

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**NİKELLİ ALAŞIMLARIN KIVILCIM PLAZMA SİNERLEME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ SIVI FAZIN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Haluk MERDİN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK

TUNCELİ - 2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NİKELLİ ALAŞIMLARIN KIVILCIM PLAZMA SİNERLEME YÖNTEMİ
İLE ÜRETİMİ SIVI FAZIN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Haluk MERDİN
(220077119)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK

TUNCELİ - 2025

T.C.
MUNZUR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**NİKELLİ ALAŞIMLARIN KIVILCIM PLAZMA SİNTERLEME YÖNTEMİ İLE
ÜRETİMİ SIVI FAZIN MALZEME ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ**

Haluk MERDİN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 03/09/2025 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliğiyle kabul edilmiştir.

İmza

İmza

İmza

Prof. Dr. Uğur ÇALIGÜLÜ

(Fırat Üniversitesi)

Başkan

Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK

(Munzur Üniversitesi)

Danışman

Doç. Dr. Yahya TAŞGIN

(Munzur Üniversitesi)

Üye

Bu tez, Enstitümüz Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda hazırlanmıştır.

Enstitü Müdürü
Doç. Dr. Nagihan KARAASLAN AYHAN

NOT: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı, 5846 sayılı “Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu”ndaki hükümlere tabidir.

03/09/2025

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

İmza
Haluk MERDİN

Danışman
Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın yürütülmesi sürecinde değerli bilgi, destek ve yönlendirmeleriyle katkı sağlayan danışmanım Doç. Dr. Ertuğrul ÇELİK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Haluk MERDİN
TUNCELİ - 2025



İÇİNDEKİLER

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	I
TEŞEKKÜR.....	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	IV
TABLolar LİSTESİ	V
SEMBOLLER LİSTESİ	VI
KISALTMALAR LİSTESİ	VII
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Nikelli Alaşımlar Hakkında Genel Bilgi	1
1.1.1. Nikelli alaşımların kullanım alanları	3
1.1.2. Kimyasal kompozisyon ve öne çıkan elementler	4
1.2. Sinterleme.....	6
1.2.1. Konvansiyonel sinterleme	7
1.2.2. İki basamaklı sinterleme	8
1.2.3. Mikrodalga sinterleme	9
1.2.4. Kıvılcım plazma sinterleme.....	9
1.3. Sıvı Faz Oluşumu ve Önemi.....	11
1.3.1. Geçici sıvı fazın tanımı.....	12
1.3.2. Geçici sıvı fazın mikroyapıya etkisi	12
1.3.3. Geçici sıvı fazın mekanik özelliklere etkisi.....	12
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Numunelerin Üretimi	20
3.2. Karakterizasyon	24
3.2.1. Numunelerin hazırlaması.....	25
3.2.2. Yoğunluk ölçümü	26
3.2.3. Sertlik ölçümü	28
3.2.4. Üç noktalı eğilme (TRS) deneyi.....	28
3.2.5. Elektron mikroskobu incelemeleri.....	29
3.2.6. XRD incelemeler	31
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	32
4.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları	32
4.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları	34
4.3. Üç Noktalı Eğilme (TRS) Deneyi Sonuçları	36
4.4. Mikroyapı İncelemeleri	38
4.5. Kırık Yüzey Analizi.....	48
4.6. XRD (X Işınımı Kırılımı) Analiz Sonuçları	57
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
5.1. Çalışmanın Genel Değerlendirilmesi	59
5.2. Çalışmadan Elde Edilen Bulgular.....	59
5.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler	60
6. KAYNAKLAR.....	62
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. 1. Sinterleme aşamaları (Aytimur ve ark., 2024).....	6
Şekil 1. 2. İki basamaklı sinterlemenin sıcaklık zaman grafiği (Lóh ve ark.,2016).....	8
Şekil 1. 3. Konvansiyonel ve mikrodalga sinterlemenin ısı akışı (Lin ve ark., 2025)	9
Şekil 1. 4. Kıvılcım plazma sinterleme şematik gösterimi (Ujah ve ark.,2024)	10
Şekil 3. 1. Kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri A)Al, B)AlSi12,C)NiCr10B2Si3.2C0.38Fe2.4Alaşım.....	20
Şekil 3. 2. Hassas terazi ile numune tartılması.....	21
Şekil 3. 3. Turbula mikser	22
Şekil 3. 4. Numunelerin sinterlendiği grafit kalıp	23
Şekil 3. 5. Kıvılcım plazma sinterleme cihazı.....	24
Şekil 3. 6. Yüzey temizliği yapılan numuneler.	25
Şekil 3. 7. Numune parlatma ve kesme cihazı	26
Şekil 3. 8. Yoğunluk ölçüm işlemi.....	27
Şekil 3. 9. Sertlik ölçüm cihazı	28
Şekil 3. 10. Ünlversal çekme, basma, üç noktalı eğilme test cihazı.....	29
Şekil 3. 11. FESEM cihazı	30
Şekil 3. 12. XRD cihazı.....	31
Şekil 4. 1. Üretilen metal kompozit numunelere ait yoğunluk değerlerinin karşılaştırmalı grafiği.....	33
Şekil 4. 2. Üretilen metal kompozit numunelerinin katkılama oranına karşılık sertlik grafikleri	35
Şekil 4. 3. S1)%100 NiCrBSiFe, S2)%2 AlSi12, S3)%4 AlSi12, S4)%6 AlSi12, S5)%8 AlSi12 katkılı numunelerin gerilme yüzde uzama grafiği.....	36
Şekil 4. 4. S1)%100 NiCrBSiFe, S6)%2 Al, S7)%4 Al, S8)%6 Al, S9)%8 Al katkılı numunelerin gerilme yüzde uzama grafiği	37
Şekil 4. 5. S1)%2 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri	39
Şekil 4. 6. S2)%4 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri	40
Şekil 4. 7. S3)%6 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri	41
Şekil 4. 8. S4)%8 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri	42
Şekil 4. 9. S9)%2 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	43
Şekil 4. 10. S10)%4 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	44
Şekil 4. 11. S11)%6 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	45
Şekil 4. 12. S12)%8 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri.....	46
Şekil 4. 13. S13)%100 NiCrBSiFe Saf numunenin kırık yüzey SEM görüntüleri	47
Şekil 4. 14. S1)%2 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	48
Şekil 4. 15. S2)%4 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	49
Şekil 4. 16. S3)%6 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	50
Şekil 4. 17. S4)%8 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	51
Şekil 4. 18. S9)%2 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri	52
Şekil 4. 19. S10)%4 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri	53
Şekil 4. 20. S11)%6 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri	54
Şekil 4. 21. S12)%8 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri	55
Şekil 4. 22. S13)%100 NiCrBSiFe Saf numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri.....	56
Şekil 4. 23. S1)%2 AlSi12, S2)%4 AlSi12, S3)%6 AlSi12, S4)%8 AlSi12, S13)%100 NiCrBSiFe numunelerin XRD grafiği.....	57
Şekil 4. 24. S9)%2 Al, S10)%4 Al, S11)%6 Al, S12)%8 Al, S13)%100 NiCrBSiFe numunelerin XRD grafiği	58

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3. 1. İş akış şeması.....	19
Tablo 3. 2. Numunelerin karışım oranları.....	21
Tablo 4. 1. Vickers sertliği ölçüm sonuçları.....	35



SEMBOLLER LİSTESİ

mm	:Milimetre (uzunluk birimi)
MPa	:Megapascal (basınç birimi)
W_{sa}	:Numunenin sudaki asılı ağırlığı
W_s	:Numune ağırlığı
ρ_{su}	:Suyun Yoğunluk Değeri
ρ	:Yoğunluk
wt. %	:Ağırlıkça yüzde oran
°C	:Santigrat derece (sıcaklık birimi)
g	:Gram



KISALTMALAR LİSTESİ

Al	:Alüminyum
B	:Bor
C	:Karbon
Cr	:Krom
Ni	:Nikel
Fe	:Demir
Si	:Silisyum
Mg	:Magnezyum
AlSi12	:Alüminyum-Silisyum
SPS	:Spark Plazma Sinterleme
PEG	:Polietilen Glikol
SEM	:Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
TRS	:Transverse Rupture Strength (Üç Noktalı Eğme Dayanımı)
XRD	:X-ray Diffraction (X-Işını Kırınımı)
dev/dk	:Devir/dakika (karıştırma hızı)
HV	:Vickers Sertlik Ölçümleri

ÖZET

Bu çalışma, nikel esaslı toz malzemelerin kıvılcım plazma sinterleme (Spark Plasma Sintering - SPS) yöntemiyle üretimini ve bu yöntemle üretilen numunelerde sıvı faz katkısının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemektedir. SPS, kısa sürede yüksek sıcaklık ve basınç uygulayarak sinterleme işleminin hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamakta; bu da daha az enerji tüketimi, ince taneli mikroyapı ve yüksek yoğunluk gibi avantajlar sunmaktadır.

Çalışma kapsamında, piyasadan temin edilen nikel esaslı alaşım tozlarına farklı oranlarda sıvı faz katkısı yapılarak 950°C sıcaklık, 35 MPa basınç ve 4 dakika süre ile sıcak presleme işlemi uygulanmıştır. Üretilen numuneler üzerinde mekanik analizleri, yoğunluk ölçümü, HV sertlik testi ve üç noktalı eğme testleri yapılmıştır. Ayrıca, mikroyapı XRD ve SEM/EDS analizleriyle faz dönüşümleri ve kırık yüzey morfolojisi detaylı olarak incelenmiştir.

Elde edilen bulgular, sıvı faz katkısının nikel esaslı alaşımların yoğunluğunu ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Özellikle katkı oranlarının optimize edilmesiyle birlikte, sertlik ve kırılma mukavemeti değerlerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, kobalt bazlı alaşımlara alternatif olarak nikel esaslı alaşımların SPS yöntemiyle yüksek performanslı yapısal bileşenler üretiminde kullanılabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Toz Metalurjisi, Spark Plasma Sinterleme, Nikel Esaslı Alaşımlar, Sıvı Faz, Mikroyapı, Mekanik Özellikler

ABSTRACT

Production of Nickel Alloys by Spark Plasma Sintering and the Effect of Liquid Phase on Material Properties

This study investigates the production of nickel-based powder materials using the Spark Plasma Sintering (SPS) method and examines the effects of liquid phase additives on the microstructure and mechanical properties of the specimens produced by this technique. SPS enables rapid sintering by applying high temperature and pressure in a short time, offering advantages such as lower energy consumption, fine-grained microstructure, and high density.

As part of the study, liquid phase additions were added to commercially available nickel-based alloy powders at various rates and hot-pressed at 950°C, 35 MPa, and 4 minutes. Mechanical analyses, density measurements, HV hardness tests, and three-point bending tests were performed on the produced samples. Furthermore, phase transformations and fracture surface morphology were investigated in detail using microstructure XRD and SEM/EDS analyses.

The findings reveal that the addition of a liquid phase positively influences the density and mechanical properties of nickel-based alloys. Notably, optimized additive ratios led to significant improvements in hardness and fracture strength. These results suggest that nickel-based alloys, processed via SPS, can serve as high-performance structural components, presenting a viable alternative to cobalt-based alloys.

Keywords: Powder Metallurgy, Spark Plasma Sintering, Nickel-Based Alloys, Liquid Phase, Microstructure, Mechanical Properties

1. GİRİŞ

Yüksek performanslı malzemeler, günümüzde artan mühendislik ihtiyaçlarına paralel olarak sürekli gelişim göstermektedir. Bu bağlamda, Nikelli alaşımları, nikel bazlı yapıları ve aşınma direnci, korozyon dayanımı gibi üstün özellikleri sayesinde, havacılık, enerji ve metal işleme gibi endüstriyel uygulamalarda önemli bir yer edinmiştir. Nikelli alaşımlarının bu özellikleri, bünyelerinde bulunan Nikel, Bor, Krom ve Tungsten gibi elementlerin benzersiz kombinasyonu ile sağlanmaktadır. Bu alaşımlar, özellikle yüksek sıcaklık ve aşındırıcı ortam koşullarında dayanıklılığı artırmak amacıyla kullanılan kıvılcım plazma sinterleme (Spark Plasma Sintering, SPS) yöntemiyle daha ileri seviyelere taşınmaktadır.

Kıvılcım plazma sinterleme, düşük enerji tüketimi ve hızlı sinterleme süreciyle dikkat çeken bir yöntemdir. Bu yöntem, sıvı fazın kontrollü oluşumunu sağlayarak Nikelli alaşımların mikroyapısal homojenliğini artırmakta ve mekanik dayanımını iyileştirmektedir. Sıvı faz oluşumu, faz stabilitesini artırarak karmaşık intermetalik bileşiklerin oluşumunu engeller ve mikroyapıda daha homojen bir dağılım sağlar. Bu da geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla daha yüksek yoğunluk, sertlik ve aşınma direnci elde edilmesini mümkün kılar.

Son yıllarda, Nikelli alaşımlarının kıvılcım plazma sinterleme yöntemiyle işlenmesi üzerine yapılan araştırmalar, sıvı fazın etkilerini daha iyi anlamaya odaklanmıştır. Bu çalışma, Nikelli alaşımların üretiminde sıvı fazın mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde inceleyerek, bu alaşımların yüksek performanslı mühendislik uygulamalarındaki potansiyelini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Özellikle, sinterleme sıcaklığı, basınç ve süre gibi parametrelerin mikroyapıda oluşturduğu faz değişimleri ve bu değişimlerin mekanik dayanım üzerindeki etkileri analiz edilecektir.

1.1. Nikelli Alaşımlar Hakkında Genel Bilgi

Nikelli süperalaşımlar, yüksek sıcaklık uygulamaları başta olmak üzere çeşitli zorlu ortam koşullarında üstün performans sergileyen malzeme gruplarıdır. Bu alaşımlar, mekanik dayanım, aşınma direnci, korozyon ve oksidasyon direnci gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır (Bhoskar ve ark., 2025).

Yüksek Sıcaklık Dayanımı: Nikelli süperalaşımlar, yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruma kapasitesine sahiptir. FCC kristal yapıya sahip nikel matris fazı ve

  zeltide bulunan güçlendirici elementler, yüksek sıcaklık deformasyonlarına karşı dayanıklılık sağlar. Böylece malzeme, yüksek sıcaklık ortamlarında çalışırken mekanik kararlılığını uzun süre muhafaza edebilir (Pasarkar ve ark., 2025).

Aşınma Direnci: Nikelli süperalaşımlar, sahip oldukları yüksek sertlik ve kimyasal kararlılık özellikleri sayesinde aşınmaya karşı yüksek direnç göstermektedir. Bu alaşımlar, hem mekanik sürtünmeye hem de kimyasal aşındırıcı etkilere karşı yüzey bütünlüğünü uzun süre koruyabilmektedir. Aşınma direnci, özellikle yüzeyde oluşan koruyucu oksit tabakalarının katkısıyla daha da güçlenmektedir. Bu koruyucu tabakalar, malzemenin hem fiziksel hem de kimyasal aşınma mekanizmalarına karşı dayanıklılığını artırarak servis ömrünü uzatır (Pei ve ark., 2025).

Yüksek Sertlik: Nikelli süperalaşımlar, içerdikleri alaşım elementlerinin etkisiyle yüksek sertlik seviyelerine ulaşabilmektedir. Özellikle krom, molibden ve bor gibi elementlerin katkısıyla, malzemenin sertliği ve yüzey dayanımı önemli   l  de artmaktadır. Yüksek sertlik, hem aşınmaya hem de darbe etkilerine karşı dayanım sağlamada kritik rol oynar. Bu   zellik sayesinde, nikelli alaşımlar zorlu mekanik koşullarda güvenilir bir performans sergiler (Graebner ve ark., 2025).

Mikro Yapısal Stabilit  : Nikelli süperalaşımlar, yüksek sıcaklık ortamlarında mekanik ve kimyasal özelliklerini koruyabilmeleri açısından üstün mikroyapısal stabilit   özelliklerine sahiptir. Bu alaşımlar, matris fazı ve   keltilerin dengeli yapıları sayesinde, uzun süreli hizmet koşullarında dayanım özelliklerini büyük   l  de sürdürebilmektedir. Mikroyapısal kararlılık, malzemenin deformasyona, tane büyümesine ve faz ayrışmasına karşı direnç göstermesiyle doğrudan ilişkilidir. Alaşımlarda bulunan kararlı   kelti fazları, sıcaklık etkisi altında dahi homojen dağılımlarını koruyarak yapısal bütünlüğü destekler. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda atomik difüzyon süreçlerinin kontrollü olması, mikroyapının zamanla bozulmasını yavaşlatır. Böylece, nikelli süperalaşımlar hem mekanik hem de tribolojik performanslarını uzun servis süreleri boyunca yüksek düzeyde sürdürebilirler (Korda ve ark., 2025).

Korozyon ve Oksidasyon Direnci: Nikelli süperalaşımlar, içerdikleri krom ve silikon gibi elementler sayesinde yüksek sıcaklıklarda m  kemm   korozyon ve oksidasyon direnci sergilemektedir. Yüzeyde oluşan Cr_2O_3 ve SiO_2 gibi stabil oksit tabakaları, kimyasal saldırılara karşı etkin bir koruma sağlar. Bu koruyucu tabakalar, alaşım yüzeyinin oksidatif ve korozif ortamlarda zarar görmesini engelleyerek malzemenin hizmet ömrünü uzatmaktadır (Khan ve ark., 2025).

1.1.1. Nikelli alaşımların kullanım alanları

Nikelli alaşımlar, üstün mekanik özellikleri, termal kararlılıkları ve korozyon dirençleri sayesinde birçok yüksek teknoloji endüstrisinde kritik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, zorlu çalışma ortamlarına karşı gösterdikleri dayanıklılık sayesinde havacılıktan enerji üretimine, kimya endüstrisinden sağlık sektörüne kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Havacılık ve Uzay Endüstrisi: Nikelli alaşımlar, havacılık ve uzay endüstrisinde yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon direnci ve üstün süperplastik şekil verilebilirlik özellikleri nedeniyle tercih edilmektedir. Özellikle uçak motorları, gaz türbinleri ve roket motorları gibi yüksek performans gerektiren bileşenlerin üretiminde, nikel bazlı alaşımlar hem yapısal dayanım hem de hafiflik avantajı sağlamaktadır. Bu alaşımlar, düşük deformasyon hızlarında bile yüksek sünekliğin korunmasına imkân vererek, karmaşık geometrilerin üretimini kolaylaştırmaktadır (Lee ve ark., 2025).

Enerji Üretimi ve Türbin Sistemleri: Enerji üretim tesislerinde, özellikle gaz türbinlerinin sıcak bölümlerinde kullanılan malzemeler, yüksek sıcaklık ve korozyon ortamlara karşı dayanıklılık göstermek zorundadır. Nikelli süperalaşımlar, sürünme direnci, sıcak korozyon direnci ve uzun süreli yapısal kararlılık özellikleri sayesinde türbin kanatları, yanma odası bileşenleri ve sıcak gaz geçiş yollarında etkin bir performans sergilemektedir. Ayrıca, hidrojen ve amonyak gibi alternatif yakıtların kullanımının yaygınlaşması ile birlikte, bu alaşımların çevresel koşullara karşı gösterdiği direnç daha da kritik hale gelmiştir (O'Connor ve ark., 2025).

Kimya ve Petrokimya Endüstrisi: Kimya ve petrokimya sektöründe, agresif kimyasal ortamlarda çalışan ekipmanların korozyona ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olması gerekmektedir. Nikelli alaşımlar, hidrojenin neden olduğu gevrekleşmeye karşı gösterdikleri direnç, üstün korozyon dayanımları ve uzun süreli mikroyapısal kararlılıkları sayesinde, boru hatları, basınçlı kaplar, ısı değiştiriciler ve reaktörler gibi kritik bileşenlerde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde, hem operasyonel güvenlik artırılmakta hem de bakım maliyetleri azaltılmaktadır (Krella, 2025).

Denizcilik ve Gemi İnşası: Denizcilik sektöründe kullanılan malzemelerin, deniz suyu gibi aşındırıcı ortamlara karşı uzun süreli koruma sağlaması büyük önem taşımaktadır. Nikelli alaşımlar, özellikle paslanmaz çelik formunda, korozyon direnci, biofouling oluşumuna karşı direnç ve yüksek yapısal bütünlük gibi özellikleri sayesinde gemi gövdeleri, su altı

yapıları ve diğer denizcilik bileşenlerinde tercih edilmektedir. Bu malzemeler, deniz ortamında servis ömrünü uzatarak sistemlerin güvenilirliğini ve performansını artırmaktadır (Vukelic ve ark., 2025).

Sağlık ve Medikal Cihazlar: Sağlık sektöründe, özellikle ortopedik implantlar ve dental uygulamalar için malzemelerin biyouyumlu, korozyona dayanıklı ve mekanik olarak güvenilir olması beklenmektedir. Nikelli alaşımlar, özellikle nikel-titanyum (NiTi) esaslı alaşımlar, sahip oldukları süperelastik davranış ve şekil hafızası etkisi sayesinde, minimal invaziv cerrahi aletlerden kalıcı implantlara kadar geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. Ayrıca, yüzey modifikasyon teknikleriyle biyouyumluluğu artırılarak, uzun vadeli implant güvenliği sağlanmaktadır (Witkowska ve ark., 2025).

Otomotiv ve Ulaşım Sektörü: Taşımacılık sektöründe karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliğinin artırılması hedefleri doğrultusunda, nikelli alaşımlar önemli çözümler sunmaktadır. Metal destekli katı oksit yakıt hücreleri (MS-SOFC'ler) gibi yeni nesil enerji sistemlerinde kullanılan nikel bazlı yapılar, yüksek sıcaklıkta mekanik dayanım, yakıt esnekliği ve hızlı başlatılabilirlik gibi özellikleri sayesinde, elektrikli otobüslerden hafif ticari araçlara kadar çeşitli taşıtlarda potansiyel kullanım sunmaktadır. Bu teknolojiler, hem çevresel sürdürülebilirliği desteklemekte hem de taşımacılık sektörünün verimliliğini artırmaktadır (Zhang ve ark., 2025).

1.1.2. Kimyasal kompozisyon ve öne çıkan elementler

Nikel (Ni), yüksek ergime sıcaklığı (~1455 °C), kimyasal kararlılığı ve FCC (face-centered cubic) kristal yapısıyla, yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal bir matris elementi olarak öne çıkmaktadır. Bu özellikleri sayesinde nikel, yüksek sıcaklıkta çalışan gaz türbini bileşenlerinden nükleer enerji sistemlerine kadar geniş bir kullanım alanı bulur. Özellikle süperalaşım sistemlerinde nikel, sadece matris fazını oluşturan temel yapı taşı olmakla kalmaz, aynı zamanda çökelme sertleşmesi mekanizmalarının gerçekleşebilmesi için uygun kristal ortamı da sağlar (Pan ve ark., 2025).

Krom (Cr), yüksek sıcaklık koşullarında kararlı oksit tabakaları oluşturarak malzemeleri oksidatif bozunmadan koruma yeteneği ile öne çıkan bir geçiş metalidir. Özellikle nikel veya zirkonyum esaslı alaşımlarda yüzeye kaplama olarak uygulandığında, kromun oksijenle tepkimesi sonucunda oluşan Cr_2O_3 tabakası, oksijen difüzyonunu sınırlandıran yoğun ve yapışkan bir bariyer görevi üstlenir. Bu koruyucu film, yüksek sıcaklıklarda bile sürekliliğini

koruyarak altyapının oksijenle temasını engeller ve iç yapının yapısal bütünlüğünü sürdürmesini sağlar (Tang ve ark., 2025).

Silisyum (Si), düşük termal genleşme katsayısı, yüksek refrakterlik ve kimyasal inertliği sayesinde ileri teknoloji seramik sistemlerinde kritik bir yapısal element olarak kullanılmaktadır. Özellikle silika (SiO_2) temelli seramik matrislerde, Si bileşenleri, yüksek sıcaklık stabilitesi ve alaşımlarla etkileşime girmeyen kimyasal pasiflikleri sayesinde gaz türbini kanatlarının iç yapılarında yaygın şekilde tercih edilmektedir (Wang ve ark., 2025).

Demir (Fe), geçiş metalleri arasında yer alan ve geniş alaşım esnekliği sayesinde pek çok yüksek performanslı mühendislik uygulamasında kullanılan bir elementtir. Nikel esaslı süperalaşımlarda genellikle γ matris fazının parçası olarak yer alır ve bu yapının termodinamik kararlılığını destekler. GH2907 gibi Fe-Ni-Co tabanlı süperalaşımlarda, demirin varlığı yalnızca mekanik dayanım açısından değil, aynı zamanda çökeltme fazlarının (örneğin γ' ve Laves fazları) mikroyapısal düzenlenişi bakımından da etkilidir (Li ve ark., 2025.)

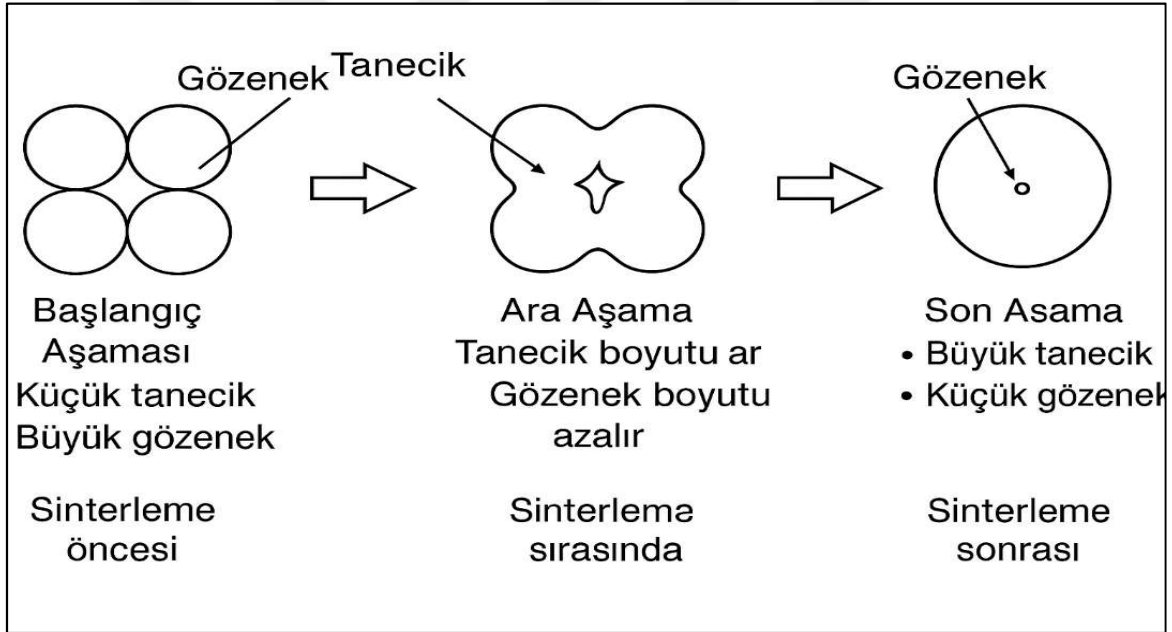
Bor (B), yüksek sertlik, düşük atomik hacim ve reaktif kimyasal yapısı ile metal matrisli kompozit kaplamalarda önemli işlevler üstlenen yarı metalik bir elementtir. Özellikle yüksek sıcaklık dayanımı ve kimyasal kararlılığı ile dikkat çeken bor bileşikleri, modern yüzey mühendisliğinde kaplama performansını artırıcı bir mikroalaşım elementi olarak tercih edilmektedir. Bor katkısının en belirgin etkisi, krom karbür esaslı termal spreycaplamalarda çatlak direnci, aşınma dayanımı ve korozyon kararlılığı üzerinde gösterdiği iyileştirici etkidir (Ksiazek ve Boron, 2025).

