



Hadi Bilir

Kastamonu University, hadibilir@gmail.com, Kastamonu-Türkiye

Mehmet Akkaş

Kahramanmaraş İstiklal University, mehmet.akkas@istiklal.edu.tr,
Kahramanmaraş-Türkiye

Can Doğan Vurdu

Kastamonu University, cvurdu@kastamonu.edu.tr, Kastamonu-Türkiye

DOI	http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2025.20.2.2A0204		
ORCID ID	0000-0002-6293-4138	0000-0002-0359-4743	0000-0002-5179-1266
Corresponding Author	Mehmet Akkaş		

TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİ İLE YÜKSEK ENTROPİLİ ALAŞIMIN ÜRETİMİ VE KARAKTERİZASYONU

Öz

Bu çalışmada, yüksek entropili alaşımlar (YEA) sınıfında yer alan CrMnFeCoNi (Cantor alaşımı) esaslı sistem, %5 Al ilavesiyle modifiye edilerek kompozit formda yeni bir alaşım geliştirilmiştir. YEA'lar, çok bileşenli yapıları sayesinde üstün mekanik ve yapısal özelliklere sahiptir. Al katkısının, yeni faz oluşumlarını tetikleyerek çökelme ve dispersiyon sertleşmesi gibi mekanizmaları devreye sokması beklenmiştir. Alaşım üretiminde, elemental tozlar yüksek enerjili bilyalı değirmen (HEBM) ile mekanik alaşımlama yoluyla homojen şekilde karıştırılmıştır. Elde edilen toz karışımları, 600 MPa basınç altında tek eksenli soğuk presleme ile kompakt hale getirilmiş, ardından 1000 °C'de atmosfer kontrollü sinterleme uygulanmıştır. Bu süreçle katı faz difüzyon mekanizmaları aktive edilerek, partiküller arası bağ oluşumu ve faz dönüşümleri sağlanmıştır. Mikroyapısal karakterizasyon SEM ile yapılmış; Al katkısının faz dağılımı, gözeneklilik ve partikül yapısı üzerinde belirgin etkiler yarattığı gözlemlenmiştir. Al ilavesi, bazı bölgelerde ikinci faz oluşumlarına, gözenek oranı değişimlerine ve heterojen partikül boyut dağılımına neden olmuştur. Sonuçlar, %5 Al katkısının CrMnFeCoNi matrisinde mikroyapısal kararlılığı ve mekanik performansı doğrudan etkilediğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek Entropili Alaşım, Sinterleme, Toz Metalurjisi, Mekanik Alaşımlama, Takviye Elementler

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF HIGH ENTROPY ALLOY BY POWDER METALLURGY METHOD

ABSTRACT

In this study, a novel composite alloy was developed by modifying the CrMnFeCoNi-based system—classified as a high-entropy alloy (HEA) and commonly referred to as the Cantor alloy—through the addition of 5 wt.% aluminum (Al). HEAs exhibit superior mechanical and structural properties due to their multi-component nature. The addition of Al is expected to promote the formation. For the alloy production, elemental powders were homogenized via mechanical alloying using a high-energy ball milling (HEBM) process. The resulting powder mixtures were then compacted through uniaxial cold pressing under a pressure of 600 MPa, followed by sintering at 1000 °C in a controlled atmosphere. This process activated solid-state diffusion mechanisms, enabling interparticle bonding and phase transformations. Microstructural characterization was conducted using scanning electron microscopy (SEM). The analysis revealed that Al addition significantly influenced phase distribution, porosity, and particle morphology. Specifically, the presence of Al led to the formation of secondary phases in certain regions, variations in porosity, and heterogeneity in particle size distribution. Overall, the findings demonstrate that the incorporation of 5 wt.% Al has a direct effect on the microstructural stability and mechanical performance of the CrMnFeCoNi matrix.

