



**ELEKTRON KONSANTRASYONUN Cu-Al-Fe
ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN DÖNÜŞÜM
SICAKLIĞI, KRİSTALOGRAFİK YAPISI VE
TERMAL AKTİVASYON ENERJİSİ ÜZERİNE
ETKİLERİ**

Esra BALCI

**Yüksek Lisans Tezi
Fizik Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. Sinan AKPINAR
OCAK-2017**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRON KONSANTRASYONUN Cu-Al-Fe ŞEKİL HATIRLAMALI
ALAŞIMLARIN DÖNÜŞÜM SICAKLIĞI, KRİSTALOGRAFİK YAPISI VE
TERMAL AKTİVASYON ENERJİSİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Esra BALCI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra BALCI

(142114110)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Ocak 2017

Tezin Savunulduğu Tarih : 08 Şubat 2017

Tez Danışmanı :

Prof. Dr. Sinan AKPINAR (Fırat Üniversitesi)



Diğer Jüri Üyeleri :

Prof. Dr. Mehmet Ali AKSAN (İnönü Üniversitesi)



Doç. Dr. Mediha KÖK

(Fırat Üniversitesi)



ŞUBAT-2017

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezimin hazırlanmasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Sinan AKPINAR' a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Ayrıca, yapmış olduğum DSC çalışmaları ve optik mikroskop çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Köksal YILDIZ'a, hem deneysel çalışmalarımda hem de manevi olarak desteğini hiçbir zaman esirgemeyen Doç. Dr. Mediha KÖK'e ve yetişmemde emeği geçen tüm hocalarıma, aileme ve çalışmamda maddi, manevi emeği geçenlere en içten saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FÜBAP tarafından FF.1516 nolu proje olarak desteklenmiştir.

Esra BALCI
ELAZIĞ – 2017

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ELEKTRON KONSANTRASYONUN Cu-Al-Fe ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLARIN DÖNÜŞÜM SICAKLIĞI, KRİSTALOGRAFİK YAPISI VE TERMAL AKTİVASYON ENERJİSİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Esra BALCI

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Elazığ 2017, Sayfa: IX+57

Bu çalışmada, farklı elektron konsantrasyonundaki CuAlFe ve CuAlFe-X (X=Ni,Ti,Mn) şekil hatırlamalı alaşımlar incelenmiştir. Bu alaşımlar, yüksek saflıktaki element tozları kullanılarak ark ergitme fırınında birkaç kez eritilerek üretilmiştir. Daha sonra üretilen alaşımlar, 950 °C de 24 saat homojenleştirmeye maruz bırakılmıştır. CuAlFe ve CuAlFe-X (X=Ni,Ti,Mn) alaşımlarının austenit-martensit faz sıcaklıkları termal analiz ölçüm yöntemiyle (Diferansiyel taramalı kalorimetre-DSC kullanılarak) yapıldı. Bütün alaşımlar yüksek sıcaklık şekil hatırlama özelliği gösterdi. DSC ölçümlerinden faydalanarak, Kissinger ve Ozawa yöntemine göre alaşımların aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Alaşımların kristal yapısı ve mikroyapısı x ışınları ölçümü ve SEM-EDX ölçümü ile belirlendi. Alaşımların x-ışınları difraktogramında 18R martensite faz ve Cu₉Al₄ çökelti fazına rastlanmıştır. Bu fazlar SEM fotoğraflarında görülmüştür. EDX sonuçları da bu fazların varlığını desteklemiştir. CuAlFe-Ti alaşımı, diğer alaşımlardan farklı olarak X –faz yapısına sahiptir. Bu faza ait görüntüleri ve kimyasal oranları SEM-EDX sonuçlarında bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Şekil Hatırlamalı Alaşım; Yüksek Sıcaklık; Aktivasyon Enerjisi; Austenit Faz, Martensit Faz

SUMMARY

Masters Thesis

THE EFFECTS OF ELECTRON CONCENTRATION ON TRANSFORMATION TEMPERATURE, CRYSTAL STRUCTURE AND THERMAL ACTIVATION ENERGY OF CU-AL-FE SHAPE MEMORY ALLOYS

Esra BALCI

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Physics Department

Elazig 2017, Page: IX+57

In this study, CuAlFe and CuAlFe-X (X=Ni,Ti,Mn) shape memory alloys which have different electron concentration value were investigated. These Alloys were produced by arc melter furnace several times by using high purity elemental powders. Then, produced alloys were subjected to homogenize at 950 °C for 24 hours. The austenite-martensite transformation temperatures of CuAlFe ve CuAlFe-X (X=Ni,Ti,Mn) alloys were done by thermal anlysis method (by using Differatial Scanning calorimetry-DSC). All of alloys show high temperature shape memory alloys property. According to Kissinger and Ozawa methods activation energy of alloys calculated by using DSC measurement. The crystal structure and microstructure of alloys were determined with x-ray measurement and SEM-EDX measurement. It was seen that 18R martensite structure and Cu₉Al₄ precipitate phase at x-ray diffractograms. These phases seen at SEM images and also supported by EDX results. CuAlFe-Ti alloy have X-phase different from other alloys. The SEM image and Chemical ratio found at SEM-EDX results.

Keywords: Shape Memory Alloys; High Temperature; Activation Energy; Austenite Phase; Martensite Phase

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
ÖZET	III
SUMMARY	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
1. GİRİŞ	1
2. KATILARDA FAZ DÖNÜŞÜMLERİ VE ŞEKİL HATIRLAMA ETKİSİ.....	3
2.1. Katılarda faz dönüşümleri.....	3
2.1.1. Ana faz.....	3
2.1.2. Premartensitik faz	3
2.1.3. Austenit faz.....	3
2.1.4. Martensit faz	3
2.2. Şekil Hatırlama Etkisi	5
2.2.1 Tek Yönlü Şekil Hatırlama Etkisi	6
2.2.2. İki Yönlü Şekil Hatırlama Etkisi	6
2.2.3. Pseudoelastik Dönüşüm.....	6
2.3. Şekil Hatırlamalı Akıllı malzemelerin Çeşitleri	7
2.3.1. Yüksek Sıcaklık Şekil Hatırlamalı Alaşımlar.....	7
2.3.2. Manyetik Şekil Hatırlama Alaşımları.....	7
2.3.3. Şekil Hatırlamalı İnce Film Malzemesi.....	8
2.3.4. Şekil Hatırlamalı Polimerler	8
2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşım Uygulamaları	8
2.4.1. Otomotiv Uygulaması	8
2.4.2. Havacılık Uygulamaları.....	8
2.4.3. Robotik Uygulamalar	8
2.4.4. Biyomedikal Uygulamaları	9
3. SICAKLIKLARINA GÖRE POTANSİYEL YÜKSEK SICAKLIK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR.....	10
3.1. 100° C - 400° C Arasındaki Karakteristik Dönüşüm Sıcaklığında Alaşımlar	10

3.2. 400°C- 700°C arasındaki sıcaklıklarda alaşımların karakteristikleri	11
3.3. Yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı 700 °C sıcaklık üzerindeki karakteristikleri.....	11
3.4. Yüksek Sıcaklık Şekil Hatırlamalı Alaşımların Potansiyel Uygulamaları	12
4. DENEYSEL İŞLEMLER.....	14
4.1. Alaşım üretimi.....	14
4.2. Kimyasal Analiz (EDX analizi)	14
4.3. Termal Analiz.....	15
4.4. X-ışınları Analizi.....	16
4.5. Metalografik Gözlemler	16
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	17
5.1. Diferansiyel taramalı Kalorimetre (DSC) ölçümleri sonuçları	17
5.2. Aktivasyon Enerjisi sonuçları	20
5.3. X-ışınları Ölçüm Sonuçları	22
6. TARTIŞMA.....	49
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	57

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Martensit dönüşüm ve Süperelastiklik [21].....	4
Şekil 5.1. a) CAF-1, b) CAF-2, c) CAF-3, d) CAF-Ni, e) CAF-Ti, f) CAF-Mn alaşımlarının 20 °C/dak ısıtma hızıyla alınan DSC eğrisi.....	17
Şekil 5.2. CuAlFe-X alaşım gruplarının Kissinger yöntemi ile aktivasyon enerjisi hesaplamak için elde edilen eğriler.....	21
Şekil 5.3. CuAlFe-X alaşım gruplarının Ozawa yöntemi ile aktivasyon enerjisi hesaplamak için elde edilen eğriler.....	22
Şekil 5.4-(a-f) Üçlü bileşene sahip CAF-1, CAF-2, CAF-3 ve dördü bileşene sahip CAF-Ni, CAF-Ti ve CAF-Mn alaşım numunelerinin oda sıcaklığında alınan XRD desenleri (CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 numuneleri için 1 nolu pikler Cu(Al,Fe), 2 nolu pikler Cu ₉ Al ₄ , 3,4,5,6,8 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pikler Fe(Al,Cu) fazlarını temsil etmektedir. CAF-Ni numunesi için 1 nolu pik Cu(Al,Fe)-Ni, 2 nolu pik Cu ₉ Al ₄ , 3,4,5,6,8 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pik Fe(Al,Cu)-Ni fazlarını, CAF-Ti numunesi için 1 nolu pik Cu(Al,Fe)-Ti, 2 nolu pik Cu ₉ Al ₄ , 3,4,5,6,8 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pik X-fazını, CAF-Mn numunesi için 1 nolu pik Cu(Al,Fe)-Mn, 2 nolu pik Cu ₉ Al ₄ , 3,4,6 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pik Fe(Al,Cu)-Mn fazlarını temsil etmektedir).	25
Şekil 5.5. CAF-1 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü... 26	
Şekil 5.6. a) CAF-1 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	28
Şekil 5.7. a) CAF-1 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	29
Şekil 5.8. a) CAF-1 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	30
Şekil 5.9. CAF-2 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü... 31	
Şekil 5.10. a) CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	32
Şekil 5.11. a) CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	33
Şekil 5.12. a) CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	34
Şekil 5.13. CAF-3 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü. 36	
Şekil 5.14. a) CAF-3 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	37

Şekil 5.15. a) CAF-3 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	38
Şekil 5.16. CAF-Ni alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.	39
Şekil 5.17. a) CAF-Ni alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	40
Şekil 5.18. a) CAF-Ni alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	41
Şekil 5.19. CAF-Ti alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.	42
Şekil 5.20. a) CAF-Ti alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	43
Şekil 5.21. a) CAF-Ti alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	44
Şekil 5.22. CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.	45
Şekil 5.23. a) CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	46
Şekil 5.24. a) CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu.	47
Şekil 5.25. a) CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve b) EDX spektrumu	48

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 4.1. Üretilen şekil hatırlamalı alaşımların ağırlıkça yüzdeleri ve elektron konsantrasyonları (e/a) değerleri.....	14
Tablo 4.2. EDX kimyasal analiz ölçüm sonuçları	15
Tablo 5.1. Üretilen alaşımların dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi değerleri	19
Tablo 5.2. CuAlFe-X alaşımlarının Kissinger ve Ozawa yöntemiyle hesaplanan aktivasyon enerjileri değerleri	20



1. GİRİŞ

Şekil hatırlamalı alaşımlar, akıllı malzemelerin bir alt grubudur. Bu alaşım grubu, termal olarak uyarıldıklarında ilk şekillerini koruma özelliğine sahiptirler. Diğer bir ifadeyle, şekil hatırlamalı alaşımlar, uygun ısı şartların uygulanmasıyla değişik geometriye sahip kristal yapılardan önceki şekline geri dönebilen metalik malzemeler olarak tanımlanabilirler. Bu üstün özelliklerinden dolayı son zamanlarda oldukça fazla talep görürler.

Şekil hatırlamalı alaşım, ilk olarak Arne Ölander tarafından 1932’de keşfedilmiştir ve “şekil hatırlama” terimi 1941’de ilk kez polimerik dış malzemesi için Vernon tarafından ortaya koyulmuştur [1,2]. William Buehler ve Fredick Wang bir Ni-Ti alaşımının 1962’deki şekil hatırlama etkisini ortaya çıkarana kadar şekil hatırlamalı malzemelerinin önemi pek bilinmiyordu [3]. Sonraki yıllarda özellikle ticari alanlarda, mühendislik ve teknik uygulamalarda şekil hatırlamalı alaşımlara yönelik talep oldukça arttı. Önemli bazı alanlar şunlardır: endüstriyel uygulamalar ve tüketici ürünleri, yapılar ve bileşikler, otomotiv, havacılık, mini aktivatör-mikro elektromekanik sistemler (MEMS), robotik, biyomedikal ve moda-tasarım alanları. Şekil hatırlamalı alaşımlar arasında, özellikle demir (Fe) ve bakır (Cu) bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar (Fe-Mn-Si, Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni gibi) düşük fiyat ve ticari uygunluğu olmasına rağmen kararsızdırlar ve pratik değillerdir. Ayrıca, bunlar düşük termo mekanik performans sahiptirler, bu nedenle Ni-Ti bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar endüstriyel uygulamalarda daha çok tercih edilirler [4].

Şekil hatırlama etkisi 1951’de Au-Cd alaşımında ilk kez keşfedilemesine rağmen, 1963’de Ti-Ni alaşımında yapılan araştırmalar ile daha aktif hale gelmeye başladı [5,6]. Şekil hatırlamalı alaşımlar akıllı malzemeler olarak dikkat çekmiştir. Bu şekil hatırlama etkisinin meydana geldiği faz dönüşümünün kendisi de oldukça ilginçtir, çünkü çeşitli çözülmemiş ya da gözden kaçan sorunları içeren tipik bir olaydır. Bu nedenle, şekil hatırlamalı alaşımlar, malzeme bilimciler ve mühendislerin yanı sıra fizikçilerinde deneysel ve teorik çalışmalarının hedefi olmaya başlamıştır. Yapılan çalışmalar hızlı olarak ilerleme göstermiş, son zamanlarda hem temelleri hem de uygulamaları günümüzde bu konu ile ilgili önemli sonuçlar açığa çıkarmıştır.

Bu çalışmada üçlü Cu-Al-Fe alaşımları ve Ni, Ti ve Mn elementlerinin katkısı ile oluşturulan dörtlü Cu-Al-Fe-X (X=Ni, Ti, Mn) alaşımları hazırlandı. Elde edilen bu

alaşımların diferansiyel kalorimetre taraması, kimyasal ve termal analizi, x-ışınları analizi ve metalografik gözlemleri yapıldı. Bu yapılan deneysel işlemler ile elde edilen sonuçlar doğrultusunda aktivasyon enerji hesaplamaları Kissenger ve Ozawa yöntemleri ile hesaplanarak litaratre uygun kıyaslamalarda bulunuldu.



2. KATILARDA FAZ DÖNÜŞÜMLERİ VE ŞEKİL HATIRLAMA ETKİSİ

2.1. Katılarda faz dönüşümleri

2.1.1. Ana faz

Şekil hatırlamalı alaşımların ana fazının kristal yapısı, genel olarak BCC ya da FCC tipi örgüdedir. Martensitik dönüşümler öncesi, ana fazlar; In-Ti, Mn-Cu ve Fe-Pd alaşımları haricinde, genellikle $B2 \rightarrow DO_3$, L_{21} veya L_{12} tipte süper elastik yapı şeklindeki dizilimdedir. Değişik düzenlerdeki ana fazlar, geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) tarafından incelendiği zaman, karakteristik ince yapılar “benekli” yapıda gözlenir [7].

2.1.2. Premartensitik faz

Martensitik dönüşümlerin öncesinde ana fazlar değişik anomaliler sergiler ve bu olay “premartensitik” faz olarak adlandırılır. Bugüne kadar premartensitik durumun varlığı elastik sabitler, elektriksel direnç, manyetik direnç, elektron kırınımı, x –ışını kırınımı, nötron kırınımı, TEM görüntüsü, akustik emisyon ve genişletilmiş absorbe olmuş x-ışını ile gözlenmiştir [8-16]. Örneğin, Matsumoto ve Hanma $Ti_{53}Ni_{47}Fe_3$ alaşımında Nikel’in (Ni) bir kısmının demir (Fe) ile yer değiştirmesine bağlı olarak yüksek sıcaklık aralığında premartensitik ve martensitik dönüşümler gözlemişlerdir [17].

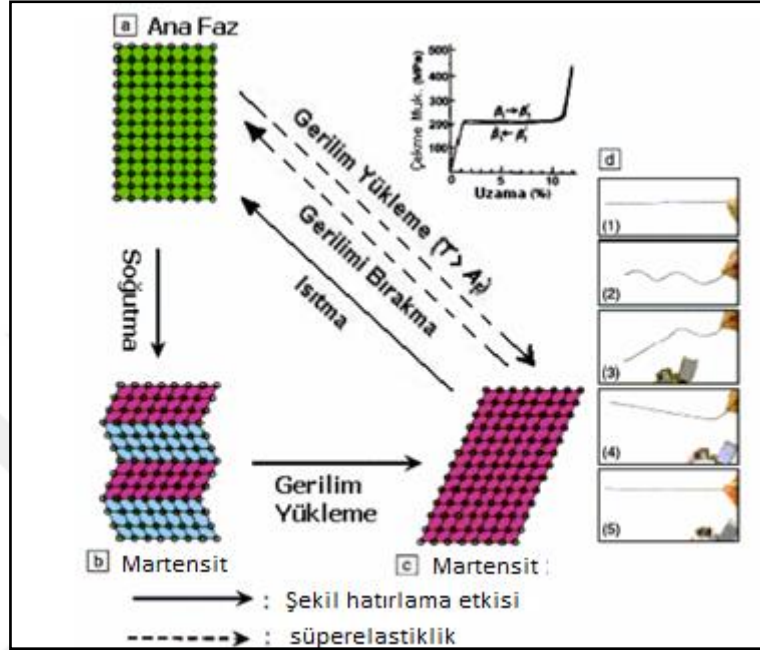
2.1.3. Austenit faz

Austenit faz yüksek sıcaklıkta karardır ve düşük simetriye sahiptir. Austenit başlangıç sıcaklığı olan A_s ’de dönüşüm başlar ve austenit bitiş sıcaklığı olan A_f ’de dönüşüm biter. Şekil hatırlamalı alaşım bir kez A_s ’nin üzerinde ısıtıldığında austenit yapıya dönüşümü başlar, yani alaşımın orijinal haline geri dönüşümü söz konusudur [18].

2.1.4. Martensit faz

Martensit faz düşük sıcaklıkta karardır ve yüksek simetriye sahiptir. İlk olarak martensit yapı çeliklerin su ile soğutulması sırasında elde edilmiştir ve bu olaya ünlü Alman metallurjist Martens’in adı verilmiştir [19]. Martensitik dönüşüm; difüzyonsuz yer değiştirme olarak tanımlanır. Yani, her bir atomun yer değiştirmesi büyük olmamakla beraber bir makroskopik şekil değişimi, bir bölgede aynı yöndeki tüm

atomların hareketi şeklindedir. Martensitik dönüşüm, makaslanma türü bir mekanizma ile tanımlanmış difüzyonsuz dönüşümdür. Ana faz genellikle kübiktir. Alaşım, Ms olarak isimlendirilen kritik sıcaklığa kadar soğutulduğunda (bu sıcaklıkta martensitik faz, soğutmanın üstünde dönüşüme başlar) asustenit yapı martensite dönüşür [20].



Şekil 2.1. Martensit dönüşüm ve Süperelastiklik [21].

Şekil 2.1' de ana fazdaki yapı soğutma ile martensit ikizlenmelere dönüşür. Martensit ikizlemeler ise, uygulanan yükleme ile ikizlenmemiş martensit yapıya, ısıtma veya yüklemenin geri çekilmesi durumunda ise martensit faz ana faz olan austenit faza dönüşür. Şekil 2.1.d' de ise mikroskobik faz değişiminin makroskobik olarak nasıl şekil değişimi meydana getirdiği görülmektedir [22].

Martensitik dönüşümleri ikiye ayırabiliriz:

- Termoelastik martensitik dönüşüm
- Termoelastik olmayan martensitik dönüşüm

Martensitik dönüşümlerin karakteristik sıcaklıkları aşağıdaki gibi tanımlanabilir ve bu karakteristik sıcaklıklar elektriksel direnç ve termal analiz gibi ölçümlerle belirlenir [23]:

Ms: martensitik dönüşüm başlama sıcaklığı

Mf: martensitik dönüşüm bitiş sıcaklığı

As: austenit dönüşüm başlama sıcaklığı

Af: austenit dönüşüm bitiş sıcaklığı

Martensit fazın karakteristikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- Dönüşüm, materyalin farklı kısımlarının makaslanması vasıtası ile olur
- Martensitlerin büyümesi için termal olarak uyarılmış difüzyon gerekli değildir ve kimyasal kompozisyon olarak martensit faz, austenit fazın kompozisyonu ile aynıdır.
- Martensit faz dönüşümler çoğunlukla aşırı derecede yüksek hızlar ile olur.
- Martensit dönüşüm, ana fazın genellikle Ms (başlama sıcaklığı) olarak adlandırılan bir sıcaklığa kadar soğutulmasıyla başlar.
- Ms' in altındaki herhangi bir sıcaklıkta, plastik deformasyon martensit miktarını artırır.
- Martensit geçişler genellikle polimorfiktir ve bunlara geniş histerisizler ile eşlik edilir.

2.2. Şekil Hatırlama Etkisi

Bazı alaşımlarda uygulanan plastik bir zorlanmanın neticesinde, alaşım belli bir sıcaklık değerinin üzerinde ısıtıldığında tamamen eski şekline geri döner. Bu olay ilk olarak 1950' lerin ortalarında Au-Cd ve In-Ti alaşımlarında şekil hatırlama etkisi olarak gözlemlenmiştir [24,25]. Ancak, 1963'de Ti-Ni alaşımı bulunduğu şekil hatırlama etkisi araştırma henüz konusu değildi ve benzer olay sonraki yıllarda Cu-Al-Ni alaşımlarında da keşfedilmiştir [26,27].

1970' de Otsuka ve Shimizu bir Cu-Al-Ni alaşımında termoelastik martensitik dönüşümün şekil hatırlama etkisine birebir karşılık geldiğini kesin olarak gösterdiler ve böylece, termoelastik martensitik dönüşüm sergileyen alaşımların karakteristiğini şekil hatırlamalı etki olarak açıkladılar [28,29].

