

## EJONS

Uluslararası Matematik, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi  
International Journal on Mathematic, Engineering and Natural Sciences

Research Article

e-ISSN: 2602 - 4136

<https://doi.org/10.5281/zenodo.16878089>

## Al-Fe Alaşımlarının Mikro Yapısı ve Sertliği Üzerinde Demir İçeriği ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi

Said ERAY \*1

<sup>1</sup> Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye  
Sorumlu Yazar Email: s.eray@sivas.edu.tr

**Makale Tarihi**

Geliş: 23.07.2025  
Kabul: 20.08.2025

**Anahtar Kelimeler**

Al-Fe Alaşımlar,  
Mikroyapı,  
Sertlik,

**Özet:** Bu çalışmada, Al-Fe esaslı alaşımların mikroyapı ve sertlik özellikleri üzerine demir içeriği ve sinterleme sıcaklığının etkileri incelenmiştir. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen numuneler 610 °C ve 640 °C sıcaklıklarda sinterlenmiş, ardından SEM görüntüleme ve Brinell sertlik deneyleri uygulanmıştır. Mikroyapı analizleri, düşük sinterleme sıcaklığında (610 °C) bazı demir parçacıklarının Al matrisiyle yeterli reaksiyona girmediğini göstermiştir. Buna karşılık, 640 °C’de sinterlenen numunelerde Al<sub>3</sub>Fe intermetalik fazların daha homojen dağıldığı ve büyük Fe parçacıklarının ortadan kalktığı tespit edilmiştir. Sertlik sonuçları, hem artan demir içeriğinin hem de yüksek sinterleme sıcaklığının Brinell sertliğini artırdığını ortaya koymuştur. Elde edilen veriler, uygun sinterleme sıcaklığı ve alaşım oranlarının seçilmesinin, Al-Fe alaşımlarının mekanik performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir.

## Effect of Iron Content and Sintering Temperature on Microstructure and Hardness of Al-Fe Alloys

**Article Info**

Received: 23.07.2025  
Accepted: 20.08.2025

**Keywords**

Al-Fe Alloys,  
Microstructure,  
Hardness,

**Abstract:** In this study, the effects of iron content and sintering temperature on the microstructure and hardness of Al-Fe-based alloys were investigated. Samples were produced via the powder metallurgy method and sintered at 610 °C and 640 °C. Scanning electron microscopy (SEM) and Brinell hardness tests were conducted for characterization. Microstructural analyses revealed that some iron particles remained unreacted at 610 °C, while at 640 °C, the formation and homogenization of Al<sub>3</sub>Fe intermetallic phases were more evident. The hardness results showed that both increasing Fe content and higher sintering temperature contributed to improved Brinell hardness. These findings suggest that optimizing the sintering temperature and alloy composition can significantly enhance the mechanical performance of Al-Fe alloys.

**1. Giriş**

Al-Fe alaşımları, yüksek mekanik mukavemet, avantajlı korozyon direnci ve çeşitli işleme tekniklerine uyum sağlama özelliklerini bir araya getiren benzersiz bir malzeme sınıfını temsil eder. Alaşımlama stratejileri ve işleme yöntemleri üzerine yapılacak daha fazla araştırma, otomotiv, havacılık ve denizcilik uygulamalarındaki kullanımlarını önemli ölçüde etkileyebilir ve bu da pratik uygulamalardaki tüm potansiyellerinin ortaya çıkmasını sağlayabilir.

Al-Fe alaşımlarının dikkat çekici özelliklerinden biri, büyük ölçüde demirin varlığından etkilenen mikroyapısal özelliklerine atfedilen etkileyici mekanik mukavemetleridir. Araştırmalar, Al-Fe alaşımlarının, yüksek enerjili bilyalı öğütme gibi koşullar altında oluşan

nanokristalin yapı sayesinde önemli plastik gerilmeye birlikte yaklaşık 1 GPa'lık bir basınç dayanımına ulaşabileceğini göstermektedir (Gupta ve ark., 2015). Ayrıca, AlFe, Al<sub>3</sub>Fe ve Al<sub>5</sub>Fe gibi metaller arası bileşiklerin varlığı, bu alaşımların hem mekanik özelliklerini hem de korozyon direncini önemli ölçüde artırabilir (Nakano ve ark., 2013).