Keywords: High Entropy Alloys, Sintering, Powder Metallurgy, Mechanical Alloying, Reinforcement Elements

How to Cite:

Bilir, H., Akkaş, M. ve Vurdu, C.D., (2025). Toz metalurjisi yöntemi ile yüksek entropili alaşımın üretimi ve karakterizasyonu. Technological Applied Sciences, 20(2):45-52, DOI: 10.12739/NWSA.2025.20.2.2A0204.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yüksek entropili alaşımlar (YEA), geleneksel alaşım tasarımıyla farklı olarak, en az beş temel elementi yaklaşık eş atomik oranlarda içeren ve yüksek konfigürasyonel entropi sayesinde basit katı eriyik fazlarının oluşumunu destekleyen yeni nesil metalik malzemelerdir [1]. Bu benzersiz faz stabilitesi, çok sayıda elementin birlikte çözünemediği tek fazlı yapılar oluşturarak malzemelerin mekanik, termal ve kimyasal performansını artırmaktadır. Yüksek entropili alaşımlar (YEA), klasik alaşım tasarım ilkelerinden saparak, en az beş temel elementi yaklaşık eş atomik oranlarda içeren ve bu sayede çok fazlı mikrostrüktürler yerine genellikle basit katı eriyik fazlarının oluşumunu teşvik eden yeni nesil malzemelerdir [1]. Bu alaşımlar, yüksek konfigürasyonel entropi etkisiyle stabilize edilen yapılarına bağlı olarak, üstün mekanik ve fiziksel özellikler sergilemektedir. Literatürde en çok araştırılan yüksek entropili alaşım sistemlerinden biri olan CrMnFeCoNi alaşımı, sahip olduğu yüksek mukavemet, tokluk, sertlik, aşınma direnci, korozyon ve oksidasyon dayanımı gibi nitelikler sayesinde hem akademik hem de endüstriyel uygulamalar açısından büyük ilgi görmektedir [1-5]. Bu özellikler, söz konusu alaşımın üretim yöntemi ve işlem parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Özellikle toz metalurjisi yöntemiyle üretilen YEA'larda sinterleme sıcaklığı, yoğunluk, tane boyutu, gözeneklilik ve faz oluşumu gibi mikro yapısal özellikler üzerinde belirleyici bir rol oynamaktadır [6, 7 ve 8].

Sinterleme sıcaklığının etkisi, mekanik alaşımlama yöntemiyle üretilen FeCoCrNi esaslı YEA tozlarının farklı sinterleme teknikleriyle işlenmesi sonucunda elde edilen mikroyapısal ve mekanik özelliklerdeki farklılıklar üzerinden açıkça gözlemlenebilmektedir [9, 10 ve 12]. Bu bağlamda, sinterleme koşullarının optimizasyonu, hedeflenen performans özelliklerine sahip YEA'ların üretilebilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, CrMnFeCoNi yüksek entropili alaşım sistemine belirli katkı elementlerinin ilave edilmesiyle elde edilen alaşım kompozisyonlarının, farklı sinterleme sıcaklıklarında mikroyapısal evrimi detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmanın temel amacı, sinterleme sıcaklığının mikro yapı üzerindeki etkilerini ortaya koymak ve bu etkilerin nihai mekanik özellikler üzerindeki yansımalarını değerlendirerek, istenilen özellikleri sağlayacak optimum üretim parametrelerinin belirlenmesine katkı sunmaktır.

YEA'lar arasında en kapsamlı şekilde incelenen sistemlerden biri olan CrMnFeCoNi alaşımı, düşük sıcaklıklarda dahi süneklik ile birlikte yüksek mukavemet sunan bir fcc (face-centered cubic) yapı sergilemektedir [13]. Aynı zamanda yüksek sertlik, iyi aşınma dayanımı, üstün korozyon ve oksidasyon direnci gibi özellikleri sayesinde havacılık, nükleer enerji ve kriyojenik uygulamalar gibi kritik alanlarda potansiyel bir malzeme adayı olarak değerlendirilmektedir. Bu üstün özellikler, yalnızca kimyasal bileşim ile değil; aynı zamanda üretim yöntemi, sinterleme atmosferi, sıcaklığı ve süre gibi işlem parametrelerine de bağlı olarak değişiklik göstermektedir [14].