Saburi ve Nenno varyantsız dönüşümlerin olmadığını ve martensitteki çoğu ikizlenmelerin klasik ikizlenme mekanizmaları ile oluştuklarını gösterdiler. Yani martensitin tek bir kristali elde edilir. Bundan dolayı, malzeme üzerindeki büyük zor ya da uzama maksimum olur ve yüklemenin üzerinde zorlanma kalıcıdır. Çünkü, M_f nin altında malzeme kararlıdır. Malzeme, A_f nin üzerindeki bir sıcaklığa ısıtılırsa, ana fazda kalan değişkenler ürün faza dönüşür. Malzemenin şeklinin, eski haline geri dönmesi şekil hatırlama etkisidir [30].

2.2.1 Tek Yönlü Şekil Hatırlama Etkisi

Malzemeye uygulanan kuvvetin kaldırılması sonucunda, malzeme üzerinde deforme edilmiş durum korunur ve sonra malzemeye uygulanan yüksek sıcaklık ile malzeme tekrar orijinal şekline döner. Bu “tek yönlü şekil hatırlama etkisi” olarak tanımlanır.

2.2.2. İki Yönlü Şekil Hatırlama Etkisi

Tek yönlü şekil hatırlama etkisine ilaveten, iki yönlü şekil hatırlamalı herhangi bir alaşım yüksek ve düşük sıcaklıklarda orijinal şeklini tekrar hatırlayabilir. Bu arada tamamen martensitik fazda olan bir malzeme deforme olduktan sonra, şekil hatırlama etkisinden dolayı uygulanan zor kaldırılrsa bile, Af sıcaklığının üzerinde kalıcı bir zor oluşabilir. Bununla beraber, sonraki soğutmalarda martensit durumdaki şekil sadece kısmi olarak kazanılmıştır. Isıtmanın üzerindeki sıcaklıklarda bu doğal şekil değişimi kaybolur. Böylece bunun gibi şekil hatırlama etkileri “iki yönlü şekil hatırlama etkisi” ya da “tersinir şekil hatırlama etkisi “ olarak adlandırılır [31,32].

2.2.3. Pseudoelastik Dönüşüm

Martensit dönüşümler M_s sıcaklığının üzerinde uygulanan zor ile uyarılabilirler [33]. Termoelastik martensit dönüşüm sergileyen bir malzemede ana faz beklenmedik şekilde aniden tersinir olur ve zor olmaksızın Af'nin üzerindeki sıcaklıklarda zorlama etkili martensit kararsızlık gösterir. Zorlama etkili martensit bir malzeme lineer olmayan elastik özellik gösterir ve kapalı zorlanma-zor eğrisi ile karakterize edilir. Lineer olmayan bu elastiklik “pseudoelastik dönüşüm“ olarak adlandırılır [34].

Zorlanma ile geri dönüşümün sürücü kuvveti, zorun bir fonksiyonu olarak ana ve ürün faz arasındaki kimyasal serbest enerjideki farktır. Tam şekil iyileşmesi şekil hatırlama etkisindeki gibi dönüşümün kristalografik terslenebilirliğinden dolayı tekrarlanabilir. Böylece pseudoelastik dönüşüm, Af'nin üzerindeki bir sıcaklıkta ısıtıldığında malzemenin geri dönüşüme sebep olması hariç, şekil hatırlama etkisindeki gibi aynı özelliktedir. Bununla beraber, pseudoelastik dönüşümün meydana gelmesi için kaymanın kritik zorlama etkili martensitik dönüşümlerinkinden daha yüksek olması gerekmektedir [35].

2.3. Şekil Hatırlamalı Akıllı Malzemelerin Çeşitleri

Şekil hatırlamalı alaşımların çeşitleri ya da diğer oluşumları, dezavantajları ya da sınırlamaları araştırılmıştır ve bu yönleri gözönüne alınarak sınıflandırılmıştır.

2.3.1. Yüksek Sıcaklık Şekil Hatırlamalı Alaşımlar

NiTi şekil hatırlamalı alaşımlara bazı elementlerin (yani Au, Hf, Pd, Pt ve Zr elementleri katkısıyla) katkılanmaları ile dönüşüm sıcaklığı 100° C' nin üzerinde olan yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar elde edilebilir. Maalesef çoğu yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar çok zor üretilirler ve bilhasa sınırlı süreklilikleri veya zayıf yoğunlukları nedeniyle oda sıcaklığında üretimleri oldukça maliyetlidir. Bu yüzden bu elementlere alternatif olarak düşük maliyete sahip bakır (Cu) ve kobalt (Co) gibi elementlerin tercihi söz konusu olmuştur. Hali hazırda yalnız TiNiPd, TiNiPt, NiTiHf, NiTiZr ve CuAlMnNi alaşımları 100° C ile 300° C' de kullanışlı olmuş ve geri kalanı da önemli ticari uygulamalarda kullanılmıştır [36].

Alaşımların üretimiyle birlikte kaliteli olması önemlidir. Kaliteli bir şekil hatırlamalı alaşımda ilk aranacak özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Maksimum şekil değişikliği,
- Tamamıyla geri dönüşebilme özelliği,
- Maksimum çevrim sayısı,
- Maksimum dayanıklılık.

2.3.2. Manyetik Şekil Hatırlama Alaşımları

Manyetik şekil hatırlamalı alaşımlar, manyetik alan etkisine hızlı bir şekilde cevap verdikleri için oldukça fazla talep görürler. Geleneksel şekil hatırlamalı alaşımlardan farkı olarak sıcaklık, zor ve manyetik alanla şekil hatırlama etkisi gösterirler [37].

Ferromanyetik şekil hatırlamalı alaşımlara örnek olarak Ni-Mn-Ga, Co-Ni-Al, Ni-Mn-Al alaşımları verilebilir. Sıcaklık malzemenin manyetik özelliklerini etkileyebilir. Bir katının sıcaklığı artırıldığında katıdaki atomların termal titreşimleri artar ve termal titreşimler manyetik momentlerin rastgele yönelme eğilimini artırır ve böylece makroskobik boyutta alaşımlarda şekil değişimi gözlenebilir. Manyetik şekil hatırlamalı alaşımlar çok kırılgan, sert ve düşük sıcaklıkta çalıştırılabilirler, ancak zor şekil alırlar.

2.3.3. Şekil Hatırlamalı İnce Film Malzemesi

Şekil hatırlamalı ince filmler, fabrika üretim teknolojisinin ilerlemesinden sonra, mikro-makine materyalleri ya da mini aktivatörler olarak kullanılmaya başlanmıştır [38]. Ayrıca, mikro elektromekanik sistemlerin hızlıca gelişmesinde rol almışlardır.

2.3.4. Şekil Hatırlamalı Polimerler

Şekil hatırlamalı polimerler özellikle üretimde ve çeşitli değişik uygulamaların hızlı gelişiminde rol aldığı için daha çok tercih edilirler. Polimerik malzemelerde şekil hatırlama etkisi için üç temel çalışma mekanizması vardır: Çift-katı mekanizması, çift bileşikli malzeme ve kısmi dönüşüm mekanizması [39].

2.4. Şekil Hatırlamalı Alaşım Uygulamaları

2.4.1. Otomotiv Uygulamaları

Daha konforlu araçlar ve iyi performans için, otomotiv sektöründe kullanılan sensör ve aktivatörlerin sayısında artış gözlenmiştir. Gelişen araç sürüş teknolojileri, otomobil uygulamalarında şekil hatırlamalı elektromanyetik aktivatörlerin kullanımı için bir dizi fırsat sunmuştur [40]. Şekil hatırlamalı alaşımların arka görüş aynası, klima kontrolü, motor sıcaklık kontrollerinde uygulaması mevcuttur.

2.4.2. Havacılık Uygulamaları

1970' lerde F-14 savaş jetlerinde hidrolik çizgiler için şekil hatırlamalı alaşımların kullanılmasından günümüze kadar geçen zamanda bu alaşımlara yönelik temel amaç havacılık uygulamalarını daha fazla geliştirmek, geometrik uzay içerikleri ve yüksek dinamik alanlara tabi tutulmasını sağlamaktır [41,42]. Bunların birkaç örneği; aktivatörler, yapısal konektörler, titreşim damperleri, vakumlamalar, gelişme mekanizmaları, manüplatörler ve yol gösterici uygulamalardır [43-45].

2.4.3. Robotik Uygulamalar

1950' lerden beri, şekil hatırlamalı alaşımlar ticari robotik sistemlerde özellikle mikro aktivatörler ya da yapay kaslarda kullanılmıştır [46]. Şekil hatırlamalı alaşımların

robotik uygulamaları üzerine etkileri Furuya ve Shimada tarafından tanımlanmıştır [47].

2.4.4. Biyomedikal Uygulamaları

1962’ de Buehler ve diğerleri tarafından şekil hatırlama etkisinin keşfi sonrasında, dişlerde implant için bu malzemeler üretilip kullanılmaya başlamıştır. NiTi alaşımları paslanmaz çelikten pahalı olmasına rağmen, bu şekil hatırlamalı alaşımlar yüksek korozyon dirençlerinden dolayı biyomedikal uygulamalarda, manyetik olmayan yüzeylerde, fiziksel araçlarda, insan kemik ve dokularında kullanılabilirler ve insan vücudunun değişen sıcaklıklarında mükemmel uyum sergilerler [48,49]. Ayrıca ortopedide, kardiyolojide, implantlarda, gözlük cam ve çerçevelerinde uygulama alanları da mevcuttur.

3. SICAKLIKLARINA GÖRE POTANSİYEL YÜKSEK SICAKLIK ŞEKİL HATIRLAMALI ALAŞIMLAR

Yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımları martensitik dönüşüm sıcaklıklarına bağlı olarak üç gruba ayırabiliriz:

1. Grup: Martensit dönüşüm sıcaklığının 100° C-400° C aralığında olduğu alaşımlar,
2. Grup: Martensit dönüşüm sıcaklığının 400° C-700° C aralığında olduğu alaşımlar,
3. Grup: Martensit dönüşüm sıcaklığının 700° C' nin üzerinde olduğu alaşımlar.

Genel olarak austenit başlama dönüşüm sıcaklığı 120° C'nin üzerinde olan ve serbest zor altında herhangi bir termo mekaniksel davranış göstermeyen alaşımlara yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar denir [50].

3.1. 100° C - 400° C Arasındaki Karakteristik Dönüşüm Sıcaklığında Alaşımlar

Araştırmaların büyük bir çoğunluğu oda sıcaklığındaki şekil hatırlamalı alaşımlar üzerine yoğunlaşmıştır. 100° C - 400° C arasında dönüşüm sıcaklıklarına sahip yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar için çalışmalar yürütülmektedir. Bu aralıktaki dönüşüm sıcaklığına sahip birçok alaşımın var olmasından dolayı bu materyallerin işlenmesindeki benzerlik günümüz ticari alaşımların termo mekaniksel işlenmesine benzerdir. Bu alaşımların dönüşüm sıcaklık aralığı küçük olduğundan deneylerde kolaylık sağlar [51].

Bu aralıktaki yüksek sıcaklık alaşımlarına aşağıdaki gruplar örnek verilebilir:

1. Ti-Ni(Pd-Pt) sistemleri
2. Ti-Ni-Pd alaşımları
3. Ti-Ni-Pt alaşımları
4. Ni-Ti-Hf ve Ni-Ti-Zr alaşımları
5. Cu bazlı alaşımlar
6. Termoelastik olmayan Co bazlı yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar
7. Ni bazlı yüksek sıcaklıkta şekil hatırlamalı alaşımlar
8. Ni-Al sistemi
9. Ni-Mn alaşım sistemi

10. Zr bazlı intermetalik yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar

3.2. 400° C- 700° C arasındaki sıcaklıklarda alaşımların karakteristikleri

400° C-700° C sıcaklık arasında dönüşüm sıcaklıklarına sahip şekil hatırlamalı alaşımlar yakıt sistemleri ve uzay uygulamalarında kullanılırlar. Yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımların bir kaçı tanımlanmış olduğundan dolayı bunlar yarı kararlı faz temellidir. 400° C' nin üzerindeki sıcaklıklarda uzun süreli ısıtılma maruz bırakıldıklarında, bu alaşımlardan verim alınamaz. Bu sıcaklık aralığında bulunan bazı alaşımlar şöyledir:

1. Ti-Pd ve Ti-Au yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar
2. Termoelastik olmayan Co-Si yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar

3.3. 700 °C' de Dönüşüm Veren Yüksek Sıcaklık Şekil Hatırlamalı Alaşımlar

700° C' de dönüşüm veren yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar nadirdir. 1000° C' nin yukarısında bazı alaşım sistemleri şekil hatırlamalı davranış gösterebilir. Düşük sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımların aksine bu sıcaklık bölgesindeki birçok alaşımlardaki şekil hatırlama davranışı denge fazı üzerine kuruludur. Bu durum bu alaşımların kararlılığının mükemmel olduğunu göstermektedir.

Donkersloot, Pt bazlı yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar üzerine çalışmıştır ve ikili Ti-Pt alaşımlarında 1070° C' de oluşan martensit dönüşümleri keşfetmiştir [52]. Daha sonra Ti-Pd ve Ti- Au gibi yüksek dönüşüm sıcaklıklara sahip diğer alaşım sistemlerinin şekil hatırlama etkisi üzerine çalışılmıştır.

Yüksek sıcaklıklarda kullanılan alaşımların dizayn şartlarına bağlı olarak yeterli mukavemete sahip olması, kullanıldığı ortamın aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklı olması ve bunlara ilaveten yüksek sıcaklıklarda metalurjik veya yapısal değişikliklere karşı koyabilmesi için kararlı olması gereklidir. Bu tür alaşımlar yüksek sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi gereken alanlarda kullanılır. Genellikle, demir, nikel, kobalt ve kromun farklı kombinasyonlarında oluşturulurlar. En önemli özellikleri, 650° C' nin üzerindeki sıcaklıklarda mukavemetlerini korumaları, erozyon ve ısı korozyon dirençlerinin yüksek olmasıdır. Yüksek sıcaklıklarda oksijen yayılımı mukavemetlenen alaşımlar ve bazı kobalt alaşımları, nikel esaslı alaşımlar kadar dayanıklıdır. Demir

esaslı olanlar ve katı eriyik ile mukavemetlenen alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda mukavemeti en düşük olanıdır.

En etkili mukavemetlendirme mekanizması, katı çözelti içerisindeki intermetalik fazın çökeltilmesidir. Böylece, malzeme süper doymuş şartlara erişmiş olur. Bunun yanı sıra, yönlü olarak karıştırılan yumuşak matrisler içerisindeki fiberlerin homojen bir şekilde dağıtılmalarıyla elde edilen kompozitler hem yüksek mukavemet ve kararlılığa hem de yüksek sıcaklık çalışma şartlarına uygundur.

Sıcaklık arttıkça yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım sistemleri daha az kullanılabilir olmaktadır. 100° C -300° C sıcaklık aralığında, çeşitli alaşım sistemleri şekil hatırlamalı davranış özelliği gösterebilirler. Ti-Ni-Pd, Ti-Ni-Pt, Ni-Ti-Hf, Ni-Ti-Zr ve Cu-Al-Mn-Ni alaşımlar örnek olarak verilebilirler. Cu-Al-Mn-Ni ve Co-Ni-Ga\Al gibi bazı alaşımlar ise yüksek sıcaklıkta süper elastikiyet gösterirler.

Mevcut yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlara dayalı olarak, şu sonuca varılabilir: Bir martensitik birikime eşlik eden plastik deformasyonların çoğunlukla belirli kimyasal elementler eşliğinde ve malzemelerin işlenmesinde yer alması, çoğunlukla bununla alakalıdır. Yeni fonksiyonel materyallerin oluşturulmasına yönelik çoklu uygulamaları, yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlar için tüm uygulamaların çoklu bileşenleri ile oluşturulmaktadır. Yüksek entropili martensitik dönüşümler, yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir ve buna eşlik eden şekil hatırlama davranışı ile güçlü bir kazanım mevcut yüksek sıcaklıktaki şekil hatırlamalı alaşımlar sayesinde olmaktadır.

3.4. Yüksek Sıcaklık Şekil Hatırlamalı Alaşımların Potansiyel Uygulamaları

Biyomedikal alanlar haricinde, şekil hatırlamalı alaşımların kullanımını içeren çok sayıda uygulama alanları vardır [53]. Bu uygulamalarda kullanılan alaşımlardan bir kaç Ni-Ti ve Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşımlardır.

Katı aktivatörler gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında bu alaşım sistemlerinin kullanımlarının çoğu şekil hatırlama temellidir. Çünkü şekil hatırlamalı bir alaşım mekanik bir zorlanma ile sıcaklıktaki bir değişmeye tepki verebilir.

Genelde tek yönlü şekil hatırlama etkisi bir yükleme (bias) ile şekil hatırlamalı alaşım aktivatörleri için kullanılır. Küçük bir termal histerisiz birçok aktivatör

uygulamalarında da kritik öneme sahiptir.

Ticari yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlara yönelik ilgi artışı havacılık endüstrisinin ihtiyaçlarıyla bağlantılıdır. Yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı ince filmlerin süper elastik özelliklerinin eşsiz bir uygulaması da Orbital Resarch Şirketi tarafından geliştirilen bir basınç dönüştürücü için gerginlik ölçümüdür [54]. Bir genelleme ile yüksek sıcaklık dayanımları nedeniyle genellikle kimyasal ekipmanlar, uçak parçaları, petrokimya ekipmanları olarak kullanım alanlarına sahiptirler. Genel kullanım alanları olarak;

Motorlarda: Eksoz valfleri, turbo yükleyiciler, ısıtma ekipmanları, valfler ve contalar.

Uçaklarda: Diskler, civatalar, vanalar, şaftlar, muhafaza kapları, yanma odaları, pervane kanatları.

Metal işçiliğinde: Sıcak işleme kalıp- takımları ve döküm kalıplar.

Tıbbi uygulamalarda: Dişçilik ve protez ekipmanlarında.

Isıl işlem ve nükleer güç sistemlerinde: Tepsiler, karıştırıcılar, konveyör bantları, akış valfleri, yaylar, hareket mekanizmaları için kontrol çubukları.

Kimyasal ve petrokimya sanayisinde: Civatalar, valfler, borular, pompalar, reaksiyon kapları.

Uzay araçlarında: Aerodinamik araç zırhları ve roket motor parçaları verilebilir.

4. DENEYSEL İŞLEMLER

4.1. Alaşım Üretimi

Tablo 4.1.' de verilen bileşimler, %99,9 saflıktaki bakır (Cu), %99,9 saflıktaki alüminyum, %99,9 saflıktaki demir (Fe), %99,9 saflıktaki nikel (Ni), %99,9 saflıktaki mangan (Mn) ve %99,9 saflıktaki titanyum (Ti) tozları kullanılarak hazırlandı. Toz halde istenilen oranda hazırlanan $\text{Cu}_{82,7-x}\text{Al}_{13,2}\text{Fe}_{4,1+x}$ ($x=0-0,5-1$) ve $\text{Cu}_{80,5}\text{Al}_{13,2}\text{Fe}_{5,1-X_{1,2}}$ ($X=\text{Ti-Ni-Mn}$) şekil hatırlamalı alaşımlar basınç altında pelet haline getirildi. Pelet haline getirilen alaşımlar, ark eritme fırınında da birkaç kez eritilerek ingot şekline getirildi. Elde edilen alaşımlar 900 °C' de 24 saat bekletilip tuzlu-buzlu suda ani soğutularak üretim aşaması gerçekleşmiş oldu.

Tablo 4.1. Üretilen şekil hatırlamalı alaşımların ağırlıkça yüzdeleri ve elektron konsantrasyonları (e/a) değerleri.

Numune Kodu	Cu %ağ.	Al %ağ.	Fe %ağ.	Ni %ağ.	Ti %ağ.	Mn %ağ.	e/a
CAF-1	82,7	13,2	4,1	-----	-----	-----	1,64
CAF-2	82,2	13,2	4,6	-----	-----	-----	1,66
CAF-3	81,7	13,2	5,1	-----	-----	-----	1,67
CAF-Ni	80,5	13,2	5,1	1,2	-----	-----	1,68
CAF-Ti	80,5	13,2	5,1	-----	1,2	-----	1,76
CAF-Mn	80,5	13,2	5,1	-----	-----	1,2	1,63

4.2. Kimyasal Analiz (EDX analizi)

Homojenleştirilen alaşımlardan birer parça kesilerek EDX ölçümleri yapıldı. EDX ölçümleri taramalı elektron mikroskobuna (SEM) bağlı EDX ölçüm cihazı ile yapılmıştır. EDX sonuçları ağırlıkça ve atomikçe yüzde olarak Tablo 4.2' de verilmiştir.

Tablo 4.2. EDX kimyasal analiz ölçüm sonuçları

Numune	Cu	Al	Fe	Ni	Ti	Mn	Cu	Al	Fe	Ni	Ti	Mn
	Ağırlıkça %						Atomikçe %					
CAF-1	85,6	9,7	4,7	-----	-----	-----	75,3	20	4,7	-----	-----	-----
CAF-2	86,4	9,1	4,5	-----	-----	-----	75,5	18,9	4,5	-----	-----	-----
CAF-3	84,7	12,0	3,3	-----	-----	-----	72,5	24,3	3,2	-----	-----	-----
CAF-Ni	83,5	10,7	5,3	0,5	-----	-----	72,5	21,9	5,2	0,5	-----	-----
CAF-Ti	84,7	12,3	2,5	-----	0,4	-----	72,3	24,8	2,4	-----	0,5	-----
CAFMn	84,7	11,5	2,6	-----	-----	1,2	72,9	23,4	2,5	-----	-----	1,2

4.3. Termal Analiz

Termal analiz ölçümleri iki aşamalı gerçekleşmiştir: Birinci aşamada, alaşımların martensit-austenit faz dönüşüm sıcaklıkları diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile 20 °C/dak ısıtma-soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde gerçekleşmiştir.

İkinci aşamada yapılan DSC ölçümleri ise, alaşımların dönüşüm esnasında harcadığı enerji olan aktivasyon enerjisi hesabı için yapıldı. Aktivasyon enerjisi hesapları için alaşımların DSC ölçümleri 10, 20, 30 ve 40 °C/dak ısıtma ve soğutma hızıyla azot gazı atmosferinde gerçekleştirildi. Aktivasyon enerjisi hesapları için Kissinger yöntemi kullanıldı.

Şekil hatırlamalı alaşımlarda katı faz dönüşümü için John-Mehl-Avrami (JMA) denklemi kullanılır. JMA denklemi izotermal olmayan durumda uygulanır. Numunelerin aktivasyon enerjisini bulmada iki farklı yöntem kullanılabilir: Bunlardan biri Kissinger diğeri ise Ozawa yöntemidir.

