

**CuAlMnFe ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARDA YAŞLANMANIN
KARAKTERİSTİK DÖNÜŞÜM SICAKLIKLARI ve KİNETİK
PARAMETRELER ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET ALİ KURGUN

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**MERSİN
ARALIK - 2019**

**CuAlMnFe ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARDA YAŞLANMANIN
KARAKTERİSTİK DÖNÜŞÜM SICAKLIKLARI ve KİNETİK
PARAMETRELER ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MEHMET ALİ KURGUN

**MERSİN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

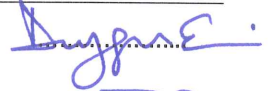
**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**Danışman
Doç. Dr. İskender ÖZKUL**

**MERSİN
ARALIK - 2019**

ONAY

Mehmet Ali KURGUN tarafından Doç. Dr. İskender ÖZKUL danışmanlığında hazırlanan “CuAlMnFe Şekil Hafızalı Alaşımlarda Yaşlanmanın Karakteristik Dönüşüm Sıcaklıkları ve Kinetik Parametreler Üzerine Etkisinin İncelenmesi” başlıklı çalışma aşağıda imzaları bulunan jüri üyeleri tarafından 16.12.2019 tarihinde yapılan Tez Savunma Sınavı sonucunda oy birliği/çokluğu ile Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Görevi	Ünvanı, Adı ve Soyadı	İmza
Başkan	Doç. Dr. Duygu EVİN	
Üye	Doç. Dr. İskender ÖZKUL	
Üye	Doç. Dr. Memduh KARA	

Yukarıdaki Jüri kararı Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 12/12/2019 tarih ve 2019/50/1963 sayılı kararıyla onaylanmıştır.



Bu tezde kullanılan özgün bilgiler, şekil, tablo ve fotoğraflardan kaynak göstermeden alıntı yapmak 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunu hükümlerine tabidir.

ETİK BEYAN

Mersin Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğinde belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlâk kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak kullandığımı,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Bu tezin herhangi bir bölümünü Mersin Üniversitesi veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı,
- Tezin tüm telif haklarını Mersin Üniversitesi'ne devrettiğimi beyan ederim.

ETHICAL DECLARATION

This thesis is prepared in accordance with the rules specified in Mersin University Graduate Education Regulation and I declare to comply with the following conditions:

- I have obtained all the information and the documents of the thesis in accordance with the academic rules.
- I presented all the visual, auditory and written informations and results in accordance with scientific ethics.
- I refer in accordance with the norms of scientific works about the case of exploitation of others' works.
- I used all of the referred works as the references.
- I did not do any tampering in the used data.
- I did not present any part of this thesis as an another thesis at Mersin University or another university.
- I transfer all copyrights of this thesis to the Mersin University.

16.../12/ 2019

İmza

Mehmet Ali KURGUN

ÖZET

CuAlMnFe ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARDA YAŞLANMANIN KARAKTERİSTİK DÖNÜŞÜM SICAKLIKLARI ve KİNETİK PARAMETRELER ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Yüksek lisans tez projesi kapsamında, birçok farklı sektörde kullanım alanı bulan, malzeme biliminin farklı davranışlara sahip malzemelerinden, şekil hafızalı alaşımlar üzerine laboratuvar ortamında yaşlandırma işlemi uygulanarak alaşımlarda şekil hafıza özelliklerindeki değişimleri gözlemlemek hedeflenmiştir. Şekil hafızalı alaşımlar, şekil hafızası etkisi, sönümleme özellikleri ile bağlantılı süper esneklik, yüksek korozyon ve olağanüstü yorulma direnci gibi kendine has özellikler gösteren eşsiz bir malzeme sınıfını temsil eder. Söz konusu alaşımların elde edilmesinde Cu, Al, Mn ve Fe elementleri kullanılmıştır. Bu elementler belirli oranlarda, hidrolik pres makinası yardımıyla kompaktlanmış ve ark fırınında ergitme yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Elde edilen CuAlMnFe alaşımı çalışmanın amacına yönelik olarak, 350 °C sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtılarak malzemelerin içyapılarında değişim hedefi ile yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Yaşlandırma işleminin son aşaması olarak oda sıcaklığında soğutma uygulanmıştır. Daha sonra işlem görmüş numuneler ve yaşlandırmadan önceki numunenin karakteristik dönüşüm sıcaklık değerleri Diferansiyel Tarama Kalorimetre cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Dönüşüm sıcaklıkları yardımıyla yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin entalpi ve entropi değerleri hesaplanmıştır. Aynı proses yaşlandırma işlemine tabi tutmadığımız homojenleştirilmiş numuneye de uygulanmıştır. Deneysel sonuçlarda yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerde östenit ve martenzit başlama ve bitiş sıcaklıkları, entropi ve entalpi değerlerinin değiştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca yaşlandırma işlemine tabi tutulan numunelerin karakteristik dönüşüm sıcaklıklarında homojen numune arasında farklılıklar gözlemlenmiştir. Alaşımların dönüşüm sıcaklıklarında görülen farklılıkların nedeni çökelti fazlarından kaynaklandığı, yaşlandırma sürelerine bağlı olarak çökelti fazlarındaki artış ve bu bağlamda martenzit yüzeylerin yerini çökelti fazlarına bıraktığı XRD ve metalografik gözlem yöntemi ile gözlemlenip desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekil Hafızalı Alaşımlar, CuAlMnFe, Termal Yaşlandırma, Martenzit Dönüşümler, DSC, XRD

Danışman: Doç. Dr. İskender ÖZKUL, Mersin Üniversitesi, Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AGING ON KINETIC PARAMETERS AND CHARACTERISTIC TRANSFORMATION TEMPERATURES IN CuAlMnFe SHAPE MEMORY ALLOYS

Within the scope of the master's thesis project, it is aimed to observe the changes in shape memory properties of alloys by applying aging process on shape memory alloys which are used in many different sectors and which have different behaviors of materials science. Shape Memory Alloys represent a unique class of materials with unique properties such as shape memory effect, pseudoelasticity, high corrosion and exceptional fatigue resistance associated with damping properties. Cu, Al, Mn and Fe elements were used to obtain these alloys. These elements were compacted with the help of hydraulic press machine and obtained by melting method in arc furnace. The obtained CuAlMnFe alloy was subjected to aging process with the aim of changing the internal structures of the materials by heating at 350 °C for different periods. The final stage of the aging process was cooling at room temperature. Then, the treated samples and the characteristic transformation temperature values of the sample before aging were determined by means of Differential Scanning Calorimeter. The enthalpy and entropy values of the samples subjected to aging were calculated by means of transformation temperatures. The same process was applied to the homogeneous sample which we did not subject to aging process. In the experimental results, it was observed that austenite and martensite phase transition start and end temperatures, entropy and enthalpy values of the samples were changed. Furthermore, differences between the homogeneous sample were observed at the characteristic transformation temperatures of the samples subjected to aging. It was observed and supported by metallographic observation and XRD method that the reason for the differences in the transformation temperatures of alloys is caused by precipitate phases and the precipitation phases increased due to the aging times hence, martensite surfaces were replaced with precipitate phases.

Keywords: Shape Memory Alloys, CuAlMnFe, Thermal Aging, Martensite Transition, DSC, XRD

Advisor: Assoc. Prof. Dr. İskender ÖZKUL, Department of Mechanical Engineering, University of Mersin, Mersin.

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi çalışmasının hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve görüşlerinden faydalandığım danışman hocam sayın Doç. Dr. İskender ÖZKUL' a ve deneysel aşamada desteklerini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY' a,

Lisansüstü tez çalışmalarım süresince beraber çalıştığım, her konuda desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Ece KALAY' a,

Hayatımın her aşamasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen, bugünlere gelmemde üzerimde büyük emeği olan annem, babam ve kardeşlerime, bu süreçte her zaman yanımda olan kıymetli eşime ve enerji kaynağım canım kızım Zeynep Lena KURGUN' a;

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma Mersin Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Biriminin 2018-3-TP2-3078 proje numarası ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇ KAPAK	i
ONAY	ii
ETİK BEYAN	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
TABLOLAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
KISALTMALAR ve SİMGELER	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
2.1. Martenzitik Faz Dönüşümü	9
2.1.1 Birinci ve İkinci Dereceden Faz Geçişleri	10
2.1.2 Şekil Hafıza Etkisi	12
2.1.3 Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi	13
2.1.4 Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi	14
2.1.5 Süperelastiklik Etkisi	16
2.2. Şekil Hafızalı Alaşımlarda Termal Yaşlandırma	16
2.3. Şekil Hafıza Alaşımların Karakterizasyonu	17
2.4. Şekil Hafızalı Alaşımlar	18
2.4.1. Au Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımlar	19
2.4.2. NiTi Şekil Hafızalı Alaşımlar	20
2.4.3. Cu Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımlar	22
2.4.3.1. CuZnAl Şekil Hafızalı Alaşımlar	22
2.4.3.2. CuAlNi Şekil Hafızalı Alaşımlar	23
2.4.3.3. CuAlBe Şekil Hafızalı Alaşımlar	23
2.4.3.4. CuAlMn Şekil Hafızalı Alaşımlar	24
2.4.4. Fe bazlı Şekil Hafızalı Alaşımlar	24
2.4.5. Diğer Şekil Hafızalı Alaşımlar	25
2.4.3.5. Yüksek Sıcaklık Hafızalı Alaşımlar	25
2.4.3.6. Manyetik Şekil Hafızalı Alaşımlar	26
2.4.3.7. Şekil Hafızalı Polimer Malzemeler	26
2.4.3.8. Şekil Hafızalı Seramik Malzemeler	27
2.4.3.9. Şekil Hafızalı Jeller	27
2.5. Üretim Teknikleri	27
2.5.1. Döküm ve Tel Çekme Yöntemi ile Üretim	28
2.5.2. Toz Metalürjisi ile Üretim	28
2.5.3. Hızlı Soğutma Yöntemi ile Üretim	29
3. MATERYAL ve YÖNTEM	30
3.1. Yaşlandırma Deneyleri	30
3.2. DSC Analiz Tekniği	36
3.3. X Işını Difraksiyonu Analiz Tekniği	37
3.4. Aktivasyon Enerjisi Hesaplamaları	38
4. BULGULAR ve TARTIŞMA	40
4.1. Yaşlandırma Deneyleri Termal Analizleri	40
4.1.1. CAMF-H1-900 Numunesi Termal Analiz Sonuçları	41
4.1.2. CAMF-1-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları	44
4.1.3. CAMF-2-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları	48
4.1.4. CAMF-3-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları	52

4.1.5. CAMF-4-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları	56
4.1.6. CAMF-5-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları	60
4.1.7. Termal Analiz Sonuçları Kıyaslanması	64
4.2. XRD Analizleri	67
4.2.1. CAMF-H1-900 Numunesi XRD Analiz Sonuçları	67
4.2.2. CAMF-1-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları	67
4.2.3. CAMF-2-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları	68
4.2.4. CAMF-3-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları	69
4.2.5. CAMF-4-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları	69
4.2.6. CAMF-5-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları	70
4.2.7. XRD Analiz Sonuçları Karşılaştırması	71
4.3. Mikro Yapı Analizleri	71
4.4. Aktivasyon Enerjisi Hesaplamaları	75
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	79
5.1. DSC Analiz Sonuçları	80
5.2. XRD Analiz Sonuçları	81
5.3. Mikroyapı Analiz Sonuçları	81
5.4. Öneriler	82
KAYNAKLAR	83
ÖZGEÇMİŞ	89

TABLULAR DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Aktüatör performans karşılaştırma tablosu.	6
Tablo 2.2. Ticari nitinol fiziksel özellikleri tablosu.	21
Tablo 2.3. Yüksek sıcaklık şekil hafıza alaşımları.	25
Tablo 2.4. Şekil hafıza polimerleri ve şekil hafıza alaşımları kıyas tablosu [101].	26
Tablo 3.1. Alaşım elementlerinin kullanım oranları.	30
Tablo 3.2. Isıl işlem deneylerinde kullanılan parametreler.	32
Tablo 4.1. CAMF-H1-900 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	44
Tablo 4.2. CAMF-1-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	48
Tablo 4.3. CAMF-2-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	52
Tablo 4.4. CAMF-3-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	56
Tablo 4.5. CAMF-4-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	60
Tablo 4.6. CAMF-5-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1. Mühendislik malzemelerinin tarihsel gelişimi [1].	2
Şekil 2.2. Aktif malzemelerin aktüatör enerjisi yoğunlukları grafiği [7].	5
Şekil 2.3. Şekil hafızalı alaşımların kullanım alanları.	7
Şekil 2.4. Faz dönüşüm şematik gösterimi.	8
Şekil 2.5. Gibbs fonksiyonunun birinci dereceden türevinin sıcaklığa bağlı değişim eğrisi [57].	11
Şekil 2.6. Saf metal katılaşma eğrisi [58].	11
Şekil 2.7. Gibbs serbest enerjisinin türevinin sıcaklığa bağlı değişim eğrisi [57].	12
Şekil 2.8. Şekil hafıza şematiği [7].	13
Şekil 2.9. Martenzit yapının deforme olmuş martenzit yapı haline geçişi.	14
Şekil 2.10. Tek yönlü şekil hafıza etkisi şematiği [5].	14
Şekil 2.11. Çift yönlü şekil hafıza etkisi şematiği [5].	15
Şekil 2.12. Süperelastiklik şematiği [5].	16
Şekil 2.13. (a) Klasik (b) süperelastik şekil hafızalı alaşımların gerilim-gerinim karşılaştırması.	19
Şekil 2.14. NiTi alaşımının ikili faz diyagramı [54, 80, 81].	22
Şekil 2.15. NiTi ve CuZnAl alaşımlarının üretim işlem adımları [54].	28
Şekil 2.16. Kompaklama İşlem Şeması	29
Şekil 2.17. Hızlı soğutma sistemi şematik gösterimi [103].	29
Şekil 3.1. %99 Saflığa sahip Cu, Al, Mn ve Fe elementleri	30
Şekil 3.2. (a) Hassas terazi (b) Vortex karıştırma cihazı (c) Kompaklama kalıbı	31
Şekil 3.3. Hidrolik pres ve ark ergitme fırın düzeneği.	31
Şekil 3.4. Isıl işlem için kullanılan kül fırını.	32
Şekil 3.5. Ergitilmiş numunelerin bakalite alınmış durumları	33
Şekil 3.6. Numune parlatma cihazı.	34
Şekil 3.7. 2.5 gr (FeCl ₃ -6H ₂ O)-48 ml CH ₃ OH ve 10ml HCl dağlama çözeltisi.	34
Şekil 3.8. Dağlama işlemi operasyonu.	35
Şekil 3.9. Mikroskop görseli.	35
Şekil 3.10. Shimadzu DSC-60A Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı.	36
Şekil 3.11. Tipik DSC eğrisi gösterimi [97].	37
Şekil 3.12. XRD analiz cihazı.	38
Şekil 3.13 Aktivasyon Enerjisi	38
Şekil 4.1. CAMF-H1-900 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	41
Şekil 4.2. CAMF-H1-900 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	42
Şekil 4.3. CAMF-H1-900 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	42
Şekil 4.4. CAMF-H1-900 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	43
Şekil 4.5. CAMF-H1-900 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	43
Şekil 4.6. CAMF-H1-900 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	44
Şekil 4.7. CAMF-1-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	45
Şekil 4.8. CAMF-1-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	46
Şekil 4.9. CAMF-1-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	46
Şekil 4.10. CAMF-1-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	47
Şekil 4.11. CAMF-1-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	47
Şekil 4.12. CAMF-1-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	48
Şekil 4.13. CAMF-2-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	49
Şekil 4.14. CAMF-2-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	50
Şekil 4.15. CAMF-2-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	50
Şekil 4.16. CAMF-2-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	51

	Sayfa
Şekil 4.17. CAMF-2-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	51
Şekil 4.18. CAMF-2-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	52
Şekil 4.19. CAMF-3-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	53
Şekil 4.20. CAMF-3-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	54
Şekil 4.21. CAMF-3-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	54
Şekil 4.22. CAMF-3-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	55
Şekil 4.23. CAMF-3-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	55
Şekil 4.24. CAMF-3-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	56
Şekil 4.25. CAMF-4-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	57
Şekil 4.26. CAMF-4-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	58
Şekil 4.27. CAMF-4-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	58
Şekil 4.28. CAMF-4-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	59
Şekil 4.29. CAMF-4-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	59
Şekil 4.30. CAMF-4-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	60
Şekil 4.31. CAMF-5-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	61
Şekil 4.32. CAMF-5-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	62
Şekil 4.33. CAMF-5-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	62
Şekil 4.34. CAMF-5-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	63
Şekil 4.35. CAMF-5-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	63
Şekil 4.36. CAMF-5-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	64
Şekil 4.37. Östenit faz başlangıç sıcaklığı A_s (°C)	65
Şekil 4.38. Östenit faz bitiş sıcaklığı A_f (°C)	65
Şekil 4.39. Martenzit faz başlangıç sıcaklığı M_s (°C)	66
Şekil 4.40. Martenzit faz bitiş sıcaklığı M_f (°C)	66
Şekil 4.41. CAMF-1-350 numunesine ait XRD grafiği	67
Şekil 4.42. CAMF-1-350 numunesine ait XRD grafiği	68
Şekil 4.43. CAMF-2-350 numunesine ait XRD grafiği	68
Şekil 4.44. CAMF-3-350 numunesine ait XRD grafiği	69
Şekil 4.45. CAMF-4-350 numunesine ait XRD grafiği	70
Şekil 4.46. CAMF-5-350 numunesine ait XRD grafiği	70
Şekil 4.47. Numunelere ait XRD grafikleri	71
Şekil 4.48. CAMF-H1-900 numunesine ait mikro yapı görüntüsü	72
Şekil 4.49. CAMF-1-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü	72
Şekil 4.50. CAMF-2-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü	73
Şekil 4.51. CAMF-3-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü	73
Şekil 4.52. CAMF-4-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü	74
Şekil 4.53. CAMF-5-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü	74
Şekil 4.54. CAMF-H1-900 numunesine ait Kissinger eğrisi	75
Şekil 4.55. CAMF-1-350 numunesine ait Kissinger eğrisi	75
Şekil 4.56. CAMF-2-350 numunesine ait Kissinger eğrisi	76
Şekil 4.57. CAMF-3-350 numunesine ait Kissinger eğrisi	76
Şekil 4.58. CAMF-4-350 numunesine ait Kissinger eğrisi	77
Şekil 4.59. CAMF-5-350 numunesine ait Kissinger eğrisi	77
Şekil 4.60. Aktivasyon enerjileri eğrisi	78

KISALTMALAR ve SİMGELER

Kısaltma/Simgesi	Tanım
a	Termal genleşme katsayısı
A_f	Martenzitik faz dönüşümünde östenit fazın bitiş sıcaklığı
A_s	Martenzitik faz dönüşümünde östenit fazın başlama sıcaklığı
DSC	Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı
E	Elastikiyet modülü
EDS	Enerji dağılımlı x ışını analizi
G	Gibbs Serbest enerjisi
H	Entalpi
M_f	Martenzitik faz dönüşümünde martenzit fazın bitiş sıcaklık
M_s	Martenzitik faz dönüşümünde martenzit fazın başlama sıcaklığı
PE	Pseudoelasticity
R	Evrensel gaz sabiti
S	Entropi
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
SHA	Şekil hafızalı alaşım
SHE	Şekil hafıza etkisi
T_0	Termodinamik Denge sıcaklığı
ν	Poisson oranı
XRD	X ışını difraksiyonu
α_1	6R tipindeki martenzit yapı
β_1	18R tipindeki martenzit yapı
ε	Gerinim
σ	Gerilim

1. GİRİŞ

İlk sanayi devrimi 18. yüzyılda buhar makinasının icadı ile başladı ve günümüzde akıllı fabrikalar ile endüstri 4.0 adı altında gelişimini sürdürmeye devam etmektedir. Teknolojinin doymak bilmez bir iştahla geliştiği, insan işçilerin yerini robotların aldığı, otomobillerin otonomlaşma yolunda ilerlediği, kilometrelerce ötelere milisaniye farklarla yapılan cerrahi operasyonların arttığı ve karadeliklerin fotoğraflandığı günümüzde, klasik malzemelerin kabiliyetleri yeterli gelmemekte ve yeni malzeme ihtiyacı doğmaktadır. Bu ihtiyacın karşılanması için bilim insanları fiyat performans dengesinin yakalanması ve yeni ufukların açılması amacıyla yeni malzeme arayışlarını süratle devam ettirmektedirler.

Mühendisler için mevcut olan alaşım sayısı 160.000 ve üstü olarak tahmin edilmektedir. Standardizasyon süreçleri sayıyı azaltmaya çalışsa da yeni çok farklı özelliklere sahip yeni malzemelerin keşfedilmeye devam edilmesi, sayıyı daha da genişletmektedir. Fakat şu anda bile kullanım olanağı bulabildiğimiz bazı malzemeler geleceğin süper alaşımları olarak tanımlanmakta ve değerleri her geçen gün artmaktadır [1].

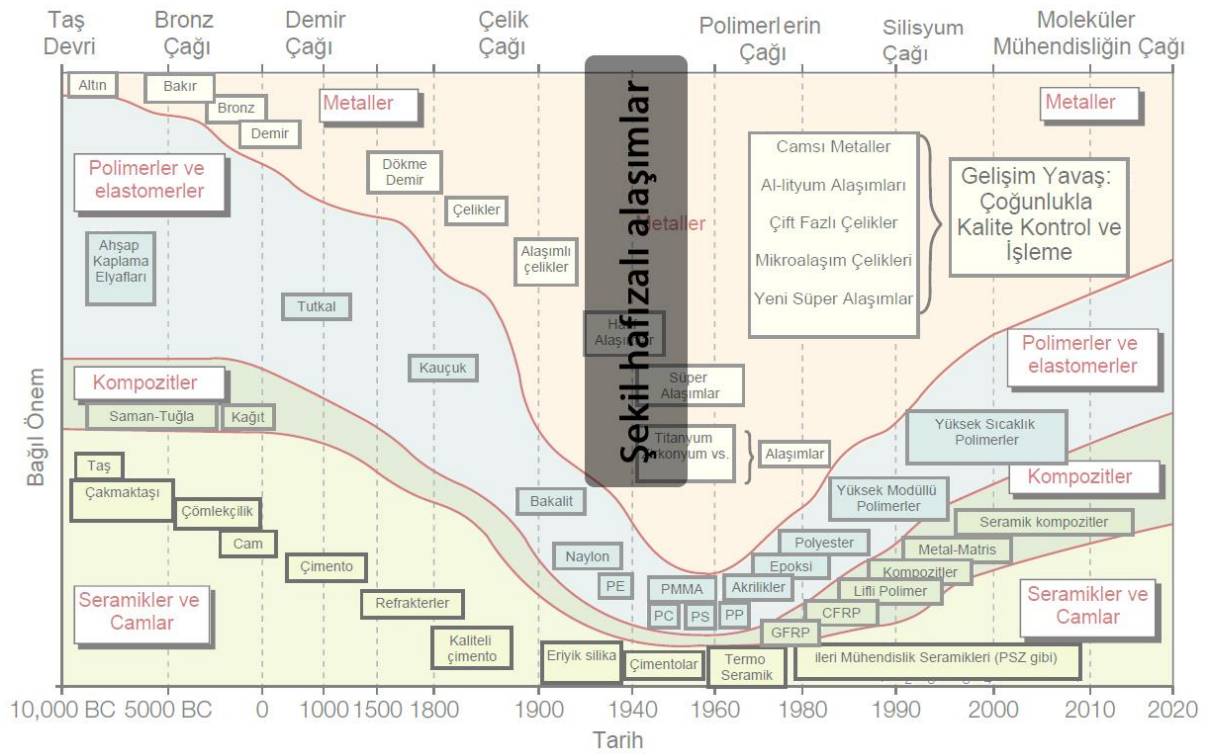
Yeni malzemelere önemli örneklerden biri olarak kabul edilen şekil hafızalı alaşımlar üzerine çalışmalar yapılmış ve yapılmaya devam etmektedir. Şekil hafızalı alaşımlar gerilim, sıcaklık, elektrik veya manyetik alan gibi etkilerle deformasyon öncesi kaybedilen formlarını yeniden elde ederek hafıza davranışını sergileme olarak tanımlanırlar. Sıcaklık, gerilim, elektrik ve manyetik alan gibi uyaranlara tepki veren şekil hafızalı alaşımlarda, faz geçişleri denilen dönüşümler, şekil hafızası etkisi ve süper elastikiyet gibi olaylarla sonuçlanır.

Şekil hafızalı alaşımlarda faz dönüşümleri difüzyonsuz olarak gerçekleşir. Difüzyonsuz faz dönüşümleri; en genel ifade ile, yüksek sıcaklık fazında belirli bir kristal yapıda bulunan malzemenin basınç, sıcaklık, gerilme veya bunların farklı kombinasyonları etkisiyle daha küçük serbest enerjili düşük sıcaklık fazındaki farklı bir kristal yapıya dönüşümü olarak tarif edilir. Difüzyon gerçekleşmediği için dönüşüm öncesi malzemedeki atomik komşuluklar dönüşümden sonra da aynıdır. Bu nedenle difüzyonsuz dönüşümlere askeri dönüşümler de denmektedir [2].

Yani şekil hafızalı alaşımları mevcut şekillerine geri dönme işini dışarıdan enerji alma yolu ile komşuluklarını korudukları atom düzenlerini tekrar eski düzene kavuşturma yeteneğine sahip özel malzemeler olarak tanımlamak mümkündür.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Konuyu tam anlamıyla kavrayabilmek adına insanlık tarihinde gerilere gitmek gerekir. İnsanlığın uygarlık yolundaki kilometre taşları olarak adlandırılan ilk adımlar, altın ve bakır gibi doğal metallerin saf metal olarak keşfedilmesiyle atılmıştır. Şekil 2.1 'de gösterilen Ashby haritası [1], 12 bin yılı kapsayan zaman diliminde malzemelerin kullanımındaki gelişimin özetini sunmaktadır. Gelişim incelendiğinde, insanoğlunun alaşımlar ile ilk münasebetinin bronz çağına kadar dayandığı görülmektedir [3].



Şekil 2.1. Mühendislik malzemelerinin tarihsel gelişimi [1].

Alaşımlama işleminin tamamıyla tesadüfi bir keşif olduğu düşünülmektedir. Mağaralardaki ilkel yangınlarda, bakır cevherleri arsenik cevherleriyle gelişigüzel bir şekilde ilk bakır arsenik karışımı olan arsenik bronz M.Ö. 3000 de tesadüf eseriyle keşfedildi. Bakırın kasıtlı olarak alaşımlanması ise M.Ö. 2500 de kalay ile oldu ve günümüze kadar gelen bronz alaşımı ortaya çıkarıldı, bu olay Bronz Çağının doğmasına da neden olmuştur. Arseniğin insan sağlığına zararı ve kalay bronzlarının mekanik özellikler arsenik bronzlarından daha üstün olması gibi nedenlerden dolayı kalay bronzları günümüze kadar gelebilmiştir [3].

Antik dönemde sadece yedi metal biliniyordu, bunlar altın, bakır, gümüş, demir, kurşun, kalay ve cıva idi. Ancak diğer metallerin keşfedilmesi bilimsel devrimin birkaç yüzyıl boyunca ortaya çıkmasını beklemek zorunda olduğundan uzun sürmüştür. Bakır-kalay alaşımlarının inter

metaliklerinin eski zamanlarda kullanıldığından bahsetmek ilginçtir. Hindistan ve Çin de dâhil olmak üzere, Eski Dünya'nın farklı bölgelerinde, aynaların gümüş gibi yansımaları kolaylaştıran yüksek sertlikleri nedeniyle bronzlardan yararlanılmıştır. Tarih dördüncü yüzyılı gösterdiğinde Çin'de bakır ve nikelin sülfür cevherleri birlikte eritilerek bakır-nikel alaşımı elde edildiği görülmüştür. On ikinci yüzyılda Avrupa'da ise paslanmaz çelik icat edilmeden önce yaygın olarak kullanılan ve beyaz bakır olarak bilinen gümüşe paslanmaya dayanıklı alaşım oluşturmak için çinko elementi eklenmiştir [3].

İlk sanayi devrimi 18. yüzyılın ilerleyen yarısında İngiltere'de başladığında, insanlar tarafından gittikçe daha fazla element keşfedildi ve üretildi. Bu yeni elementlerden ileri alaşımlar dahil olmak üzere çok sayıda metalik malzeme geliştirilmiştir. Farklı kompozisyonlarla sentezlenmiş ve çeşitli işlem yolları ile üretilmişlerdir. Bugüne kadar, her biri bir ana metalik elemente dayanan yaklaşık 30 alaşım sistemi geliştirilmiş ve çeşitli ürünler için kullanılmıştır [4].

Bazı önemli alaşımlar mühendisler tarafından geliştirilmiştir. Örneğin, Michael Faraday, pota çeliğini yeniden üretme çabalarında ilk alaşımlı çeliklerin bazılarını bulmuş ve alaşımlı çeliklerin babası olarak anılmaya başlamıştır. 1880'lerin ortalarında Hall-Héroult işleminin ticarileşmesinden sonra alüminyum alaşımları üretildi, hafif ve kuvvetli Al-Cu-(Mg) ve Al-Zn-Mg-(Cu) gibi sertleştirilebilen alaşımlarda büyük ilerleme sağlandı. Bu ilerleme ile I. Dünya Savaşı sırasında (1914-1918) uçak endüstrisinin patlama seviyesinde genişlemesinde en büyük katkıyı sağlayan hafif ve güçlü uçak gövdelerinde kullanılan AlZnMg (Cu) alaşımı geliştirilmiştir [3].

Başka bir örnek olarak, 1900'lerin başında tanıtılan kesici takımlar için yüksek hızlı çelik verilebilir. Kesme hızının daha da yüksek olması için, 1930'larda tungsten karpit kobalt kompozitlerinin sement veya sinterlenmiş karbürleri tanıtılmıştır. Aynı zamanda, 1930'larda ABD'de süper alaşım gelişimi başlar ve gaz türbini teknolojisinin talepleri ile çalışmalar hızlanır. Ferritik, östenitik ve martenzitik paslanmaz çelikler 1910 civarında neredeyse aynı zamanda geliştirilir [3].

1940'larda hafif alaşımlar ve özel alaşımlar sanayide yoğun olarak kullanılmaya başladı. 1950'lerde ise mühendislik malzemeleri denilince sadece metal akla geliyordu. Mühendislere metalurji dersleri verilir fakat bu dönemlerde diğer malzemelerden zar zor söz edilirdi. Elbette diğer malzeme sınıflarında da gelişmeler de olmuştur. Örneğin, geliştirilmiş çimento, camlar, polimerler, kauçuk, bakalit, polietilen olarak adlandırılan polimerlerden bahsedilebilir. Ancak metal dışı bu malzemelerin, bu tarihlerde toplam malzeme pazarındaki payları azdı. 1950'den sonra her şey değişti. Polimer ve kompozit endüstrileri hızla gelişim sağladı ve yeni yüksek performanslı seramik üretiminin büyümesi ile ilgili gelişmeler burada da genişlemeye devam etti. Yine de çelik günlerinin bittiğini hayal edilmemelidir. Çelik üretimi, tüm dünya metal üretiminin %90'ını oluşturuyordu. Benzersiz mukavemeti, sünekliği, tokluğu ve düşük fiyat kombinasyonu, çeliği yeri doldurulamaz yapmaya devam ediyordu [1].

Geleneksel mühendislik malzemelerinin özel özelliklerini ortaya çıkarmanın yanı sıra, yeni ve gelişmiş materyallerin keşfedilmesi için hem bilimsel hem de endüstriyel geniş bir araştırma akışı ve çok sayıda karmaşık proje bulunmaktadır. Günümüzde, şaşırtıcı özelliklere sahip bazı yeni malzemeler hakkında bilgi rapor edildiğinde, keşfin insan yapımı bir malzeme olduğu varsayılmaktadır. İnsan tarafından icat edilen, tasarlanan ve üretilen bu tür malzemelerden en bilinenleri ve zaten mühendislik uygulamalarında çok güçlü bir konuma sahip olan, büyük olasılıkla plastik ve/veya kompozitleridir [5].

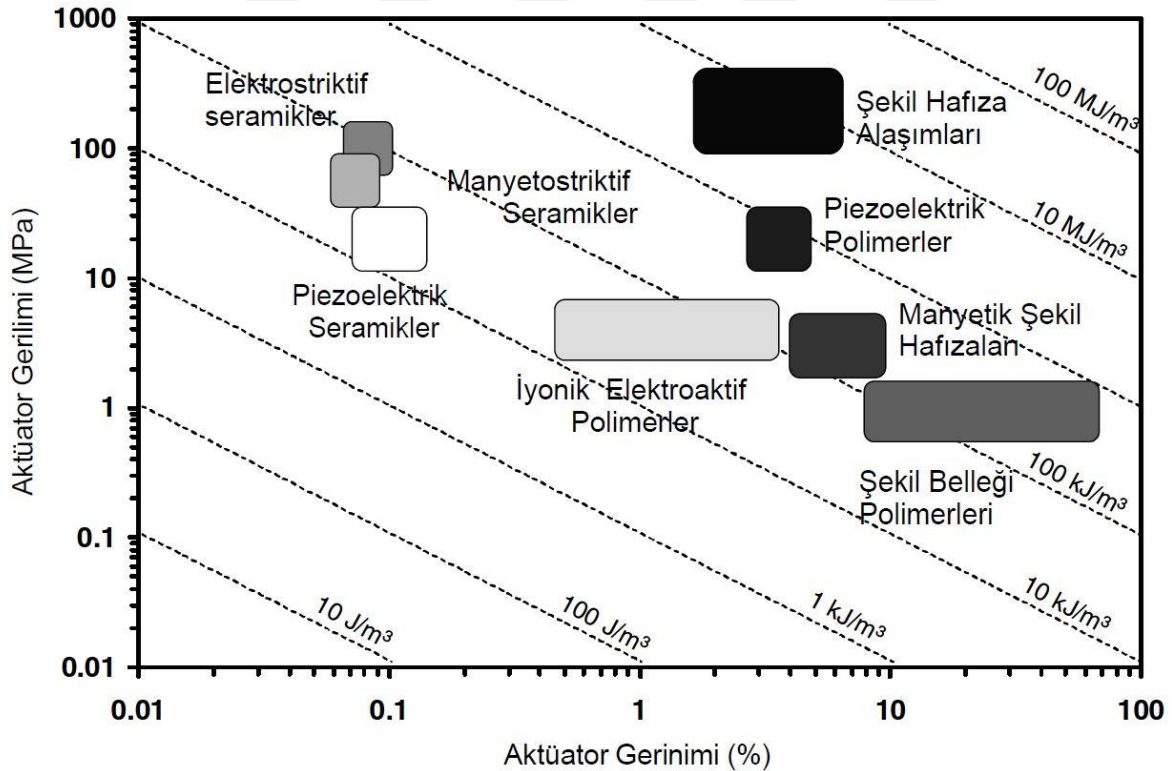
Bir elementin en az bir başka element ile birleşmesinden oluşan homojen karışım olan alaşımlardan bahsetmeden önce özellikle Hume-Rothery kurallarının bilinmesi gereklidir. Hume-Rothery 'in 1920'lerde ve 1930'lardaki çalışmaları metalurji sanatını bilime dönüştürdü ve katı hal fiziğinin ortaya çıkmasına katkıda bulunmuştur. Hume-Rothery kuralları, bileşen elementlerin atom çaplarındaki farklılık, elektronegatiflik farkı ve alaşımın elektron konsantrasyonu (elektron/atom) oranı bakımından alaşım oluşumu için şartları belirtir [6]. Hume-Rothery alaşımlarının oluşum kuralları önemini korumaya devam etmektedir. Örneğin bakır atomu, boyutu ve kimyasal özellikleri bakımından metallerin ortasında yer aldığı söylenebilir bu nedenle en iyi eritici olarak bilinir. Bakır birçok metali en az %5 oranında eriterek katı eriyik oluşturur (Al, Au, Cd, Mg, Pt, Sn, Zn vb.) Gümüş için de aynı şeyler söylenebilir. Fakat bir başka örnek olan alüminyum ve kurşundan katı eriyik diğer bir değişle alaşım oluşmaz, nedeni ise atom çapları arası bağıl farkın %15 den büyük olmasıdır. Bu iki metal karıştırılıp soğumaya bırakıldığında, sonunda ortada bir alaşım oluşmadığı ve kurşun ile alüminyum katı metalleri elde edilir.