Bu çalışmada, CrMnFeCoNi esaslı yüksek entropili alaşım sistemine belirli alaşım elementlerinin katkılanması yoluyla elde edilen kompozisyonların, farklı sinterleme sıcaklıklarında mikroyapı üzerindeki evrimi detaylı olarak araştırılmıştır. Araştırmanın temel amacı, sinterleme sıcaklığının mikroyapısal özellikler üzerindeki etkisini anlamak ve bu sayede hedeflenen mekanik performansa sahip malzemelerin üretimi için optimal işlem parametrelerini belirlemektir.

2. RESEARCH SIGNIFICANCE

Bu çalışma, yüksek entropili alaşımlar (YEA) alanına katkı sağlayarak, CrMnFeCoNi (Cantor alaşımı) esaslı sisteme alüminyum (Al) katkısının mikroyapı ve potansiyel performans üzerindeki etkilerini incelemektedir. Yüksek enerjili bilyalı öğütme, soğuk presleme ve atmosfer kontrollü sinterleme gibi toz metalurjisi teknikleri kullanılarak, düşük oranlı Al katkısının faz kararlılığı, gözeneklilik ve partikül morfolojisi üzerindeki etkilerine dair önemli bulgular elde edilmiştir. Katı faz difüzyonunun aktive edilmesi ve çökelme/dağılma sertleşmesi gibi mekanizmaların değerlendirilmesiyle, YEA özelliklerinin ileri düzey yapısal ve fonksiyonel uygulamalara yönelik nasıl optimize edilebileceği gösterilmiştir. Ayrıca, bu çalışma Al ile takviye edilmiş YEA'ların geleneksel toz işleme yöntemleriyle ekonomik ve ölçeklenebilir şekilde üretilebileceğini ortaya koymaktadır.

Highlights:

- Elementel tozlar, yüksek enerjili bilyalı değirmenle mekanik olarak alaşımlanarak homojen karışım elde edilmiştir.
- 600 MPa'da tek eksenli soğuk presleme ve ardından 1000 °C'de sinterleme ile yoğunlaşma ve faz dönüşümleri sağlanmıştır.
- Al katkısı, ikincil faz oluşumlarına ve gözeneklilik ile partikül morfolojisinde değişimlere yol açmıştır.

3. MATERYAL VE METOD (MATERIALS AND METHODS)

Cantor elementleri olarak bilinen CrMnFeCoNi alaşımı ana bileşen (bundan sonra AB olarak kodlanacak) içinde %atomik oranlar (eşmolar oran) hepsi için %20 seçilmiştir. Çalışmamızda takviye elementleri olarak Alüminyum belirlenmiştir. Bu elementlere ait atomik boyut ve bazı fiziksel özellikler aşağıda tabloda verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan elementlere ait fiziksel veriler
(Table 1. Physical data of the elements used)

Element	Ergime Derecesi (°C)	Atom Ağırlığı (g/mol)	Yoğunluk (g/cm ³)	Atom Yarıçapı (pm)
Cr	1907	51.99	7.15	140
Mn	1246	54.93	7.26	140
Fe	1538	55.84	7.87	140
Co	1495	58.93	8.9	135
Ni	1455	58.69	8.9	135
Al	660	26.98	2.7	125