JMA denklemine göre, X , reaksiyon hızının belli bir t zaman sonraki oranıdır.

$$X = 1 - \exp\left[-(Kt)^n\right] \quad (4.1)$$

Bu denklemde n ; avrami sabiti, K etkin reaksiyon hızı değeridir. Bu denkleme göre,

$$K = K_0 \exp(-E / RT) \quad (4.2)$$

Kissinger ve Ozawa yöntemi Arrhenius denkleminin çözümüdür. Aktivasyon enerjisi değeri Kissinger ve Ozawa' ya göre sırasıyla aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$\ln(\beta / T^2) = A - E / RT \quad (4.3)$$

$$\log \beta = B - E / RT \quad (4.4)$$

Burada β ısıtma hızıdır. E, aktivasyon enerjisi ve R ise ideal gaz sabiti değeridir [55].

4.4. X-ışınları Analizi

Değişik elektron konsantrasyonlarına sahip, CuAlFe-X (X=Ni, Ti, Mn) şekil hatırlamalı alaşımlarını kristal yapı analizi, Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü x-ışını difraktometresi ile CuK_α ($\lambda=1,54 \times 10^{-10}$ m) radyasyonu kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler 20° ile 80° aralığında $2^\circ/\text{dak}$ sabit tarama hızıyla gerçekleştirilmiştir.

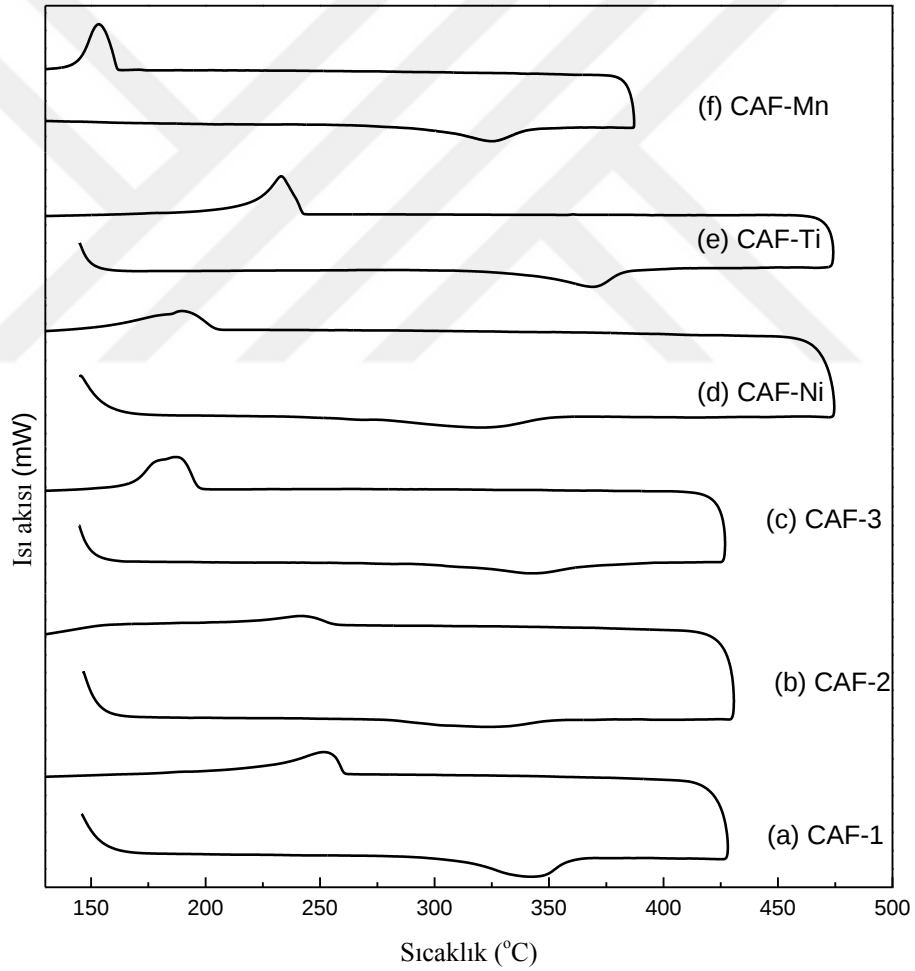
4.5. Metalografik Gözlemler

CuAlFe-X (X=Ni,Ti, Mn) şekil hatırlamalı alaşımlarının optik mikroskop ölçümlerinin yapılabilmesi için polyester reçine ile soğuk kalıplama yapıldı. Soğuk kalıplama yapılan alaşımlar ipek ve kadife çuha ile parlatma işleminden sonra 50 ml HCl, 10 CuSO_4 ve 50 ml saf su ile hazırlanan çözelti ile kimyasal dağlama yapıldı. Bu şekilde hazırlanan alaşımların yüzey analizi ölçümleri JSM7001F marka SEM cihazı ile alındı.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Diferansiyel taramalı Kalorimetre (DSC) ölçümleri sonuçları

Şekil 5.1.a'da elektron konsantrasyonu değeri 1,66 olan CuAlFe şekil hatırlama alaşımının ısıtma soğutma boyunca sıcaklığa bağlı faz değişimini gösteren DSC eğrisi görülmektedir. Bu ölçümden elde edilen austenit, martensit dönüşüm sıcaklıkları değerleri ve ısıtma ve soğutma anındaki entalpi değişimi değerleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablo ve grafikten görüldüğü gibi Cu-Al-Fe (CAF-1) alaşımının yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım özelliği gösterdiği söylenebilir.



Şekil 5.1. a) CAF-1, b) CAF-2, c) CAF-3, d) CAF-Ni, e) CAF-Ti, f) CAF-Mn alaşımının 20 °C/dak ısıtma hızıyla alınan DSC eğrisi

Değişik kimyasal konsantrasyonda ve değişik elektron konsantrasyonu değerinde, Cu-Al-Fe (CAF-2) şekil hatırlamalı alaşımın dönüşüm sıcaklığını gösteren DSC eğriside Şekil 5.1.b’de görülmektedir. Burada da alaşımın austenit dönüşüm sıcaklığı değeri 200 °C nin üzerindedir (Tablo 5.1). Bu nedenle, yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım özelliği gösterir. CAF-1 alaşımıyla kıyaslanınca elektron konsantrasyonun değerinin %2 lik bir artışı dönüşüm sıcaklığı değerini düşürmüştür. Dönüşüm sıcaklığı ile birlikte entalpi değişimi değerinin de düştüğü görülmektedir.

Farklı elektron konsantrasyonunda ve farklı kimyasal oranda Cu-Al-Fe (CAF-3) şekil hatırlamalı alaşımın dönüşüm sıcaklığı değerleri ve entalpi değişimini veren DSC eğrisinde, Elektron konsantrasyon değeri artmaya devam etmesine rağmen dönüşüm sıcaklığı CAF-2 alaşımına göre artarken, CAF-1 alaşımına göre azalmıştır. Entalpi değişimi değeri ise CAF-1 alaşımının entalpi değerine daha yakındır.

Cu-Al-Fe-Ni (CAF-Ni) şekil hatırlamalı alaşımı, Cu-Al-Fe alaşımına ağırlıkça % 1,2 oranında nikel elementi katkılanarak elektron konsantrasyon değeri (e/a) değeri arttırılmaya devam edilmiştir. Şekil 5.1.d’de Cu-Al-Fe-Ni dörtlü şekil hatırlamalı alaşımın austenit ve martensit faz dönüşüm sıcaklığı veren DSC eğrisi görülmektedir. Austenit başlama sıcaklığı değerinin CAF-1,CAF-2 ve CAF-3 alaşımına göre azaldığı görüldü. Martensit başlama sıcaklığının ise CAF-1 ve CAF-2 alaşımına göre azalırken, CAF-3 alaşımına göre arttığı görülmüştür.

Şekil 5.1.e’de, Cu-Al-Fe-Ti (CAF-Ti), Cu-Al-Fe alaşımına %1,2 Ti katkılanarak elde edilen şekil hatırlamalı alaşımın dönüşüm sıcaklığı eğrisi, Tablo 5.1’de ise dönüşüm sıcaklıkları değeri ve dönüşüm esnasındaki entalpi değişimi görülmektedir. Bu alaşımın, austenit-martensit dönüşüm sıcaklıkları değerine göre yüksek sıcaklık şekil hatırlama özelliği gösterdiği söylenebilir. En yüksek austenit başlama dönüşüm sıcaklığı değeri ve entalpi değişimi değeri CAF-Ti alaşımında görülmektedir. CAF-1, CAF-2, CAF-3 ve CAF-Ni alaşımına göre CAF-Ti alaşımının elektron konsantrasyonu değeri diğerlerinde %8 daha fazladır. Dönüşüm sıcaklığının yüksek olma nedenlerinden birinin yüksek bir e/a değeri olması söylenebilir.

CAF-1, CAF-2, CAF-3 ve CAF-Ni ve CAF-Ti alaşımlarının dönüşüm sıcaklıkları değeri kendi aralarında kıyaslanırsa, elektron konsantrasyonu ile birlikte, farklı elementlerin kullanılmasının da CuAlFe şekil hatırlamalı alaşımın dönüşüm sıcaklığı değerlerini değiştirmede baskın bir etki olduğu söylenebilir. CAF-1,CAF-2 ve

CAF-3 üçlü alaşımlarında, bakır oranları azaltılırken femir oranları arttırılmıştır. Dönüşüm sıcaklığı değerlerinin azaldığı görülmüştür. Ancak bu azalma oranı lineer değildir.

Tablo 5.1. Üretilen alaşımların dönüşüm sıcaklıkları ve entalpi değişimi değerleri

Numune	A _s	A _p	A _f	M _s	M _p	M _f	ΔH(J/g)	ΔH (J/g)
	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	Isıtma	Soğutma
CAF-1	310,1	342,1	359,0	261,0	252,6	223,7	7,97	-6,92
CAF-2	278,7	322,0	354,8	256,6	242,0	214,8	4,50	-2,77
CAF-3	298,8	342,9	364,1	195,6	187,5	167,5	8,01	-9,51
CAF-Ni	267,9	320,5	351,2	204,6	190,4	154,1	5,83	-6,09
CAF-Ti	317,1	368,6	383,2	243,4	233,3	210,5	11,0	-11,4
CAF-Mn	276,1	325,2	342,7	161,6	153,6	143,5	7,99	-8,38

CAF-Ni ve CAF-Ti alaşımları, CuAlFe alaşımına Ni ve Ti elementleri katkılanarak dördümlü şekil hatırlamalı alaşımlar üretilmiştir. Nikel katılan alaşımın dönüşüm sıcaklığı değeri, CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 ile kıyaslandığında azalmaya devam ederken, titanyum katkılanan CAF-Ti alaşımında dönüşüm sıcaklığının arttığı görülmüştür. Bu alaşımlarda elektron konsantrasyonundan ziyade, nikel ve titanyum'un alaşım içindeki atomik yerleşim düzeni önemli olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5.1.f'de CuAlFe-Mn dördümlü alaşımının (CAF-Mn) 20 °C/dak ısıtma hızıyla alınan DSC eğrisi görülmektedir. Dönüşüm sıcaklıkları sonuçları ise Tablo 5.1'de verilmiştir. Sonuçlara göre elektron konsantrasyonu değeri arttığı halde, dönüşüm sıcaklıkları değerlerinde ciddi bir azalma olmuştur. Buradaki azalma, nikel elementi katkısının (CAF-Ni alaşımı), mangan elementi katkısından daha etkili olduğu tablodan açıkça görülmektedir. Austenit başlama sıcaklığı CAF-Ni alaşımında CAF-Mn alaşımına göre, daha düşüktür. Ancak, martensit dönüşüm başlama sıcaklığı CAF-Mn alaşımında, CAF-Ni alaşımına göre daha düşüktür.

CAF-1,CAF-2 ve CAF-3 şekil hatırlamalı alaşımları Cu, Al ve Fe elementinden oluşmuştur. S. Yang ve arkadaşları da CuAlFe şekil hatırlamalı alaşımlarını çalışmışlardır. Fe oranını %5'lik ağırlıkça oranda sabit tutup, Al oranını artırırken, Cu

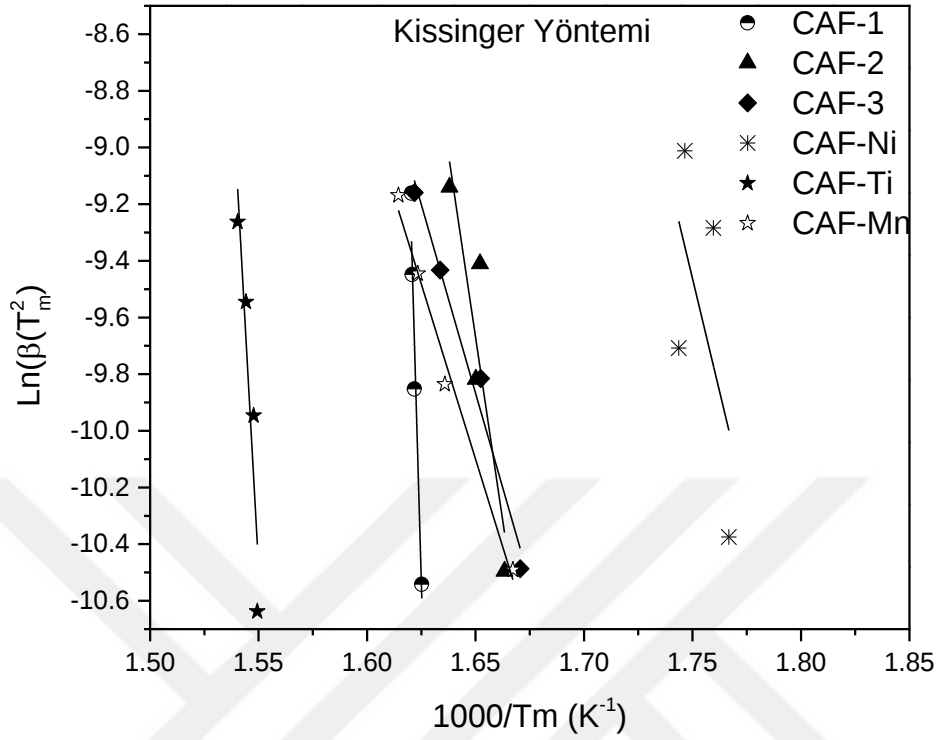
oranını azaltmışlardır. Bütün alaşımlar için dönüşüm sıcaklıkları değerinin, 500 °C civarında olduğunu bulmuşlardır[56]. Bu çalışmada bulunan dönüşüm sıcaklıkları değeri yaklaşık 280 °C civarındadır. Raju ve arkadaşı da CuAlFe şekil hatırlamalı alaşımlar üzerine araştırma yapmışlardır. Değişik oranlarda ürettikleri alaşımların dönüşüm sıcaklıkları değeri 200 ile 500 °C aralığında değişmektedir. Bu çalışma kapsamında alaşım içindeki ufak miktarda değişimler dönüşüm sıcaklığında ciddi değişimlere neden olmuştur [57]. Bu sonuçlar, yaptığımız çalışmayla uyum içindedir. Bu çalışmada, CuAlFe alaşımı kendi arasında veya değişik element katkılanarak oluşturulan elemente değişim dönüşüm sıcaklıklarında belirgin değişimlere neden olmuştur.

5.2. Aktivasyon Enerjisi Sonuçları

Şekil 5.2. ve Şekil 5.3. de, CAF-1, CAF-2, CAF-3, CAF-Ni, CAF-Ti ve CAF-Mn şekil hatırlamalı alaşımların aktivasyon enerjisi hesabı için gerekli olan denklem 4.3 ve denklem 4.4. e bağlı eğriler görülmektedir. Bu eğrilerden hesaplanan aktivasyon enerji değerleri Tablo 5.2’de verilmiştir.

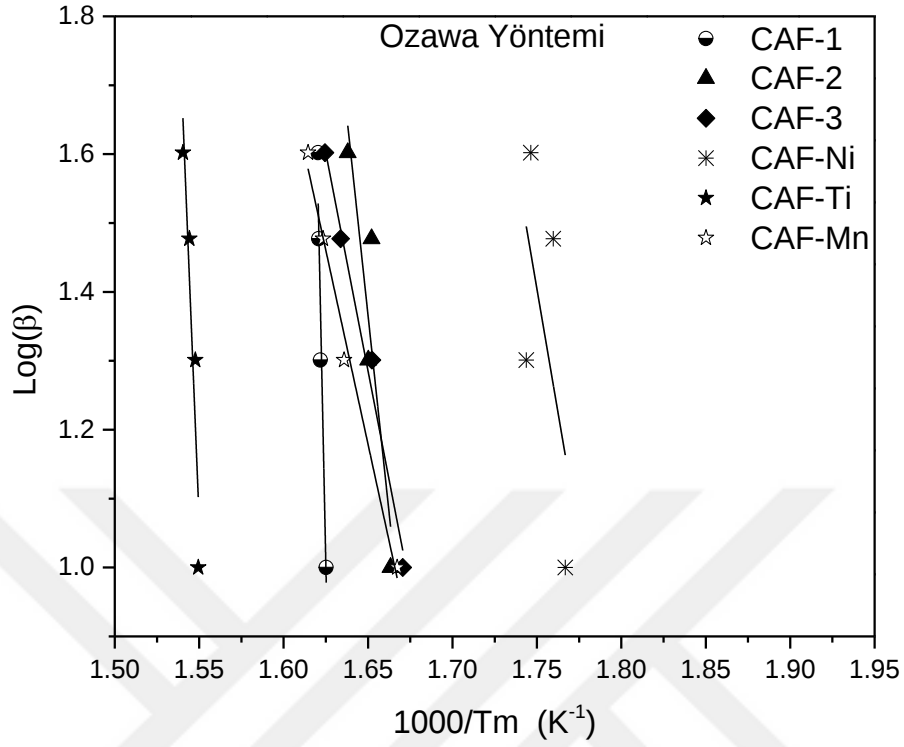
Tablo 5.2. CuAlFe-X alaşımlarının Kissinger ve Ozawa yöntemiyle hesaplanan aktivasyon enerjileri değerleri.

Numune Kodu	E _a (Kissinger) (kJ/mol)	E _a (Ozawa) (kJ/mol)
CAF-1	2211,8	2212,5
CAF-2	429,6	418,0
CAF-3	221,4	230,4
CAF-Ni	265,6	261,6
CAF-Ti	1150,1	1103,6
CAF-Ni	204,9	205,5



Şekil 5.2. CuAlFe-X alaşım gruplarının Kissinger yöntemi ile aktivasyon enerjisi hesaplamak için elde edilen eğriler

Tablo 5.2' ye göre, en yüksek aktivasyon enerjisi değeri en düşük elektron konsantrasyonu değerine sahip Cu-Al-Fe alaşımında (CAF-1 alaşımı) görülmektedir. Elektron konsantrasyonu artıkça aktivasyon enerjisi değerinde ciddi bir azalma meydana gelmiştir. Ancak, titanyum elementi katkılı CAF-Ni alaşımı diğer alaşımlardan farklıdır. Aktivasyon enerjisi değeri CAF-1 den küçük olmasına rağmen diğerlerinden çok büyüktür. Bunun alaşım içindeki titanyum elementinden kaynaklandığını söyleyebiliriz.



Şekil 5.3. CuAlFe-X alaşım gruplarının Ozawa yöntemi ile aktivasyon enerjisi hesaplamak için elde edilen eğriler

5.3. X-Işınlari Ölçüm Sonuçları

Farklı atomik kompozisyonlara sahip üçlü Cu-Al Fe ve dördü Cu-Al-Fe-X (X; Ni, Ti ve Mn) yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım sistemlerinin kristalografik özellikleri $2\theta=10-80^\circ$ aralığında XRD desenlerinin alınmasıyla incelendi. Şekil 5.4-(a-f)'de sırasıyla CAF-1, CAF-2, CAF-3, CAF-Ni, CAF-Ti ve CAF-Mn alaşım numunelerinin oda sıcaklığındaki XRD desenleri gösterilmektedir. Öncelikle Şekil 5.4-(a-c)'de gösterilen üçlü bileşene sahip CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 numunelerinin XRD desenleri incelendiğinde, numunelerin genel olarak hem kristalografik özelliklerinin hem de faz bileşenlerinin benzer oldukları ve farklı e/a oranlarının üçlü Cu-Al-Fe şekil hatırlamalı alaşımının yapısal özellikleri üzerinde belirgin bir değişiklik meydana getirmediği görülmektedir. Şekil 5.4-(a-c)'deki alaşım numunelerine ait XRD desenlerinin hepsinde de temel olarak 4 farklı faz grubuna ait karakteristik difraksiyon pikleri vardır: Ana martensite faz (3,4,5,6,8 ve 9 nolu pikler), Cu(Al,Fe) çökelti fazı (1

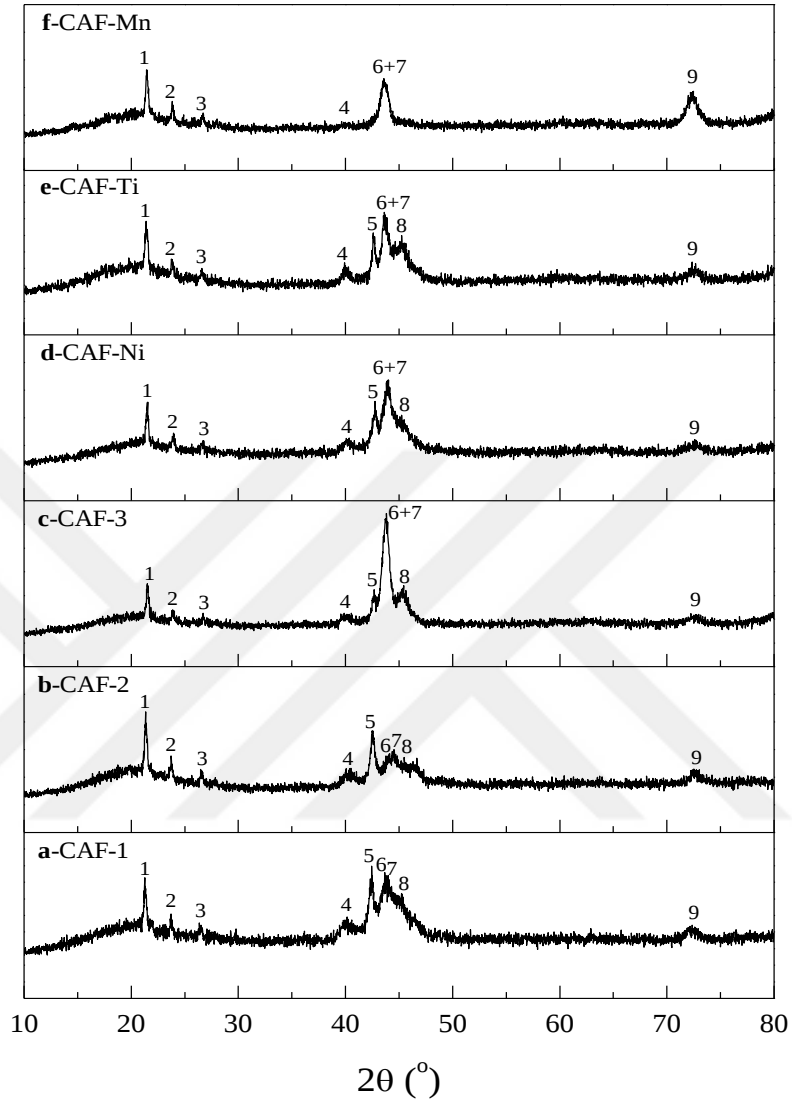
nolu pik), Cu_9Al_4 çökelti fazı (2 nolu pik) ve $\text{Fe}(\text{Al,Cu})$ çökelti fazı (7 nolu pik) dır. Bu ilgili fazların XRD spektrumlarındaki 20 konumlarına göre tanımlanmalarında literatürdeki çalışmalardan yararlanılmıştır [58-63] ve fazların kimyasal bileşenleri de ileride bahsedilecek olan EDX spektrumlarından elde edilmiştir.