Karbon (C), inorganik ve organik yapı sistemlerinin temel bileşeni olarak bilinen çok yönlü bir elementtir. Son yıllarda, sürdürülebilir yapı malzemeleri alanında karbon temelli malzemelerin özellikle biochar formunda kullanımı önemli bir ilgi odağı haline gelmiştir. Biochar, atık biyokütlenin piroliz işlemiyle karbonlaştırılması sonucu elde edilen gözenekli bir karbon türü olup, hem karbon sekestrasyonu (CO_2 tutumu) hem de higrotermal performans açısından betonarme sistemler için yenilikçi katkı maddesi olarak değerlendirilmiştir (Rupasinghe ve ark., 2025).

Alüminyum (Al), düşük yoğunluğu, yüksek korozyon direnci ve faz dönüşümlerine olan etkisi ile metalürjik açıdan son derece işlevsel bir alaşım elementidir. Yüksek dayanımlı bronz alaşımlarında alüminyum, hem mekanik performansı artırıcı bir çekirdek element hem de mikroyapısal dengeyi belirleyici bir faz dengeleyici olarak kritik görev üstlenmektedir (de Luca ve ark., 2025).

1.2. Sinterleme

Sinterleme süreci, metalik ya da seramik esaslı tozların kontrollü sıcaklık ve atmosfer koşulları altında bir araya getirilerek, yüksek yoğunluk, mekanik dayanım ve yapısal bütünlük gösteren kompakt bir malzeme formuna dönüştürülmesini amaçlayan gelişmiş bir ısıtım işlemi tekniğidir. Bu yöntem kapsamında, önceden şekillendirilmiş ve “yeşil kompakt” olarak adlandırılan toz preform, yoğunlukla dış kuvvet uygulanmadan ya da yalnızca sınırlı düzeyde basınç altında, tozların erime sıcaklıklarının altındaki bir aralığa kadar ısıtılır. Bu termal işlem sonucunda, parçacıklar arasında atomik düzeyde difüzyon gerçekleşir ve böylece mikroyapısal bağlanmalar meydana gelerek malzemenin bütünlüğü sağlanır (Küçük & Yıldız, 2023). Genel sinterleme aşamaları Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. 1. Sinterleme aşamaları (Aytimur ve ark., 2024)

Bu bağ oluşumu, sistemin toplam yüzey serbest enerjisini azaltmaya yönelik termodinamik eğilimden kaynaklanır. Özellikle çok kristalli malzemelerde, yüzey enerjisi minimizasyonu, sinterleme sürecinin itici kuvveti olarak görev yapar. Katı hal sinterleme ve sıvı faz sinterleme olmak üzere iki temel mekanizma üzerinden yürütülen bu süreçte, katı hal sinterleme genellikle daha düşük sıcaklıklarda ve daha kontrollü faz dönüşümleriyle gerçekleşir (Zhang et al., 2025; Thirupathi, 2022).

Sinterleme işlemi üç evreye ayrılarak değerlendirilir. İlk evrede parçacıklar arasındaki temas noktalarında “boyun” adı verilen mikro bağ yapıları oluşmaya başlar. Ara evrede bu boyunlar büyüyerek partiküller arası difüzyon yoğunlaşır, gözenekler küçülür ve mikro yapının sürekliliği artar. Son evrede ise gözeneklerin büyük bölümü kapanır, tane sınırları belirginleşir ve tane büyümesi gözlemlenir. Bu evrimsel ilerleme, sinterleme sonrası malzemenin mekanik ve fiziksel özelliklerini doğrudan etkiler (Alkhafaji, 2023). Atomik düzeyde, sinterleme sırasında iki temel taşıma mekanizması devreye girer. Bunlardan ilki, parçacık yüzeylerinde gerçekleşen ve yalnızca boyun gelişimini sağlayan yüzey taşınımıdır. Bu mekanizma, partiküller arası mesafeyi değiştirmez. İkinci mekanizma olan kütle taşınımı ise atomların hacim içinden hareket ederek gözeneklerin kapanmasına ve gerçek yoğunlaşmanın sağlanmasına neden olur. SPS (Spark Plasma Sintering) gibi ileri tekniklerde, her iki mekanizma da hızlı ısıtma ve vakum ortamında eş zamanlı olarak desteklenir (Rao et al., 2024). Sinterleme işlemi sadece parçacıkların fiziksel olarak birleşmesini değil; aynı zamanda gözenekliliğin azaltılması, yoğunluğun artırılması ve kompakt yapının mekanik performansının optimize edilmesini sağlayan karmaşık bir difüzyon ve faz dönüşüm sürecidir. Özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılan nikel bazlı süperalaşımlarda sinterleme, mikro yapı bütünlüğü ve servis performansı açısından vazgeçilmez bir üretim basamağıdır (Ojo & Richards., 2022). Sinterleme türleri Konvansiyonel Sinterleme, İki Basamaklı Sinterleme, Mikrodalga Sinterleme ve Kıvılcım Plazma Sinterleme olmak üzere dört şekilde sınıflandırılır.

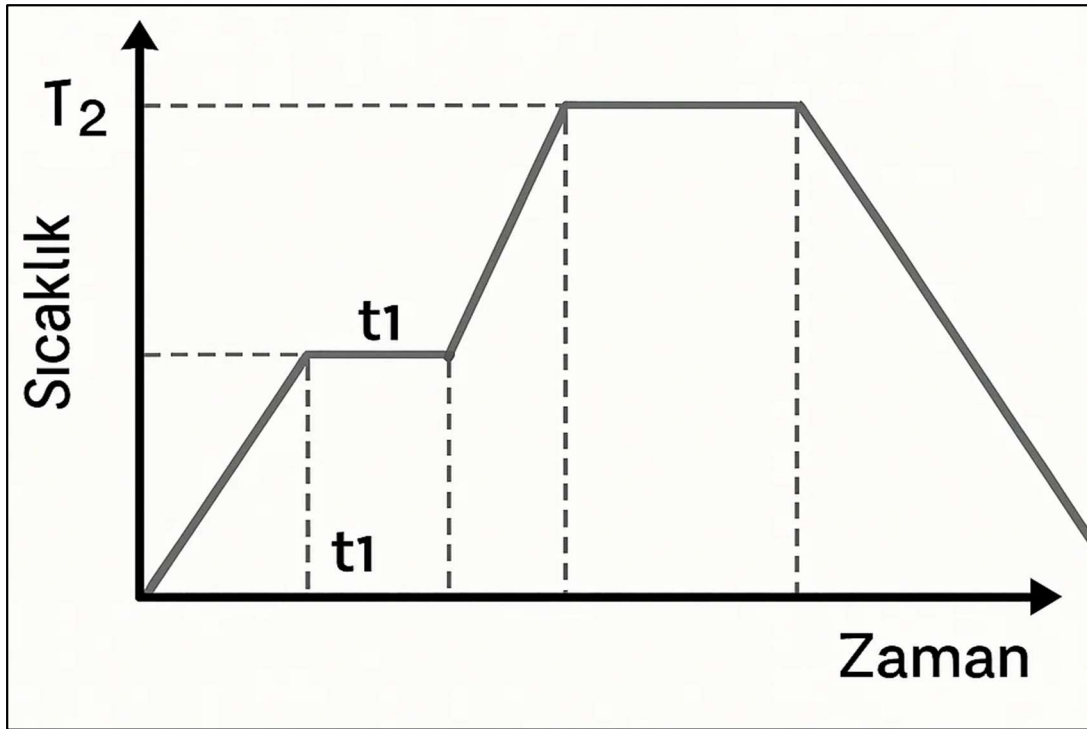
1.2.1. Konvansiyonel sinterleme

Konvansiyonel sinterleme, toz metalurjisi alanında yaygın olarak kullanılan, harici bir basınç uygulanmadan gerçekleştirilen bir ısıtma işlemi yöntemidir. Bu yöntemde, önceden şekillendirilmiş toz kompaktları, genellikle inert atmosfer veya vakum ortamında, malzemenin erime noktasının altındaki uygun sıcaklıklara kadar ısıtılarak sinterlenir. Süreç, sabit sıcaklıkta belirli bir süre bekletme ve ardından kontrollü bir soğutma aşamasını içerir. Basit ekipman gereksinimi, düşük işletme maliyeti ve endüstriyel uygulanabilirliği, bu yöntemin başlıca avantajları arasında yer almaktadır. Ancak, sinterleme sürecinin görece uzun sürmesi, gözeneklerin tam olarak giderilememesi ve elde edilen ürün yoğunluğunun sınırlı kalması gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Radhika et al., 2025).

1.2.2. İki basamaklı sinterleme

İki aşamalı sinterleme prosesi, yeşil kompaktların sinterleme süreci boyunca mikroyapısal bozulmaların önüne geçilmesini amaçlayan kontrollü bir ısıtma işlemi tekniğidir. Bu yöntemde, numuneler başlangıçta nispeten düşük bir sıcaklığa kadar hızla ısıtılır ve bu sıcaklıkta kısa süre bekletilir. Ardından, numuneler daha yüksek sinterleme sıcaklığına çıkarılmadan önce bu düşük sıcaklıkta bir ara bekleme gerçekleştirilir. Böylece, tane büyümesinin önüne geçilerek mikroyapının homojenliğinin korunması sağlanır (Yang et al., 2025).

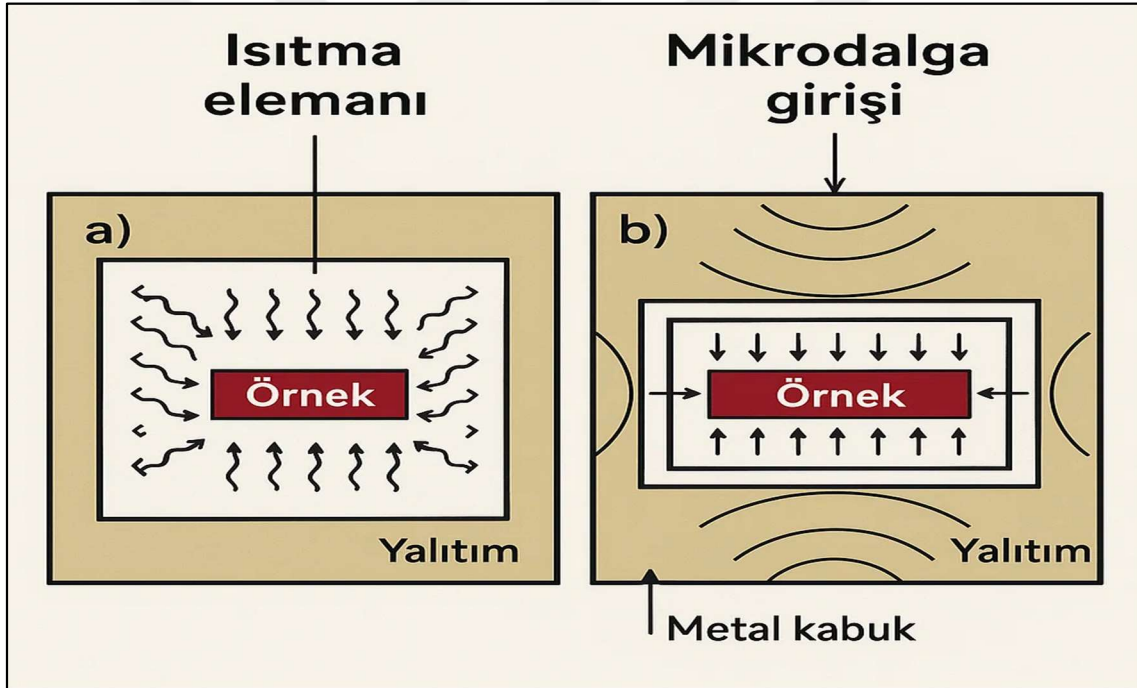
İki aşamalı sinterlemenin ilk ısıtma aşamasında, hızlı ısıtma ile malzeme, sinterleme için kritik kabul edilen yaklaşık %85–90 arası bir yoğunluğa erişir. Bu aşamada uygulanan düşük sıcaklık ve kısa bekleme süresi, tane sınırlarında aşırı büyümenin başlamasını engeller. Ardından gelen ikinci aşama ise daha düşük sıcaklıkta daha uzun sürede tamamlanır ve bu evrede malzemenin tam yoğunluğa ulaşması sağlanır. Bu strateji sayesinde, geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla hem mikroyapının istenilen düzeyde korunması hem de nihai mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi mümkün olur. (Yang et al., 2025)



Şekil 1. 2. İki basamaklı sinterlemenin sıcaklık zaman grafiği (Lóh ve ark.,2016)

1.2.3. Mikrodalga sinterleme

Mikrodalga sinterleme, elektromanyetik dalgaların malzemenin hacmi içinde doğrudan ısıya dönüştürülmesine dayanan ileri düzey bir sinterleme yöntemidir. Bu teknikte yaygın olarak kullanılan 2.45 GHz frekansındaki mikrodalga radyasyonu, malzeme içerisindeki serbest ve bağlı yüklerin hareketini tetikleyerek enerji kaybına ve buna bağlı olarak doğrudan içsel ısı üretimine yol açar. Konvansiyonel sinterleme yöntemlerinin aksine, ısıtma dış ortamdan içeriye doğru iletilmez; bunun yerine tüm hacimde eş zamanlı ısıtma sağlanır. Bu durum hem ısı verimliliği artırmakta hem de sinterleme süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır (Ren et al., 2025). Konvansiyonel ve mikrodalga sinterlemenin ısı akışı Şekil 1.3'te gösterilmiştir.

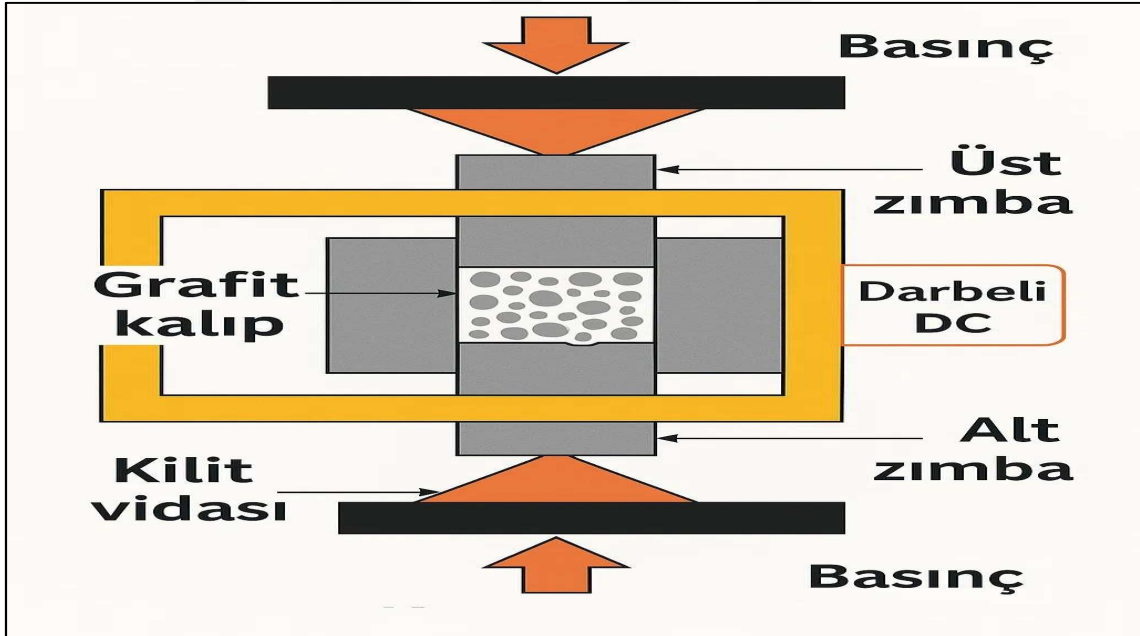


Şekil 1. 3. Konvansiyonel ve mikrodalga sinterlemenin ısı akışı (Lin ve ark., 2025)

1.2.4. Kıvılcım plazma sinterleme

Kıvılcım Plazma Sinterleme (Spark Plasma Sintering – SPS), toz metalurjisi alanında yoğunluk kazandırma süreçlerinde devrim yaratan, hem elektriksel hem de mekanik enerjiyi kullanan yenilikçi bir sinterleme yöntemidir. SPS sürecinde, toz malzeme genellikle grafit

kalıplar içine yerleştirilir ve üzerine eşzamanlı olarak doğru akım (DC) ve mekanik basınç uygulanır. Kıvılcım Plazma Sinterlemenin şematik gösterimi Şekil 1.4'te verilmiştir. Bu eşzamanlılık, sinterleme sıcaklıklarının düşürülmesine, sinterleme süresinin kısaltılmasına ve tane büyümesinin engellenmesine olanak tanır. Özellikle Nikel esaslı alaşımlarda, SPS ile düşük sıcaklıklarda dahi yüksek yoğunluk ve mikro yapısal homojenlik elde edilmektedir (Rahman & Ravi Chandran, 2025). Süreç, aynı zamanda malzeme içindeki heterojen elementlerin kontrollü dağılımını da teşvik ederek, alaşım bütünlüğünü artırır. SPS sistemlerinde kullanılan kısa darbe akımı, geleneksel ısı işlemlere kıyasla çok daha az enerji gerektirir. Bu nedenlerle, SPS yöntemi günümüzde ileri düzey metalürjik araştırmalarda tercih edilen bir teknolojidir. Ayrıca SPS, hızlı difüzyon yolları sağlayarak çok fazlı yapılar arasında uyumlu geçişlere olanak tanır. Bu mekanizma, özellikle alaşım kompleksliği yüksek sistemlerde mikroyapısal dengeyi kolaylaştırmaktadır (Pei ve ark., 2025).



Şekil 1. 4. Kıvılcım plazma sinterleme şematik gösterimi (Ujah ve ark.,2024)

Kıvılcım Plazma Sinterlemenin Avantajları ve Dezavantajları: SPS yönteminin başlıca avantajları arasında hızlı ısınma oranları, kısa sinterleme süreleri, yüksek yoğunlukta ürün elde etme kapasitesi ve düşük sıcaklıkta sinterleme yer alır. Bu özellikler sayesinde özellikle kırılgan ve zor sinterlenen malzemeler için oldukça uygundur. Ancak SPS sistemleri genellikle yüksek maliyetlidir ve kalıp ömrü gibi konularda sınırlılıklar barındırır.

Ayrıca üretim ölçeğinin laboratuvar düzeyinden endüstriyel boyuta taşınması hâlâ bazı teknik zorluklar içermektedir. Buna ek olarak, SPS'in proses süresi boyunca oluşabilecek termal gerilimler, malzemenin iç yapısında çatlak oluşumuna neden olabilir. Yüksek frekanslı akım darbeleri, özellikle karmaşık geometrilere sahip ürünlerde kalıp hasarına yol açabilir. Bu nedenle, SPS'in avantajları kadar proses parametrelerinin hassas kontrolü de başarı için kritik öneme sahiptir. Ayrıca SPS ile işlenen kompozitlerde, malzeme bileşenleri arasındaki mikroyapısal sınırların kararlılığı süreç optimizasyonuna bağlıdır. Bu sınırlar, ürünün uzun dönem mekanik stabilitesi üzerinde doğrudan etkilidir (Liu et al., 2025)

SPS Kullanım Alanları: SPS teknolojisi, özellikle ileri seramikler, yüksek sıcaklık yapısal malzemeler, süperalaşımlar, kompozitler ve nükleer uygulamalar gibi geniş bir yelpazede kullanılmaktadır. Bu yöntemin bor nitrür (h-BN) gibi geleneksel olarak zor şekillendirilen seramiklerde dahi yüksek yoğunluk ve olağanüstü mekanik özellikler sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca SPS ile sentezlenen malzemelerin nötron radyasyon koruma kapasitesine sahip olması, bu yöntemin savunma ve uzay teknolojileri gibi özel alanlarda da tercih edilmesini sağlamaktadır (Wang & Li, 2025).

SPS ayrıca, çevresel etkilere dayanıklı fonksiyonel malzemelerin üretiminde de giderek artan bir rol oynamaktadır. Özellikle elektromanyetik zırhlama ve ısı iletim performansı açısından kritik bileşenler, bu yöntemle etkin şekilde geliştirilebilmektedir. Hızlı üretim döngüsü ve üstün yapısal performans özellikleri, SPS'i gelecek odaklı teknolojik çözümler için ideal bir sinterleme alternatifine haline getirmiştir. Aynı zamanda enerji teknolojileri alanında, termal bariyer kaplamalar ve katı oksit yakıt hücrelerinde de SPS'in kullanımı yaygınlaşmaktadır (Moison et al., 2025).

1.3. Sıvı Faz Oluşumu ve Önemi

Toz metalurjisi ve özellikle gelişmiş sinterleme tekniklerinde, sıvı faz oluşumu, yoğunluk artışı ve mikroyapı kontrolü açısından kritik bir rol oynamaktadır. Sıvı faz, sinterleme sıcaklığında bileşenlerden birinin ya da reaksiyonla oluşan yeni bir fazın kısmen erimesiyle meydana gelir ve partiküller arası boşlukların doldurulmasını sağlayarak kompakt yapının oluşumunu hızlandırır. Geçici sıvı fazlar ise, sadece sinterleme süreci sırasında oluşup işlem sonrasında katı faza dönüşen yapılar olup, geçici bağlanma ve yoğunluk sağlama mekanizmaları açısından önemlidir (Vidyuk et al., 2025).

1.3.1. Geçici sıvı fazın tanımı

Geçici sıvı faz, sinterleme işlemi sırasında geçici olarak oluşan, fakat soğuma süreciyle birlikte yeniden katılaştıran bir faz türüdür. Bu fazlar, malzeme bileşenlerinin lokal reaksiyonları ya da düşük erime noktalarına sahip ikincil bileşenlerin kısa süreli erimesiyle meydana gelir. Sinterleme sürecinde difüzyon hızını artırarak, partiküller arası bağların daha hızlı kurulmasını sağlar. Geçici sıvı faz oluşumu, özellikle çok bileşenli sistemlerde, hızlı ısıtma ve soğutma uygulamalarıyla desteklenerek mikroyapının sıkılaşmasına katkı sunar (Zhou et al., 2025).

Bu fazlar genellikle mikro düzeyde gözlemlenir ve sinterleme sonrasında malzeme içerisinde görünür kalıntı bırakmaz. Ancak etkileri yoğunluk, bağ bütünlüğü ve gözenek yapısı üzerinde kalıcıdır. Bu nedenle, geçici sıvı fazlar modern sinterleme tekniklerinde kontrollü bir şekilde kullanılmakta ve yüksek performanslı malzemelerin üretiminde tercih edilmektedir (Jin ve ark., 2024).

1.3.2. Geçici sıvı fazın mikroyapıya etkisi

Geçici sıvı fazın sinterleme sırasında kısa süreli olarak varlık göstermesi, malzeme mikroyapısında önemli değişimlere neden olur. Bu fazlar, partiküller arası yüzey enerjisini azaltarak bağ oluşumunu hızlandırır ve gözeneklerin kapanmasını sağlar. Sonuç olarak daha kompakt, homojen ve ince taneli mikroyapılar elde edilir. Özellikle nano yapıları kompozitlerde, geçici sıvı fazın etkisiyle tane sınırı hareketliliği artar ve bu da mikroyapının kontrol edilebilirliğini iyileştirir (An ve ark., 2025).

Mikroyapı üzerinde en belirgin etkilerden biri, fazların daha düzgün dağılması ve yoğunluk farklarına bağlı lokal boşlukların azaltılmasıdır. Bu durum, özellikle seramik matrisli kompozitlerde kırılma mekanizmasının yönlendirilmesini sağlar. Böylece mekanik dayanımın yanı sıra termal ve aşınma dirençlerinde de belirgin artışlar elde edilmektedir. (Kuo et al., 2024).

1.3.3. Geçici sıvı fazın mekanik özelliklere etkisi

Geçici sıvı faz oluşumu, mekanik özellikler üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Bu fazlar, sinterleme sırasında partiküller arasında daha fazla yüzey alanı oluşturduğu için bağ

dayanımını artırır ve bu da sertlik, dayanıklılık ve kırılma tokluğu gibi mekanik parametreleri iyileştirir. Özellikle hızlı sinterleme teknikleri ile birleştirildiğinde, geçici sıvı fazın etkisiyle mikroyapıdaki gözenekler minimuma indirgenir ve bu da yüksek yoğunluklu, sağlam yapıların elde edilmesini sağlar (Fernandes et al., 2025).

Yapılan deneysel çalışmalar, geçici sıvı faz kullanılarak sinterlenen kompozitlerin klasik katı hal sinterleme ile üretilen örneklerle göre %20'ye varan oranda daha yüksek Vickers sertliği sergilediğini ortaya koymuştur. Bu gelişmeler, özellikle yapısal uygulamalar ve aşınma dayanımı gerektiren mühendislik çözümlerinde önemli avantajlar sunmaktadır (Basnet et al., 2024).



2. LİTERATÜR TARAMASI

Asadian ve arkadaşları, Mo-SiC kompozitlerinin SPS yöntemi ile üretimi sırasında kontrollü faz oluşumunun mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma, %10-40 oranında SiC içeren kompozitlerin mikroyapısında Mo₂C, Mo₃Si ve Mo_{4.8}Si₃C_{0.6} gibi fazların oluştuğunu ortaya koymuştur. %20 SiC içeriğine sahip kompozit, en yüksek sertlik (12.88 GPa) ve mikro yapısal homojenlik sunarken, daha yüksek SiC içeriği kırılğan fazların oluşumu nedeniyle mekanik özelliklerin azalmasına neden olmuştur. Sinterleme sürecindeki faz dönüşümleri, kompozitlerin termal stabilite ve aşınma direncini artırmıştır.