Takviye elementinin takviye oranı %5 olarak alınmıştır. Sinterleme sıcaklığı 1000°C olarak belirlenmiştir. Numunelerin oluşturulması için mekanik alaşımlandırma metodu uygulanmıştır. 400rpm hız ayarlanmıştır. Numuneler 13mm çapında ve 5mm yüksekliğinde silindirik şekilde üretilmiş ve soğuk presle 600MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Basınç, takviye elementinin yapısından kaynaklanan sebeplerden dolayı bazı numunelerde düşürülmüştür. Karıştırmanın daha homojen ve yapıya daha iyi nüfuz etmesi için 6.8 ve 10mm'lik çelik bilyalar kullanılmıştır. Bilyalar, karıştırma kabını taşımayacak şekilde ayarlanmış ve hepsinden belli miktarda kullanılmıştır. Toz-Bilya oranı 10:1 seçilmiştir. Cihazın toz haznesinin kendisi 2387g ve kapağı ise 772g olup hassas terazi ile bu ölçüler dikkate alınarak işlem yapılmıştır. Karıştırma esnasında ısınma ve hızdan dolayı çeperlere tozların yapışmaması için oranları koruyacak şekilde biraz fazladan toz ilavesi yapılmıştır. Çalışmaya ait tablo ve cihaz aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Çalışmada kullanılan Retsch marka mekanik karıştırıcı
(Figure 1. Retsch brand mechanical mixer used in the study)

Soğuk preslenen numuneler argon gazlı sinter fırınında 1000C°'de sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi 3 kademede yapılmıştır;

- 1. kademede fırın 1.5 saat boyunca belirlenen sıcaklığa getirildi,
- 2. kademede aynı sıcaklıkta 3 saat bekletildi ve
- 3. kademede 3 saat oda sıcaklığına düşmesi beklendi.

Sinterlemenin yapıldığı fırın aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 2. Sinterleme fırınının iki ayrı görüntüsü
(Figure 2. Two separate views of the sintering furnace)

Sinterlemeden alınan numuneler metalografik zımparalama işlemine tabi tutuldu. İlk olarak kabaca 75 numaralı zımpara ile tüm numuneler zımparalandıktan sonra sırasıyla; 320, 600, 800, 1200 ve son olarak 1500 numaralı zımparalar ile yüzey tamamen düzgünleştirildi. Zımparalamalar 3-4 dakika sürecek şekilde dikkatlice yapıldı ve arkasından son olarak parlatmaya geçildi. 1 micron water-based diamond suspension ile 5 dakikadan az olmamak şartıyla çuha ile numuneler parlatılmıştır.

Numunelerin dağlanma (etching) işlemi için aşağıda sıralanan miktarlarda bir asit preparatı hazırlanmıştır:

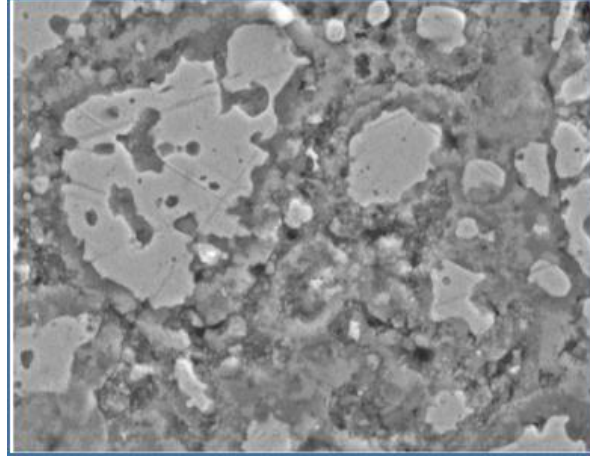
- 2 mL Hidrojen Florür (HF)
- 3 mL Hidroklorik asit (HCl)
- 5 mL Nitrik asit (HNO₃)
- 190 mL Saf Su (H₂O)

Bu asit karışımıyla havadar bir ortamda numuneler yaklaşık 25 saniye süre ile dağlanarak arkasından alkol ile temizlenmiş ve sıcak hava ile kurutularak SEM görüntüleri için hazırlanmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA (FINDINGS AND DISCUSSION)

4.1. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizleri ve Mikroyapısal Gözlemler (Scanning Electron Microscope (SEM) Analyses and Microstructural Observations)

Alüminyum takviye edilerek toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş olan numunelerin taramalı elektron mikroskobu analizleri yapılmıştır (Şekil 3). Bu analiz sonucuna göre elde edilen verilerden değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 3. Üretilen numunenin SEM görüntüleri
(Figure 3. SEM images of the produced sample)

