

# CoCrFeNi Bazlı Yüksek Entropili Alaşımlarda Molibden Katkısının Mikroyapı ve Nanosertlik Üzerindeki Rolü

Veysel Murat BOSTANCI<sup>1</sup>  Tuğba Selcen ATALAY KALSEN<sup>2\*</sup> 

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Konya, Türkiye

<sup>2</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Konya, Türkiye

## Makale Bilgisi

Geliş Tarihi: 30.11.2024

Kabul Tarihi: 12.12.2024

Yayın Tarihi: 31.12.2024

## Anahtar Kelimeler:

Yüksek entropi alaşımları,  
Mekanik özellikler,  
Nanoindentasyon.

## ÖZET

Yüksek entropili alaşımlar (YEA'lar), günümüzde yenilikçi mühendislik malzemeleri arasında öne çıkan bir sınıftır ve birçok endüstriyel alanda artan bir ilgi görmektedir. Havacılık sektöründe, bu alaşımlar hem dayanım hem de hafiflik gereksinimlerini karşılamaları nedeniyle eşsiz bir potansiyele sahiptir. Geleneksel alaşımlara kıyasla daha üstün mekanik, termal ve kimyasal özellikler sunan YEA'lar, bu nedenle modern havacılık uygulamaları için umut vaat eden malzemeler olarak değerlendirilmiştir. Bu çalışmada, CoCrFeNiMo<sub>x</sub> (x=0, 0.2, 0.4 % at.) YEA'ları vakumlu ark ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen YEA'ların, X-Işınları Diffraktometresi (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), vickers sertlik testi, basma testi ve nanoindentasyon testi ile yapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, yüzey merkezli kübik (YMK) yapılı matris oluşmakta ve Mo ilavesi ile kafes parametresi artmaktadır. Atomikçe %2 Mo ilavesinin bile mikroyapıda önemli değişikliklere sebep olduğu, dendritik yapının oluşmasına yol açtığı mikroyapısal incelemelerle tespit edilmiştir. Mo ilavesinin %4'e çıkarılması ile dendritler arası bölgede Mo-Cr zengin bölgeler oluşmaktadır. Yapıda Mo içeriği %0, %2 ve %4 (% at.) için sertlik değerleri 184 HV, 195 HV, 214 HV olarak elde edilirken, basma testinden elde edilen akma dayanımı ise 206 MPa, 254 MPa ve 287 MPa olarak ölçülmüştür. Nanoindentasyon testleri ile, Cr-Mo zengin bölgelerde yüksek sertlik değerleri (~7.9 GPa) tespit edilmiş, bu durum Mo'nun katı çözelti sertleşmesi ve segregasyon mekanizmalarıyla alaşımı güçlendirdiğini doğrulamıştır. Elde edilen bulgular, CoCrFeNi alaşımına Mo ilavesinin yapıdaki süneklik özelliğinin korunarak katı çözelti sertleşmesi ve minör düzeyde ikincil faz çökelmeleri ile dayanımın artırdığını göstermektedir. Bulgular, YEA'ların mekanik dayanım ve mikroyapısal özelliklerin kritik olduğu havacılık uygulamaları için güçlü adaylar olduğunu ortaya koymaktadır.

## The Role of Molybdenum Addition on the Microstructure and Nanohardness of CoCrFeNi-Based High Entropy Alloys

## Article Info

Received: 30.11.2024

Accepted: 12.12.2024

Published: 31.12.2024

## Keywords:

Satellite data,  
Convolutional neural network,  
Multilayer perceptron,  
Cloud mask,  
Cloud detection,  
Visible and infrared bands.

## ABSTRACT

High entropy alloys (HEAs) have emerged as a prominent class of innovative engineering materials and are attracting increasing interest across various industries. In the aerospace industry, these alloys possess unique potential due to their ability to meet both strength and lightweight requirements. Offering superior mechanical, thermal, and chemical properties compared to conventional alloys, HEAs are therefore considered promising materials for modern aerospace applications. In this study, CoCrFeNiMo<sub>x</sub> (x=0, 0.2, 0.4 at. %) HEA were produced using the vacuum arc melting method. The structural and mechanical properties of the produced HEAs were characterized using X-Ray Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), Vickers hardness test, compression test, and nanoindentation test. According to the results, a face centered cubic (FCC) matrix structure forms, and the lattice parameter increases with Mo addition. Microstructural investigations revealed that even the addition of 2 at. % Mo causes significant changes in the microstructure, leading to the formation of a dendritic structure. When Mo addition is increased to 4 at. %, Mo-Cr-rich regions were observed in the interdendritic regions. The hardness values were determined as 184 HV, 195 HV, and 214 HV for Mo contents of 0, 2, and 4 at. %, respectively, while the yield strengths obtained from compression tests were measured as 206 MPa, 254 MPa, and 287 MPa. Nanoindentation tests identified high hardness values (~7.9 GPa) in Cr-Mo rich regions, confirming that Mo enhances the strength of alloy through solid solution hardening and segregation mechanisms. The findings demonstrate that the addition of Mo to CoCrFeNi alloy increases strength while maintaining the ductility of the structure through solid solution strengthening and minor secondary phase precipitations. These results highlight that HEAs are strong candidates for aerospace applications, where mechanical strength and microstructural properties are critically important.

## Bu makaleye atıfta bulunmak için:

Bostancı, V. M., & Atalay Kalsen, T. S. (2024). CoCrFeNi bazlı yüksek entropili alaşımlarda molibden katkısının mikroyapı ve nanosertlik üzerindeki rolü. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 3(2), 175-187. <https://doi.org/10.56753/ASREL.2024.2.7>

\*Sorumlu Yazar: Tuğba Selcen ATALAY KALSEN, [tsatalay@erbakan.edu.tr](mailto:tsatalay@erbakan.edu.tr)



This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## GİRİŞ

Atomik konsantrasyonları %5 ile %35 arasında değişen beş veya daha fazla temel element içeren alaşımlar, yüksek entropili alaşımlar (YEA) olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde dört element ve üzeri elemente sahip alaşımlar da YEA olarak isimlendirilebilmektedir (Zhou vd., 2019). YEA'lar, yüksek karışım entropisi, kafes bozulmaları, yavaş atomik difüzyon ve kokteyl etkisi gibi özellikler sayesinde geleneksel alaşımlara kıyasla üstün mekanik ve kimyasal özellikler sergilerler. Çok bileşenli yapıları sayesinde yüksek entropiye sahip ve genellikle tek fazlı katı çözeltiler oluşturabilen YEA'lar, farklı kombinasyon ve kompozisyonlarda üretilebilme esnekliği ile mühendislik, havacılık ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Miracle & Senkov, 2017; Ranganathan, 2003; Yeh, 2013).