Saviot ve arkadaşları, Al_xCoCrFeNi (x = 0.3 ve 1) yüksek entropili alaşımlarını mekanik aktivasyon ve spark plazma sinterleme (SPS) yöntemleriyle üreterek faz ve mikro yapı oluşumunu araştırmıştır. Çalışmada, Al içeriğinin artmasının mekanik alaşımlama süresini uzattığı ve bunun sinterleme sonrası tane boyutu ile mikro yapı homojenliğini etkilediği belirlenmiştir. Al_{0.3}CoCrFeNi alaşımı FCC (yüz merkezli kübik) fazı ve nanometrik B₂ çökeltileri içerirken, AlCoCrFeNi alaşımı BCC'den FCC'ye faz dönüşümü ve sigma fazı çökmesi ile heterojen bir mikro yapı sergilemiştir. Sinterleme sıcaklığının artışı, FCC faz içeriğini artırarak mekanik özelliklerin optimize edilmesine olanak sağlamıştır.

Huang ve arkadaşları, elmas aletler için Fe₃Al bazlı metal bağ materyalleri üzerinde çalışmıştır. İki aşamalı reaktif sinterleme yöntemini kullanarak üretilen Fe₃Al bağların, geleneksel Fe alaşımlı bağlara kıyasla üstün aşınma direnci ve mekanik özellikler sunduğu gözlemlenmiştir. 1150-850°C'de yapılan sinterleme işlemi, Fe₃Al bağlarının yoğunluğunu ve sertliğini artırmış, aynı zamanda elmas gritlerinin grafitlenmesini önlemiştir. Bu yöntemle üretilen elmas aletlerin, sert ve kırılğan malzemelerin işlenmesinde daha yüksek performans sergilediği belirlenmiştir.

Jiang ve arkadaşları, CoCrFeMnNi yüksek entropili alaşımında (HEA) heterojen tane yapısı oluşturmak için spark plazma sinterleme (SPS) yönteminin yüksek sıcaklık gradyanını kullanmıştır. Bu süreç, tane boyutlarının 140 nm ile 5 µm arasında değişen heterojen bir yapıya dönüşmesini sağlamış ve böylece malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Elde edilen sonuçlar, 1,03 GPa akma dayanımı ve %9,5 düzgün uzama ile dikkat çekmektedir. Bu bulgular, mukavemet ve süneklik arasındaki geleneksel ticaret-off probleminin aşılabileceğini göstermektedir.

Kanyane ve arkadaşları, eşatomik TiAlMoSiNi yüksek entropili alaşımını SPS yöntemiyle üretmiş ve bu alaşımın yüksek sıcaklıkta işlenmesi sonucunda %98,8'lik bir bağıl yoğunluk, 612 HV maksimum sertlik ve yüksek oksidasyon direnci sergilediğini rapor etmiştir. Bu sonuçlar, SPS yönteminin yüksek sıcaklık ve hızlı sinterleme avantajlarıyla mekanik özellikleri optimize edebileceğini ortaya koymaktadır.

Xie ve arkadaşları, SPS ile işlenmiş Al_{0.7}CoCrFeNi yüksek entropili alaşımında faz dönüşümünün mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma, BCC'den FCC'ye olan faz dönüşümünün tane boyutlarını küçülterek (5,66 µm'den 3,10 µm'ye) malzemenin sünekliğini ve çekme dayanımını artırdığını, ancak sertlik değerlerini azalttığını (372,5 HV'den 328,4 HV'ye) ortaya koymuştur. Faz dönüşümünün, daha düşük difüzyon hızı nedeniyle malzeme yoğunlaşmasını azalttığı da vurgulanmıştır.

Peng ve arkadaşları, FeCoCrNi-Mo yüksek entropili alaşımını (HEA) spark plazma sinterleme (SPS) ve vakumlu sıcak pres sinterleme yöntemleriyle üretmişlerdir. Çalışmada, SPS ile üretilen numunelerin, vakumlu sıcak pres yöntemiyle üretilenlere kıyasla daha düşük sertlik ve aşınma direnci sergilediği belirtilmiştir. Bununla birlikte, SPS'in yüksek entropili alaşımlar için düşük sıcaklıkta hızlı sinterleme işlemleri açısından uygun bir yöntem olduğu vurgulanmıştır.

Podobová ve arkadaşları, Ti-Cu tabanlı kompozitlerin grafenle takviye edilmesi ve atık metal malzemelerle zenginleştirilmesi üzerine çalışmıştır. Spark plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle üretilen bu kompozitlerin aşınma davranışları, mekanik özellikleri ve mikro yapıları detaylı şekilde analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, farklı bileşimlerin aşınma karakteristiklerinde belirgin farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu çalışma, atık metallerin yeniden kullanımına ve Ti-Cu bazlı kompozitlerin malzeme tasarımının iyileştirilmesine önemli katkılar sağlamıştır.

Meng ve arkadaşları, hidroksiapatit (HAP) ve 45S5 biyoglass katmanlı seramik kompozitlerini spark plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle üretmiştir. Çalışmada, 950°C sıcaklıkta sinterlenen kompozitlerin bükülme mukavemetinin 153,22 MPa ve kırılma enerjisinin 2049 J·m⁻² olduğu belirlenmiştir. Bu bulgular, biyomedikal ve kemik tamir malzemelerinde kullanılabilecek yüksek performanslı seramiklerin geliştirilmesi için önemli bir temel oluşturmuştur.

Liu ve arkadaşları, CUG-1A Ay regolit simülanının SPS ile sinterlenmesi sonucu mekanik ve termal özelliklerin büyük ölçüde artırıldığını göstermiştir. En iyi sonuçlar, 1273 K sıcaklıkta sinterlenmiş örneklerde elde edilmiştir; %99,7 yoğunluk, (2,65 W·m⁻¹).K⁻¹

1) Termal iletkenlik ve 370,2 MPa basma dayanımı ile bu materyaller, Ay'da yerinde kaynak kullanımı için büyük bir potansiyel sunmaktadır.

Bahamirian ve arkadaşları (2021), reaktif spark plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle üretilen SiC-B4C-Ni hibrit kompozitlerde karbon nanotüplerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışmada, karbon nanotüplerin malzemenin sertliğini ve tokluğunu artırdığı, aynı zamanda çatlak ilerlemesini engelleyerek mekanik dayanımı iyileştirdiği belirtilmiştir. Bu hibrit kompozitlerin sinterleme sürecinde karbon nanotüplerin homojen dağılımı, mikro yapının yoğunlaşmasını artırmış ve mekanik performansı optimize etmiştir. Sonuçlar, bu tür kompozitlerin özellikle aşınmaya dirençli ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için büyük bir potansiyel taşıdığını göstermektedir.

Orooji ve arkadaşları (2019), spark plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle mullite-TiB₂-CNT (karbon nanotüp) hibrit kompozitlerinin hazırlanmasını ve bu kompozitlerin mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma, karbon nanotüplerin mullite ve TiB₂ matrisleri ile sinerjik etkiler göstererek kompozitin sertlik, yoğunluk ve tokluk gibi mekanik özelliklerini geliştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, TiB₂'nin sinterleme sıcaklığında oluşan reaktif bağ yapılarının, malzemenin çatlak ilerlemesine karşı direnç sağladığı vurgulanmıştır. Bu hibrit kompozitlerin, yüksek mukavemet ve aşınma direnci gerektiren ileri mühendislik uygulamaları için uygun olduğu belirtilmiştir.

Zhang ve arkadaşları (2024), sıcak pres sinterleme yöntemiyle üretilen B₄C-Al₂O₃ kompozit seramiklerin mekanik özelliklerini ve tokluk mekanizmalarını incelemiştir. Çalışma, Al₂O₃'ün B₄C matrisine katkısının malzemenin sertlik, tokluk ve yoğunluk gibi mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ayrıca, malzemenin çatlak ilerlemesine karşı direncini artıran mekanizmaların, mikro yapıdaki taneciklerin yeniden düzenlenmesi ve ara yüzey bağlarının güçlendirilmesi olduğu belirtilmiştir. Bu kompozitlerin, yüksek mukavemet ve aşınma dayanımı gerektiren ileri seramik uygulamaları için uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Yue Wen ve arkadaşları Si₃N₄ seramiği ile nikel esaslı süperalaşım GH4169 arasında Ti/Au/Ni ara tabakaları kullanılarak kısmi geçici sıvı faz (PTLP) birleştirme yöntemiyle oluşturulan bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Araştırmada, 1100 °C'de 90 dakika tutulan örneklerde Au-Ni sıvı fazının, Ti folyosunu eriterek Si₃N₄ ile reaksiyona girip TiN tabakası oluşturduğu ve bu tabakanın mikroyapıda homojenliği sağladığı belirtilmiştir. Sıvı fazın ara bölgede yoğunluğu optimize ederek kalınlıkları dengeli bir şekilde dağıttığı, aynı zamanda plastik deformasyon kabiliyeti yüksek Au-Ni(s,s) fazı

sayesinde artık gerilimin azaltıldığı ifade edilmiştir. Mekanik olarak, en yüksek makaslama mukavemeti 131 MPa olarak ölçülmüş; bu değer, sıvı fazın kontrollü katılaşması ve faz geçişlerinin homojen gerçekleşmesiyle doğrudan ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, mikroyapıdaki NiTi ve Ni₃Ti fazlarının dağılımı, sıcaklık ve süreye bağlı olarak farklılık göstermiş, bu da yoğunluk profilini ve mikrosertlik dağılımını önemli ölçüde etkilemiştir. Bu bulgular, sıvı fazın hem yoğunluk hem de mekanik ve mikroyapısal bütünlük üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermiştir (Yue Wen ve ark., 2025).

Cao ve arkadaşları Cu elementi ilaveli GH4061 nikel esaslı süperalaşımın katılaşma sürecini deneysel karakterizasyon ve faz-alanı (phase-field) simülasyonlarıyla detaylı şekilde incelemiştir. Çalışmada, Cu ilavesinin sıvı faz içerisindeki alaşım elementlerinin difüzyonunu ve mikrosegregasyon davranışını etkileyerek hem mikroyapıyı hem de yoğunluk profilini değiştirdiği vurgulanmıştır. Cu oranı arttıkça tane boyutu, ikincil dendrit kol aralığı (SDAS) ve birincil karbürlerin hacimce oranı önce artmış, ardından azalmıştır. Bu durum sıvı fazdaki solüt elementlerin (özellikle Nb, Mo, Ti) segregasyon seviyesinin düşmesi ve katı-sıvı arayüz enerjisinin artması ile ilişkilendirilmiştir. Faz-alanı simülasyonları ayrıca sıvı fazın hacim fraksiyonundaki değişimin, karbürlerin şekil dönüşümünü şerit yapıdan blok yapıya doğru yönlendirdiğini göstermiştir. Sonuç olarak, sıvı fazın difüzyon karakteristikleri ve enerji parametreleri, mikroyapı homojenliği ve mekanik dayanım açısından belirleyici olmuş; böylece optimize Cu içeriği ile yoğunluğu iyi dengelenmiş ve mekanik olarak daha kararlı bir yapı elde edilmiştir (Cao ve ark., 2025).

Ebrahimi ve arkadaşları enerji yönetiminde kullanılmak üzere faz değişim malzemelerini (PCM) kapsüllemek amacıyla nikel/karbon kompozit köpüklerin yerinde sentezine dayalı bir çalışma yürütmüştür. Polimerik HIPE yapıdan türetilen ve pirolizle 900 °C'de karbonize edilen köpükler, iyi dağılmış yaklaşık 50 nm boyutlu nikel nanoparçacıkları içermektedir. Nikel nanoparçacıkları, sadece elektriksel ve termal iletkenliği artırmakla kalmamış; aynı zamanda karbon matrisinde yüksek kristallik düzeyine sahip grafitik bölgelerin gelişimini katalize etmiştir. Bu grafitik yapılar, mikroyapıda daha homojen ve dayanıklı bir iskelet sağlamıştır. Sıvı fazdaki Ni partiküllerinin kontrollü dağılımı sayesinde, kompozitlerdeki yoğunluk profili istikrar kazanmış ve gözenekli yapının sürekliliği korunmuştur.

Qoriatı ve arkadaşları, nikel içeren elektrokaplama atık sularından geri kazanım amacıyla membran distilasyon (MD), destekli sıvı membran (SLM) ve elektrodpozisyon (ED) tekniklerini entegre ederek yenilikçi bir sistem geliştirmiştir. Bu süreçte, sıvı faz

değişimi ve taşıyıcı ortamın kontrolü, metal iyonlarının ayrılması ve geri kazanımı için kritik bir rol oynamıştır. Çalışmada, Ni iyonlarının D2EHPA/Isopar-G taşıyıcı sistemi içinde sıvı faza geçişiyle birlikte yüksek derecede seçici bir taşıma sağlanmış ve stripping aşamasında Ni iyonlarının %76,05 oranında başarıyla geri kazanıldığı belirtilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

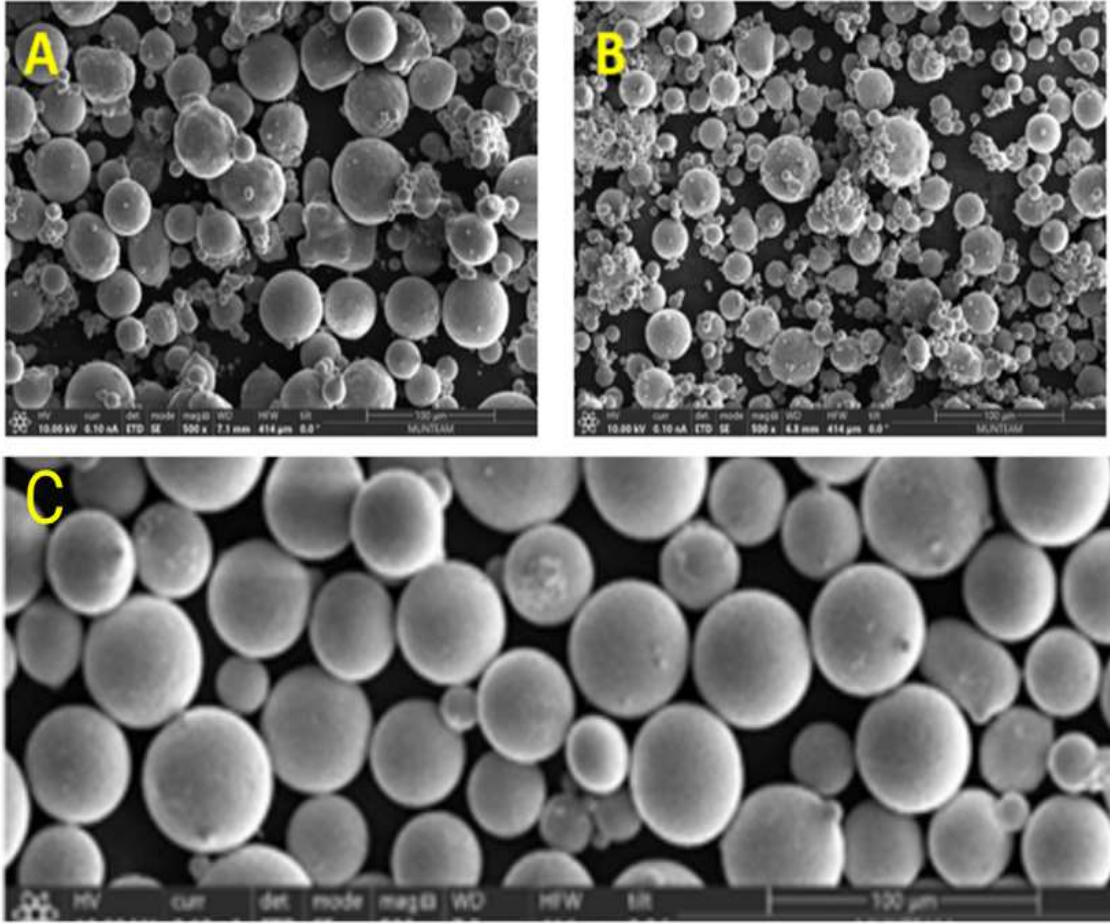
Deneysel çalışma kapsamında, üç ana grup altında toplam 9 farklı numune serisi tasarlanmıştır. Her seriden beşer adet olmak üzere toplamda 45 adet numune üretilmiştir. Çalışma sürecine ilişkin detaylı akış şeması Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1. İş Akış Şeması

No	İşlem Başlığı	Açıklama
1	Numune Örneklerinin Temini	Nikel esaslı alaşım (Ni, Cr, Si, Fe, B, C) ile birlikte AlSi12 ve Al katkılı alaşım elementleri temin edilmiştir.
2	Numunelerin Tartılması	Hazırlanan numuneler, yüksek hassasiyetli bir terazide uygun miktarlarda tartılmıştır.
3	Karıştırma İşlemi	Ağırlıkça %2 oranında Polietilen Glikol (PEG) eklenen karışım, 10 mm çapındaki krom rulman bilyeleri ile birlikte plastik kaplarda karıştırıcıya alınmış ve 35–40 devir/dakika hızında 45 dakika boyunca karıştırılmıştır.
4	Numune Kalıplama	Hazırlanan karışım numuneleri, 40×10×5 mm boyutlarında disk şeklinde grafit kalıplara yerleştirilerek presleme işlemi uygulanmıştır.
5	Plazma Sinterleme İşlemi	Sinterleme, 950 °C sıcaklıkta, 500 mmHg vakum altında ve 35 MPa uygulama basıncıyla 4 dakika süreyle koruyucu N ₂ atmosferi altında gerçekleştirilmiştir.
6	Ölçüm ve Karakterizasyon	1) Yoğunluk ile Ağırlık Ölçümleri 2) Sertlik Ölçümleri (HV) 3) Üç Noktalı Eğme (TRS) Testi 4) Mikroyapı Karakterizasyonu (Taramalı Elektron Mikroskobu) 5) Kırık Yüzey Analizi 6) XRD (X ışını kırılımı) Analizleri yapılmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Numunelerin Üretimi

Ticari olarak piyasada satılan ortalama 63 Mikron ortalama toz boyutunda Al, ortalama 40 mikron toz boyutunda AlSi12, ortalama 30 mikron boyutunda (TMC Powder A.Ş. Türkiye), NiCr10. B2Si3.2C0.38Fe2.4 (Sentes Bir A.ş. Türkiye) firmalarının ürettiği oldukları tozlar kullanılmıştır. Numuneleri üretmek için kullanılan tozların SEM görüntüleri Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 1. Kullanılan tozların taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri A)Al, B)AlSi12, C)NiCr10B2Si3.2C0.38Fe2.4 alaşımı

AlSi12, Al ve NiCr10.B2Si3.2C0.38Fe2.4 Alaşımı tozları Tablo 3.2’de belirtilen bileşim oranlarına uygun olarak, ± 0.01 g hassasiyete sahip Japon menşeli AND FZ-500İ marka hassas terazi Şekil 3.2’de gösterilen tartı ile tartılarak hazırlandı.

Tablo 3. 2. Numunelerin karışım oranları

No	Katkı Türü	Katkı Ağırlık Oranı (%)	Matris Ağırlık Oranı (%)	Teorik Yoğunluk (g/cm ³)
S1	AlSi12	2	98	7.98
S2	AlSi12	4	96	7.67
S3	AlSi12	6	94	7.39
S4	AlSi12	8	92	7.12
S9	Al	2	98	7.99
S10	Al	4	96	7.68
S11	Al	6	94	7.4
S12	Al	8	92	7.13
S13	NiCrBSiFe	0	100	8.123

Ana matris malzemesi olarak NiCr10.B2Si3.2C0.38Fe2.4 alaşımı kullanılarak içerisine sırası ile ağırlıkça %2-4-6-8 oranında AlSi12 ile Al malzemeleri eklenmiştir.



Şekil 3. 2. Hassas terazi ile numune tartılması

Tablo 3.2.'ye göre hazırlanan toz karışımları kontaminasyonu engellemek amacı ile yüksek yoğunluklu polietilen bir kap içerisinde hacimce 1/1 oranınca Cr kaplı çelik bilyeler kullanılarak şekil 3.3'te gösterilen turbula mikser (Çelmak T5-F, Türkiye) ile 30 dakika boyunca 40 dev/dak dönüş hızında kuru olarak karıştırıldı. Daha sonra içerisinde ağırlıkça %1 oranında Polietilen Gilikol PEG400 eklenerek 15 dakika daha karıştırıldı.



Şekil 3. 3. Turbula mikser

Hazırlanan numuneler, Şekil 3.4'te sunulan grafit kalıpların bölmelerine dikkatlice yerleştirilerek sinterleme işlemine uygun hale getirilmiştir. Plazma sinterleme sürecine geçilmeden önce, kalıp bütünlüğünün korunabilmesi amacıyla grafit kalıp, alüminyumdan imal edilmiş bir sıkıştırma çerçevesi ile sabitlenmiştir. Bununla birlikte, sistemde istenmeyen elektriksel iletimin engellenmesi ve hedeflenen sıcaklık profilinin yalnızca kalıp hacmi içerisinde elde edilebilmesi amacıyla, çerçevenin çevresine yalıtım amaçlı olarak asbest esaslı plakalar yerleştirilmiştir. Hazırlanan toz karışımları, her bir bölmesi 40×10×5 mm boyutlarında olan dikdörtgen kesitli grafit kalıplara yerleştirilmiştir. Bu kalıplarda tercih edilen grafit malzeme, yüksek sıcaklık altında hem elektriksel iletkenlik hem de mekanik mukavemet özelliği göstermesi nedeniyle üretimde avantaj sağlamaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklık ve basınç koşullarında şekil bozulmalarına karşı dirençli yapısıyla numunelerin istenilen boyutlarda üretilmesine olanak tanımaktadır.

Grafit kalıplar, parça hâlinde tasarlanmış olup bu sayede presleme işlemi sonrasında numuneler kolaylıkla kalıptan çıkarılabilmekte ve aynı kalıplar birden fazla üretim için tekrar kullanılabilir. Kalıp çevresi, yalıtkan seramik bir malzeme ile kaplanarak hem elektriksel hem de termal izolasyon sağlanmıştır. Kalıp sisteminin en dış yüzeyi ise alüminyum bir çerçeve ile desteklenerek, sinterleme işlemi sırasında mekanik stabilitenin korunması amaçlanmıştır. Presleme esnasında kütle kaybını önlemek ve tozların kalıplara yapışmasını engellemek amacıyla, kalıp yüzeylerine sıvı formda bor nitrid uygulanmıştır.



Şekil 3. 4. Numunelerin sinterlendiği grafit kalıp

Grafit kalıp içerisindeki numuneler Şekil 3.5’te gösterilen PLC kontrollü ve direk dirençli ısıtma tekniği ile çalışan 6. Nesil Kıvılcım Plazma Sinterleme makinesi kullanılarak (ÇELMAK SPS 160 V, Türkiye) yapıldı. Sinterleme pulse on/off oranı 35/2 yapıldı. Sıcaklık ölçümleri, grafit kalıbın merkezine yerleştirilen, maksimum 1200 °C ölçüm kapasitesine sahip K tipi bir termokupıl kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sürecinin başlangıcında, matris karışımına ilave edilen polietilen glikol (PEG) bağlayıcısının yapısal matristen uzaklaştırılmasını sağlamak amacıyla, sistem 540 °C sıcaklıkta ve 20 MPa uygulama basıncı altında 120 saniye süreyle bekletilmiştir. Bu aşamanın ardından vakum kapağı kapatılmış ve ısıtma işlemi 200 °C/dakika oranında, 35 MPa sabit basınç altında devam ettirilmiştir. Sinterleme, 950 °C sıcaklıkta, 240 saniye boyunca, %99.9 saflıktaki azot (N₂) gazı ile sağlanan inert atmosfer koşullarında ve yüksek vakum altında gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemi bittikten sonra cihaz içerisinde vakum ve koruyucu

gaz altında 35 MPa 'da 200 °C ye soğuyana kadar cihaz içerisine bırakıldı. Sinterleme işleminin bitmesinden sonra grafit kalıp makineden çıkartılarak oda sıcaklığına kadar soğuması beklendi. 40x10x5 mm boyutunda her seriden 5'er adet numune üretildi.



Şekil 3. 5. Kıvılcım plazma sinterleme cihazı

Numuneler, herhangi bir ön soğuk presleme işlemine tabi tutulmaksızın, doğrudan toz karışımlarının grafit kalıplara doldurulması ile hazırlanmıştır. Üretim öncesinde, her numune için katkı elementlerinin bileşim oranlarına göre teorik özkütle hesaplaması yapılmıştır. Bu hesaplamalara dayanarak 2 cm³ hacme karşılık gelen toz miktarları 0,01 g hassasiyetinde bir analitik terazi ile tartılmıştır.

3.2. Karakterizasyon

Kıvılcım Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi ile üretilen numunelerin mikro yapı ve mekanik özelliklerinin analizine geçilmeden önce, bazı ön hazırlık işlemleri gerçekleştirilmiştir. Numune yüzeylerinde işlem sonrasında oluşabilecek oksit tabakaları ile

bor nitrür (BN) kalıntılarının uzaklaştırılması amacıyla, tüm yüzeyler 600 mesh inceliğindeki su zımparası kullanılarak dikkatli bir şekilde zımparalanmıştır. Bu işlem, ölçüm ve gözlemlerin sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi için yüzeydeki kirleticilerin ve artıkların elimine edilmesini sağlamıştır. Yüzey hazırlığı tamamlanan numunelere ait görüntüler Şekil 3.6’da sunulmaktadır.



Şekil 3. 6. Yüzey temizliği yapılan numuneler.

3.2.1. Numunelerin hazırlaması

Numunelerin yüzey parlatma işlemleri, Munzur Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü Malzeme Laboratuvarı’nda bulunan Metkon Forcipol 202 (Türkiye) cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parlatma işleminden önce, numuneler uygun boyutlara getirilmek amacıyla sıvı soğutma ortamında çalışan Metkon Metacut M-250 model kesme cihazında, 1,1 mm kalınlığında silikon karbür (SiC) esaslı kesme diski ile kesilmiştir. Bu ön hazırlık işlemi, hem yüzey düzgünlüğünü sağlamak hem de sonraki mikroyapı analizleri için numunelerin standart hâle getirilmesini amaçlamaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3. 7. Numune parlatma ve kesme cihazı

Numuneler, yüzey parlatma işlemi kapsamında sırasıyla 300, 600, 800, 1000, 1200 ve 2000 mesh incelikteki su zımparaları kullanılarak mekanik olarak parlatılmıştır. Bu işlemin ardından, yüzeylerin mikroyapı incelemelerine uygun hale getirilebilmesi amacıyla, çuha bez üzerine uygulanan 3 mikron ve 1 mikron partikül boyutuna sahip elmas pastalar ile son parlatma işlemleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen düzgün yüzeyler, dağlama (etching) işlemine geçmeden önce etil alkol ile temizlenmiş ve kalıntılardan arındırılarak kurutulmuştur. Parlatma ve kesme işlemlerinde kullanılan cihazlara ilişkin görseller Şekil 3.8’de sunulmaktadır. Dağlama işlemi öncesinde, yüzeylere uygun kontrastın kazandırılması için Kallings No. 2 reaktifi (5 g Bakır (II) klorür (CuCl_2), 100 ml konsantre hidroklorik asit (HCl), 100 ml etanol) uygulanmıştır.