Al-Fe alaşımlarının korozyon davranışı kapsamlı bir şekilde incelenmiş ve uygun şekilde işlendiklerinde çukurlaşma korozyonuna karşı direnç göstermedeki etkinlikleri ortaya konmuştur. Örneğin, Nakano ve ark., yüksek basınç burulmasına tabi tutulan Al-Fe alaşımlarının, aşındırıcı maddelere karşı etkili bariyerler görevi gören alüminyum oksit filmlerinin artan oluşumu nedeniyle gelişmiş korozyon direnci gösterdiğini bildirmiştir (Nakano ve ark., 2013). Dahası, krom gibi belirli alaşım elementlerinin eklenmesinin, koruyucu intermetalik fazların oluşumu yoluyla gelişmiş korozyon direncine katkıda bulunduğu gösterilmiştir (Seikh ve ark., 2016). Ek olarak, karbonun alüminyum açısından zengin demir alüminidlerin korozyon özellikleri üzerindeki olumlu etkisi tartışılmış ve bu da alaşımlama stratejilerinin sulu ortamlardaki performansı önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir (Silva ve ark., 2022).

Al-Fe alaşımları, mikro yapısal özellikleri ve içerdiği elementlerin etkileşimi sayesinde dikkat çekici sertlik değerleri sergilemekte olup, bu da onları mühendislik uygulamaları açısından önemli kılmaktadır. Sertliğin iyileştirilmesi amacıyla yapılan araştırmalarda, alaşım kompozisyonunun yanı sıra üretim yöntemi ve ısıl işlemlerin de belirleyici olduğu görülmektedir. Örneğin, Faria ve ark., (Faria ve ark., 2023), Al-5Ni-1Fe alaşımının ikili sistemlere göre %13 ile %102 arasında daha yüksek sertlik gösterdiğini belirterek Al, Ni ve Fe elementleri arasındaki sinerjiyi vurgulamıştır. Benzer şekilde, Zhou ve ark., (Zhou et al., 2014), alüminyum oranı arttıkça katı çözümlü sertleşmesi nedeniyle Fe-Al alaşımlarının sertliğinin de arttığını göstermiştir.

Sertliğin yalnızca bileşimden değil, aynı zamanda üretim tekniğinden de etkilendiği Bandriyana ve ark., (Bandriyana ve ark., 2023) tarafından ortaya konmuş; toz metalürjisiyle üretilen Fe-Cr-Al alaşımlarının sertlik değerlerinin geleneksel paslanmaz çeliklerle karşılaştırılabilir olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, Shurkin ve ark., (Shurkin ve ark., 2020) tarafından yapılan çalışmalarda demir ilavesinin katı çözümlü özelliklerinin korunmasına katkı sağladığı ve bu sayede döküm sırasında faz bileşiminin sertliği belirlediği ifade edilmiştir. Isıl işlemin de sertliğe etkisi, Mi ve ark. (2011) tarafından Cu-Al-Fe alaşımları üzerinde yapılan çalışmalarda vurgulanmış; yaşlandırma sürecinde oluşan fazların sertlik değerini doğrudan etkilediği gösterilmiştir. Tüm bu çalışmalar, Al-Fe bazlı alaşımlarda hem kompozisyonun hem de süreç parametrelerinin optimize edilmesiyle mekanik performansın önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir.