Yüzyıllar boyunca, metaller yapısal malzemeler olarak önemli bir rol oynamıştır. Bilim ve teknolojiye gelişmeler ve mikroyapı ve işleme tekniklerinin malzeme davranışı üzerindeki etkilerinin daha iyi anlaşılması ile malzeme bilimi alanı son yıllarda kökten iyileşmiştir. Çeşitli uygulamalar için farklı malzeme özellikleri (mekanik, termal, elektrik vb.) oluşturma yeteneği, yeni alaşımların ve kompozitlerin geliştirilmesini sağlamıştır. Hem sıkı yapısal gereklilikleri karşılayan hem de ek mühendislik işlevselliği sağlayan (örn. algılama, aktifleştirme, elektromanyetik koruma) özel özelliklere sahip daha hafif ve daha güçlü malzemelere olan talep, çok işlevli malzemeler olarak adlandırılan yeni bir malzeme dalı oluşturmuştur. Algılama ve aktifleştirme yeteneklerini sergileyen uzmanlaşmış birçok işlevli malzeme alt grubu aktif malzeme olarak bilinir [7].

Algılamada, bir mekanik sinyal mekanik olmayan bir çıktıya (örneğin voltaj) dönüştürülürken, bir aktüatör mekanik olmayan bir girişi (örneğin elektrik gücünü) mekanik bir çıktıya dönüştürür. Genel olarak aktif malzemeler, mekanik olmayan bir alana (termal, elektrik, manyetik, optik vb.) maruz kaldıklarında mekanik bir tepki gösterir. Bu malzemelerin mekanik tepkisi, tipik olarak, termal genleşme gibi geleneksel malzeme davranışından kaynaklanan

tepkiden daha büyük bir veya daha fazla emirdir. Bazı aktif malzeme örnekleri arasında piezoelektrik ve elektrostriktif (mekanik ile elektrik alanların bağlanması), piezomanyetik ve manyetostriktif (mekanik ile manyetik alanların bağlanması) ve şekil belleği malzemeleri (termal ile mekanik alanların bağlanması) bulunur. Aktif malzemeler doğrudan veya dolaylı birleştirme sergileyen malzemeler olarak ayrıca ikiye bölünebilir. Piezoseramikler, piezoelektrik polimerler, manyetostriktif seramikler, şekil hafızalı alaşımlar ve manyetik şekil hafızalı alaşımlar, doğrudan birleşme gösteren aktif malzemelere örneklerdir. Bu, mekanik veya mekanik olmayan alanın bir girdi, diğeri çıktı olarak hizmet edebileceği anlamına gelir [7].

Aktif bir malzemenin aktüatör uygulamaları için doğrudan bağlantıya uygunluğu iki temel girdi olan, aktüatör enerji yoğunluğu (birim hacim başına mevcut iş çıkışı) ve malzemenin aktüatör frekansına bağlıdır. İdeal bir aktif malzeme hem yüksek aktüatör enerji yoğunluğuna hem de yüksek aktüatör frekansına sahip olacaktır. Şekil 2.2 'de, bazı ortak aktif maddelerin çalıştırma enerji yoğunluklarını karşılaştırması görülmektedir. Harekete geçirme enerjisi yoğunluğu, Şekil 2.2 'de noktali çizgilerle gösterilmektedir ve burada aktif malzemenin sabit gerilme altında çalıştığını varsayarak harekete geçirme gerilmesi ile harekete geçirme gerginliğinin ürünü (harekete geçiricinin darbesiyle ilişkili olarak) tanımlanmaktadır [7].



Şekil 2.2. Aktif malzemelerin aktüatör enerji yoğunlukları grafiği [7].

Şekil hafızalı alaşımları, sıcaklık arttığında şekillerini geri kazanma özelliğine sahip benzersiz bir şekil belleği malzemesi sınıfıdır. Şekil hafızalı alaşımlar, uygulanan mekanik

döngüsel yüklemeye maruz kaldıklarında, geri dönüşümlü bir histeretik şekil değişikliğinden geçerek mekanik enerjiyi sönümleyebilirler. Şekil hafızalı alaşımların bu benzersiz özellikleri onları algılama ve çalıştırma, darbe ve titreşim sönümleme uygulamaları için popüler hale getirmiştir.

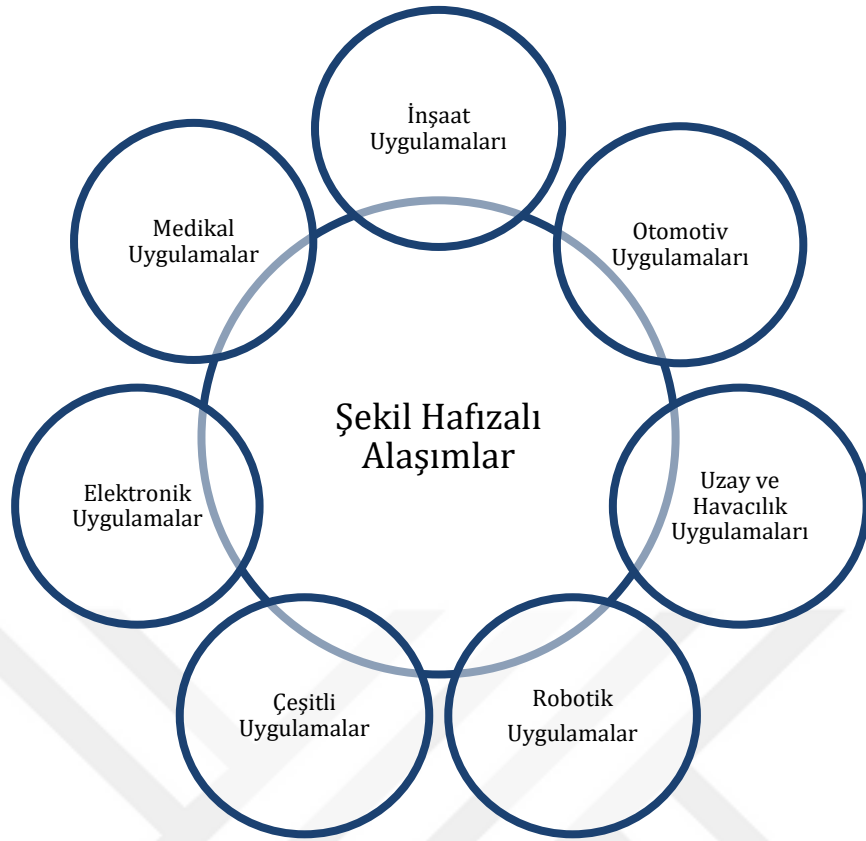
Tablo 2.1. Aktüatör performans karşılaştırma tablosu.

Aktüatör tipi	Gerilme	Gerinim	Verim	Birim Hacim İşi	Birim Hacim Gücü
	[MPa]	[%]	[%]	[J/cm ³]	[W/cm ³]
Nitinol	200	10	3	10	30
Piezoseramik	35	0.2	50	0.035	175
Tek kristal piezoelektrik	300	1.7	90	2.55	15000
İnsan kası	0.007-0.8	1-100	35	0.035	0.35
Hidrolik	20	50	80	5	20
Pnömatik	0.7	50	90	0.175	3.5

Tablo 2.1 'e bakıldığında, NiTi şekil hafıza alaşımı, kısa bir tepki süresi veya yüksek verimlilik için kritik bir gereksinim olmadan, önemli yer değiştirme ve çalıştırma kuvveti sağlayan aktüatör tasarımcıları için açık bir seçim olacaktır. Bu, NiTi şekil hafıza alaşımını çeşitli endüstriyel uygulamalar için akıllı yapılar ve akıllı sistemler için cazip bir aday yapar [8].

Şekil hafızalı alaşım veya "akıllı alaşım" ilk olarak Arne Ölander (1932) tarafından keşfedildi ve "şekil hafızası" terimi ilk kez Vernon (1941) tarafından polimerik dış materyali için tanımlandı. Şekil hafızalı malzemelerin, William Buehler ve Frederick Wang, 1962 'de nitinol olarak da bilinen (materyal bileşimi ve keşif yerinden elde edilen, yani NiTi ve Naval Ordnance Laboratory bir birleşimi) bir nikel-titanyum (NiTi) alaşımında şekil hafızası etkisini bulununca önemi fark edildi [9, 10].

Şekil hafızalı alaşımlara mühendislik ve teknik uygulamalardaki talep, tüketici ürünleri ve endüstriyel uygulamalar da dâhil olmak üzere birçok ticari alanda artmaktadır. Şekil 2.3 'de uygulamalara ait şema gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Şekil hafızalı alaşımların kullanım alanları.

Otomotiv uygulamalarında; modern araçlarda daha iyi performans gösteren daha güvenli, daha konforlu araçlara olan talep nedeniyle algılayıcı ve aktüatör sayısı muazzam bir şekilde artmaktadır. Gelişmekte olan otonom sürüş teknolojisi, otomotiv uygulamalarındaki elektromanyetik aktüatörlere alternatif olarak şekil hafızalı alaşım aktüatörleri için geniş bir fırsat yelpazesi sunmaktadır. [11-13]. Bu uygulamalara, radyatörler, yakıt sistemleri, aküler, airbag sistemleri [14], dikiz aynası [15], gibi örnekler gösterilebilir.

Uzay ve havacılık uygulamalarında; şekil hafızalı alaşımların 1970'lerde F-14 avcı uçlarındaki hidrolik hatlarında kullanımındaki başarısından bu yana [16], bu alaşımlar benzersiz özellikleri ile havacılık uygulamalarında daha fazla görülür olmuştur [17-20]. Bu uygulamalara, aktüatörler [16], yapısal konektörler, titreşim damperleri, sızdırmazlık elemanları, açma veya yerleştirme mekanizmaları, şişirilebilir yapılar [21, 22], manipülatörler [23, 24] ve navigasyon uygulamaları [19, 25] örnek gösterilebilir.

Robotik uygulamalarda; özellikle 1980'lerden bu yana mikro-aktüatörler veya yapay kaslar olarak adlandırılan sistemler çok çeşitli ticari robotik sistemlerde kullanılmıştır [26, 27]. Robotik uygulamalara, yarası robot [28], festo yusufoçuk robotu ("BionicOpter" olarak da bilinen "yusufoçuk", 13 derecelik bir serbestliğe sahiptir, havada asılı kalabilir ve her yöne hareket edebilir.) [29], batmav projesi [30, 31] örnek gösterilebilir.

Biyomedikal uygulamalarda; 1962 'de Buehler tarafından nitinolde şekil hafızası etkisinin keşfedilmesinden sonra, bu materyali diş hekimliğinde implantlar için kullanmayı önerdiler ve birkaç yıl sonra, bir NiTi alaşımından yapılan ilk süper elastik gergiler 1971 'de Andreasen tarafından tanıtıldı [9, 32]. Biyomedikal uygulamalara, ortodontide [33, 34], ortopedide [35-37], gastroenterolojide [38, 39] ve ürolojide [40, 41] örnekler gösterilebilir.

İnşaat uygulamalarında; şekil hafızalı alaşımlar inşaat mühendisliği uygulamalarında aşırı, tekrarlayan ve çeşitli yükleme koşullarına (örneğin deprem) dayanma kabiliyeti ile birlikte yüksek sönümlenme özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir [42, 43]. İnşaat uygulamalara, sütunlarda, kirişlerde, sütun ve kirişlerin bağlantı elemanlarında, köprü ve bina yapılarında yataklamalar [44] örnek gösterilebilirler.

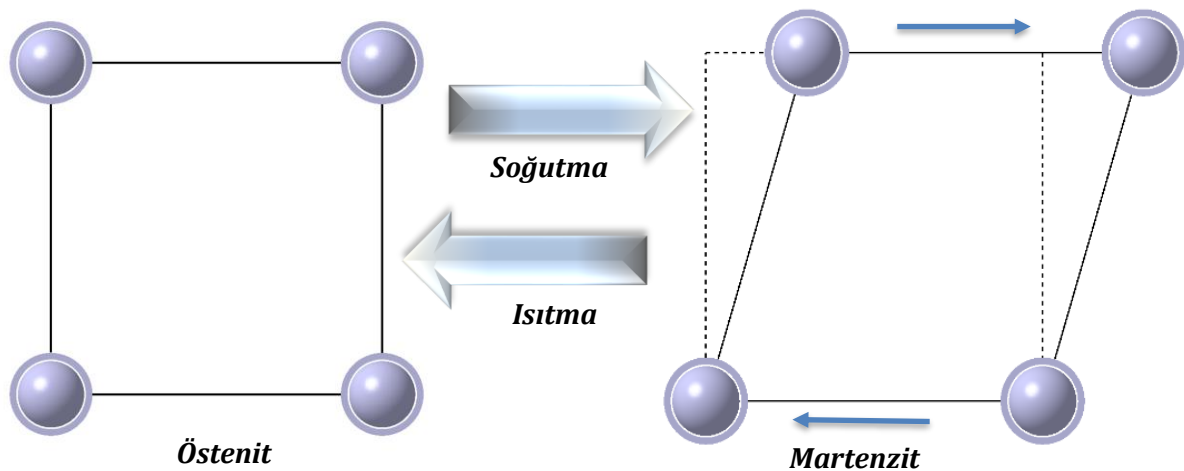
Elektronik uygulamalarda, sıcaklık sensörleri [45], pozisyon geri bildirimi [46], direnç geri bildirimi [47, 48], limit eğrisi [48] ve adaptif sıfırlama [49] gibi elektronik kontrol cihazları gibi ticari uygulamalarda aşırı gerilme ve aşırı ısınma sorunları çözümü için şekil hafızalı alaşımlar kullanılır.

Şekil hafızalı alaşımlar, sıcaklık veya manyetik alan gibi dış mekanik olmayan uyarıcılara maruz kaldıklarında, işlevselliklerin temel mikroyapısal değişikliklerden kaynaklandığı geniş bir akıllı malzeme sınıfının alt kümesidir [50, 51].

Termal olarak yanıt veren şekil hafızalı alaşımlarda, kararlı bir yüksek sıcaklık östenitik fazı ve düşük sıcaklıklı martenzitik faz arasındaki tersinir katı-katı, difüzyonsuz termoelastik faz dönüşümleri, şekil hafıza etkisi ve süper esneklik gibi ilginç olayları gösterir [51].

Faz dönüşümleri, uzun menzilli atom difüzyonundan ziyade dik kafes çarpıklıklarının (ikizlenme) bir sonucudur [7, 52].

Şekil 2.4 'de faz dönüşümü şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Faz dönüşüm şematik gösterimi.

2.1. Martenzitik Faz Dönüşümü

Maddenin içyapısının özellikleri, maddeyi oluşturan atomların sıcaklık ve basınç koşullarına göre dizilimi karakteristiğine faz denir. Bir başka deyişle, malzemeler üzerinde homojen sınırlarla ayrılmış ve özellikleri birbirlerinden farklı olan alanlara faz denir. Malzemedeki bileşim oranı, sıcaklık veya basınçtaki herhangi bir değişim faz dönüşümüne sebep olabilmektedir.

Yapısal faz dönüşümleri, difüzyonlu ve difüzyonsuz olmak üzere iki farklı grupta incelenir. Martenzitik dönüşümler, atomların zamandan bağımsız ani hareketi ile oluştuğundan dolayı difüzyonsuz dönüşümler grubunda yer alırlar. Martenzit terimi ilk önce bu mikro yapıyı su verilmiş çelikte ilk gözlemleyen Alman metalürji Profesörü Adolf Martens 'in onuruna verilmiştir. Yavaş soğutma ile elde edilene kıyasla, yüksek sıcaklıktan su verilmiş demir-karbon çeliği çok ince ve keskin bir mikro yapıya sahiptir ve çok daha serttir. Su verilmiş çeliklerin mekanik özellikleri ve yapısı, teknolojik önemi nedeniyle uzun süredir çalışılmaktadır. Su verilmiş çeliğin yapısına, Sorby 'nin ilk çalışmasını büyük ölçüde artıran ünlü öncü metalürji Profesörü Adolf Martens 'dir. İlk olarak, sertleştirilmiş ancak temperlenmemiş çeliklerin mikro yapısını belirtmek için belirsiz bir şekilde kabul edilmiştir. Su verilmiş çeliğin temel özellikleri daha iyi bilindiği için, kelimenin anlamı, benzer özelliklerin ortaya çıktığı demir dışı alaşımlara uzatıldığı gibi yavaş yavaş açıklığa kavuşturulmuştur. Martenzit terimi zaman zaman biraz belirsiz kullanılsa da kelimenin kullanımında kritik bir kısıtlama vardır. Bir maddenin yapısının martenzitik yapı olarak adlandırılabilmesi için belirli özelliklere sahip olması gerekir; benzer şekilde, bir faz dönüşümünün martenzitik dönüşüm olarak adlandırılabilmesi için belirli özelliklere sahip olması gerekir [53].

Bazı alaşımlarda, özellikle de dönüştürme sıcaklığı düşükse, ikizlenme de oluşabilir. Bu tür ikizler, küçük şekil değişimleri olan dönüşümler hariç, genellikle çok ince olmalıdır, çünkü kalın ikizler kenarlarına yakın büyük gerginlikler üretir. Bu anlamda, "iç ikiz" terimi onu normal ikizden ayırt etmek için kullanılır, ancak "ikiz hata" terimi ikiz sınırın varlığını vurgulamak için daha uygun olabilir. İlk önce optik mikroskop altında görülebilecek ve x-ışını kırınımı ile doğrulanabilecek kadar büyük olan bir ikiz için "dönüşüm ikizi" terimini kullandı. Burada açıklanan iç ikizden farklıdır. Greninger 'in dönüşüm ikizi belki iki dönüşüm değişkeni, biri diğeri kristalografik bir ikiz, ya da yeniden kristalleşme ikizleri olabilir. Günümüzde ortak kullanımda dönüşüm ikizi terimi "iç ikiz" ile eş anlamlıdır. Kısacası, martenzit toplu atomik hareketler tarafından üretildiğinden, kaçık, istifleme hataları ve ikiz faylar gibi kafes kusurları kaçınılmaz olarak ortaya çıkmaktadır. Dönüşüm, gerilim büyük olduğunda miktarları büyük, gerilim küçük olduğunda küçüktür. Bu gibi kafes kusurlarının varlığı martenzitin önemli bir özelliğidir ve bu kusurlar martenzitin anlamlı bir tartışmasında ihmal edilemez [53].

Faz dönüşümünün gerçekleşebilmesi için fazın ilk durumunun son durumuna göre daha kararsız bir yapıda olması beklenir diğer bir deyişle sabit sıcaklık ve basınçtaki faz dönüşümü Gibbs serbest enerjisi ile belirlenir. Bir sistemin Gibbs Enerjisi,

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (1)$$

şeklinde ifade edilir. Burada S entropi (sistemin düzensizlik ölçüsü), T mutlak sıcaklık ve H entalpi (sistemin ısı kapasite ölçüsü) olarak tanımlanır. Entalpi;

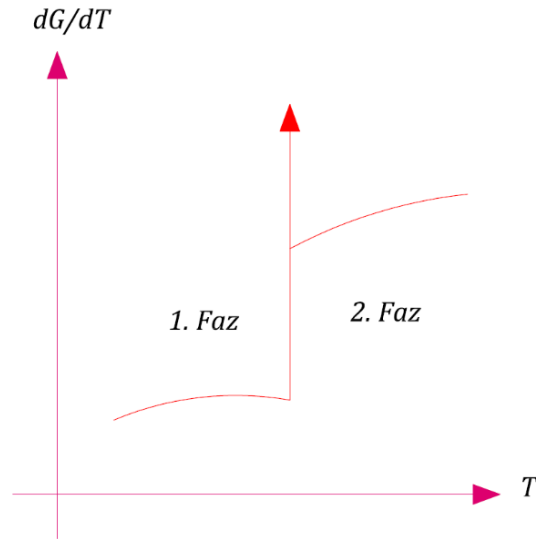
$$H = E + PV \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. E sistemin iç enerjisi, P basınç ve V hacim olarak tanımlanır. Sistemin iç enerjisi atomların kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır.

Şekil hafızalı alaşımlarda östenit fazdan martenzit fazına geçiş sıcaklığına bağımlı bir faz dönüşümü olduğundan bu faz dönüşümü aynı zamanda termoelastik bir dönüşüm olarak da isimlendirilir. Termoelastik dönüşüm dışardan verilen sıcaklık ile kristal kafes yapısının daha düşük enerjili bir yapıya geçmesi sonucu atomik düzeyde hareketlilik sağlar ve bunun sonucu olarak şekil geri kazanımı gerçekleşir. Termoelastik dönüşüm atomik düzeylerde ortaya çıkar. Mikro düzeydeki toplu atom hareketleri maddenin tamamında makro düzeyde gözlemlenir. Fakat bu atom hareketleri anında atomların birbirlerine olan komşuluklarına değişiklik gözlenmez ve bu sayede şekil hafızası kazanmış olur. Martenzitik dönüşümü bu nedenlerle difüzyonsuz bir katı hal faz değişimi örneği sergiler [54]. Bütün bu sistemler dikkate alındığında martenzitik faz dönüşümü ısı, mekanik zorlanma ve elektrik enerjisi ile sistemde var olan atomların birbiri ile yer değiştirmesi olarak tanımlanabilir [55]. Martenzitik faz geçişleri birinci dereceden katı-katı faz geçişlerine örnek olarak gösterilmektedir. Faz dönüşümü esnasındaki geçiş sıcaklığının davranışı faz geçişinin derecesi olarak tanımlanmaktadır. Temel olarak iki kısma ayrılması mümkün olan bu geçişlerden birinci dereceden faz geçişi (süreksiz), ikinci dereceden faz geçişi (sürekli) olarak tanımlanabilir [56].

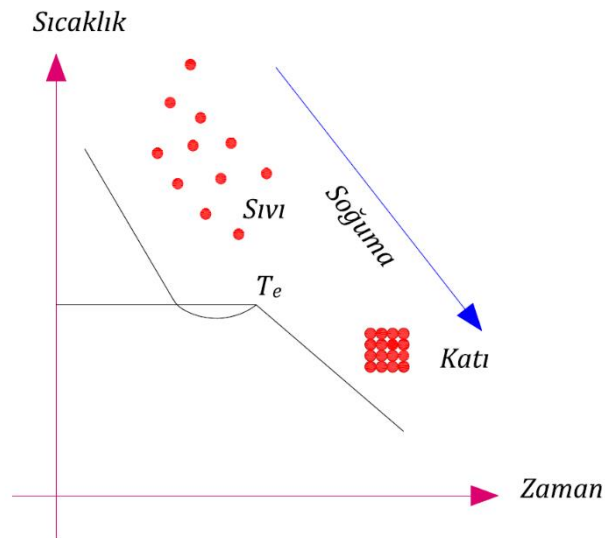
2.1.1 Birinci ve İkinci Dereceden Faz Geçişleri

Gibbs fonksiyonunun birinci türevinde görülen olay fonksiyon her iki fazın aynı anda bulunduğu anlarda süreksizliği yani birinci dereceden bir faz geçişi sergilediği görülmektedir. Bu olay, fazların aynı anda ve ayrı olarak görüldüğü Şekil 2.5 'deki $dG/dT - T$ grafiğinde gözlemlenebilmektedir [57].

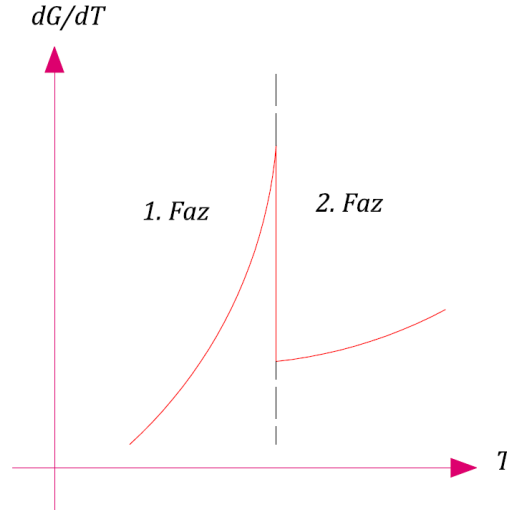


Şekil 2.5. Gibbs fonksiyonunun birinci dereceden türevinin sıcaklığa bağlı değişim eğrisi [57].

Özellikle saf metallerin katılaştırma işlemlerinde karşılaştığımız birinci dereceden faz geçişleri, malzemelerin genelinde meydana gelen faz geçişlerinde gözlemlenmektedir. Ergiyik bir metalin katılaşma sürecinin başlaması için olayın düşük soğuma hızlarında ve erime sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta cereyan etmesi gereklidir. Bu olay birinci dereceden faz geçişinin karakteristik yapılarından ve Şekil 2.6 'da grafik olarak gösterilmiştir [56].



Şekil 2.6. Saf metal katılaşma eğrisi [58].



Şekil 2.7. Gibbs serbest enerjisinin türevinin sıcaklığa bağlı değişim eğrisi [57].

İkinci dereceden faz geçişlerinde ise yine Gibbs fonksiyonunun birinci türevinde görülen olayda her iki fazın aynı anda bulunduğu anlarda fonksiyonun süreklilik sergilediği görülmektedir. Bu olay, fazların aynı anda ve ayrı olarak görüldüğü $dG/dT - T$ grafiğinde geçiş anındaki sıcaklıkta süreklilik gözlemlenebilmektedir [57]. Bu olay Şekil 2.7 'de gösterilmiştir.

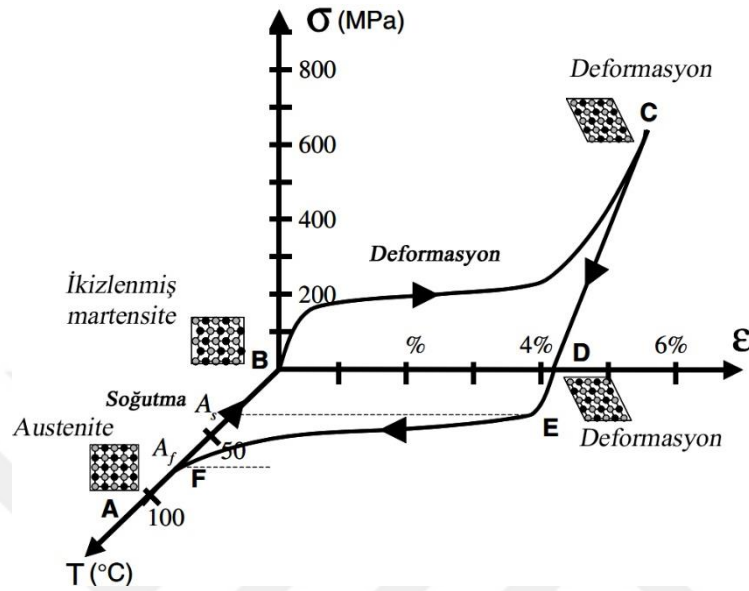
2.1.2 Şekil Hafıza Etkisi

Şekil hafızası etkisi ve süper elastikiyet bir şekil hafızası alaşımı özelliğidir. Yüzde birkaç gerginlik şekil hafıza etkisi için ısıtılarak ve süper elastikiyet için doğal olarak geri kazanılır. Bu özellikler martenzitik dönüşüm ve bunun ters dönüşümden kaynaklanmaktadır. Şekil hafızalı alaşımlarda geri kazanım gerilimi, enerji tüketimi ve martenzitik dönüşüm nedeniyle ortaya çıkan depolama farklı tür işlerde kullanılabilir.

Faz dönüşümü ile ilişkili dört karakteristik sıcaklık vardır. İleri dönüşüm sırasında, östenit, sıfır yük altında, martenzitik başlangıç sıcaklığında [59] ikizlenmiş martenzite dönüşmeye başlar ve martenzitik bitiş sıcaklığında (M_f) martenzite dönüşümü tamamlar. Bu aşamada, dönüşüm tamamlanmıştır ve malzeme tamamen ikizlenmiş martenzitik fazdadır. Benzer şekilde, ısıtma sırasında, ters dönüşüm, östenitik başlangıç sıcaklığında (A_s) başlar ve bu dönüşüm, östenitik bitiş sıcaklığında tamamlanır [60].

Bir şekil hafızalı alaşımda, ikizlenmiş martenzitik fazdayken deforme olduğunda ve daha sonra A_s 'nin altındaki bir sıcaklıkta yük kaldırıldığında, şekil hafızası etkisini sergiler. Daha sonra A_f üzerine ısıtıldığında, şekil hafızalı alaşımlar tekrar ana östenitik faza dönüştürülerek orijinal şeklini geri kazanacaktır. Şekil hafızalı alaşımların doğası, Şekil 2.8 'de gösterildiği gibi kombine bir gerilim-gerinim-sıcaklık alanındaki termomekanik yükleme yolunu takip ederek daha iyi

anlaşılabilir. Şekil 2.8 tek eksenli yükleme altında test edilen tipik bir NiTi örneği için deneysel verileri temsil etmektedir. Stres (σ), uygulanan bir yük nedeniyle numune üzerindeki tek eksenli streştir. Karşılık gelen gerinim (ϵ), numunenin uzunluğunun, orijinal uzunluk tarafından normalize edilen, uygulanan yük yönü boyunca değişmesidir [7].



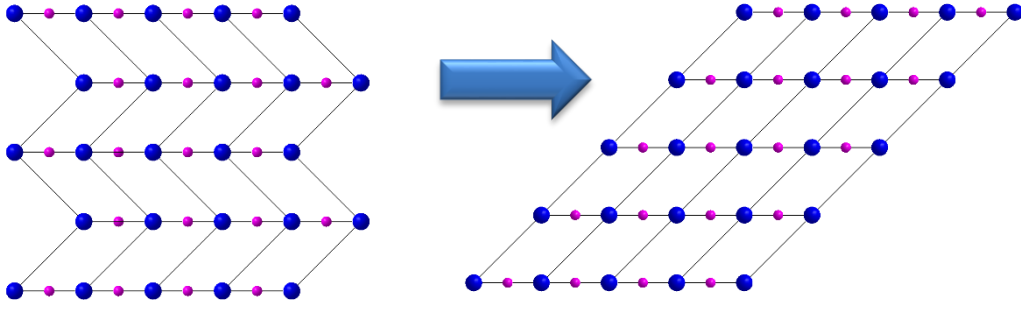
Şekil 2.8. Şekil hafıza şematifi [7].

Şekil hafızalı alaşımlar mutlak suretle ilk şekillerine tam olarak geri dönemezler, her dönüşümde mevcut şekillerinden uzaklaşma görülür. Bu nedenle çok fazla dönüşüme maruz kaldıkları durumda mevcut şekillerinden uzaklaşma artacağı için bir süre sonra malzeme hafızasındaki şekli kaybedecektir [61].

Şekil hafıza etkisi şekil hafızalı alaşımlarda tek yönlü şekil hafıza etkisi, çift yönlü şekil hafıza etkisi ve süper elastiklik olarak farklı şekillerde ortaya çıkmaktadır.

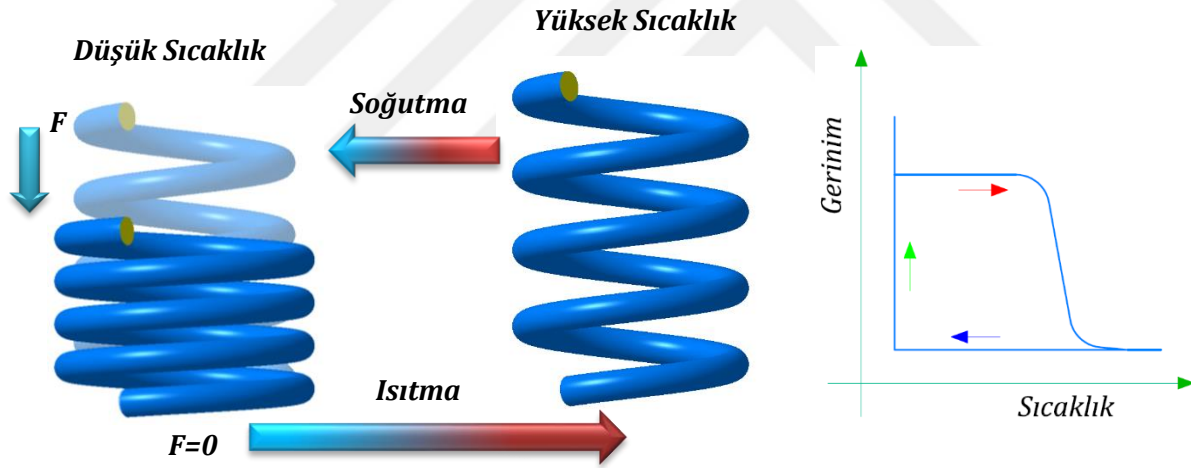
2.1.3 Tek Yönlü Şekil Hafıza Etkisi

Tek yönlü şekil hafıza etkisi, şekil hafızalı alaşımlarda görülen bazı mekanik yükleme-boşaltma döngüsü tarafından soğuk bir sıcaklıkta kalıcı bir şekilde deforme olduğunda, mekanik deformasyonda kalıcı deformasyonunu geri alır ve daha yüksek bir sıcaklığa ısıtması üzerine orijinal şekline geri döner. Genelde şekil geri kazanımı deforme olmuş malzemeyi ısıtarak sağlanır. Mekanik yükleme-boşaltma işlemi esnasında martenzit yapı nedeni ile Şekil 2.9 'da gösterildiği gibi atom komşuluklarının değişmediği durum gözlemlenir. Tek yönlü şekil hafıza etkisi tersinmez bir etkidir.



Şekil 2.9. Martenzit yapının deforme olmuş martenzit yapı haline geçişi.