Araştırmalar, YEA'ların farklı elementel bileşimlerinin, belirli uygulamalara yönelik modifiye edilebileceğini ve bu sayede aşınma direnci ve yorulma dayanımı gibi özelliklerin optimize edilebileceğini göstermektedir (Yalcın & Talaş, 2024). Bu özellikler, YEA'ları geleceğin havacılık malzemeleri için umut verici adaylar haline getirmekte, daha hafif ve dayanıklı uçak yapıları ve bileşenlerinde kullanılmasına olanak tanımaktadır (Tsai & Yeh, 2014; Wang & Zhang, 2023). Örneğin, AlCoCrFeNi YEA'sı, kriyojenik koşullarda bile yüksek çekme mukavemeti ve süneklik sergilemektedir (Geantă & Voiculescu, 2020; Qiao vd., 2011). Aynı zamanda, YEA'lar uçak motor malzemelerinde, entegre uçak bileşenlerinde ve birçok diğer parçaya alternatif olarak büyük potansiyel taşımaktadır. YEA'ların, yüksek dayanım/ağırlık oranı, iyileştirilmiş soğuk şekillendirilebilirlik, yüksek çevrimli yorulma dayanıklılığı, iyi süneklik ve mükemmel kırılma tokluğu gibi özellikleri, geniş bir uçak uygulaması yelpazesi için alternatif sunmaktadır (Livatyalı & Caudill, 2023; Uyaner vd., 2024). Son zamanlarda, YEA'ların türbin kanatları, kanatlar, statorlar, rotorlar, yanma odaları, egzoz nozülleri ve gaz türbini kasaları gibi uçak motoru bileşenlerinde kullanım için umut verici olduğu belirtilmektedir (Sonar vd., 2024). Aynı zamanda kara-hava mobilite mekanizmasının önemli bir parçası olan iniş takımlarında (Boeing 777) kullanım potansiyeli taşımaktadır (Afolabi vd., 2020; Kocamer vd., 2022; Krishna vd., 2024). Uçak motor malzemeleri arasında çelikler, titanyum alaşımları, nikel bazlı süper alaşımlar, alüminyum alaşımlarının yanında, son dönemde YEA'lardan sıklıkla bahsedilmektedir (Afolabi vd., 2020; Krishna vd., 2024; Sonar vd., 2024).

Kriyojenik ortamlarda yüksek mukavemeti, yüksek korozyon ve oksidasyon direnci ile dikkat çeken YEA'lardan biri de Cantor alaşımı olarak bilinen CoCrMnFeNi alaşımıdır (Cantor, 2021). Mn içermeyen Cantor alaşımının (CoCrFeNi) ise daha yüksek sertliğe ve aşınma direncine sahip olması bazı araştırmacılarca belirtilmiş ve umut verici olduğu vurgulanmıştır (Salishchev vd., 2014; Tang & Li, 2021). Buna ek olarak, Ta, W, Nb ve Mo gibi alaşım elementlerinin eklenmesi ile CoCrFeNi YEA'sına ait mekanik ve yapısal özellikler iyileştirilebilmektedir (Jiang vd., 2018; Liu vd., 2015; Niu vd., 2019; Shun vd., 2012; Yang & Zhong, 2021). Özellikle yüksek erime noktası, mukavemeti, aşınma ve korozyon direnci ile bilinen molibdenin (Mo), CoCrFeNi YEA'sının basma ve akma dayancını arttırdığına dair literatürde çalışmalar mevcuttur (Shun vd., 2012). Örneğin, Dai vd. (2020) CoCrFeNi yüksek entropili alaşımlarında Mo içeriğinin mikroyapı ve korozyon direnci üzerindeki etkisini incelemiştir. Düşük Mo içeriği (FeCoCrNiMo<sub>0,1</sub>), pasif filmde Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cr(OH)<sub>3</sub> oluşturarak korozyon direncini artırmıştır. Ancak, yüksek Mo içeriği (CoCrFeNiMo<sub>0,6</sub>), çökeltiler nedeniyle Cr ve Mo zengin bölgelerde korozyona neden olmuştur (Dai vd., 2020). Zhang vd. (2018), CoCrFeNiMo Fe<sub>24,1</sub>Co<sub>24,1</sub>Cr<sub>24,1</sub>Ni<sub>24,1</sub>Mo<sub>3,6</sub> (at. %) YEA'sını toz metalurjisi yöntemiyle üreterek elmas kesim takım uygulamaları için değerlendirmiştir. YMK kristal yapısına sahip alaşımların sertlik ile aşınma direnci, ticari metal matrislerden 2-4 kat daha yüksek bulunmuştur. Bu çalışma aynı zamanda bu alaşımların elmas kesici takımların performansını artırabilecek yeni nesil malzemeler için umut vaat ettiğini göstermektedir (M. Zhang vd., 2018). Liu vd. (2016) CoCrFeNi YEA'sına Mo eklenmesinin, sert intermetalik fazların çökmesi yoluyla alaşımın mukavemetini artırdığını göstermiştir. Mo<sub>0,3</sub> alaşımı,

1,2 GPa çekme mukavemeti ve %19 uzama ile yüksek mukavemet ve iyi süneklik özellikleri sergilemiştir. Sert  $\sigma$  ve  $\mu$  fazları, matris içinde homojen şekilde dağılarak alaşımı güçlendirmiş ancak kırılma mekanizması (Liu vd., 2016). Li vd. (2018), toz metalurjisiyle üretilen CoCrFeNiMo<sub>0,2</sub> yüksek entropili alaşımın kırılma mekanizmalarını in-situ SEM kullanarak detaylı bir şekilde incelemiştir. Alaşım, 781MPa çekme mukavemeti ve %55,6 uzama kapasitesiyle dikkat çekmiş, yüksek süneklik ve dayanım özellikleri sayesinde çatlak ilerlemesine karşı üstün direnç göstermiştir. Aynı zamanda bu çalışma, mikro boşlukların oluşumu, büyümesi ve birleşimiyle karakterize edilen sünek kırılma mekanizmasının, YMK matrisin deformasyon kabiliyetiyle desteklendiğini ortaya koymuştur (Li vd., 2018).

Bu çalışmada, CoCrFeNiMo<sub>x</sub> (x=0, 2, 4 % at.) YEA'sına minör alaşım elementi olarak Mo eklenerek, mekanik ve yapısal özelliklere etkisi incelenmiştir. Farklı oranlardaki Mo içeriğine sahip YEA'ların mekanik özellikleri sertlik ve basma testleri ile tespit edilirken, Mo'nun mikroyapıda oluşturduğu değişiklikler ve bu değişikliklerle ilişkili mikromekanik özellikler yüksek hızda gerçekleştirilen nanoindentasyon haritaları ile ortaya koyulmuştur.

