineering: A*, 738(October), 344–352. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.104>
- Kumar, A., Kukshal, V., & Kiragi, V. R. (2020). Assessment of Mechanical and Sliding Wear Performance of Ni Particulate Filled 7075 Aluminium Alloy Composite. *Materials Today: Proceedings*, xxxx. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.556>
- Kumar, N., & Das, A. (2019). Ecofriendly Energy Efficient Welding of Aluminium Matrix Composites for Aerospace Applications: A State of Art Review. *Materials Today: Proceedings*, 26, 1666–1675. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.352>
- Lancaster, L., Lung, M. H., Sujana, D., & Ash, A. C. S. (2013). Utilization of Agro-Industrial Waste in Metal Matrix Composites: Towards Sustainability. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 73.
- Lee, W. B., Bang, K. S., & Jung, S. B. (2005). Effects of Intermetallic Compound on the Electrical and Mechanical Properties of Friction Welded Cu/Al Bimetallic Joints During Annealing. *Journal of Alloys and Compounds*, 390(1–2), 212–219. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.07.057>
- Li, L. I. U., Ying, L. I., & Fuhui, W. (2012). Corrosion Behavior of Metals or Alloys with a Solid NaCl Deposit in Wet Oxygen at Medium Temperature. *Technological Sciences*, 55(2), 369–376. <https://doi.org/10.1007/s11431-011-4675-7>
- Liao, X., Li, Y., Dong, P., & Chen, K. (2020). Effect of Minor Cr Additions on Dispersed Phase and Properties of Al-Zn-Mg-Cu-Zr Alloys. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, 8, 27-36. <https://doi.org/10.4236/msce.2020.82004>
- Liu, T., Wang, Q., Sui, Y., Wang, Q., & Ding, W. (2016). An Investigation Into Interface

Formation and Mechanical Properties of Aluminum-Copper Bimetal by Squeeze Casting. *Materials and Design*, 89, 1137–1146. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.072>

Lloyd, D. J. (1994). Particle Reinforced Aluminium and Magnesium Matrix Composites. *International Materials Reviews*, 39(1), 1–23. <https://doi.org/10.1179/imr.1994.39.1.1>

Macke, A., Schultz, B. F., & Rohatgi, P. (2012). Metal Matrix: Composites Offer The Automotive Industry an Opportunity to Reduce Vehicle Weight, Improve Performance. *Advanced Materials and Processes*, 170(3), 19–23.

Malekan, M., Emamy, M., Mossayebi, N., & Lotfpour, M. (2020). Effects of Al₃Ni and Al₇Cr Intermetallics and T6 Heat Treatment on the Microstructure and Tensile Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(5), 3432–3442. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04824-8>

Mani Kumar, V., & Neelima Devi, C. (2014). Evaluation of Mechanical Characteristics for Aluminum-Copper Metal Matrix Composite. *Research Journal of Engineering Sciences*, 3(3), 1–5. www.isca.me

Mavhungu, S. T., Akinlabi, E. T., Onitiri, M. A., & Varachia, F. M. (2017). Aluminum Matrix Composites for Industrial Use: Advances and Trends. *Procedia Manufacturing*, 7, 178–182. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.045>

Medrano-Prieto, H. M., Garay-Reyes, C. G., Estrada-Guel, I., Mendoza-Duarte, J. M., Guía-Tello, J. C., Ochoa-Gamboa, R. A., Ornelas-Gutiérrez, C. E., Rodríguez-Cabriaes, G., Castro-Carmona, J. S., Camacho-Montes, H., Maldonado-Orozco, M. C., & Martínez-Sánchez, R. (2020). Effect of Ni Additions and Hot Deformation on Precipitation Behavior and Hardness in Al–Si–Mg Aged Alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 828. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154429>

Mertdinç, S. (2016). *Sentezlenen Ve Ticari LaB₆ Katkılı Mekanik Alaşımlanmış Al-Ağ.%7Si Toz ve Sinter Hibrit Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu Çalışmaları*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