3.2.2. Yoğunluk ölçümü

Numunelerin yoğunluğu ve porozite oranlarının belirlenmesi amacıyla, Arşimet prensibine dayalı bir yoğunluk ölçüm yöntemi uygulanmıştır. Bu işlemde ASTM B-311 standardı referans alınarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Deney prosedürü kapsamında, numuneler önce kuru halde tartılmış, ardından sıcaklığı kontrol edilen saf su içeren bir kap içerisinde askıya alınarak ikinci kez tartılmıştır. Bu iki ölçüm verisi kullanılarak, numunelerin gerçek yoğunluk değerleri hesaplanmış ve gözeneklilik (porozite) oranları elde edilmiştir. Yoğunluk ölçüm setine entegre terazi sistemi ve kullanılan ekipmanlara ait görsel içerik Şekil 3.8’de sunulmaktadır.



Şekil 3. 8. Yoğunluk ölçüm işlemi

Yoğunluk değerleri aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır.

$$d = \frac{A \times E}{A - B}$$

Denklemden:

d: Numunenin özkütlesi

A: Numunenin havadaki kuru ağırlığı

B: Numunenin su içerisindeki ağırlığı

E: Suyun yoğunluğunu temsil etmektedir.

3.2.3. Sertlik ölçümü

Üretilen numunelerin makro sertlik değerlerinin belirlenmesi amacıyla, Emco Test - Durajet üçüncü nesil evrensel tip sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, Vickers sertlik birimi (HV) cinsinden gerçekleştirilmiştir. Her bir numune için dört ayrı noktadan ölçüm yapılmış, elde edilen değerlerin aritmetik ortalaması alınarak ilgili numunenin temsili sertlik değeri hesaplanmıştır. Sertlik ölçüm işlemlerinde kullanılan test cihazına ait görsel materyal Şekil 3.9’da sunulmaktadır.



Şekil 3. 9. Sertlik ölçüm cihazı

3.2.4. Üç noktalı eğilme (TRS) deneyi

Numunelerin eğilme mukavemetlerini belirlemek amacıyla, üç noktalı eğilme testi uygulanmıştır. Bu testler, ASTM B528-83a standardına uygun olarak, 1 mm/dakika çapraz kafa hızı ve 30 mm destek açıklığı ile gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar, Şekil 3.10’da sunulan 100 kN kapasiteli SHIMADZU marka evrensel test cihazı kullanılarak ve cihazla entegre çalışan TRAPEZIUMX yazılımı aracılığıyla yürütülmüştür. Eğilme testi sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda numunelerin kırılma tokluğu aşağıda verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 3. 10. Üniversal çekme, Basma, Üç noktalı eğilme test cihazı

$$\sigma = (3 \times P \times L) / (2 \times t^2 \times w)$$

Bu denklemde: P: Kırılmadan önceki yük,

L: Destek noktaları arasındaki mesafe

w: Numune yüksekliği

t: Numune kalınlığı

3.2.5. Elektron mikroskobu incelemeleri

Numunelerin mikroyapısal özelliklerini detaylı olarak incelemek amacıyla, elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, Şekil 3.11’de gösterilen Munzur Üniversitesi’ne ait Hitachi SU3500 model taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak, yüksek vakum koşulları altında yürütülmüştür. Yapılan gözlemlerle, uygulanan sinterleme işleminin etkinliği değerlendirilmiş ve üretilen numunelerin mikroyapısal bütünlükleri analiz edilmiştir. Ayrıca, alaşımlama işlemlerinin homojen bir şekilde gerçekleşip gerçekleşmediğini belirlemek amacıyla, numuneler üzerinde noktasal elementel analiz (EDS) ve element dağılım haritalama (MAP) çalışmaları da yapılmıştır.



Şekil 3. 11. FESEM Cihazı

3.2.6. XRD incelemeler

Üretilen numunelerin farklı katkıları ile sinterlenmeleri sonucunda numunelerde meydana gelebilecek faz yapılarını anlamak amacıyla şekil 3.12’de gösterilen Munzur Üniversitesinde bulunan Rigaku Mini Flex 600 Tabletop Bilgisayar Kontrollü X-Işınları Difraktometresi kullanılarak X-ışını kırınımı çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 3. 12. XRD Cihazı

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

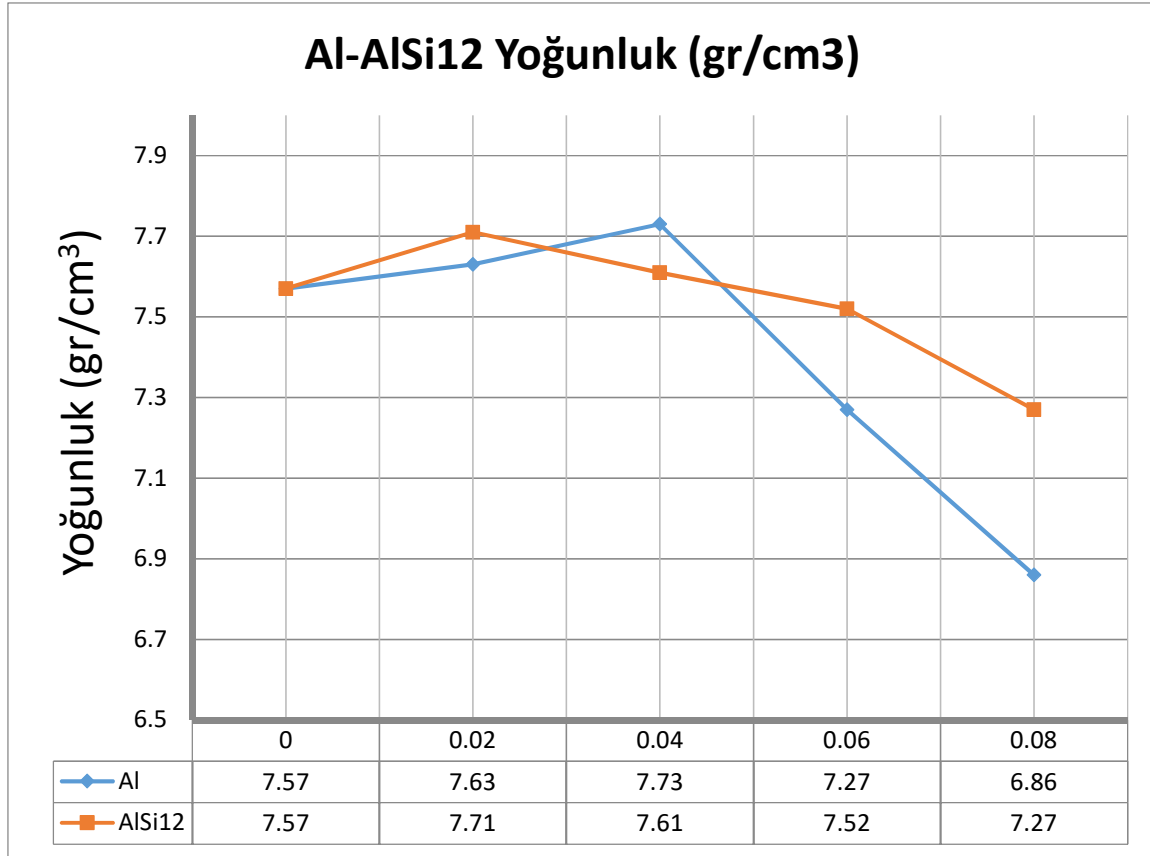
Bu çalışmada, sıcak presleme tekniği ile 35 MPa basınç, 950 °C’de 15 dakika süre ile üretilen numunelerin karakterizasyonlarının belirlenmesi için deney sonuçları bu kısımda anlatılacaktır.

4.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemiyle üretilen numunelere ait yoğunluk değerleri, sinterleme sırasında kullanılan katkı türü ve oranlarına bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Özellikle Al katkısı, sinterleme esnasında oluşan sıvı fazın gözenekleri doldurması sayesinde, numunelerin yoğunluğunu artırıcı etki göstermiştir. Bu durum, katkının mikroyapısal bütünlük üzerinde olumlu bir rol oynadığını göstermektedir.

Buna karşılık, AlSi12 katkısı hem düşük erime sıcaklığı hem de iyi akışkanlık özellikleri sayesinde sıvı faz oluşumunu daha etkin şekilde sağlamış, böylece daha kompakt ve homojen yapıların oluşmasına olanak tanımıştır. Ayrıca, AlSi12 katkısı içeren numunelerde, daha düşük yoğunluk değerlerine rağmen, yapısal olarak daha istikrarlı bir mikroyapı elde edilmiştir.

Farklı sinterleme sıcaklıklarında ve katkı oranlarında elde edilen yoğunluk verileri, sinterleme davranışının anlaşılması açısından önemlidir. Numunelerin katkı türüne göre yoğunluk değişimlerini gösteren grafik Şekil 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4. 1. Üretilen metal kompozit numunelere ait yoğunluk değerlerinin karşılaştırmalı grafiği

Üretilen numunelerin hesaplanan teorik yoğunluk değerleri, her bir numuneye ait alaşım bileşenlerinin yoğunlukları ve ağırlıkça oranları dikkate alınarak belirlenmiştir. Teorik yoğunluk değerleri, deneysel ölçümlerle elde edilen gerçek yoğunluk sonuçlarıyla karşılaştırılarak sinterleme etkinliği, porozite oluşumu ve mikroyapısal bütünlük hakkında önemli çıkarımlar yapılmasına olanak sağlamaktadır. Bu karşılaştırmalar sayesinde sinterleme parametrelerinin malzeme yapısına etkisi daha net bir şekilde anlaşılmakta ve üretim sürecinin optimizasyonuna katkı sağlanmaktadır. Özellikle teorik yoğunluk ile deneysel yoğunluk arasındaki fark, gözeneklilik miktarının dolaylı bir göstergesi olarak değerlendirilmekte ve mikro yapıdaki boşlukların dağılımı hakkında fikir vermektedir. Ayrıca bu değerlendirme, malzemenin mekanik özellikleriyle doğrudan ilişkili olan yoğunluk homojenliğinin belirlenmesinde de kritik bir rol oynamaktadır. Bu tür analizler, sadece laboratuvar düzeyinde değil, endüstriyel ölçekte üretim süreçlerinde kalite kontrol açısından da büyük önem taşımaktadır.

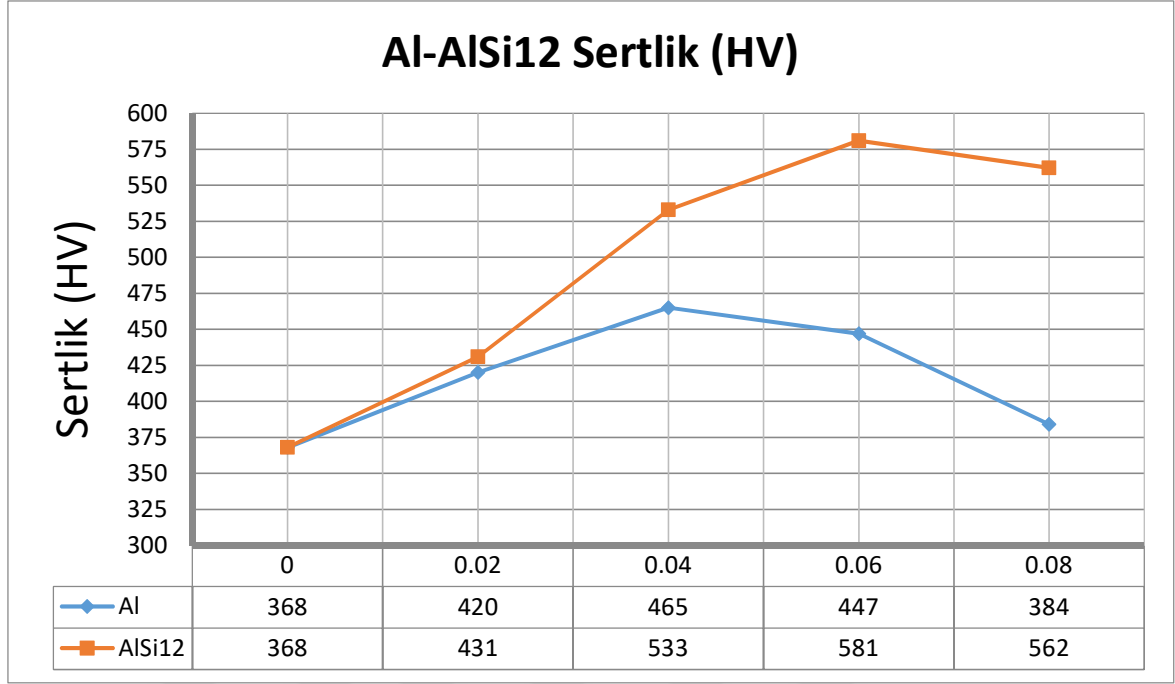
4.2. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Spark Plazma Sinterleme (SPS) yöntemi ile üretilen numunelere ait Vickers mikroyüzey sertlik değerleri, katkı malzemesinin türüne ve oranına bağlı olarak farklılık göstermiştir. Özellikle Al katkısı, toz parçacıkları arasında artan yüzey etkileşimi ve partikül hareketliliği sayesinde daha etkin sinterleme koşulları sağlamış, bu da mikroyapı bağlarının güçlenmesine ve sertlik değerlerinin artmasına katkı sağlamıştır.

AlSi12 katkısı ise, ötektik yapısı nedeniyle saf Al'ye göre daha yüksek mekanik dayanım sunmuş, ayrıca düşük erime sıcaklığı sayesinde sinterleme sıcaklığında daha erken sıvı faz oluşumuna olanak tanıyarak yoğunluğu artırmış ve mikroyapısal homojenliği iyileştirmiştir. Bu durum, sertlik değerlerine doğrudan olumlu yansımış ve AlSi12 katkılı numunelerde daha yüksek HV değerlerinin elde edilmesini sağlamıştır.

Sertlik sonuçları incelendiğinde, katkı oranı arttıkça malzeme içerisindeki bağ yapılarının kuvvetlendiği ve bu durumun Vickers sertlik değerlerinde belirgin bir artışa neden olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, katkı türü ve oranı, sertlik performansının optimize edilmesinde kritik bir parametre olarak ön plana çıkmaktadır.

Farklı katkı içeriklerine sahip kompozit numunelere ait Vickers sertlik sonuçları Şekil 4.2'de grafiksel olarak sunulmuştur.



Şekil 4. 2. Üretilen metal kompozit numunelerinin katkılama oranına karşılık sertlik grafikleri

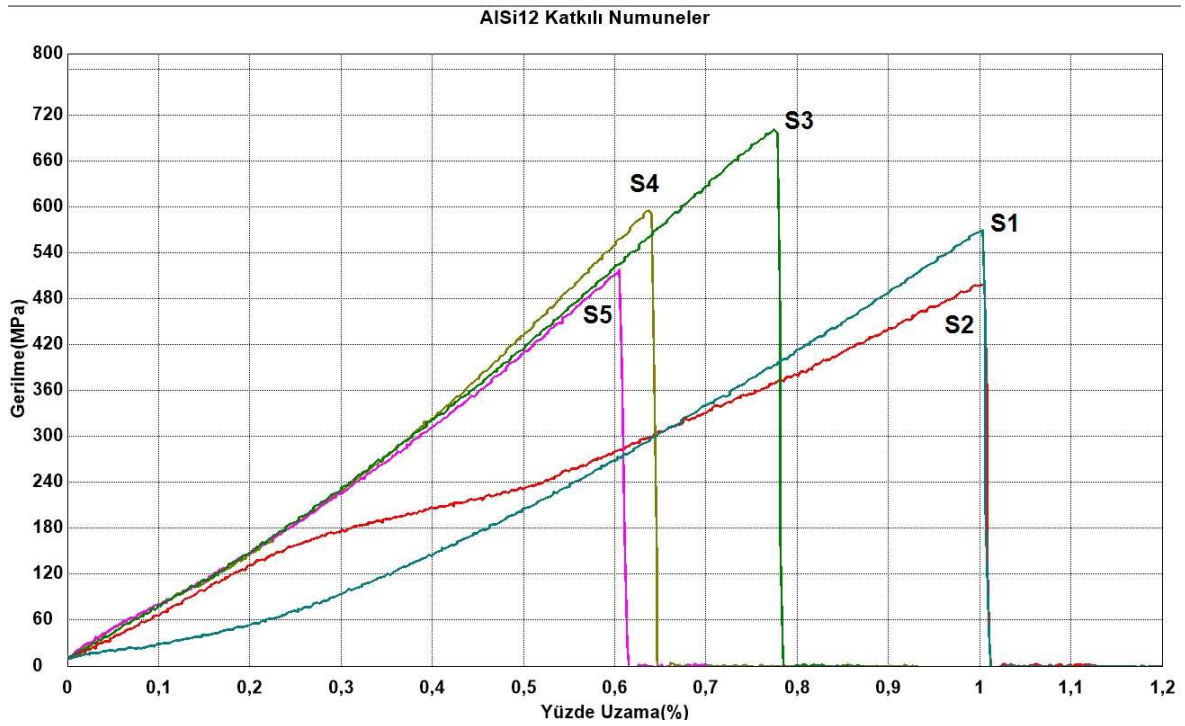
Üretilen numunelere ait sertlik ölçüm değerleri tablo 4.1’ de gösterilmiştir.

Tablo 4. 1. Vickers sertliği ölçüm sonuçları

Numune No	Katkı Türü	Sertlik - Yüzey 1 (Vickers Sertliği (HV))	Sertlik - Yüzey 2 (Vickers Sertliği (HV))	Sertlik - Yüzey 3 (Vickers Sertliği (HV))	Sertlik - Yüzey 4 (Vickers Sertliği (HV))
S1	ALSi12	464	370	501	387
S2	ALSi12	558	493	552	527
S3	ALSi12	568	589	575	592
S4	ALSi12	614	511	597	524
S9	Al	479	418	451	332
S10	Al	481	450	483	444
S11	Al	511	457	458	361
S12	Al	321	509	267	440
S13	NiCrBSiFe	338	398	338	396

4.3. Üç Noktalı Eğilme (TRS) Deneyi Sonuçları

Üretilen numunelerin üç noktalı eğilme sonuç grafikleri şekil 4.3 ile şekil 4.4'te gösterilmektedir. Kıyaslamanın daha rahat yapılabilmesi ve matris katkı malzemelerin etkisinin daha anlaşılır bir şekilde görülebilmesi için S1(NiCrBSiFe), numunesi ile kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.



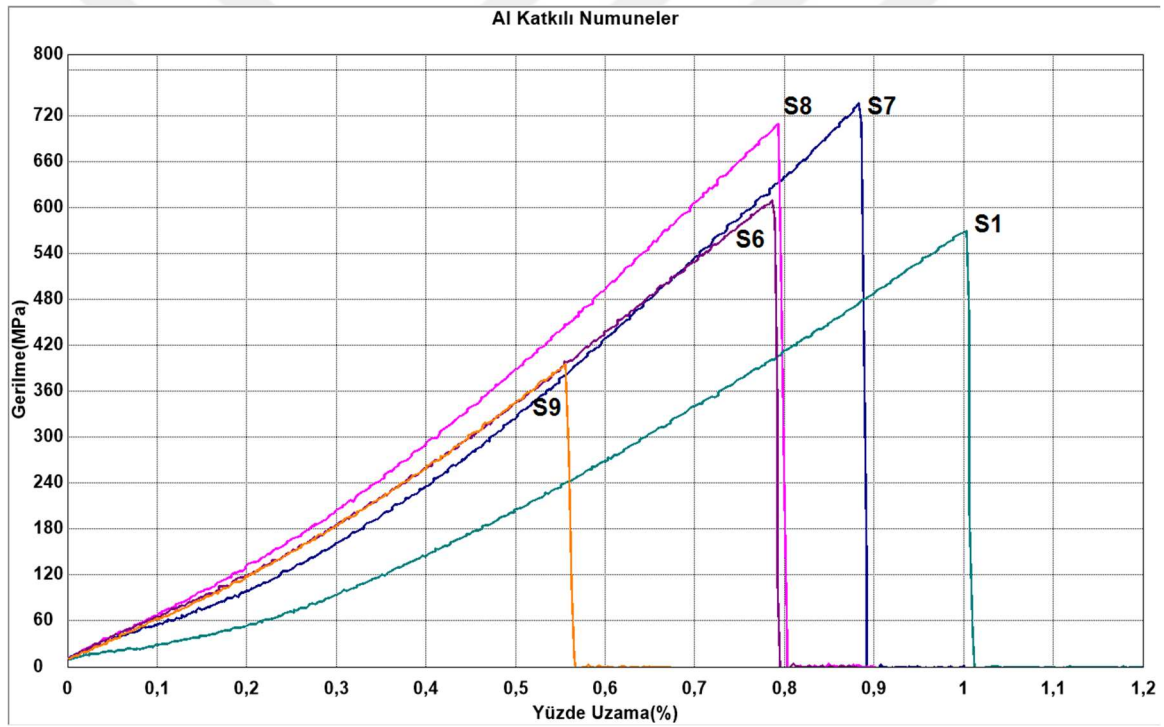
Şekil 4. 3. S1)%100 NiCrBSiFe, S2)%2 AlSi12, S3)%4 AlSi12, S4)%6 AlSi12, S5)%8 AlSi12 katkılı numunelerin gerilme yüzde uzama grafiği

Ekteki gerilme-yüzde uzama grafiği, farklı oranlarda AlSi12 katkısı içeren NiCrBSiFe numunelerin mekanik davranışını göstermektedir. %100 saf NiCrBSiFe (S1) numunesi, en yüksek uzama oranına (%1,1 civarı) sahip olup, orta düzeyde bir maksimum gerilme dayanımı sergilemektedir. %2 AlSi12 katkılı (S2) numune, hem gerilme dayanımı hem de uzama bakımından S1'in gerisinde kalmakta, dolayısıyla katkının bu düşük oranının mekanik performansı olumsuz etkilediği görülmektedir.

Katkı oranı %4 (S3), %6 (S4) ve %8 (S5) AlSi12 olan numunelerde ise maksimum gerilme dayanımında belirgin bir artış gözlenmiştir; özellikle %4 AlSi12 katkılı S3 numunesi yaklaşık 720 MPa'ya varan en yüksek gerilme dayanımını göstermektedir. Ancak bu artış

uzama oranında azalmaya neden olmuş, en yüksek katkı olan %8 AlSi12 (S5) numunesi ise kırılabilirliği artırmış ve uzama oranı yaklaşık %0,6 civarına düşmüştür.

Bu sonuçlar, AlSi12 katkısının NiCrBSiFe matrisine mekanik mukavemeti artırıcı etkisinin belirgin olduğunu ancak yüksek katkı oranlarının malzemenin sünekliğini azalttığını ortaya koymaktadır. Optimum performans, %4 ila %6 AlSi12 aralığında gözlemlenirken, daha yüksek katkı oranlarında malzemenin kırılabilirlik gösterdiği söylenebilir. Bu durum, AlSi12 partiküllerinin sertleşme sağlarken, aşırı miktarda katkının mikro yapıda çatlak başlatıcı etki yapmasıyla açıklanabilir. Dolayısıyla, AlSi12 katkısının oranı, mekanik özellikler arasında denge kurmak için dikkatle optimize edilmelidir (Yan ve ark., 2014).



Şekil 4. 4. S1)%100 NiCrBSiFe, S6)%2 Al, S7)%4 Al, S8)%6 Al, S9)%8 Al katkılı numunelerin gerilme yüzde uzama grafiği

Şekil 4.4'te verilen gerilme-yüzde uzama grafiği, farklı Al katkı oranlarına sahip NiCrBSiFe bazlı numunelerin mekanik davranışını karşılaştırmalı olarak sunmaktadır. Grafikte, %100 saf NiCrBSiFe (S1) numunesi en yüksek uzama değerine (yaklaşık %1,1) ulaşmasına rağmen, gerilme dayanımı açısından en düşük performansı göstermektedir. Al katkısının artışıyla birlikte numunelerin maksimum gerilme dayanımı anlamlı şekilde artmış, özellikle

%4 (S7) ve %6 Al (S8) katkılı numuneler, yaklaşık 720–730 MPa maksimum gerilme dayanımıyla en yüksek mukavemeti sergilemiştir. Buna karşın, bu numunelerde uzama oranı azalmış ve numuneler daha kırılgan bir yapıya bürünmüştür. %8 Al katkılı (S9) numune ise hem gerilme dayanımı hem de uzama bakımından S6, S7 ve S8 numunelerinin altında kalmış ve kırılganlığın arttığını göstermektedir.

Bu veriler, Al katkısının NiCrBSiFe alaşımının mukavemetini artırırken sünekliği azalttığını ve optimum mekanik performansın %4–%6 Al aralığında sağlandığını göstermektedir. Al miktarının artırılmasıyla sertleşme mekanizmalarının etkinliği yükselirken, malzemenin deformasyon kabiliyeti azalmakta, dolayısıyla kırılganlık artmaktadır. Bu durum, mikro yapıda Al katkısının intermetalik fazların oluşumunu teşvik ederek sertlik ve dayanımı artırması ancak aynı zamanda çatlak ilerlemesini hızlandırarak sünekliği düşürmesi ile açıklanabilir. Sonuç olarak, NiCrBSiFe alaşımında Al katkısının miktarı, istenen uygulamaya bağlı olarak mukavemet ve süneklik arasında bir denge kurulması açısından kritik öneme sahiptir (Yan ve ark., 2014).