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemiyle Al-Fe esaslı alaşımlar üretilmiş ve alaşım ilavelerinin ve sinterleme sıcaklığının mikroyapısal evrim ve sertlik üzerindeki incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

### 2.1. Alaşımların üretimi

Alaşımların üretimi için toz metalürjisi yöntemi kullanılmıştır. Sırasıyla %99,8 ve %99,5 saflığa sahip Al ve Fe tozları belirlenen oranlarda karıştırılarak sertleştirilmiş soğuk takım çeliğinden imal edilen çelik kalıpta 2 cm çap ve yaklaşık 1 cm yüksekliğe sahip silindirik numuneler halinde preslenmiştir. Pres için manuel hidrolik pres kullanılmıştır ve numune ölçülerine göre 400 MPa'a denk gelen 12,5 ton yük uygulanmıştır. Preslenen numuneler önceden belirli sıcaklığa (610 ve 640 °C) ısıtılmış atmosfer kontrollü tüp fırına yerleştirilerek azot gazı altında sinterlenmiştir. Kullanılan azot gazının saflığı %99,99 olup 0,5 lit/dakika debi

ile fırına verilmiştir. Numuneler 60 dk süre ile belirlenen sıcaklıkta bekletildikten sonra fırında çıkarılarak havada soğumaya bırakılmıştır.

## 2.2. Numunelerin karakterizasyonu

Elde edilen sinterlenmiş numunelerin yüzeyi metalografik yöntemlerle hazırlanarak TESCAN MIRA marka mikroyapıları elektron mikroskop (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca numunelerin Brinell sertliği INNOVATEST marka ve Nexus 610RS model cihazı kullanılarak ölçülmüştür.