CAF-1 numunesinin Şekil 5.4-(a)'daki XRD deseni tipik 18R martensit fazına ait difraksiyon pikleri ile birlikte $2\theta \approx 21,5^\circ$ 'de gözlenen $\text{Cu}(\text{Al,Fe})$ çökelti fazına ait difraksiyon piki, $2\theta \approx 23,5^\circ$ açısında gözlenen Cu_9Al_4 çökelti fazına ait difraksiyon piki ve $2\theta \approx 43,5^\circ$ açısında martensite faza ait pik ile çok yakın gözlenen $\text{Fe}(\text{Al,Cu})$ çökelti fazına ait difraksiyon pikini ihtiva etmektedir. Şekil 5.4-(b-c)'deki CAF-2 ve CAF-3 numunelerinin XRD desenleri sırasıyla incelendiğinde ise; artan e/a oranları ile Cu-Al-Fe alaşımlarının çökelti bileşenlerinin değişmediği, fakat $2\theta \approx 42,4^\circ$ 'deki 18R ana martensit fazına ait (0018) indisli pikin (5 nolu pik) şiddetinin oldukça azaldığı ve CAF-3 numunesinde $2\theta \approx 43,5^\circ$ açısında $\text{Fe}(\text{Al,Cu})$ çökelti fazına ait pik ile (12-8) indisli martensit faza ait pikin (6 ve 7 nolu pikler) üst üste bindikleri görülmektedir. Buradan şu sonuca varılabilmektedir: artan e/a oranları ile üçlü Cu-Al-Fe yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlarının içerisindeki ana martensit yönelim değişmiştir ve de aynı zamanda artan Fe oranıyla (%ağ. 5,1) mikroyapı içerisindeki $\text{Fe}(\text{Al,Cu})$ çökelti fazının miktarı da artmıştır.

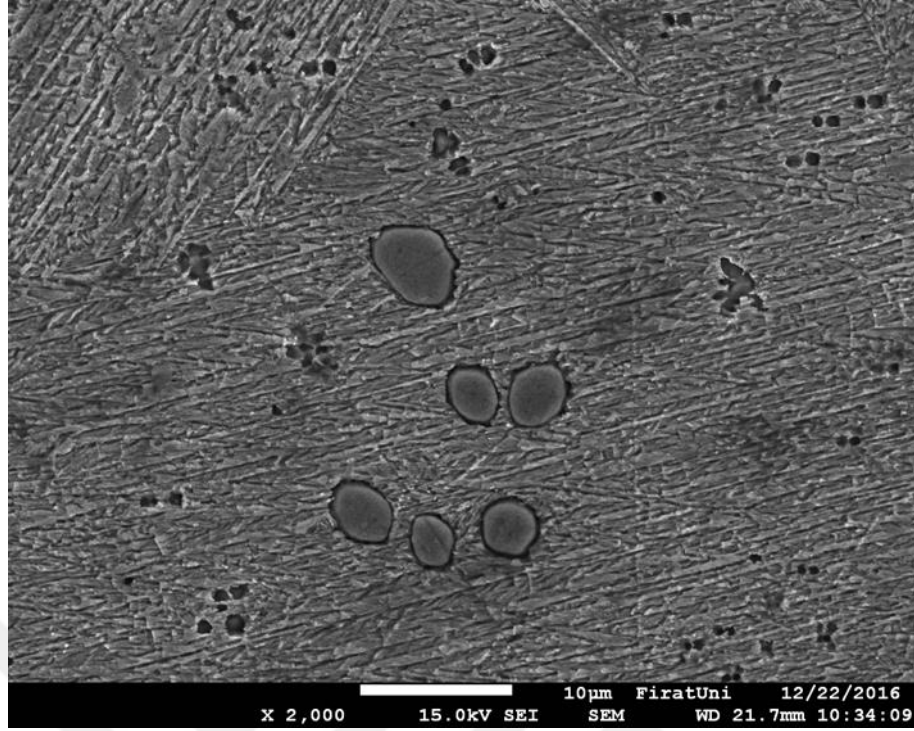
Üçlü Cu-Al-Fe yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlarında Al ve Fe oranlarının sabit tutulup %ağ. 1,2 oranlarında Ni, Ti ve Mn elementlerinin ilave edilmesiyle elde edilen dörtlü CAF-Ni, CAF-Ti ve CAF-Mn alaşım numunelerinin XRD desenleri sırasıyla Şekil 5.4-(d-f)'de gösterilmektedir. XRD desenlerinden farklı dördüncü element ilavesinin Cu-Al-Fe alaşımlarının hem kristalografik hem de bazı yapısal özelliklerinde değişikliklere neden olduğu görülmektedir. Ni ve Mn elementlerinin ilave edildiği CAF-Ni ve CAF-Mn alaşım numuneleri yapısal olarak sırasıyla 18R martensit+Cu (Al,Fe)-Ni çökelti fazı+ Cu_9Al_4 çökelti fazı+ $\text{Fe}(\text{Al,Cu})$ -Ni çökelti fazı ve 18R martensit+Cu (Al,Fe)-Mn çökelti fazı+ Cu_9Al_4 çökelti fazı+ $\text{Fe}(\text{Al,Cu})$ -Mn çökelti fazı bileşenlerinden oluşurken, Ti ilave edilen CAF-Ti alaşım numunesi ise 18R martensit+Cu (Al,Fe)-Ti çökelti fazı+ Cu_9Al_4 çökelti fazı+X-faz çökelti fazı bileşenlerinden oluşmaktadır. Elde edilen sonuçlardan da görülebileceği gibi, Ti ilavesi ile Cu-Al-Fe alaşımlarının mikroyapısında farklı bir çökelti fazı oluşmuştur. Genel olarak, Cu-Al-Ni şekil hatırlamalı alaşımlarının zayıf olan mekanik özelliklerini iyileştirmek

için, bu alaşım grubuna yaklaşık 1% oranında Ti elementi ilave edilmektedir ve böylece de β fazının tane boyutunun 100 μm 'nin altına düşürölmesi amaçlanmaktadır. Ti ilavesi ile alaşım içerisinde ısııl işlem sonrası tane büyümesini kontrol eden ikincil faz çökeltileri oluşmaktadır. Ti'nin oluşturduğu bu çökeltiler, zamanında kimyasal bileşimi ve kristal yapısı bilinmediği için o şekilde tanımlanan *X*-faz ökeltileridir. $(\text{Cu,Ni})_2\text{TiAl}$ kompozisyonuna ve düzenli kübik Huesler yapısına ($L2_1$) sahip olan *X*-faz çökeltileri genelde boyut ve şekillerine göre sınıflandırılmaktadırlar [61,64,65].





Şekil 5.4-(a-f) Üçlü bileşene sahip CAF-1, CAF-2, CAF-3 ve dörtlü bileşene sahip CAF-Ni, CAF-Ti ve CAF-Mn alaşım numunelerinin oda sıcaklığında alınan XRD desenleri (CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 numuneleri için 1 nolu pikler $\text{Cu}(\text{Al,Fe})$, 2 nolu pikler Cu_9Al_4 , 3,4,5,6,8 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pikler $\text{Fe}(\text{Al,Cu})$ fazlarını temsil etmektedir. CAF-Ni numunesi için 1 nolu pik $\text{Cu}(\text{Al,Fe})\text{-Ni}$, 2 nolu pik Cu_9Al_4 , 3,4,5,6,8 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pik $\text{Fe}(\text{Al,Cu})\text{-Ni}$ fazlarını, CAF-Ti numunesi için 1 nolu pik $\text{Cu}(\text{Al,Fe})\text{-Ti}$, 2 nolu pik Cu_9Al_4 , 3,4,5,6,8 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pik X -fazını, CAF-Mn numunesi için 1 nolu pik $\text{Cu}(\text{Al,Fe})\text{-Mn}$, 2 nolu pik Cu_9Al_4 , 3,4,6 ve 9 nolu pikler martensit ve 7 nolu pik $\text{Fe}(\text{Al,Cu})\text{-Mn}$ fazlarını temsil etmektedir).

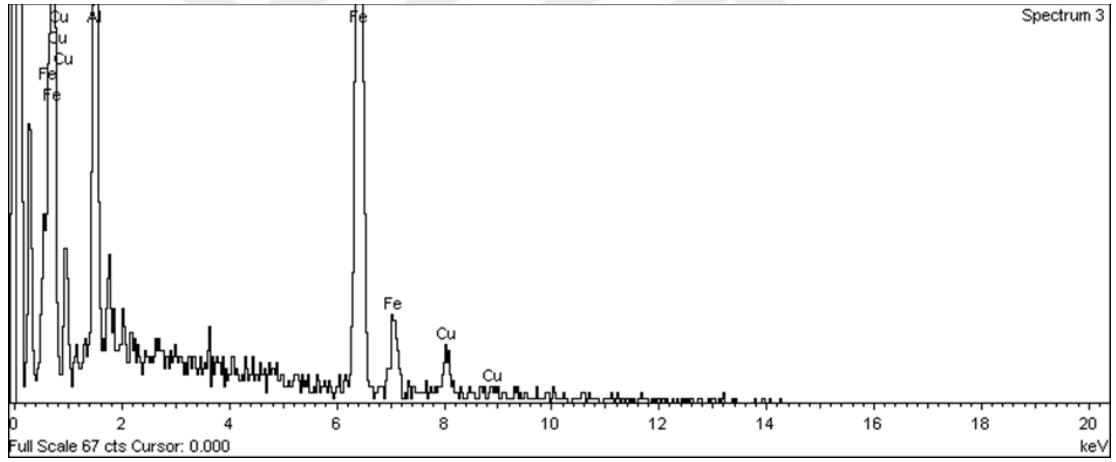
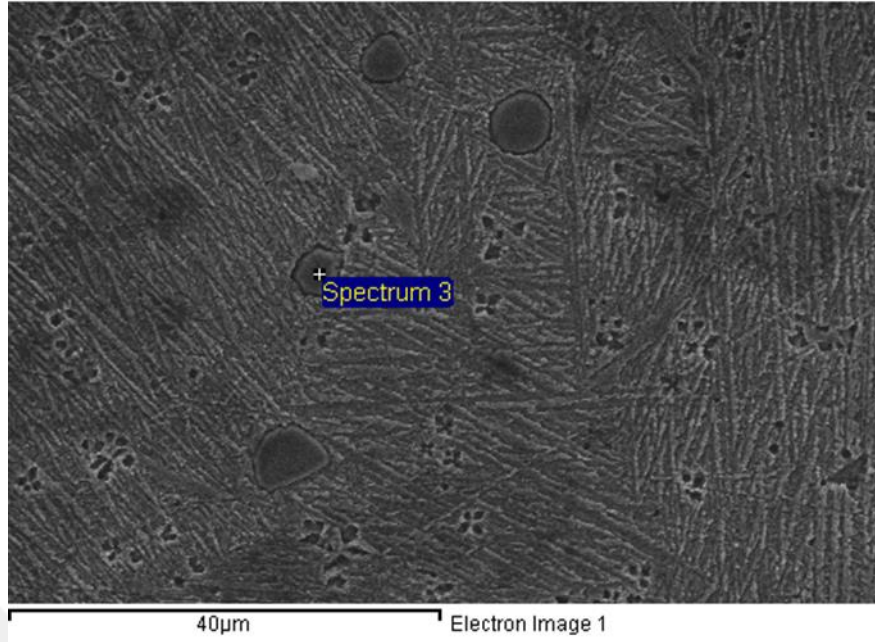


Şekil 5.5. CAF-1 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.

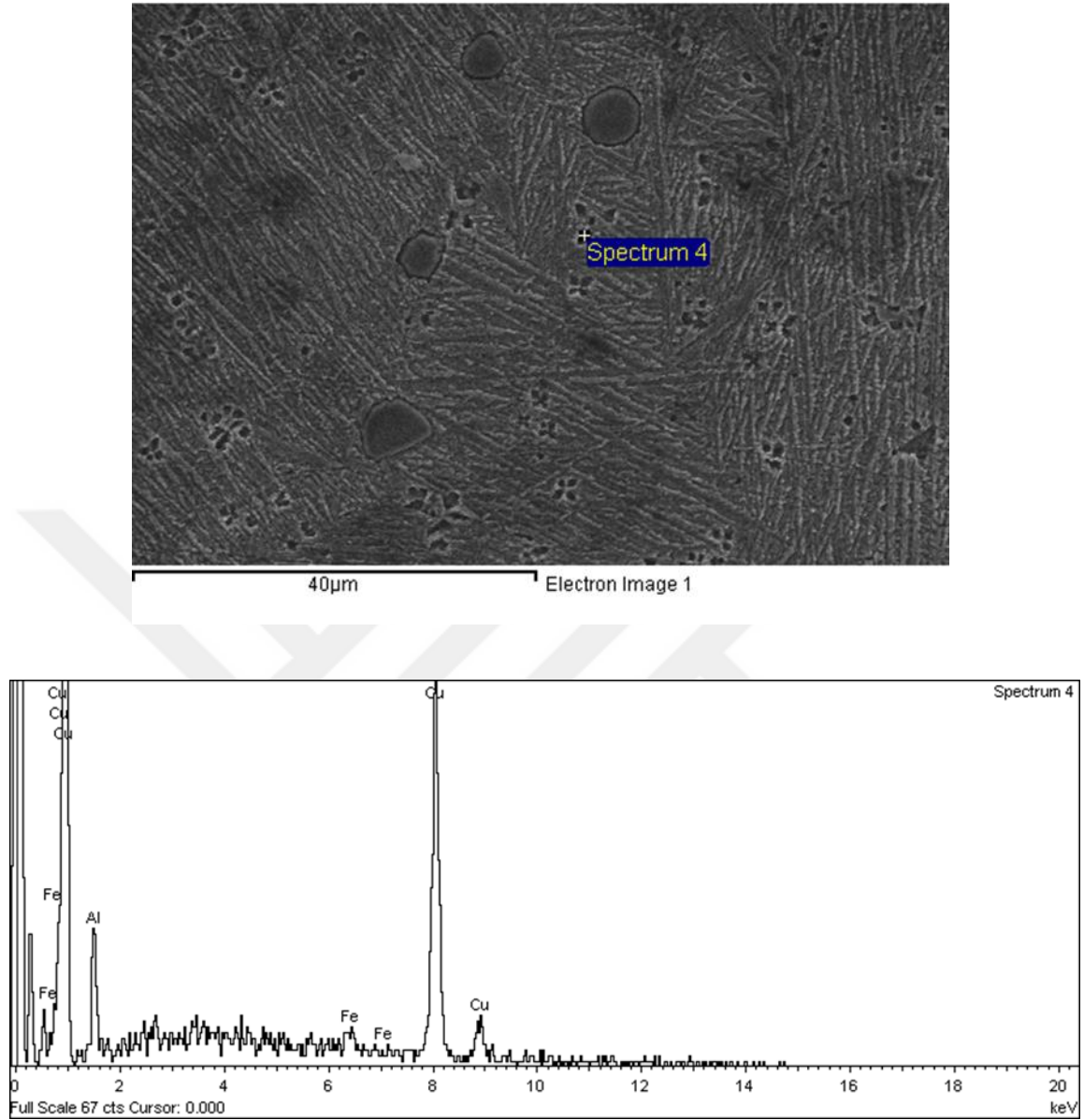
Üçlü CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 ve dörtlü CAF-Ni, CAF-Ti ve CAF-Mn alaşım numunelerinin yüzey morfolojileri SEM ve yüzey mikroyapılarındaki farklı fazların kimyasal analizleri ise EDX spektrumlarının alınmasıyla gerçekleştirildi. Şekil 5.5’de CAF-1 numunesinin yüzeyinin SEM görüntüsü gösterilmektedir. Şekil 5.5’deki SEM görüntüsü, CAF-1 numunesinin oda sıcaklığında martensit fazda olduğunu ve numunenin mikroyapısındaki martensit varyantların morfolojik yapısının da 18R yapısı olan β'_1 fazını temsil eden ince martensit varyantlardan oluştuğunu göstermektedir. SEM görüntüsünde farklı bir martensit fazı tanımlayan varyant morfolojisine rastlanmamıştır. Ayrıca, CAF-1 numunesinin mikroyapısının farklı boyut ve morfolojilere sahip çok sayıda çökelti fazı içerdiği Şekil 5.5’den net bir şekilde görülebilmektedir. Bununla birlikte, Şekil 5.5’deki SEM görüntüsü dikkatlice incelendiğinde CAF-1 numunesinin mikroyapısının oldukça ilginç morfolojik özellikler sergilediği görülmektedir. CAF-1 numunesinin mikroyapısı çok sayıda mikro boyutlu boşluklar içermektedir ve bazı alanlarda çökelti fazları bu mikro boşlukların içerisinde yer almaktadırlar. Bu çökelti fazlarının kimyasal analizleri uygun alanlardan EDX spektrumlarının alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6-(a-b)’de CAF-1 numunesi mikroyapısında yer alan bir çökeltiden alınan SEM görüntüsü ve EDX spektrumu

gösterilmektedir. Büyük boyutlu çökeltiden alınan EDX spektrumuna göre; CAF-1 numunesindeki bu çökelti fazının kimyasal bileşimi atomik olarak %68,11 Fe, %21,54 Al ve %10,34 Cu elementlerini içermektedir ve buradan da bu çökeltinin Fe(Al,Cu) çökeltisi olduğu anlaşılmaktadır. CAF-1 numunesinin mikroyapısında bulunan farklı bir çökelti fazına ait SEM görüntüsü ve ilgili EDX spektrumu Şekil 5.7-(a-b)'de verilmektedir. Alınan EDX spektrumundan bu çökeltinin kimyasal bileşiminin atomik olarak %79,58 Cu, %16,48 Al ve %3,94 Fe elementlerinden oluşan Cu_9Al_4 çökelti fazı olduğu belirlenmiştir. Son olarak Şekil 5.8-(a-b), CAF-1 numunesi içerisinde yer alan farklı bir çökelti fazının SEM görüntüsü ve EDX spektrumudur. EDX analiz sonucu, incelenen bu çökeltinin atomik olarak %70,53 Cu, %15,59 Al ve %13,88 Fe elementlerini ihtiva eden Cu(Al,Fe) çökelti fazı olduğunu ortaya koymuştur. Sonuç olarak, CAF-1 alaşım numunesi için elde edilen EDX sonuçların Şekil 5.4-a' daki XRD sonuçları ile uyum içerisinde oldukları görülmektedir.

Şekil 5.9., CAF-2 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsüdür. CAF-2 numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde, CAF-1 numunesi ile benzer morfolojik özellikler sergilediği görülmektedir. CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısı, ince martensit varyant morfolojisine sahip 18R ana martensit fazı ile farklı boyutlara sahip çökelti fazlarından oluşmaktadır. Benzer şekilde CAF-2 numunesinin mikroyapısında yer alan büyük boyutlu çökelti fazları da CAF-1 numunesindeki gibi boşlukların içerisinde yer almaktadırlar. CAF-2 numunesi içerisindeki çökelti fazlarının kimyasal analizleri için alınan EDX spektrumları, spektrumların alındıkları bölgeler ile beraber Şekil 5.11, 12 ve 13'de gösterilmektedir. Şekil 5.10-a'daki SEM görüntüsündeki büyük boyutlu çökeltiden alınan EDX spektrumu (Şekil 5.10-b), incelen çökeltinin atomik olarak %63,85 Fe, %21,6 Al ve %14,55 Cu bileşen oranlarına sahip Fe(Al,Cu) çökelti fazı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 5.11-(a-b)' de gösterilen SEM görüntüsü ve EDX spektrumundan, incelen bölgedeki çökelti fazının atomik olarak %78,24 Cu, %19,47 Al ve %2,29 Fe element oranları ile Cu_9Al_4 çökelti fazı olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.12-(a-b)' deki SEM görüntüsü ve EDX spektrumundan da, analizi gerçekleştirilen çökelti fazının atomik olarak %63,47 Cu, %21,57 Al ve %14,96 Fe bileşen oranlarına sahip Cu(Al,Fe) çökelti fazı olduğu tespit edilmiştir.