## YÖNTEM

Çalışma kapsamında, temel alaşım olarak CoCrFeNi, ve bu alaşıma sırasıyla %2 ve %4 Mo eklenmesi ile (CoCrFeNi)<sub>98</sub>Mo<sub>2</sub> ve CoCrFeNi<sub>96</sub>Mo<sub>4</sub> (% at.) YEA'ları argon atmosferi altında vakum ark ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Numuneler sırası ile Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 olarak kodlanmış ve nominal bileşimleri

Tablo 1'de verilmiştir. Her bir bileşim için, %99,9'dan yüksek saflığa sahip Co, Cr, Fe, Ni ve Mo element parçaları hassas bir şekilde tartılarak toplam 2,2 gramlık metal karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar, bakır haznelere sahip vakum ark eritme cihazında (Optosense, Türkiye) 140 amper (A) ile eritilerek homojen bir karışım elde edilmesi amacıyla en az dört kez çevrilmiştir. Elde edilen homojen alaşımlar, su soğutmalı silindirik 3 mm çapa sahip bakır kalıba emişli döküm yöntemi ile dökülmüştür.

**Tablo 1**

*YEA'ların Nominal Kompozisyonları*

| YEA  | Kompozisyon (% at.) |      |      |      |    |
|------|---------------------|------|------|------|----|
|      | Co                  | Cr   | Fe   | Ni   | Mo |
| Mo-0 | 25                  | 25   | 25   | 25   | -  |
| Mo-2 | 24,5                | 24,5 | 24,5 | 24,5 | 2  |
| Mo-4 | 24                  | 24   | 24   | 24   | 4  |

Dökülen YEA'ların faz analizi, X-ışını difraktometresi (XRD, PANalytical EMPYREAN) ile Cu-K $\alpha$  radyasyonu kullanılarak, 10-100 derece aralığında, 0.01 derecelik adımlarla ve dakikada 1° tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir. Polyester bazlı reçine içerisine yerleştirilen YEA'lar geleneksel metalografik işlemlere tabi tutulmuştur. Dağlama işlemi için kral suyu (3HCl:1HNO<sub>3</sub>) hazırlanmış, 10-15s tutularak gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış ve dağlanmış YEA'lara ait mikroyapısal analizler, taramalı elektron mikroskobu (SEM, HITACHI SU1510) ve enerji dağılımlı spektrometre (EDS, Oxford Instruments X-act) yardımıyla 20kV hızlandırma voltajı kullanılarak yapılmıştır.

Alaşımlara ait mikromekanik özellikler nanoindentasyon cihazı ile entegre iNano® sistemi (KLA Instruments, Milpitas, CA, ABD) kullanılarak tespit edilmiştir. Birbirine yakın izlerin deformasyon alanının belirlenmesi amacıyla numune yüzeyinde farklı kuvvetlerde (5mN, 10mN) ölçüm yapılmıştır. Ön ölçümler neticesinde 5mN yük kullanılarak, her bir ölçüm arasında 3  $\mu$ m boşluk olacak şekilde 45x45  $\mu$ m alan taranmıştır. Toplamda 225 noktadan ölçüm alınan alaşımlardan sertlik haritaları elde

edilerek, izlere denk gelen bölgelerin kimyasal kompozisyonunun belirlenmesi için taramalı elektron mikroskopunda incelenmiştir. Üretilen YEA'ların sertlik değerleri, 0,1 kgf yük ile Vickers mikrosertlik testi (Emcotest, Durascan G5) ile en az 3 noktadan ölçüm alınacak şekilde elde edilmiştir. YEA'lara ait makro mekanik özelliklerin belirlenmesi amacıyla basma testi (Shimadzu AGS-X), sabit gerinim hızında ( $10^{-4} \text{ s}^{-1}$ ) ASTM E9-09 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Farklı bileşimlere sahip YEA'ların akma dayanımları, test sonrasında elde edilen %0,2'lik kayma noktası değerleri temel alınarak belirlenmiştir.