Mindivan, H. (2018). Silisyum Karbür Takviyeli Alüminyum Matris Kompozitlerin Tribolojik Davranışlarının İncelenmesi. İ.T.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

Miracle, D. B. (2005). Metal Matrix Composites - From Science to Technological Significance. *Composites Science and Technology*, 65(15-16 SPEC. ISS.), 2526–2540. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.05.027>

Mohanavel, V., Ravichandran, M., & Suresh Kumar, S. (2020). Tribological and Mechanical Properties of Zirconium Di-Boride (ZrB₂) Particles Reinforced Aluminium Matrix Composites. *Materials Today: Proceedings*, 21, 862–864.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.603>

- Mondal, D. P., & Das, S. (2006). High Stress Abrasive Wear Behaviour of Aluminium Hard Particle Composites: Effect of Experimental Parameters, Particle Size and Volume Fraction. *Tribology International*, 39(6), 470–478. <https://doi.org/10.1016/j.tribo-int.2005.03.003>
- Naga Swapna, M., & Chittaranjan Das, V. (2018). Mechanical Characterization of LM25/Copper Powder Reinforced Metallic Composites. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 9(7), 844–851.
- Nath Op, A. R., & Arul, S. (2020). Effect of Nickel Reinforcement on Micro Hardness and Wear Resistance of Aluminium Alloy Al7075. *Materials Today: Proceedings*, 24, 1042–1051. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.418>
- Osmanoğlu, H. (2018). *Hibrit Kompozitlerde Farklı Metal Bağlantılarının Yapıştırma Özelliklerinin Belirlenmesi*. İ.T.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Özbeyaz, K., Kaya, H., Kentli, A., Şahbaz, M., & Ögüt, S. (2019). Mechanical Properties and Electrical Conductivity Performance of ECAP Processed AA2024 Alloy. *Indian Journal of Chemical Technology*, 26(3), 266–269.
- Özdemir, Ö. (2023, Nisan 4). *Ni-Al İntermetalik Malzemeler*. https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi137/d137_5763.pdf adresinden alınmıştır.
- Özkaya, S. (2014). *Aluminyum- B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Nanokompozitlerin Üretimi , İç Yapı, Fiziksel, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi*. K.T.Ü, Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon.
- Prasad, D. S., Shoba, C., & Ramanaiah, N. (2014). Investigations on Mechanical Properties of Aluminum Hybrid Composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(1), 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.11.002>
- Prasad Reddy, A., Vamsi Krishna, P., Narasimha Rao, R., & Murthy, N. V. (2017). Silicon Carbide Reinforced Aluminium Metal Matrix Nano Composites-A Review. *Materials Today: Proceedings*, 4(2), 3959–3971. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.296>
- Purohit, R., Qureshi, M. M. U., & Jain, A. (2020). Forming Behaviour of Aluminium Matrix Nano Al₂O₃ Composites for Automotive Applications. *Advances in Materials and Processing Technologies*, 6(2), 324–335.
- Rahman, A. (2022). *Investigation of the Effect of Cr Addition on the Mechanical and Machinability Properties of Cr-Mo Steels Produced By Powder Metallurgy*. Karabuk University, Institute of Graduate Programs, Master Thesis, Karabuk.
- Ramakrishnan P. (2013). Autommotive Aplications of Metallurgy. *Advanced Powder Metallurgy*, 493-519.