Şekil hafızalı alaşım martenzit faz üzerindeki bir sıcaklıkta ta ki östenit faz aralığına kadar ısıtıldığı durumda, alaşımda şekil değişikliği ilk haline gelene kadar gözlemlenecektir. Gözlemlenen bu olay tek yönlü şekil hafıza etkisi olarak tanımlanmaktadır. Toplam gerinim sürekli plastik akışa uğramadığı sürece alaşıma uygulanan deformasyon çekme, basma, eğme veya çok farklı karmaşık şekillerde uygulanabilir [62]. Şekil 2.10 'da tek yönlü şekil hafıza etkisi şematiki gösterilmiştir. Tek yönlü şekil hafıza etkisinin gözlemlendiği birçok alaşım örneği vardır. Bunlardan bazıları; NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC alaşımlarıdır [63].



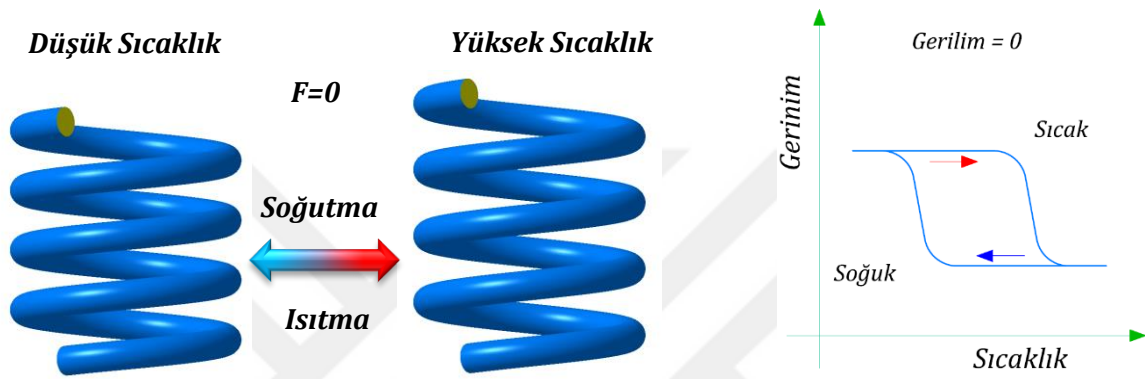
Şekil 2.10. Tek yönlü şekil hafıza etkisi şematiki [5].

2.1.4 Çift Yönlü Şekil Hafıza Etkisi

Çift yönlü şekil hafıza etkisinde durum biraz daha farklıdır. Mekanik yükleme yapmayan malzeme sıcaklığın basit bir şekilde değiştirilerek şeklini yüksek sıcaklık şeklinden düşük sıcaklık şekline değiştirdiğinde, iki yönlü bir şekil hafızası etkisi gözlemlenir. Şekil 2.11 'de gösterilmektedir. Bu etki, sıcaklığı belirli bir karakteristik düşük sıcaklığın altına düşürmek ve malzemeyi belirli bir karakteristik yüksek sıcaklığın üzerine ısıtmak üzerine gerçekleşir. İki yönlü

şekil hafızası etkisi şekil hafızalı alaşımlarda ancak bazen eğitim olarak adlandırılan özel termomekanik işlemten sonra elde edilebilir [7].

Çift yönlü şekil hafıza etkisi tamamen, martenzitik dönüşüm esnasında iç gerilmelere maruz kalan mikroyapısal değişimlere bağlıdır. Çift yönlü şekil hafıza etkisinde birbiri ile uyumlu martenzit plakalar iç gerilmelerin varlığı yüzünden dönüşüm esnasında kaybolurlar ve baskın varyantlar (farklı plakalar) oluşur. Baskın varyantların miktarı martenzit yapıda birbiri ile uyumlu plakalardan oldukça fazladır. Bunun sonucu olarak soğutma sonrası soğuk-şekil görülürken tersine çevrimde ısıtılma ile sıcak-şekil dönüşümü gerçekleşir [62].



Şekil 2.11. Çift yönlü şekil hafıza etkisi şematığı [5].

Şekil hafıza etkisinde bazı önemli sınırlamalar bulunmaktadır. Bu sınırlamalar uygulamanın niteliği için oldukça önemlidir. Bunlar [64];

- Gerilim limiti: Beklenen şekil geri dönüşümü sınırlı derecededir ve tipik olarak %2 civarındadır.
- Histerezis: Isıtma ve soğutma arasındaki sıcaklık farkı her malzeme için farklı değerlerdir ve bu sıcaklık farkı uygulamalara esas oluşturur.
- Soğutmada düşük dönüşüm kuvveti: Pratikte ısıtırken elde edilen şekil geri kazanımdaki kuvvet soğuturken elde edilen kuvvetten daha fazladır.
- Üst sıcaklık limiti: Şekil hafızalı alaşımlarda çok yüksek sıcaklıklara çıkarsa şekil hafıza etkisi için verilen eğitim kaybolabilir.

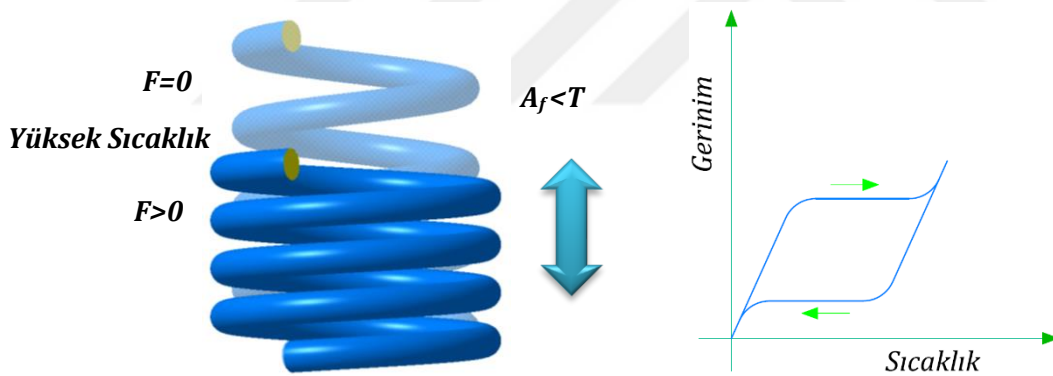
Şekil hafızalı alaşımlar ilk üretildiklerinde şekil hafızaları yoktur. Şekil hafıza etkisi gösterebilmeleri için termal işlemeli bazı işlemlerden geçmelidirler. Şekil hafıza kazandırılmak istenen alaşımlar öncelikle cebir kullanılarak hafıza kazanması istenilen şekle getirilir ve bu şekilde sabitlenir ve belirli aralıklarla yüksek sıcaklıklara çıkarılırlar. Bu sayede malzemeye tek yönlü şekil hafıza kazandırılmış olunacaktır. Aynı malzemenin şekli değiştirilip tekrar sabitlenir

ve tekrar yüksek sıcaklıklara çıkarıldığı takdirde çift yönlü şekil hafıza kazandırılmış olunacaktır [65].

2.1.5 Süperelastiklik Etkisi

Süperelastiklik geleneksel metalik malzemelerin davranışında karşılaşılmayan şekil hafızalı alaşımların gösterdiği bir başka olağanüstü etkidir. Belirli bir şekil hafızalı alaşım malzemesi için tek yönlü şekil hafızalı etkinin üretilebildiğine kıyasla daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir. [7].

Şekil hafızalı alaşımlar izotermal yani sıcaklıktan bağımsız olarak östenit fazının tamamlandığı sıcaklığın üzerindeki bir sıcaklıkta deformasyona maruz kalırsa martenzitik dönüşüm mekanik olarak gerçekleşecektir. Bu martenzit tipi gerilim esaslı martenzit olarak bilinir. Gerilim altındaki uygulamalarda yük azalmasında faz değişimi meydana gelir ve elastik bir kuvvet oluşur. Bunun sonucu olarak alaşım martenzit ana fazdaki ilk şekline geri çekilecektir. Bu gibi malzemeler %6-7 civarında gerinme kazanabilirler [62]. Şekil 2.12 'de süperelastiklik şematiği gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Süperelastiklik şematiği [5].

2.2. Şekil Hafızalı Alaşımlarda Termal Yaşlandırma

Metalik malzemelere uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri, malzemede mekanik özellikleri değiştirmeyi amaçlamaktadır. Bu tür süreçler ısıtma işlem süreçleri olarak adlandırılmaktadır. Yaşlanma da ısıtma işlem süreçlerinin bir çeşididir. Yaşlanma, malzemenin denge diyagramında solvüs eğrisi bulunan alaşımlarda ve solvüs eğrisinin sınırladığı katı eriyik malzemelerde gözlemlenmektedir. Yaşlanma sonucu oluşan sertleşme ilk olarak 1906 yılında Almanya'da Alfred Wilm tarafından keşfedilmiştir. İçeriğinde %2 Cu bulunan bir Al alaşımına, çelik malzemelere uygulanan sertleştirme amaçlı ısıtma işlemin aynısını uygulayıp malzemenin

sertleşmesini sağlamıştır. Isıl işlem öncesi yumuşak olan Al alaşımının ısıl işlemde sonra oda sıcaklığında sertleştiğini görmüş fakat bu olay kimse tarafından ta ki 1911 yılına kadar izah edilememiştir [66].

Alaşımın sertlik ve mukavemet gibi mekanik özellikleri soğuk deformasyon veya uygun işlemlerle yükseltilebilmektedir. İçeriğinde demir bulunmayan alaşımların sertlik ve mukavemet gibi mekanik özelliklerini arttırmak için özellikle yaşlanma veya çökeltme sertleşmesi işlemi uygulanmaktadır. Yapılan ısıl işlem, kısmi katı çözünürlük gösteren diğer bir değişle solvus eğrisi içeren ve katı çözünürlüğü, azalan sıcaklıkla azalan veya artan sıcaklıkla artan sistemlere uygulanabilir. Bahsi geçen sistemler, sıvı durumunda birbiri içerisinde her oranda ve katı durumda kısmen çözünen metallerden oluşur. Denge diyagramlarında ötektik nokta mevcuttur ve oda sıcaklığı ve oda sıcaklığının biraz üstündeki sıcaklıkta sertliğin süreye bağlı olarak artması görülür, bu olay metal biliminde yaşlanma, bu olayı gerçekleştiren ısıl işlem de yaşlandırma olarak adlandırılır [67].

Bakır bazlı şekil hafızalı alaşımlar, termal yaşlandırma işlemine karşı hassastırlar ve yaşlandırma işleme sonrası dönüşüm davranışları farklılık gösterir. Zamana bağlı yaşlandırma işleminde martenzit yapısı değişir ki bu teknolojik uygulamalarda kullanılan şekil hafızalı alaşımlar için uygun değildir [68].

2.3. Şekil Hafıza Alaşımların Karakterizasyonu

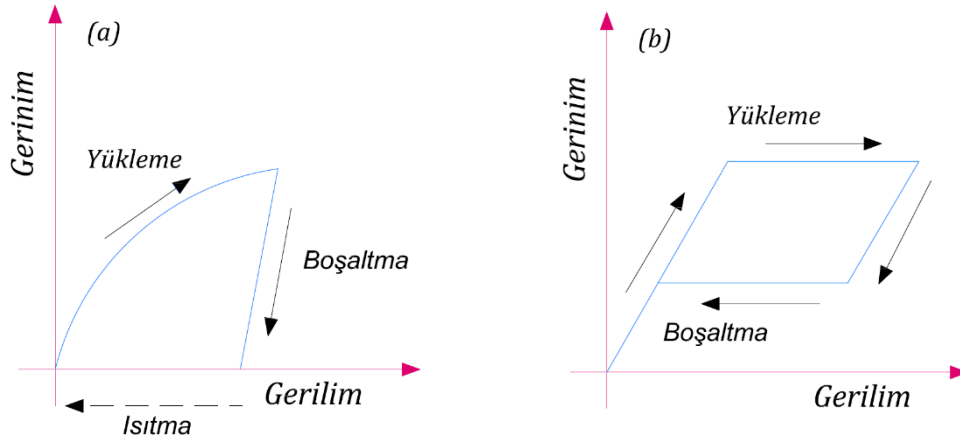
Şekil hafızalı alaşımların karakterizasyonunda esas olan katı hal faz geçişleridir. Ana ürün fazı olan östenit fazından ürün fazı olan martenzit fazına geçiş bu işin temelini oluşturmaktadır. Bazı özel alaşımlara has geçiş fazları harici olarak bulunsun da (R fazı gibi) esas olan östenit ve martenzit fazlar arasında olan geçişlerdir. Bu iki fazın başlangıç sıcaklıkları, östenit başlangıç sıcaklığı (A_s) ve martenzit başlangıç sıcaklığı [59] faz dönüşümü sırasında fazın oluşum başlangıç sıcaklığı değerini gösterirken östenit bitiş sıcaklığı [60] ve martenzit bitiş sıcaklığı (M_f) faz dönüşümünün tamamen gerçekleştiği sıcaklığı belirten değerler olarak karşımıza çıkar. Genel olarak bu ölçümler hem soğutma hem de ısıtma yapıp sıcaklık hızı ayarlanabilen ve referans bir numuneye göre analizi yapılan test numunelerinin içerisinde oluşan enerji değişimlerini gösteren diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı ile bulunur. Bu yöntemin alternatif metotları bulunmaktadır. Bu yöntem ile sadece faz geçiş sıcaklıkları ve geçişler arası enerji değişimleri tespit edilebilir. Fakat fazların cinsi hakkında bilgi sahibi olunamaz. Bu yüzden alaşım sentezlenmesi sonucunda pik deseni ile karşımıza çıkan fazların literatür kartları ile karşılaştırılması sonucunda, hangi fazların oluştuğu hakkında bilgiye toz X ışını difraksiyonu analiz yöntemi ile ulaşılmaktadır. Fakat bu test metodunun zayıf yönü olarak, sıcaklık kontrollü olan analiz cihazlarının pek nadir bulunması söylenebilir. Bu nedenle genel olarak oda

sıcaklığında alınan X ışını difraksiyonu desenlerinden bulunan fazlar oda sıcaklığına ait fazlardır. Dolayısıyla hangi fazlar arası geçişlerin meydana geldiğini öğrenebilmek için sıcaklık kontrolü olan X ışını difraksiyonu cihazları kullanılır. Döküm sektöründe, her zaman amaçlanan ile elde edilen ürün arasında çok az da olsa farklar meydana gelmesi olağandır. Bu nedenden dolayı sentezleme sonrası elde edilen alaşımın kütsel ve atomsal olarak kimyasal kompozisyonlarının bulunması için tahribatlı ve tahribatsız olmak üzere birçok metot bulunmaktadır. Bu metotlardan noktasal ve alansal olarak analiz yapabilen genellikle SEM (taramalı elektron mikroskobu) cihazlarının bir modülü olarak kullanılan EDS (enerji dağılımlı x ışını analizi) sayesinde hassas olarak bileşen analizi yapılabilir. Bu metot malzemenin yüzey morfolojisini yüksek ölçeklerde görüntülememizi sağlayan SEM cihazı sayesinde yüzey üzerindeki çökelti, kalıntılar gibi ana fazdan ayrılan farklı yapıların ne olduğu hakkında bilgi sahibi olmamızı da sağlar. Malzemenin mikro yapısı mikroskoplar sayesinde sınırlı bir seviyeye kadar gözlemlenebilirken ileri seviye analizler SEM analizi yapılabilir. Şekil hafızalı alaşımlarda, parlatma ve dağlama işlemi sonrasında elde edilen yüzey morfolojisinde oluşan martenzitik plakalar mikroskop sayesinde rahatlıkla gözlemlenebilmektedir. Söz konusu metotlar sayesinde şekil hafızalı alaşımların yeterli düzeyde bilgi sağlayacak olan karakterizasyon bilgileri rahatlıkla elde edilebilir. Tabi ki elde edilen ürünün daha farklı özelliklerini farklı analiz yöntemleri ile iletirmek mümkündür.

2.4. Şekil Hafızalı Alaşımlar

Alaşım oluşturmak için periyodik tablodaki birbirleriyle birleştirmek üzere 60 farklı elementi (aşırı radyoaktif, toksik, nadir ve/veya kullanımı zor olanlar hariç) göz önüne alırsak ve eğer her bir alaşım bileşiminde %0.1 oranında farklılık gösterirse muhtemel alaşımların toplamı yaklaşık 10^{177} gibi bir rakama denk gelmektedir. Alaşımları oluşturmak için kullanılabilecek elementlerin sayısını 40 'a düşürsek ve her alaşımın bileşiminde %1 farklılık gösterdiğini düşünelim bile, muhtemel alaşımların toplam sayısı 10^{78} 'dir ki galakside 10^{66} adet atom olduğu düşünülürse bu sayının astronomik bir sayı olduğu ortaya çıkacaktır [69].

En belirgin işlevsel metalik malzemelerden biri olan şekil hafızalı alaşımlar, kahve makinesi termostatlarından gözlük çerçevelerine kadar birçok cihazda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, özellikle stentler, kılavuz teller ve filtreleme cihazları gibi tıbbi cihazların üretiminde, cerrahi alanında artan sayıda uygulama bulmuşlardır [70]. Şekil hafızalı alaşımlara özgü özellikler, onları bu uygulamalara uygun kılan şekil hafızası etkisi ve süper esnekliktir.



Şekil 2.13. (a) Klasik (b) süperelastik şekil hafızalı alaşımların gerilim-gerinim karşılaştırması.

Şekil hafızası etkisi ve süper esneklik Şekil 2.13 'deki gerilme-gerinme eğrileri biçiminde gösterilmiştir. Şekil hafıza etkisinde, orijinal şeklini basitçe ısıtmak suretiyle geri kazanmak için daha önce deforme olmuş bir alaşım yapılabilir [71].

Şekil hafızalı alaşımların 1932 yılında Ölander [72] tarafından keşfedilmesinden sonra 1941 yılında Vernon tarafından ilk kez “şekil hafızası” terimi polimerik dış materyali için tanımlanmıştır. 1965 'te Chang ve Read [73] Au-Cd alaşımı üzerinde çalışırken ilk olarak “şekil kazanım”, terimini kullandılar ve aynı zamanda direnç değişikliği ile ters ve ileri dönüşüm üzerine çalıştılar. Buehler ve Wiley [73] NiTi alaşımları üzerine yapmış oldukları çalışmalarda “şekil hafıza etkisi” terimini malzemenin bir özelliği olarak rapor etmişlerdir. 1960'lı yıllardan sonra NiTi alaşımları daha önce keşfedilen alaşımlara oranla ucuz ve üzerinde kolay çalışılabilir olmasından dolayı, araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Bu araştırmalar sonucu şekil hafıza olayı sadece metalik malzemelerde değil aynı zamanda farklı malzeme türü olan seramik ve polimer gibi malzemelerde de görülmüştür [54]. Alman malzeme bilimi Profesörü Adolph Martens tarafından bulunan martenzit ve Robert Austen tarafından bulunan Östenit fazları, kendilerini onurlandırmak için kendi isimleri ile adlandırılmıştır. Martenzit fazı ilk olarak çelik sertleştirmede tersinir olmayan bir faz olarak bulunmasına rağmen daha sonraki zamanlarda demir dışı malzemelerde de bulunduğu tespit edilmiştir [74]. Bunlar Au bazlı, NiTi alaşımları, Cu bazlı ve Fe bazlı alaşımlardır ve kendi aralarında farklı özelliklere sahiptir [5, 54].

2.4.1. Au Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımlar

Şimdiye dek keşfedilen ilk şekil hafızalı alaşım bir Au-Cd alaşımıydı [75]. Ölander, B2 kübik (östenit) ve B19 ortofobik (martenzit) fazlarını tanımlamak için elektrokimyasal teknikleri kullanmıştır. Ayrıca, henüz şekil belleği etkisini kabul etmemiş olmasına rağmen, bu malzemelerdeki tuhaf bir davranışı ilk tanıyan kişi olarak bilinmektedir. Daha sonra, Bystrom ve

Almin X-ışını analizi sonrası ve farklı kompozisyondaki Au-Cd alaşımları için farklı fazlar bulmuşlardır. Chang ve Read tarafından, X-ışını analizi, elektriksel direnç ölçümleri ve hareketli görüntü gözlemleri yöntemleri kullanılarak dönüşüm sırasında iki faz arasındaki sınırların hareketleri incelenerek tanımlanmıştır. Chang ve Read tarafından elde edilen sonuçlar, incelenen bileşiğin, martenzit bitiş sıcaklığına (M_f) soğutulduğunda, yüksek simetri B2 kübikten düşük simetri B19 ortofobik yapıya difüzyonsuz transformasyona uğradığı sonucuna varılmıştır. Malzemenin östenit bitiş sıcaklığı olan [60] 80 °C'ye ısıtılmasında B19 yapısından B2 yapısına ters dönüşümün gerçekleştiği bulunmuştur. Alaşım soğuduğunda, martenzit başlangıç sıcaklığı [59] pik değerinde keskin bir yükselme meydana gelir. M_f 'deki dönüşümün tamamlanması üzerine, pik değeri martenzit soğutulurken tekrar düşer. Bu martenzitik fazın ısıtılmasında ters dönüşüm A_s 'de başlar ve A_f 'de tamamlanır [76]. 1975'te Güney Afrika Maden Odası, altın bazlı şekil hafızalı alaşımlar konusunda büyük bir araştırma çabasına sponsor olmuştur. Ayrıntılı olarak, ilgi bazı patentlere götüren altın-çinko ve bakır-çinko bellek alaşımlarının bir kombinasyonuna odaklanmıştır. Araştırmacılar özellikle β faz tipinin kristalografisindeki, Heusler alaşımı olarak bilinen AuCuZn alaşımına yoğunlaştılar. Bu alaşımlarda, şekil hafızası özellikleri, bileşimde işlenebilirliği, mekanik mukavemeti ve sünekliği oda sıcaklığında optimize etmek için bileşimde belirli bir esnekliğe izin veren çok çeşitli bileşimlerde gösterir [75]. Bu tip şekil hafıza alaşımları, altının yüksek maliyetli oluşu ve kadmiyum elementinin insan sağlığı açısından tehlikeli olmasından dolayı pek tercih edilmemektedir.

2.4.2. NiTi Şekil Hafızalı Alaşımlar

1956 yılında ABD Donanması Mühimmat Laboratuvarında (Naval Ordnance Laboratory, (NOL)) bir süpervizör ve Subroc, UUM-44A füzesinin burnu için metal alaşımlarının seçilmesinden sorumlu kişi olan William Buehler, standart denizaltı torpido tüplerinden atılmak üzere tasarlanmış ve bir su-hava-su görevinden sonra denizaltı hedeflerine vurmayı amaçlayan ve büyük bir silah olan denizaltı roketinin (Subroc) düşman savunmalarına başarılı bir şekilde nüfuz etmesini sağlamak amacıyla, alaşımın yüksek darbe dayanımı ve yüksek erime sıcaklığına sahip olması için çalışıyordu. Bir bibliyografik inceleme temelinde gerçekleştirilen ilk elemelerden gelen onlarca farklı bileşik arasından Buehler, daha fazla araştırma için bir düzine malzeme üzerinde çalışma yapmıştır. Küçük disk şeklindeki numunelerin çekiçlenmesiyle gerçekleştirilen darbe testleri, mükemmel genel yapısal ve işlenebilirlik özellikleri ile bikomponent edilmiş en iyi tepkiye sahip nikel-titanyum alaşımlarını kullanmıştır. Bu ilk bulgudan sonra, alaşımın yüksek değişkenlikteki sönümlenme özelliklerine sahip davranışını anlamak için büyük bir çaba harcanmış ve bu sırada da yorgunluğa direnç gösterdiği bulunmuştur. Araştırma grubu metalurji uzmanı olan Wiley ve Goldstein de katılarak genişlemiş daha sonra ayrıca malzeme uzmanı Wang

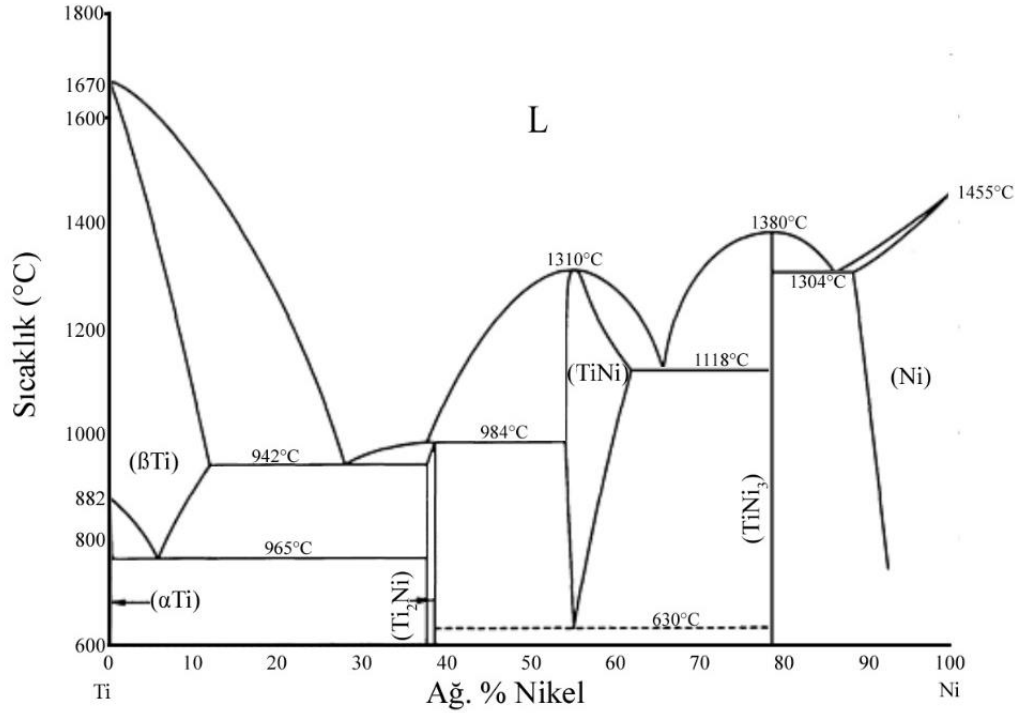
da takıma katılmıştır. 1962 yılında, Buehler ve Wiley sonuçlarını yönetime sunmuş ve döngüsel yüklemeye karşı direncini göstermek için bir milimetrenin onda biri kalınlığında, katlanmış bir tel sergilemiştir. Komite üyelerinin, numunenin sırayla bükülüp katlandığını ve bu stresin tekrarlanan gerilmeleri çok iyi taşıyabileceklerini doğrulayarak ilgilerini çekmişlerdir. Komisyonun bir sigara içicisi olan David Muzzey, katlanmış bir teli alıp çakmağının alevi üzerine koyduğunda telin neredeyse orijinal şekline geldiği görülmüştür ve bu malzeme laboratuvar ismiyle ilişkilendiren NITINOL kısaltması ile anılmaya başlamıştır. Keşfedildikten sonra, finanse edilen birçok araştırma başlamış, bazıları başarıyla sonuçlanmış, bazıları ise hiç sonuç vermemiştir. Çalışmalar üniversitelere, araştırma merkezlerine ve endüstrilere yayıldıkça birçok patent alınmıştır. Bununla birlikte, 1960'larda ve 1970'lerde sadece birkaç ticari ürün piyasaya sürülmüş ve bunlardan sadece biri, boru bağlantı sistemi konusunda başarılı olmuştur. Zorlu üretim (erime hassasiyetinden, saflıktan, biçimlendirmeden işleme işlemine vb. kadar uzanan), yüksek maliyetler ve güvenilir tedarikçilerin ilk eksikliği nedeniyle çalışmalar çok yavaş ilerlemiştir [75, 77]. Tablo 2.2 'de Nitinole ait fiziksel özellikler sergilenmiştir.

Tablo 2.2. Ticari nitinol fiziksel özellikleri tablosu.

Özellik	Sembol	Birim	Martenzit	Östenit
Yoğunluk	ρ_D	kg/m ³	6450 ~ 6500	
Elektriksel Direnç (yaklaşık)	ρ_R	$\mu\Omega.cm$	76 ~ 80	82 ~ 100
Özgül Isı Kapasitesi	c	J/kg.K	836.8	836.8
Termal iletkenlik	k	W/m.K	8.6 ~ 10	18
Termal Genleşme Katsayısı	a	m/m.K ⁻¹	6.6×10^{-6}	11.0×10^{-6}
Çekme Dayanımı	σ_{uts}	MPa	895 (tavlanmış) / 1900 (sertleştirilmiş)	
Elastikiyet Modülü (yaklaşık)	E	GPa	28 ~ 41	75 ~ 83
Akma Dayanımı	σ_y	MPa	70 ~ 140	195 ~ 690
Poisson Oranı	v	-	0.33	

NiTi alaşımı ikili bir alaşım tipi olsa da Fe, Cu, Nb, Pd, Pt, Hf veya Zr gibi elementlerin ilavesi ile dönüşümlerdeki histerezis aralıklarını değiştirerek alaşımın farklı özellikler kazanması sağlanmıştır [78, 79]. NiTi alaşımının ikili faz diyagramı Şekil 2.14.'de sunulmuştur.

NiTi şekil hafızalı alaşımına üçüncü element ilavesi ile çok farklı özellikler kazandırmış ve yeteneklerinin çok daha fazla arttığı görülmüştür. Bu ilavelerden Fe etkisi düşük M_s değeri elde edilmesini sağlamıştır. Bakır ilavesi popülerliği artan başka bir element ilavesi olup düşük dönüşüm histerezisi sağlayarak döngü sayısını arttırmıştır. Paladyum eklentisi NiTi şekil hafıza alaşımının otomotiv uygulamaları gibi yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmasına imkân tanımıştır. Neobyum ise geniş bir histerezis aralığına sahip özellikler kazandıran bir element olarak NiTi alaşımının zenginleşmesini sağlamaktadır [62].



Şekil 2.14. NiTi alaşımının ikili faz diyagramı [54, 80, 81].

2.4.3. Cu Bazlı Şekil Hafızalı Alaşımlar

Au bazlı alaşımlarda olduğu gibi, Cu bazlı alaşımlarında şekil hafızası özelliklerinin keşfi 1950 yılına kadar uzanmaktadır. Bu alaşımlar ucuz olmaları, üretimlerinin kolay olması ve iyi derecede alaşımlanma gibi özellikleri ile araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Piyasada kolayca elde edilebilen malzemelerden, standart üretim ve işleme aletleri (klasik fırınlar ve normal metal oyma ekipmanı gibi) imal edilebilirlerdir. Süneklikleri ve işlenebilirlikleri mükemmel olmasa da hemen hemen her şekil ve büyüklükte üretilebilirlerdir. CuAl şekil hafızalı alaşımının diğer şekil hafızalı alaşımlara göre çok yüksek dönüşüm sıcaklıkları vardır fakat bu dezavantaj, üçüncü bir eleman eklenmesiyle kolayca azaltılabilir. Üzerine en çok çalışılan alaşımlar CuZnAl ve CuAlNi 'dir, ancak CuAlMn ve CuAlBe alaşımlarına da kayda değer çalışma yapılmıştır. Cu bazlı alaşımlar sırayla karmaşık yaşlanma etkileriyle sonuçlanan belirli bir faz kararlılığı sunarlar. Bu malzemelerin en yaygın kullanım alanları inşaat boru bağlantıları ve hidrolik bağlantı elemanları, mekanik damperler, termal aktüatör ve sensör sistemleridir [75, 82].

2.4.3.1. CuZnAl Şekil Hafızalı Alaşımlar

CuZnAl, ticari olarak ilgi çekici ve literatürde geniş çapta çalışılan üçlü bir şekil hafıza alaşımıdır. Çinko, düşük maliyeti ve piyasadaki geniş bulunabilirliği nedeniyle seçilmiştir. Bu alaşım hem bileşimin hem de termomekanik işlemlerin bir işlevi olan -100 ile 100 °C arasındaki

dönüşüm sıcaklıklarında şekil hafıza etkisi gösterir. Tarihsel olarak, CuZnAl ticari olarak kullanılan ilk bakır bazlı şekil hafızalı alaşımdır. Alaşım özellikle %15-30 Zn, %3-7 Al ve kalanı Cu elementinden oluşmaktadır. CuZnAl alaşımlarının en büyük avantajı, nispeten ucuz metallerden yapılma ve indüksiyon ergitme (tanecik ebadını azaltmak için zirkonyum veya titanyum gibi küçük miktarlarda katkı maddeleri gerektiren) veya toz metalürjisi gerektiren geleneksel işlemlerle üretilebilmesi olarak görülebilir. Şekil hafıza özellikleri, yaklaşık %5'lik bir maksimum geri kazanılabilir gerinimi ile önemli ölçüdedir. Bileşiminde bulunan Al sayesinde soğuk işlenebilirlik kabiliyeti yüksektir. CuZnAl alaşımları, eğitim sürecine bağlı olarak iki yönlü şekil hafıza mekanizması sergileyebilir [75, 83].

2.4.3.2. CuAlNi Şekil Hafızalı Alaşımlar

Nikel, çinkoya alternatif olarak kabul edilir ve ucuz bir malzemedir. CuAlNi geniş bir gelişme göstermiştir ve genellikle bakır alaşımları arasında tercih edilir. Alaşım özellikle %13 Al, %4 Ni ve kalanı Cu elementinden oluşmaktadır. Dönüşüm sıcaklıkları 80 ile 200 °C arasında görülmektedir. CuZnAl alaşımı gibi ucuzdur ve standart yöntemlerle işlenebilir. Mekanik özellikler, CuZnAl gibi aynı katkı maddeleri kullanılarak (tanecik ebadını azaltmak için zirkonyum veya titanyum gibi küçük miktarlarda katkı maddeleri gerektiren) geliştirilebilir. Ayrıca, küçük Mn yüzdeleri (eşit miktarda Al miktarının değiştirilmesi) dönüşüm sıcaklıklarını azaltır. Yine, ilave elemanlar alaşımın dengesini etkileyebilir ve bu nedenle kullanımları sınırlandırılmalıdır. CuZnAl alaşımından farklı olarak, CuAlNi alaşımındaki Al yüzdesi işlenebilirliği önemli ölçüde etkilemez ve sıcak işlem tek ve yeterli üretim prosedürüdür. Sıcak işlemenin bir sonucu olarak, bu malzemelerin dönüşüm sıcaklıkları gibi önemli özellikleri sabitlemek için kontrollü bir soğutma işlemine ihtiyacı vardır. Ayrıca, bu parametreleri stabilize etmek için genellikle daha fazla işlem gerekir. Bu ekstra işlemler, CuAlNi alaşımını CuZnAl alaşımından daha pahalı, ancak NiTi alaşımından daha ucuz hale getirir. Önemli yaşlanma etkileri 120 °C 'den yüksek sıcaklıklarda gözlenirken, dönüşüm sıcaklığı aralıkları genellikle CuZnAl alaşımından daha düşüktür [75, 84].