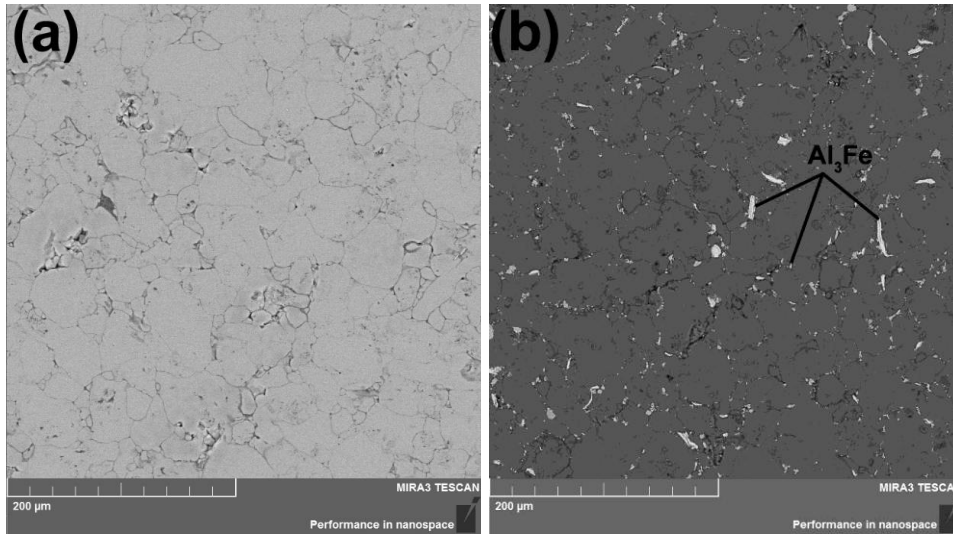
## 3. Bulgular ve Tartışma

### 3.1. Numunelerin mikroyapı analizleri

Numunelerin SEM görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1-a'de saf alüminyumun mikroyapısı karşılaştırmak amacıyla göstermektedir. Şekil 1-b ise %5 Fe içeren alaşımın mikroyapısını göstermektedir. Koyu gri renk olan matris yapısı alüminyum ( $\alpha$ -Al) fazıdır. Görselde belirgin şekilde iğnemi veya çubuksu yapılarda fazlar gözlemlenmektedir. Bu yapıların keskin kenarlı ve uzun oluşu, mekanik özellikler açısından gevrek davranışlara neden olabilir. Bu fazlar çatlak ilerlemesini kolaylaştırır ve sünekliği azaltır. Bu yapılar, Al-Fe alaşımlarında sıkça rastlanan  $Al_3Fe$  intermetalik fazlara işaret etmektedir. Bu fazlar genellikle Fe zengin bölgelerde çöker ve düşük çözünürlüklerinden dolayı katı çözültiden ayrılırlar. Bu fazların rastgele yapılan EDS analiz sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Bu sonuçlara göre bu fazlar yaklaşık 25-30 wt.% demir içermektedir. Bu demir oranı Al-Fe faz diyagramı ve literatürde (Goulart ve ark., 2010) rapor edilen  $Al_3Fe$  fazın oluştuğunu doğrulamaktadır

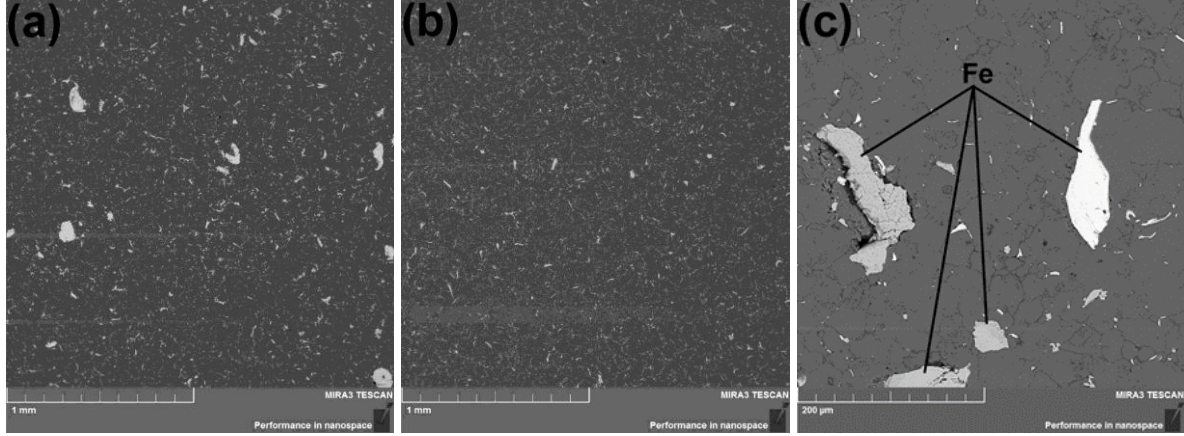
**Tablo 1.** İğnemi Al-Fe fazların EDS analiz sonuçları