- Ramnath, B. V., Elanchezhian, C., Annamalai, R. M., Aravind, S., Atreya, T. S. A., Vignesh, V., & Subramanian, C. (2014). Aluminium Metal Matrix Composites - A Review. *Reviews on Advanced Materials Science*, 38(1), 55–60.
- Rajan, T. P. D., Pillai, R. M., & Pai, B. C. (1998). Reinforcement Coatings and Interfaces In Aluminium Metal Matrix Composites. *Journal of Materials Science*, 33(14), 3491–3503. <https://doi.org/10.1023/A:1004674822751>
- Ravi Kumar, K., Kiran, K., & Sreebalaji, V. S. (2017). Micro Structural Characteristics and Mechanical Behaviour of Aluminium Matrix Composites Reinforced with Titanium Carbide. *Journal of Alloys and Compounds*, 723, 795–801. <https://doi.org/10.1016/j.jall-com.2017.06.309>
- Ravikumar, A., Sellamuthu, R., & Saravanan, R. (2016). Effect of Cr Addition on Mechanical Properties and Wear Rate of Cast Al-Cu Alloy. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(34), 1–7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i34/100952>
- Ribeiro, T. M., Catellan, E., Garcia, A., & dos Santos, C. A. (2020). The Effects of Cr Addition on Microstructure, Hardness and Tensile Properties of As-Cast Al-3.8wt.%Cu-(Cr) Alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 6620–6631. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt-.2020.04.054>
- Salih, S. S. (2017). *A Study on Corrosion Characteristics of AA2024 Under Different Conditions*. University Of Gaziantep, Graduate School Of Natural & Applied Sciences, M. Sc. Thesis, Gaziantep.
- Salih, O. S., Ou, H., Wei, X., & Sun, W. (2019). Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welded AA6092/Sic Metal Matrix Composite. *Materials Science and Engineering: A*, 742(October 2018), 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.10.116>
- Sameezadeh, M., Emamy, M., & Farhangi, H. (2011). Effects of Particulate Reinforcement and Heat Treatment on The Hardness And Wear Properties of AA2024-MoSi₂ Nanocomposites. *Materials and Design*, 32(4), 2157–2164. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.037>
- Sankaranarayanan, S., Jayalakshmi, S., & Gupta, M. (2011). Effect of Addition of Mutually Soluble and Insoluble Metallic Elements on The Microstructure, Tensile and Compressive Properties of Pure Magnesium. *Materials Science and Engineering A*, 530(1), 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.09.066>
- Sankaranarayanan, S., Jayalakshmi, S., & Gupta, M. (2012). Effect of Individual and Combined Addition of Micro/Nano-Sized Metallic Elements on The Microstructure and Mechanical Properties of Pure Mg. *Materials and Design*, 37, 274–284. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.01.009>
- Saraloğlu, C. (2010). *Nano Partiküller ile Kuvvetlendirilmiş Alüminyum Metal Matris Kompozitlerin Korozyon Özelliklerinin Belirlenmesi*. Gazi Üniversitesi, Fenbilimleri

Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.

- Shayan, M., Eghbali, B., & Niroumand, B. (2019). Synthesis of AA2024-(SiO_{2np}+TiO_{2np}) Hybrid Nanocomposite Via Stir Casting Process. *Materials Science and Engineering A*, 756(April), 484–491. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.089>
- Shaw, L., Zawrah, M., Villegas, J., Luo, H., & Miracle, D. (2003). Effects of Process-Control Agents on Mechanical Alloying of Nanostructured Aluminum Alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 34(1), 159–170. <https://doi.org/10.1007/s11661-003-0217-7>
- Shibli, S. M. A., Archana, S. R., & Muhamed Ashraf, P. (2008). Development of Nano Cerium Oxide Incorporated Aluminium Alloy Sacrificial Anode For Marine Applications. *Corrosion Science*, 50(8), 2232–2238. <https://doi.org/10.1016/j.cor-sci.2008.06.017>
- Shin, J. H., Choi, H. J., & Bae, D. H. (2014). The Structure and Properties of 2024 Aluminum Composites Reinforced with TiO₂ Nanoparticles. *Materials Science and Engineering A*, 607, 605–610. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.04.038>
- Shu, Y., Wang, F., & Wu, W. (2000). Corrosion Behavior of Pure Cr with a Solid NaCl Deposit in O₂ Plus Water Vapor. *Oxidation of Metals*, 54.
- Singh, N., & Belokar, R. M. (2021). Tribological Behavior of Aluminum and Magnesium-Based Hybrid Metal Matrix Composites: A State-Of-Art Review. *Materials Today: Proceedings*, 44, 460–466. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.757>
- Singh, J., & Chauhan, A. (2014). A Review on Sliding Wear Behaviour of Aluminium Matrix Composites with Hybrid Reinforcements for Automotive Applications. *Tribology Online*, 9(3), 121–134. <https://doi.org/10.2474/trol.9.121>
- Smagorinski, M. E., Tsantrizos, P. G., Grenier, S., Cavaşin, A., Brzezinski, T., & Kim, G. (1998). The Properties and Microstructure of Al-Based Composites Reinforced with Ceramic Particles. *Materials Science and Engineering: A*, 244(1), 86–90. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00830-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00830-7)
- Solakoğlu, S. (2021). *Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen Uçucu Kül Takviyeli Alüminyum Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının İncelenmesi*. Karabük Üniversitesi, Fenbilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Karabük.
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical alloying and milling. *Progress in Materials Science*, 46(1–2), 1–184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
- Suryanarayanan, K., Praveen, R., & Raghuraman S. (2013). Silicon Carbide Reinforced Aluminium Metal Matrix Composites for Aerospace Applications: A Literature Review. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(11), 6336–6344.
- Talla, G., Sahoo, D. K., Gangopadhyay, S., & Biswas, C. K. (2015). Modeling and Multi-