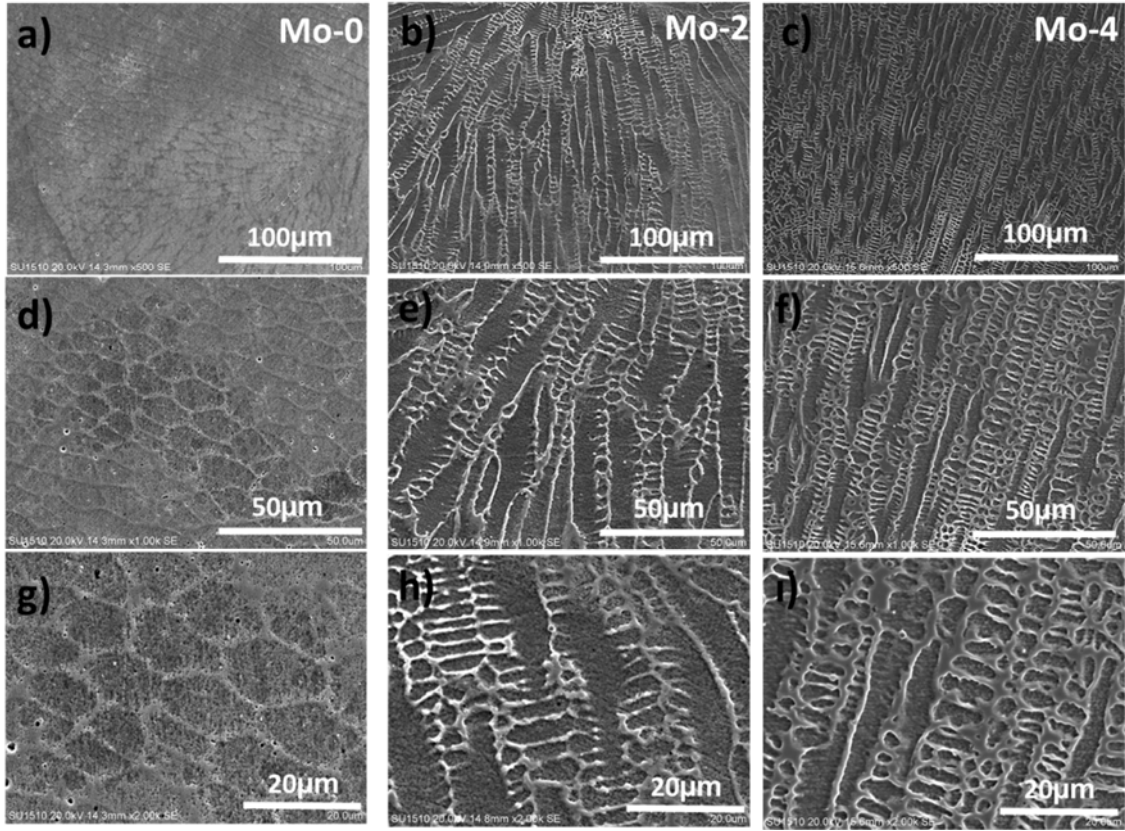
## BULGULAR VE TARTIŞMA

YEA'larda Mo içeriğindeki artışın mikroyapı üzerinde etkisini incelemek amacıyla dağlanmış numuneler elektron mikroskobu ile incelenmiştir. Şekil 2'de Mo-0, Mo-2, Mo-4 YEA'larına ait farklı büyütmelerde (500x, 1000x, 2000x) mikroyapıları verilmiştir. Şekil 2'den görüleceği üzere Mo ilavesiz CoCrFeNi alaşımında (Mo-0) homojen bir yapı gözlemlenirken, sırası ile %2 ve %4 (% at.) Mo ilavesi ile dendritik yapı oluşmuştur. Atomikçe %4 Mo ilavesi ile dendritler arası bölgelerin kalınlaştığı ve segregasyon benzeri bir ayrışmanın belirginleştiği tespit edilmiştir. Dendritler ve dendritler arasındaki bölgede elementel dağılımın saptanması amacıyla EDS çizgi analizi yapılmış ve analiz sonucu Şekil 2'te verilmiştir. Şekil 2'ten görüleceği üzere açık kontrasta sahip dendritler arası bölgede belirginleşen segregasyonların, Cr-Mo zengin bölgeler olduğu tespit edilmiştir. Cr-Mo konsantrasyon farklılığı Şekil 2'de bulunan Mo-4 YEA'sında açıkça görülmektedir. Dendritik (D) ve dendritler arası (DA) bölgelerde kimyasal kompozisyonun belirlenmesi amacıyla Şekil 2 üzerinde bulunan D ve DA bölgelerinden EDS spektrum alınmış olup Tablo 2'te verilmiştir. Mo'nun nispeten yüksek atomik çapı, Mo difüzyonunu yavaşlatmış ve bu durum, katılaşma sırasında sıvı bölgede Mo bakımından zengin segregasyonların oluşmasına yol açmış olduğu görülmektedir. Tablo 2'ten görüleceği üzere, Mo-4 YEA'sına ait dendrit bölgelerinde atomikçe %23,86 Cr ve %3,75 Mo elde edilirken, dendritler arası bölgede Cr ve Mo oranları sırası ile %26,09 ve %6,76 olarak elde edilmiştir. Bu durum, katılaşma sırasında Cr-Mo zengin fazların yapıdan ayrıştığı ve belli bölgelerde segrege olduğunu göstermektedir. Benzer sonuçlar farklı araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir. Örneğini, Shun vd., CoCrFeNiMox ( $x=0, 0,3, 0,5, \text{ ve } 0,85$  molar) inceledikleri çalışmada artan Mo içeriği ile Cr-Mo zengin  $\sigma$  fazları oluştuğunu ve YMK matriksine yerleştiğini belirtmektedir (Shun vd., 2012). Literatürde Dai vd, FeCoCrNiMox ( $x = 0, 0.1, 0.3, 0.6$  molar) YEA'larında Mo içermeyen ve Mo0.1 içeren YEA'da tek faz elde ettiklerini ancak Mo içermeyen malzemede daha homojen bir mikroyapı elde edildiğini belirtmişlerdir. Benzer şekilde Mo içeriğinin artması ile dendritler arası bölgelerde Mo-Cr'ca zengin segregasyonların oluştuğunu ve ikincil fazların çökmesine sebep olduğunu bildirmişlerdir (Dai vd., 2020). Bu çalışmada aynı zamanda artan Mo oranı ile alaşım içerisinde oluşan çökeltilerin hacim fraksiyonunun arttığı da belirtilmiştir. Şekil 1'de verilmiş olan Mo-2 ve Mo-4 YEA'lara ait mikroyapılarda artan Mo içeriği ile birlikte bu segregasyonun daha belirgin hale geldiği açıkça görülmektedir. Bu çalışmanın kapsamında minör Mo alaşımlama %2 ve %4 oranında (% at.) Mo alaşımlaması söz konusudur. Bu sebeple ikincil faz çökelmeleri XRD paternlerinde tespit edilememiş (Polat vd., 2022), bölgelerden alınmış EDS spektrum ve çizgi analizleri ile değerlendirilmiştir. Yapılan analizler neticesinde, CoCrFeNi YEA'sına eklenen Mo içeriğinin önemli olduğu, az miktarda Mo eklenmesinin bile yapıda önemli değişikliklere sebep olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



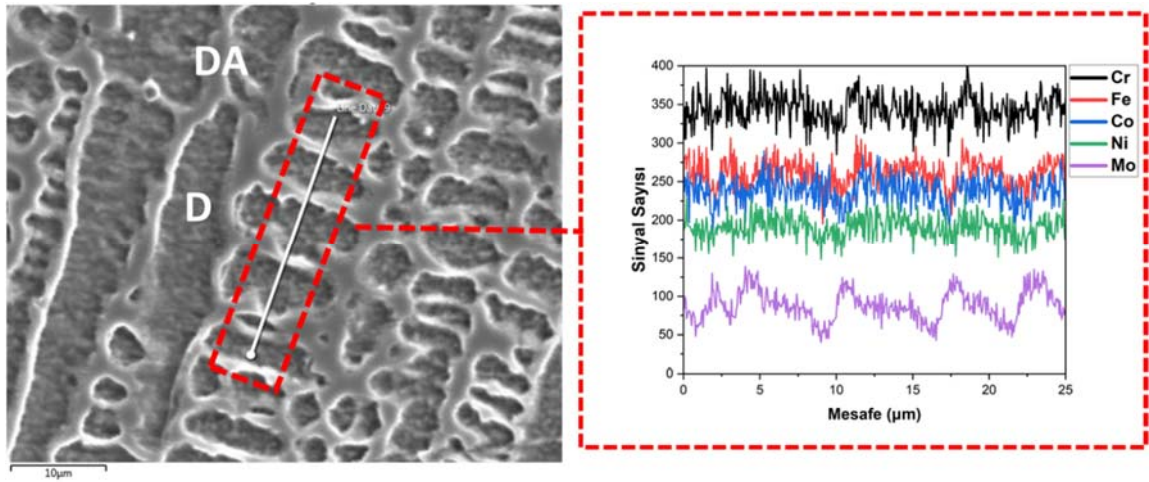
**Şekil 1**

Numunelere ait mikroyapı görüntüleri a)Mo-0 b)Mo-2 c)Mo-4 (500x), d)Mo-0 e)Mo-2 f)Mo-4 (1000x) g)Mo-0 h)Mo-2 ı)Mo-4 (2000x)