Şekil 3'te sunulan taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerinden de açıkça görülebileceği üzere, çalışmada elde edilen kompozit yapının genel mikroyapısı belirgin bir şekilde gözlemlenebilmektedir. SEM görüntüleri, alaşım matrisinin bütünlüğünü ve takviye fazların dağılımını değerlendirmek açısından önemli mikroyapısal ipuçları sunmaktadır [15]. Bu kapsamda, matris fazi içerisine takviye edici faz olarak ilave edilen alüminyum (Al) parçacıklarının homojen bir şekilde dağıldığı net bir biçimde tespit edilmiştir. Al takviyesinin mikro yapı içerisine düzgün yayılması, toz karışımının etkin şekilde gerçekleştirilmiş olması ve sinterleme parametrelerinin uygun şekilde seçilmiş olmasına atfedilmektedir. Bu bulgu, ilgili literatürde yer alan benzer çalışmalarla da örtüşmektedir; önceki araştırmalar da Al gibi takviye elemanlarının dağılımının, üretim sürecindeki karıştırma homojenliği ve sinterleme koşullarının kontrolüne doğrudan bağlı olduğunu vurgulamaktadır [16, 17 ve 18].

SEM analizleri ayrıca üretilen numunede bazı mikroyapısal kusurların da mevcudiyetini ortaya koymuştur. Özellikle mikroyapı içerisinde lokalize çatlak oluşumları ve belirli düzeyde gözenek yapıları gözlemlenmiştir. Bu tür kusurlar, genellikle toz partiküllerinin tam yoğunlaşamaması veya sinterleme sıcaklığının/atmosferinin yetersiz kalması gibi üretim parametrelerine bağlı olarak gelişmektedir. İlginç bir şekilde, gözenek oranında belirli bir azalma eğiliminin, ilave edilen Al miktarına bağlı olarak değiştiği saptanmıştır. Bu durum, Al parçacıklarının sinterleme sürecindeki ergime davranışları ve matrisle etkileşimlerine bağlı olarak oluşan mikroyapısal yeniden düzenlemelerle açıklanabilir [19, 20 ve 21].

Ayrıca, SEM görüntülerinde elde edilen bulgular, Al parçacıklarının morfolojisi hakkında da bilgi vermektedir. Takviye olarak kullanılan Al fazlarının genellikle düzensiz geometrik formlarda, keskin köşeli ve birbirine yakın boyut aralığında oldukları belirlenmiştir. Bu morfolojik özellikler, parçacıkların kırma ile elde edilmesinden kaynaklanmakta olup, parçacık morfolojisinin mikroyapısal

bütünlük, sinterleme davranışı ve mekanik özellikler üzerinde etkili olabileceği bilinmektedir. Parçacıkların keskin köşeli yapısı, sinterleme sırasında matris ile yeterli derecede bağlanmayı sınırlandırabilir ve lokal stres birikimlerine neden olabilir. Bu bağlamda, parçacık morfolojisinin kontrol altına alınması, kompozit malzemelerin mekanik performansının iyileştirilmesi açısından kritik öneme sahiptir [22 ve 23].