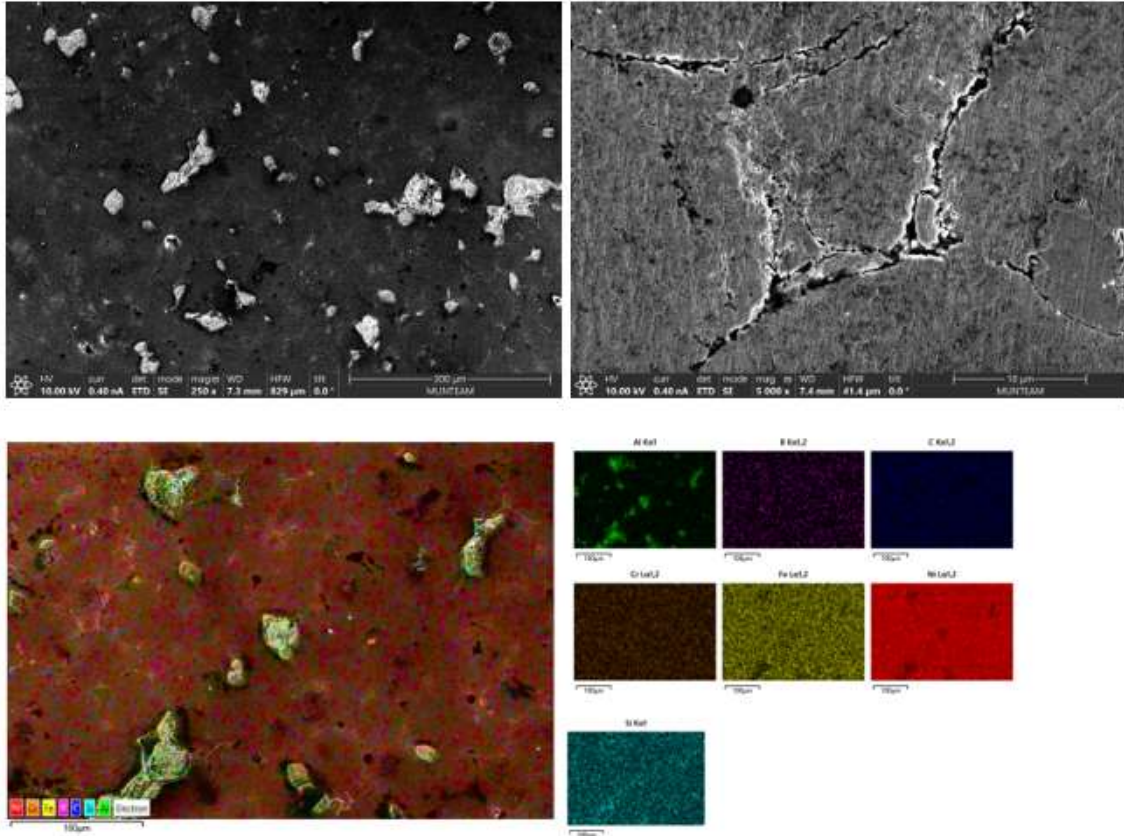
4.4. Mikroyapı İncelemeleri

Mikroyapı incelemeleri yapılırken, eklenen katkı malzemelerinin yapıya etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için sinterlenmiş numunelerin SEM resimleri 250x ve 1000x büyütmelerinde alınarak incelenmiştir.

Mikroyapı incelendiğinde Nikel esaslı numunede partiküller arası kopmalar meydana gelmiştir.

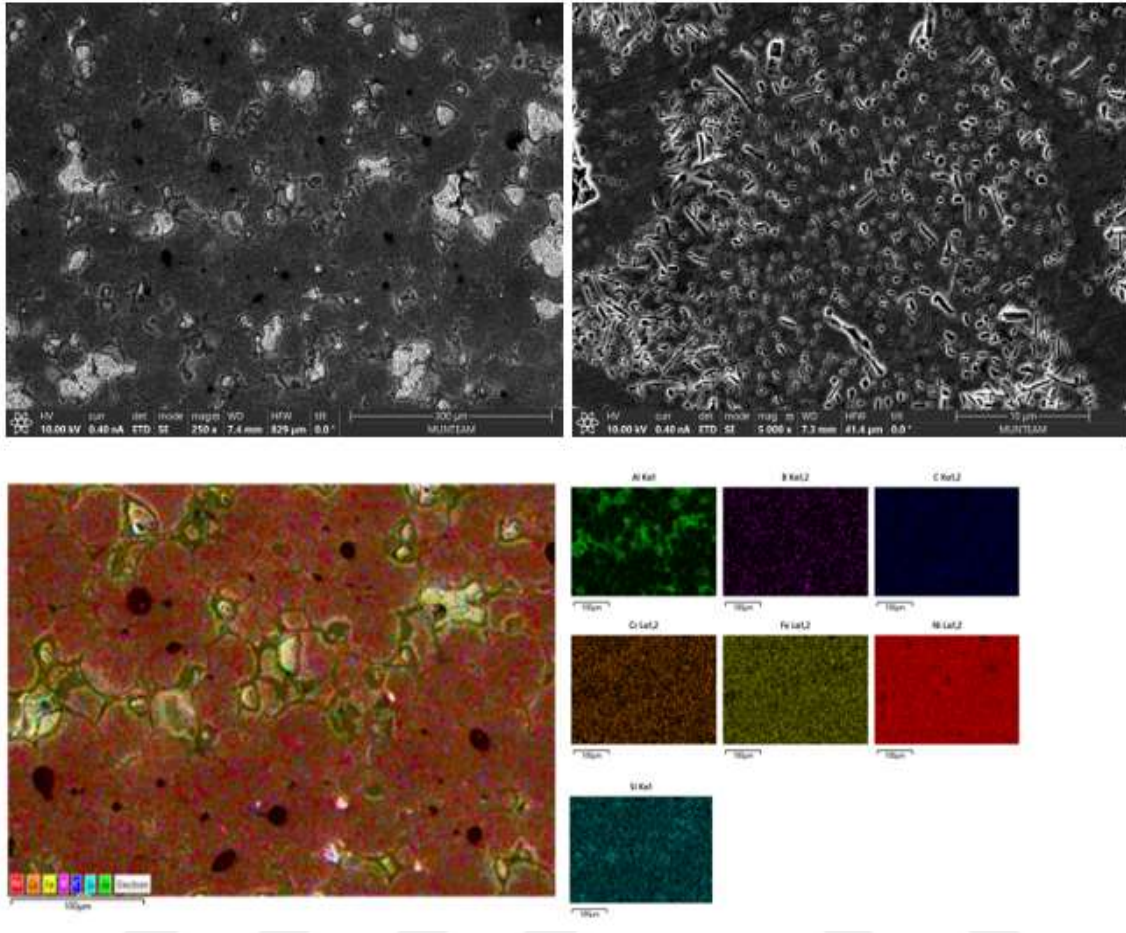
Alüminyum eklendiğinde %4'e kadar kopma mukavemeti yükseldiği görülmüştür. Yükselen değer daha sonra azalmıştır.

Alüminyumun mekanik özelliklerinden kopma mukavemeti oluşmuştur.



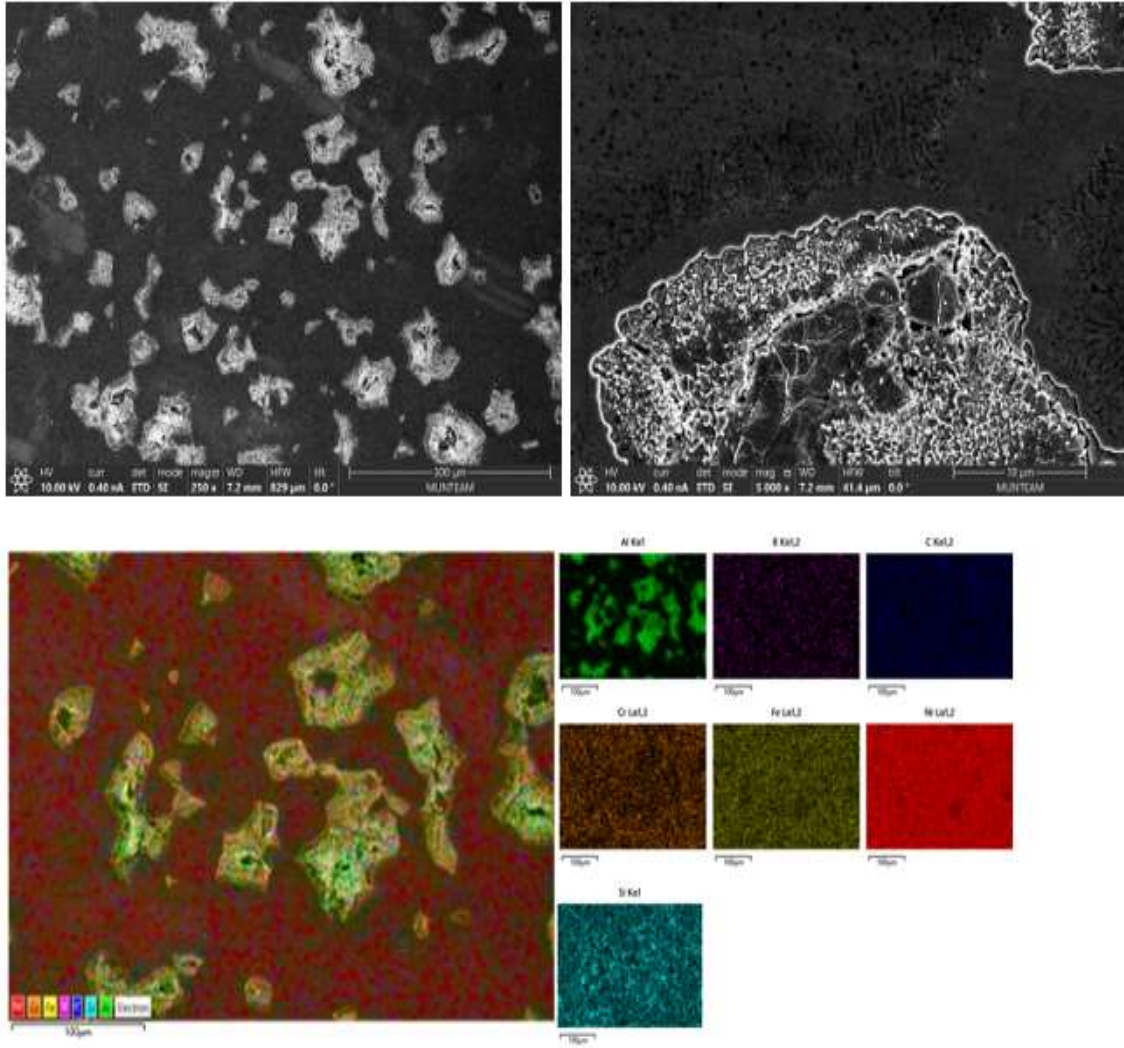
Şekil 4. 5. S1)%2 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.5’te ki SEM görüntüsünde, koyu-orta gri tonda süreksiz bir alan olarak izlenen γ -Ni esaslı katı çözelti (NiCrBSiFe matrisi) içinde, yüksek atom numarasına bağlı olarak daha parlak kontrast veren, düzensiz morfolojili iri adacıkların muhtemel sert intermetalik/seramik fazları (özellikle Cr-zengin borür/karbürler; ör. CrB/Cr₂B, Cr₇C₃ ve kısmen Ni-borürler) temsil ettiği görülmektedir. Bu adacıkların çevresinde %2-8 AlSi12 ilavesine bağlı olarak yerel Al-Si zenginleşmeleriyle birlikte Ni-Al ara bileşikleri (ör. NiAl, Ni₂Al₃) ve ince ötektik benzeri ağların geliştiği anlaşılmaktadır. Parlak adacıklar aşınma ve sertlik artışına katkı sunarken, matristeki FCC yapı tokluğu taşır; adacık-matris arayüzlerinde görülen ince koyu hatlar/filmimsi bölgeler ise katılma veya sinter sonrası segregasyon/ötektik kalıntılara işaret etmektedir. Görüntü genelinde rastlanan siyah boşluklar ve bazı “pull-out” izleri sinterlemeye özgü mikrogözenekleri ve parça kopmalarını göstermekte olup, bunlar yerel gerilme yığılmalarına ve yoğunluk/mekanik performansın sınırlandırılmasına neden olabilir.



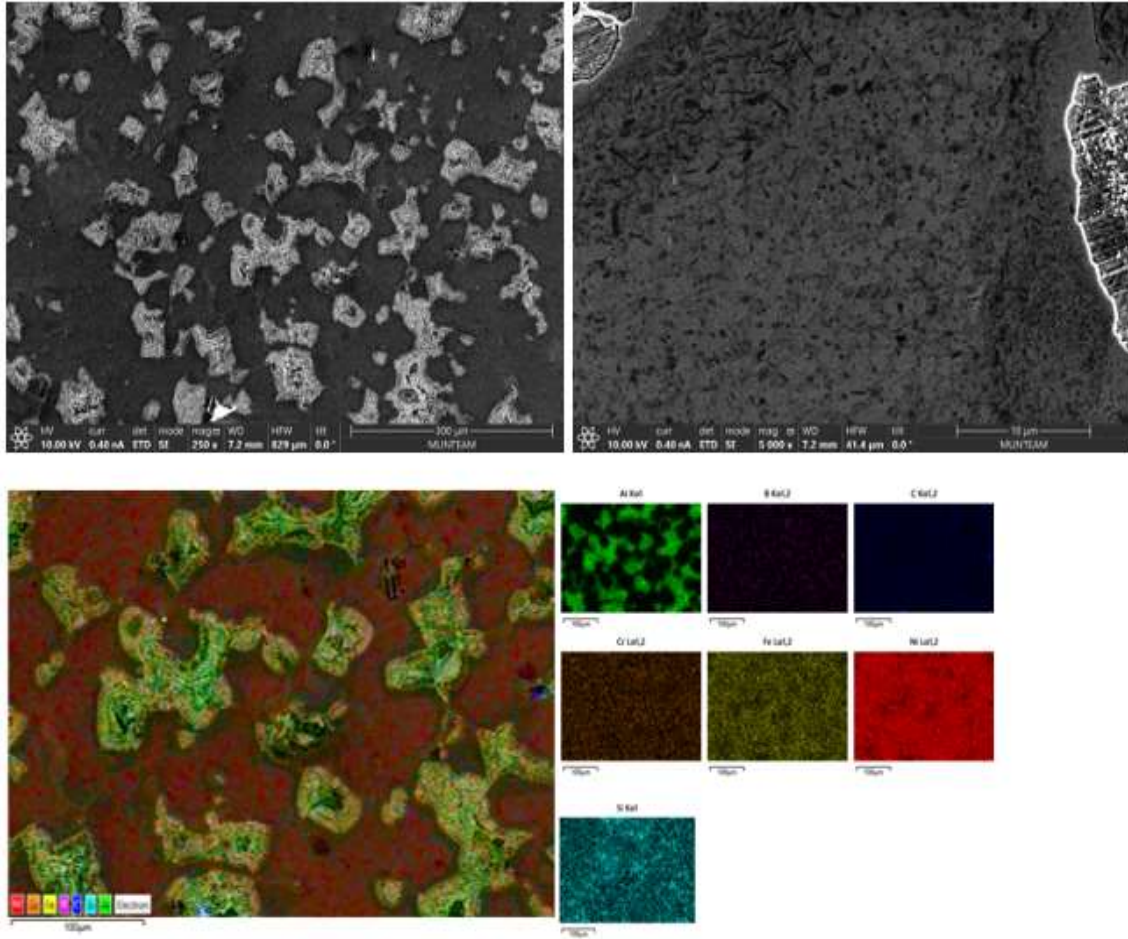
Şekil 4. 6. S2)%4 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.6'da ki SEM ve EDS haritalama görüntüsünde, matris bölgesinin büyük ölçüde kırmızı tonlarda gözleendiği ve bunun Ni (nikel) element dağılımını temsil ettiği, NiCrBSiFe alaşımının γ -Ni esaslı katı çözelti matrisi olarak fazın temel yapısını oluşturduğu görülmektedir. Parlak-yeşil tonlarda belirginleşen düzensiz iri parçacıklar, yüksek yoğunlukta Al (alüminyum) ve Si (silisyum) içermekte olup, bu bölgeler muhtemelen AlSi12 ilavesinden kaynaklı ötektik Si fazları ve/veya Ni-Al intermetalik bileşikler (NiAl, Ni_2Al_3) ile Si zengin bölgeler şeklinde oluşmuştur. Sarı ve turuncu tonlarda gözlenen lokal zenginleşmeler Fe (demir) ve Cr (krom) varlığına işaret etmekte olup, bu alanların Cr-zengin borür/karbür fazları (CrB , Cr_2B , Cr_7C_3) ile Fe içeren sert faz oluşumlarını temsil ettiği değerlendirilmektedir.



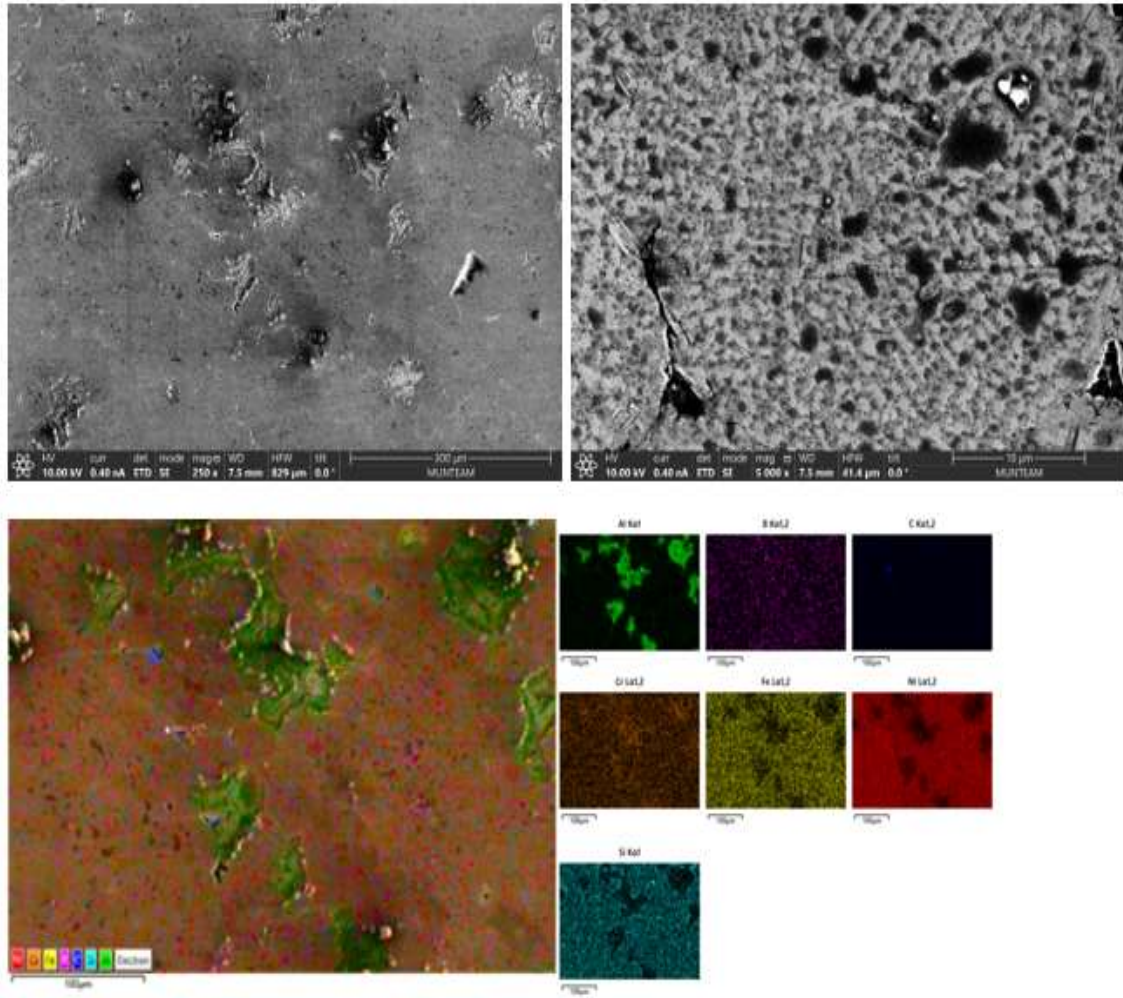
Şekil 4. 7. S3)%6 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.7’de ki SEM ve EDS dağılımında mor tonlarda yer yer izlenen bölgeler B (bor) zenginleşmesini göstermekte ve sert borür fazlarının varlığını desteklemektedir. Elementlerin fazlar arasındaki keskin sınırlarla ayrıldığı görülmekte olup, bu durum sinterleme sonrası element difüzyonunun sınırlı, ancak lokal çökeltme ve segregasyon mekanizmalarının belirgin olduğunu ortaya koymaktadır. Bu faz dağılımı, özellikle sertlik artışına ve aşınma direncinin gelişmesine katkı sağlayan yapısal özellikleri yansıtmaktadır.



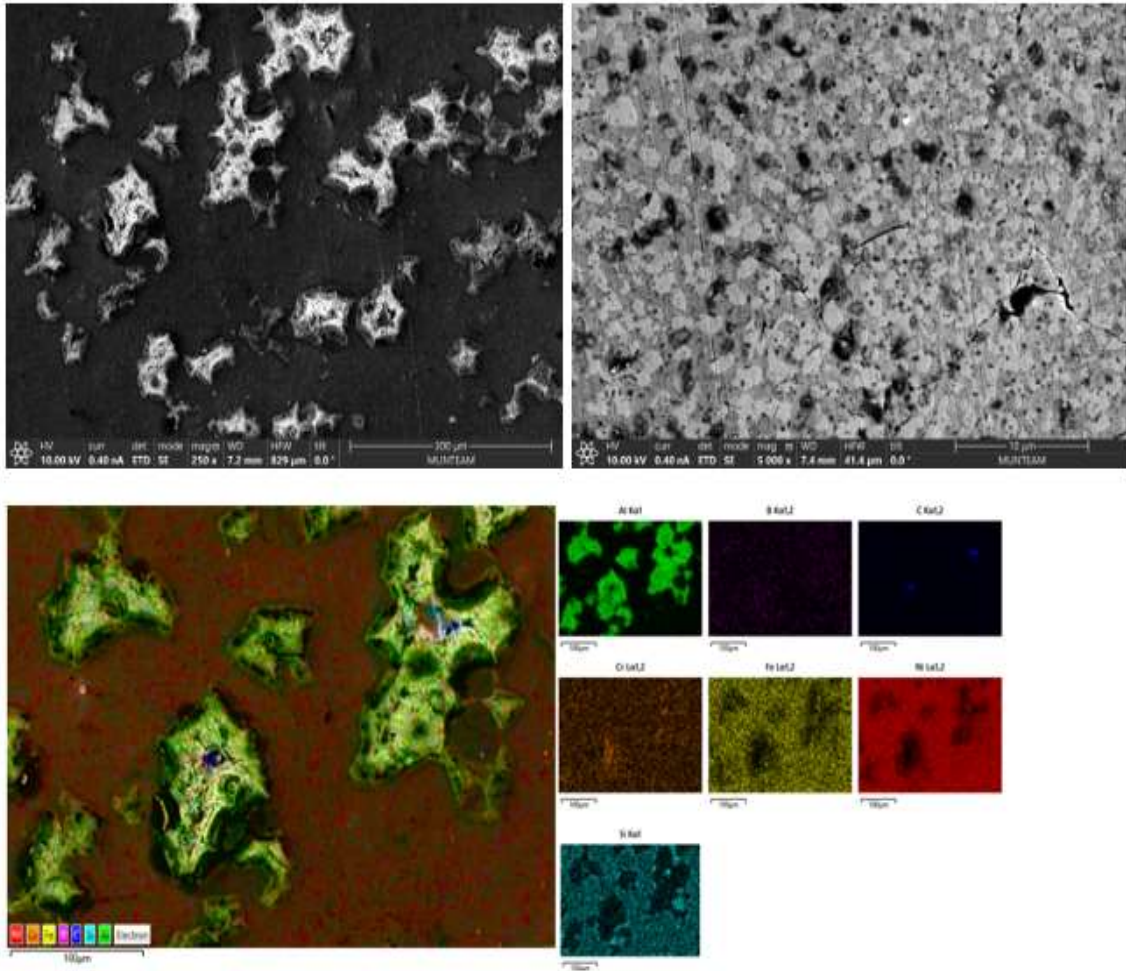
Şekil 4. 8. S4)%8 AlSi12 katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.8’de ki SEM-EDS sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, γ -Ni esaslı matrisin tokluğu korurken, parlak kontrastlı sert faz adacıkları ile Al-Si katkısından kaynaklanan Ni-Al intermetalikleri ve ötektik benzeri ağ yapılarının birlikte, malzemenin hem sertlik hem de aşınma direncini artırıcı yönde katkı sunduğu anlaşılmaktadır. Literatürde benzer bulgular ile de uyumlu şekilde, AlSi12 katkısının NiCrBSiFe alaşımındaki mikroyapısal çeşitliliği artırarak performans olumlu etki ettiği görülmektedir (Sucgang ve ark., Cuzacq ve ark., Guo ve ark., Islak ve ark., Hemmati ve ark.)



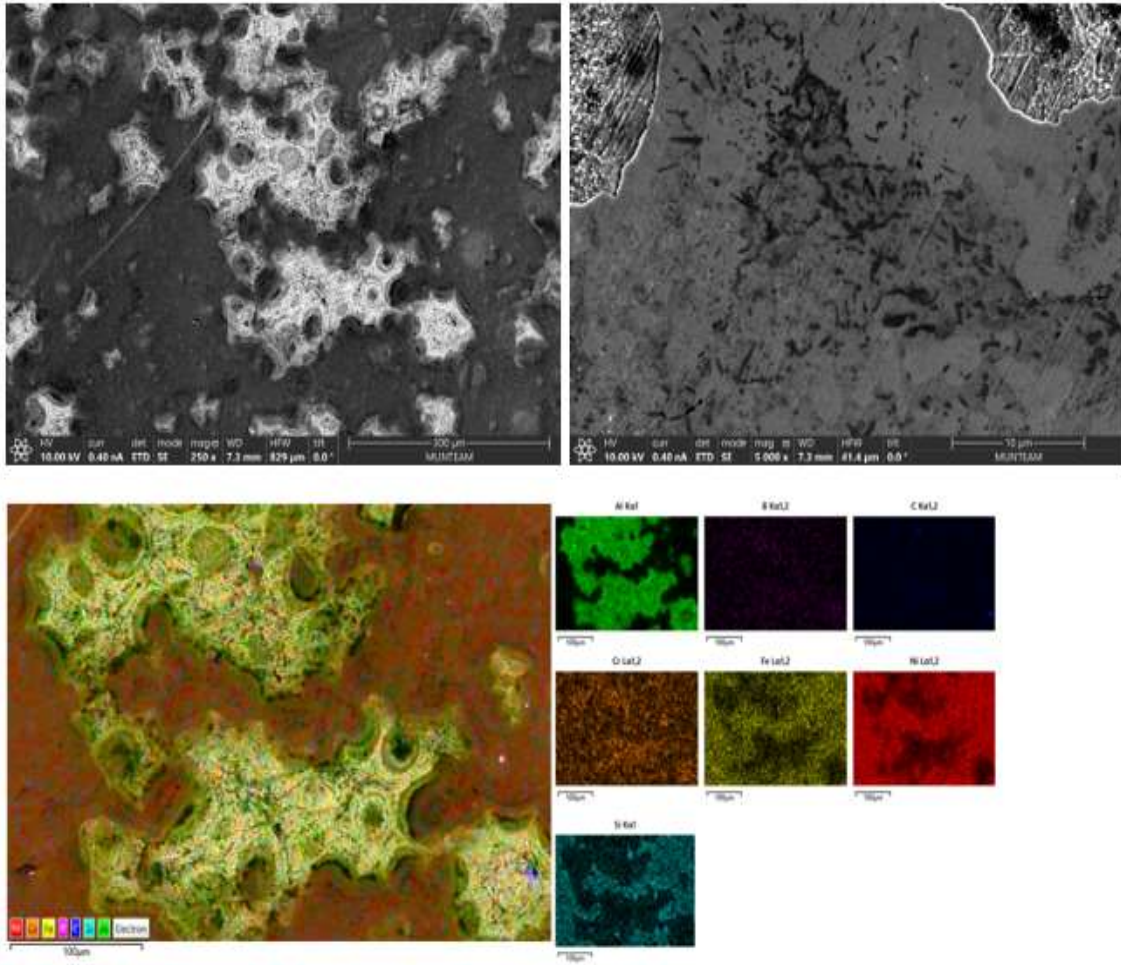
Şekil 4. 9. S9)%2 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.9’da ki SEM görüntüsünde koyu gri tonlarda izlenen alanlar, NiCrBSiFe alaşımının γ -Ni esaslı katı çözelti matrisini temsil etmektedir. Bu matris FCC kristal yapıya sahip olup, Cr ve Fe elementlerinin homojen çözünmesi sayesinde yüksek tokluk ve korozyon direnci kazandırmaktadır. Matris içerisinde parlak kontrastlı ve düzensiz morfolojili iri bölgeler gözlenmiş olup, bu bölgeler yüksek atom numarasına sahip elementlerin yoğunlaşması sonucu oluşan sert intermetalik/seramik fazlar olarak değerlendirilmektedir. Söz konusu fazların başlıca Cr-zengin borürler (CrB , Cr_2B) ve karbürler (Cr_7C_3) ile kısmen Ni-borürlerden oluştuğu düşünülmektedir.