Objective Optimization of Powder Mixed Electric Discharge Machining Process of Aluminum/Alumina Metal Matrix Composite. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18(3), 369–373. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.01.007>

- Topçu A., Öztürk B., & Cora Ö.N. (2022). Performance Evaluation of Machined and Powder Metalurgically Fabricated Crofer 22 APU Interconnects for SOFC Applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 3437-3448.
- Toptan F. (2011). *Alüminyum Matrisli B₄C Partikül Takviyeli Aşınma Direnci Yüksek Kompozit Malzeme Üretimi*. Y.T.Ü., Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- Torralba, J. M., Da Costa, C. E., & Velasco, F. (2003). P/M Aluminum Matrix Composites: An Overview. *Journal of Materials Processing Technology*, 133(1–2), 203–206.
- Umutoğlu, A. (2008). *Mekanik Alaşımlama Yöntemleri İle Üretilmiş Al-Fe Tabanlı Sic ve Y₂O₃ Pekiştiricili Kompozitlerin Geliştirilmesi Ve Karakterizasyonu*. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- Ujah, C., Popoola, P., Popoola, O., & Aigbodion, V. (2019). Enhanced Mechanical, Electrical and Corrosion Characteristics of Al-Cnts-Nb Composite Processed Via Spark Plasma Sintering for Conductor Core. *Journal of Composite Materials*, 53(26–27), 3775–3786. <https://doi.org/10.1177/0021998319848055>
- Ujah, C. O., Popoola, A. P. I., Popoola, O. M., & Aigbodion, V. S. (2020). Influence of Cnts Addition on The Mechanical, Microstructural, and Corrosion Properties of Al Alloy Using Spark Plasma Sintering Technique. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7–8), 2961–2969. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04699-7>
- Ujah, C. O., & Kallon, D. V. Von. (2022). Trends in Aluminium Matrix Composite Development. *Crystals*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/cryst12101357>
- Vani, V. V., & Chak, S. K. (2018). The Effect Of Process Parameters İn Aluminum Metal Matrix Composites With Powder Metallurgy. *Manufacturing Review*, 5. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2018001>
- Varol, T., & Canakci, A. (2013). Effect Of Particle Size and Ratio of B₄C Reinforcement on Properties and Morphology of Nanocrystalline Al₂₀₂₄-B₄C Composite Powders. *Powder Technology*, 246, 462–472. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.05.048>
- Vieira, A. C., Pinto, A. M., Rocha, L. A., & Mischler, S. (2011). Effect of Al₂Cu Precipitates Size And Mass Transport on the Polarisation Behaviour of Age-Hardened Al-Si-Cu-Mg Alloys in 0.05 M NaCl. *Electrochimica Acta*, 56(11), 3821–3828. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.02.044>
- Vinod, B., Ramanathan, S., Ananthi, V., & Selvakumar, N. (2019). Fabrication and Characterization of Organic and In-Organic Reinforced A356 Aluminium Matrix