**Şekil 2**

Mo-4 YEA'sına ait EDS çizgi analizi

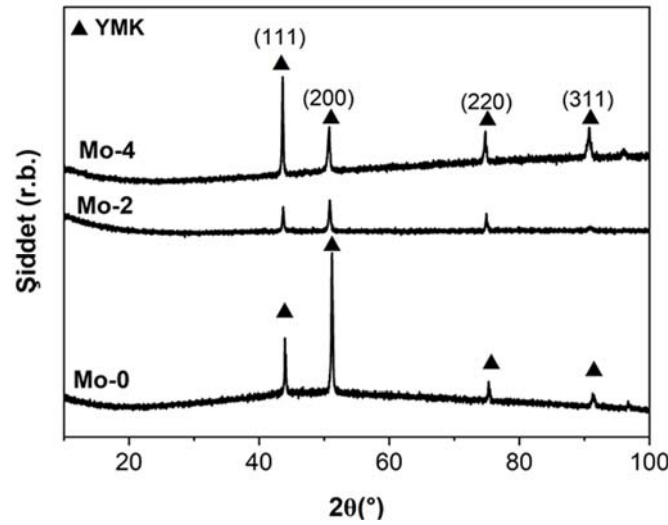


**Tablo 2***Mo-4 numunesine ait dendrit ve dendritler arası bölgeden alınan EDS spektrumları*

| Bölge     | % Atomik |       |       |       |      |
|-----------|----------|-------|-------|-------|------|
|           | Cr       | Fe    | Co    | Ni    | Mo   |
| <b>D</b>  | 23,86    | 24,00 | 25,10 | 23,78 | 3,75 |
| <b>DA</b> | 26,09    | 22,38 | 23,05 | 21,72 | 6,76 |

\*D:Dendrit DA:Dendritlerarası

Tablo 1'de belirtilen nominal bileşimlere sahip Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 alaşımlarının XRD desenleri Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3'e göre Mo eklenmemiş temel alaşımda (%0 Mo) ve %2 ve %4 Mo (% at.) eklenen alaşımların tümünde YMK fazına ait desen gözlemlenmiştir. Ancak, Mo ilavesiyle birlikte kırınım piklerinin konumları, düzenli bir şekilde sola kaymıştır. Düzlemler ve kırınım açıları dikkate alınarak hesaplanan kafes parametreleri Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 alaşımları için sırası ile 3,567 Å, 3,584 Å ve 3,589 Å olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, Mo içeriği arttıkça temel alaşımda bulunan YMK yapıya ait kafes parametresi artmakta ve Mo ile katı çözelti oluşturmaktadır. Ayrıca Mo elementi sahip olduğu nispeten büyük atomik çap ile kafeste genişlemeye ve dolayısı ile kafes parametresinin artmasına sebep olmaktadır. Benzer şekilde Liu vd. artan Mo içeriğinin CoCrFeNiMo<sub>x</sub> YEA'sında YMK matris içindeki çözünmesi ile kafes parametresinin artışına ve kafes gerinimi oluşmasına sebep olduğunu belirtmişlerdir (Liu vd., 2016).

**Şekil 3***Numunelere ait XRD Desenleri*

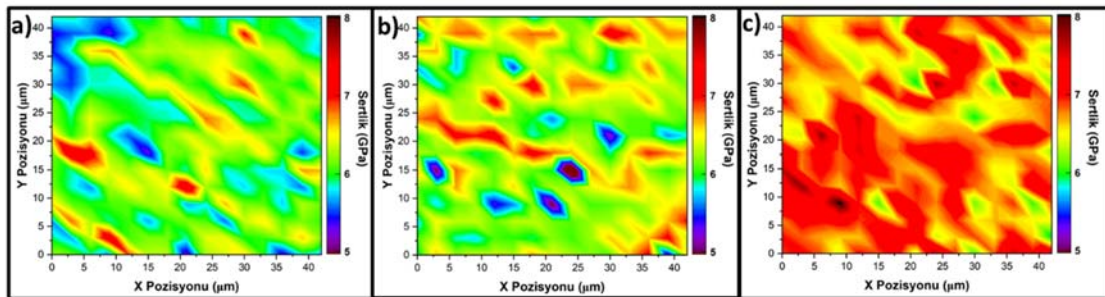
YEA'larda oluşan fazların ve yapısal faktörlerin belirlenmesinde karışım entalpisi ( $\Delta H_{krş}$ ), değerlik elektron konsantrasyonu (DEK), atomik boyut farkı ( $\delta$ ), karışım entropisi  $\Delta S_{krş}$  gibi termodinamik değerler önem arz etmektedir. Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 YEA'larına ait  $\delta$  sırasıyla %0,3, %1,33 ve %1,84,  $\Delta H_{krş}$  -3,75 kJ/mol, -3,88 kJ/mol ve -3,99 kJ/mol ve DEK değerleri ise sırasıyla 8,25, 8,21 ve 8,16 olarak hesaplanmıştır. Guo vd. (2011) DEK'in YEA'lardaki YMK fazının yüksek ( $DEK \geq 8$ ), HMK fazının ise daha düşük DEK değerlerinde ( $< 6,87$ ) kararlı olduğunu belirtmişlerdir. Bu durum Şekil 3'te tespit edilmiş olan YMK fazını açıklamaktadır. Buna ek olarak, Yang vd. (2012), atomik boyut farkının ( $\delta$ ) YEA'larda tek faz kararlılığı ile ilişkili olduğu, katı çözelti oluşumu için  $\delta < 6,6$  olması gerektiği belirtilmiştir. Benzer şekilde intermetalik oluşumunun engellenmesi ve YEA'larda katı çözelti oluşumu ve faz kararlılığının artması için karışım entalpisinin

$-20 \leq \Delta H_{krş} \leq 5 \text{ kJ/mol}$  değerleri arasında olması gerektiği literatürde belirtilmiştir (Kumar vd., 2023; Y. Zhang vd., 2008). Sonuç olarak, CoCrFeNi temel alaşımına (Mo-0) atomikçe %2 ve %4 Mo eklenmesi ile YMK yapılı katı çözeltiler ve artan Mo içeriği ile kafes çarpımları oluşmaktadır.