Analiz No	Al (wt.%)	Fe (wt.%)
1	79	21
2	74	26
3	76	24
4	71	29
5	74	26



**Şekil 1.** a) saf alüminyum, b) Al-%5Fe alaşımın mikroyapısı

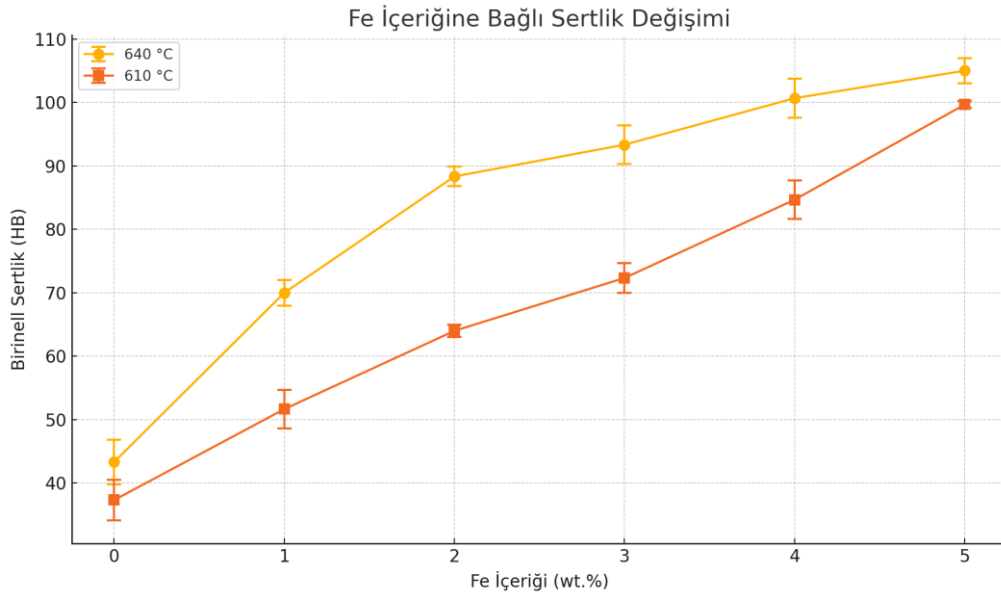
Şekil 2 farklı sıcaklıklarda sinterlenen Al-%5Fe alaşımların SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 2-a'ya göre, 610 °C'de sinterlenen numunelerde büyük demir tozları görülmektedir. Bu parçacıkların demir olduğu EDS analizleri ile doğrulanmıştır. Bu iri demir tozları sıcaklığın 640 °C'ye çıkmasıyla ortadan kaybolmuş ve Al<sub>3</sub>Fe intermetalik faz oluşumunun bu sıcaklıkta tamamlandığını ortaya koymuştur. Şekil 2-c'de ise 610 °C'de numunelerde tepkimeye girmemiş demir tozların daha yakından görünümünü göstermektedir.



Şekil 2. Al-%5Fe alaşımın SEM görüntüleri. a) 610 °C'de sinterlenmiş, b) 640 °C'de sinterlenmiş, c) 610 °C sinterlenmiş (yüksek büyütme)

### 3.2. Numunelerin sertlik sonuçları

Her iki sıcaklıkta da artan Fe içeriği ile birlikte sertlikte bir artış gözlemlenmektedir. Bu, Fe'nin Al matrisi içinde intermetalik fazlar (özellikle Al<sub>3</sub>Fe) oluşturduğunu ve bu fazların sertliği artırdığını göstermektedir. Ancak bu artış 610 °C'de daha sınırlı kalmakta, özellikle 3–5% Fe içeriğinde dahi 640 °C'ye göre sertlik belirgin ölçüde düşüktür.



Şekil 3. Farklı oranlarda demir içeren Al-Fe alaşımların Brinell sertlik değerleri

Sıcaklığın etkisine bakıldığında, 640 °C’de sinterlenen numuneler, her Fe içeriği oranında 610 °C’de sinterlenenlere kıyasla belirgin şekilde daha yüksek Brinell sertlik değerleri göstermektedir. Bu fark, 640 °C’nin daha etkin bir sinterleme sıcaklığı olduğunu ve hem matris (Al) tozlarının hem de alaşım elementlerinin (özellikle Fe) daha iyi difüzyonla bütünleştiğini düşündürmektedir. SEM analizlerine göre, 610 °C’de sinterleme sırasında Fe tozlarının bir kısmı Al ile reaksiyona girmemiş, iri parçacıklar olarak yapıda kalmıştır. Oluşmayan Al<sub>3</sub>Fe miktarı düşük olduğundan, bu intermetalik fazın sertleştirici etkisi yeterince hissedilmemiştir. Toz demirin matrisle iyi bağlanmaması, lokal zayıf noktalar oluşturmuş olabilir.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, Al-Fe alaşımlarının mikroyapı ve sertlik özellikleri demir içeriği ve sinterleme sıcaklığı parametreleri dikkate alınarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre:

- Fe içeriği arttıkça sertlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Bu artış, Al matrisi içinde oluşan Al<sub>3</sub>Fe intermetalik fazlarının sertleştirici etkisine bağlanabilir.
- Sinterleme sıcaklığının artışı, sadece sertliği değil, aynı zamanda mikroyapının homojenliğini de iyileştirmiştir. 640 °C’de sinterlenen numunelerde, Fe tozlarının daha etkin difüzyonla Al ile reaksiyona girerek intermetalik fazlara dönüştüğü görülmüştür.
- 610 °C’de sinterlenen numunelerde reaksiyona girmemiş iri Fe parçacıklarının kalması, yapısal zayıflıklara ve daha düşük sertlik değerlerine neden olmuştur.