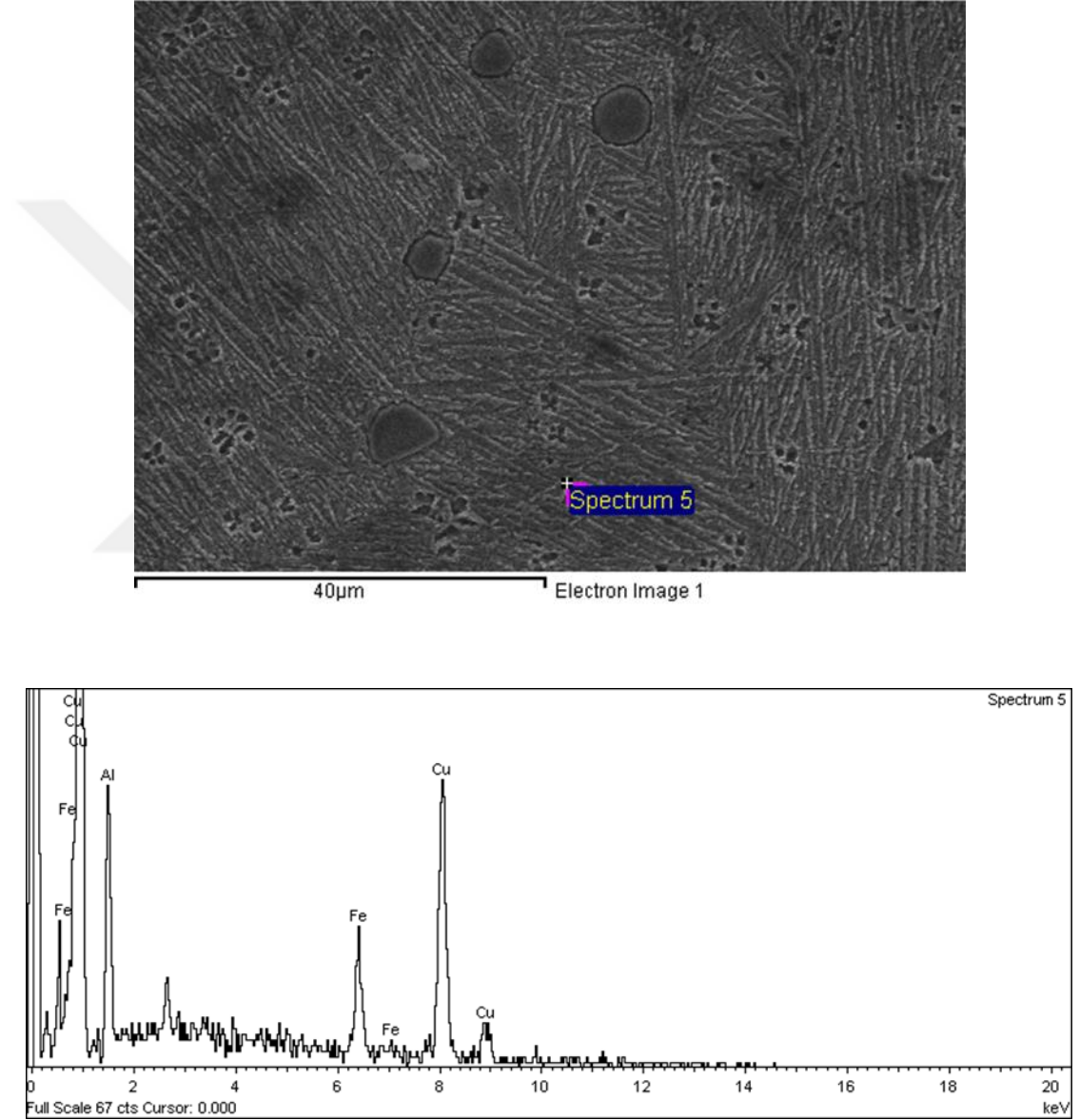
Şekil 5.6. a) CAF-1 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



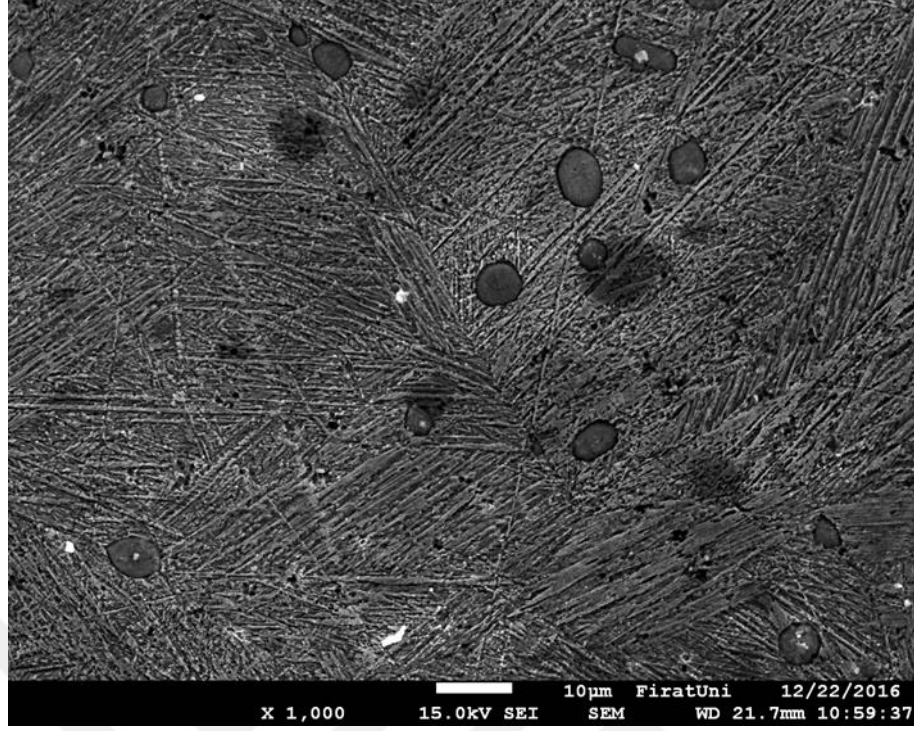
Şekil 5.7. a) CAF-1 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.

CAF-3 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü Şekil 5.13' de gösterilmektedir. CAF-3 numunesinin yüzey mikroyapısı, ince martensit morfolojisine sahip 18R martensit varyantlardan ve farklı kimyasal bileşenlere sahip çökelti fazlarından oluşmaktadır. CAF-3 numunesinin mikroyapısında bulunan Fe(Al,Cu) ve Cu_9Al_4 çökelti fazlarına ait SEM görüntüleri ve ilgili EDX spektrumları sırasıyla Şekil 5.14. ve 5.15.'de gösterilmektedir. Fe(Al,Cu) çökeltisine için alınan EDX spektrumu (Şekil 5.14-b) sonucundan, çökeltinin kimyasal bileşiminin atomik olarak

%48,95 Fe, %30,21 Al ve %20,84 Cu elementlerinden oluştuğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde Cu_9Al_4 çökelti fazı için alınan EDX spektrumu (Şekil 5.15-b), çökeltinin kimyasal bileşiminin atomik olarak %71,89 Cu, %24,38 Al ve %3,73 Fe elementlerinden oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. CAF-3 numunesinin XRD (Şekil 5.4-c) deseninde şiddetli bir $\text{Cu}(\text{Al,Fe})$ çökelti piki bulunmasına rağmen, SEM-EDX analizlerinde incelenen bölgede bu çökelti fazı tespit edilememiştir.



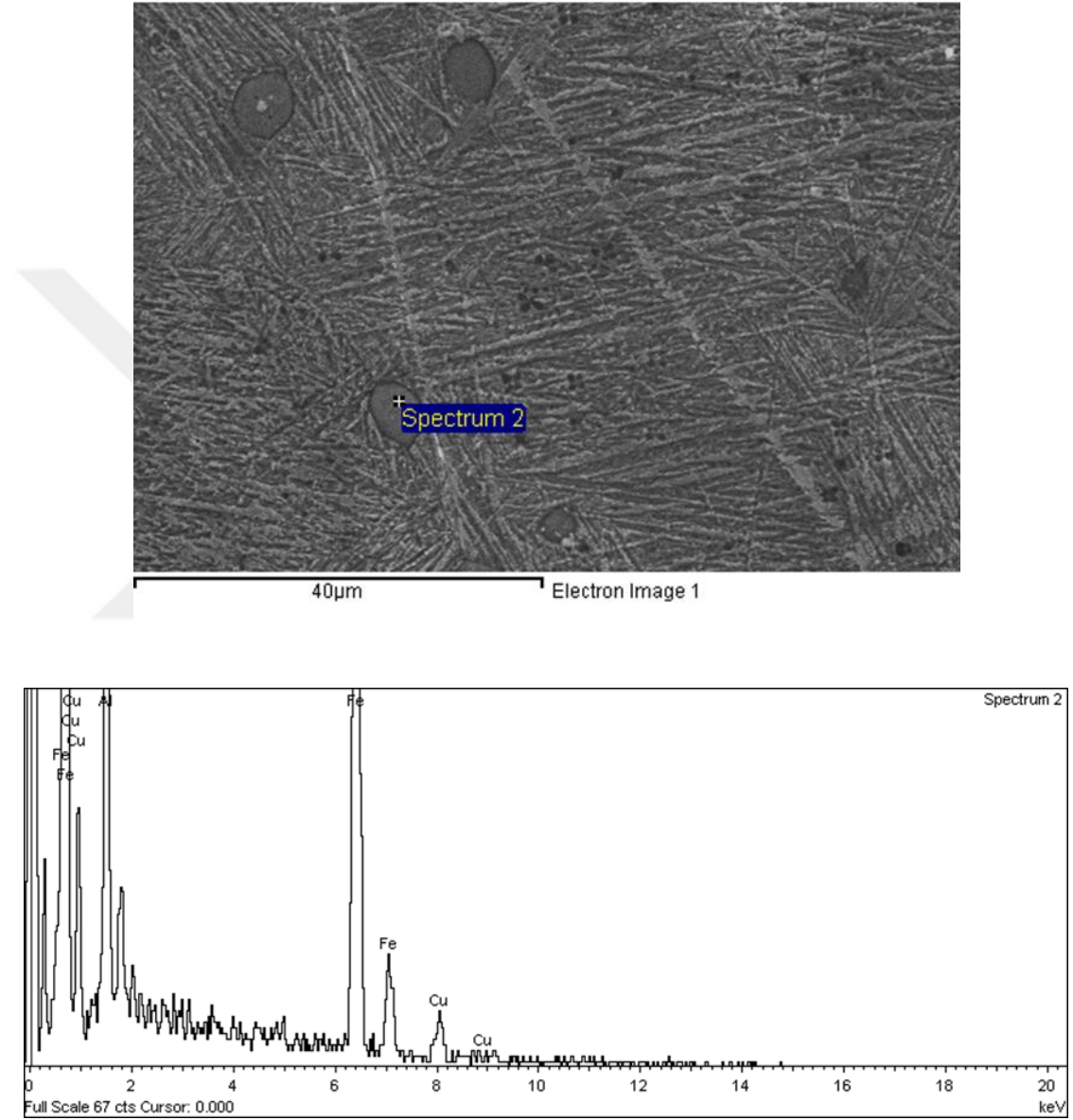
Şekil 5.8. a) CAF-1 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



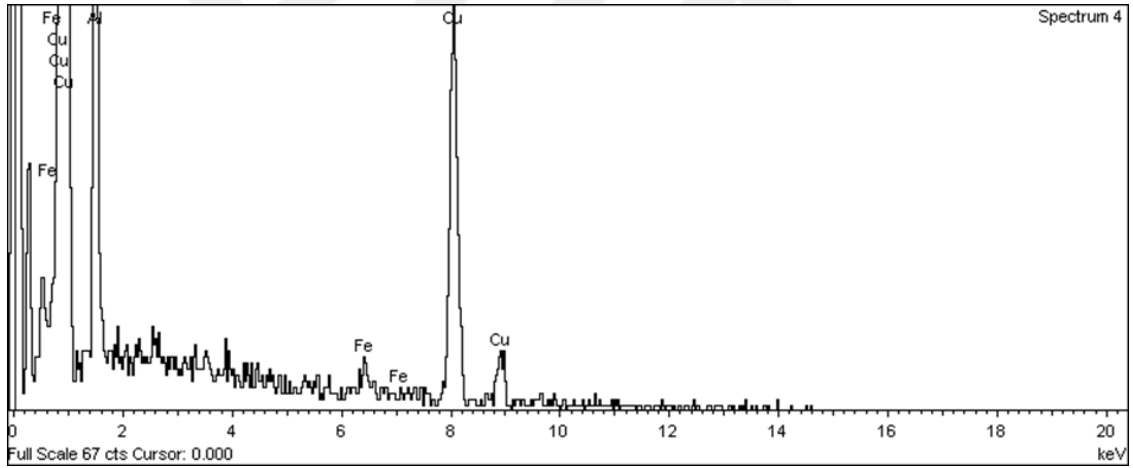
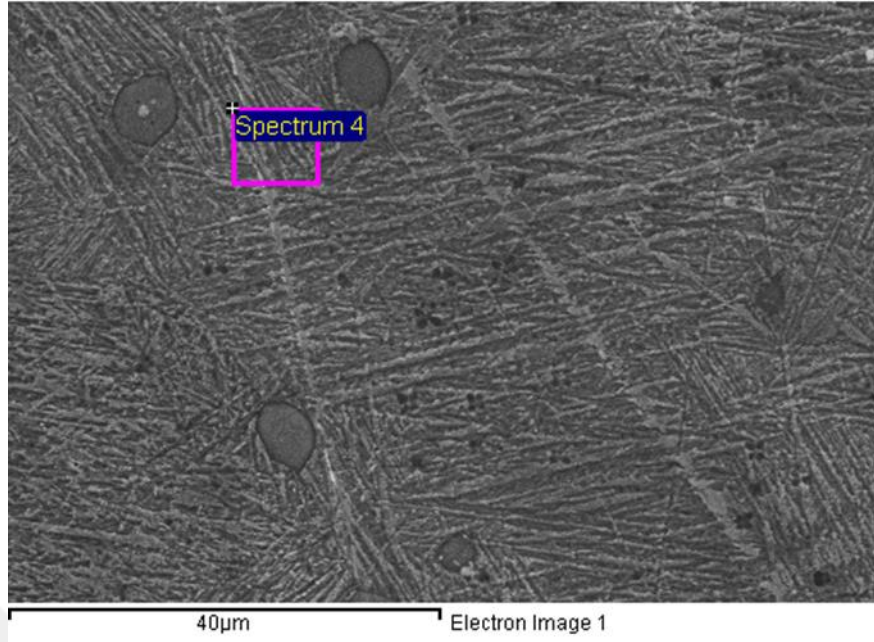
Şekil 5.9. CAF-2 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.

Şekil 5.16., CAF-Ni alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsüdür. CAF-Ni numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde, Ni ilavesinin Cu-Al-Fe alaşımının yüzey morfolojisinde değişikliklere sebebiyet verdiği görülmektedir. CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 alaşım numunelerindeki mikroyapıların aksine, CAF-Ni numunesinin yüzeyinde boşluk yapıları bulunmamaktadır ve yüzeyde bulunan çökeltiler de herhangi bir boşluğun içerisinde yer almamaktadırlar. SEM görüntüsünden, CAF-Ni alaşım numunesinin yüzey mikroyapısının ince martensit varyant morfolojisine sahip 18R ana martensit fazı ile farklı boyutlara sahip çökelti fazlarından oluştuğu görülmektedir. CAF-Ni numunesi içerisindeki çökeltilerin kimyasal analizleri için alınan EDX spektrumları, spektrumların alındıkları bölgeler ile birlikte Şekil 5.17. ve 5.18.'te gösterilmektedir. Şekil 5.17-a'da gösterilen SEM görüntüsündeki büyük boyutlu çökeltiden alınan EDX spektrumu (Şekil 5.17-b), incelen çökeltinin atomik olarak %57,99 Fe, %25,67 Al, %14,04 Cu ve %2,31 Ni bileşen oranlarına sahip Fe(Al,Cu)-Ni çökelti fazı olduğunu ortaya çıkarmıştır. Şekil 5.18-(a-b)'de gösterilen SEM görüntüsü ve EDX spektrumundan, incelen bölgedeki çökelti fazının atomik olarak %71,94 Cu, %22,86 Al, %4,15 Fe ve %1,05 Ni element oranları ile Cu_9Al_4

çökelti fazı olduğu anlaşılmaktadır. CAF-Ni numunesinin XRD (Şekil 5.4-d) deseninde şiddetli bir Cu(Al,Fe)-Ni çökelti piki bulunmasına rağmen, SEM-EDX analizlerinde incelenen bölgede bu çökelti fazı tespit edilememiştir.



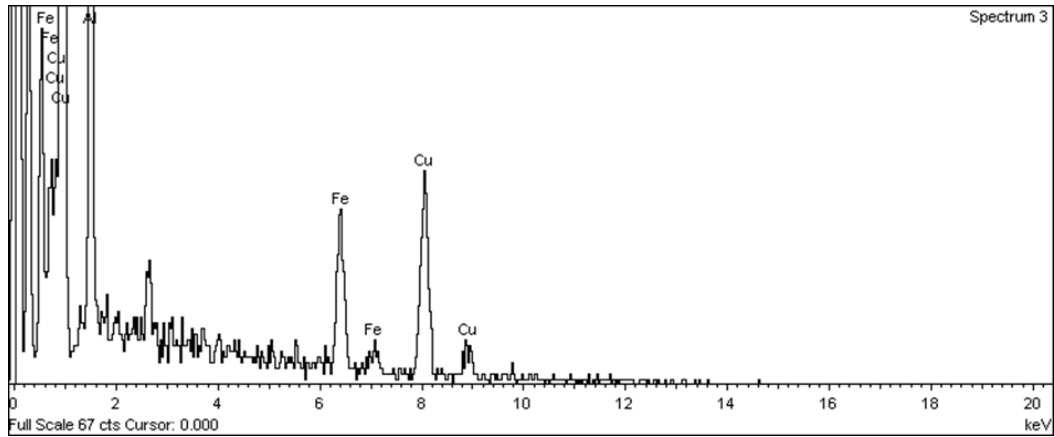
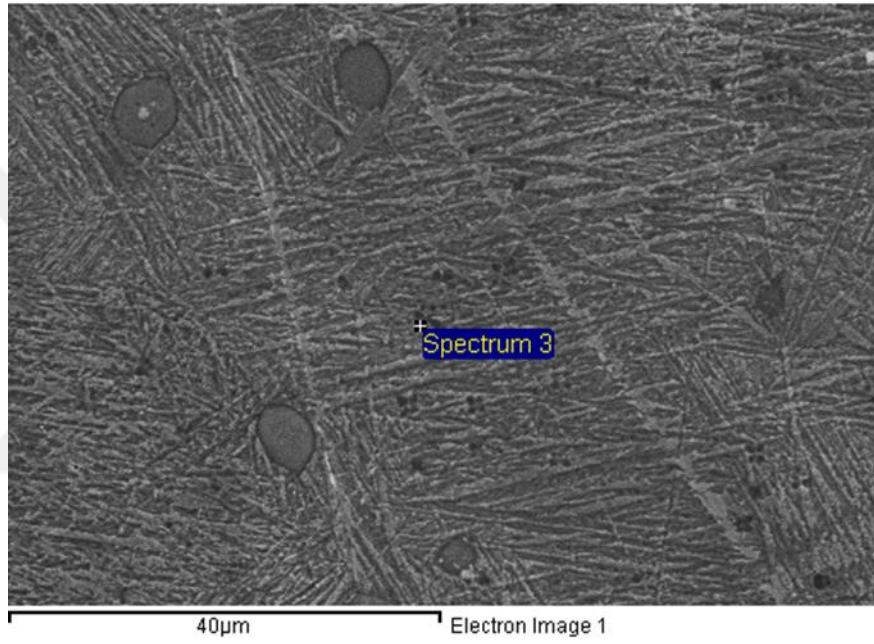
Şekil 5.10. a) CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



Şekil 5.11. a) CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.

CAF-Ti alaşım numunesinin yüzey mikroyapısı Şekil 5.19.' daki SEM görüntüsünde gösterilmektedir. Şekil 5.19.' daki SEM görüntüsünden, CAF-Ti numunesinin mikroyapısının çok fazla sayıda boşluk içerdiği, boşlukların büyük çoğunluğunun içerisinde çökelti bulunmadığı, boşlukların genellikle küresel formda oldukları ve içerisinde çökelti bulunan boşlukların da içerisindeki çökeltinin morfolojisi ile aynı formda oldukları görülmektedir. Kimyasal bileşen analizleri gerçekleştirilen X-faz ve Cu(Al,Fe)-Ti çökeltilerinin SEM görüntüleri ve EDX spektrumları sırasıyla Şekil

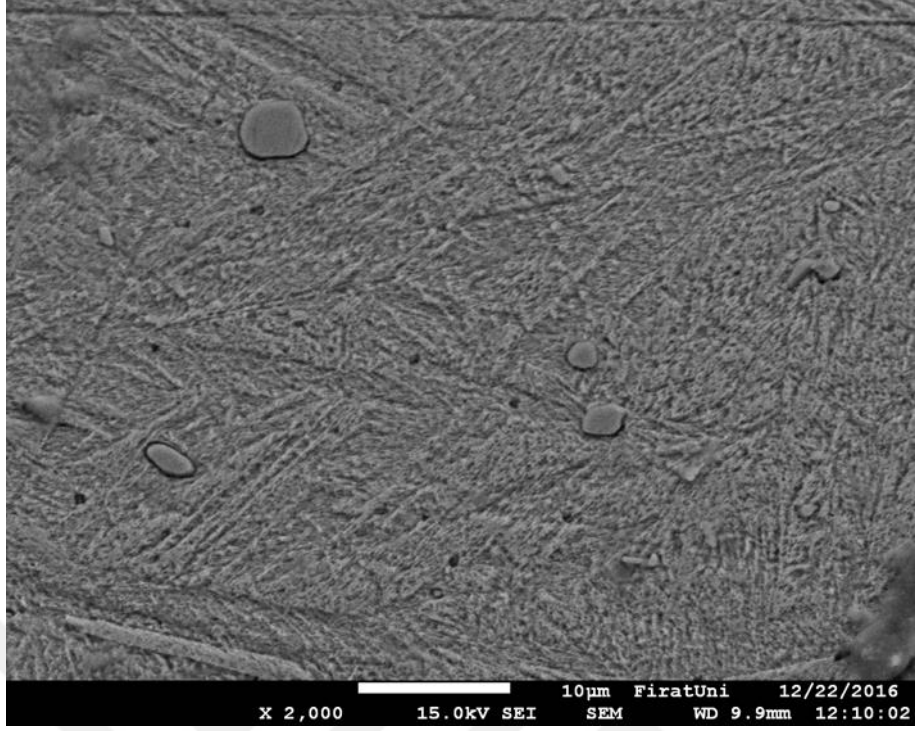
5.20. ve 5.21.'de verilmektedir. EDX sonuçlarından, CAF-Ti numunesinin mikroyapısında tespit edilen X-faz ve Cu(Al,Fe)-Ti çökeltilerinin kimyasal bileşimlerinin sırasıyla atomik olarak %50,97 Cu, %17,87 Al, %23,27 Fe ve %7,9 Ti ve %61,12 Cu, %29,7 Al, %8,77 Fe ve %0,41 Ti elementlerinden oluştukları tespit edilmiştir. CAF-Ti numunesinin XRD deseninde (Şekil 5.4.-e) Cu_9Al_4 çökelti fazına ait difraksiyon piki görülmesine rağmen, bu faz SEM görüntülerinde ve EDX analizlerinde tespit edilememiştir.