Yapıda bulunan fazların ve elementel dağılımının mikro boyutta mekanik analizleri için nanoindentasyon testi kullanılmıştır. Mo içeriğine bağlı olarak nanoindentasyon sertlik haritaları çıkarılmış ve Şekil 4'te sunulmuştur. Öncelikle Mo içeriği arttıkça yapıya ait sertlik haritalarında yüksek nanoindentasyon sertlik değerlerini temsil eden kırmızı rengin arttığı görülmektedir. Mo-0'da ortalama nanoindentasyon sertliği 6 GPa iken, Mo-2'de ortalama 6,7 GPa değerlerine ulaşmıştır. %4 Mo ilave edilmiş Mo-4'te ise nanoindentasyon sertliği 7,5 GPa seviyelerine ulaşmıştır. Bu değerler analiz yapılan mikron boyuttaki bölgelerden alınmıştır. Mo miktarı arttıkça alaşımda bulunan fazlara ait sertlik değerleri değişkenlik göstermektedir. Özellikle Mo-4 YEA'sında dikkati çeken yaklaşık 7,9 GPa nano sertliğe sahip fazların Mo-Cr zengin kompozisyona sahip olduğu EDS spektrum analizleri ile tespit edilmiştir. Bölgeden alınan EDS spektrumunda Cr, Fe, Co, Ni ve Mo için sırası ile %25,53, %22,51, %23,33, %22,56, %6,07 (% at.) olarak elde edilmiştir. Mo-4 ve Mo-0 kıyaslandığında ise Mo eklenmesi, YMK yapıdaki matris fazının sertliğini de arttırmaktadır. Bu sonuç, daha önce belirtilmiş olan Mo alaşımlama ile YMK yapıdaki katı çözeltiler sertleşmesini desteklemektedir (Şekil 3). YMK kafes yapısına nispeten daha büyük atomik çapta olan Mo elementinin katılması, kafes çarpılmasına yol açarak deformasyona karşı direnç oluşturmuştur. Sonuç olarak, Mo eklenmesi ile makro sertlik ve dayanım artışının temelinde katı çözeltiler sertleşmesi ve Mo ve Cr elementlerinin bölgesel zenginleşmesi neticesinde oluşan segregasyonlar olmak üzere iki mekanizmaya dayandığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde Zhang vd. (2022), CoCrNi alaşımına Ta etkisini incelediği çalışmada nanoindentasyon haritalama ile yapıdaki sertlik haritasını incelemişlerdir. YEA'ya ait sertleşme mekanizmasının katı çözeltiler oluşumu ve ikincil faz çökelmelerine dayanmakta olduğunu tespit etmişlerdir. CoCrNiMo<sub>x</sub> (x=0,2, 0,4, 0,4, 0,8 % at.) alaşımında mikroyapı, bileşim ve mekanik özellikler arasındaki ilişki, nanoindentasyon ile ortaya koyulan bir başka çalışma ise Tong vd. (2021) tarafından bildirilmiştir. Tong vd. (2021), YMK matriste oluşan ve matrisin iki katı sertliğine sahip Laves fazları oluştuğunu ve artan Mo içeriğinin YMK matrisinde katı çözeltiler sertleşmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. Bu bağlamda, Mo içeriğinin artışının sadece katı çözeltiler sertleşmesi yoluyla YMK matris fazının mekanik özelliklerini arttırdığını değil aynı zamanda Mo-Cr zengin segregasyonlar yoluyla yapının mukavemetinin artmasının sağlandığı ortaya konulmuştur. Nanoindentasyon haritaları, Mo eklenmesinin YEA'ların yerel mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini mikroyapısal düzeyde detaylı bir şekilde incelemeye olanak tanımıştır.

#### Şekil 4

YEA'ların Nanoindentasyon sertlik haritaları a)Mo-0, b)Mo-2, c)Mo-4



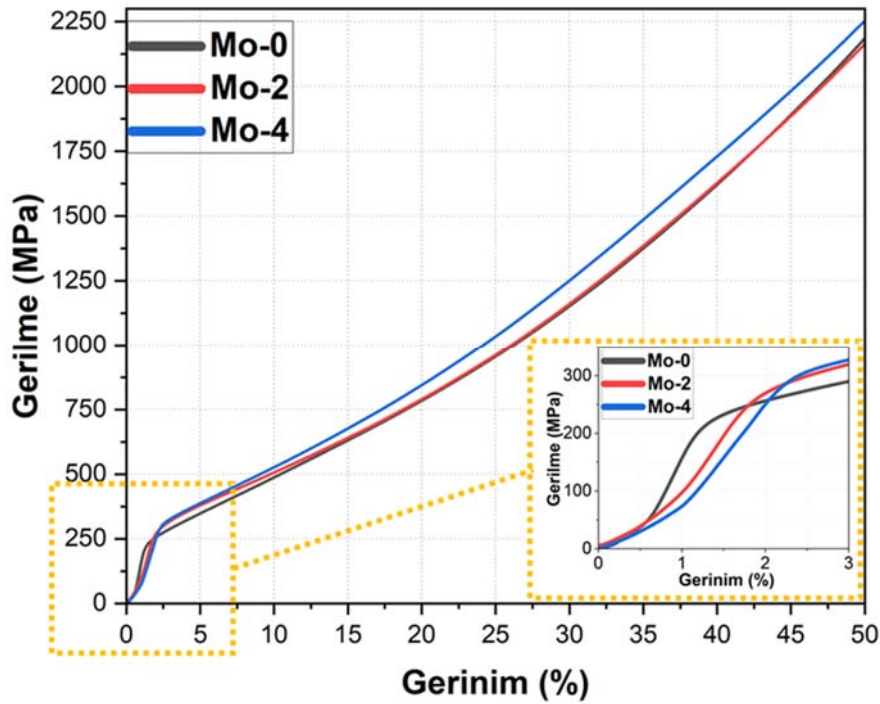
Mo içeriğinin YEA'larda makro mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi amacıyla sertlik ve basma testi uygulanmıştır. Mo-0, Mo-2, Mo-4 numunelerine ait sertlik değerleri sırası ile  $184 \pm 4 \text{ HV}$ ,  $195 \pm 1 \text{ HV}$ ,  $214 \pm 3 \text{ HV}$  olarak elde edilmiştir. Artan Mo içeriği ile birlikte YEA'lara ait sertlik değerlerinde artış meydana gelmiştir. YEA'nın sertliğinin yükselmesi, Mo artışı ile YEA'daki kafes genişlemesi sonucunda oluşan kafes çarpımları (Şekil 3) ve Mo-Cr zengin bölgelerin oluşumu ile