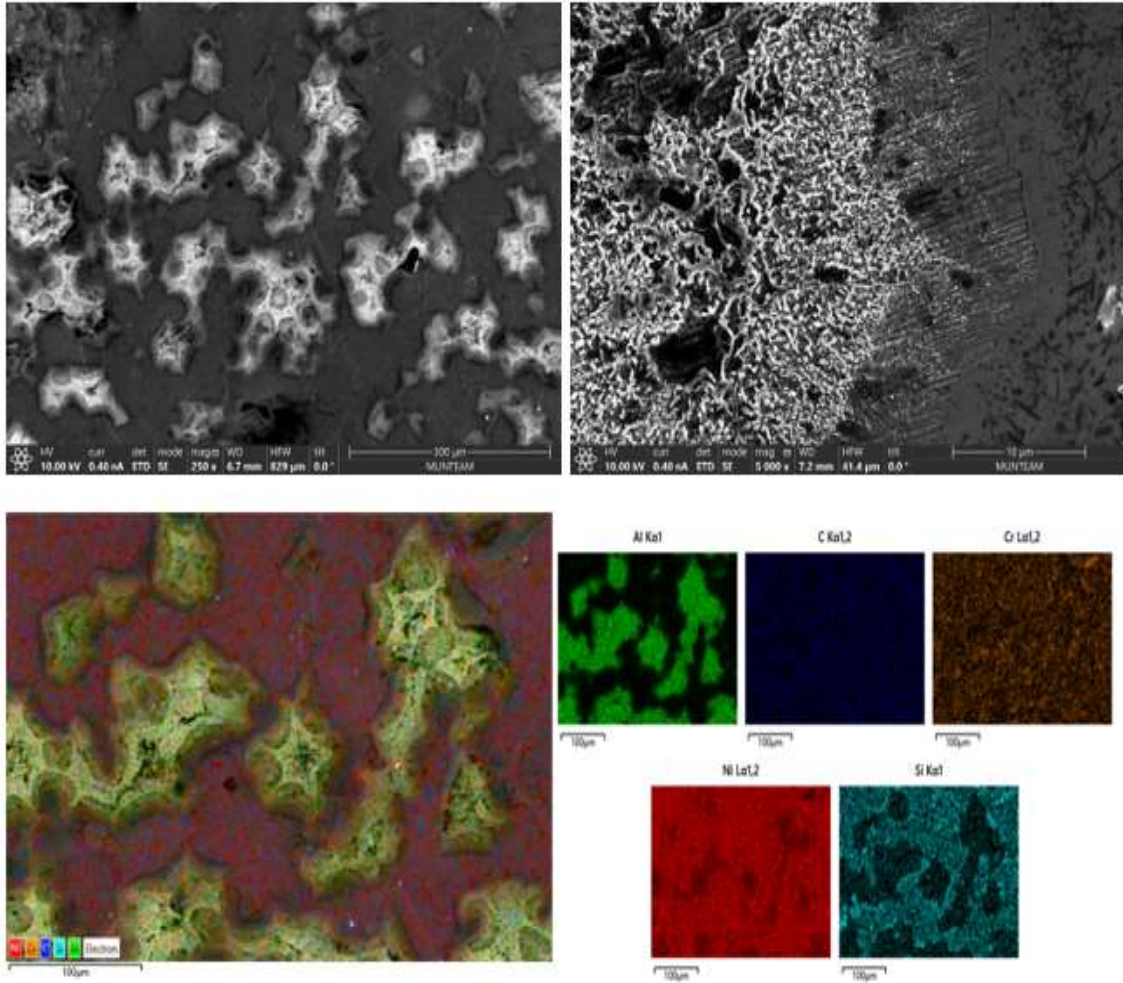
Şekil 4. 10. S10) %4 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.10'da ki SEM sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde %4 Al ilavesiyle parlak bölgelerde yerel Al zenginleşmeleri tespit edilmiş olup, bu bölgelerde Ni-Al intermetaliklerinin (NiAl , Ni_2Al_3) olduğu değerlendirilmektedir. Parlak bölgeler içerisinde gözlenen ince ağ yapılar ötektik benzeri çöktirile işaret etmektedir. Bunun yanında, küçük boşluklar ve düzensiz oyuklar, sinterleme süreci esnasında meydana gelen mikrogözenekler veya sert parçacıkların kopmasıyla (pull-out) ilişkilidir. Bu tür yapısal kusurlar, malzeme içerisinde lokal gerilme yığılmalarına yol açarak mekanik performansı kısmen sınırlayabilmektedir.



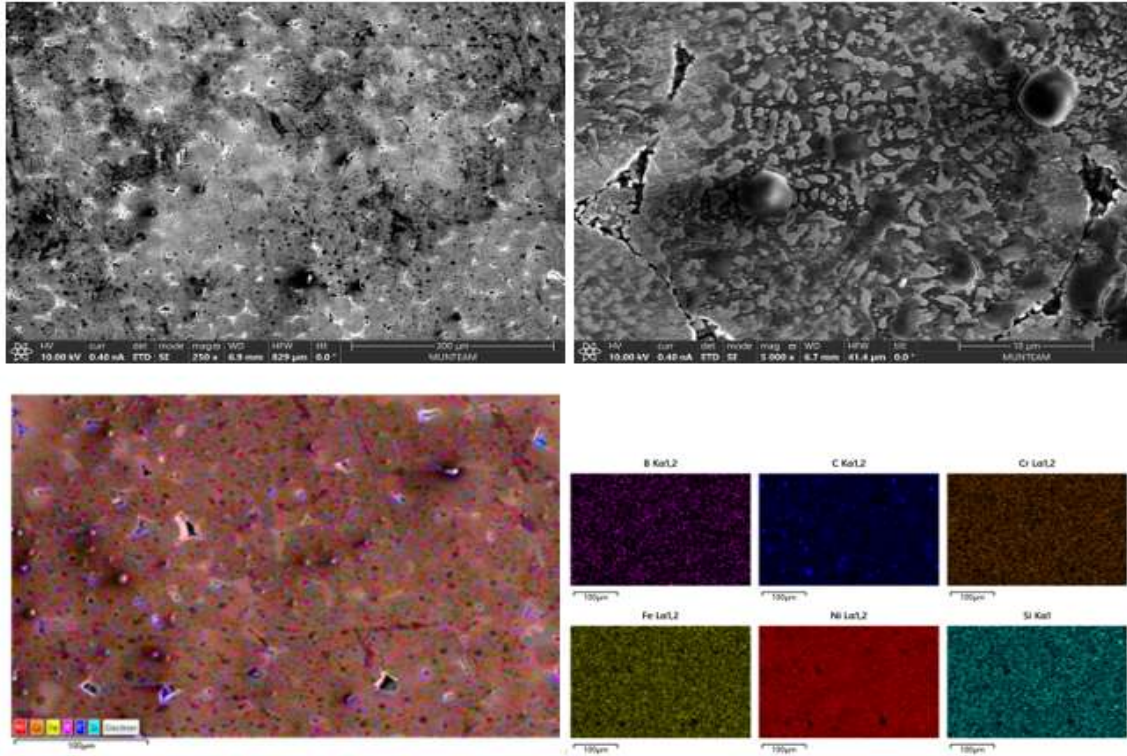
Şekil 4. 11. S11)%6 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.11’de ki SEM sonuçları için mikroyapısal bütünlük incelendiğinde, sert fazların aşınma direncine katkı sunduğu, matrisin ise tokluk sağladığı görülmektedir. Böylece kompozit yapı hibrit bir mekanik performans göstermektedir. Şekilde verilen EDS analizleri, sinterleme yöntemiyle %2–8 Al ilave edilmiş NiCrBSiFe alaşımının çok fazlı bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Fe ve Ni bakımından zengin koyu renkli matris fazı içerisinde, Cr, B, Si ve Ni elementlerinin lokalize olduğu parlak bölgeler belirlenmiştir. Bu bölgelerde Ni_3B , CrB , NiCrSi gibi sert intermetalik fazlar ve Cr_3C_2 benzeri karbür fazlarının oluştuğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4. 12. S12)%8 Al katkılı numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.12’de ki SEM sonuçları, söz konusu sert fazların alaşımın sertlik ve aşınma direncini önemli ölçüde artırdığını göstermektedir. Al elementinin homojen dağılmadığı, belirli bölgelerde çözünerek Al-Ni veya Al-Si esaslı intermetalik fazların oluşumuna katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. Ayrıca karbon elementi de karbürleşme yoluyla mikroyapıya destek sağlamaktadır. Genel olarak, sinterleme süreci ile elde edilen bu çok fazlı yapı, mekanik dayanımı optimize etmekte ve alaşımın aşınma ile yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılabilirliğini artırmaktadır. Bu bulgular, literatürdeki çalışmalarla uyumlu sonuçlar ortaya koymaktadır (Guo ve ark., 2011; Hemmati ve ark., 2013; Islak ve ark., 2014; Cuzacq ve ark., 2025; Sucgang ve ark., 2025).

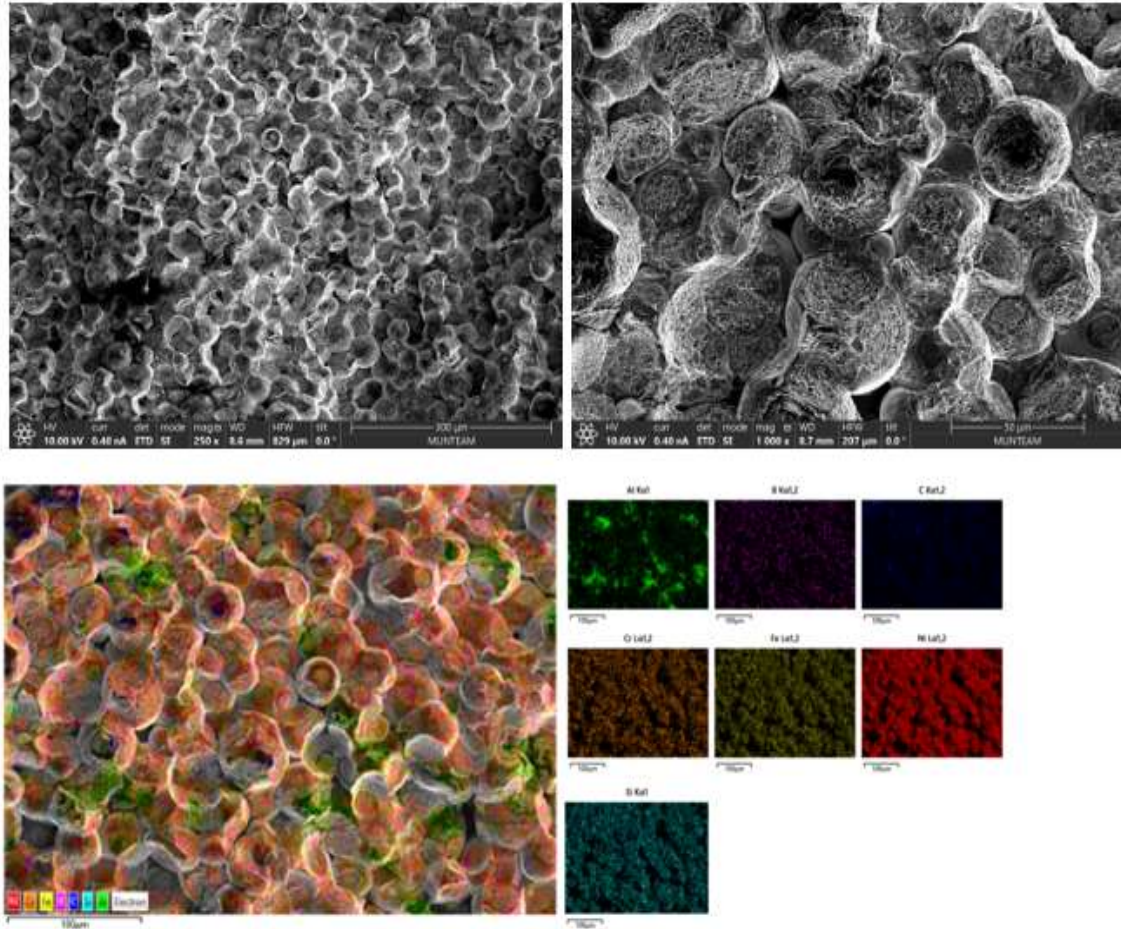


Şekil 4. 13. S13)%100 NiCrBSiFe Saf numunenin 1000x büyütmedeki SEM görüntüleri

Şekil 4.13'te verilen SEM görüntüsü, NiCrBSiFe esaslı alaşımın sinterleme sonrası oluşan çok fazlı mikroyapısını göstermektedir. Görüntüde gri tonlardaki alanlar, Fe-Ni esaslı katı çözeltili matris fazını temsil ederken, parlak (beyaz) bölgeler Cr, B ve Si içeren sert intermetalik fazlara (örneğin Ni_3B , CrB) işaret etmektedir. Bu fazlar, yapının sertliğini ve aşınma direncini artırmaktadır. Mikroyapıda ayrıca sinterleme sırasında oluşmuş porozite bölgeleri gözlenmekte, bu boşluklar mekanik özellikleri zayıflatmakla birlikte bazı uygulamalarda fayda da sağlayabilmektedir. Küçük, koyu ve dairesel partiküller ise ikincil faz çökeltilerini temsil edebilir. Genel olarak yapı, yüksek performanslı ve aşınmaya dayanıklı uygulamalar için uygun, kompleks ve heterojen bir faz dağılımı sergilemektedir. Bu EDS görüntüsü, sinterleme sonrası NiCrBSiFe alaşımının çok fazlı mikroyapısını göstermektedir. Fe ve Ni elementleri matris fazda baskın olup, Fe-Ni esaslı katı çözeltiliyi temsil etmektedir. Parlak bölgelerde Cr, B ve Si elementlerinin yoğunlaştığı intermetalik bileşikler (örneğin CrB , Ni_3B) oluşmuştur. Ayrıca, C ve B'nin birlikte bulunduğu alanlar karbür ve borür fazlarını işaret etmektedir. Si elementi ise fazların stabilitesine katkı sağlamaktadır. Bu çok fazlı yapı, alaşımın sertlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık dayanımını artıran başarılı bir faz dağılımı sunmaktadır (Guo ve ark., 2011; Hemmati ve ark., 2013; Islak ve ark., 2014; Cuzacq ve ark., 2025).

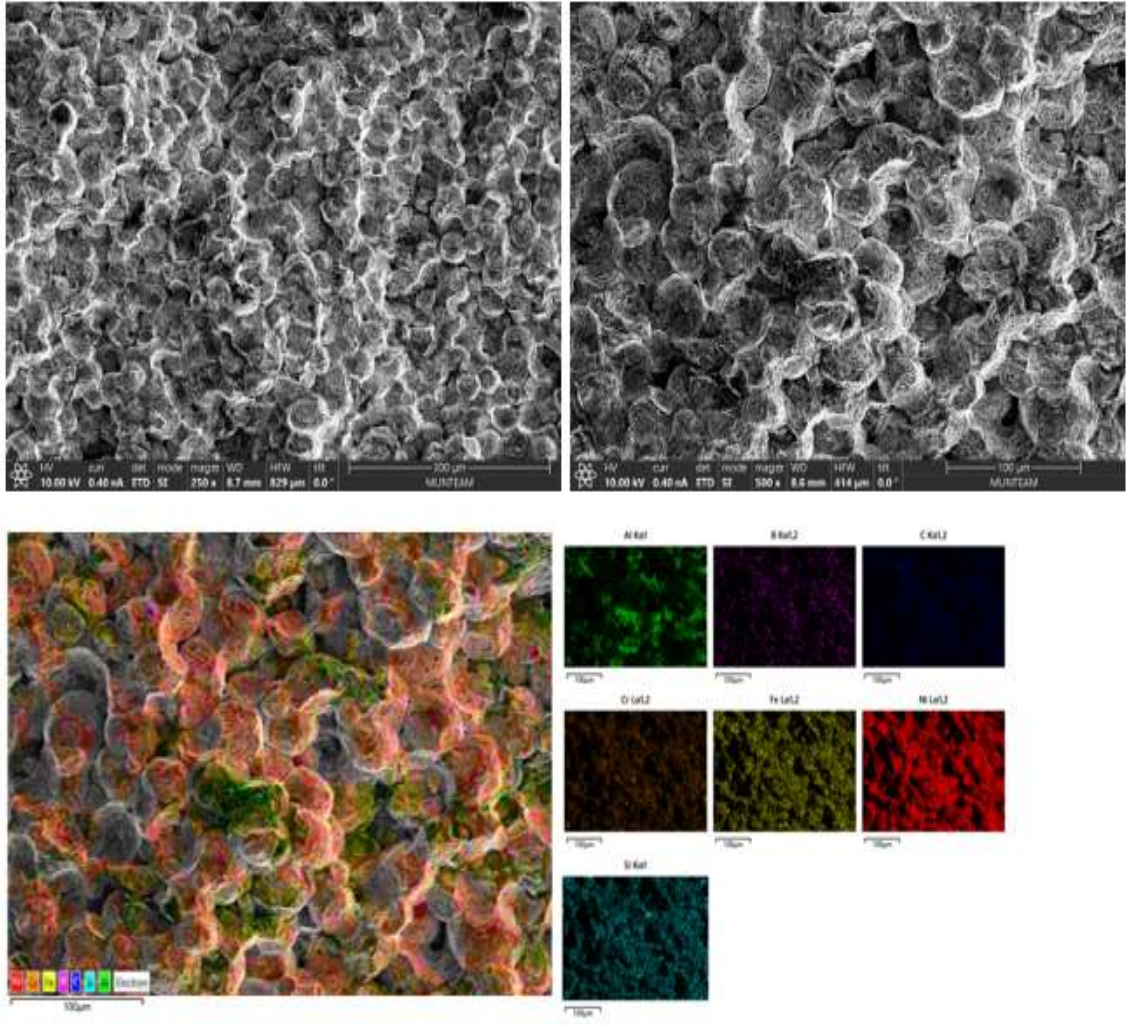
4.5. Kırık Yüzey Analizi

Al ve AlSi katkıları, hem mekanik özellikleri (özellikle sertlik) hem de mikroyapısal yoğunluğu geliştirme açısından olumlu sonuçlar vermiştir. Katkı oranlarının artmasıyla birlikte hem sinterleme etkinliği hem de nihai ürün kalitesi artmıştır. Bu bulgular, katkılı tozlarla yapılan sinterleme çalışmalarının mühendislik uygulamaları açısından önemli potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır.



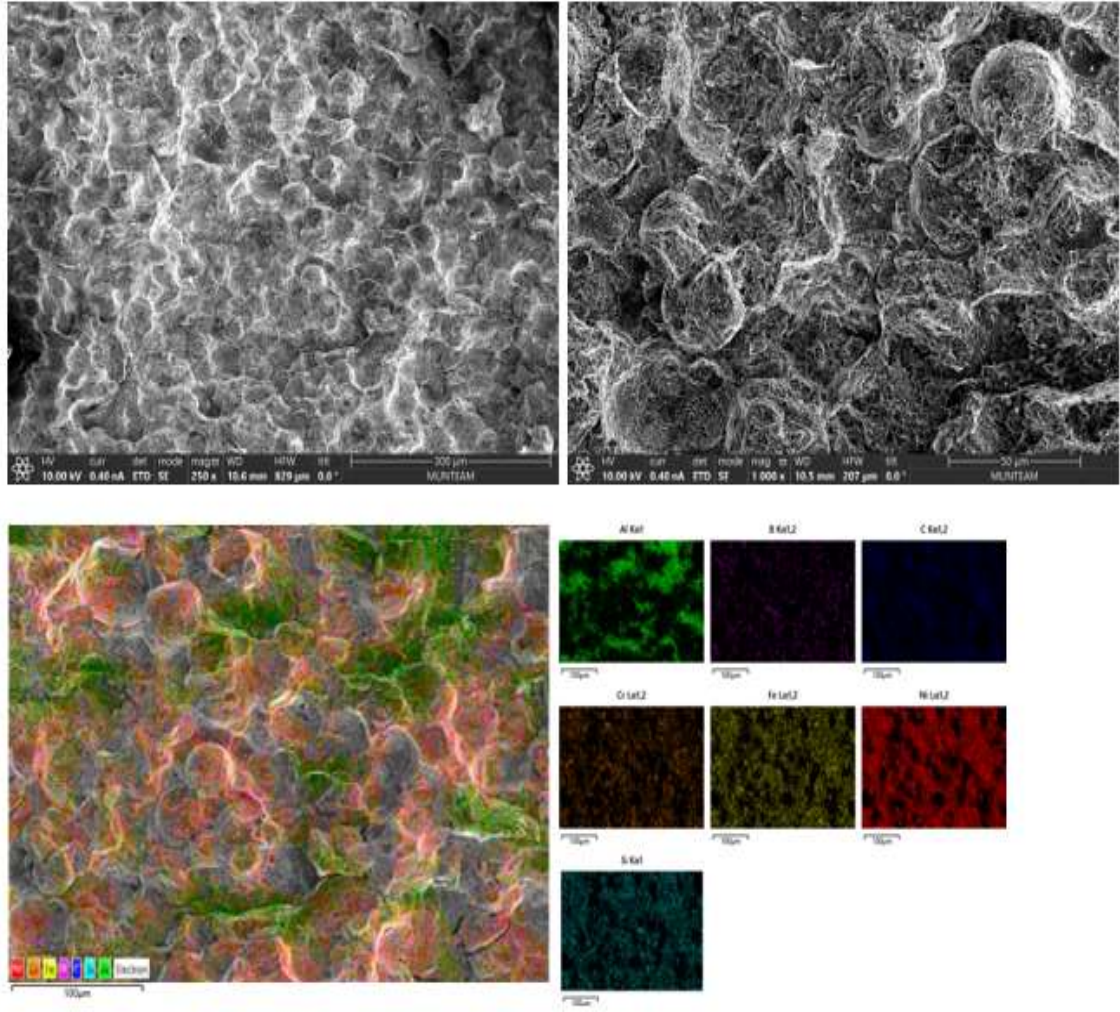
Şekil 4. 14. S1)%2 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.14'te ki SEM-EDS görüntüsünde NiCrBSiFe esaslı matris içinde AlSi12 katkısından kaynaklı Al (kırmızı) ve Si (pembe) elementlerinin belirli bölgelerde yoğunlaştığı, Ni ve Cr elementlerinin ise homojen dağılarak matrisi oluşturduğu görülmektedir.



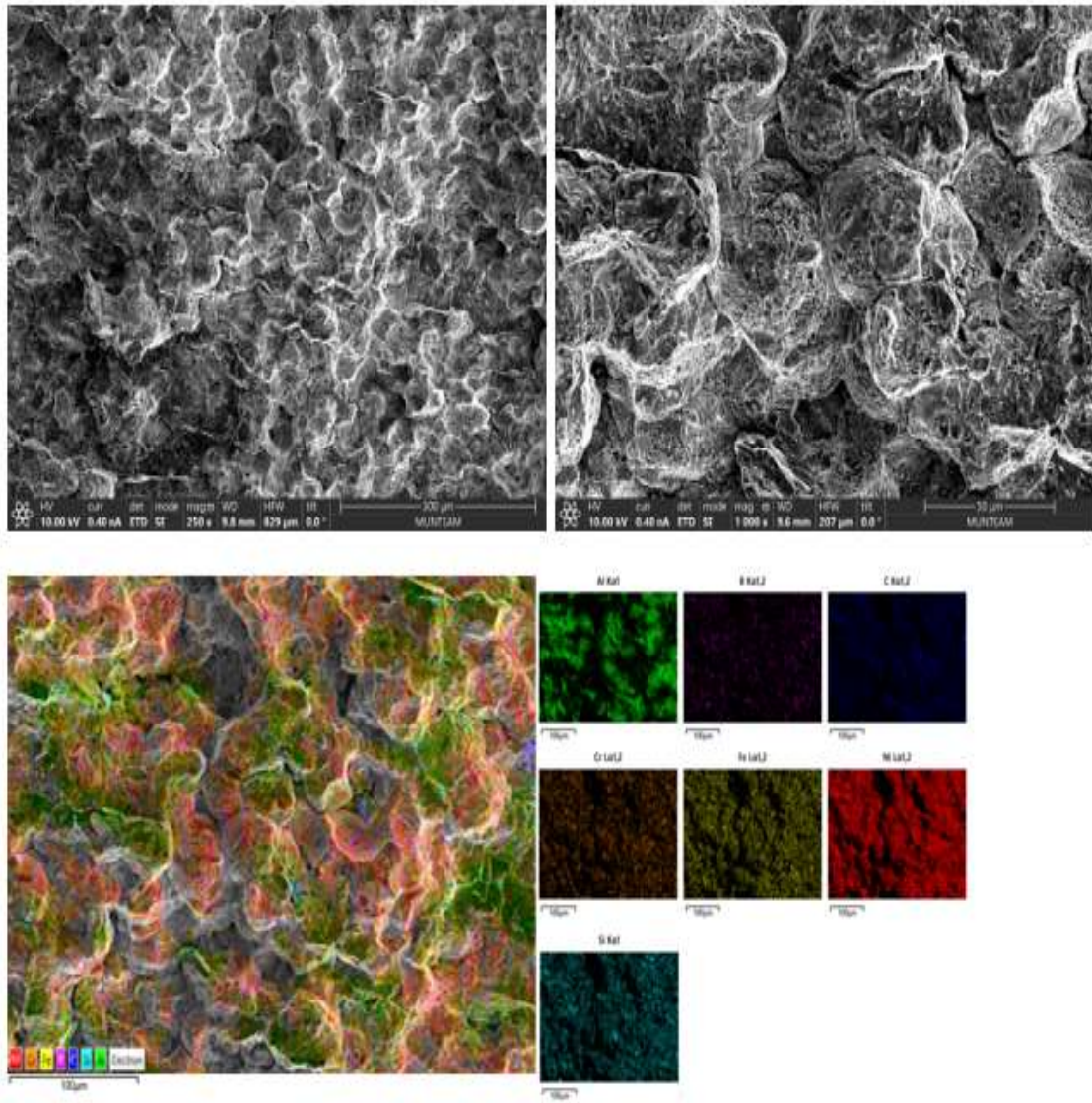
Şekil 4. 15. S2)%4 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.15'te ki SEM-EDS görüntüsünde AlSi12 katkılı numunede kırık yüzey morfolojisi düzensiz ve gözenekli yapısıyla gevrek kırılma davranışına işaret etmekte, Al ve Si yoğunlaşmaları ötektik benzeri çöktürleri göstermektedir.