2.4.3.3. CuAlBe Şekil Hafızalı Alaşımlar

İlk üretilen CuAlBe alaşımı, Cu bazlı polikristal bir alaşımdır. 2003 ve 2004 yıllarında Fransa'da Trefimetaux isimli Fransız metalürji firması tarafından çeşitli çaplarda CuAlBe alaşımının telleri üretilip şekillendirilmiştir. Firma tarafından AH140 koduyla üretilen numuneye ait $M_s = -18.5$ °C, $M_f = -47$ °C, $A_s = -20$ °C ve $A_f = 2$ °C dönüşüm sıcaklıkları ve % kütleli kimyasal bileşimi Al = 11.8, Be = 0.5, Cu = 87.7 olarak paylaşılmıştır. Cu bazlı alaşımlar için standart ısı

işlem, yüksek sıcaklıkta (yaklaşık 85 °C kısa bir süre boyunca uygun bir homojenizasyon ve oda sıcaklığında suda hızlı bir soğutma işlemi ayrıca birkaç saat 100 °C sıcaklıkta yaşlandırma işlemi yapılmaktadır[85]. CuAlBe alaşımları CuZnAl ve CuAlNi alaşımlarının sunmuş olduğu avantajların toplamını sunar. Bu alaşım türünün diğer bir dezavantajı ise berilyum elementinin berilyum oksit olarak sağlığa zararlı bir yapı olmasıdır. Bütün bunlara rağmen Be alaşım içerisinde çok az biçimde kullanılır [86, 87].

2.4.3.4. CuAlMn Şekil Hafızalı Alaşımlar

CuAlMn alaşımı, CuAlZn ve CuAlNi alaşımları ile kıyaslanabilir bir şekil hafızası etkisi gösteren bir şekil hafızalı alaşımdır. Alaşımın martenzitik dönüşüm sıcaklıkları, yaşlandırma işlemine karşı hassastır. Bu hassaslık, alaşımın kimyasal bileşimindeki bir değişiklik nedeniyle açıklanmıştır; ancak, gerilimdeki artış ve yığılma düzenlerindeki değişikliklerinin artması da önemli görünmektedir. Bazı çalışmalarda, CuAlMn alaşımı faz geçişlerinin, artan manganer içeriği ile birlikte D0₃-B2 geçiş sıcaklığının azaldığını görülmüştür. Nakanishi ve arkadaşları, yaşlanma sırasında Mn bölgesi doluluk değişimine eşlik eden martenzitik dönüşüm sıcaklıklarında da bir artış gözlemlemiştir [88].

CuAlMn alaşımları diğer şekil hafızalı alaşımlarda olduğu gibi alaşımlama elementlerinin ve miktarları [89-91] ve farklı ısıtma işleme yöntemleri [92, 93] bu malzemelerin göstermiş olduğu hem mekanik hem de fiziksel karakter yapılarını değiştirerek tasarımcıya çok farklı yöntemler sunmuştur.

2.4.4. Fe bazlı Şekil Hafızalı Alaşımlar

Fe bazlı şekil hafıza alaşımlarının araştırılması ve geliştirilmesi için itici güç, maliyeti düşük olması sebebiyle inşaat mühendisliği alanında yaygın talep görmesidir. Japon araştırmacıların patent raporlarında, özellikle bu alaşımların iyi bir şekil hafıza etkisi göstermesi, %13 gibi büyük bir süperelastiklik kabiliyeti gibi artı yönleri bu alaşımların ticarileşmesinde büyük katkı payı olduğunu belirtmektedirler. Ayrıca Fe bazlı alaşımların Cu bazlı alaşımlara yarı yarıya düşük maliyetli olduğu da bir gerçektir [5].

Japon araştırmacıların patent açıklamasında bildirdiği son ilerleme, %13'lük süperelastik akış genliği ile mükemmel şekil hafıza etkisi özelliklerine sahip Fe bazlı malzeme için üretim teknolojisinin mevcudiyeti bu alanda mükemmel fırsatlar yaratıyor gibi görünmektedir; özellikle, Fe bazlı şekil hafızalı alaşımlar malzemelerinin üretim maliyetleri hali hazırda Cu bazlı şekil hafızalı alaşımlar malzemelerinkinden ciddi oranda daha düşük olduğu bilinmektedir.

Fe bazlı şekil hafızalı alaşımlar NiTi alaşımlarına göre nispeten kısıtlı korozyon direncine sahiptirler [94]. Bu özelliğin yanı sıra işlenebilirlik, kaynak edilebilirlik, yüksek mekanik dayanım ve iyi derecede şekillendirilebilme özellikleri bu alaşım tipini ayrıcalıklı yapmaktadır [95, 96].

2.4.5. Diğer Şekil Hafızalı Alaşımlar

Şekil hafızalı alaşımların performansını iyileştirmek için yapılan çalışmalar sonucunda şekil hafıza materyalleri adı altında yeni türler bulunmuştur. Şekil hafıza malzemeleri birden fazla biçimde veya türde kategorize edilebilir. Diğer türdeki şekil hafıza alaşımlar; yüksek sıcaklık şekil hafıza alaşımları, manyetik şekil hafızalı alaşımlar, polimer ve seramik şekil hafıza malzemeleri olarak örneklendirilebilir.

2.4.3.5. Yüksek Sıcaklık Hafızalı Alaşımlar

Tablo 2.3. Yüksek sıcaklık şekil hafıza alaşımları.

Gruplar	Alaşım	Dönüşüm Sıcaklık Aralığı [°C]	Termal Histerezis [°C]	Gerinim [%]	Geri Kazanım [%]	Yorumlar
100 - 400°C	Ti-Ni-Pd Ti-Ni-Pt	100 - 530 110 - 1100	20 - 26 31 - 55	2.6 - 5.4 3 - 4	90PE - 100 100	Yüksek malzeme maliyeti, çoğunlukla ticari ve yüksek verimlilik.
	Ni-Ti-Hf Ni-Ti-Zr	100 - 400 100 - 250	60 54	3 1.8	100 100	Yeteli şekil hafıza etkisi, büyük histerezis ve nispeten düşük malzeme maliyeti
	Cu-Al-Ni Cu-Al-Nb	100 - 400	21.5 59 - 170	3 - 5PE 5.5 - 7.6	80 - 90PE	Düşük malzeme maliyeti, yeteli şekil hafıza etkisi, Cu-Al-Ni alaşımında gerginlik ile gelen kırılma
	Co-Al Co-Ni-Al		121 15.5	2 5PE		İyi işlenebilirlik, Co-Ni-Al alaşımında yüksek sıcaklıkta büyük histerezis
	Ni-Al	100 - 300				Düşük malzeme maliyeti, düşük histerezis ve zayıf çekme sünekliği
	Ni-Mn	100 - 670	20	3.9	90	
	Ni-Mn-Ga	100 - 400	85	10	70	
	Zr-Cu	100 - 600	70	8	44	İyi süneklik ve işlenebilirlik fakat düşük şekil hafıza etkisi
	Ti-Nb	100 - 200	50	2 - 3	97-100	Şekil hafıza etkisi ve süneklik iyi, fakat oksidasyona maruz kalma riski ve uranyum barındırması riski
	U-Nb		35	7		
400 - 700°C	Ti-Pd Ti-Au	100 - 510 100 - 630	40 35	10 3	88 100	İyi süneklik fakat yüksek malzeme maliyeti
	Ti-Pt-Ir	990 - 1184	66.5	10PE	40PE	Yüksek akma dayanımı
> 700°C	Ta-Ru Nb-Ru	900 - 1150 425 - 900	20	4 4.2	50 88	Kararlı mikroyapısal, ancak zayıf oksidasyon direnci ve küçük histerezis.

Literatürde, yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar, 100 °C sıcaklığın üzerindeki sıcaklıklarda ve bazı kaynaklarda 150 °C sıcaklığın üzerindeki faz dönüşümleri yapan şekil hafızalı alaşımlar olarak tanımlanır ve martenzitik dönüşüm aralıklarına göre üç gruba ayrılırlar. Tablo 2.3 'de gruplar ile ilgili bilgiler paylaşılmıştır [97].

2.4.3.6. Manyetik Şekil Hafızalı Alaşımlar

Şekil hafızası etkisinin manyetik kontrolü, büyük mesafeler ve hızlı tepki veren yüksek kuvvetler gösterebilen yeni bir aktüatör sınıfının prensibi için önerilmiştir. Bu yeni malzemelerin çalıştırılması, uygulanan bir manyetik alanda martenzit birim hücrelerinin yeniden canlandırılması ile şekil hafızasının etkisinin kontrolüne dayanmaktadır. Manyetik şekil hafızalı alaşımlar adı verilen yeni manyetik kontrollü şekil hafızalı alaşımların çalışma ilkesi, geleneksel şekil hafızalı alaşımlarinkine benzerdir. Temel fark, manyetik şekil hafızalı alaşımlarda malzeme morfolojisindeki ikiz sınırların hareketinin veya martenzit ile ana faz (östenit) arasındaki dönüşümleri uygulanan manyetik alan tarafından sürülmesidir [98].

FeNiCoTi, FeNiCoAl, FeNiMnAl, CoNiAl, CoNiGa, NiMnGa, NiMnIn, NiMnCo, NiMnSn, NiFeGa alaşımları yüksek frekanslarda aktive olan bazı manyetik şekil hafıza alaşımlarına örneklerdir [99].

2.4.3.7. Şekil Hafızalı Polimer Malzemeler

Şekil hafıza etkisi, tek polimerlerin spesifik bir malzeme özelliği ile ilişkili değildir; bu özellik uygulanan işlem ve programlama teknolojisi ile birlikte polimer yapısının ve polimer morfolojisinin bir kombinasyonundan kaynaklanmaktadır. Şekil hafızası davranışı, kimyasal bileşimlerinde önemli farklılıklar gösterebilen birçok polimer için gözlenebilir. Bununla birlikte, literatürde sadece birkaç şekil hafızalı polimer tanımlanmaktadır [100].

Bir polimer ürününün engin ticari uygulaması göz önüne alındığında, şekil hafızalı polimerlerin önemli bir ticari uygulamaya sahip olduğu açıktır. Tablo 2.4 'de şekil hafızalı alaşımlar ile şekil hafızalı polimerler kıyaslanmıştır.

Tablo 2.4. Şekil hafıza polimerleri ve şekil hafıza alaşımları kıyas tablosu [101].

Özellikler	Şekil Hafıza Polimerleri	Şekil Hafıza Alaşımları
Yoğunluk (g/cm ³)	0.9 - 1.25	6 - 8
Geçiş sıcaklığı (°C)	10 - 50	5 - 30
Faz geçişi	Camsı	Martenzitik
Elastikiyet modülü at $T < T_{Trans}$ at $T > T_{Trans}$	400'e kadar 800 üzerinde	%8'e kadar
Deforme stresi (MPa)	0.01 - 3 (0.1 → 10) x 10 ³	83 (NiTi) 28 - 41
Geri kazanım stresi (MPa)		50 - 200
Geri kazanım hızı	1 - 3	150 - 300
Termal iletkenlik (W/mK)	<1 saniye ile birkaç dakika arası.	<1 saniye
Biyouyumluluk	Yüksek	bazıları biyouyumlu
Korozyon direnci	Mükemmel	Mükemmel

Özellikler	Şekil Hafıza Polimerleri	Şekil Hafıza Alaşımları
Yüksek sıcaklıkta durum	Yumuşak	Sert
Düşük sıcaklık durumu	Sert	Yumuşak
Maliyet	Ucuz	Pahalı
Şekil hafıza eğitimi	Kolay ve Hızlı	Zor
İmalat / işleme koşulu	<200°C, düşük basınçla	>1000°C, yüksek basınçla

2.4.3.8.Şekil Hafızalı Seramik Malzemeler

Bazı ZrO_2 seramiklerinde, bir dikdörtgenden monoklinik bir yapıya geçiş, termal olarak veya stresin uygulanmasıyla indüklenen bir martenzitik faz geçişi olarak gerçekleşir. Bu malzemelere martenzitik seramik denir. Monoklinikten tetragonal simetriye dönüşme, termoelastik olarak gerçekleşebilir, bu yüzden martenzitik seramikler, termo-tepki veren bir şekil hafızası etkisi gösterir [100].

2.4.3.9.Şekil Hafızalı Jeller

Polimer jellerin göze çarpan bir özelliği, dış hava koşullarındaki değişikliklere kayda değer hacim değişiklikleri, şişme veya büzülme ile tepki verme kabiliyetleridir. Dış uyaran yalnızca sıcaklık değişimleriyle sınırlı değildir. Hacim değişiklikleri, pH değerindeki, iyonik kuvvetteki veya çözücünün kalitesindeki bir değişiklik ile tetiklenebilir. Buna ek olarak, elektrik alanlarını veya ışığını uygulayarak belirli jelleri uyarmak mümkündür. Jeller ile uygulamalar zayıf mekanik özellikleri nedeniyle sınırlıdır [100, 102].

2.5. Üretim Teknikleri

Şekil hafızalı alaşımların imalatı birçok farklı çalışma işlemi içerir ve her adım son ürünün nihai fonksiyonel özellikleri için çok önemlidir. Erime yolundan başlayarak, kimyasal bileşimin istenen alaşımlı kontrolüne ve safsızlık içeriğine dayanarak, her bir hazırlama yöntemi şekil hafızalı alaşım ürününün mekanik ve ısı özelliklerini etkiler. Şekil hafıza alaşımları sonuçta bir metal alaşımı olduğundan ilk akla gelen metallerin geleneksel imalat yöntemleridir. Ticari olarak kullanım alanları bakımından başlıca üretim teknikleri aşağıdaki şekilde sıralanabilir [56].

1. Döküm ve tel çekme yöntemi
2. Toz metalürjisi
3. Hızlı soğutma (Hızlı katılaştırma)

2.5.1. Döküm ve Tel Çekme Yöntemi ile Üretim

Şekil hafızalı alaşımların bileşiminde kullanılan elementler oksitlenmeye meyilli elementlerdir. Oksitlenme üretimde istenen bir olay değildir. Oksitlenmeyi engellemek için özellikle ergitme yönteminde ortamda bulunan oksijen gazının kovulması amacıyla ergitme potasına inert gaz ilavesi yapılır. Oksitlenmenin engellenmesi ile talep edilen alaşım üretimi gerçekleştirilmektedir. Üretilen alaşım nihai ürün değildir. Nihai ürünü elde etmek için ergitme sonrası farklı mekanik ve termal işlemler uygulanır.

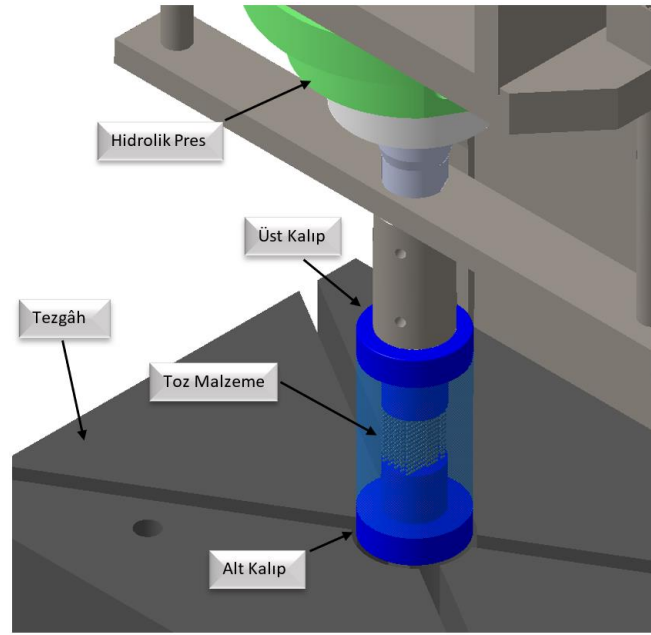


Şekil 2.15. NiTi ve CuZnAl alaşımlarının üretim işlem adımları [54].

Bu türde bir üretime örnek olarak Şekil 2.15 'de işlem adımları yer alan NiTi ve CuZnAl alaşımları gösterilmektedir. Alaşımların şekil hafıza etkisi gösterebilmeleri için sıcak ekstrüzyon, dövme yöntemi, sıcak haddeleme ve soğuk çekme gibi bazı mekanik süreçler uygulanmaktadır.

2.5.2. Toz Metalürjisi ile Üretim

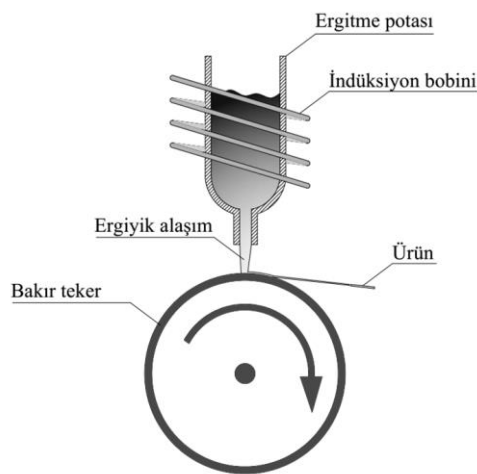
Ticari kullanım konusunda en yüksek orana sahip NiTi şekil hafıza alaşımının üretimi için çeşitli metalurji veya ilave üretim teknikleri vardır. Bu teknikler temel olarak pahalı başlangıç maliyetleri nedeniyle biyomedikal topluluk tarafından kullanılır. Şekil hafıza alaşımlarının üretim yöntemlerinden toz metalürjisi ile üretimin ilk basamağı bileşeni oluşturan hammaddenin toz denilen tanecikli yapısını elde etmektir. Bir sonraki basamakta alaşımı oluşturan bileşenlerin tozları harmanlanır ve karıştırma işlemi yapılır. Harmanlama ile karışımı sağlanan tozlar basınç altında sıkıştırılarak kompaktlama olarak adlandırılan Şekil 2.16 'da şeması bulunan işlemde geçerler. Bazı durumlarda polimer katkısı ile tozların iyi şekil alması da sağlanabilir. Kompaktlama sonrası alaşımın elde edilmesi için eritme yöntemi ile işlem genellikle sonlandırılır. Şekil hafıza alaşımları şekil hafıza etkisi eğitimi işlemi eklenmesi ile üretim sonlandırılır.



Şekil 2.16. Kompaktlama İşlem Şeması

2.5.3. Hızlı Soğutma Yöntemi ile Üretim

Şekil hafıza alaşımlarının biyomedikal alanda özellikle tel formu kullanılmaktadır. Hızlı soğutma yöntemi ile genelde malzeme tel formunda üretilmektedir. Hızlı soğutma yöntemi ile üretim erimiş malzeme bir soğutma gazı kullanılarak, akışkanın ısı transfer kapasitesi yüksek bir silindirik malzeme üzerine sarılarak ince şeritler veya teller üretimi şeklindedir. Şekil 2.17 'de bu üretim yöntemine ait sistematik görselleştirilmiştir. Genellikle karşılaşılan problemler, oksijen içeriği, kimyasal son bileşimin kontrolü, ikincil fazların oluşumu ve son malzemenin mikroyapısal homojenliğidir.



Şekil 2.17. Hızlı soğutma sistemi şematik gösterimi [103].

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu tez çalışmasında şekil hafıza etkisi gösteren Cu bazlı şekil hafıza alaşımının bir türü olan dördü CuAlMnFe alaşımı elde ederek, bu alaşımda yaşlandırma işlemi yapmak ve şekil hafızalı alaşımlarda yaşlandırmada zaman ve sıcaklık faktörünün dönüşüm sıcaklığına etkisini incelemek amaçlanmıştır. Bu amaçla alaşımın üretimi yapılmıştır. Daha sonra yaşlandırma işlemi yapılarak ve dönüşüm sıcaklıklarını elde etmek amacıyla taramalı diferansiyel kalorimetre cihazı kullanılmıştır. Dönüşümlerin hangi fazlarda gerçekleştiğini incelemek için X ışını difraksiyonu analiz yöntemi kullanılmıştır.

3.1. Yaşlandırma Deneyleri

Tez çalışmamızda şekil hafıza etkisi gösteren Cu-bazlı alaşım olan CuAlMnFe alaşımını elde etmek için 325 mesh (~45µm) boyutlarında ve %99 üzerinde saflığa sahip Cu, Al, Mn ve Fe elementleri kullanılmıştır. İlk süreçte ergitme yöntemi kullanılarak CuAlMnFe dördü alaşımı üretilmiştir. CuAlMnFe dördü alaşımının üretiminde kullanılan elementlere ait ağırlıkça (ağ. %) ve atomikçe (at. %) oranları Tablo 3.1 'de verilmiştir.

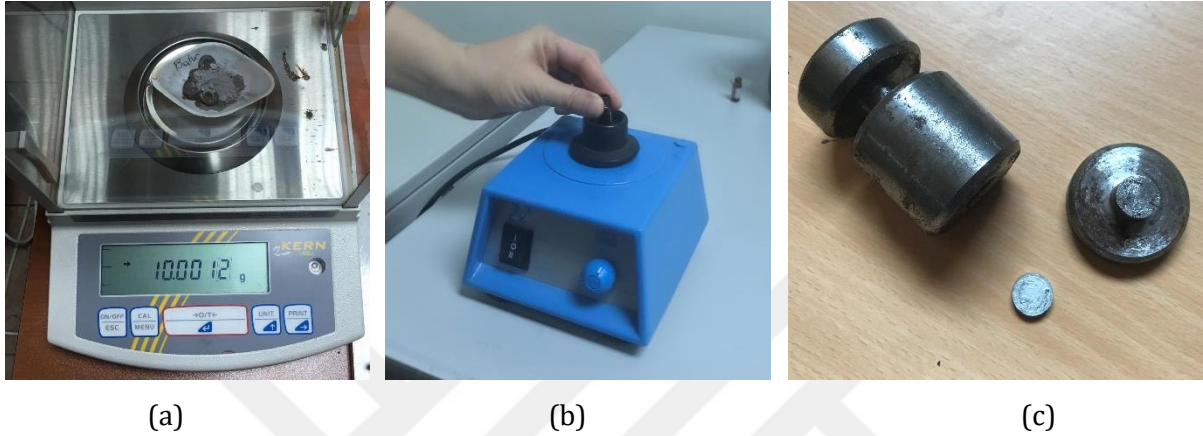
Tablo 3.1. Alaşım elementlerinin kullanım oranları.

	[ağ. %]	[at. %]
Al	11.81	23.80
Mn	4.18	4.14
Fe	1.25	1.22
Cu	82.76	70.84
Toplam	100.00	100.00



Şekil 3.1. %99 Saflığa sahip Cu, Al, Mn ve Fe elementleri

Şekil 3.1 'de %99 saflığa sahip elementlere ait görsele yer verilmiştir. Malzemelerin kimyasal kompozisyonları belirlendikten sonra malzemeler hassas terazide, belirlediğimiz ağırlıkta ölçümler yapılarak harmanlanmıştır. Harmanlanan ürünler daha sonra vorteks karıştırıcısında karıştırılarak hidrolik pres yardımı ile kompaktlanmak üzere presleme kalıbına konulmuş ve sıkıştırma işlemi yapılmıştır. Ürün hazırlama işlemlerinde kullanılan hassas terazi, vortex cihazı ve kompaktlama kalıbı Şekil 3.2 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. (a) Hassas terazi (b) Vortex karıştırma cihazı (c) Kompaktlama kalıbı

Hidrolik pres yardımıyla kompaktlanan malzemeler argon gazı ortamında bakır pota içerisinde ark ergitme fırınında ergitilmiştir. Şekil 3.3 'de hidrolik pres ve ergitme fırın düzeneği gösterilmiştir. Malzemelerin ortamda bulunan oksijen ile reaksiyona girip oksitlenmesini engellemek için ergitme potasından oksijen gazı vakumlanmış ve potaya argon gazı inert gaz olarak eklenmiştir.



Şekil 3.3. Hidrolik pres ve ark ergitme fırın düzeneği.

Deneylerde 350 °C sıcaklıkta ve 5 farklı bekleme süresi (60, 120, 180, 240 ve 300 dakika) denenmiş, numuneler oda sıcaklığında bekletilerek soğutulması sağlanmıştır. Bir adet numune 900 °C β fazında 1 saat homojenize edilerek tuzlu buzlu suda soğutulmuştur. Deneylerde kullanılan parametreler Tablo 3.2 'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Isıl işlem deneylerinde kullanılan parametreler.

Numune Kodu	Yaşlandırma sıcaklığı	Yaşlandırma Süresi	Yaşlandırma Ortamı
CAMF-1-350	350 °C	60 dakika	Oda Sıcaklığı
CAMF-2-350	350 °C	120 dakika	Oda Sıcaklığı
CAMF-3-350	350 °C	180 dakika	Oda Sıcaklığı
CAMF-4-350	350 °C	240 dakika	Oda Sıcaklığı
CAMF-5-350	350 °C	300 dakika	Oda Sıcaklığı

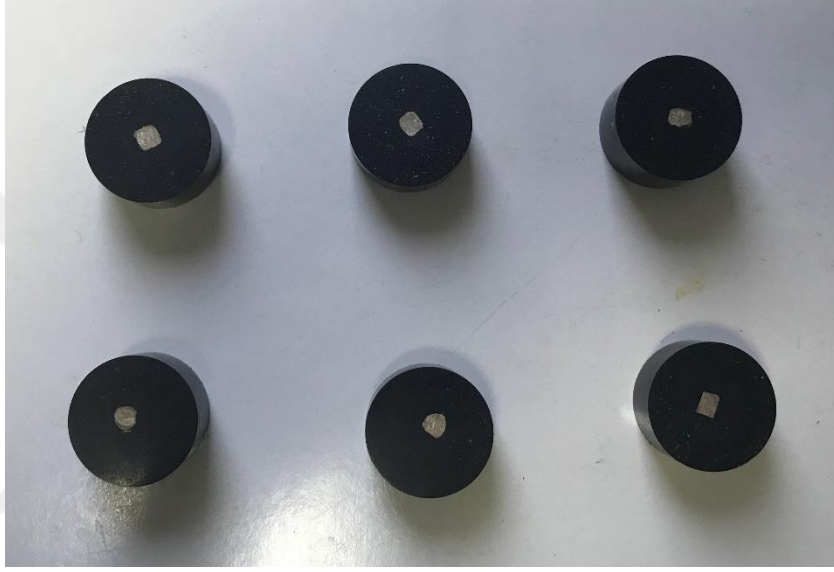
Deney kodlaması yapılırken “ABCD-H1-123” şeklinde yapılmıştır. “ABCD” kısmı malzemeyi oluşturan elementlerin ilk harflerini, “H” homojen numuneyi, “1” yaşlandırma işlemine maruz bırakılan süreyi saat cinsinden ve “123” kısmı deneylerde maruz bırakılan santigrat cinsinden sıcaklık değerini temsil etmektedir.

Fırın içerisinde numuneler refrakter malzeme olan yüksek sıcaklıklara dayanan krom magnezit taşı üzerine konulmuştur. Ürünler bu malzemenin üzerinde fırına yerleştirilerek deney numunelerinin ısı işlem olarak eşit şartlarda yaşlanma işlemine tabi tutulmaları sağlanmıştır. Şekil 3.4 'de yaşlandırma için kullanılan kül fırını gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Isıl işlem için kullanılan kül fırını.

CAMF-H1-900 kodlu ilk numuneye kül fırını yardımıyla 900 °C de 60 dakika bekletildikten sonra tuzlu buzlu su ortamında soğutularak malzeme içyapısındaki gerilmelerin atılması amacıyla, homojenize edilmiştir. Daha sonra diğer numuneler (CAMF-1-350, CAMF-2-350, CAMF-3-350, CAMF-4-350, CAMF-5-350) kül fırını yardımı ile 350 °C sıcaklıkta belirlenen parametrelerde yaşlandırma işlemine maruz bırakılmıştır. Isıl işlemler sonucunda diferansiyel kalorimetre cihazı ve X ışını difraksiyonu cihazlarında değerlendirebilmek için numunelerin yüzeylerinde oluşan oksit tabakasını silmek ve analizler için gerekli olan hassasiyette örnekler elde etmek amacıyla parlatma cihazında zımparalanarak hazırlanmıştır.



Şekil 3.5. Ergitilmiş numunelerin bakalite alınmış durumları

Ergitme aşamasında ürettiğimiz malzememiz, alaşımın yaşlandırma işlemine hazır edilmesi ve analizlerinin yapılabilmesi için küçük parçalar halinde kesilmiştir. Yaşlandırma işlemi sonrası elde edilen 6 adet numunelere bakalite alma işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.5 'de bakalite alınmış numunelere ait görsellere yer verilmiştir. Şekil 3.6 'da görülen parlatma cihazı kullanılarak, sırası ile 220, 360, 800, 1000, 1200 ve en son 4000 numaralı zımpara kullanılarak numunelerin parlatma işlemi yapılmıştır.

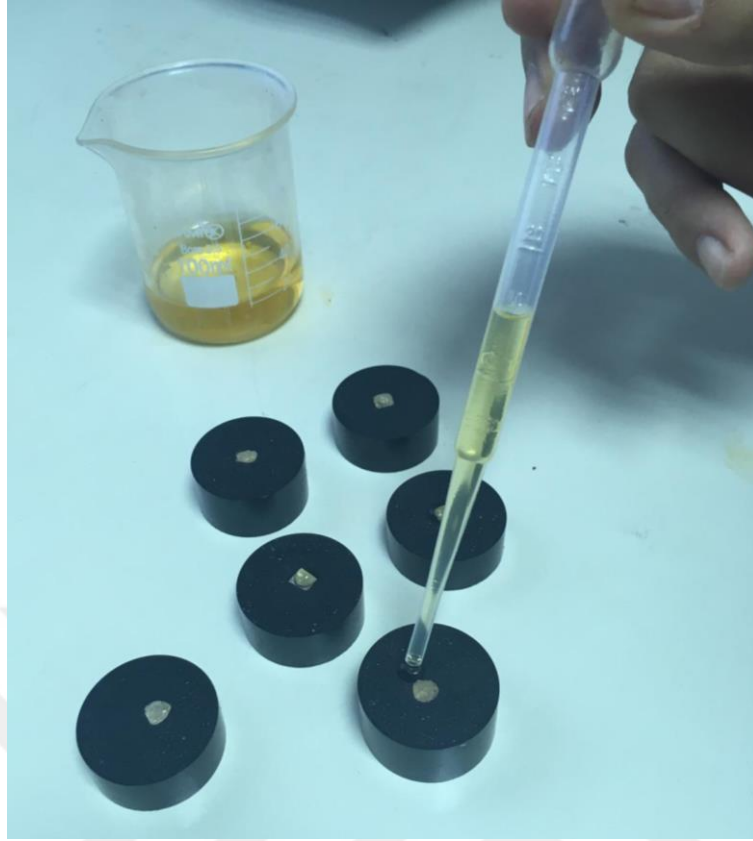


Şekil 3.6. Numune parlatma cihazı.

Numunelerin dağlama işlemi için 2.5 gr ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 48 ml CH_3OH ve 10ml HCl dağlama çözeltisi hazırlanarak numunelerin dağlama işlemi tamamlanmıştır. Şekil 3.7 ve Şekil 3.8 'de dağlama işlemi ile ilgili görseller paylaşılmıştır. Şekil 3.9 'da mikroyapı incelemesi için kullanılan mikroskopa ait görsele yer verilmiştir.



Şekil 3.7. 2.5 gr ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)-48 ml CH_3OH ve 10ml HCl dağlama çözeltisi.



Şekil 3.8. Dağlama işlemi operasyonu.



Şekil 3.9. Mikroskop görseli.

3.2. DSC Analiz Tekniği

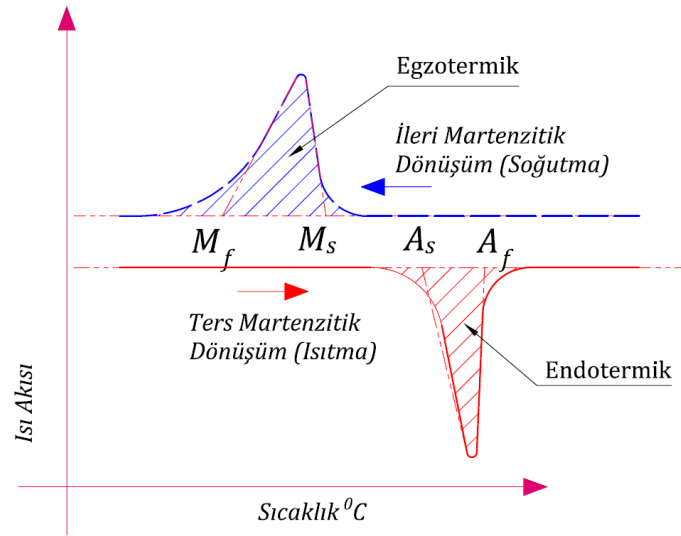
Diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı literatürde DSC ismi ile de anılmaktadır. Bu cihaz malzemenin içerisindeki ısı kapasitesinin sıcaklık karşısında nasıl değıştiğini tespit eden termal bir analizleme tekniği kullanarak çalışmaktadır. Cihaza ait görsel Şekil 3.10 'da yer verilmiştir. Bu tekniğin altında yatan temel prensip, numune faz geçişleri gibi fiziksel bir dönüşüm geçirdiğinde, ikisinin de aynı sıcaklıkta kalması için referanstan daha fazla veya daha az ısının akması gerekmesidir. Daha az veya daha fazla ısının numuneye akması gerekip gerekmediği, işlemin ekzotermik veya endotermik olmasına bağlıdır. Örneğin, katı bir numune bir sıvıya eridiğinde, sıcaklığını referans ile aynı oranda arttırmak için numuneye daha fazla ısı akması gerekir. Bu, katıdan sıvıya endotermik faz geçişinden geçerken numunenin ısıyla emiliminden kaynaklanır. Benzer şekilde, örnek ekzotermik işlemlerden geçtiği için (kristalizasyon gibi) örnek sıcaklığını yükseltmek için daha az ısı gerekir. Numune ve referans arasındaki ısı akışındaki farkı gözlemleyerek, diferansiyel tarama kalorimetreleri, bu tür geçişler sırasında emilen veya bırakılan ısı miktarını ölçebilir. DSC, cam geçişleri gibi daha ince fiziksel değışiklikleri gözlemlemek için de kullanılabilir. Endüstriyel ortamlarda, numune saflığını değerlendirmede ve polimer kürünü incelemek için uygulanabilirliği nedeniyle kalite kontrol aracı olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır [104-106].

Tipik bir DSC eğrisi ve bu eğrideki pik noktalarının hangi faz başlangıcı ve bitişı olduğunu gösteren grafik Şekil 3.11 'de gösterilmiştir.

Şekil hafızalı alışımlarda bu grafik yardımı ile faz değışimleri rahatlıkla anlaşılabilir. Piklerin birbirlerine olan sıcaklık farkları piklerin ait olmuş oldukları faz çeşidini de belirlemektedir.



Şekil 3.10. Shimadzu DSC-60A Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı.



Şekil 3.11. Tipik DSC eğrisi gösterimi [97].

3.3. X Işını Difraksiyonu Analiz Tekniği

X ışını difraksiyonu literatürde XRD olarak da anılmaktadır. Temelinde malzeme üzerine X ışını gönderilerek X ışını kırınım yöntemi ile bir kristalin atomik ve moleküler yapısını inceleme amaçlı yapılan bir analiz türüdür. Analiz detayında numunenin kristal yapısı üzerine X ışını gönderilerek kırınıma uğramış olan ışının açı ve genlik miktarları desen yansıması şeklinde sonuç alınır. Yöntem Bragg yasası esasına dayanır ve üç parametrenin birleştirilmesiyle elde edilen bilgiler içerir. Bu parametreler;

1. En yüksek kırınım pozisyonu,
2. En yüksek pikin şiddeti,
3. Kırınım açısının bir fonksiyonu olarak şiddetin dağılımıdır.