mikroyapıda meydana gelen değişimler (Şekil 1 ve Şekil 2) ile ilişkili olduğu söylenebilmektedir. Mo içeriğinin akma dayancı, uzama gibi karakteristik mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi amacıyla basma testi uygulanmıştır. Şekil 5'te Mo-0, Mo-2, Mo-4 YEA'larına ait gerilme gerinim diyagramları verilmiştir. Şekil 5'e göre YEA Mo içeriği %0'dan %4'e çıkarıldığında, malzemenin basma dayanımı yükselmiş ve daha yüksek gerilmelerde kalıcı deformasyona uğramıştır. Mo-0, Mo-2 ve Mo-4 YEA'larının akma dayancı sırası ile 206 MPa, 254 MPa ve 287 MPa olarak elde edilmiştir. Bir diğer deyişle, %2 (% at.) Mo ilavesi CoCrFeNi YEA'sının akma dayancını %23 oranında arttırmıştır. %4 Mo ilavesi ile temel alaşımın basma dayancında yaklaşık %39'luk bir artış meydana gelmiştir. Mo ilavesi ile yapıya ait mikroyapı değişimi ve oluşan segregasyonlar, yapıda sadece makro sertlik artışına sebep olmamış, aynı zamanda yapının akma dayanımını da arttırmıştır. Ayrıca, alaşımsız ve minör alaşımlanmış YEA'ların tamamına ait matrisin YMK olması sebebiyle sünek davranış (>%50 uzama) göstermiştir. Literatürde Shun vd. (2012), ve Liu vd. (2016), majör Mo alaşımlama (0,5, 0,85, 1, 1,5 molar) ile CrCoFeNi YEA'sında oluşan  $\sigma$  ve  $\mu$  fazları sebebiyle sünekliğinin önemli derecede düştüğünü belirtmişlerdir. Bu çalışmada yapılan minör Mo ilavesi ile mekanik özelliklerinin değişimi ile uyumlu olarak Shun vd. (2012), artan Mo içeriği ile birlikte oluşan ikincil fazlar ve katı çözelti sertleşmesi sebebiyle YEA'ya ait makro sertlik değerlerinin ve basma dayanımının arttığını belirtmiştir.

### Şekil 5

Mo-0, Mo-2, Mo-4 YEA'larına ait gerilme gerinim diyagramları



### SONUÇ

Bu çalışmada, CoCrFeNiMo<sub>x</sub> (x=0, 0,2, 0,4 % at.) yüksek entropi alaşımları vakumlu ark ergitme yöntemi ile üretilmiş mikroyapısal ile mekanik özellikleri incelenmiştir. Ayrıca, mikroyapı ve mekanik özellik ilişkisi yüksek verimli nanoindentasyon haritaları ile ortaya koyulmuş, sertleşme mekanizmaları belirlenmiştir. Yapısal analizler, mikroyapı görüntülemeleri, makro sertlik ve basma testleri, nanoindentasyon ölçümleri neticesinde şu sonuçlara ulaşılmıştır:

- Mo alaşımlama neticesinde CoCrFeNi YEA'sı dendritik katılaşma göstermiş, dendritler arası bölgelerde Mo-Cr zengin bölgeler olduğu tespit edilmiştir. Mo içeriğinin %2'den %4'e artırılması ile segregasyon bölgeleri alansal olarak artmaktadır.



- Üretilen YEA’larda YMK kafes yapısı oluşmuş ancak Mo ilavesi ile kafes parametreleri artmıştır. %0 Mo ve %4 Mo içeren YEA için sırası ile kafes parametresi 3.567 Å ve 3.589 Å olarak elde edilmiştir.
- Nanoindentasyon sertlik haritaları, Cr-Mo zengin bölgelerde lokal sertlik artışını doğrulamıştır. Mo-0 alaşımında ortalama 6 GPa olan nanoindentasyon sertliği, Mo-4 alaşımında 7,5 GPa değerine ulaşmıştır. Lokal olarak en yüksek sertlik değerleri 7,9 GPa olarak %4 (% at.) Mo içeriğine sahip YEA’da ölçülmüştür.
- Mo içeriğinin artması ile alaşıma ait makro sertlik değerleri 184 HV’dan 214 HV’ye artmıştır. Yapıdaki sertlik artış, Mo alaşımlamaya bağlı mikroyapısal modifikasyonlarla ve kafes bozulmaları ile ilişkilendirilmiştir.
- Mo ilavesi, YMK matrisin akma dayanımını artırmış, %0, %2 ve %4 (% at.) Mo içeren YEA için sırası ile 206 MPa, 254 MPa ve 287 MPa olarak elde edilmiştir. Bu artış ile, akma dayanımında %39’a varan bir iyileşme sağlarken alaşımların yüksek süneklik özellikleri korunmuştur.
- Yapıdaki makro sertlik artışı ve akma dayanımındaki artış, Mo ilavesiyle meydana gelen katı çözelti sertleşmesi ve Cr-Mo segregasyonları ile ilişkili olduğu belirlenmiştir.

Bu sonuçlar, CoCrFeNi bazlı YMK yapıya sahip yüksek entropili alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirmek için minör Mo alaşımlamanın etkili bir yöntem olduğunu ve bu alaşımların havacılık gibi dayanım ve mikroyapı kararlılığının kritik olduğu alanlarda umut vadeden malzemeler olduğunu göstermektedir.

### **Etik Kurul Onayı**

Bu çalışmada etik kurul onayı gerektiren insan veya hayvan denekleri kullanılmamıştır.

Araştırma, kamuya açık veri setleri, literatür taramaları veya teorik analizler üzerinden yürütülmüştür.

Etik kurallar gereği, araştırma sürecinin her aşamasında akademik dürüstlük ve bilimsel etik kurallara tam uyum sağlanmıştır. Bu nedenle, etik kurul onayı gerekmemiştir

### **Yazar Katkıları**

Araştırma Tasarımı (CRediT 1) Yazar 1 (%40) – Yazar 2 (%60)

Veri Toplama (CRediT 2) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Araştırma - Veri Analizi - Doğrulama (CRediT 3-4-6-11) Yazar 1 (%50) – Yazar 2 (%50)

Makalenin Yazımı (CRediT 12-13) Yazar 1 (%60) – Yazar 2 (%40)

Metnin Tashihi ve Geliştirilmesi (CRediT 14) Yazar 1 (%40) – Yazar 2 (%60)

### **Finansman**

Bu çalışmada herhangi bir finansal destek alınmamıştır.

### **Çıkar Çatışması**

Bu çalışmada bir çıkar çatışması yoktur.

### **Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları (SDG)**

Sürdürülebilir Kalkınma Amaçları: Desteklemiyor.