5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada, yüksek entropili alaşım matrisine takviye amacıyla alüminyum (Al) ilave edilerek, toz metalürjisi yöntemi kullanılarak kompozit yapıdaki numuneler üretilmiştir. Üretim sürecinde deneysel parametreler sabit tutulmuş olup, kompaktlama işlemi 600 MPa'lık tek eksenli presleme basıncı altında gerçekleştirilmiş, ardından sinterleme işlemi 1000°C sıcaklıkta, 3 saat süreyle atmosfer kontrollü bir fırında uygulanmıştır. Bu parametreler, matris ve takviye fazları arasında yeterli difüzyonun sağlanması ve yoğunlaşmanın maksimize edilmesi amacıyla literatürdeki benzer çalışmalara dayalı olarak seçilmiştir. Üretilen kompozit numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu, taramalı elektron mikroskopu (SEM) analizleri ile gerçekleştirilmiştir. SEM görüntüleri üzerinden yapılan incelemeler sonucunda, sinterleme işlemi sonrası elde edilen mikro yapının genel bütünlüğü değerlendirilmiş; ancak mikroyapı içerisinde belirli oranlarda çatlak oluşumları ve gözenek yapılarının bulunduğu tespit edilmiştir. Bu tür kusurlar, genellikle sinterleme sırasında tam yoğunlaşmanın sağlanamamasına ve partikül ara yüzeylerinde yeterli bağlanmanın oluşmamasına bağlıdır. Bununla birlikte, elde edilen görüntüler üzerinden yapılan karşılaştırmalı analizlerde, gözenek miktarının Al ilave oranına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Al miktarındaki artışla birlikte, gözenek oranında azalma eğilimi ortaya çıkmış ve bu durumun sinterleme sırasında ergimeye yakın davranış sergileyen Al parçacıklarının gözenekleri doldurucu etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, Al partiküllerinin matris fazı içerisinde homojen şekilde dağıldığı gözlemlenmiş olup, bu durumun üretim sürecindeki karıştırma işleminin yeterliliğini ve sinterleme parametrelerinin uygunluğunu yansıttığı değerlendirilmiştir. Homojen dağılım, mekanik özelliklerin izotrop hale gelmesine katkı sağlayarak nihai kompozit malzemenin performansını doğrudan etkilemektedir. Söz konusu gözlemler, literatürde benzer sistemler üzerinde yapılan çalışmalarda bulgularla uyumlu olup, takviye fazlarının mikroyapı içerisindeki homojenliğinin toz hazırlama ve sinterleme koşullarıyla güçlü bir şekilde ilişkili olduğunu göstermektedir.

NOT (NOTICE)

Bu çalışma, hadi BİLİR tarafından Doç.Dr. Mehmet AKKAŞ akademik danışmanlığında yürütülen "Katkılı CrMnFeCoNi Yüksek Entropili Alaşımın Üretimi ve Karakterizasyonu" başlıklı Doktora Tezinden türetilmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Yazarlar bu çalışma için herhangi bir mali destek almadığını beyan etmiştir.

ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarları bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Erdoğan, A. ve Zeytin S., (2019). Yüksek Entropili Alaşımlar: Prensipler ve Alaşım Tasarımı. ÖHÜ Müh. Bilim Der. 8(2):1160-1178.
- [2] Akkaş, M., (2024). The effect of molten salt on the mechanical properties and microstructure of CuNiSi alloys with reinforced Fe. Science of Sintering, 28-28.
- [3] Akkaş, M., Tabonah, T.M.K., Elfghi, A.M.A., and Özorak, C., (2023). Powder metallurgical fabrication of co reinforced cunisi matrix composites: microstructural and corrosion characterization. Technological Applied Sciences, 18(4):64-74.
- [4] Baloğlu, A.R., (2022). Mekanik alaşımlama ile üretilen FeCoCrNi yüksek entropi alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine geleneksel sinterleme ve spark plazma sinterlemenin etkisinin araştırılması. Necmettin Erbakan Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek lisans tezi, 2022 Konya, Metalurji ve Malzeme Müh. ABD.
- [5] Yong, Z., Ting, T.Z., Tang, Z., Michael, C.G., Dahmen, K.A., Peter, K., and Ping, L.Z., (2019). Microstructures and Properties of High Entropy Alloys. Progress in Materials Science, 102:296-345, Elsevier.
- [6] Özorak, C., Tabonah, T.M.K., and Akkaş, M., (2023). Production of CuNiSi composites by powder metallurgy method: effects of Ti on the microstructural and corrosion properties. European Journal of Technique (EJT), 13(2):88-93.
- [7] Chen, W., Fu, Z., Fang, S., Xiao, H., and Zhu, D., (2013). Alloying behavior, microstructure and mechanical properties in a FeNiCrCo0.3Al0.7 High Entropy Alloy. Material and Design, 44:223-227
- [8] Özkan, D. and Karaoğlu, A.C., (2021). High Entropy Alloys: Production and Utilization Areas. ECJSE, 8(1):164-181.
- [9] Akkaş, M., (2022). Synthesis and characterization of MoSi₂ particle reinforced AlCuMg composites by molten salt shielded method. Türk Doğa ve Fen Dergisi, 11(4):11-17.
- [10] Caligulu, U., Durmus, H., Akkas, M., and Sahin, B., (2021). Microstructure and mechanical properties of Ni matrix B₄C reinforced functionally graded composites. Science of Sintering, 53(4):475-484.
- [11] Akkaş, M., and Al, S.F.R.A., (2021). Effect of hot pressing and reinforcement of TiC and WC on the mechanical properties and microstructure of AlCuFeCrNi HEAs alloy. Science of Sintering, 53(1):19-35.
- [12] Satyanarayanaraju C, V., et al., (2019). Effect of Heat Treatment On Microstructure and Properties of High Entropy Alloy Reinforced Titanium Metal Matrix Composites. Material Today: Proceedings.
- [13] Akkaş, M., and Boushiha, K.F.I., (2021). Investigation of wc reinforced cunisi composites produced by mechanical alloying method. El-Cezeri, 8(2):592-603.
- [14] Yadav, S., Sarkar, S., Aggarwal, A., Kumar, A., Biswas, K., (2018). Wear and Mechanical Properties of Novel (CuCrFeTiZn)_{100-x}Pbx High Entropy Alloy Composite via Mechanical Alloying and Spark Plasma Sintering. Wear, 410-411:93-103.
- [15] Basem, A., Hassan, M.A., Elkady, O.A., El-Shekeil, Y.A., Bendoukha, S., Barhoumi, N., ... and Elsheikh, A., (2024). Characterization of FeCoNiCr high-entropy alloys manufactured by powder metallurgy technique. Journal of Materials Research and Technology, 30:88-100.
- [16] Akkaş, M., (2021). Production and characterization of boron carbide and silicon carbide reinforced copper-nickel composites

- by powder metallurgy method. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 52(1):32-42.
- [17] Torralba, J.M., Alvaredo, P., and García-Junceda, A., (2019). High-entropy alloys fabricated via powder metallurgy. A critical review. *Powder Metallurgy*, 62(2):84-114.
- [18] Abolkassem, S.A., El-Hadad, S., and Mohamed, L.Z., (2025). Synthesis and characterization of WNiFeCo, WNiFeMo, and WNiFeCoMo compositional complex alloys manufactured by powder metallurgy technique. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 50(4):2367-2381.
- [19] Loginov, P.A., Zaitsev, A.A., Sidorenko, D.A., Eganova, E.M., and Levashov, E.A., (2025). Interfacial interaction and evaluation of bonding strength between diamond and CoCrFeNi (Cu, Ti) high-entropy alloys. *Diamond and Related Materials*, 151, 111849.
- [20] Zhang, B., Huang, Y., Huang, Z., and Wang, J., (2025). Porous WMoTaNb refractory high entropy alloy fabricated by elemental powder metallurgy. *Materials Today Communications*, 45, 112362.
- [21] Ragunath, S., Radhika, N., Krishna, S.A., and Pramanik, A., (2025). Microstructural, electrochemical, and hot corrosion analysis of CoCrFeCuTi high entropy alloy reinforced titanium matrix composites synthesized by microwave sintering. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 8(1):141-155.
- [22] Zhang, B., Huang, Y., Huang, Z., and Wang, J., (2025). Microstructure and mechanical properties of NbMoTaW porous refractory high entropy alloy processed by powder metallurgy. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 107063.
- [23] Tao, H., Wang, Z., Wu, X., Li, L., Wang, Y., Zhao, C., and Du, W., (2025). Effect of Al content on high-temperature oxidation behavior and mechanism of Al_xCoCrFeNi_{1.5}Ti_{0.1} high-entropy alloy coatings by laser cladding. *Surface and Coatings Technology*, 502:131961.