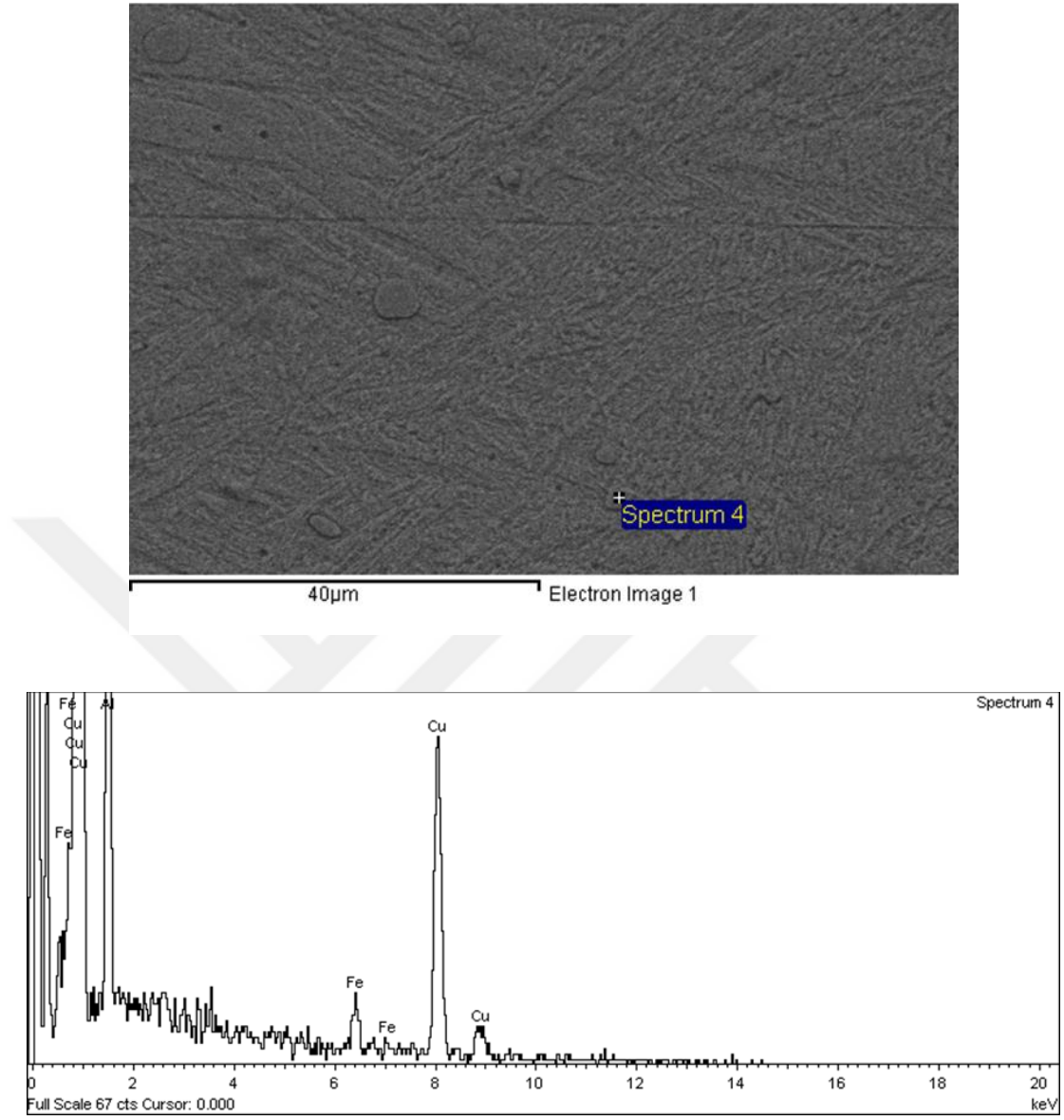
Şekil 5.12. a) CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.

CAF-Mn alaşım numunesinin yzey morfolojisini gsteren SEM gcruntusu şekil 5.22.'de gsterilmektedir. SEM gcruntusunden, CAF-Mn numunesinin yzey morfolojisinin CAF-Ti alaşım numunesinin yzey morfolojisi ile benzer ozellikler sergilediği gcrulmektedir. CAF-Mn numunesinin mikroyapısı ikerisindeki cokerltilerin kimyasal analizleri iwin alınan EDX spektrumları, spektrumların alındıkları bclgeler ile birlikte şekil 5.23., 24 ve 25' de gsterilmektedir. şekil 5.23.-a'daki SEM gcruntusundeki cokerltiden alınan EDX spektrumu (şekil 5.23-b), incelen cokerltinin atomik olarak %56,02 Fe, %4,79 Al, %32,21 Cu ve %6,98 Mn bileşen oranlarına sahip Fe(Al,Cu)-Mn cokerlti fazı olduğunu ortaya cikarmıştır. şekil 5.24-(a-b)'de gsterilen SEM gcruntusu ve EDX spektrumundan, incelen bclgedeki cokerlti fazının atomik olarak %73,02 Cu, %22,71 Al, %3,53 Fe ve %0,74 Mn element oranları ile Cu₉Al₄ cokerlti fazı olduğu anlaşılmaktadır. şekil 5.25-(a-b)'deki SEM gcruntusu ve EDX spektrumundan da, analizi gercekleştirilen cokerlti fazının atomik olarak %66,1 Cu, %19,83 Al, %11,69 Fe ve %2,37 Mn bileşen oranlarına sahip Cu(Al,Fe)-Mn cokerlti fazı olduğu tespit edilmiştir. Buradan, CAF-Mn alaşım numunesi iwin elde edilen SEM-EDX sonuqlarının şekil 5.4-f'de verilen XRD sonuqları ile uyum ikerisinde olduğu gcrulmektedir.

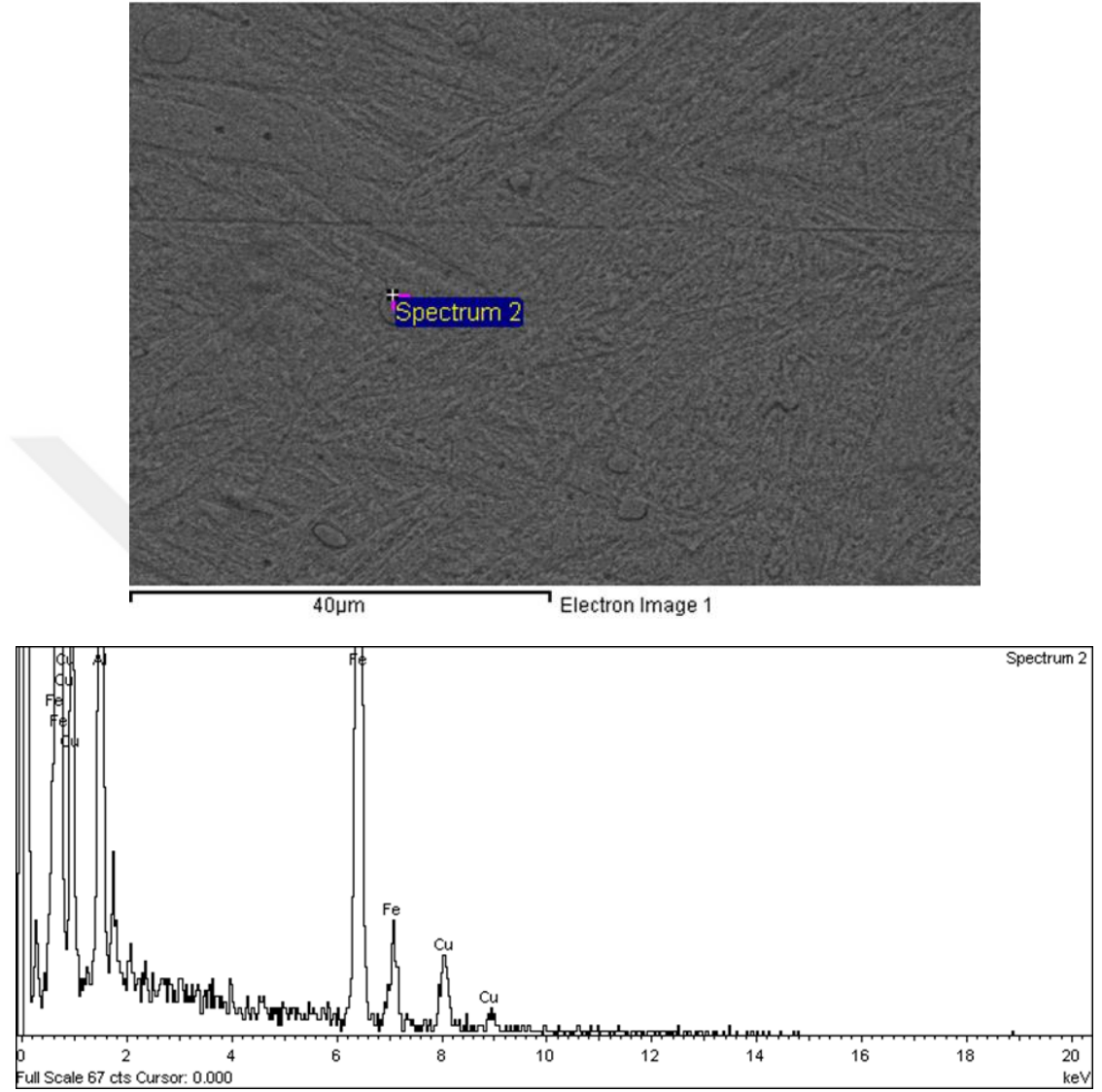
Uclcu Cu-Al-Fe ve dortlu Cu-Al-Fe-Ti ve Cu-Al-Fe-Mn yuksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım sistemlerinin mikroyapılarındaki boşlukların uzun sureli homojenizasyon işlemi sırasında oluştuğunu duşunulmektedir. Fakat şu aşamada mikroyapılar ikerisinde var olan bu boşlukların oluşum mekanizmaları ve muhtemel nedenleri hakkında herhangi net bir izah yapılamamaktadır. Bunun iwin daha detaylı ve sistematik yeni bir takım calışmaların yapılması gerektiğine inanılmaktadır. Sure ve Brown [66] β -CuAlNi alaşımının mikro yapısında benzer mikro boşluklar gozlemlemişlerdir ve onlar bu boşlukların anafaz ikerisindeki X-faz cokerltilerinin etrafındaki yerel plastik deformasyonların bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde Sobrero ve arkadaşları da [67] Cu-13Al-5.5Ni-1Ti (wt%) alaşımının mikroyapısı ikerisinde uzaysal dağılıma (cokerltilerin boşluklar ikerisinde yer aldıkları durum) sahip X-faz cokerltileri tespit etmişlerdir. Fakat onlar bu X-faz cokerltilerinin neden boşluklar ikerisinde yer aldıkları uzaysal bir dağılıma sahip olmaları ile ilgili detaylı herhangi bir acıklama yapmamışlardır.



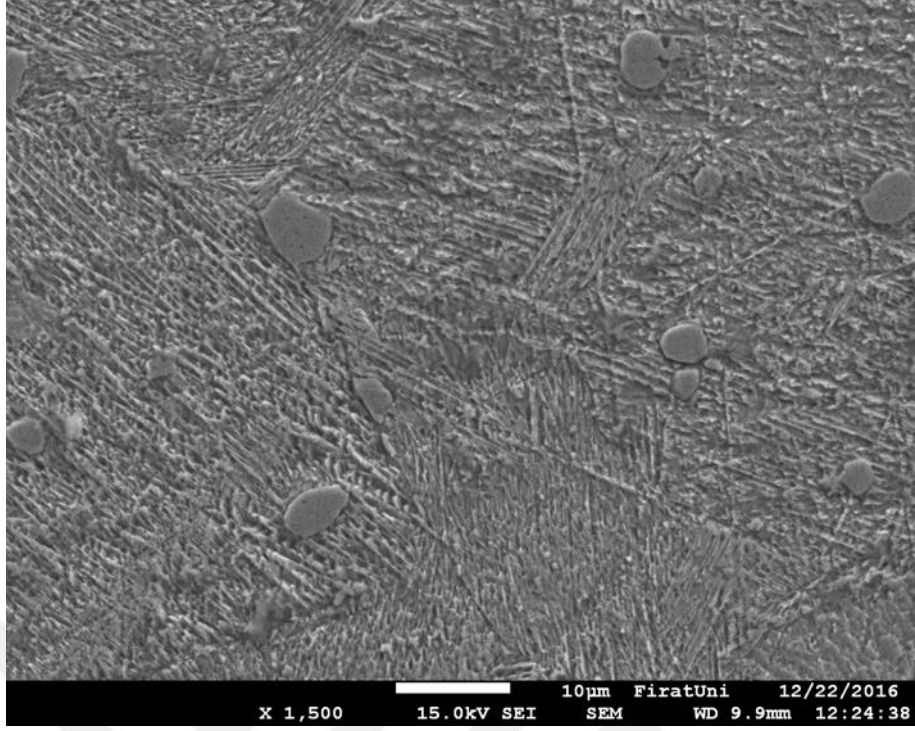
Şekil 5.13. CAF-3 alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.



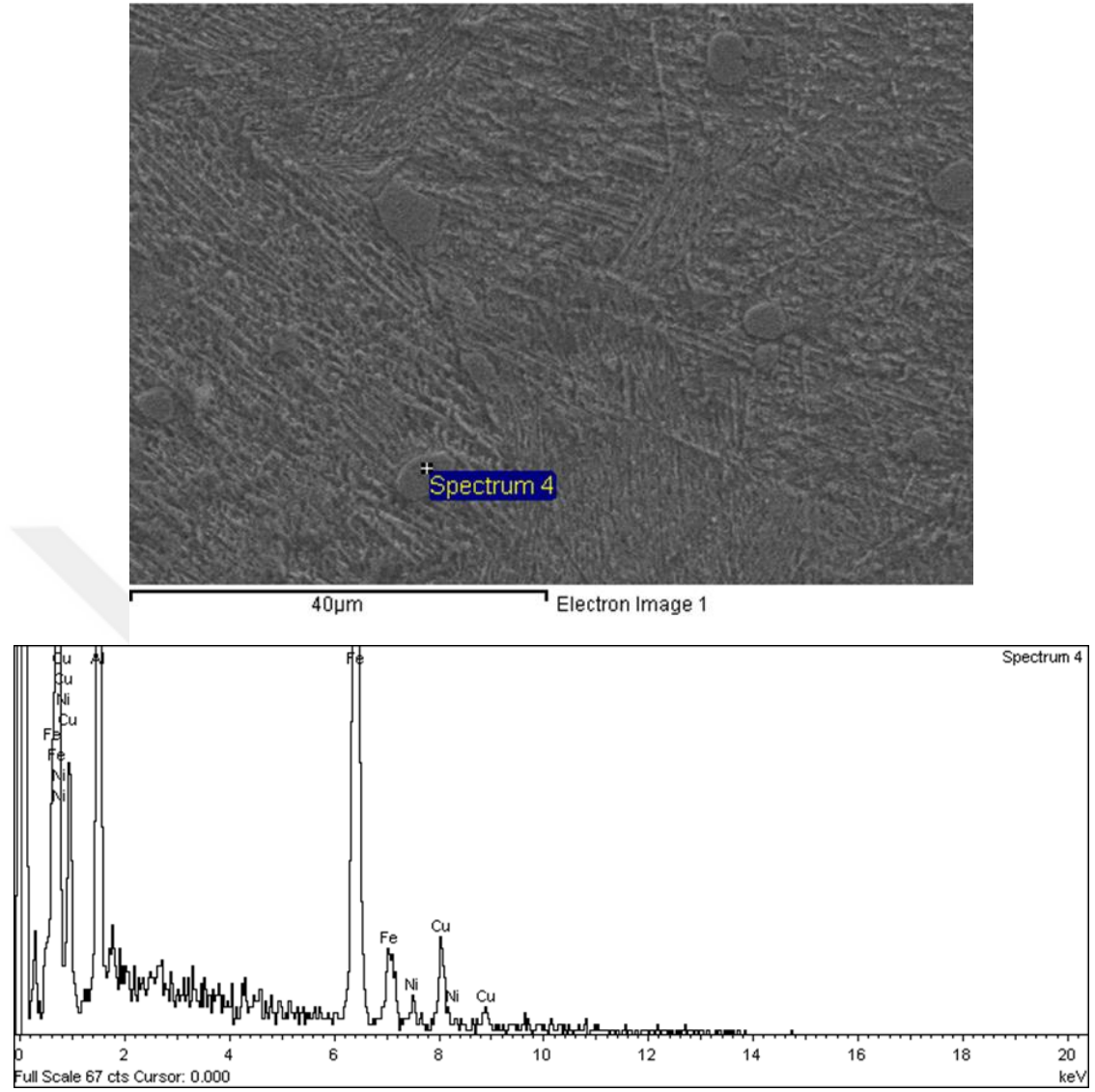
Şekil 5.14. a) CAF-3 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



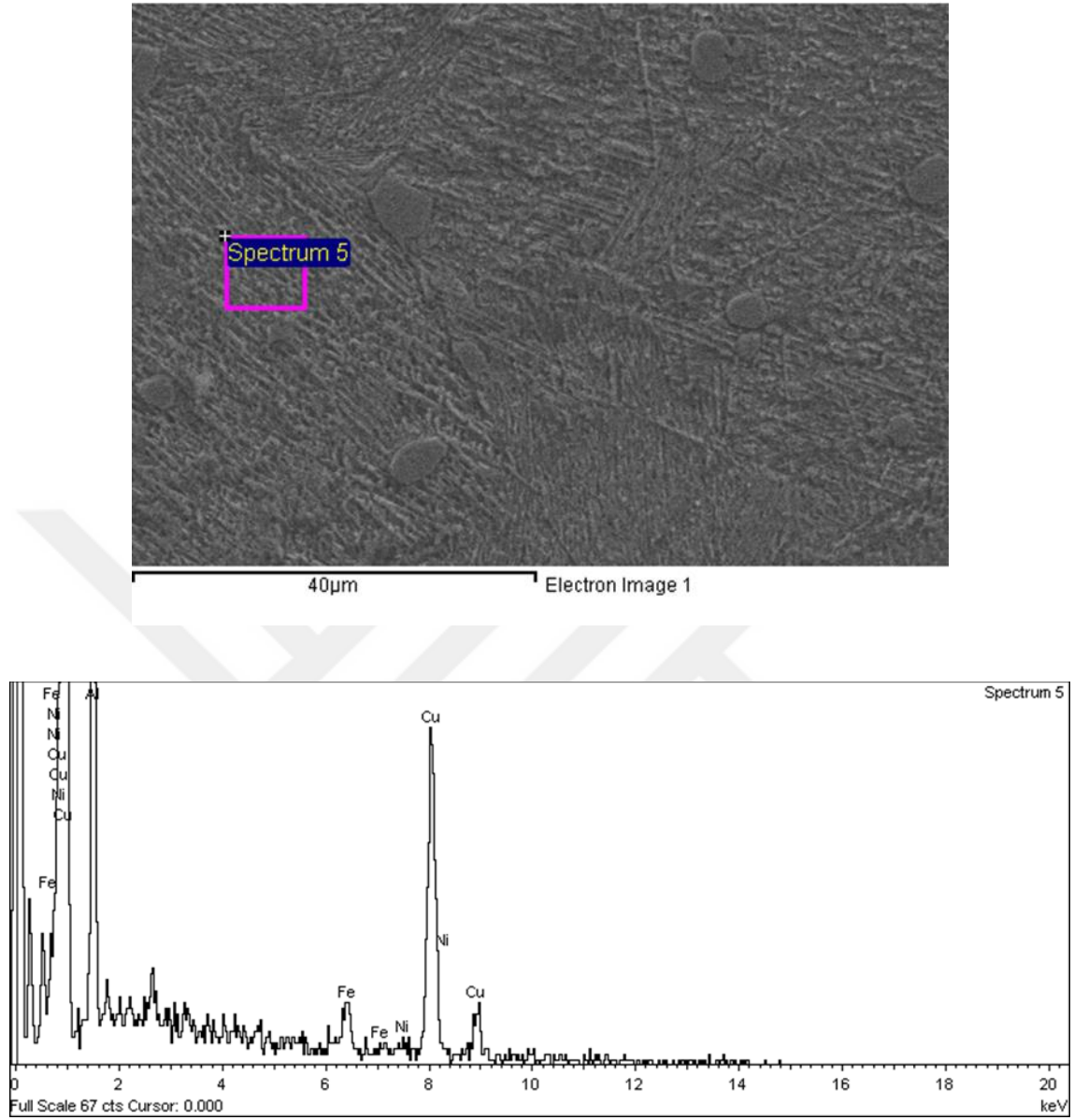
Şekil 5.15. a) CAF-3 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



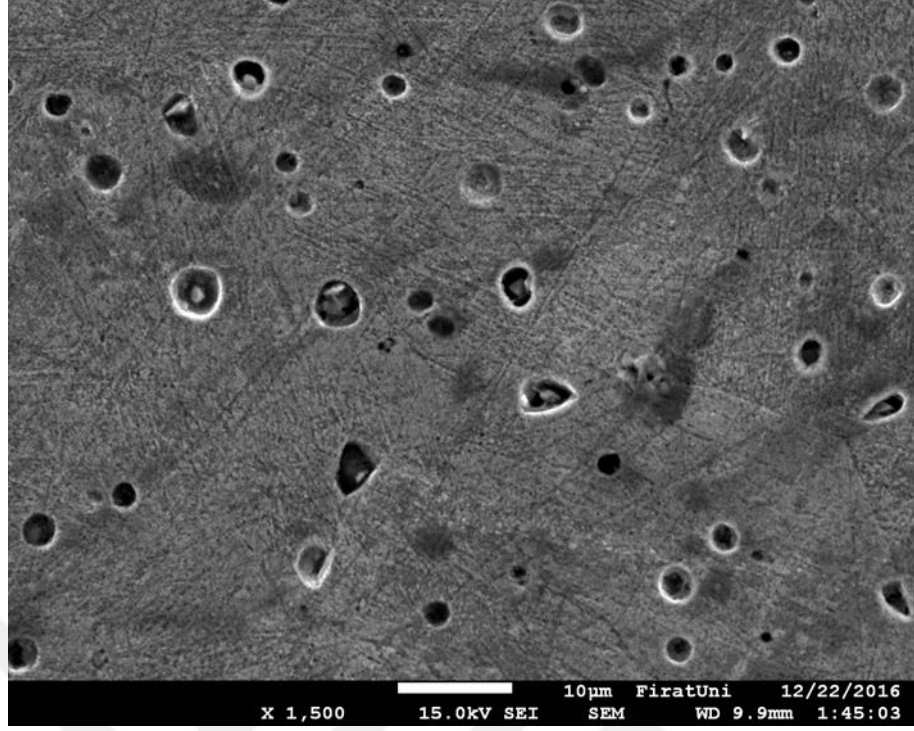
Şekil 5.16. CAF-Ni alaşıım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.