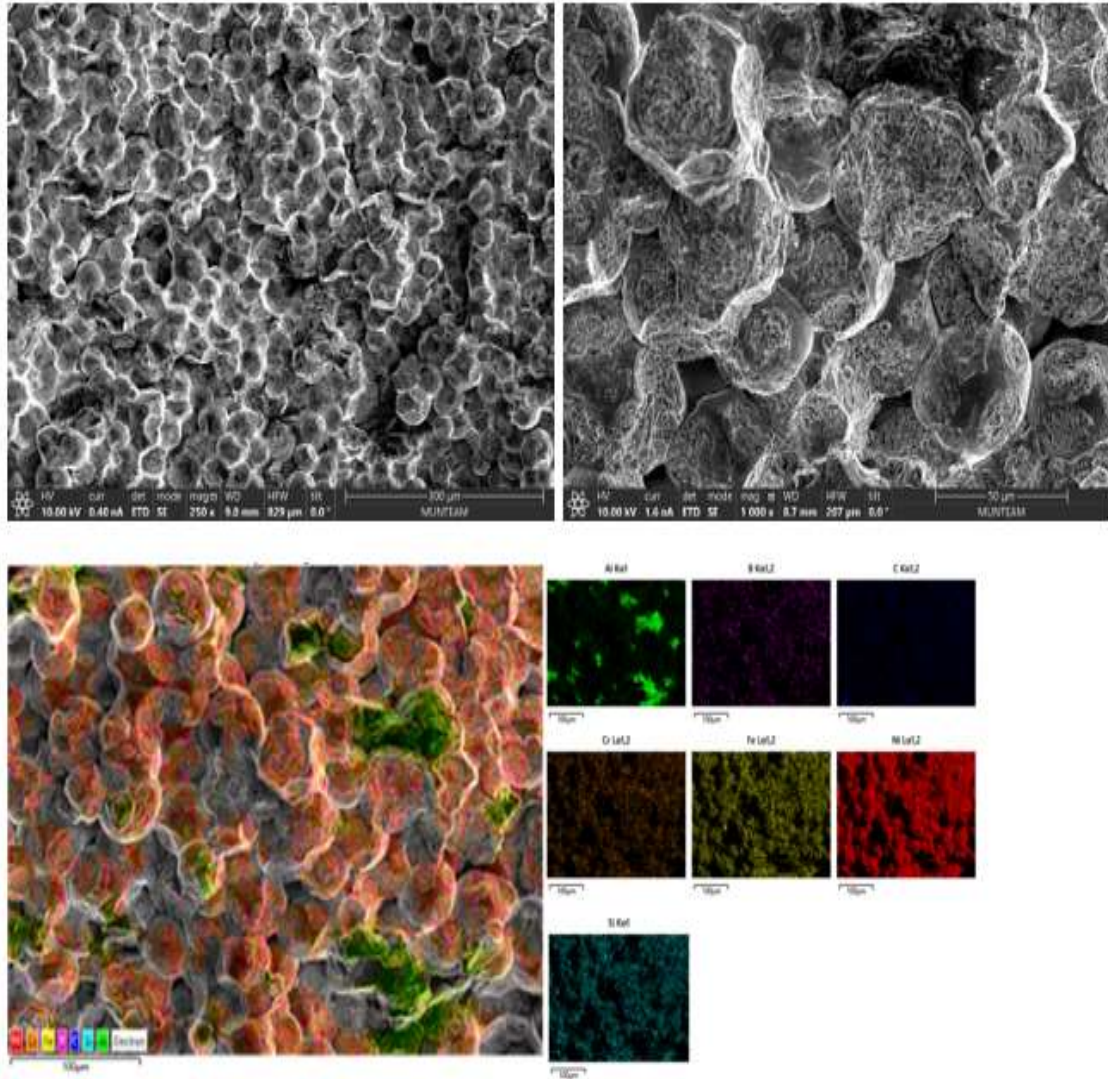
Şekil 4. 16. S3)%6 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.16'da ki SEM-EDS görüntüsünde EDS haritalamada Al ve Si zenginleşmeleri, Ni ve Cr'un homojen matrisi içinde ayrılmış bölgeler halinde belirginleşmektedir. Bu durum, AlSi12 katkısının lokal intermetalik faz oluşumuna yol açtığını göstermektedir.



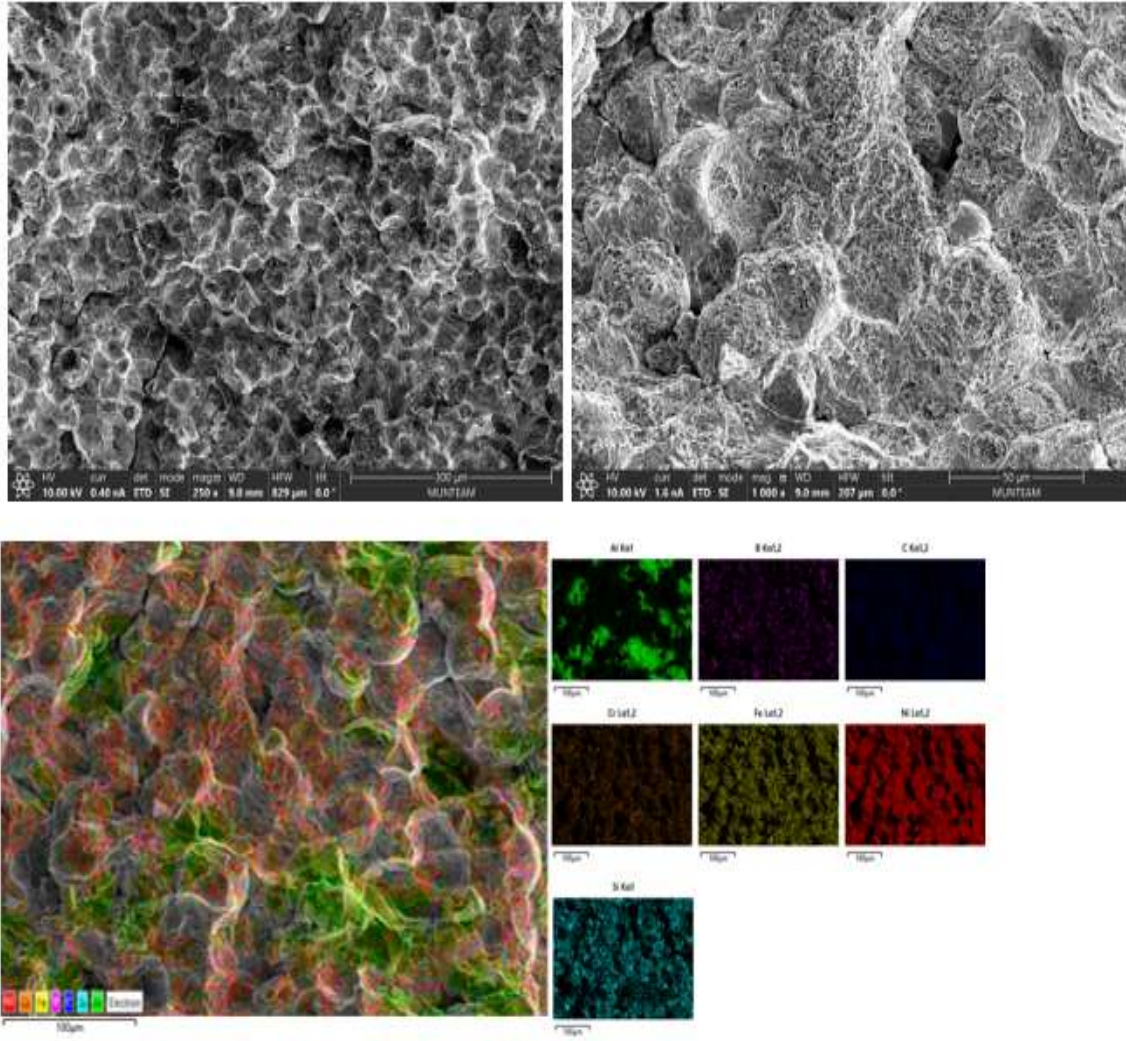
Şekil 4. 17. S4)%8 AlSi12 katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.17’de ki SEM-EDS görüntüsünde AlSi12 katkısı, matris içinde ötektik benzeri ağ yapılarının oluşmasına neden olmuş, bu da sertlik ve aşınma direncini artırıcı yönde katkı sağlamıştır.



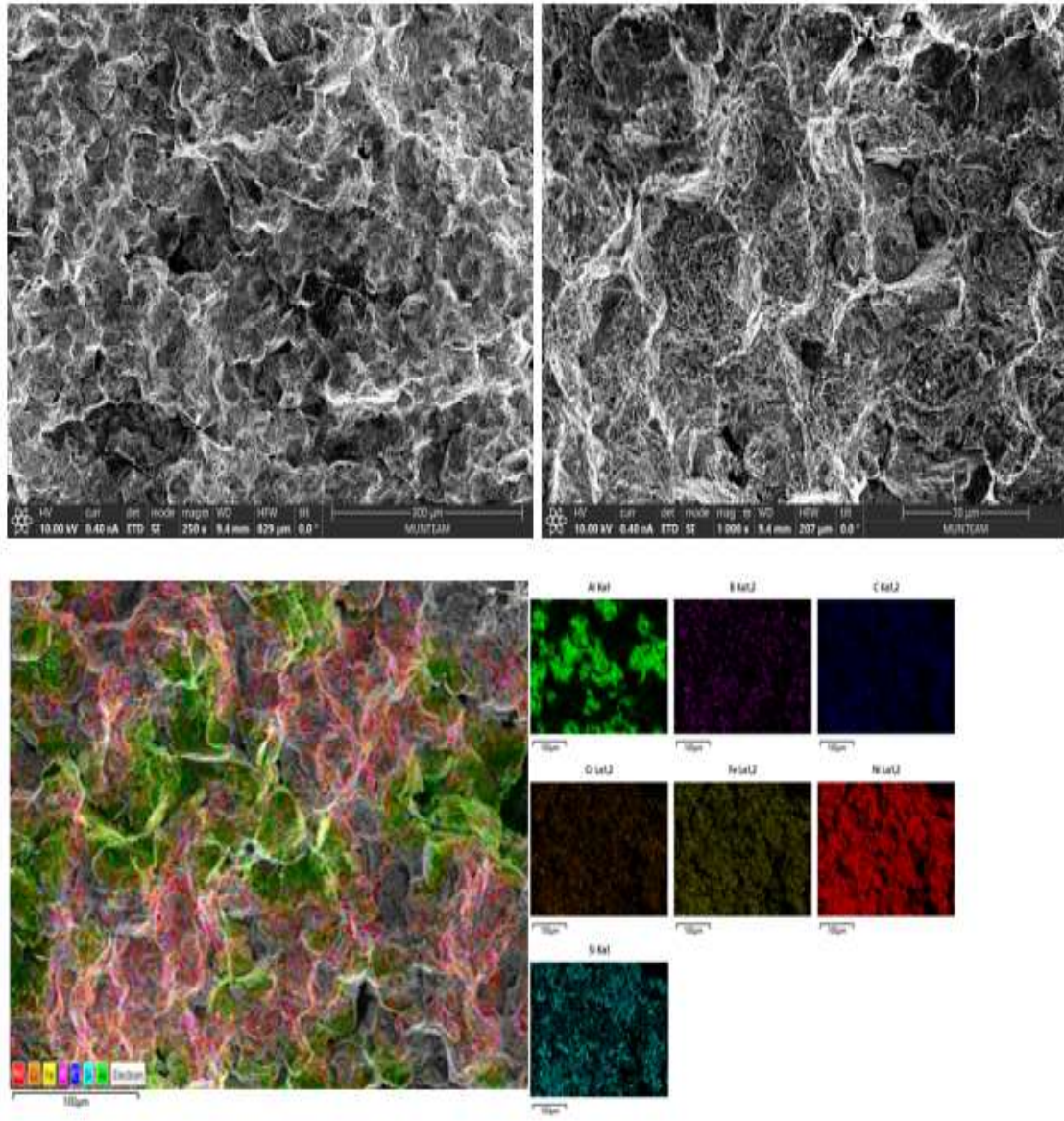
Şekil 4. 18. S9)2 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.18’de ki SEM-EDS görüntüsünde Al katkılı numunede Al elementinin (kırmızı) matris içerisinde homojen dağılmadığı, belirli bölgelerde yoğunlaştığı, Ni ve Cr elementlerinin ise yapının temel fazını oluşturduğu gözlenmektedir.



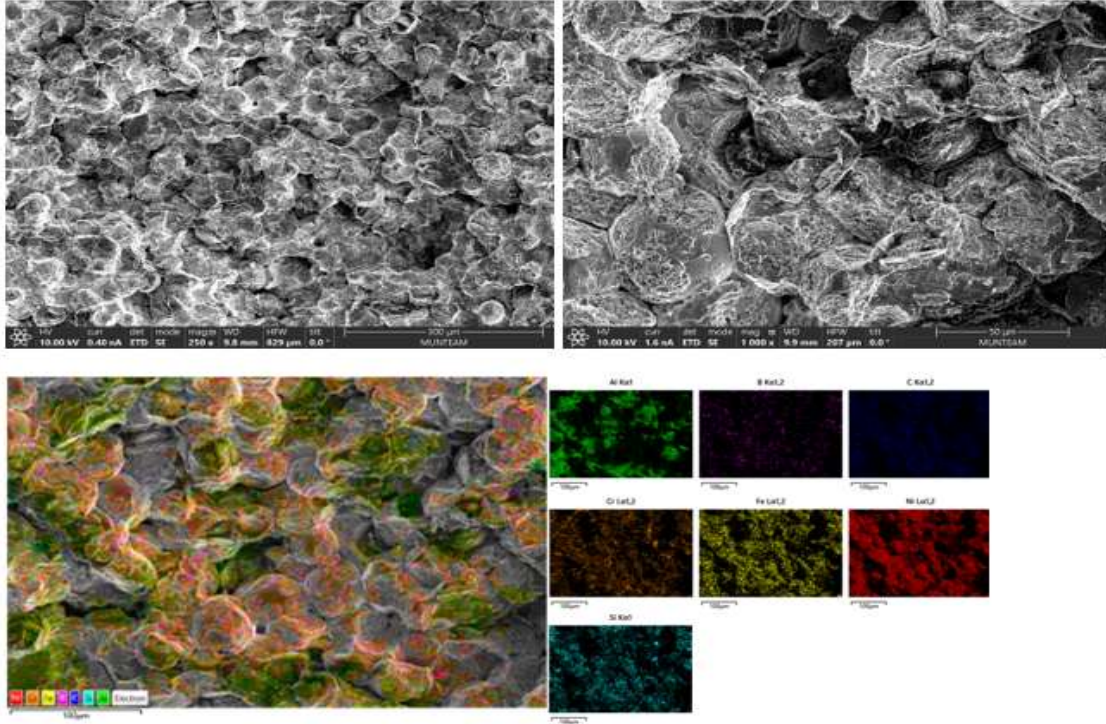
Şekil 4. 19. S10)%4 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.19’da ki SEM-EDS görüntüsünde Al katkısı sonrası kırık yüzeyde gözenekli ve gevrek yapılar oluşmuş, Al zengin bölgelerde Ni-Al esaslı intermetalik bileşiklerin varlığına işaret eden dağılımlar belirlenmiştir.



Şekil 4. 20. S11)%6 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.20’de ki SEM-EDS görüntüsünde EDS haritaları, Al’un lokalize olduğu bölgelerde ötektik benzeri çökeltilerin ve muhtemel Ni-Al fazlarının oluştuğunu göstermekte, bu fazlar sertlik artışına katkı sunmaktadır.



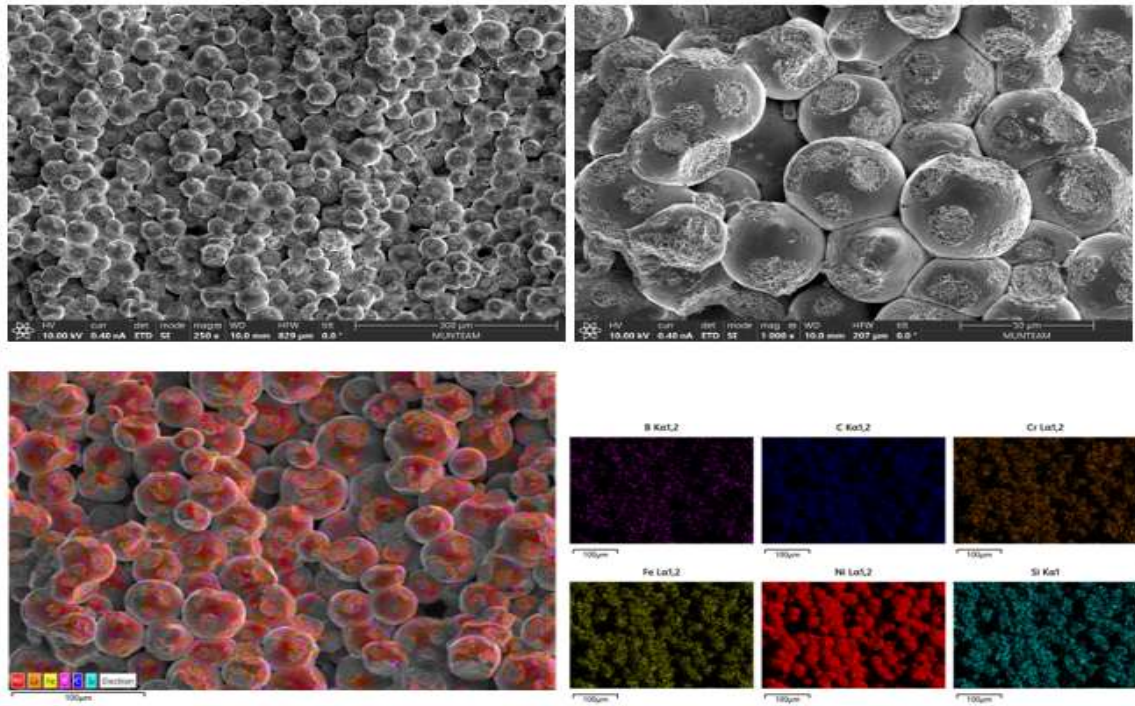
Şekil 4. 21. S12)%8 Al katkılı numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.21’de ki SEM-EDS görüntüsünde Al katkılı numunelerde, matrisin tokluğu ile Al kaynaklı sert fazların birleşmesi sonucu hibrit bir mikroyapı elde edilmiştir; bu yapı aşınma direncini ve yüksek sıcaklık performansını iyileştirmektedir.

Şekil 4. 14-21’de verilen SEM-EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu - Enerji Dağılımlı Spektroskopi) görüntüsü, sinterleme yöntemiyle %2, %4, %6 ve %8 oranlarında Al ve AlSi12 katkısı yapılan NiCrBSiFe esaslı bir numunenin kırık yüzeyine aittir. Görüntüde, farklı elementlerin dağılımları renkli haritalama ile üst üste bindirilmiş şekilde sunulmuştur. Resmin sol alt kısmında yer alan renk kodlamalarına göre; sarı (Fe), yeşil (B), mavi (C), mor (Ni), turuncu (Cr), pembe (Si), kırmızı (Al) elementlerini temsil etmektedir. Siyah-beyaz arka plan ise elektron görüntüsünü yansıtmaktadır.

Yüzey morfolojisi incelendiğinde, düzensiz ve gözenekli bir yapı göze çarpmaktadır. Bu yapı, sinterleme sonrası oluşan kırılma mekanizması ve malzemenin gevrek karakteri hakkında bilgi vermektedir. Elementel dağılım açısından bakıldığında, özellikle kırmızı ve pembe bölgelerde yoğunlaşan Al ve Si elementlerinin, Al ve AlSi12 katkılarının sinterleme sonrası matris içinde belirli bölgelerde birikme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Ni ve Cr elementleri (mor ve turuncu), alaşımın temel yapısını oluşturmaya devam etmekte olup,

homojen bir dağılım sergilemektedir. Fe (sarı) ve B (yeşil) elementlerinin de yapıda nispeten dengeli bir dağılım gösterdiği gözlemlenmektedir. Genel olarak, bu görüntü hem alaşımın kırık yüzey morfolojisini hem de farklı elementlerin sinterleme sonrası dağılım davranışlarını ortaya koymaktadır. Bu tür analizler, sinterleme parametrelerinin ve katkı maddelerinin mikro yapı üzerindeki etkilerini değerlendirmek açısından oldukça kritik öneme sahiptir.



Şekil 4. 22. S13)%100 NiCrBSiFe Saf numunenin kırık yüzey EDS görüntüleri

Şekil 4.22’de verilen SEM-EDS (Taramalı Elektron Mikroskobu – Enerji Dağılımlı Spektroskopi) görüntüsü, sinterlenmiş NiCrBSiFe alaşımına ait bir numunenin kırık yüzeyinden elde edilmiştir. Görüntüde farklı elementlerin dağılımları, renk kodlamasıyla haritalandırılmış olup, sol altta belirtilen renklere göre: kırmızı (Ni), turuncu (Cr), sarı (Fe), mor (B), mavi (C), ve açık mavi (Si) olarak tanımlanmıştır. Arka planın gri tonlarda olması ise elektron görüntüsüne karşılık gelmektedir.

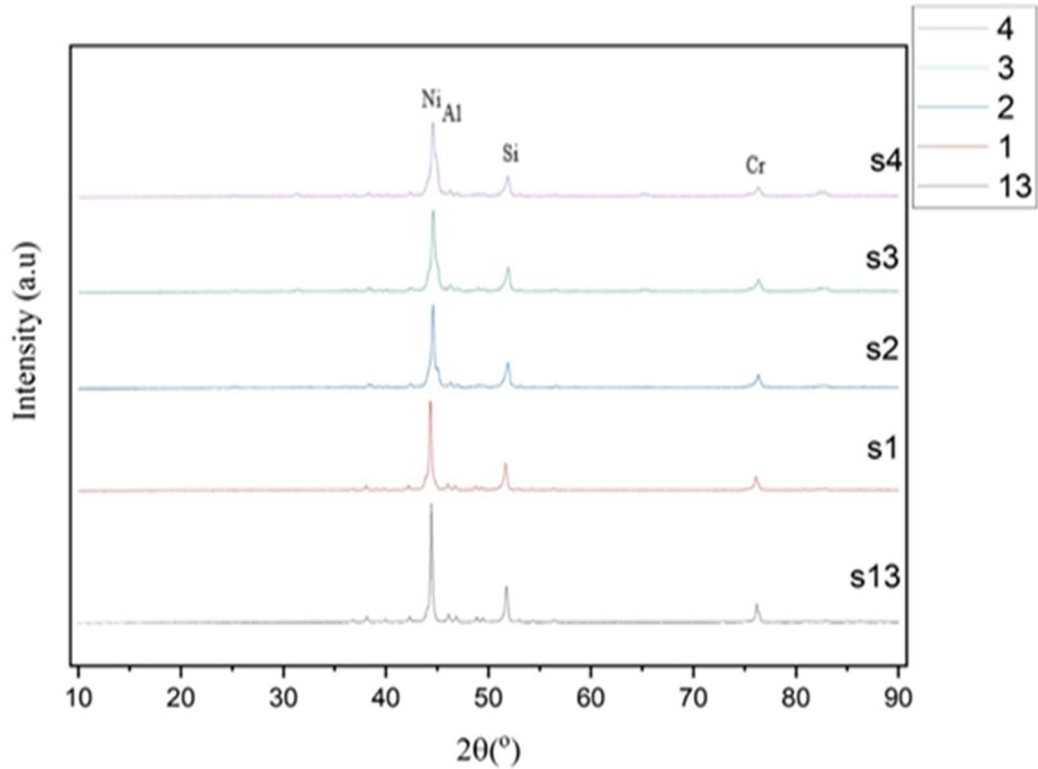
Mikroyapı incelemesi, numunenin büyük oranda küresel tanelerden oluştuğunu ve bu tanelerin sinterleme işlemi sırasında birbirine kısmen kaynaştığını göstermektedir. Bu yapı, kullanılan başlangıç tozlarının morfolojisinin korunmuş olduğunu ve sinterleme sıcaklığı ile süresinin tam yoğunlaşmayı sağlamadığını düşündürmektedir. Elementel dağılıma

bakıldığında, özellikle Ni (kırmızı) ve Cr (turuncu) elementlerinin tüm yüzeyde homojen bir şekilde dağılmış olduğu gözlemlenmektedir. Fe, B, C ve Si elementleri de küresel parçacıkların üzerinde düzenli bir dağılım sergilemekte, bu da sinterleme sonrası kimyasal bileşimin mikro yapıya dengeli bir şekilde entegre olduğunu göstermektedir. Bu görüntü, sinterleme sonrası mikro yapıda meydana gelen elementel dağılımın yanı sıra, gözeneklilik ve tanecik arası bağlanma hakkında da önemli ipuçları sunmaktadır. Homojen element dağılımı ve belirgin tanecik yapısı, sinterleme işleminin kontrollü bir şekilde gerçekleştiğini ve alaşımın hedeflenen kompozisyonunun başarılı bir şekilde sağlandığını göstermektedir.