X ışını difraksiyonu analiz yönteminde numune döner bir tabla üzerine yerleştirilir ve numune üzerine gönderilen X ışını bombardımanı ile kırınım oluşturulur. Bu kırınım dönme esnasındaki açı miktarları ile X ışını deseni meydana gelir. Elde edilen desenler ile numunenin her bir fazının Miller indisleri hesaplanması ile fazlara ait hücre kafes parametreleri gibi yapısal özellikler belirlenebilir [56, 107].

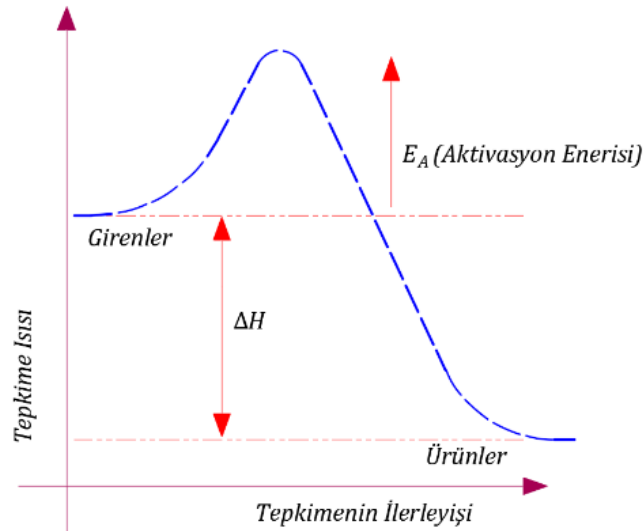
Tez çalışmamız için Mersin Üniversitesi bünyesinde yer alan ileri teknoloji eğitim, araştırma ve uygulama merkezinde bulunan Şekil 3.12 'de görseli yer alan cihaz (Model Smartlab, Rigaku) kullanılmıştır. X-ışını kırınımı (XRD) analizleri $35^\circ \leq 2\theta \leq 60^\circ$ değer aralığında ve 2 derece/dakika tarama hızı ile grafikler elde edilmiştir. XRD analizi ölçümleri $\lambda = 1.5405 \text{ \AA}$ olan $\text{CuK}\alpha$ radyasyonu kullanılarak alınmıştır.



Şekil 3.12. XRD analiz cihazı.

3.4. Aktivasyon Enerjisi Hesaplamaları

Aktivasyon enerjisi değeri, her iki faz dönüşümü için gereklidir. Ayrıca, alaşımın kristalleşme davranışını gösterir [108]. Bir sistemin belli bir süre veya sıcaklık aralığında aldığı veya verdiği ısı miktarı entalpi olarak adlandırılır. Aktivasyon enerjisi ve entalpi arasındaki ilişki Şekil 3.13 'de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Aktivasyon Enerjisi

Kissinger [109] metodu (3) tarafından verilen kinetik aktivasyon enerjisi parametresi için denklem aşağıda verilmiştir;

$$\frac{d[\ln(\emptyset A_{\max}^2)]}{d(1/A_{\max})} = - \frac{E}{R} \quad (3)$$

Denklemden verilen $A_{\max}$ DSC eğrisinden elde edilen östenit faz sıcaklığının en yüksek olduğu noktadır. R evrensel gaz sabitini ($R = 8.314 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}$), E ise aktivasyon enerjisini tarif etmektedir.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında CuAlMnFe kompozisyonlu şekil hafızalı alaşımlar ergitme yöntemi ile elde edildi. Alaşımda yaşlandırmanın dönüşüm sıcaklıkları (A_s , A_f , M_s , M_f) üzerine etkisi ve yaşlandırma yöntemi ile yaşlandırılmış numunelerin fiziksel özellikleri incelendi. Aynı zamanda da numunelerin yaşlandırılmadan önceki dönüşüm sıcaklıkları ile yaşlandırılma işleminden sonraki dönüşüm sıcaklıkları belirlenip, yaşlandırma işleminin dönüşüm sıcaklıkları ve fiziksel özellikler üzerine etkisi incelendi.

4.1. Yaşlandırma Deneyleri Termal Analizleri

Yaşlandırma deneylerinde kullanılmak üzere ark ergitme fırınında argon ortamında üretilen CAMF-H1-900, CAMF-1-350, CAMF-2-350, CAMF-3-350, CAMF-4-350 ve CAMF-5-350 numuneleri X ışını difraksiyonu analizi ve diferansiyel kalorimetre cihazı analizi için uygun geometriye getirilmiş ve parlatma işlemi yapılmıştır. CAMF-1-350, CAMF-2-350, CAMF-3-350, CAMF-4-350 ve CAMF-5-350 numuneleri belirlenen parametrelerde kül fırını yardımı ile 350 °C sıcaklıkta yaşlandırma işlemine tabi tutulmuşlardır. Numuneler oda sıcaklığında soğutulduktan sonra numunelerin üzerindeki oksit tabakasını silmek ve analizlere hazır hale getirmek için numuneler parlatma cihazında temizlenmişlerdir.

Şekil 3.10 'da görseli bulunan Shimadzu DSC-60A marka Diferansiyel kalorimetre cihazında homojen numune dahil tüm numuneler için 5, 15, 25, 35, 45 °C /dakika hızlarında ısıtma/soğutma yapılarak analiz sonuçları elde edilmiştir. Her ısıtma/soğutma hızlarında elde edilen grafik değerleri ile östenit ve martenzit faz başlangıç ve bitiş dönüşüm sıcaklıkları, Tong ve Wayman [110] tarafından öne sürülen;

$$T_0 = (A_f + M_s)/2 \quad (4)$$

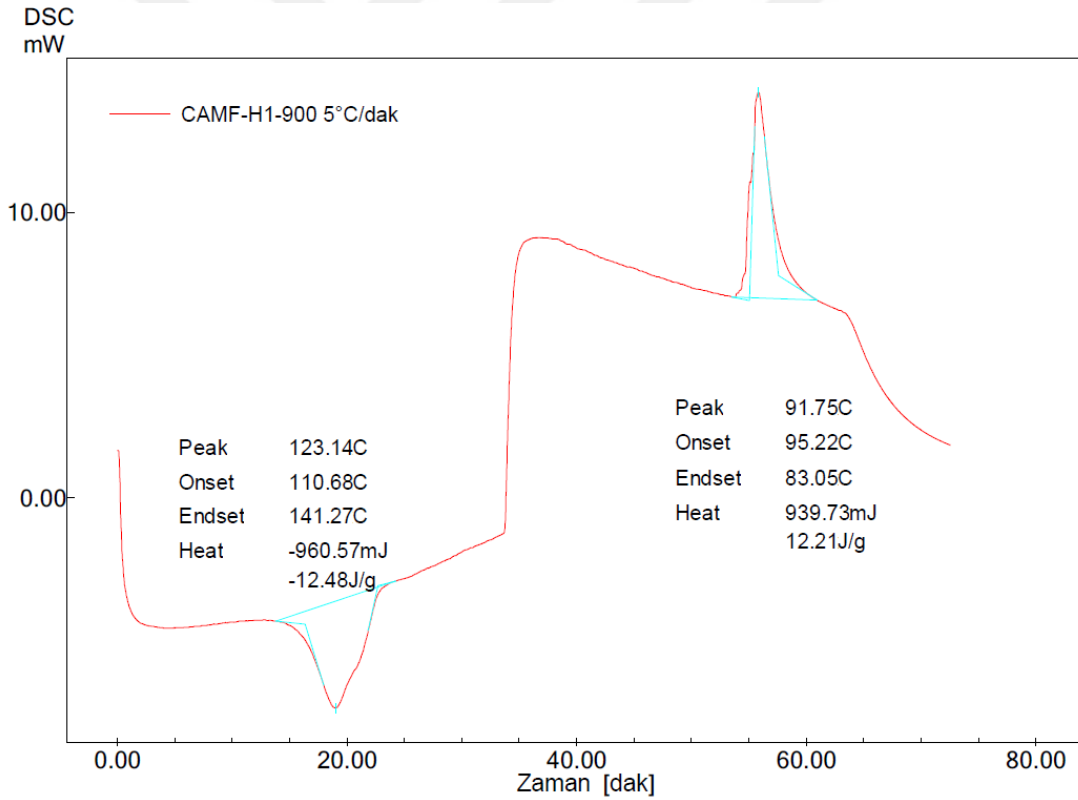
denklemini ile denge sıcaklığı ve entropi değerleri Prado ve arkadaşları tarafından öne sürülen [111];

$$\Delta S_{M \rightarrow A} = \Delta h_{M \rightarrow A}/T_0 \quad (5)$$

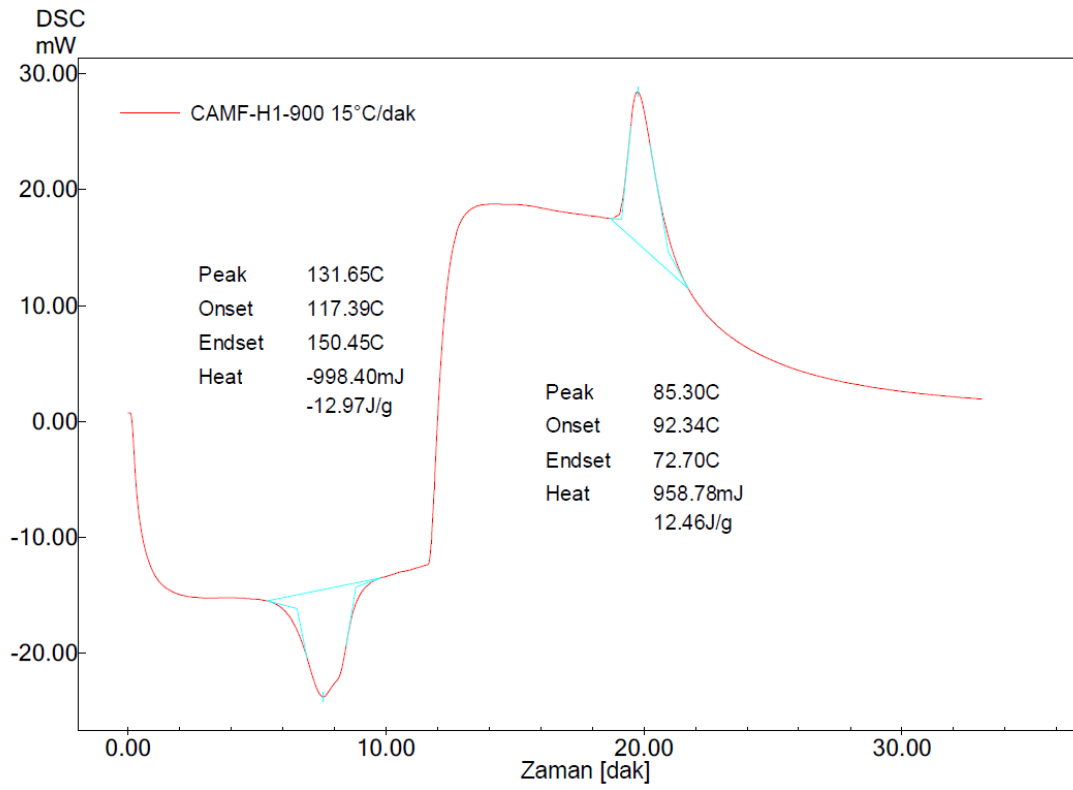
denklemini ile hesaplanmış ve entalpi değerleri de bulunmuştur.

4.1.1. CAMF-H1-900 Numunesi Termal Analiz Sonuçları

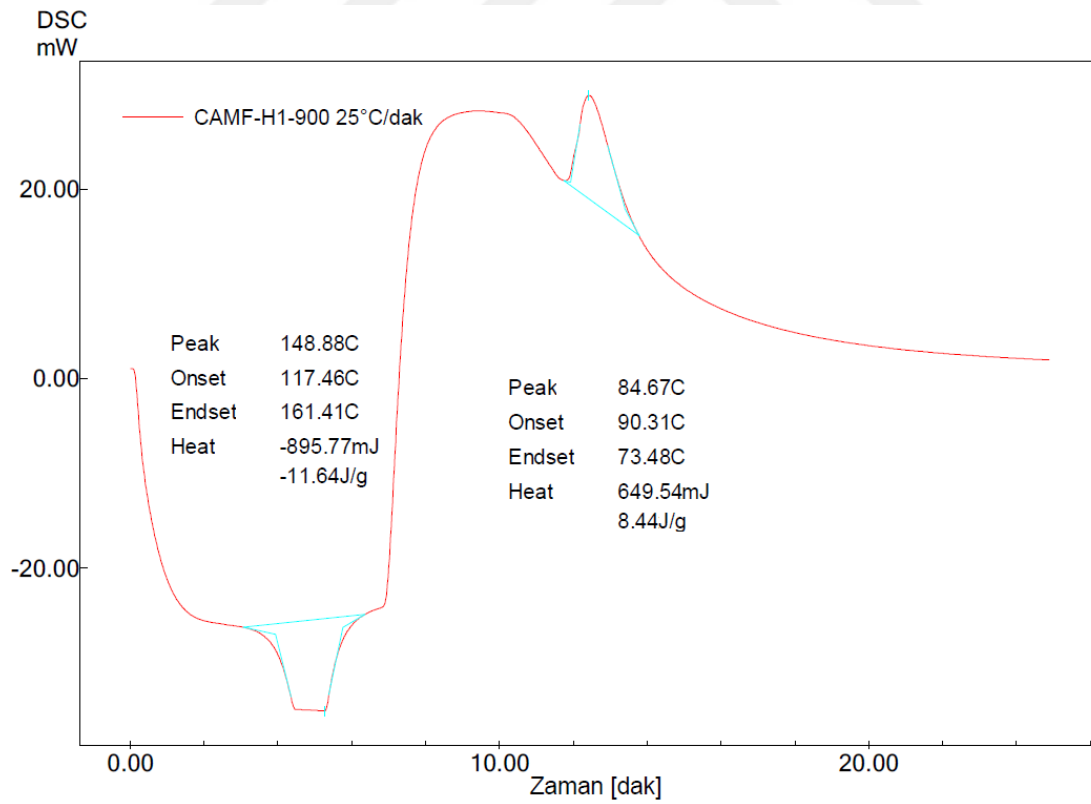
CAMF-H1-900 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.1– Şekil 4.5 ile verilmiştir. Bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları Denklem 4 'de, entropi değerleri ve Denklem 5 'de hesaplanıp, Tablo 4.1 'de verilmiştir. CAMF-H1-900 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 110.68-141.27 °C, 110.68-150.45 °C, 110.68-161.41 °C, 110.68-151.54 °C, 110.68-159.92 °C dir. Her bir ısıtma/soğutma hızı için martenzit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 95.22-83.05 °C, 92.34-72.7 °C, 90.31-73.48 °C, 93.24-79.39 °C, 93.02-78.08 °C, olarak belirlenip Tablo 4.1 'de verilmiştir. Farklı ısıtma/soğutma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma/soğutma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.6 'da DSC eğrilerinde ve Tablo 4.1 'de gösterilmektedir.



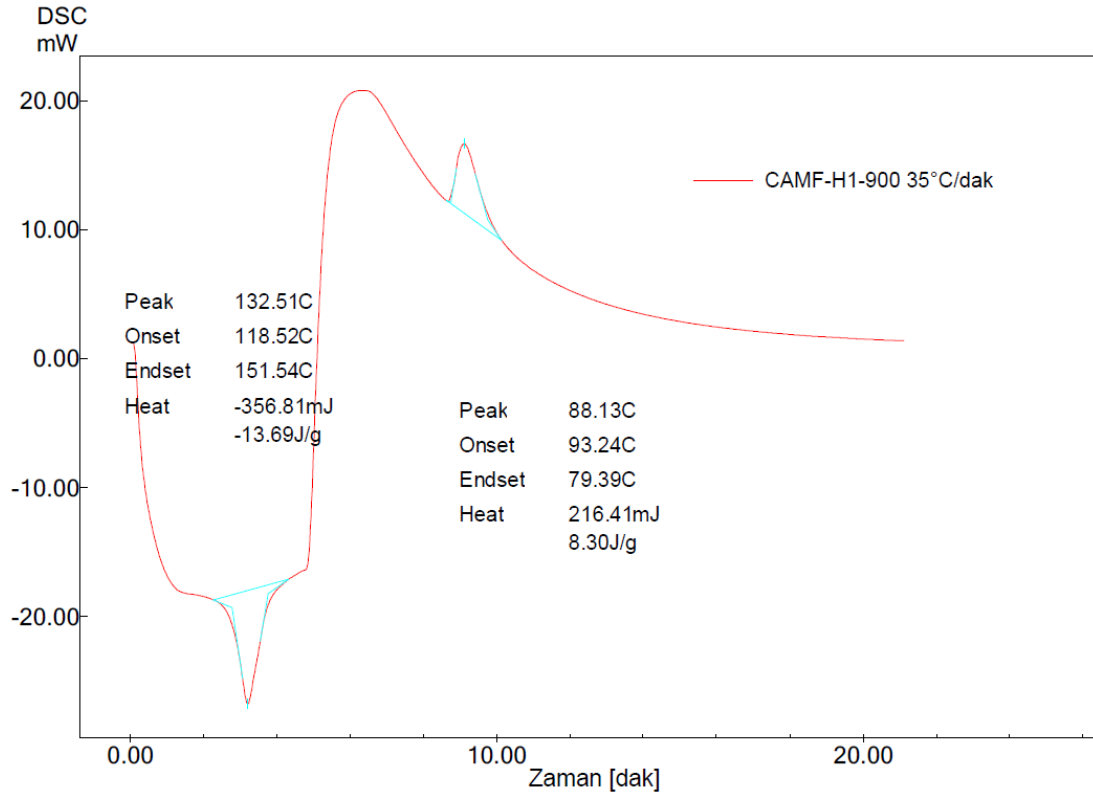
Şekil 4.1. CAMF-H1-900 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



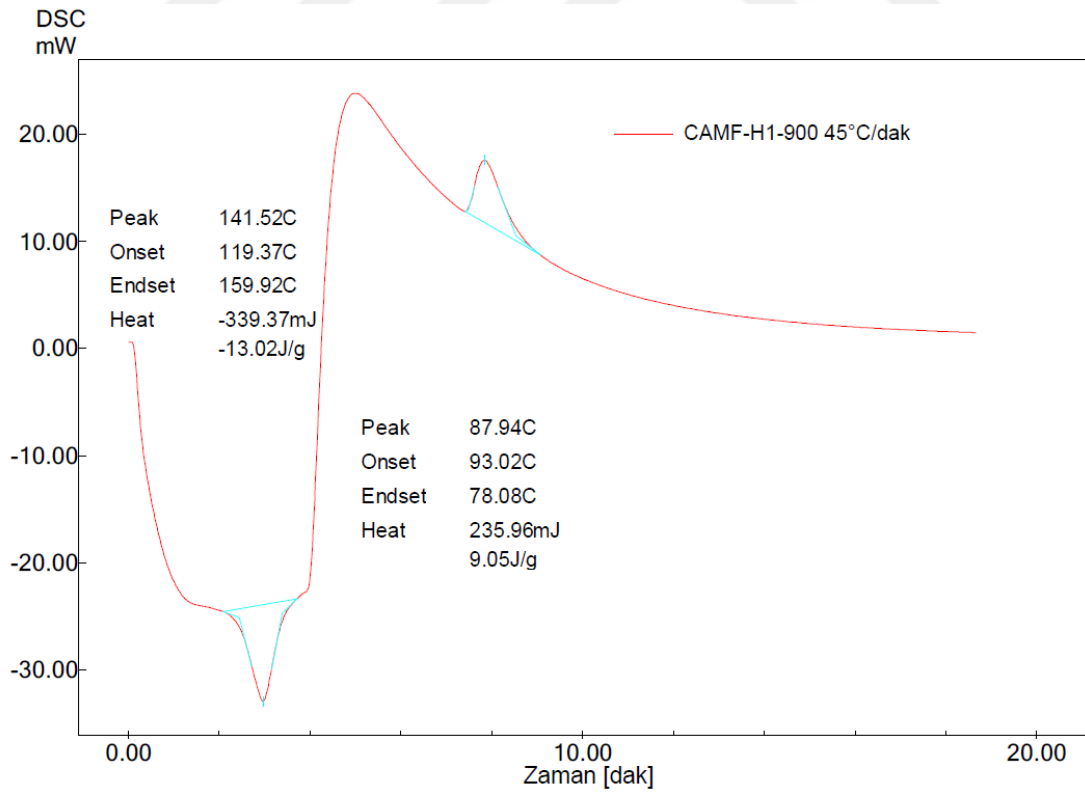
Şekil 4.2. CAMF-H1-900 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



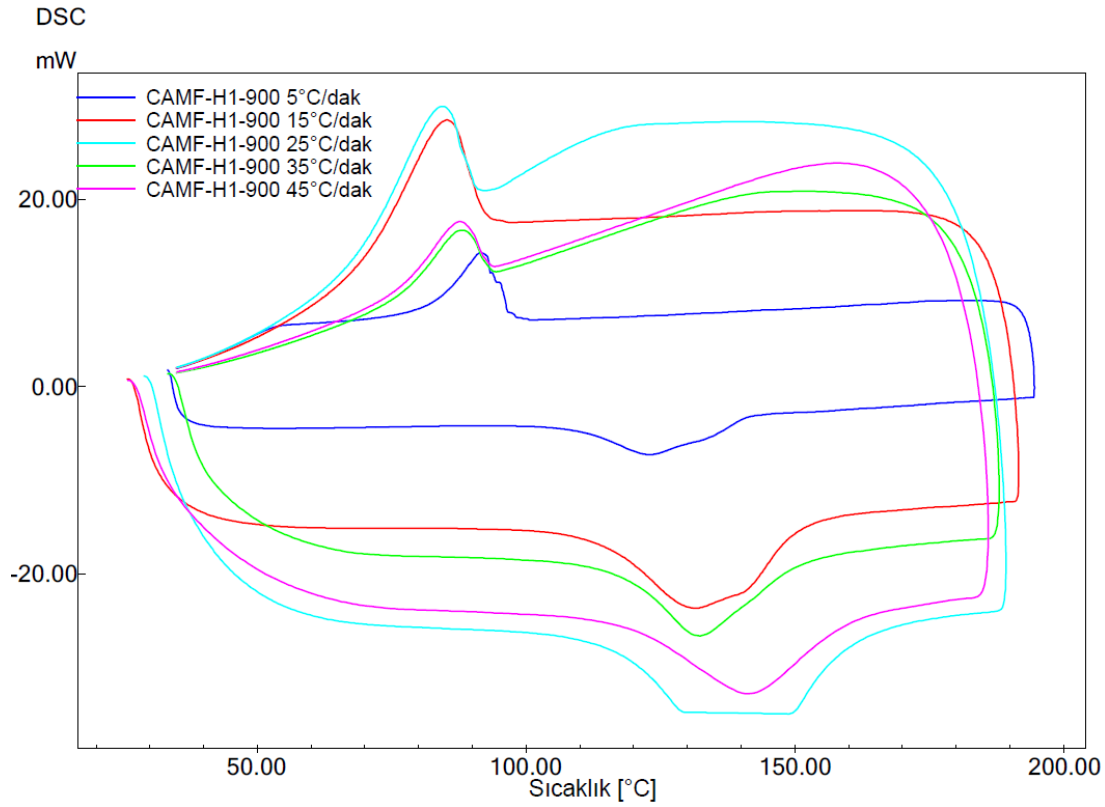
Şekil 4.3. CAMF-H1-900 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.4. CAMF-H1-900 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.5. CAMF-H1-900 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.6. CAMF-H1-900 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

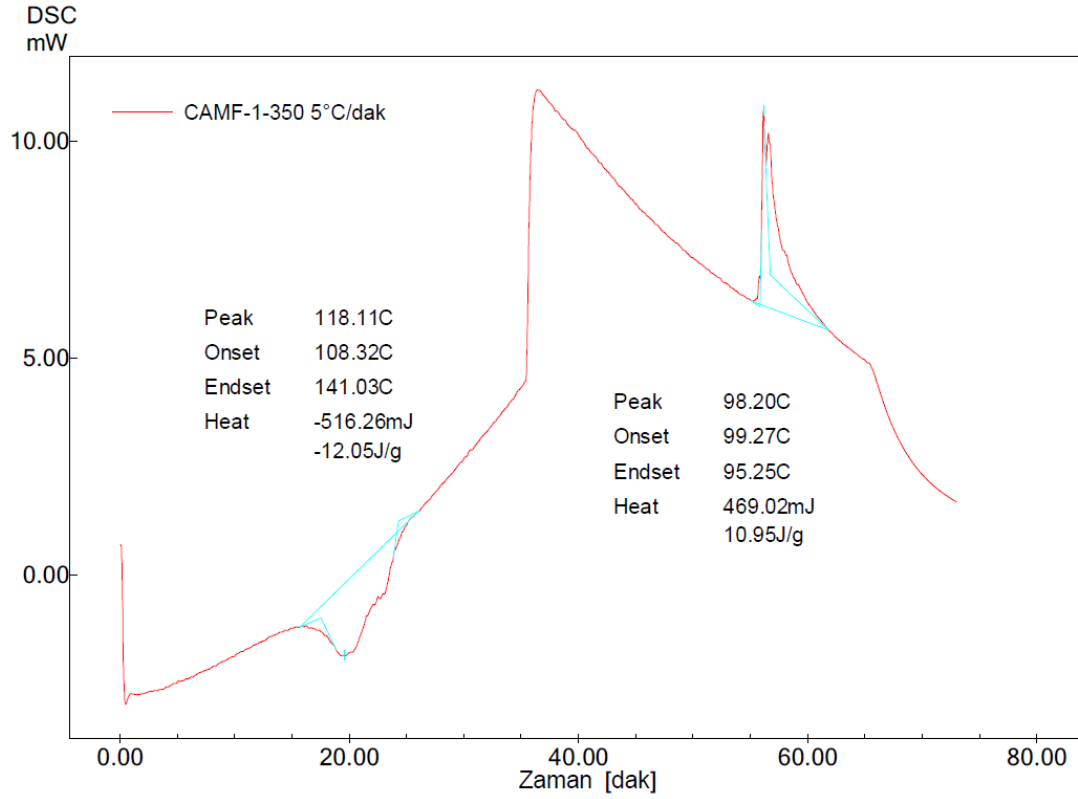
Tablo 4.1. CAMF-H1-900 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı	A_{max} (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)	$\Delta h_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta s_{M \rightarrow A}$ (J/gK)	M_{max} (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta h_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta s_{A \rightarrow M}$ (J/gK)	T_0 (K)
5 °C/dak	123.1	110.7	141.3	-12.5	-0.03	91.8	95.2	83.1	12.2	0.03	391.40
15 °C/dak	131.7	110.7	150.5	-13.0	-0.03	85.3	92.3	72.7	12.5	0.03	394.55
25 °C/dak	148.9	110.7	161.4	-11.6	-0.03	84.7	90.3	73.5	8.4	0.02	399.01
35 °C/dak	132.5	110.7	151.5	-13.7	-0.03	88.1	93.2	79.4	8.3	0.02	395.54
45 °C/dak	141.5	110.7	159.9	-13.0	-0.03	87.9	93.0	78.1	9.1	0.02	399.62

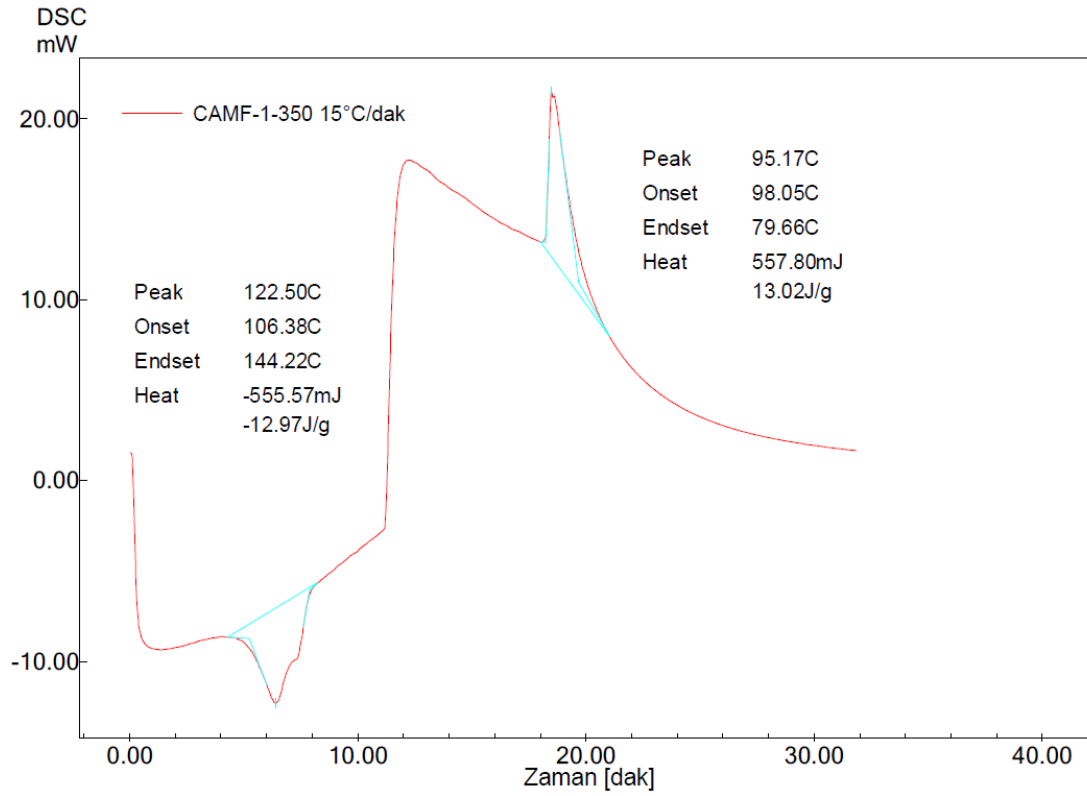
4.1.2. CAMF-1-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları

CAMF-1-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.7 - Şekil 4.11 ile verilmiştir. Bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları ve entropi değerleri hesaplanıp, Tablo 4.2 'de verilmiştir. CAMF-1-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 108.3-141 °C, 106.4-144.2 °C, 108.2-147.8 °C, 107.1-152.7 °C, 104-159.1 °C dir. Her bir ısıtma/soğutma hızı için martenzit

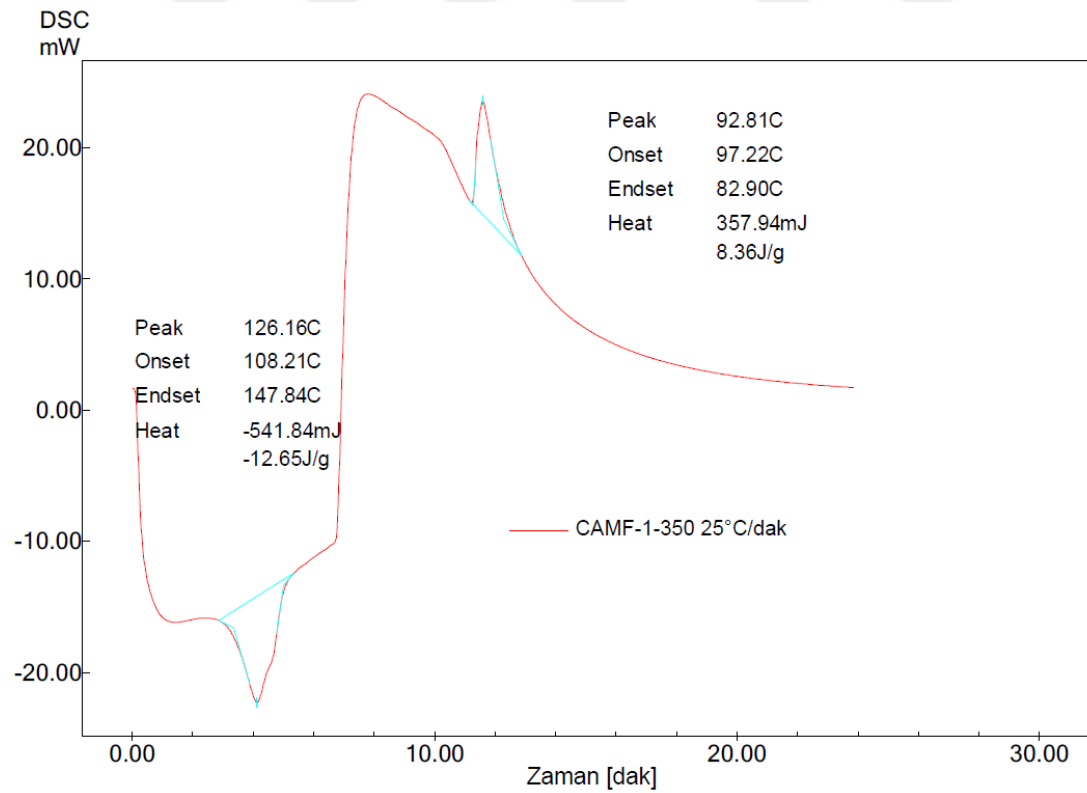
başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 99.27-95.25 °C, 98.05.-79.66 °C, 97.22-82.9 °C, 97.31-83.24 °C, 97.06-81.95 °C, olarak belirlenip Tablo 4.2 'de verilmiştir. Farklı ısıtma/soğutma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma/soğutma hızı artıkc dönüşüm sıcaklıklarında da değışmeler gözlemlenmiştir. Bu değışimler Şekil 4.12 'de DSC eğrilerinde ve Tablo 4.2 'de gösterilmiştir.