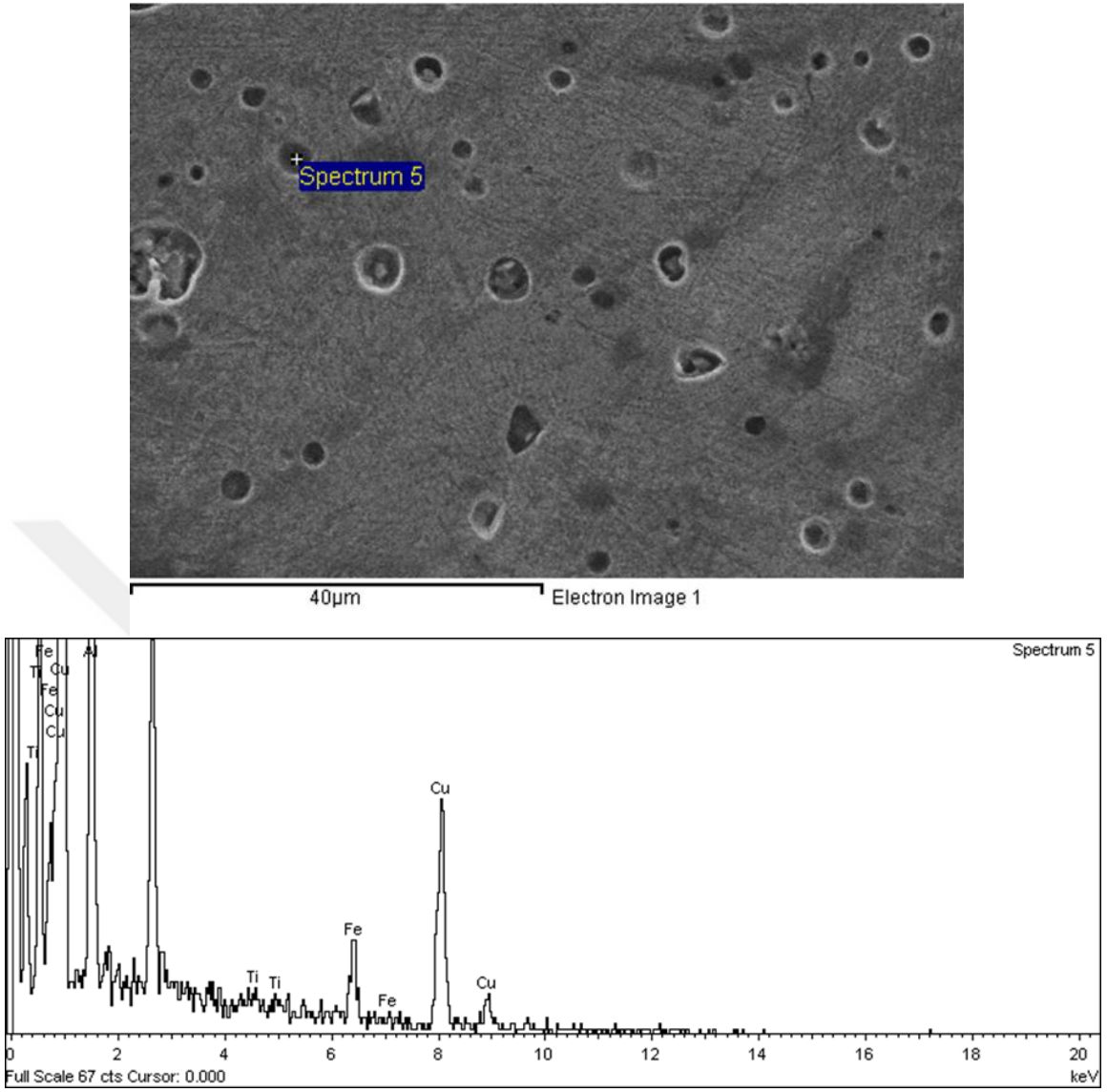
Şekil 5.17. a) CAF-Ni alaşıım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



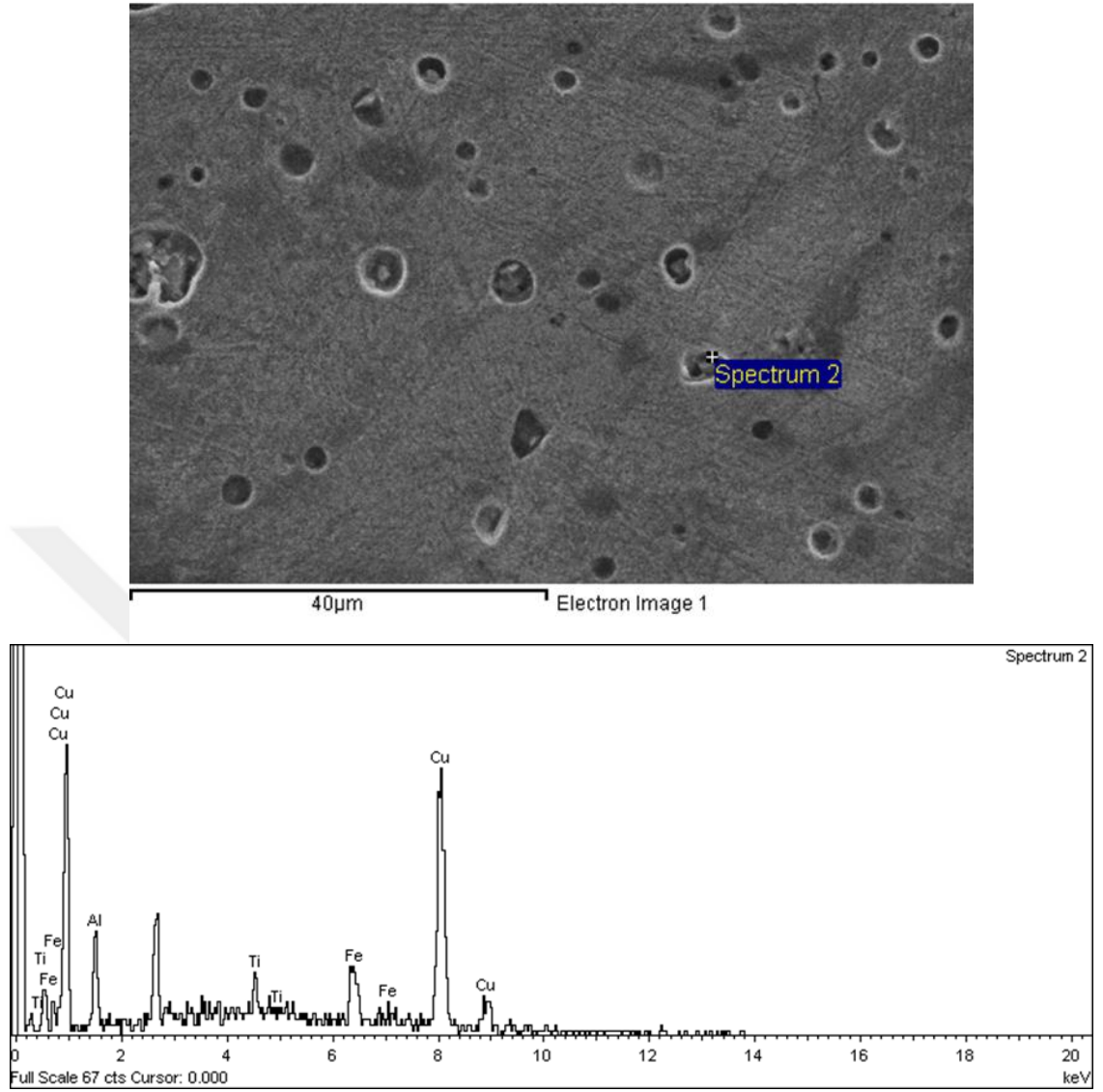
Şekil 5.18. a) CAF-Ni alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



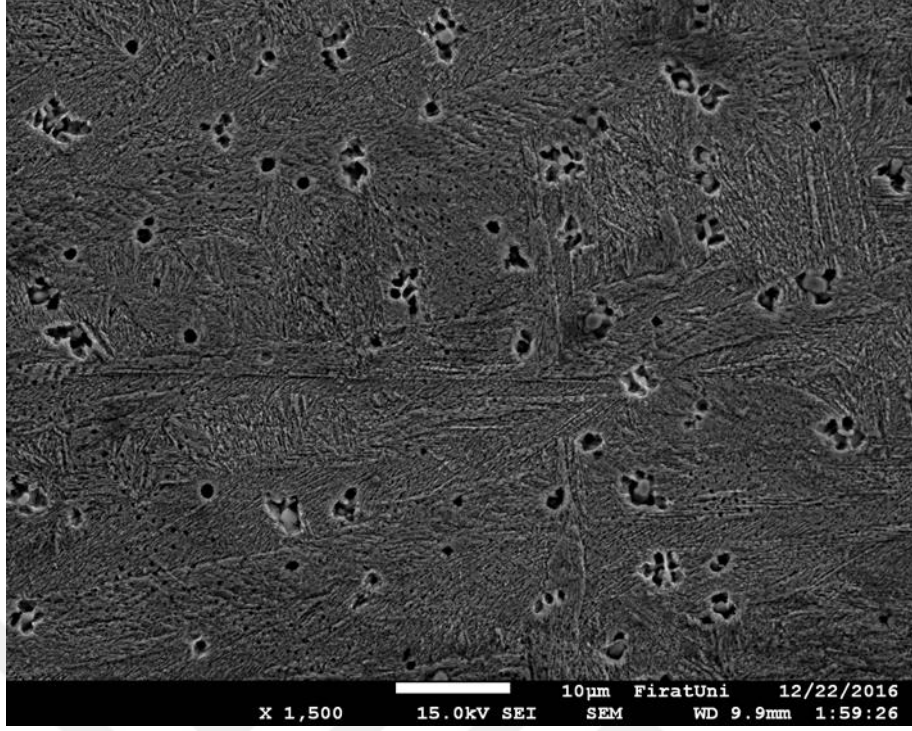
Şekil 5.19. CAF-Ti alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.



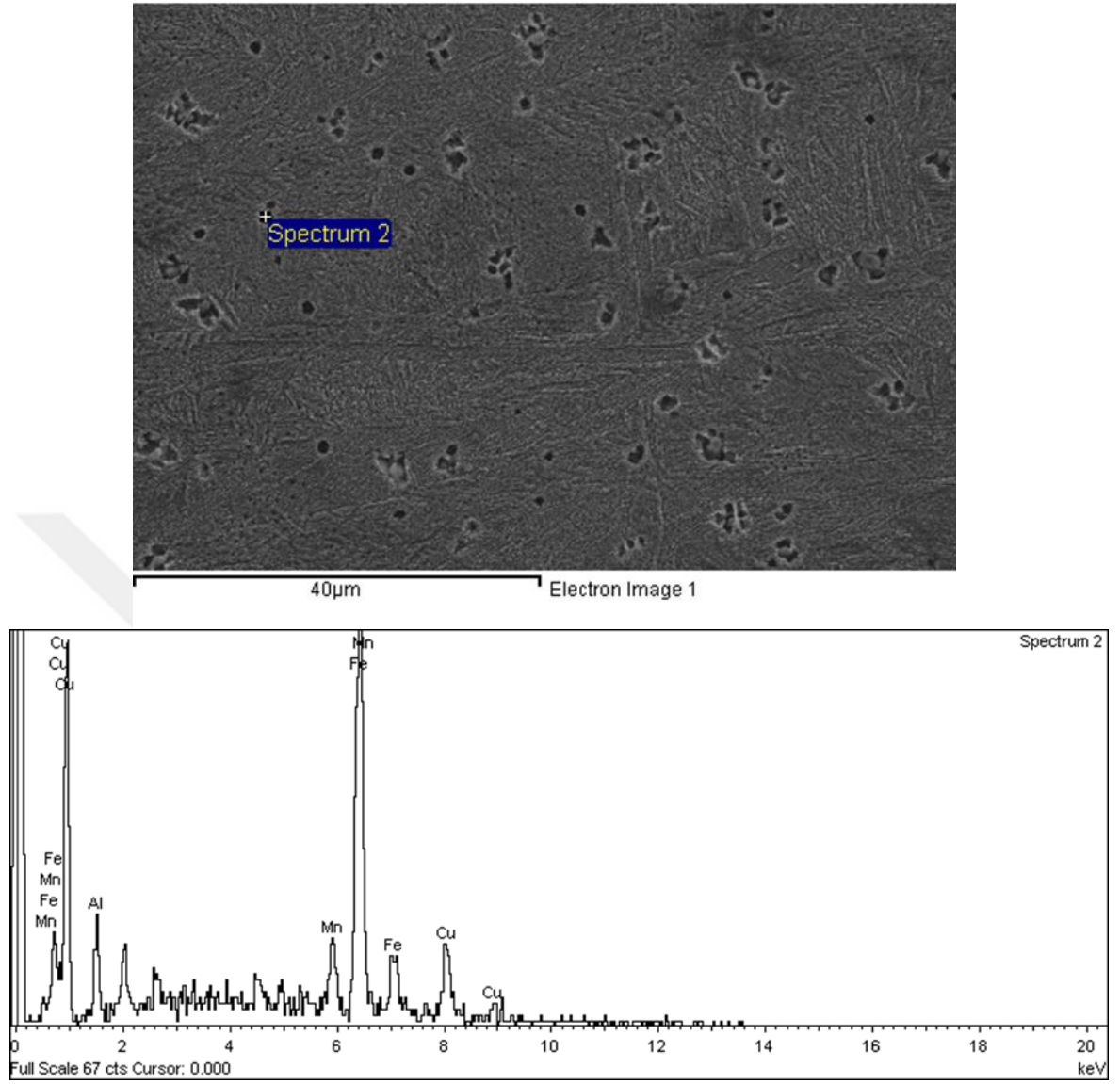
Şekil 5.20. a) CAF-Ti alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



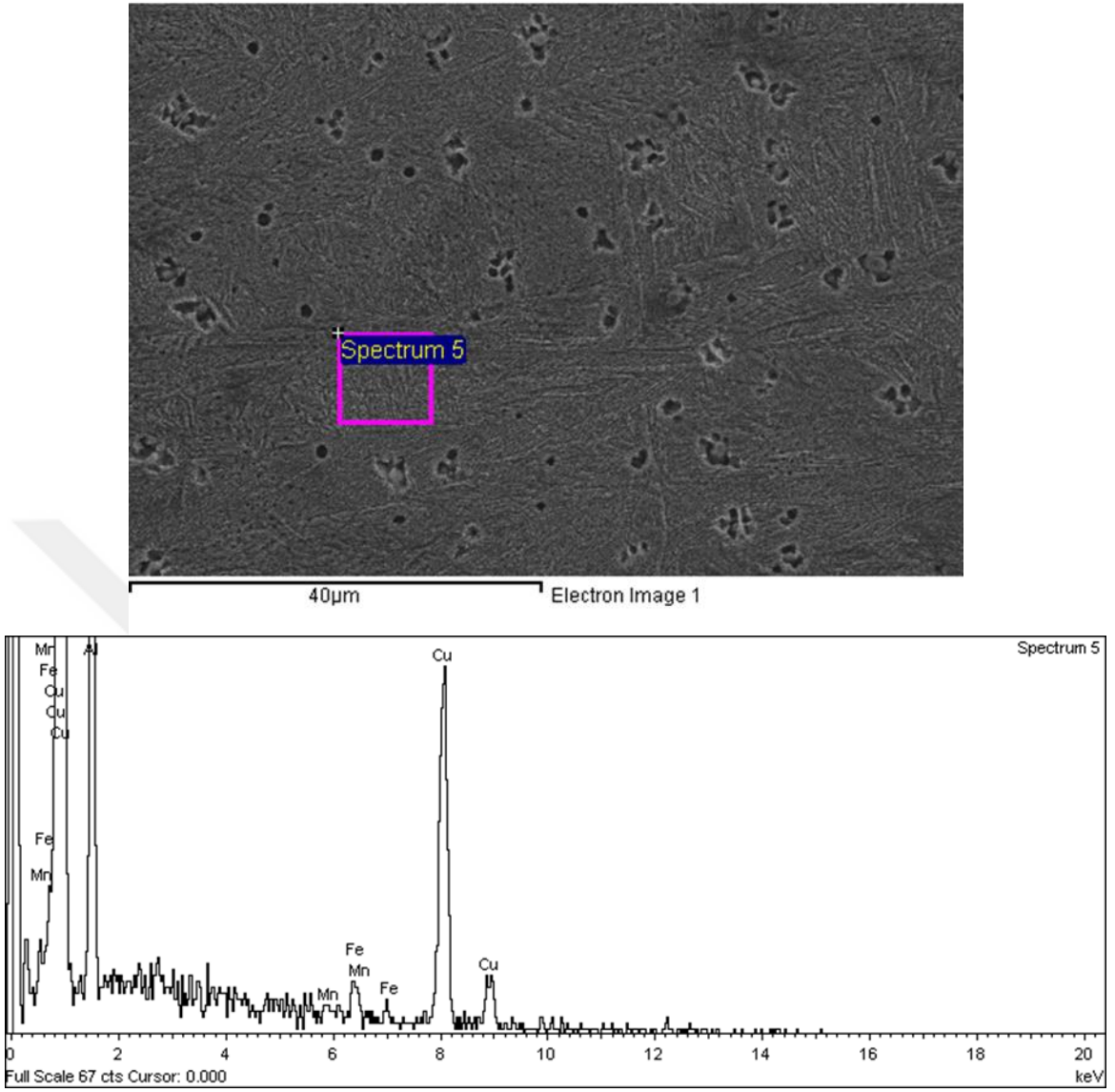
Şekil 5.21. a) CAF-Ti alaşıım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



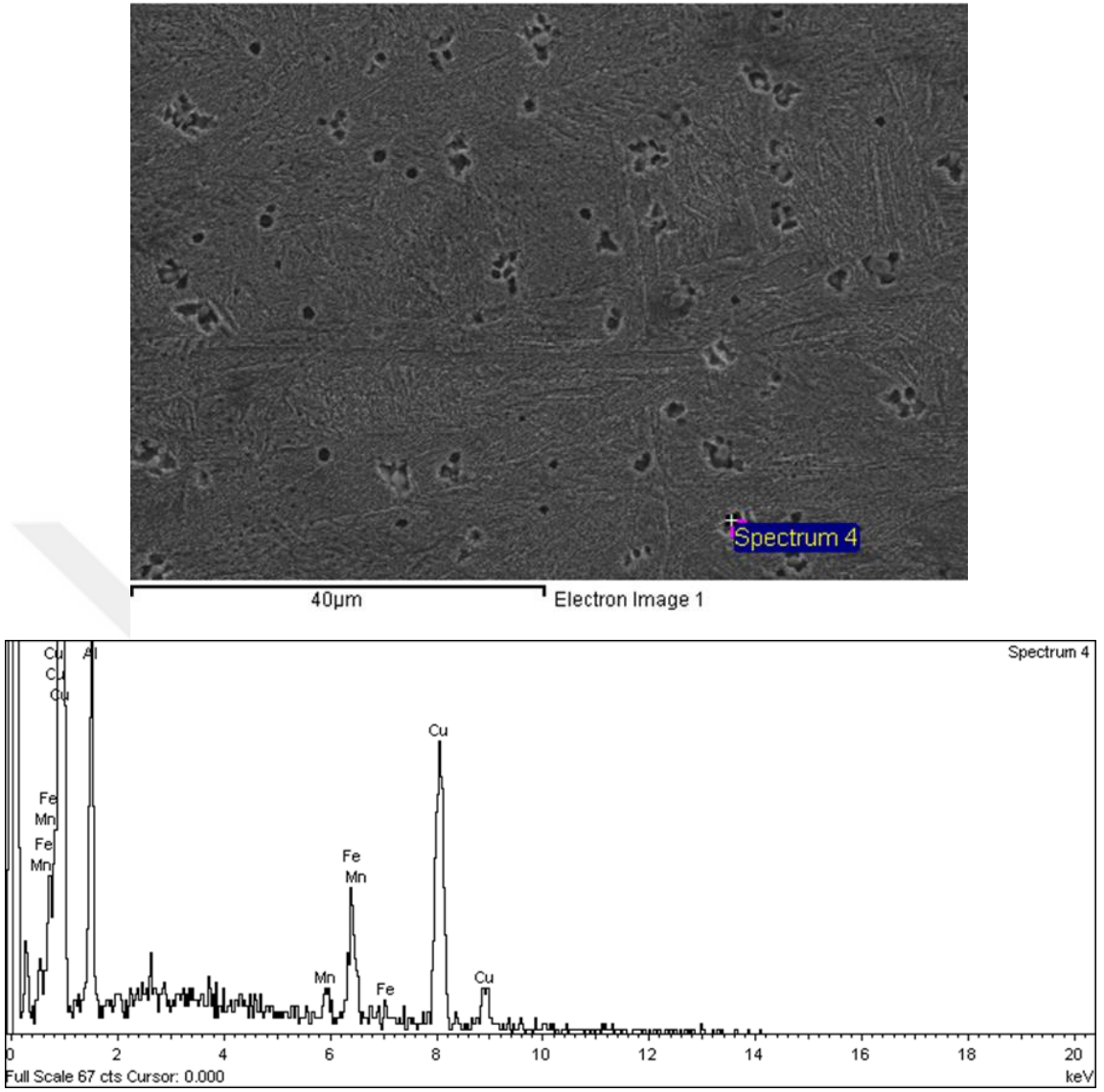
Şekil 5.22. CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey morfolojisini gösteren SEM görüntüsü.