Bu bulgular, Al-Fe alaşımlarının özelliklerinin hem alaşım kompozisyonunun hem de işlem sıcaklığının dikkatli kontrolüyle iyileştirilebileceğini göstermektedir. Özellikle toz metalurjisi gibi katı hal işlem yöntemlerinde, sinterleme sıcaklığı kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Gelecek çalışmalarda, Al-Fe alaşımlarına Ni, Si veya Zr gibi alaşım elementlerinin ilavesiyle mikroyapısal evrim ve intermetalik faz oluşumu üzerindeki etkiler araştırılabilir. Bu tür element katkılarının, özellikle sertlik, mekanik dayanım ve ısıl kararlılık gibi özellikler üzerinde iyileştirici etkiler sağlayabileceği öngörülmektedir.

#### Kaynaklar

- Bandriyana, B., Sujatno, A., Salam, R., Haerani, D.N., Sugeng, B., Shabrina, N., Sukaryo, S.G., 2023. Synthesis and microstructure characterization of Fe-Cr-Al alloys developed by powder metallurgy technique with plasma sintering method. *Journal of Physics: Conference Series*, 2556(1): 012023.
- Faria, J., de Paula, A., Silva, C., Kakitani, R., Barros, A., Garcia, A., Brito, C., Cheung, N., 2023. Fe-containing al-based alloys: relationship between microstructural evolution and hardness in an Al-Ni-Fe alloy. *Metals*, 13(12): 1980.
- Goulart, P.R., Spinelli, J.E., Bertelli, F., Osório, W.R.R., Cheung, N., Garcia, A., 2010. Cellular microstructure and mechanical properties of a directionally solidified Al-1.0wt%Fe Alloy. *Materials Science Forum*, 636–637.
- Gupta, R.K., Fabijanic, D., Zhang, R., Birbilis, N., 2015. Corrosion behaviour and hardness of in situ consolidated nanostructured Al and Al–Cr alloys produced via high-energy ball milling. *Corrosion Science*, 98: 643–650.
- Mi, G.F., Zhang, J.Z., Lv, S.L., Wang, P., 2011. The effect of aging heat treatment on the sliding wear behavior of Cu-Al-Fe-(x) alloys. *Advanced Materials Research*, 219–220.

- Nakano, H., Yamaguchi, H., Yamada, Y., Oue, S., Son, I.J., Horita, Z., Koga, H., 2013. Effects of high-pressure torsion on the pitting corrosion resistance of aluminum–iron alloys. *Materials Transactions*, 54(9): 1642-1649.
- Seikh, A., Baig, M., Ammar, H., Alam, M., 2016. The influence of transition metals addition on the corrosion resistance of nanocrystalline Al alloys produced by mechanical alloying. *Metals*, 6(6): 140.
- Shurkin, P.K., Belov, N.A., Musin, A.F., Aksenov, A.A., 2020. New high-strength casting aluminum alloy based on the Al–Zn–Mg–Ca–Fe system without requirement for heat treatment. *Tsvetnaya Metallurgiya*, 1: 48–58.
- Silva, A.P., Brito, P.P., Martins, N., 2022. Corrosion behavior of FeAl and Fe<sub>3</sub>Al based Fe–Al–C alloys in sulfuric acid. *Archives of Foundry Engineering*, 77–82.
- Zhou, Z., Du, J., Zhang, Y., Zhang, Y., Gu, S., 2014. The vacancy-hardening properties in water-quenched Fe–Al alloys. Proceedings of the 2015 International Conference on Material Science and Applications.