- Hybrid Composite by Improved Double-Stir Casting. *Silicon*, 11(2), 817–829.
- Vishwanatha, A. D., Panda, B., & Shivanna, D. M. (2020). Effect of a T6 Aging Treatment on The Corrosion Behaviour of In-Situ AlxNiy Reinforced AA6061 Composite. *Materials Today: Proceedings*, 44(xxxx), 4112–4117.
- Wang, F., & Shu, Y. (2003). Influence of Cr Content on the Corrosion of Fe – Cr Alloys : The Synergistic Effect of NaCl and Water Vapor. *Oxidation of Metals*, 59(April).
- Wang, Z., Dong, L., Hu, B., & Chen, B. (2023). The Effect of Cu Addition on Corrosion Resistance of Al-Si-Mg-Cr Alloy. *Metals*, 13(4).
- Yadav, D., & Bauri, R. (2010). Nickel Particle Embedded Aluminium Matrix Composite with High Ductility. *Materials Letters*, 64(6), 664–667. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.200912.030>
- Yalçın, E. D. (2018). Za27/Grafen/B₄C Nanokompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilmesi Ve Özelliklerinin İncelenmesi. K.T.Ü. Fenbilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Trabzon.
- Yan, C., Xiong, D., & Li, J. (2018). Synthesis of Ni-Al-Ta Composite Coatings on Al Alloy Plates and The Transfer of Al Powder Via Mechanical Milling Technique. *Powder Technology*, 340, 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.024>
- Yang, L. (2008). *Techniques For Corrosion Monitoring*. Southwest Research Institute <https://doi.org/10.1533/9781845694050.frontmatter>
- Yazdipour, A., & Heidarzadeh, A. (2016). Effect of Friction Stir Welding on Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Al 5083-H321 and 316L Stainless Steel Alloy Joints. *Journal of Alloys and Compounds*, 680, 595–603. <https://doi.org/10.1016/j.jall-com.2016.03.307>
- Ye, H. Z., & Liu, X. Y. (2005). Microstructure and Tensile Properties of Ti6Al4V/AM60B Magnesium Matrix Composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 402(1–2), 162–169. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2005.04.175>
- Yousefi, M., & Doostmohammadi, H. (2021). Microstructural Evolution and Solidification Behavior of Functionally Graded In Situ Al–Cr Composites During Centrifugal Casting. *International Journal of Metalcasting*, 15(2), 650–663. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00499-y>
- Yu, M., Zhou, D., Zhu, B., Cui, T., Lu, Y., & Wang, Y. (2023). NaCl-induced hot corrosion behaviors of NiSiAlY coatings. *Frontiers in Materials*, April, 1–10. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1186789>
- Zheng, R., Hao, X., Yuan, Y., Wang, Z., Ameyama, K., & Ma, C. (2013). Effect of High Volume Fraction of B₄C Particles on The Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Based Composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 576, 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.04.141>

ÖZGEÇMİŞ

Gül GEDİK GÜLTEKİN, 2001-2002 öğretim yılında Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2005 yılında bu bölümden mezun oldu. Sonrasında Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makina Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2009 yılında mezun oldu. Aynı yıl KTÜ Abdullah Kanca MYO'da öğretim görevlisi olarak göreve başladı. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü'nde doktora yapmaya başladı.

Gültekin, G. G., Çanakçı, A., & Canpolat, Ö. (2023). Effect of Milling Time and Process Control Agent on Microstructure and Mechanical Properties of AA2024-2 wt.% Cu Metal–Metal Composites Produced by Mechanical Alloying. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 12(3), 444–454. <https://doi.org/10.1007/s13632-023-00962-2>