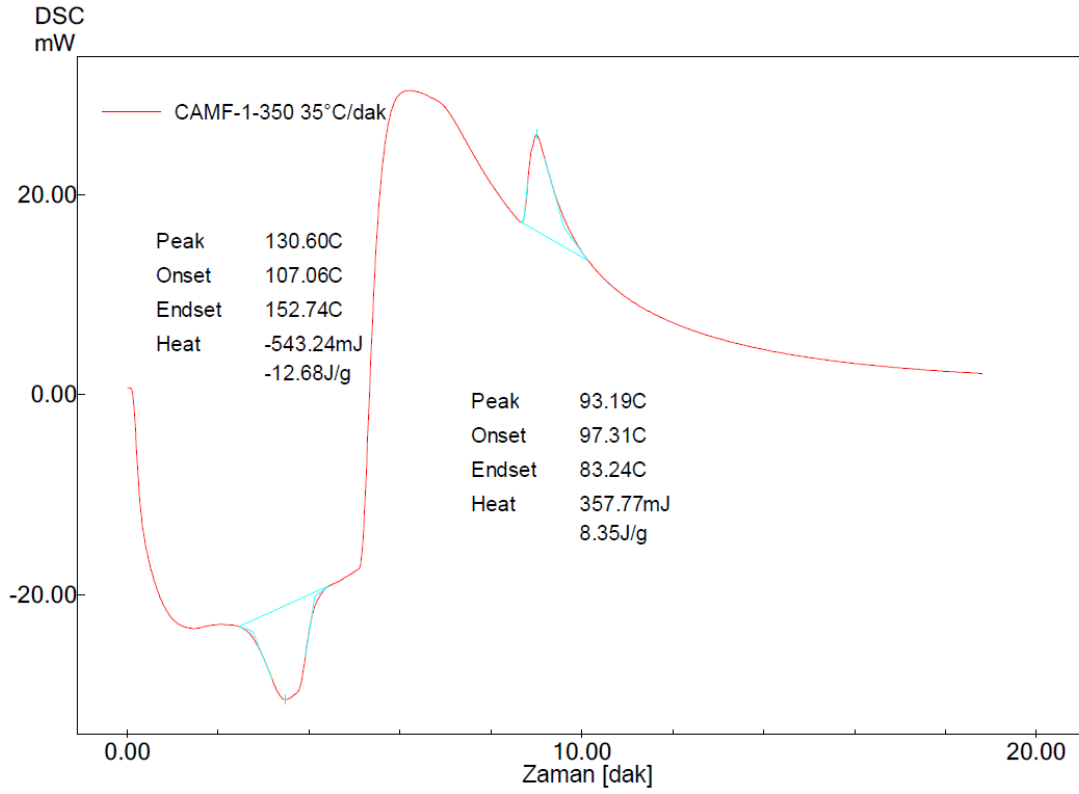
Şekil 4.7. CAMF-1-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



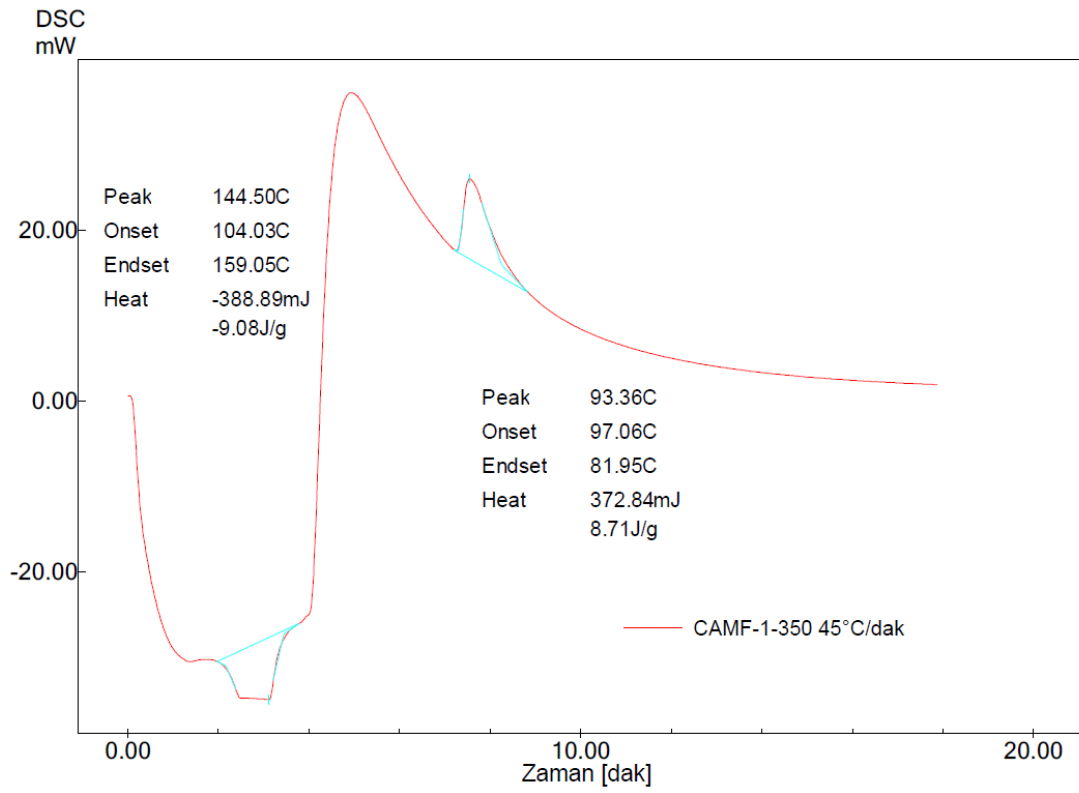
Şekil 4.8. CAMF-1-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



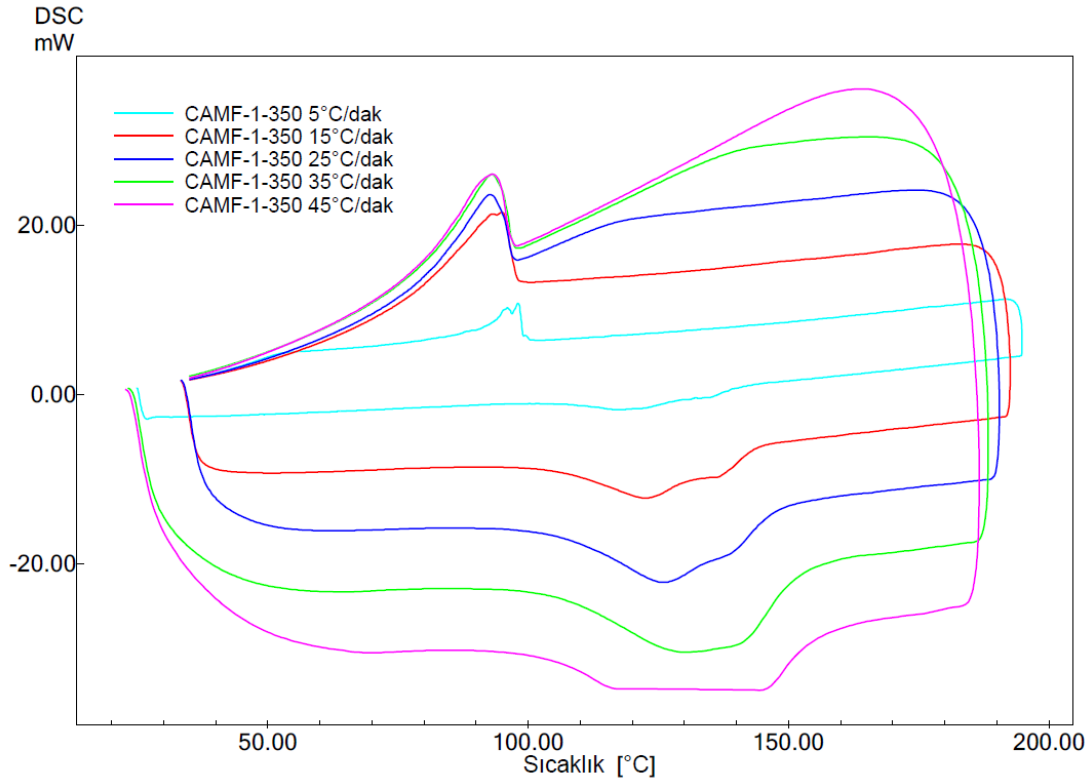
Şekil 4.9. CAMF-1-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.10. CAMF-1-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.11. CAMF-1-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.12. CAMF-1-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

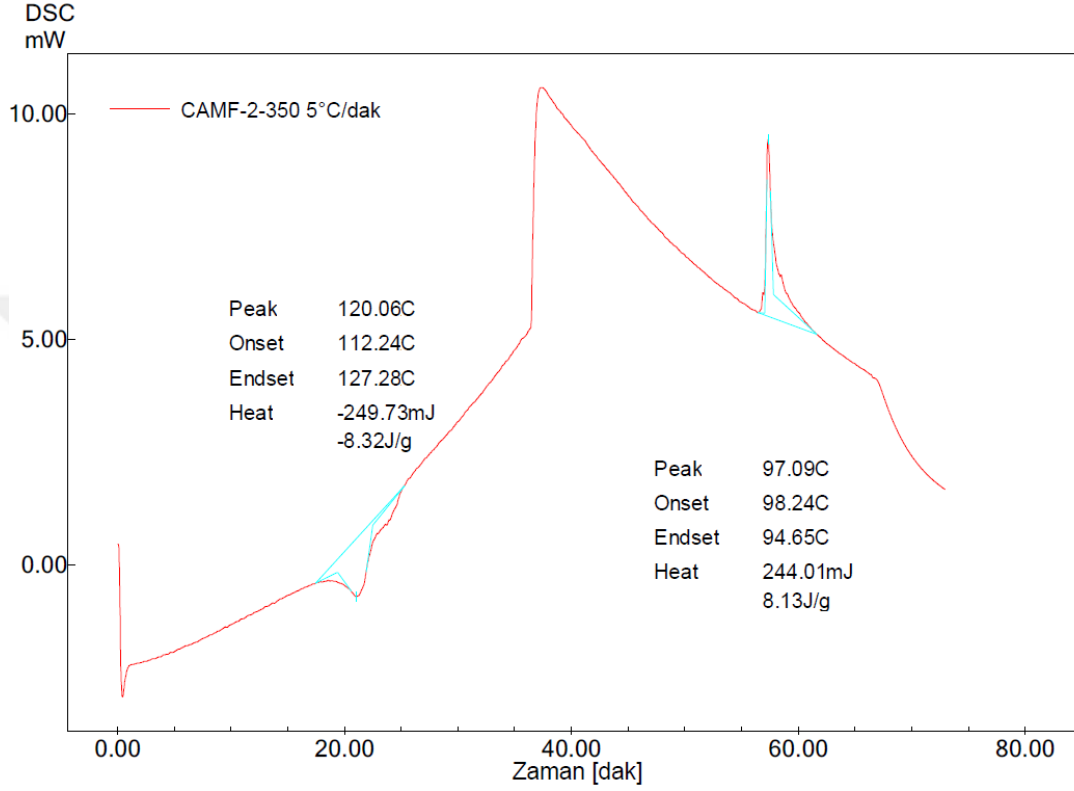
Tablo 4.2. CAMF-1-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı	A_{max} (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)	$\Delta h_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta s_{M \rightarrow A}$ (J/gK)	M_{max} (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta h_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta s_{A \rightarrow M}$ (J/gK)	T_0 (K)
5 °C/dak	118.1	108.3	141.0	-12.1	-0.03	98.2	99.3	95.3	11.0	0.03	393.30
15 °C/dak	122.5	106.4	144.2	-13.0	-0.03	95.2	98.1	79.7	13.0	0.03	394.29
25 °C/dak	126.2	108.2	147.8	-12.7	-0.03	92.8	97.2	82.9	8.4	0.02	395.68
35 °C/dak	130.6	107.1	152.7	-12.7	-0.03	93.2	97.3	83.2	8.4	0.02	398.18
45 °C/dak	144.5	104.0	159.1	-9.1	-0.02	93.4	97.1	82.0	8.7	0.02	401.21

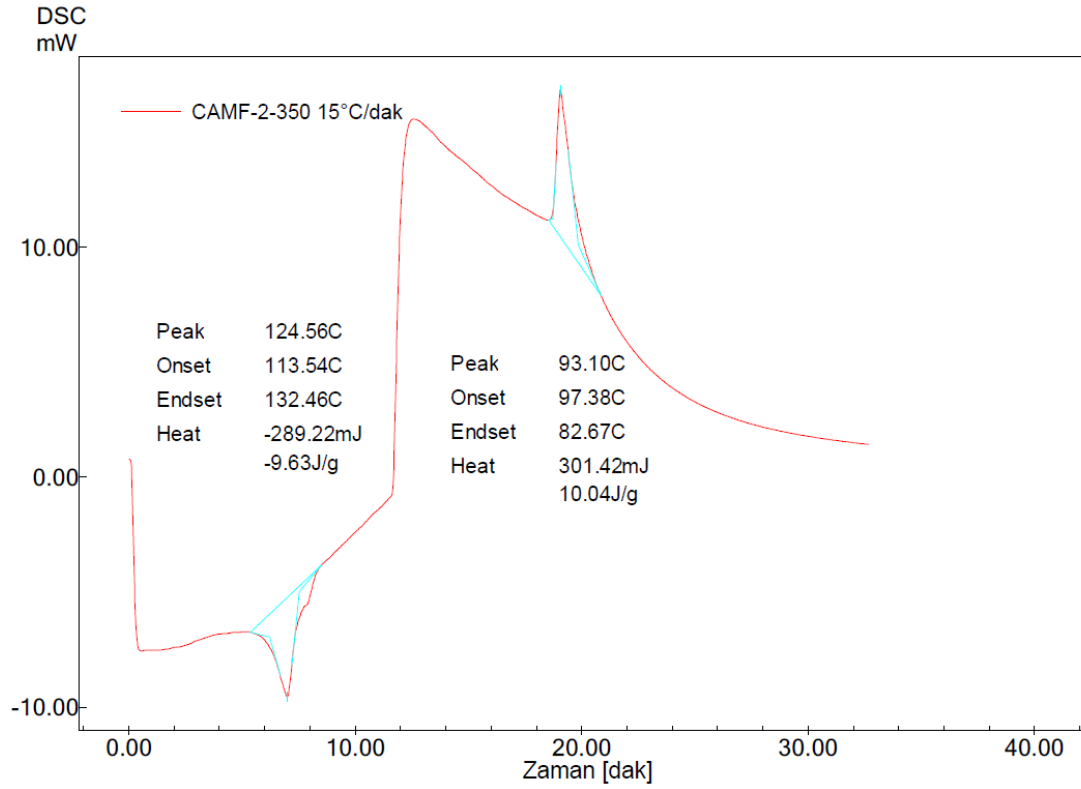
4.1.3. CAMF-2-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları

CAMF-2-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.13 – Şekil 4.17 ile verilmiştir. Bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları ve entropi değerleri hesaplanıp, Tablo 4.3 'de verilmiştir. CAMF-2-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 120.1-112.2 °C, 124.6-113.5 °C, 126.9-115.1 °C, 129.5-114.8 °C, 129.6-112.9 °C dir. Her bir ısıtma/soğutma hızı

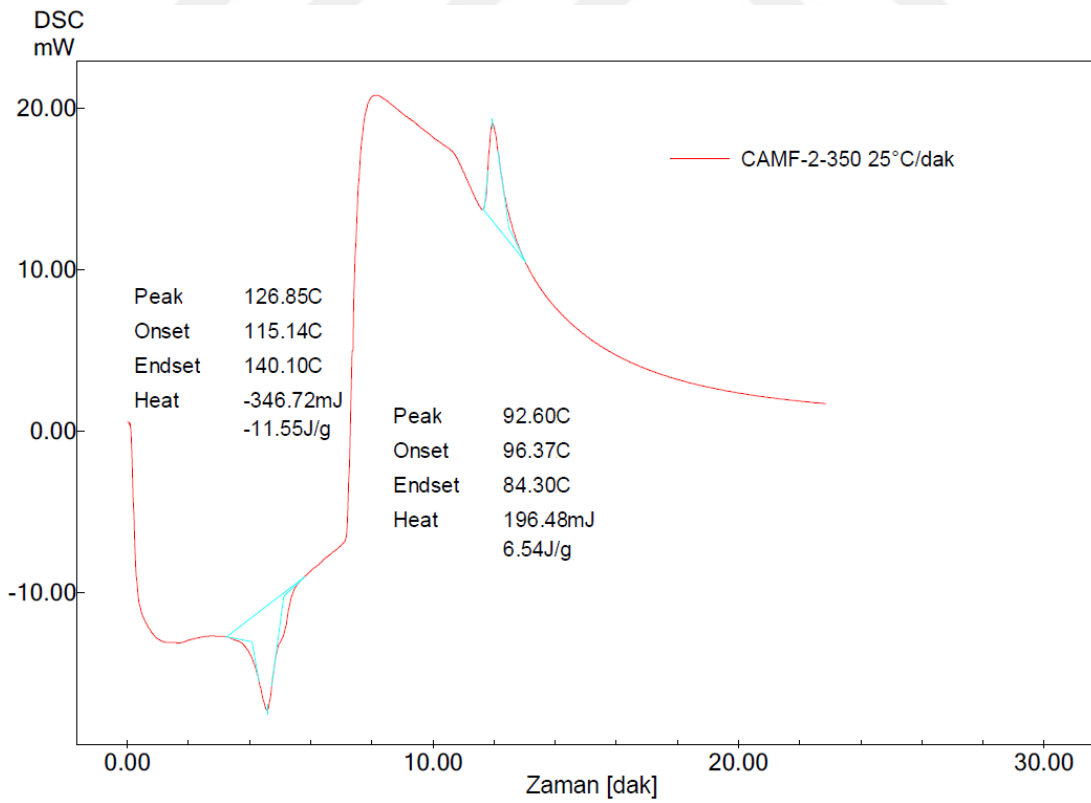
için martenzit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 98.24-94.65 °C, 97.38.-82.67 °C, 96.37-84.3 °C, 95.2-81.31 °C, 96.246-83.57 °C, olarak belirlenip Tablo 4.3 'de verilmiştir. Farklı ısıtma/soğutma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma/soğutma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.18 'de DSC eğrilerinde ve Tablo 4.3 'de gösterilmektedir.



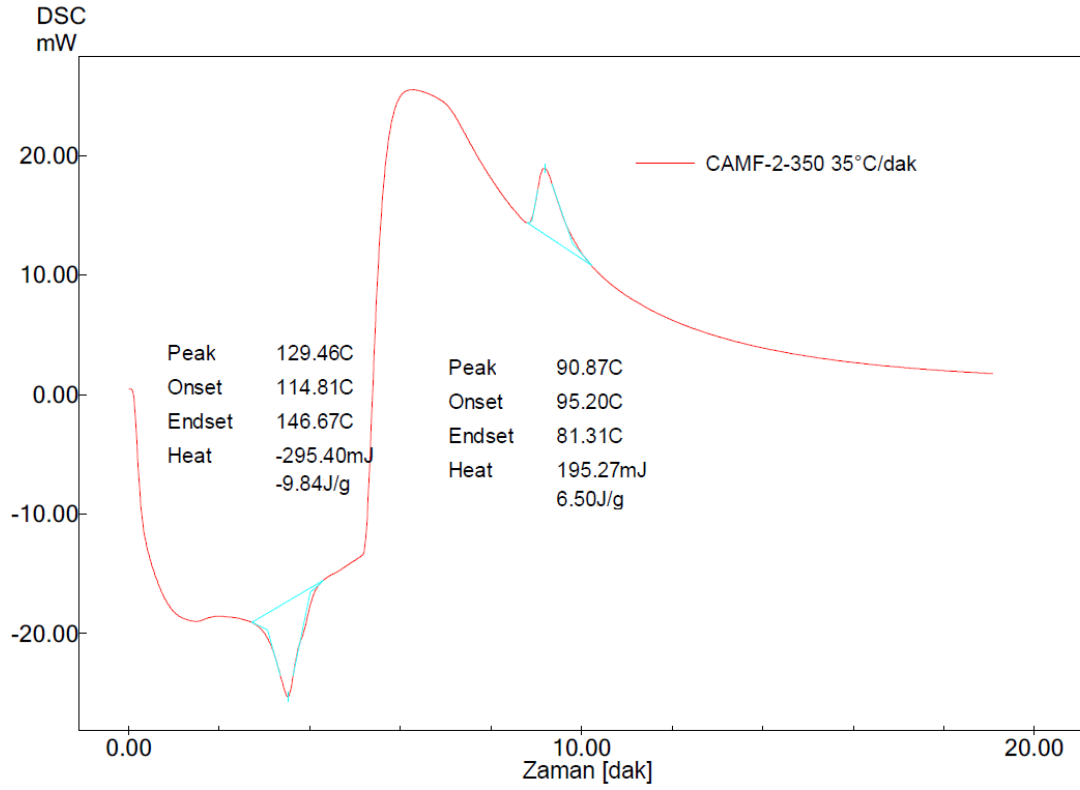
Şekil 4.13. CAMF-2-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



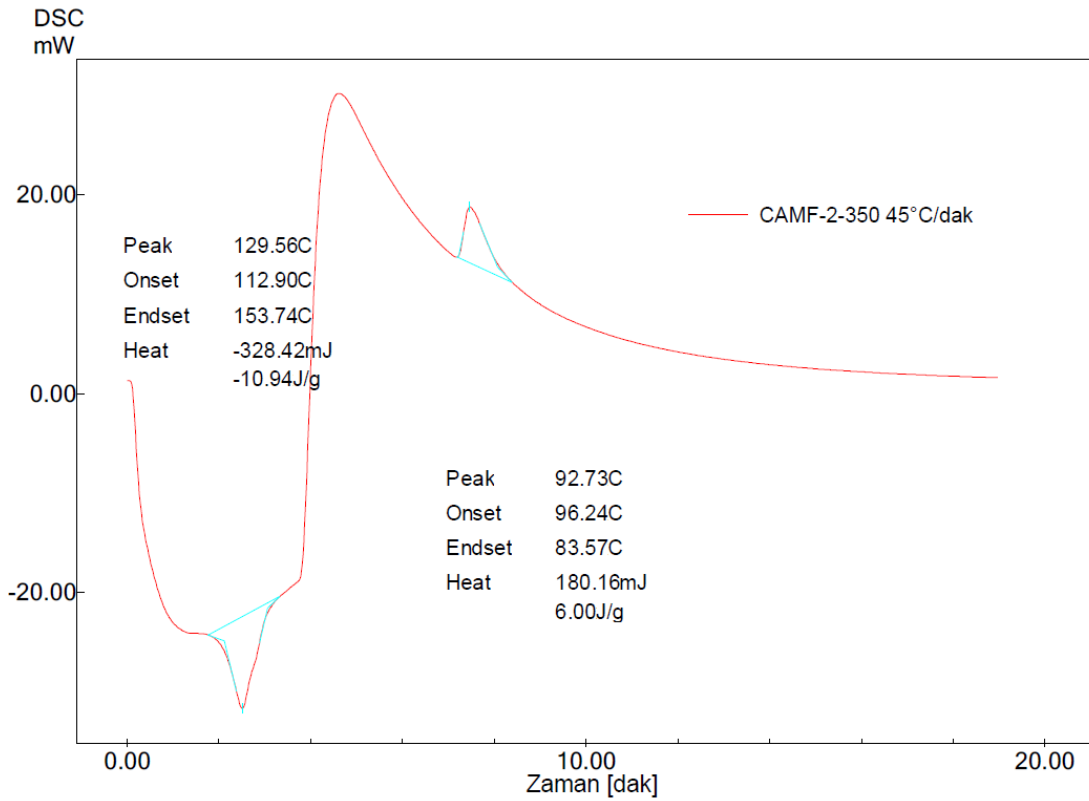
Şekil 4.14. CAMF-2-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



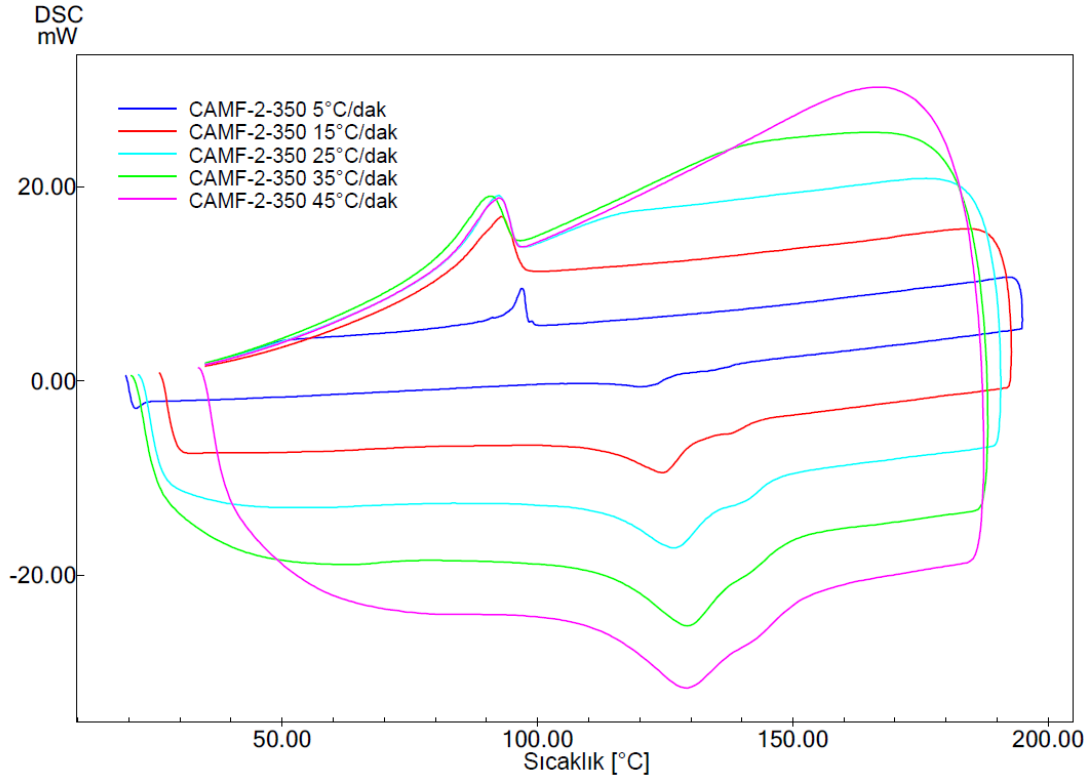
Şekil 4.15. CAMF-2-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.16. CAMF-2-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.17. CAMF-2-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.18. CAMF-2-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

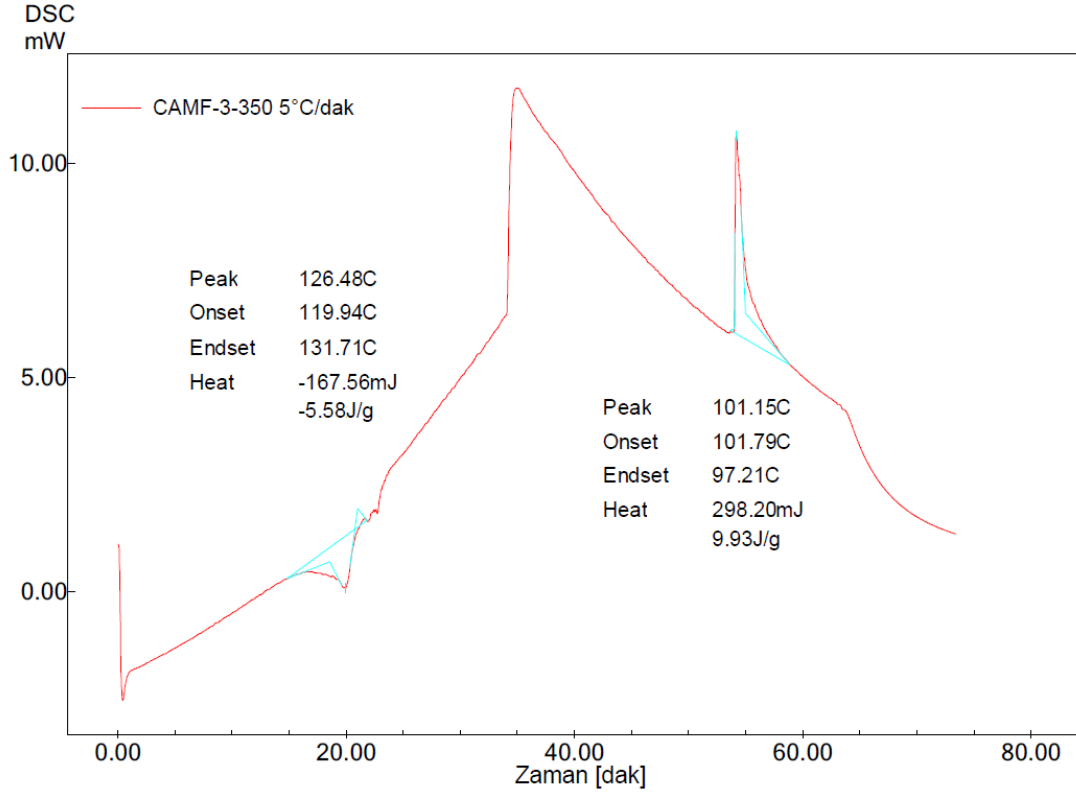
Tablo 4.3. CAMF-2-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı	A_{max} (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)	$\Delta h_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta s_{M \rightarrow A}$ (J/gK)	M_{max} (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta h_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta s_{A \rightarrow M}$ (J/gK)	T_0 (K)
5 °C/dak	120.1	112.2	127.3	-8.3	-0.02	97.1	98.2	94.7	8.1	0.02	385.91
15 °C/dak	124.6	113.5	132.5	-9.6	-0.02	93.1	97.4	82.7	10.0	0.03	388.07
25 °C/dak	126.9	115.1	140.1	-11.6	-0.03	92.6	96.4	84.3	6.5	0.02	391.39
35 °C/dak	129.5	114.8	146.7	-9.8	-0.02	90.9	95.2	81.3	6.5	0.02	394.09
45 °C/dak	129.6	112.9	153.7	-10.9	-0.03	92.4	96.2	83.6	6.0	0.02	398.14

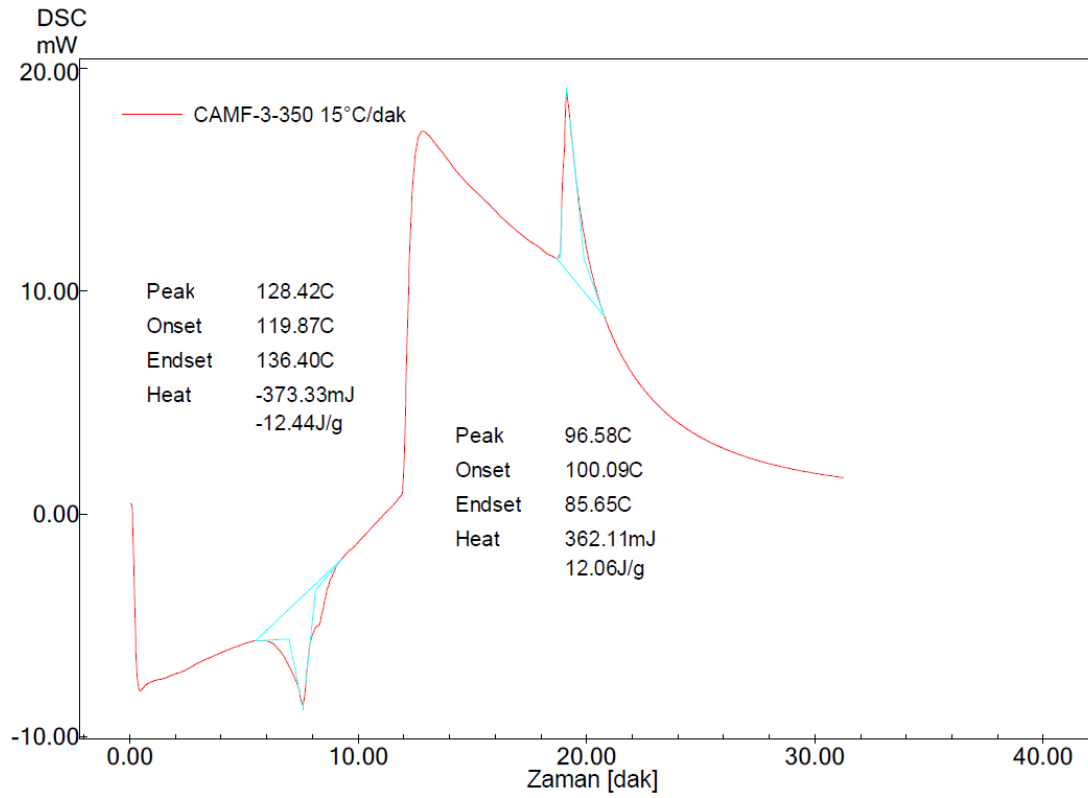
4.1.4. CAMF-3-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları

CAMF-3-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.19 – Şekil 4.23 ile verilmiştir. Bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları ve entropi değerleri hesaplanıp, Tablo 4.4 'de verilmiştir. CAMF-3-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 119.9-131.7 °C, 119.9-136.4 °C, 119.1-142.5 °C, 118.2-151.5 °C, 117.1-153.3 °C dir. Her bir ısıtma/soğutma hızı için martenzit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 101.8-97.21 °C, 100.1-85.65 °C, 99.65-

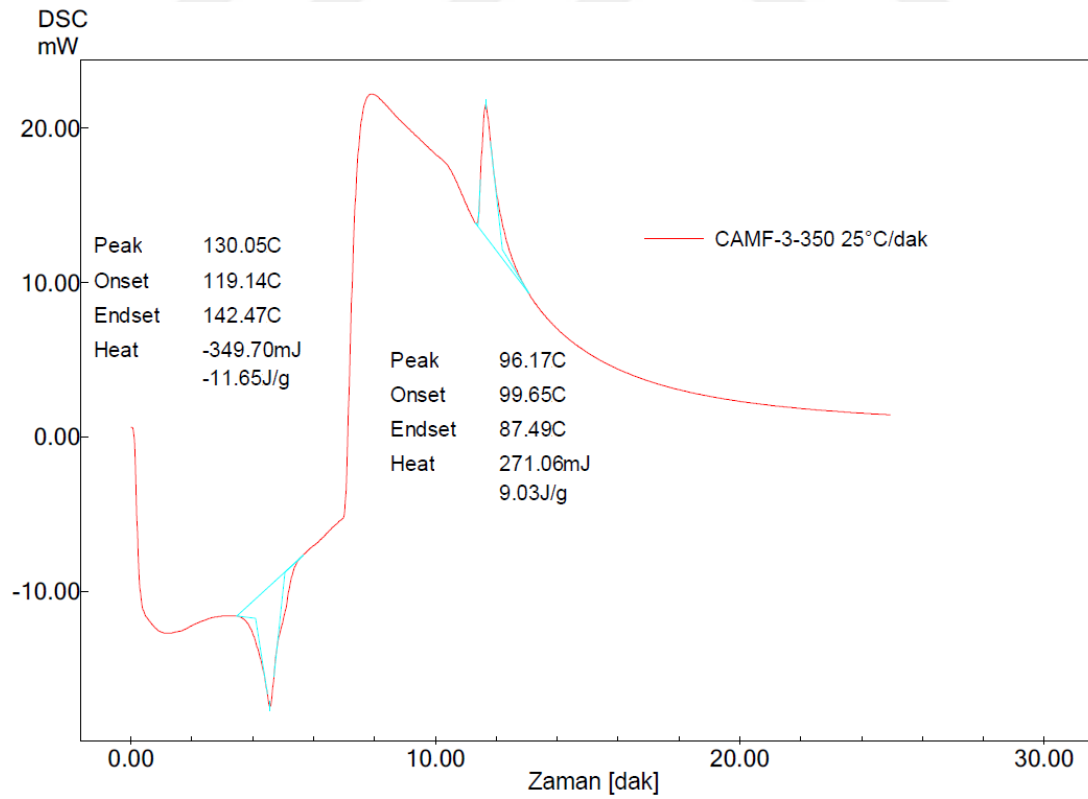
87.49 °C, 99.37-85.68 °C, 99.02-88.08 °C, olarak belirlenip Tablo 4.4 'de verilmiştir. Farklı ısıtma/soğutma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma/soğutma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.24 'de DSC eğrilerinde ve Tablo 4.4 'de gösterilmektedir.