## REFERANSLAR

- Afolabi, A. E., Popoola, A. P. I., & Popoola, O. M. (2020). High entropy alloys: advance material for landing gear aerospace applications. *Handbook of Nanomaterials and Nanocomposites for Energy and Environmental Applications*, 1–27.
- Cantor, B. (2021). Multicomponent high-entropy Cantor alloys. *Progress in Materials Science*, 120, 100754.
- Livatyalı, M. S., & Caudill, J. R. (2023). Solid-state vs. fusion-based metal additive manufacturing technologies. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 2(2), 128-138.
- Dai, C., Zhao, T., Du, C., Liu, Z., & Zhang, D. (2020). Effect of molybdenum content on the microstructure and corrosion behavior of FeCoCrNiMox high-entropy alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 46, 64–73.
- Geantă, V., & Voiculescu, I. (2020). *Characterization and Testing of High-Entropy Alloys From AlCrFeCoNi System for Military Applications*.
- Jiang, H., Han, K., Qiao, D., Lu, Y., Cao, Z., & Li, T. (2018). Effects of Ta Addition on the Microstructures and Mechanical Properties of CoCrFeNi High Entropy Alloy. *Materials Chemistry and Physics*, 210, 43–48.
- Kocamer, A., Uzun, M., & Çoban, S. (2022). Static Analysis and Design of Fixed-Wing Tactical Unmanned Aerial Vehicle (TUAV) Retractable Main Landing Gear. *Aerospace Research Letters (ASREL)*, 1(2), 125-131.
- Krishna, S. A., Noble, N., Radhika, N., & Saleh, B. (2024). A comprehensive review on advances in high entropy alloys: Fabrication and surface modification methods, properties, applications, and future prospects. *Journal of Manufacturing Processes*, 109, 583–606.
- Kumar, A., Chandrakar, R., Dubey, V., & Michalska-Domańska, M. (2023). *High-Entropy Alloys: Processing, Alloying Element, Microstructure, and Properties*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.
- Li, W. P., Wang, X. G., Liu, B., Fang, Q. H., & Jiang, C. (2018). Fracture mechanisms of a Mo alloyed CoCrFeNi high entropy alloy: In-situ SEM investigation. *Materials Science and Engineering: A*, 723, 79–88.
- Liu, W. H., He, J., Huang, H., Wang, H., Liu, X., & Liu, C. T. (2015). Effects of Nb Additions on the Microstructure and Mechanical Property of CoCrFeNi High-Entropy Alloys. *Intermetallics*, 60, 1–8.
- Liu, W. H., Lu, Z. P., He, J. Y., Luan, J. H., Wang, Z. J., Liu, B., Liu, Y., Chen, M. W., & Liu, C. T. (2016). Ductile CoCrFeNiMox high entropy alloys strengthened by hard intermetallic phases. *Acta Materialia*, 116, 332–342.
- Miracle, D. B., & Senkov, O. N. (2017). A critical review of high entropy alloys and related concepts. *Acta Materialia*, 122, 448–511.
- Niu, Z., Xu, J., Wang, T., Wang, N., Han, Z., & Wang, Y. (2019). Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance of CoCrFeNiW (X = 0, 0.2, 0.5) High Entropy Alloys. *Intermetallics*, 112, 106550.
- Polat, G., Tekin, M., & Kotan, H. (2022). Role of yttrium addition and annealing temperature on thermal stability and hardness of nanocrystalline CoCrFeNi high entropy alloy. *Intermetallics*, 146, 107589.

- Qiao, J. W., Ma, S. G., Huang, E.-W., Chuang, C. P., Liaw, P. K., & Zhang, Y. (2011). Microstructural characteristics and mechanical behaviors of AlCoCrFeNi high-entropy alloys at ambient and cryogenic temperatures. *Materials Science Forum*, 688, 419–425.
- Ranganathan, S. (2003). Alloyed pleasures: Multimetallurgical cocktails. *Current science*, 85(5), 1404–1406.
- Salishchev, G. A., Tikhonovsky, M. A., Shaysultanov, D. G., Stepanov, N. D., Kuznetsov, A. V., Kolodiy, I. V., Tortika, A. S., & Senkov, O. N. (2014). Effect of Mn and V on structure and mechanical properties of high-entropy alloys based on CoCrFeNi system. *Journal of Alloys and Compounds*, 591, 11–21.
- Shun, T.-T., Chang, L.-Y., & Shiu, M.-H. (2012). Microstructure and Mechanical Properties of Multiprincipal Component CoCrFeNiMox Alloys. *Materials Characterization*, 70, 63–67.
- Sonar, T., Ivanov, M., Trofimov, E., Tingaev, A., & Suleymanova, I. (2024). An overview of microstructure, mechanical properties and processing of high entropy alloys and its future perspectives in aeroengine applications. *Materials Science for Energy Technologies*, 7, 35–60.
- Tang, Y., & Li, D. Y. (2021). Nano-tribological behavior of high-entropy alloys CrMnFeCoNi and CrFeCoNi under different conditions: A molecular dynamics study. *Wear*, 476, 203583.
- Tsai, M.-H., & Yeh, J.-W. (2014). High-entropy alloys: a critical review. *Materials Research Letters*, 2(3), 107–123.
- Uyaner, M., Karadal, K., Merdan, T., & Acar, N. N. (2024). Havacılık Sektöründe Yeşil Kompozitler: NACA 4452 Rib Uygulaması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 6(2), 272–288.
- Wang, Z., & Zhang, S. (2023). Research and application progress of high-entropy alloys. *Coatings*, 13(11), 1916.
- Yalcın, M. C., & Talaş, Ş. (2024). Investigation on Microstructural and Mechanical Properties of FeNiMnCrCoTi0. 1 High Entropy Alloy with B Addition. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 5(1), 195–213.
- Yang, S., & Zhong, Y. (2021). Ab Initio Modeling of fcc Fe-Co-Cr-Ni High Entropy Alloys with Full Composition Range. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 42(5), 656–672.
- Yeh, J.-W. (2013). Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *JOM*, 65, 1759–1771.
- Zhang, M., Zhang, W., Liu, Y., Liu, B., & Wang, J. (2018). FeCoCrNiMo high-entropy alloys prepared by powder metallurgy processing for diamond tool applications. *Powder Metallurgy*, 61(2), 123–130.
- Zhang, Y., Zhou, Y., Lin, J., Chen, G. L., & Liaw, P. K. (2008). Solid-Solution Phase Formation Rules for Multi-component Alloys. *Advanced Engineering Materials*, 10(6), 534–538. <https://doi.org/10.1002/adem.200700240>
- Zhou, N., Jiang, S., Huang, T., Qin, M., Hu, T., & Luo, J. (2019). Single-phase high-entropy intermetallic compounds (HEICs): bridging high-entropy alloys and ceramics. *Science Bulletin*, 64(12), 856–864.



## **EXTENDED ABSTRACT**

**Introduction:** High entropy alloys (HEAs) possess exceptional mechanical, thermal, and chemical properties for engineering applications. This study explores the effects of Mo additions on the microstructure and mechanical properties of CoCrFeNi HEAs to address its microstructures, macro and micro mechanical properties.

**Method:** CoCrFeNi-based HEAs with 0, 2, and 4 (at. %) Mo were produced using vacuum arc melting. The structural, microstructural, and mechanical properties were analyzed using XRD, SEM, hardness testing, and nanoindentation mapping.

**Findings:** Mo additions led to the formation of a dendritic structure and increased lattice parameters in the FCC matrix. Mechanical properties improved, with hardness rising from 184 HV to 214 HV and yield strength increasing from 206 MPa to 287 MPa.

**Discussion:** The results indicate that Mo improves mechanical performance through solid solution strengthening and the segregation of Mo-Cr rich regions.

**Conclusion:** It has been concluded that adding a small amount of Mo significantly enhances the mechanical properties of FCC structured CoCrFeNi-based HEAs. These improved alloys show potential for applications where strength and microstructural stability are crucial, such as in the aerospace industry.