4.6. XRD (X Işınımı Kırılması) Analiz Sonuçları

Şekil 4.23 grafiğinde görüldüğü gibi 42-44-76 derecelerde Ni-AlSi12 yoğun bir şekilde görülmektedir.

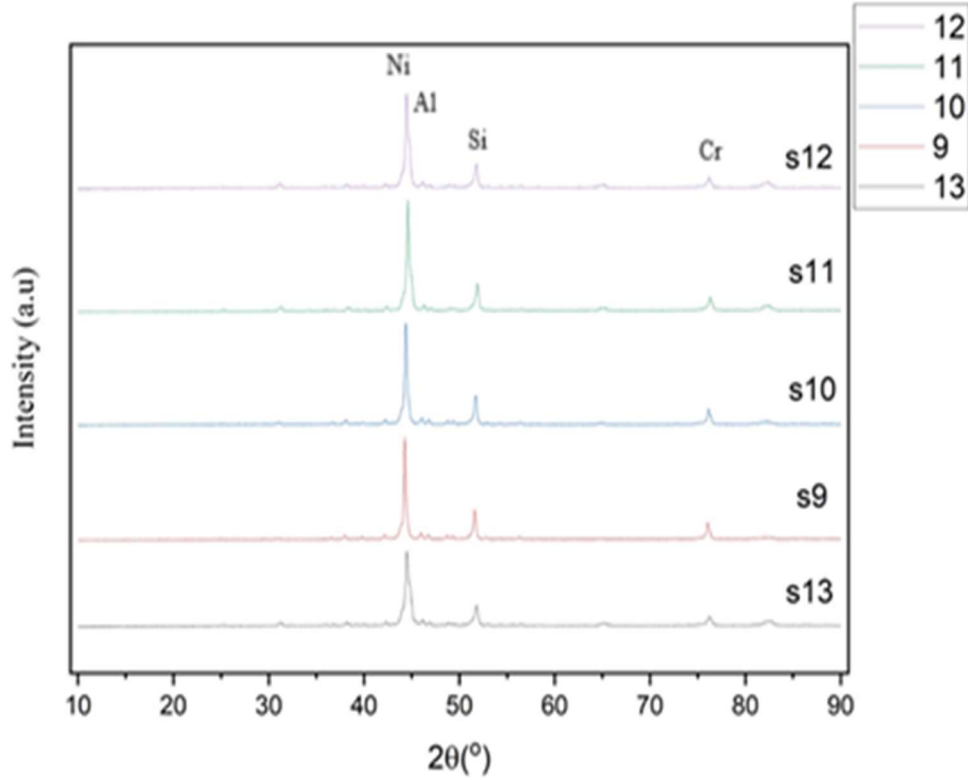
Ayrıca 76 derecede Cr, 82 derecede Fe görülmektedir.



Şekil 4. 23. S1)%2 AlSi12, S2)%4 AlSi12, S3)%6 AlSi12, S4)%8 AlSi12, S13)%100 NiCrBSiFe numunelerin XRD grafiği

Şekil 4.24 grafiğinde görüldüğü gibi 45-52-76 derecelerde Ni-Al yoğun bir şekilde görülmektedir.

Ayrıca 77 derecede Cr, 83 derecede Fe görülmektedir.



Şekil 4. 24. S9)%2 Al, S10)%4 Al, S11)%6 Al, S12)%8 Al, S13)%100 NiCrBSiFe numunelerin XRD grafiği

XRD analizlerinden elde edilen faz tanımlamaları, sinterleme sonrası yapıda, yüksek sıcaklık ve indirgen atmosfer koşullarında oluşan kararlı fazların korunduğunu ortaya koymaktadır. Bu bulgu, literatürde benzer nikel esaslı çok fazlı sistemler üzerinde yapılan çalışmalarla uyumlu olup, elde edilen sonuçların güvenilirliğini desteklemektedir. Bununla birlikte, çok fazlı yapıya sahip numunelerde bazı fazların düşük simetriye sahip olması ve piklerin kısmen örtüşmesi, belirli fazların kesin olarak ayırt edilmesini zorlaştırmıştır. Sinterleme sonrası numunelerde, nikel esaslı matris fazın yanı sıra çeşitli borür ve karbür fazlarının oluştuğu belirlenmiştir. Bu sert ve yüksek sıcaklık dayanımlı fazların varlığı, malzemenin sertlik, aşınma direnci ve yüksek sıcaklık stabilitesi gibi mekanik özelliklerine önemli ölçüde katkı sağlayacak bir mikroyapının oluştuğunu göstermektedir (Hemmati ve ark., 2013; Yamanoglu ve ark., 2014; Naik ve ark., 2021; Silva ve ark., 2024).

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Çalışmanın Genel Değerlendirilmesi

Bu tez çalışmasında, kıvılcım plazma sinterleme (SPS) yöntemiyle nikel esaslı alaşımların üretimi gerçekleştirilmiş ve sıvı faz katkısının mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. SPS yöntemi, kısa sürede yüksek sıcaklık ve basınç uygulayarak homojen mikroyapılar elde etme konusunda başarılı olmuş, özellikle geçici sıvı faz oluşumunun mikroyapı yoğunluğunu ve sertliği artırdığı gözlemlenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, Al ve AlSi12 katkılarının sinterleme etkinliğini artırdığı, gözenek oranlarını düşürdüğü ve bağ dayanımını güçlendirdiği belirlenmiştir. Yoğunluk, sertlik ve eğilme dayanımı gibi mekanik testler, sıvı faz katkısının uygun oranlarda kullanılması durumunda önemli iyileşmeler sağladığını göstermiştir. XRD ve SEM/EDS analizleri de, oluşan fazların ve mikroyapıların homojenliğini destekleyici niteliktedir.

Elde edilen bulgular, SPS yönteminin hızlı ve enerji verimli üretim süreçleri açısından oldukça avantajlı olduğunu ve nikel esaslı alaşımların yüksek performanslı uygulamalar için güçlü bir alternatif oluşturduğunu ortaya koymuştur. Ayrıca, bu çalışmanın sonucunda üretilen veriler, gelecekteki araştırmalara temel teşkil edecek nitelikte olup, farklı katkı türlerinin ve oranlarının denenmesiyle yeni bileşimlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

5.2. Çalışmadan Elde Edilen Bulgular

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde aşağıdaki temel bulgular elde edilmiştir:

- SPS yöntemi ile üretilen nikel esaslı alaşımlar yüksek yoğunlukta, gözeneksiz ve homojen mikroyapılara sahip olmuştur.
- Al ve AlSi12 katkılarının artan oranlarıyla birlikte numunelerin yoğunluklarında genel bir azalma eğilimi, sertlik ve kırılma dayanımı değerlerinde ise artış eğilimi gözlemlenmiştir.

- %2–4 AlSi12 katkısı, optimum katkı oranı olarak belirlenmiş; bu oranlarda hem yoğunluk hem de mekanik özellikler arasında iyi bir denge sağlanmıştır.
- Vickers sertliği ölçümleri, katkı oranı arttıkça mikroyapı içerisindeki bağlanmanın güçlendiğini ve sertlik değerlerinin yükseldiğini göstermiştir.
- Üç noktalı eğilme testleri, sıvı faz katkılı numunelerde kırılma dayanımının katkısız numunelere göre daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur.
- XRD analizleri, sinterleme sonrası oluşan fazların kimyasal kararlılığa sahip olduğunu; SEM/EDS incelemeleri ise mikroyapının homojen dağılım sergilediğini ve katkı elementlerinin etkili şekilde matrise dağıldığını göstermiştir.
- Geçici sıvı faz oluşumunun, partiküller arası bağlanmayı kolaylaştırdığı, gözenekleri azalttığı ve bu sayede mikroyapısal bütünlüğü artırdığı deneysel olarak kanıtlanmıştır.

Bu bulgular, sıvı faz katkısının SPS yöntemiyle üretilen nikel esaslı alaşımların mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerinde doğrudan ve olumlu etkileri olduğunu göstermektedir.

5.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

- Bu çalışmada elde edilen bulgular doğrultusunda, gelecekte yapılacak araştırmalarda aşağıdaki hususlara odaklanılması faydalı olacaktır:
- Farklı sıvı faz katkı malzemeleri (örneğin Cu, Sn, Mg gibi) kullanılarak, nikel esaslı alaşımların mikro yapı ve mekanik performans üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmelidir.
- Sinterleme sıcaklığı, basınç ve süre parametreleri sistematik olarak değiştirilerek, en uygun üretim koşulları belirlenmelidir.
- Elde edilen numunelerin yüksek sıcaklıkta mekanik performansı, oksidasyon ve korozyon dayanımı gibi özellikleri test edilerek ileri mühendislik uygulamalarındaki potansiyelleri değerlendirilmelidir.
- Çevresel etkiler (termal çevrim, nem, gaz atmosferi) altında malzeme dayanımı uzun vadeli testlerle analiz edilmelidir.
- SPS yöntemiyle üretilen bu tür alaşımların kaplama teknolojilerinde veya biyomalzeme alanlarında kullanımı incelenerek disiplinler arası araştırmalara katkı sağlanabilir.

- Kullanılan toz boyutlarının, katkı maddesi dağılımının ve öğütme süresinin mikroyapı üzerindeki etkileri daha detaylı karakterizasyon yöntemleriyle araştırılmalıdır.
- Numunelerin simülasyon ve modelleme çalışmalarıyla desteklenmesi, deneysel sonuçların daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.
- Bu öneriler doğrultusunda yapılacak çalışmalar, SPS yöntemiyle üretilen nikel esaslı alaşımların daha geniş uygulama alanlarında etkin şekilde kullanılmasına olanak sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- An, J., Li, Y., & Zhao, F.,** 2025. Influence of transient melt phases on the microstructure evolution in ceramic-metal sintered systems. *Ceramics International*, 51(3), 2769–2781.
- Asadian, K., Khosravibavandpoori, S., Gholeji, R.B., Paykar, Z., Eshraghi, M.J., Derakhshandeh, M.R.,** 2024. Kontrollü faz oluşumu ile reaktif spark plazma sinterleme sırasında Mo-SiC kompozitlerinin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi. *Journal of Alloys and Compounds*, 177502.
- Aytimur, A., Koçyiğit, S., & Uslu, İ.** 2014. Calcia stabilized ceria doped zirconia nanocrystalline ceramic. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 24, 927-932.
- A.T. Sucgang, L. Cuzacq, J.-L. Bobet, Y. Lu, J.-F. Silvain.,** 2025. Pressure-less liquid-phase sintering of aluminum-based materials, *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9
- Bahamirian, M., Alipour, F., Golenji, R.B., Nikzad, L., Barounian, M.H., Razavi, M.,** 2021. Reaktif spark plazma sinterleme yöntemiyle üretilen SiC-B4C-Ni hibrit kompozitlerde karbon nanotüplerin mekanik özellikler üzerindeki rolü. *Ceramics International*
- Basnet, B., Rijal, B., & Sah, D.,** 2024. Comparative study of mechanical properties in transient and non-transient phase sintered compacts. *Materials Characterization*, 209, 112864.
- Bhoskar, A., Naik, H., Kalyankar, V., Deshmukh, D.,** 2025. Nickel-based metallurgical coating architectures for superior wear resistance in high-temperature P91 steel applications. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 9:100151
- Cao, S., Gong, T., Zhang, S., Zhang, J., Chen, Y., Chen, X. Q., & Li, D.,** 2025. Solidification of a nickel-based superalloy containing copper: A study combined with experiment and phase-field simulation. *Journal of Alloys and Compounds*, 1020, 179477.
- C.Guo, J. Zhou, J. Chen, J. Zhao, Y. Yu, H. Zhou,** 2011. High temperature wear resistance of laser cladding NiCrBSi and NiCrBSi/WC-Ni composite coatings, *Wear*, 270 492-498.
- C. Yan, L. Hao, A. Hussein, S.L. Bubb, P. Young, D. Raymont,** 2014. Evaluation of light-weight AlSi10Mg periodic cellular lattice structures fabricated via direct metal laser sintering, *Journal of Materials Processing Technology*, 214, 856-864.

- De Luca, R., do Nascimento, P. H. T., dos Santos, V. T., da Silva, M. R., Lobo, F. G., Teram, R., ... & dos Santos, G. A.** 2025. Correlation of Solidification Thermal Variables with Microstructure and Hardness in CuMn11Al8Fe3Ni3 Manganese–Aluminum–Bronze Alloy. *Materials*, 18(234), 1–14.
- Ebrahimi, M., Maleki, M., Ahmadi, R., Karimian, H., & Shokrieh, A.** (2024). In-situ synthesis of nanoporous nickel/carbon composite foam to encapsulate the phase change materials for energy management. *Journal of Energy Storage*, 102, 113915.
- E.B. Silva, M.G. Azevedo, L.A. Matlakhova, B.F. Oliveira, S.N. Monteiro, L.J. Oliveira,** Influence of pressure and powder characteristics on the properties and microstructure of Colmonoy-5 alloy sintered by spark plasma sintering, *Journal of Materials Research and Technology*, 31 (2024) 363-371.
- Fernandes, R., Lopes, M., & Gonçalves, A.,** 2025. Mechanical reinforcement in transient liquid phase sintered metal-matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 21, 32–43.
- Graebner, M., Giese, M., Lorenz, S., Treutler, K., Schroepfer, D., Wesling, V., & Kannengiesser, T.,** 2025. Wear resistance of modified NiMoCrSi claddings in relation to the resulting surface machinability via ultrasonic-assisted milling. *Wear*.
- Huang, Y.J., Zhang, F.L., Pan, X.Y., Zhou, Y.M., Tang, H.Q.,** 2024. Elmas takım için çift aşamalı reaktif sinterlenmiş Fe3Al bazlı yüksek aşınma dirençli metal bağ. *Wear*, 556, 205517.
- H. Naik, V. Kalyankar,** 2021. Development of NiCrSiBC weld hardfacing approach for P91 steels used in steam turbine components, *Soldagem & Inspeção*, 26 e2608.
- I. Hemmati, V. Ocelík, J.T.M. De Hosson,** 2013. Effects of the Alloy Composition on Phase Constitution and Properties of Laser Deposited Ni-Cr-B-Si Coatings, *Physics Procedia*, 41 302-311.
- I. Hemmati, V. Ocelík, K. Csach, J.T.M. De Hosson,** 2014. Microstructure and phase formation in a rapidly solidified laser-deposited Ni-Cr-B-Si-C hardfacing alloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 45 878-892.
- Jiang, F., Zhao, C., Liang, D., Zhu, W., Zhang, Y., Pan, S., Ren, F.,** 2020. Spark plazma sinterleme ile üretilen CoCrFeMnNi yüksek entropili alaşımlarında in-situ oluşturulan heterojen tane yapısı ile mukavemet-süneklik dengesi. *Materials Science and Engineering A*, 771, 138625.
- Jin, S., Wang, T., & Li, H.,** 2024. Thermally-induced transient phase transitions in powder metallurgy systems. *Powder Metallurgy Progress*, 24(2), 81–90
- Kanyane, L.R., Malatji, N., Popoola, A.P., Fayomi, O.S.,** 2019. Spark plazma sinterleme tekniği ile eş atomik Ti-Al-Mo-Si-Ni yüksek entropili alaşımın sentezi: Mikro yapı, aşınma, korozyon ve oksidasyon davranışlarının evrimi. *Results in Physics*, 14, 102465.

- Khan, M.F., Damodaram, R., Altammar, H., & Karthik, G. M.** (2025). Metallurgical and Mechanical Properties of Stellite 6 Deposition Developed Through Friction Surfacing Technique. *Materials* 18(5) 1003.
- Korda, A. A., Muhammad, D. P. T., Muhammad, F., Achmad, T. L., Prawara, B., Prajitno, D. H., Jihad, B. H., Setianto, M. H., & Basuki, E. A.,** 2025. Microstructural stability and high temperature isothermal oxidation behavior studies of high entropy alloy AlCoCrFeNi. *Corrosion Communications*.
- Kováčik, J., & Lis, M.,** 2025. *Journal of Materials Research and Technology*, 36, 5940–5951.
- Krella, A.,** 2025. Hydrogen-Induced Degradation of Metallic Materials—A Short Review. *Materials*, 18(3), 597.
- Ksiazek, M., & Boron, L.,** 2025. Microstructure, Tribological, and Corrosion Behavior of HVOF-Sprayed (Cr₃C₂-NiCr+Ni) Coatings on Ductile Cast Iron. *Materials*, 18(1856), 1–22.
- Kuo, C.-H., Lin, Y.-F., & Wang, M.,** 2024. Enhanced densification of nano-structured composites via transient liquid phase sintering. *Materials Letters*, 352, 134987.
- Küçük, M., & Yıldız, A.,** 2023. Spark Plasma Sinterleme Yöntemi ile Yoğunlaştırılan Yüksek Entropili Alaşımlarda Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerin İncelenmesi. *Journal of Advanced Materials Technologies*, 9(1), 44–57.
- Lee, M., Kim, H., & Ahn, J.,** 2025. Superplastic Deformation Behavior and Microstructural Evolution of Electroformed Nickel Foils Determined by Thermomechanical Analysis. *Materials*, 18(6), 1365.
- Li, M., Wan, J., Ding, Z., & Li, R.,** 2025. The role of Si element on the precipitation behavior of GH2907 superalloys. *Metals*, 15(484), 1–17.
- Lin, M. S., & Chu, K. R.,** 2025. On the Non-Thermal Mechanisms in Microwave Sintering of Materials. *Materials*, 18(3), 668.
- Liu, X., Zhang, Y., Wang, T., & Li, H.,** 2025. *Materials Chemistry and Physics*, 305, 128027.
- Liu, Y., Zhang, X., Chen, X., Wang, C., Yu, Y., Jia, Y., Yao, W.,** 2024. CUG-1A Ay regolit simülanının mekanik ve termal özelliklerinin SPS ile iyileştirilmesi. *Crystals*, 14, 1022.
- Lóh, N. J., Simão, L., Faller, C. A., De Noni Jr, A., & Montedo, O. R. K.,** 2016. A review of two-step sintering for ceramics. *Ceramics International*, 42(11), 12556-12572.
- L. Cuzacq, I. Atchi, J.-L. Bobet, Y. Lu, J.-F. Silvain,** 2025. Pressureless sintering of Al/diamond materials using AlSi12 liquid phase, *Materials Letters*, 381 137788.

- Meng, Y., Li, X., Yun, B.,** 2024. SPS yöntemiyle üretilen HAP/45S5 biyoglass katmanlı seramik kompozitlerin mekanik özelliklerinin hazırlanması ve karakterizasyonu. *Materials*, 17, 5413. <https://doi.org/10.3390/ma17225413>.
- Moison, X., Giraud, D., Hébert, S., & Drouet, E.,** 2025. *Scripta Materialia*, 240, 115608.
- O'Connor, J., Noble, D. R., Bridges, A., Shingledecker, J., Scheibel, J., & Gagliano, M.,** 2025. Review of the Impact of Hydrogen-Containing Fuels on Gas Turbine Hot-Section Materials. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 147(8), 81013.
- Ojo, O. A., & Richards, N. L.,** 2022. Spark plasma sintering of nickel-based superalloys: Influence on microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Science*, 57(16), 10055–10068.
- Orooji, Y., Ghasali, E., Moradi, M., Derakhshandeh, M.R., Alizadeh, M., Shahedi Asl, M., Ebadzadeh, T.,** 2019. Spark plazma sinterleme yöntemiyle mullite-TiB₂-CNT hibrit kompozitlerin hazırlanması. *Ceramics International*.
- Pan, W., Xu, B., & Liu, C.,** 2025. Role of metallic carbides on high temperature mechanical properties of wire arc additive manufactured GH4099 Ni-based superalloy. *Journal of Alloys and Metallurgical Systems*, 9, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.jalms.2025.100163>
- Pasarkar, A., & Balaguru, S.,** 2025. Comparative study on tensile and high cycle fatigue behaviour of 316L(N) SS hardfaced with Ni-Cr-B-Si alloy by GTA and laser cladding processes. *Nuclear Engineering and Technology*, 57, 103185.
- Pei, W., Zhang, S., Ma, M., Tan, W., & Zhu, G.,** 2025. Effect of work-rate on synergy of corrosion and wear of nickel-based 690 alloys under fretting conditions. *Results in Engineering*, 26, 104902.
- Peng, Y.B., Zhang, W., Mei, X.L., Wang, H.J., Zhang, M.Y., Wang, L., Li, X.F., Hu, Y.,** 2020. Spark plazma sinterleme ve vakum sıcak presleme ile üretilen FeCoCrNi-Mo yüksek entropili alaşımların mikro yapıları ve mekanik özellikleri. *Materials Today Communications*, 24, 101009.
- Podobová, M., Puchý, V., Sedlák, R., Medved', D., Džunda, R., Kromka, F.,** 2024. Grafenle takviye edilmiş Ti-Cu atık metal sürtünme kompozitlerinin aşınma davranışları. *Crystals*, 14, 948.
- Qoriati, D., Tsai, D. W., You, S. J., & Wang, Y. F.,** 2025. Experimental investigation on synergistic integrated MD-SLM-ED for Nickel recovery from electroplating wastewater: Influence of operating parameters and optimization. *Chemical Engineering Journal*, 160277.
- Rahman, M. S., & Ravi Chandran, K. S.,** 2025. *Materials Science and Engineering: A*, 932, 148249.

- Rao, S. A., Patel, H. N., & Zala, D. M., 2024.** Effect of spark plasma sintering on microstructure and mechanical properties of CoNiFeTi high entropy alloy fabricated by mechanical alloying. *Materials Chemistry and Physics*, 305, 127926.
- Ren, Y., Xiao, Y., Lu, Y., Li, Y., Hu, X., & Xu, F., 2025.** In situ SR-CT study of interfacial behavior of AlCoCrFeNi/Al composites during microwave sintering. *Journal of Alloys and Compounds*, 1027, 180541.
- Rupasinghe, M., Zhang, Z., Mendis, P., & Sofi, M., 2025.** Carbon sequestering biochar incorporated cementitious composites: Evaluation of hygrothermal, mechanical and durability characteristics. *Cement and Concrete Composites*, 157, 105864.
- R. Yamanoglu, W. Bradbury, E. Karakulak, E. Olevsky, R. German, 2014.** Characterisation of nickel alloy powders processed by spark plasma sintering, *Powder Metallurgy*, 57: 380-386.
- Saviot, A., Sallamand, P., Monchoux, J.P., Marcelot, C., Cours, R., Geoffroy, N., Le Gallet, S., 2024.** Al_xCoCrFeNi (x = 0.3 ve 1) yüksek entropili alaşımlarının reaktif spark plazma sinterleme sırasında faz ve mikro yapı oluşumu. *Journal of Materials Research and Technology*, 32, 3047-3059.
- S. Islak, M. Ulutan, S. Buytoz, 2020.** Microstructure and Wear Properties of Hot-Pressed NiCrBSi/TiC Composite Materials, *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 61: 571-582.
- Tang, Y.-Y., Chang, Y.-L., Luo, W., & Tang, D.-W., 2025.** High-temperature oxidation behavior of TiN-, Cr-, and TiN–Cr PVD-coated Zircaloy 4 alloy at 1200 °C. *Materials*, 18(1692).
- Thiruppathi, K., 2022.** Effect of process parameters on hardness and density of Cu-Al-Ni alloy with aluminium nanoparticles using Taguchi technique
- Ujah, C. O., Von Kallon, D. V., & Aigbodion, V. S., 2024.** High entropy alloys prepared by spark plasma sintering: Mechanical and thermal properties. *Materials Today Sustainability*, 25, 100639.
- Vidyuk, D., Tsarev, A., Petrov, M., & Kovalchuk, I., 2025.** Role of transient liquid phase in rapid sintering of titanium-based composite materials. *Journal of Advanced Materials Processing*, 15(2), 134–145.
- Vukelic, G., Mihaljec, B., & Ivošević, Š., 2025.** Marine Environment Effect on Welded Additively Manufactured Stainless Steel AISI 316L. *Journal of Marine Science and Engineering*, 13(3), 459.
- Wang, B., Cheng, Z., Xu, H., Wang, Y., Luo, L., Wang, S., Long, W., & Wei, S., 2025.** Study on the properties and mechanism of magnesium alloy and Ni-plating stainless-steel by ultrasonic-laser welding-brazing. *Scientific Reports*, 15(13588).

- Wang, Y., Tang, M., Zheng, H., Hu, Z., Zhong, Y., & Yang, C., 2025.** The impact of organic bentonite content on the properties of stereolithographic 3D-printed silicon-based ceramic core paste. *Materials*, 18(1855).
- Wang, Y., & Li, Z., 2025.** *Materials Today*, 58, 106–114.
- Wen, Y., Liu, C., Sun, L., Shan, T., Li, Z., & Zhang, J., 2025.** Microstructure and properties of partial transient liquid phase bonding joint of Si₃N₄ with nickel-based superalloy using ti/Au/Ni interlayers. *Ceramics International*
- Witkowska, J., Sobiecki, J., & Wierzchoń, T., 2025.** Advancements in Surface Modification of NiTi Alloys for Orthopedic Implants: Focus on Low-Temperature Glow Discharge Plasma Oxidation Techniques. *International Journal of Molecular Sciences*, 26(3), 1132.
- Xie, S., Li, R., Yuan, T., Zhang, M., Wang, M., Yin, L., Cao, P., 2020.** Spark plazma sinterleme yöntemiyle üretilen Al_{0.7}CoCrFeNi yüksek entropili alaşımlarında faz dönüşümünün yoğunlaşma kinetiği ve özellikler üzerindeki etkisi. *Materials Characterization*, 160, 110098.
- Yang, L., Zhang, Y., Chen, X., & Li, M., 2025.** Enhanced microstructure control in ceramics via two-step sintering: Mechanisms and recent advances. *Journal of Advanced Ceramics*, 14(2), 112–128.
- Zhang, J., Zhang, C., Zhang, S., Zhang, W., 2024.** Sıcak pres sinterleme yöntemiyle üretilen B₄C-Al₂O₃ kompozit seramiklerin mekanik özellikleri ve tokluk mekanizmaları. *Ceramics International*, 50(13), 24499–24507.
- Zhang, Y., Li, H., Wang, J., & Liu, Z., 2025.** Formation mechanism and control strategy of transient liquid phase in Ni-based superalloys during spark plasma sintering process. *Journal of Materials Science & Technology*, 142, 134–146.
- Zhang, Z., Du, H., Xu, K., Zhang, X., Ma, X., & Shuai, S., 2025.** Review of the Application of Metal-Supported Solid Oxide Fuel Cell in the Transportation Field. *Automotive Innovation*.
- Zhou, L., Wang, Y., & He, J., 2025.** Transient liquid phase formation during fast sintering of multi-component alloys. *Journal of Advanced Powder Materials*, 36, 104112.

ÖZGEÇMİŞ