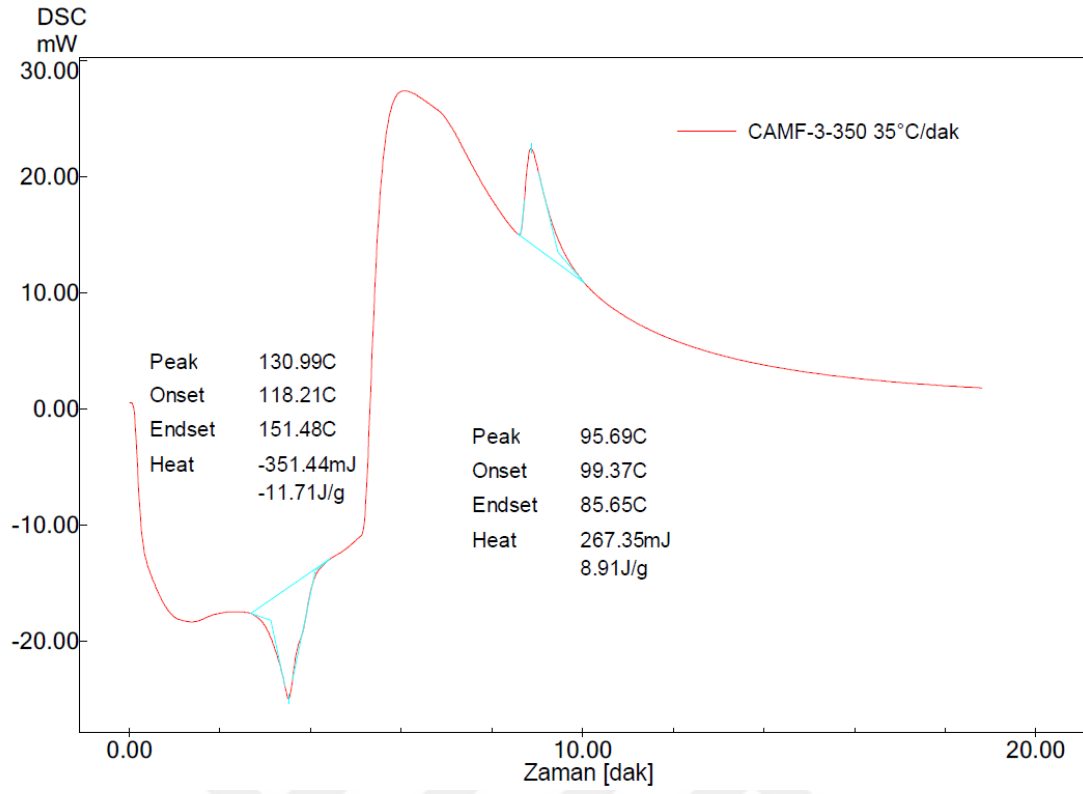
Şekil 4.19. CAMF-3-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



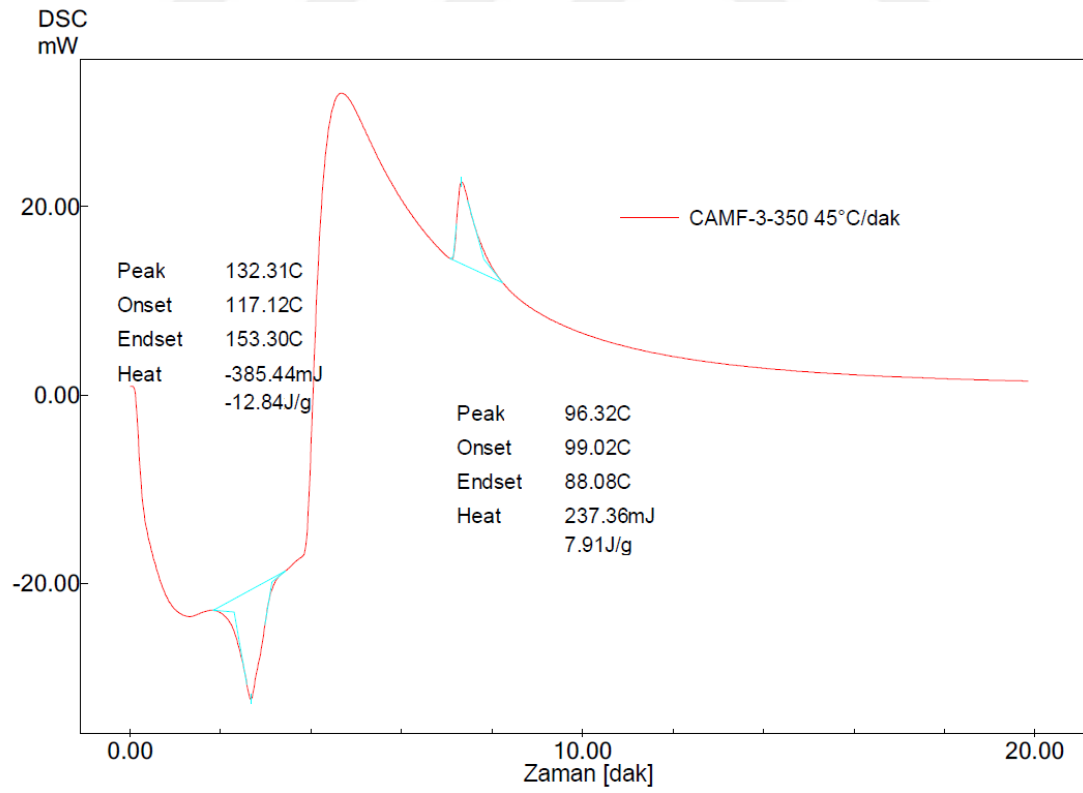
Şekil 4.20. CAMF-3-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



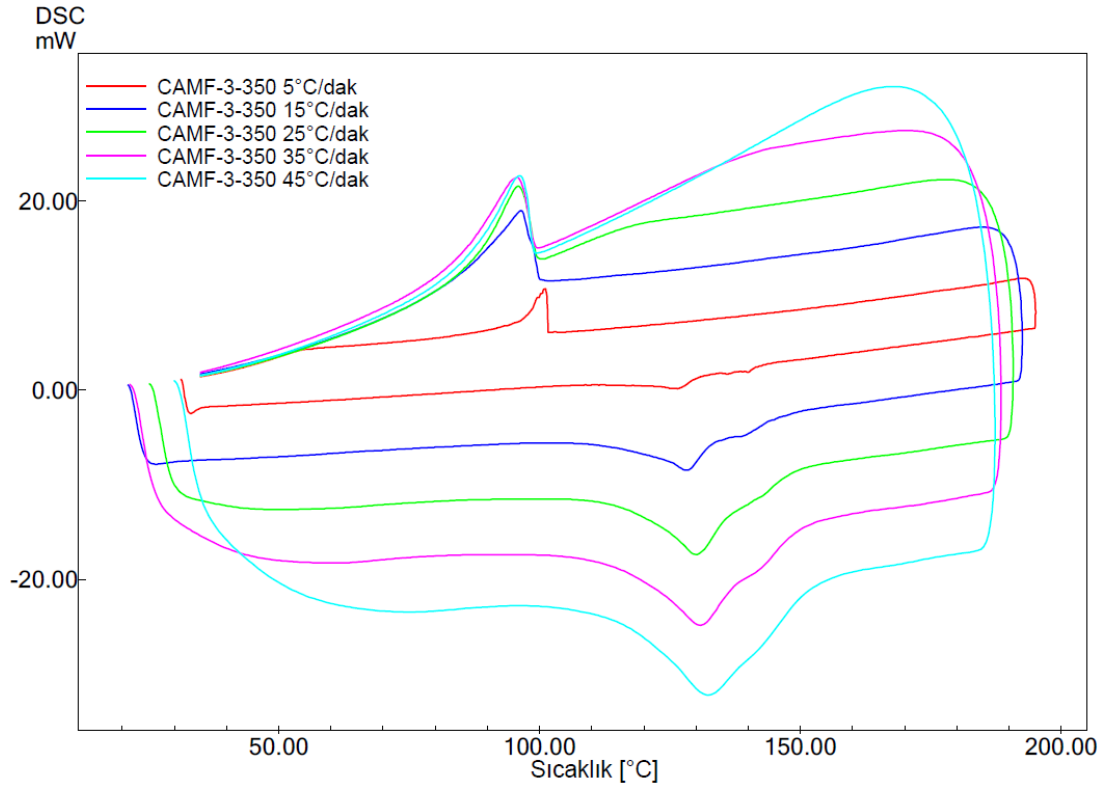
Şekil 4.21. CAMF-3-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.22. CAMF-3-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.23. CAMF-3-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.24. CAMF-3-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

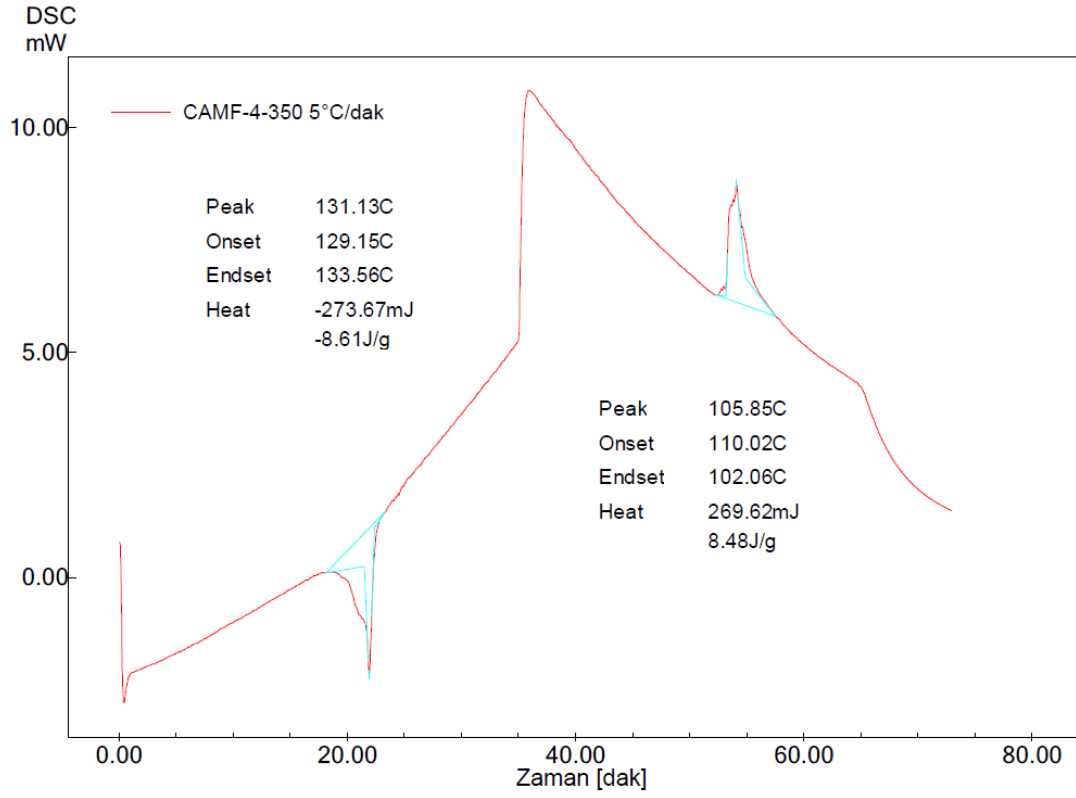
Tablo 4.4. CAMF-3-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı	A_{max} (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)	$\Delta h_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta s_{M \rightarrow A}$ (J/gK)	M_{max} (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta h_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta s_{A \rightarrow M}$ (J/gK)	T_0 (K)
5 °C/dak	126.5	119.9	131.7	-5.6	-0.01	101.2	101.8	97.2	9.9	0.03	389.90
15 °C/dak	128.4	119.9	136.4	-12.4	-0.03	96.6	100.1	85.7	12.1	0.03	391.40
25 °C/dak	130.1	119.1	142.5	-11.7	-0.03	96.2	99.7	87.5	9.0	0.02	394.21
35 °C/dak	131.0	118.2	151.5	-11.7	-0.03	95.7	99.4	85.7	8.9	0.02	398.58
45 °C/dak	132.3	117.1	153.3	-12.8	-0.03	96.3	99.0	88.1	7.9	0.02	399.31

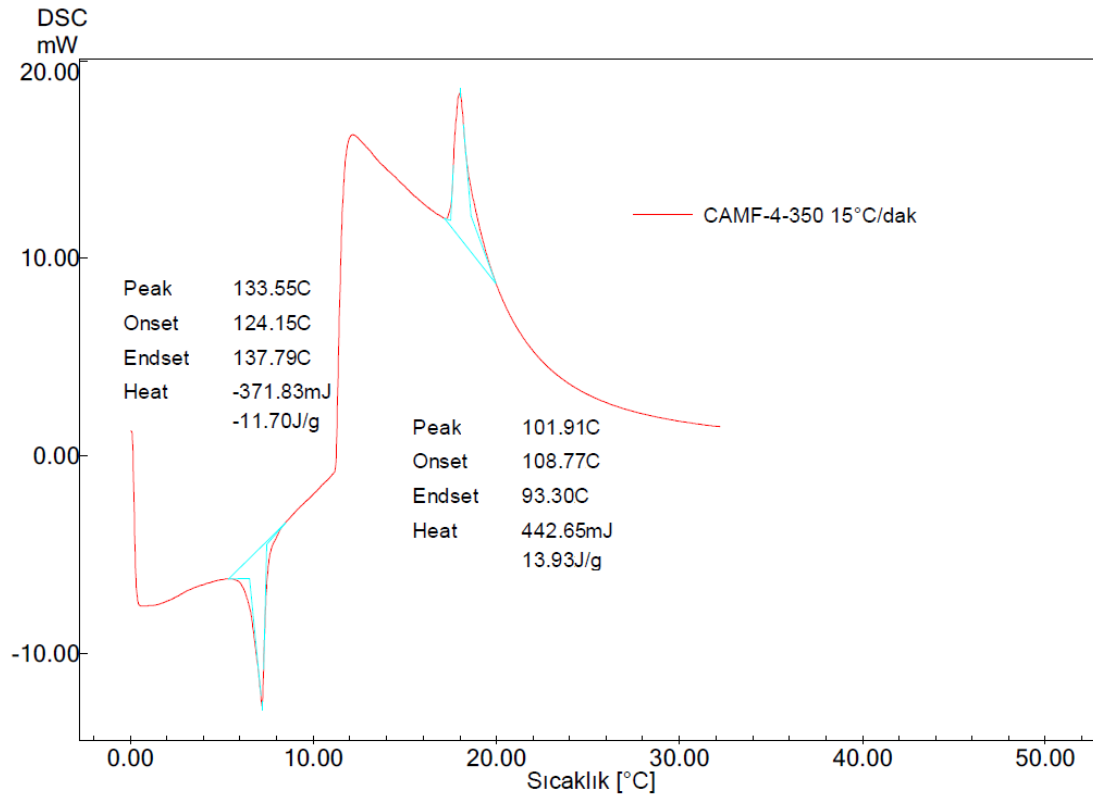
4.1.5. CAMF-4-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları

CAMF-4-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.25 – Şekil 4.29 ile verilmiştir. Bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları ve entropi değerleri hesaplanıp, Tablo 4.5 'de verilmiştir. CAMF-4-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 129.2-133.6 °C, 124.2-137.8 °C, 125.6-141.6 °C, 124.5-145.7 °C, 125.5-155.6 °C dir. Her bir ısıtma/soğutma hızı için martenzit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 110-102.1 °C, 108.8-93.3 °C, 107.6-91.7 °C, 106.7-91.12 °C, 106-91.2 °C, olarak belirlenip Tablo 4.5 'de verilmiştir. Farklı ısıtma/soğutma

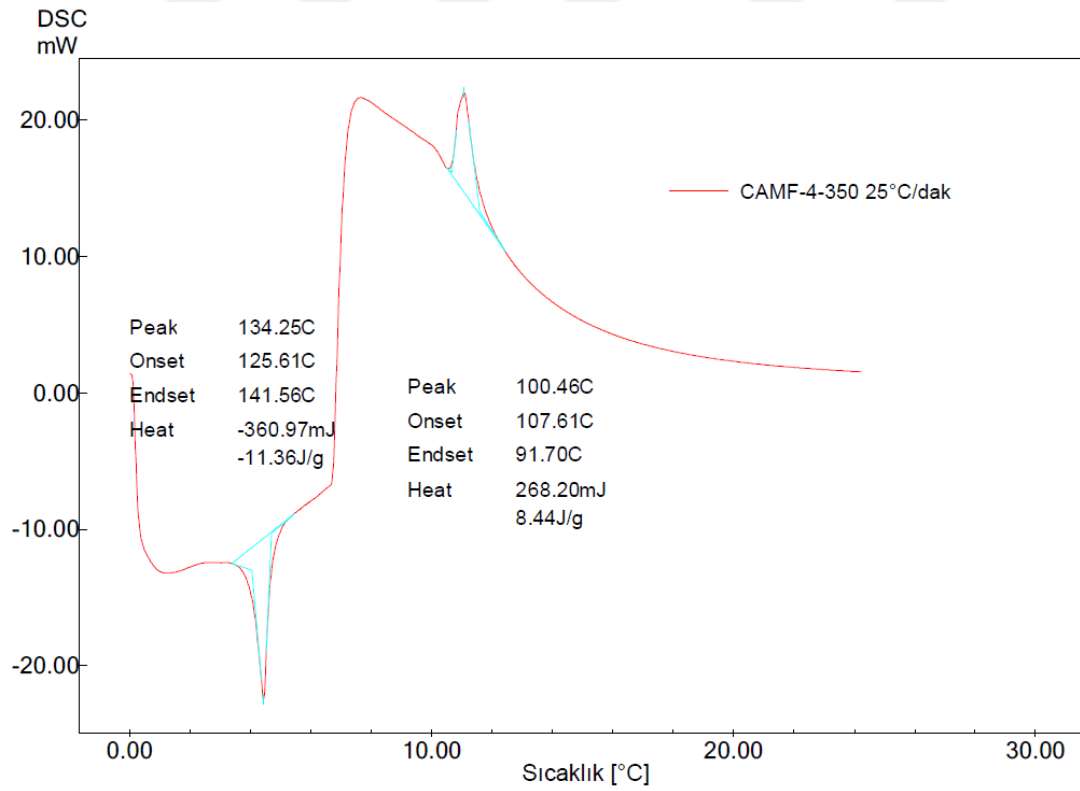
hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma/soğutma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.30 'da DSC eğrilinde ve Tablo 4.5 'de gösterilmektedir.



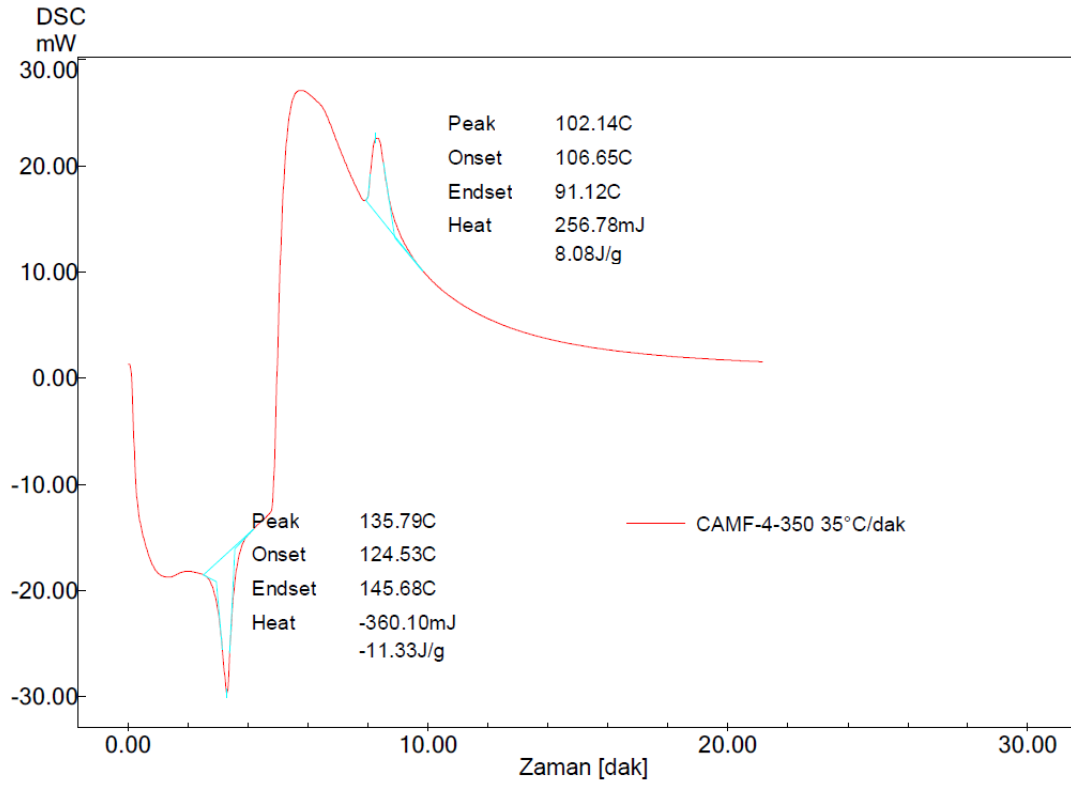
Şekil 4.25. CAMF-4-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



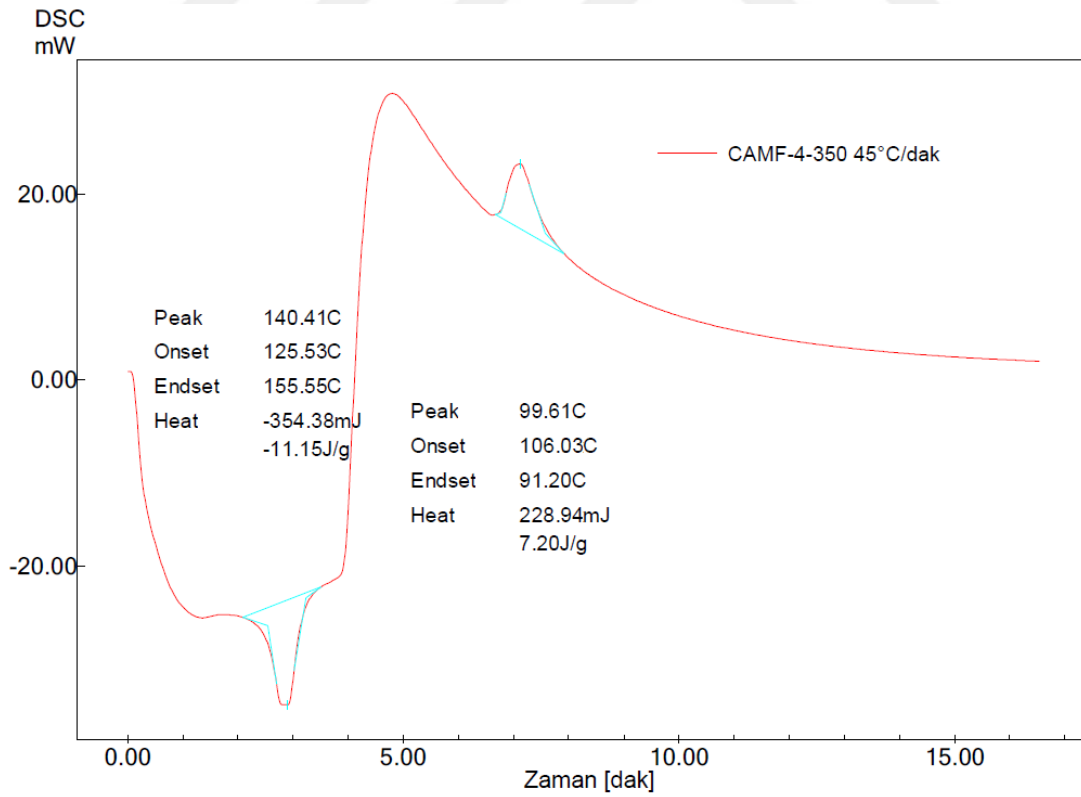
Şekil 4.26. CAMF-4-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



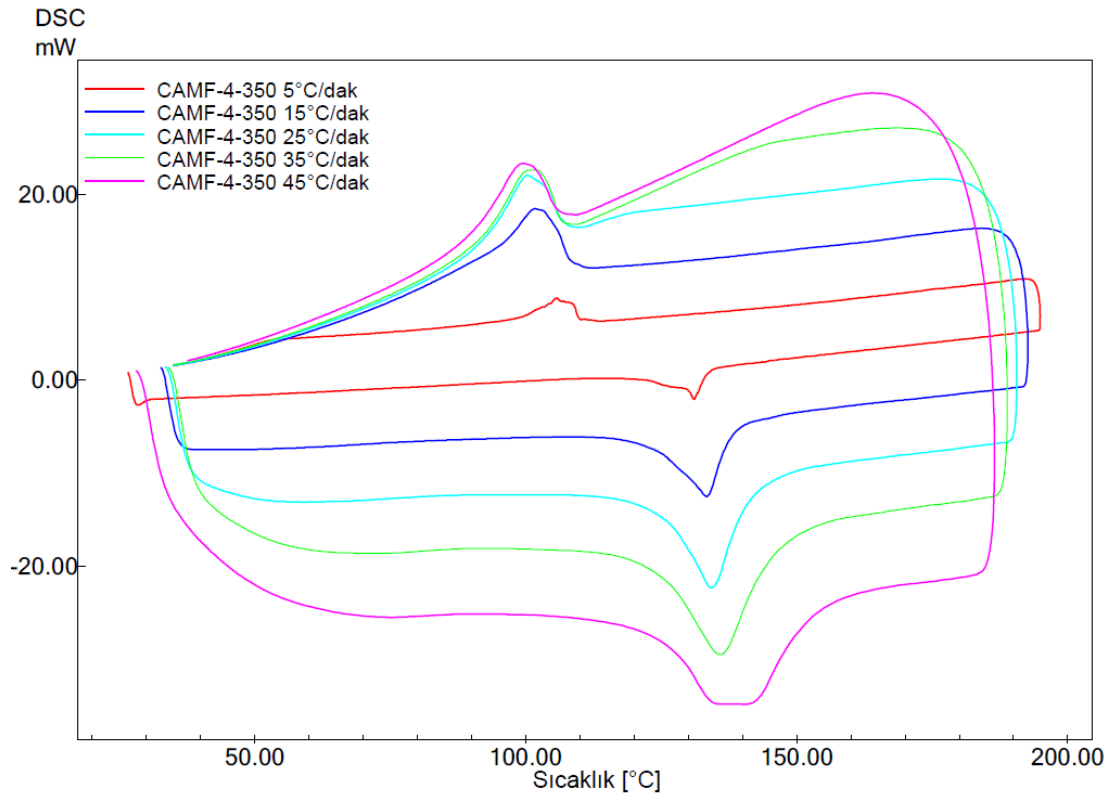
Şekil 4.27. CAMF-4-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.28. CAMF-4-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.29. CAMF-4-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.30. CAMF-4-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

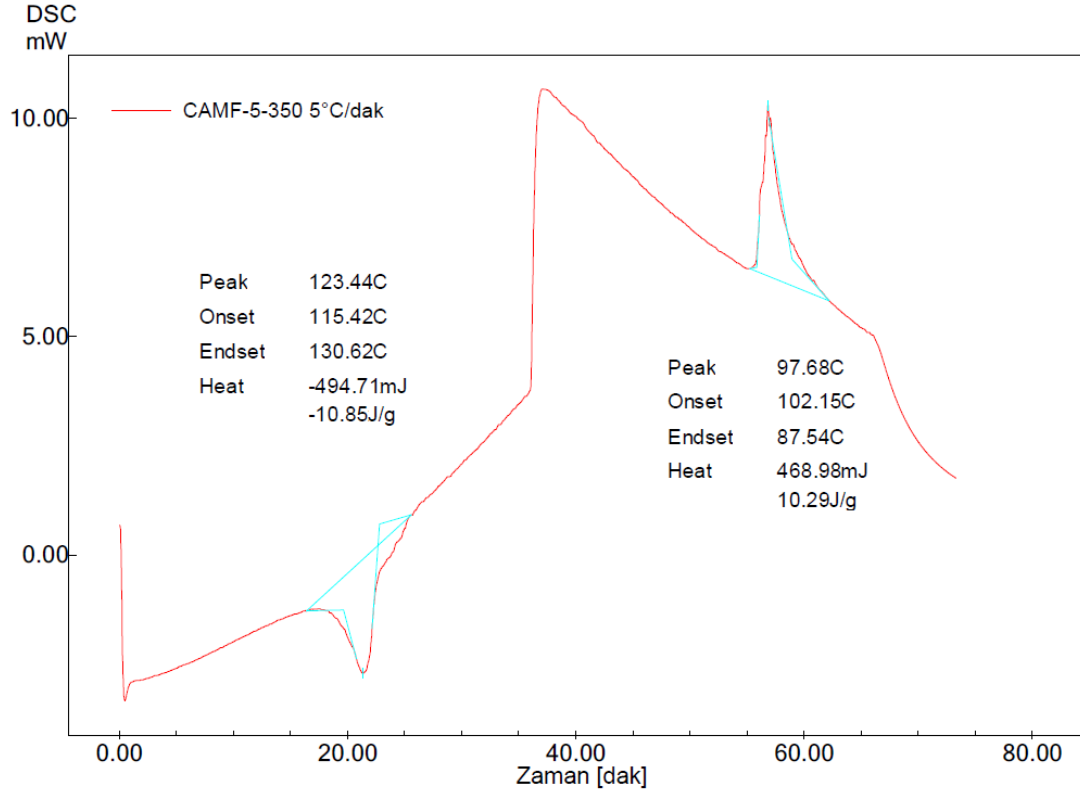
Tablo 4.5. CAMF-4-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı	A _{max} (°C)	A _s (°C)	A _f (°C)	Δh _{M→A} (J/g)	Δs _{M→A} (J/gK)	M _{max} (°C)	M _s (°C)	M _f (°C)	Δh _{A→M} (J/g)	Δs _{A→M} (J/gK)	T ₀ (K)
5 °C/dak	131.1	129.2	133.6	-8.6	-0.02	105.9	110.0	102.1	8.5	0.02	394.94
15 °C/dak	133.6	124.2	137.8	-11.7	-0.03	101.9	108.8	93.3	13.9	0.04	396.43
25 °C/dak	134.3	125.6	141.6	-11.4	-0.03	100.5	107.6	91.7	8.4	0.02	397.74
35 °C/dak	135.8	124.5	145.7	-11.3	-0.03	102.1	106.7	91.1	8.1	0.02	399.32
45 °C/dak	140.4	125.5	155.6	-11.2	-0.03	99.6	106.0	91.2	7.2	0.02	403.94

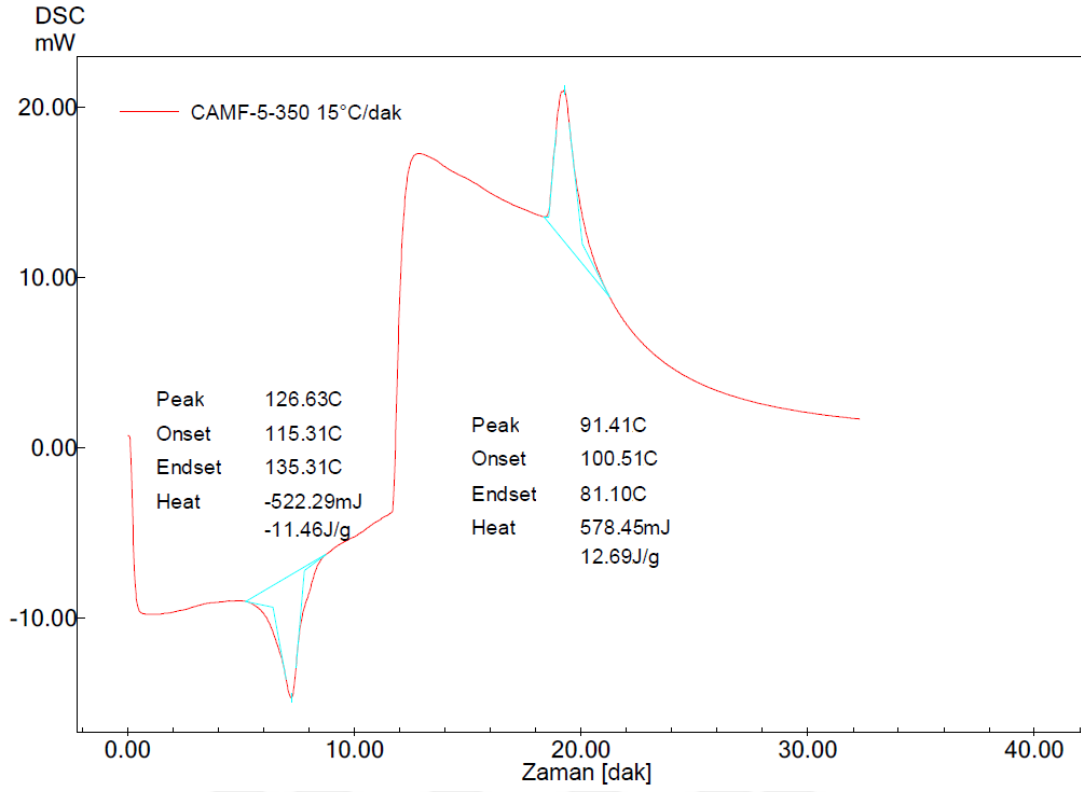
4.1.6. CAMF-5-350 Numunesi Termal Analiz Sonuçları

CAMF-5-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen DSC eğrileri Şekil 4.31 – Şekil 4.35 ile verilmiştir. Bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları ve entropi değerleri hesaplanıp, Tablo 4.6 'da verilmiştir. CAMF-5-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma/soğutma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile östenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 115.4-130.6 °C, 115.3-135.3 °C, 113.8-143 °C, 116.2-154 °C, 102.4-160.6 °C dir. Her bir ısıtma/soğutma hızı için martenzit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 102.2-87.54 °C, 100.5-81.1 °C, 99.43-81.75

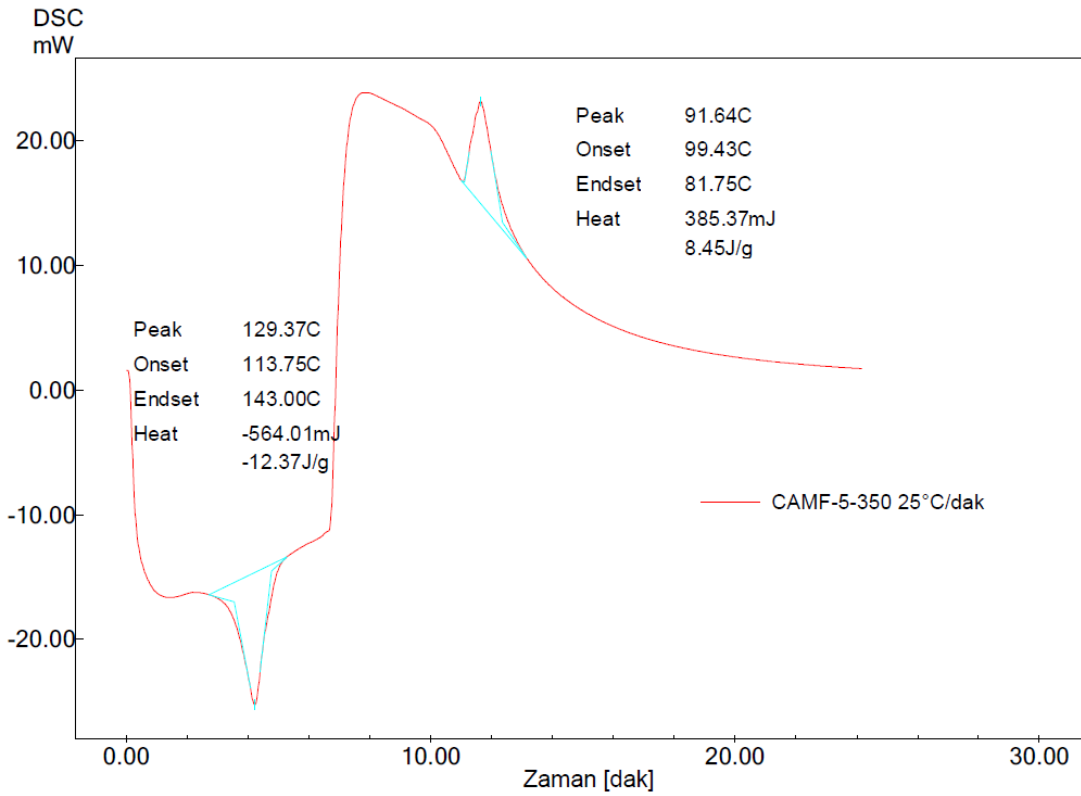
°C, 99.2-82.37 °C, 99.18-82.78 °C, olarak belirlenip Tablo 4.6 'da verilmiştir. Farklı ısıtma/soğutma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma/soğutma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler Şekil 4.36 'da DSC eğrilerinde ve Tablo 4.6 'da gösterilmektedir.