Şekil 5.23. a) CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



Şekil 5.24. a) CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu.



Şekil 5.25. a) CAF-Mn alaşım numunesinin yüzey mikroyapısındaki çökelti fazlarını gösteren SEM görüntüsü ve **b)** EDX spektrumu

6. TARTIŞMA

Bu çalışmada, üzerinde çalışılan Cu-Al-Fe alaşımına Bölüm 4’ de belirtilen deneysel işlemler uygulandı. Elde edilen sonuçlar, bölüm 5’ deki bulgular ve tartışma bahsinde geniş bir şekilde literatüre de dayalı olarak tartışıldı. Bu deneysel çalışmalar; alaşım üretimi, kimyasal ve termal analiz, X-ışınları analizi, diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve metalografik gözlemler olmak üzere deney grupları halinde toplu olarak aşağıdaki şekilde özetlenebilir;

Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Sonuçları

Diferansiyel Tarama Kalorimetresi Cu-Al-Fe ve Cu-Al-Fe-X (X=Ni,Ti,Mn) alaşımlarının ısıtma ve soğutma anında meydana gelen austenit-martensit dönüşüm sıcaklıklarını belirlemede kullanıldı . Elde edilen bulgular şöyle özetlenebilir;

- Üretilen bütün alaşımlar için elde edilen ısı akısı eğrilerinde, ısıtma ve soğutma esnasında austenit ve martensit faz dönüşümlerine rastlanmıştır, Cu-Al-Fe ve Cu-Al-Fe-X (X=Ni,Ti,Mn) alaşımlarının hepsinin yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım özelliği sergilediği tespit edilmiştir.
- Farklı elektron konsantrasyonu ve farklı kimyasal oranlar ile alaşımların dönüşüm sıcaklığının ve buna bağlı olarak entalpi değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir.
- Cu-Al-Fe alaşımına %1.2 lik Ni katkılanarak elektron konsantrasyon değeri artırılmıştır. Böylece, austenit başlama sıcaklığının CAF-1,CAF-2 VE CAF-3 e göre azaldığı tespit edilmiştir. Öte yandan martensit başlama sıcaklığının ise CAF-1 ve CAF-2 ye göre azalırken, CAF-3 e göre arttığı görülmüştür. Cu-Al-Fe alaşımına % 1.2 lik Ti katkılıdır. Austenit ve martensit dönüşüm sıcaklıklarına göre daha yüksek sıcaklık şekil hatırlama özelliği gösterdiği görüldü. Ayrıca en yüksek austenit başlama sıcaklığı ve entalpi değişimi CAF-Ti alaşımında görüldü. CAF-Ti alaşım numunesi; CAF-1, CAF-2, CAF-3 ve CAF-Ni alaşımlarına göre elektron konsantrasyon değerinin bunlardan %8 daha fazla olması, dönüşüm sıcaklığının yüksek olma sebeplerinden biridir.
- CuAlFe alaşımına Ni ve Ti elementi katkılanarak dörtlü şekil hatırlamalı alaşımlar üretilmiştir. Ni katılan alaşımın dönüşüm sıcaklık değeri CAF-1. CAF-2 ve CAF-3 e göre azalırken, Ti katılan alaşımda dönüşüm sıcaklığının CAF-1,CAF-2 ve CAF-3 e göre arttığı görülmüştür. Elektron konsantrasyonlarından

ziyade, Ni ve Ti elementlerinin alaşım içindeki atomik yerleşim düzeninin daha önemli olduğu düşünölebilir.

- Cu-Al-Fe-Mn dörtlü alaşımının elektron konsantrasyon değeri alaşım grubundaki en düşük electron konsantrasyonuna sahip alaşımdır.ve dönüşüm sıcaklıklarında azalma görölmüştür.
- Bu alaşımların dönüşüm sıcaklık değeri kendi aralarında kıyaslanırsa elektron konsantrasyonunun ve farklı elementler dönüşüm sıcaklığını değiştirmede baskın bir etki olduğu söylenebilir. Fe elementi arttıkça, dönüşüm sıcaklık değeri lineer olmamakla beraber azalma göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı kapsamında ufak miktarda alaşım içindeki değişimler dönüşüm sıcaklığında ciddi değişimlere neden olmuştur. Bu sonuçlar yaptığımız çalışmalar ile uyum içeriindedir.

Aktivasyon Enerjisi Sonuçları

CAF-1,CAF-2,CAF-3,CAF-Ni, CAF-Ti ve CAF-Mn alaşımlarının aktivasyon enerji hesabı için gerekli olan denklemlerden (4.3 ve 4.4) yararlanılmıştır. Kissnger ve Ozawa yöntemi kullanılmıştır. Bu sonuçla;

- Hesaplamalara göre en yüksek aktivasyon enerjisi değeri ve en düşük elektron konsantrasyonu değeri Cu-Al-Fe (CAF-1) alaşımı için elde edilmiştir.
- Tüm alaşımlara kıyasla CAF-Ti ve CAF-Ni alaşımı bu alaşımlardan farklıdır. Aktivasyon enerjileri CAF-1 den küçük olmasına rağmen, diğerlerinden çok büyüktür. Bunun sebebi içeriindeki Ti elementindendir.
- Elektron konsantrasyonu arttıkça, aktivasyon enerjisi düşer.

X-Işınları Ölçüm Sonuçları

Farklı atomik kompozisyonlarında Cu-Al-Fe ve dörtlü Cu-Al-Fe-X (Ni,Ti,Mn) yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşım sistemlerinin kristalografik özellikleri özellikleri $2\theta=10-80^\circ$ aralığında XRD desenlerinin alınmasıyla incelendi.

- şekil 5.9-(a-c)'de gösterilen üçlü bileşene sahip CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 numunelerinin XRD desenleri incelendiğinde numunelerin genel olarak hem kristalografik özelliklerinin hem de faz bileşenlerinin benzer oldukları ve farklı e/a oranlarının üçlü Cu-Al-Fe şekil hatırlamalı alaşımının yapısal özellikleri

üzerinde belirgin bir değişiklik meydana getirmediği görülmüştür. CAF-1 alaşım numunesinin XRD deseni 18R martensit fazına ait difraksiyon pikleri içerir.

- CAF-2 ve CAF-3 numunlerinin XRD desenleri sırasıyla incelendiğinde, artan e/a oranları ile Cu-Al-Fe alaşımının çökelti bileşiğinin değişmediği, 18R ana martensit fazına ait pik şiddetinin oldukça azaldığı, çökelti fazındaki pik ile martensit faza ait pikin üst üste bindikleri görülmektedir. CAF-2 ve CAF-3 numunlerinde artan e/a oranlarıyla üçlü Cu-Al-Fe yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımın içerisindeki ana martensit yönelim değişmiştir.
- Cu-Al-Fe yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaşımlarına Ni,Ti veya Mn elementleri ilavesi ile elde edilen CAF-Ni, CAF-Ti, CAF-Mn alaşım numunlerinde; farklı dördüncü element ilavesinin Cu-Al-Fe alaşımında hem kristalografik hemde bazı yapısal özelliklerinde değişikliklere neden olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlardan Ti elementi ilavesi ile Cu-Al-Fe alaşımının mikroyapısında farklı bir çökelti fazı olduğu gözlenmiştir.

SEM ve EDX Analiz Sonuçları

Üçlü CAF-1, CAF-2 ve CAF-3 ve dördümlü CAF-Ni, CAF-Ti, CAF-Mn alaşım numunelerinin yüzey morfolojilerinin SEM görüntüleri ve yüzey mikroyapılarındaki farklı fazların kimyasal analizleri ise EDX spektrumlarının alınmasıyla gerçekleştirildi. Bu sonuçla;

- CAF-1 numunesinin oda sıcaklığında martensit fazda olduğu ve numunenin mikroyapısındaki martensit varyantların morfolojik yapısının 18R yapısı olan β_1^1 fazını temsil eden ince martensit varyantlardan oluştuğu, SEM görüntüsünde ise farklı bir martensit fazı tanımlayan varyant morfolojisine rastlanmadığı tespit edilmiştir. CAF-1 numunesinin mikroyapısının farklı boyut ve morfolojilere sahip çok sayıda çökelti fazı içerdiği ve de ilginç morfolojik özellikler sergilediği görülmektedir. Sonuç olarak CAF-1 alaşım numunesi için elde edilen EDX ve SEM sonuçları XRD sonuçları ile uyum içindedir.
- CAF-2 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısı, ince martensit varyantlar 18R ana martensit fazı ile farklı boyutlara sahip çökelti fazından oluşmuştur.CAF-1 alaşımı ile benzer morfolojik özellikler gösterdiği tespit edilmiştir.
- CAF-3 alaşım numunesinin yüzey mikroyapısı, ince martensit varyantlar 18R martensit varyant ve farklı kimyasal bileşenlere sahip çökelti fazından oluşur.

Çökelti bileşenleri Cu ve Fe dir. XRD deseninde Cu (Al,Fe) çökelti piki bulunmasına rağmen SEM-EDX analizlerinde bu çökelti fazı bulunamamıştır.

- CAF-Ni alaşımda, Ni elementi ilavesinin Cu-Al-Fe alaışımının yüzey morfolojisinde değışime sebebiyet verdiğı görölmüştür. CAF-Ni numunesinin yüzeyinde boşluklar bulunmamaktadır. Yüzey mikroyapısının 18R ana martensit fazı ile farklı boyutlara sahip çökelti fazından oluştuğı görölmektedir. Şiddetli Cu(Al,Fe)-Ni çökelti piki bulunmasına rağmen, SEM-EDX de çökelti fazı tespit edilmemiştir.
- CAF-Ti alaışımında çok sayıda boşluk ve boşlukların büyük çoğunluğunun içerisinde çökelti bulunmadığı, boşlukların genelde küresel formda olduğu ve içerisinde çökelti bulunan boşluklarda çökeltinin morfolojisi ile aynı formda olduğu gözlenir. XRD desenlerinde Cu₉Al₄ çökelti fazı difraksiyon piki olmasına rağmen, bu fazın SEM-EDX analizlerinde bulunmadığı tespit edilmiştir.
- CAF-Mn alaışımının, CAF-Ti alaışım numunesine benzer yüzey morfolojisi özellikler sergilediğı görölür. Burada CAF-Mn için elde edilen EDX ve SEM sonuçları XRD desenleriyle uyum içindedir.
- Üçlü Cu-Al-Fe ve dörölü Cu-Al-Fe-Ti, Cu-Al-Fe-Mn yüksek sıcaklık şekil hatırlamalı alaışım sistemlerinin mikroyapısındaki boşlukların uzun süreli homojenizasyon işlemi sırasında oluştuğı düşünölür.

KAYNAKLAR

- [1] Ölander A. An electrochemical investigation of solid-cadmium-gold alloys. Am Chem Soc 1932; 54: 3819-33.
- [2] Vernon LB, Vernon HM. Process of manufacturing articles of thermoplastic synthetic resins. In: US Patent 2234993;1941.
- [3] Buehler WJ, Gilfrich JV, Wiley RC, Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi, Appl Phys 1963; 34: 1475-7.
- [4] A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials and Design. 56 (2014) 1078-1113.
- [5] Shape memory effect and pseudoelasticity in Cu-Zn-Si, L.C. Chang and T.O. Read, Trans AIME 189(1951) p.47.
- [6] Effect of Low-Temperature Phase Changes on the Mechanical Properties of Alloys near Composition TiNi, W.J. Buehler, J.W Gilfrich, and R.C. Willey, J.APPL. Phys. 34(1963)p.1475.
- [7] Shape memory alloys, Delaey, L., Perkins, A.J., Massalski, T.B.1972.J. Mater. Sci.7:1197-215
- [8] Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behaviour; Nakanishi, On transformation plasticity., N. 1979. Prog. Mater. Sci.24: 143-265
- [9] Wang, F.E., Desavage, B.F., Buehler, W.J., Hosler, W.R. Component local densities of states for ordered TiNi. 1968.J. Appl. Phys.39:2166-75
- [10] Livingston, H., Mukherjee, Alloys, take place with a large temperature interval (about 100 K), K.1972.J.Appl.Phys.12:4944-50
- [11] Delaey, L., Perkins, A.J., Massalski, Shape memory alloys., T.B.1972.J. Masler. Sci.7: 1197-215.
- [12] Transformation plasticity and the effect of temperature on the mechanical behaviour; Sandrock, G.D., Perkins, A.J., Hehernann, R.F.1971. Metall. Trans.2:2769-81.
- [13] Salaman, M.B., Meichle, M., Wayman, C.M., Hwang, C.M., Shapiro, S.M. 1979. Modulated structure, pp-223-25. New York :AIP
- [14] Delaey, L., Perkins, A.J., Massalski, Shape memory alloys., T.B.1972.J. Mater.Sci.7 : 1197 -215
- [15] Maeder, D., Ryser, P., Saderson, B., Sillow, A., Steiner, A.1982. Proc. Int. Conf. Martensitic Transformations (ICOMAT-82), Leven, Belgium. J. Phys.43 (suppl.4):c4-609-14
- [16] Terrauchi, H., Iida, S., Tanabe, K., Kikukawa, K., Maeda, H., et al.1983. J. Phys. Soc. Jpn. 52:4041-43

- [17] Matsumoto, M., Honma, T.1976. Proc. 1st. JIM Int. Symp. Martensitic transformations (JIMIS-1, ICOMAT-76), Kobe, Japon. Suppl. Trans. Jpn. Ins. Met.17: 199-204
- [18] Lagoudas DC. SMAs: Modelling and engineering applications. 1 st. Ed. New York: Springer; 2010.
- [19] C.N.R. Rao and K.P.R. Pisharody. “Transition Metals Sulfides”, “Progress in Solid State Chemistry”, vol. 10, Pergamon Pres, Oxford,1975.
- [20] Science and Techology of Shape Memory Alloys; New Developments.
- [21] Z. Nishiyama, Martensitic Transformation (Academic Press, New York, 1978).
- [22] Science and Techology of Shape Memory Alloys; New Developments; H.Warlimont and L.Delaey, Prog.Mater.Sci.18 (1974) P.1.
- [23] Science and Techology of Shape Memory Alloys; New Developments, c. m. Wayman, Introduction to Crystallography of martensitic Transformations (Macmillon, NewYork,1964).
- [24] Chang, L. C, Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals— the gold-cadmium beta phase. Trans. T.A. 1951. Trans. AIME.189: 47-52
- [25] Basinski, Z.B., Christian, J.W., Shape memory behavior of ionomers and their compounds 1954. Acta Metal.2:101-16.
- [26] Shape memory behavior of ionomers and their compounds; Buehler, W.J., Glifrich, J.W., Wiley, R.C.1963.J. Appl.Phsy. 34:1475-77
- [27] Shape memory behavior of ionomers and their compounds ;Arbuzova, J.A., Khandros, L.G.1964. Fiz. Met. Metallaved.17:390-99
- [28] Otsuka, K., Shimizu, New Aspects of Martensitic Transformation., K.1970. Scr. Metall. 4:469-72
- [29] Otsuka K., Shape memory alloys., 1971. Jpn. J.Appl. Phys.10:571-79
- [30] Saburi, T., Nenno, S.1981. Proc. Int. Conf. Solid-Solid Phase Transformations. Metal. Soc.AIME. pp.1455-79
- [31] Shape memory alloys, Delaey, L., Krishnan, R.V., Tas, H., Warliment, H. 1974. J. Mater. Sci. 9:1521-55
- [32] Shape memory alloys; Otsuka, K., Wayman, C.M. 1977 In International Quarterly Scientific Rewiews Journal, ed. P.Feltam, 2(2):81-172.Israel: Freund.
- [33] Otsuka, K., Shimizu, Pseudoelasticity and Shape Memory Effects in Alloys. International Metals Reviews, K.1986.Int., Metals Reviews 31:93-114.
- [34] Otsuka, K., Shimizu, Shape Memory Alloys Pseudoelasticity, Metals Forum, K.1981. Net. Forum 4(3):142-52.
- [35] Shape Memory Alloys, Otsuka,K., Shimizu, K.1981.Met.Forum 4(3):142-52.
- [36] High Temperature Shape Memory Alloys, International Materials Rewiews Volume 55, 2010- issue5

- [37] Tellinen J, Suorsa I, Jaaskelainen A, Aaltio I, Ullakko K. Basic properties of magnetic shape memory actuators. In: Proc of 8th int conf on actuator. Bremen, Germany; 2002. p.566-9.
- [38] Winzek B, Schmitz S, Rumpf H, Sterzl T, Ralf Hassdorf, Thienhous S, et al. Recent developments in shape memory thin film technology. Mater Sci Eng: A. 2004;378:40-6.
- [39] Huang WM, Zhao Y, Wang CC, Ding Z, Purnawali H, Tang C, et al. Thermo/Chemo-responsive shape memory effect. In polymers: a sketch of working mechanisms, Fundamentals and optimization. J Polym Res 2012;19:1-34.
- [40] Butera F, Cada A, Vergani G. Shape memory actuators for automotive applications., IN: Nanotec. IT newsletter. Roma: AIRI/nanotec. IT; 2007. P.12-6.
- [41] Melton KN. General applications of SMA and Smart materials- Cambridge University Press; 1999. p.220-39.
- [42] Humbeeck JV. Non- medical applications of SMAs. Mater Sci Eng A 1999;134-48.
- [43] Haril DJ, Lagoudos DC. Aerospace applications of SMAs. Proc Inst. Mech Eng, Part G: J Aerospace Eng. 2007;221:535-52.
- [44] Prahlad H, Chapra I. Design of a variable twist tilt-rotor blade using (SMA) actuators. In: 8th Annual international symposium on smart structures and materials. International society for optics and Photonics; 2001. p.46-59.
- [45] Godard OJ, Lagoudos MZ, Lagoudos DC. Design of space systems using SMAs. In: Smart structures and materials: international society for optics and photonics; 2003. p.545-58.
- [46] Fujita H. Studies of microactuators in Japan. In: IEEE international conference on robotic automation. Institute of Industrial Science. Tokyo University; 1989. p.1559-64.
- [47] Furuya Y, Shimada H. Shape memory actuators for robotic applications. Mater Des 1991;12:21-8.
- [48] Hodgson DE, Wu MH, Biermann RJ. SMAs. ASM Handbook: conducted on the corrosion behavior of NiTi SMAs, ASM international 1990:897-902.
- [49] Mantovani D. SMAs: properties and biomedical applications. JOM 2000;52:36-44.
- [50] High Temperature Shape Memory Alloys; Transactions of the ASME, 98/ Vol.121, 1999.
- [51] High Temperature Shape Memory Alloys; International materials Reviews 2010.
- [52] H. Donkersloot and J. Van Vucht: J. Less-Common Met., Journal of the Less-Common Metals 83 Elsevier Sequoia S.A. 1970, 20, 83.
- [53] K. Otsuka and T. Kakeshita: Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments MRS Bull., Feb. 2002, 91.
- [54] M.A. Hauff, W.L. Bernard, F.J. Lisy and T.S. Prince: US patent no. 6622558, 2003.

- [55] J. Vazquez, P.L. Lopez-Aleman, P. Villares, R. Jimenez-Garay, Generalization of the avrami equation for the analysis of non-isothermal transformation kinetics. Application to the crystallization of the $\text{Cu}_{0.20}\text{As}_{0.30}\text{Se}_{0.50}$ alloy, *J. Phys. Chem. Solids*, 61 (2000) 493-500
- [56] Shuiyuan Yang, Yu Su, Cuiping Wang, Xingjun Liu, Microstructure and properties of Cu-Al-Fe high-temperature shape memory alloys, *Materials Science and Engineering B* 185 (2014) 67–73
- [57] T.N.Raju and V.Sampath, Influence of aluminium and iron contents on the transformation temperatures of Cu-Al-Fe shape memory alloys, *Transactions of The Indian Institute of Metals* Vol. 64, Issues 1 & 2, February-April 2011, pp. 165-168
- [58] Yang S, Su Y, Wang C, Liu X. Microstructure and properties of Cu-Al-Fe high-temperature shape memory alloys. *Materials Science and Engineering B* 2014;185:67-73.
- [59] Yildiz K, Kök M, Dağdelen F. Cobalt addition effects on martensitic transformation and microstructural properties of high-temperature Cu-Al-Fe shape-memory alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2015;120:1227-1232.
- [60] Gui J, Zou W H, Wang R, Zhang D, Tang C H, Xiang M, Yang D Z. X-ray diffraction study of the reverse martensitic transformation in Cu-Al-Ni-Mn-Ti shape memory alloy. *Scripta Materialia* 1996;35:435-440.
- [61] Wei Z G, Peng H Y, Zou W H, Yang D Z. Aging effects in a Cu-12Al-5Ni-2Mn-1Ti shape memory alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A* 1997; 28A:955-967.
- [62] Saud S N, Hamzah E, Abubakar T, Zamri M, Tanemura M. Influence of Ti additions on the martensitic phase transformation and mechanical properties of Cu-Al-Ni shape memory alloys. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 2014;118:111-122.
- [63] Wang C P, Su Y, Yang S Y, Shi Z, Liu X J. A new type of Cu-Al-Ta shape memory alloy with high martensitic transformation temperature. *Smart Materials and Structures* 2014; 23:025018 (7pp).
- [64] Hurtado I, Ratchev P, Van Humbeeck J, Delaey L. A fundamental study of the χ -phase precipitation in Cu-Al-Ni-Ti-(Mn) shape memory alloys. *Acta Materialia* 1996;44:3299-3306.
- [65] Sugimoto K, Kamei K, Matsumoto H, Komatsu S, Akamatsu K, Sugimoto T. Grain-refinement and the related phenomena in quaternary Cu-Al-Ni-Ti shape memory alloys. *Le Journal de Physiques Colloques* 1982;C4:C4-761-766.
- [66] Sure G N, Brown L C. The mechanical properties of grain refined β -CuAlNi strain-memory alloys. *Metallurgical Transactions A* 1984;15A:1613-1621.
- [67] Sobrero C E, La Roca P, Roatta A, Bolmaro R E, Malarría J. Shape memory properties of highly textured Cu-Al-Ni-(Ti) alloys. *Materials Science and Engineering A* 2012;536:207-215.

ÖZGEÇMİŞ

06.06.1988 yılında Malatya’da doğdum. İlköğretim ve orta öğretim ve liseyi Malatya’da tamamladım. 2014 yılında İnönü Üniversitesi Fen- Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünden mezun oldum. Aynı yıl içerisinde mezun olduktan sonra Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Fizik Anabilim dalında yüksek lisansa başladım.

Esra BALCI