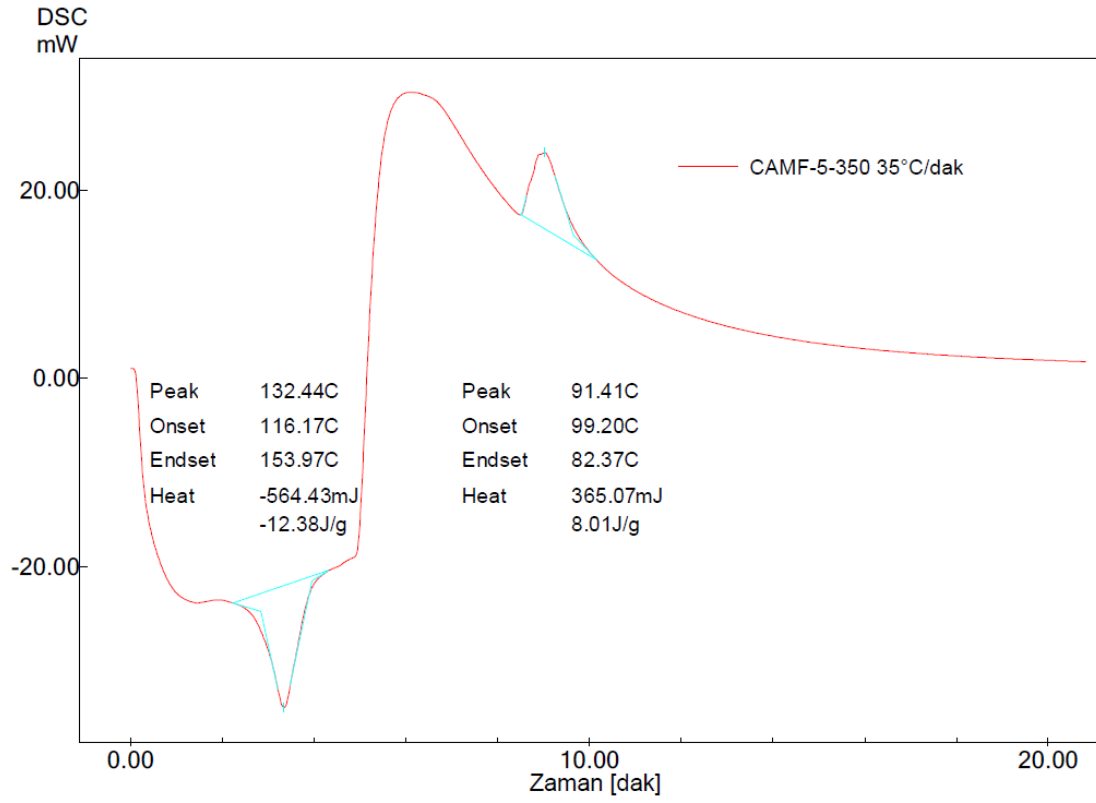
Şekil 4.31. CAMF-5-350 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



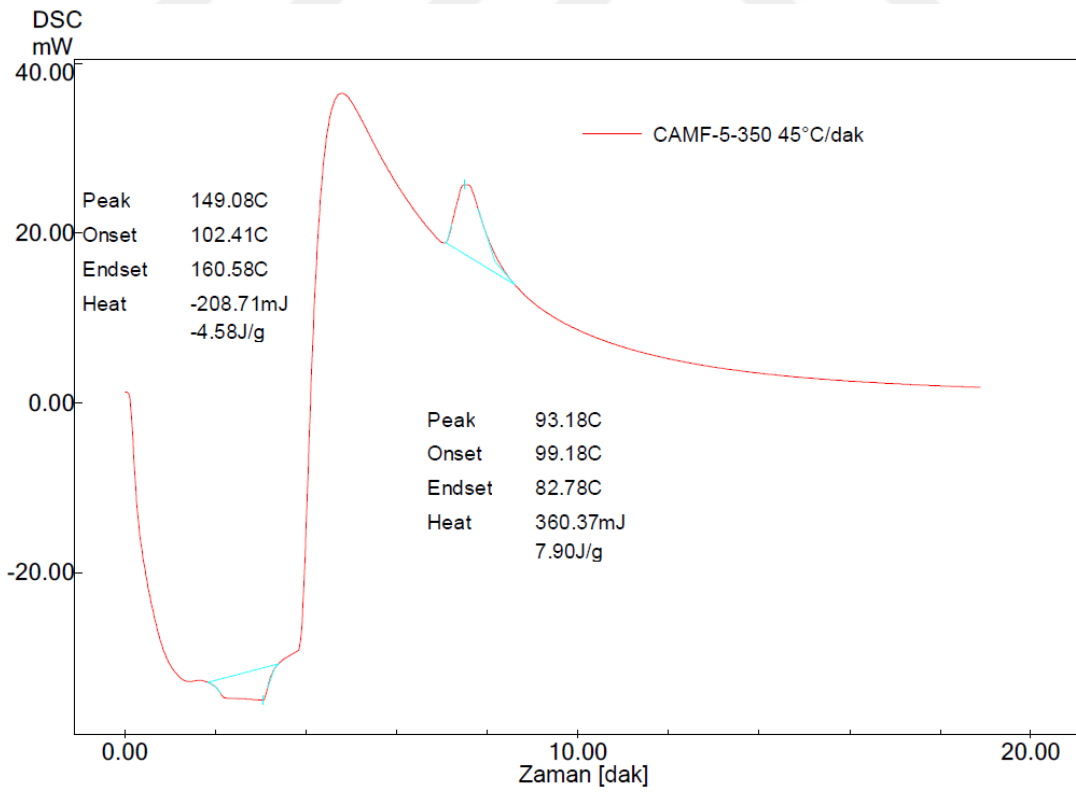
Şekil 4.32. CAMF-5-350 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



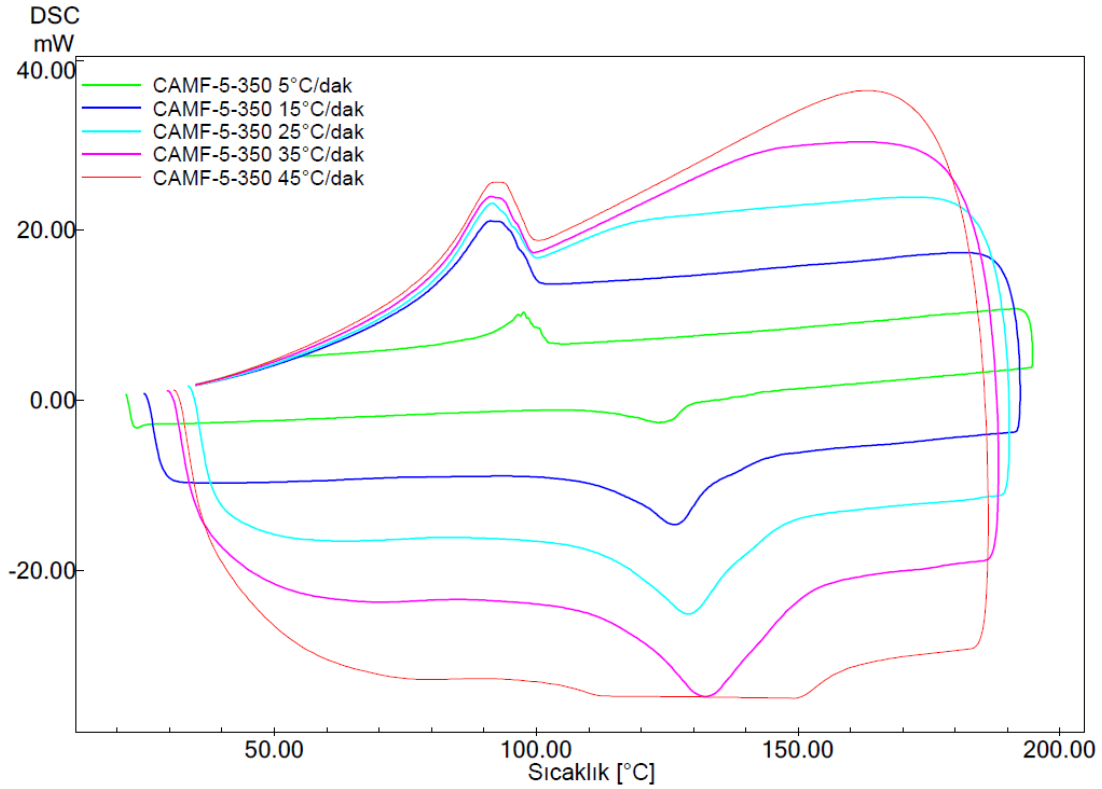
Şekil 4.33. CAMF-5-350 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.34. CAMF-5-350 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 4.35. CAMF-5-350 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



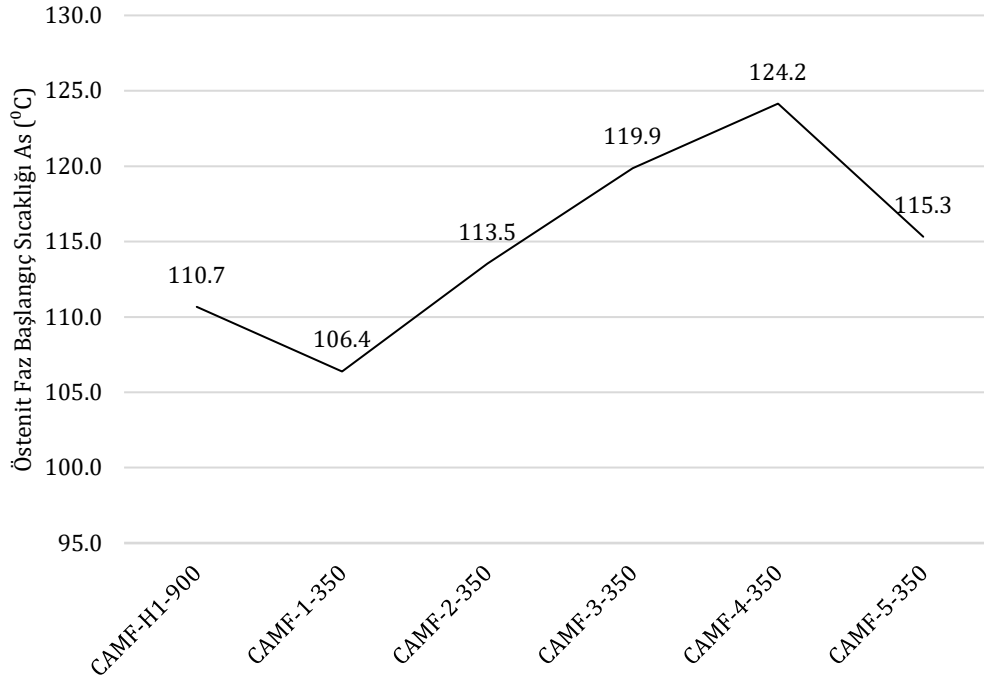
Şekil 4.36. CAMF-5-350 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 4.6. CAMF-5-350 referans numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

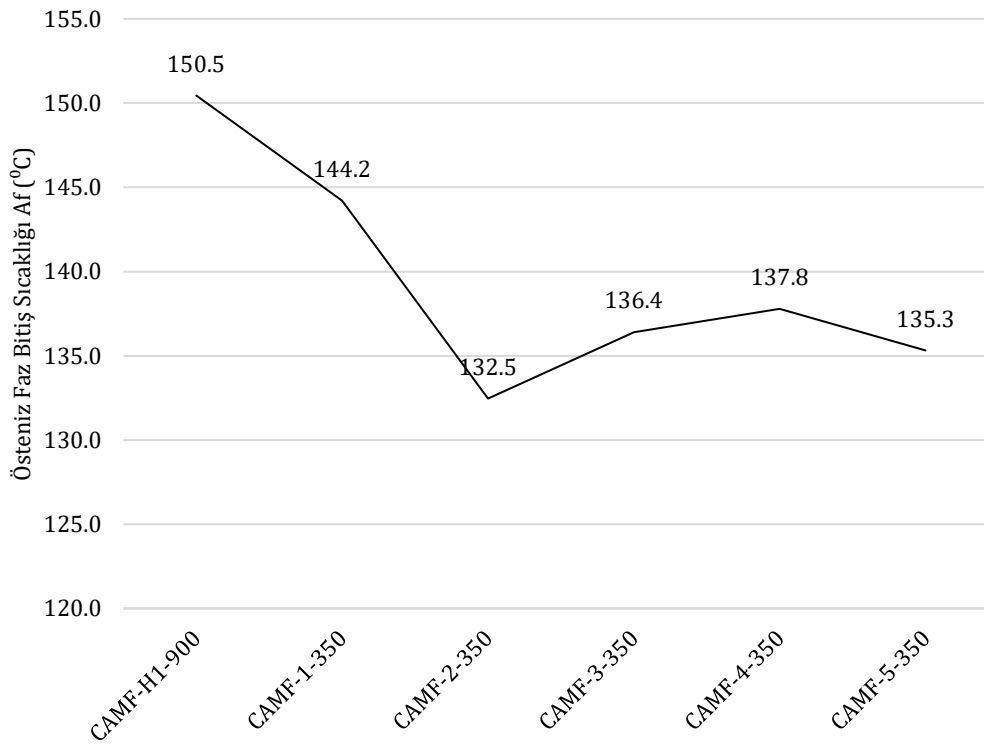
Isıtma / Soğutma Hızı	A_{max} (°C)	A_s (°C)	A_f (°C)	$\Delta h_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta s_{M \rightarrow A}$ (J/gK)	M_{max} (°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta h_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta s_{A \rightarrow M}$ (J/gK)	T_0 (K)
5 °C/dak	123.4	115.4	130.6	-10.9	-0.03	97.7	102.2	87.5	10.3	0.03	389.54
15 °C/dak	126.6	115.3	135.3	-11.5	-0.03	91.4	100.5	81.1	12.7	0.03	391.06
25 °C/dak	129.4	113.8	143.0	-12.4	-0.03	91.6	99.4	81.8	8.5	0.02	394.37
35 °C/dak	132.4	116.2	154.0	-12.4	-0.03	91.4	99.2	82.4	8.0	0.02	399.74
45 °C/dak	149.1	102.4	160.6	-4.6	-0.01	93.2	99.2	82.8	7.9	0.02	403.03

4.1.7. Termal Analiz Sonuçları Kıyaslanması

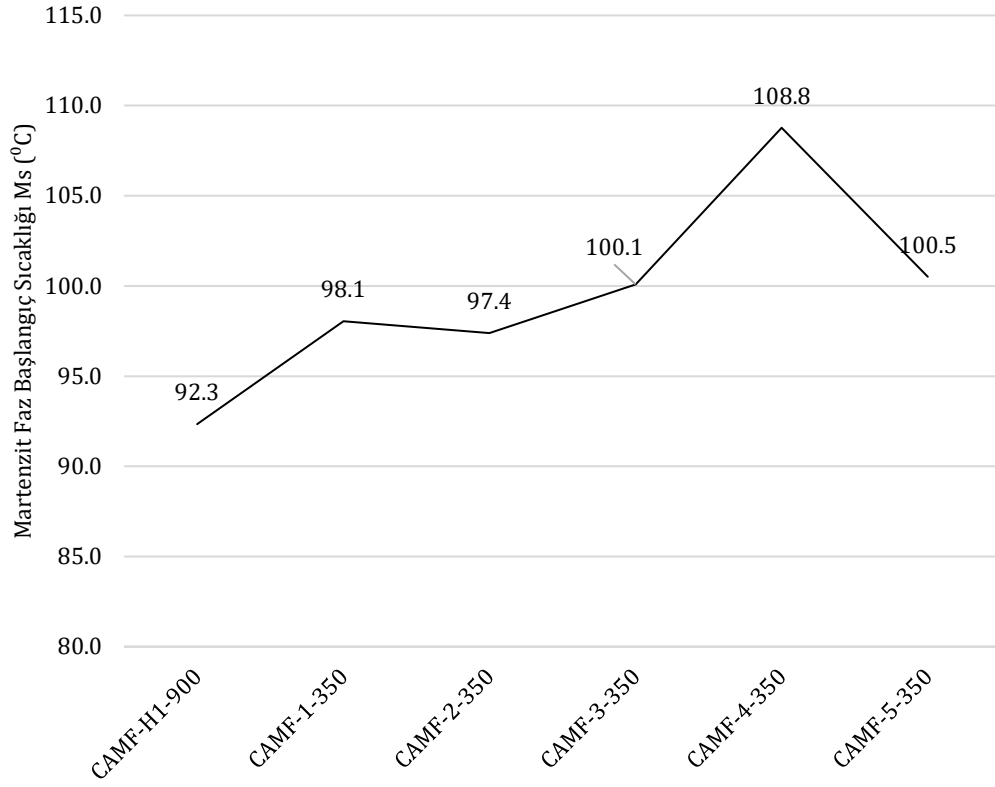
CAMF-H1-900, CAMF-1-350, CAMF-2-350, CAMF-3-350, CAMF-4-350 ve CAMF-5-350 kodlu numunelere ait 15 °C/dakika ısıtma/soğutma hızı ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları grafikleri, Şekil 4.37 – Şekil 4.40 ile verilmiştir. Östenit başlangıç sıcaklığında artış eğilimi görülürken östenit bitiş sıcaklığında azalma eğilimi görülmüştür. Martenzit faz başlangıç ve bitiş sıcaklıklarında genelde artış eğilimi görülmüştür.



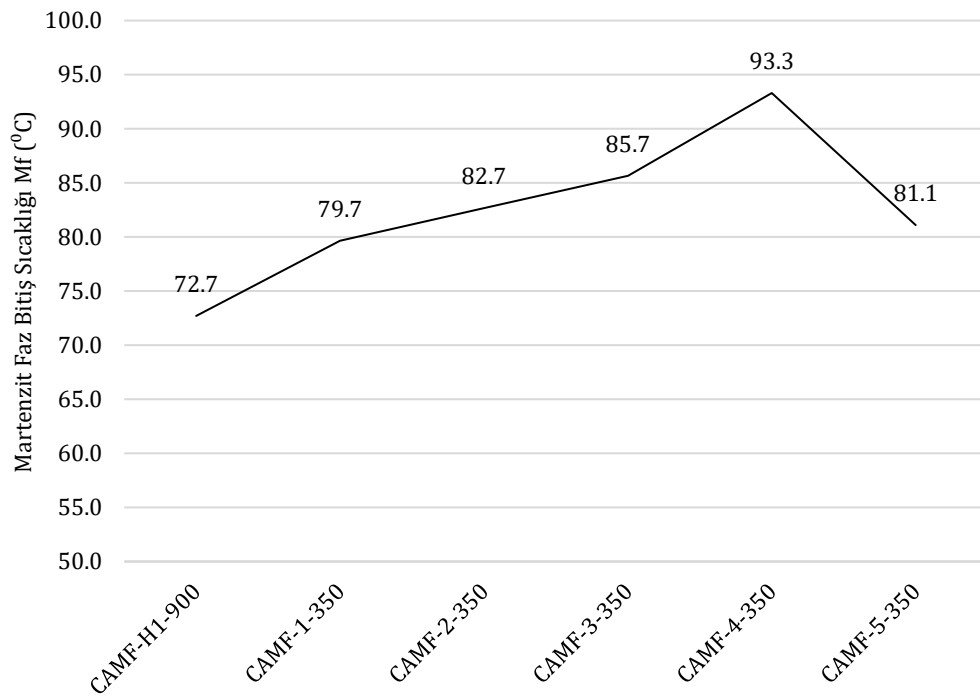
Şekil 4.37. Östenit faz başlangıç sıcaklığı A_s (°C)



Şekil 4.38. Östenit faz bitiş sıcaklığı A_f (°C)



Şekil 4.39. Martenzit faz başlangıç sıcaklığı M_s (°C)



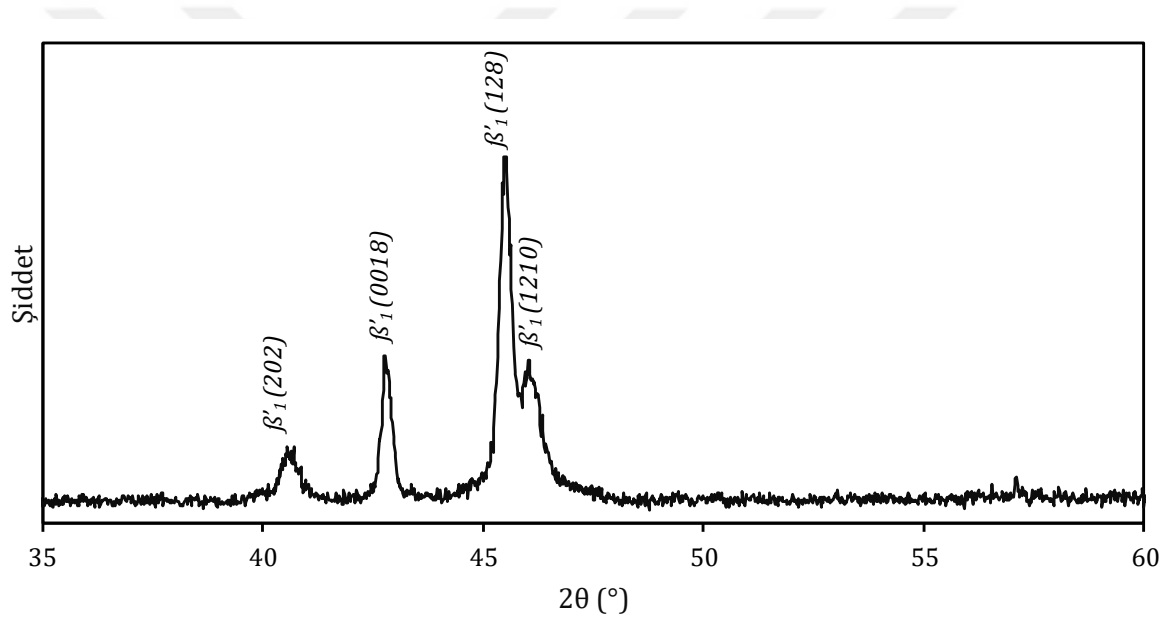
Şekil 4.40. Martenzit faz bitiş sıcaklığı M_f (°C)

4.2. XRD Analizleri

Deneyler esnasında X ışını difraksiyon cihazı kullanılarak $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak $5^\circ/\text{dakika}$ tarama hızında numunelerin XRD desenleri elde edilmiştir. Elde edilen desenlerin miller indisleri ve piklere ait fazlar çizim üzerinde gösterilmiştir.

4.2.1. CAMF-H1-900 Numunesi XRD Analiz Sonuçları

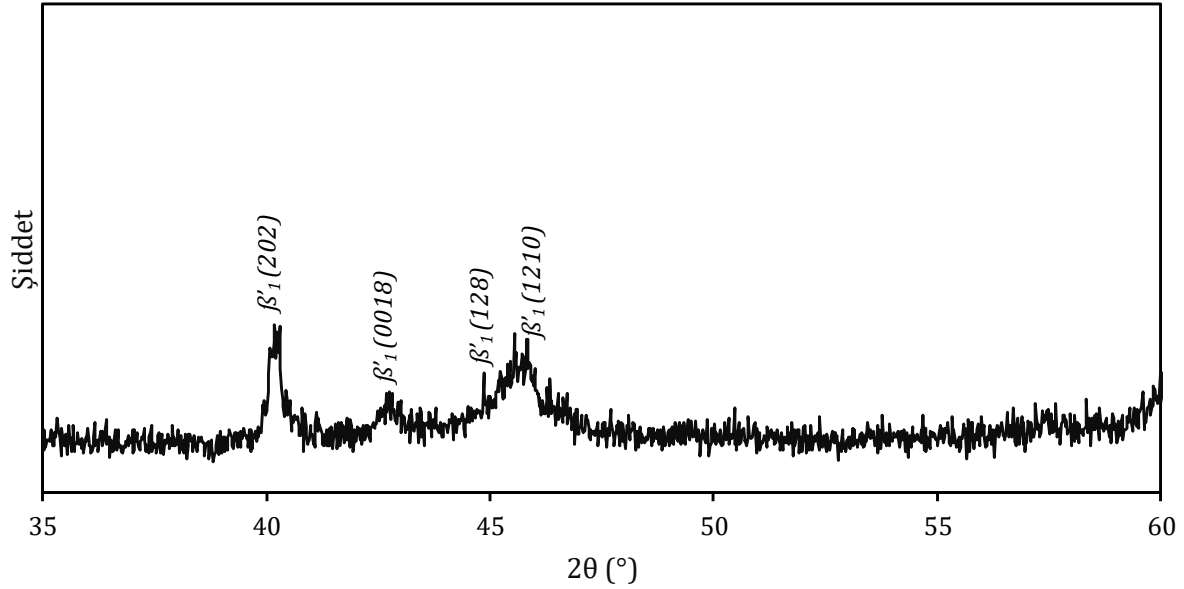
CAMF-H1-900 numunesinin XRD analiz sonuçlarından elde edilen deseni Şekil 4.41 'de verilmiştir. Genel olarak desen üzerindeki piklerin β'_1 fazına ait olduğu saptanmış ve (202), (0018), (128) ve (1210) düzlemlerinin yansımaları görülmüştür.



Şekil 4.41. CAMF-1-350 numunesine ait XRD grafiği

4.2.2. CAMF-1-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları

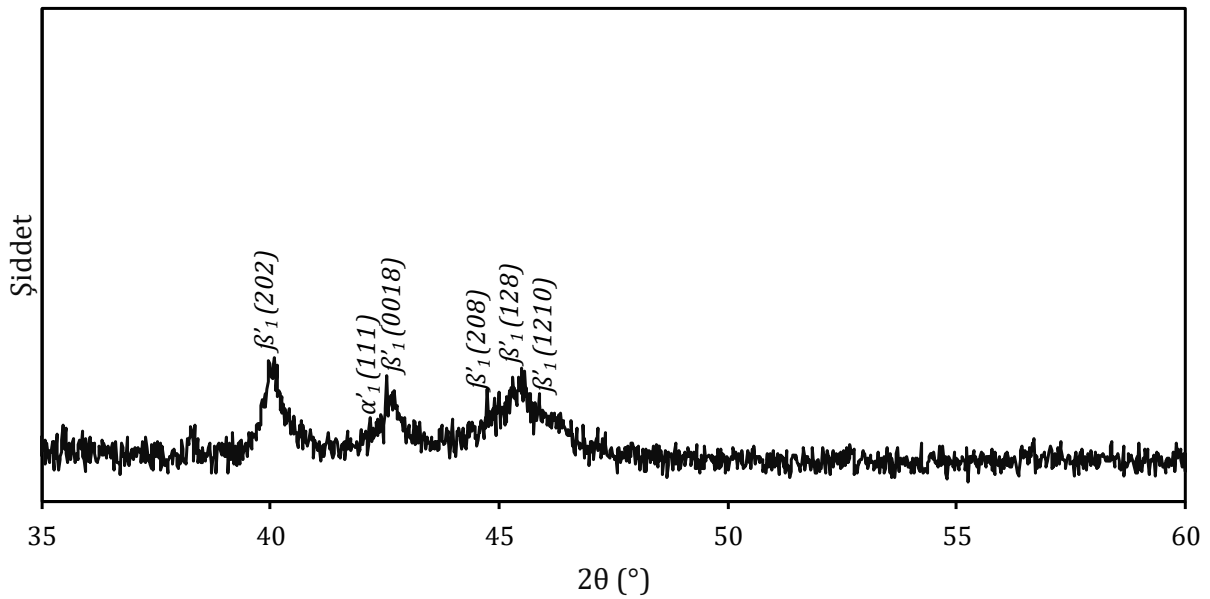
CAMF-1-350 numunesinin XRD analiz sonuçlarından elde edilen deseni Şekil 4.42 'de verilmiştir. Genel olarak desen üzerindeki piklerin β'_1 fazına ait olduğu saptanmış ve (202), (0018), (128) ve (1210) düzlemlerinin yansımaları görülmüştür.



Şekil 4.42. CAMF-1-350 numunesine ait XRD grafiği

4.2.3. CAMF-2-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları

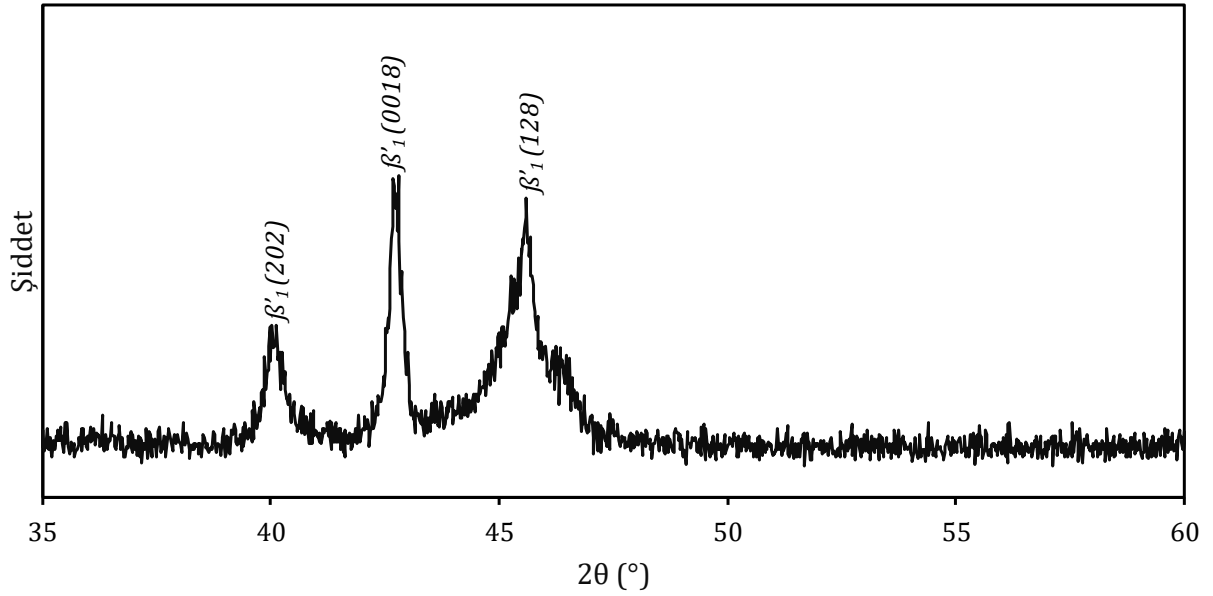
CAMF-2-350 numunesinin XRD analiz sonuçlarından elde edilen deseni Şekil 4.43 'de verilmiştir. Genel olarak desen üzerindeki piklerin β'_1 fazına ait olduğu saptanmış ve (202), (0018), (208), (128), (1210) düzlemlerinin ve α'_1 fazına ait (111) düzlemi yansımaları görülmüştür.



Şekil 4.43. CAMF-2-350 numunesine ait XRD grafiği

4.2.4. CAMF-3-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları

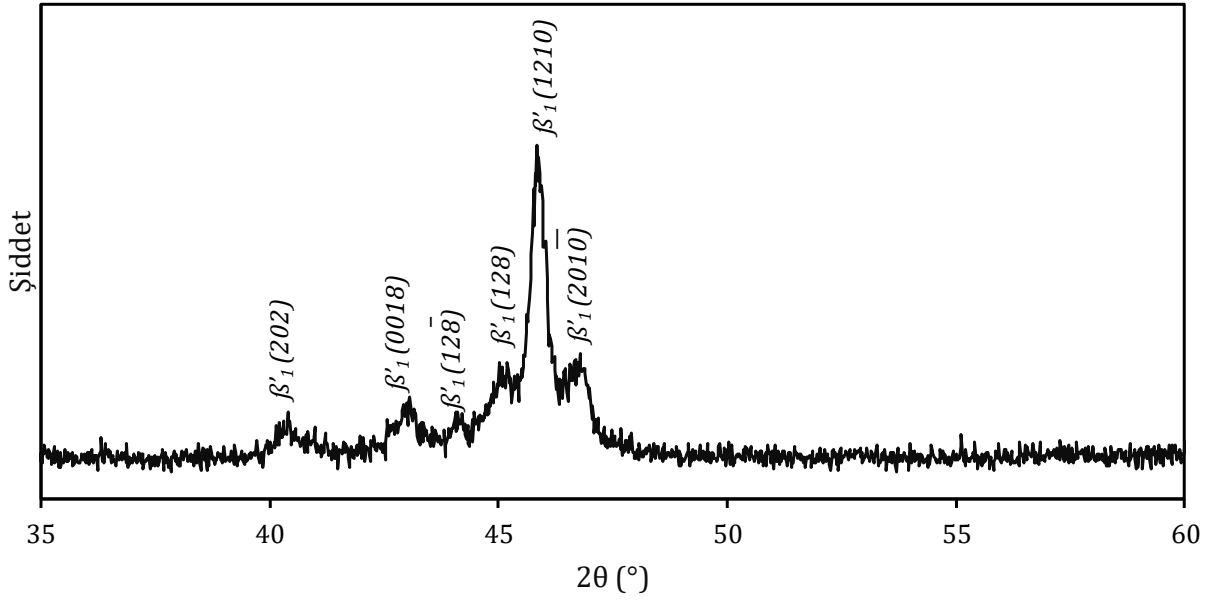
CAMF-3-350 numunesinin XRD analiz sonuçlarından elde edilen deseni Şekil 4.44 'de verilmiştir. Genel olarak desen üzerindeki piklerin β'_1 fazına ait olduğu saptanmış ve (202), (0018), ve (128) düzlemlerinin yansımaları görülmüştür.



Şekil 4.44. CAMF-3-350 numunesine ait XRD grafiği

4.2.5. CAMF-4-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları

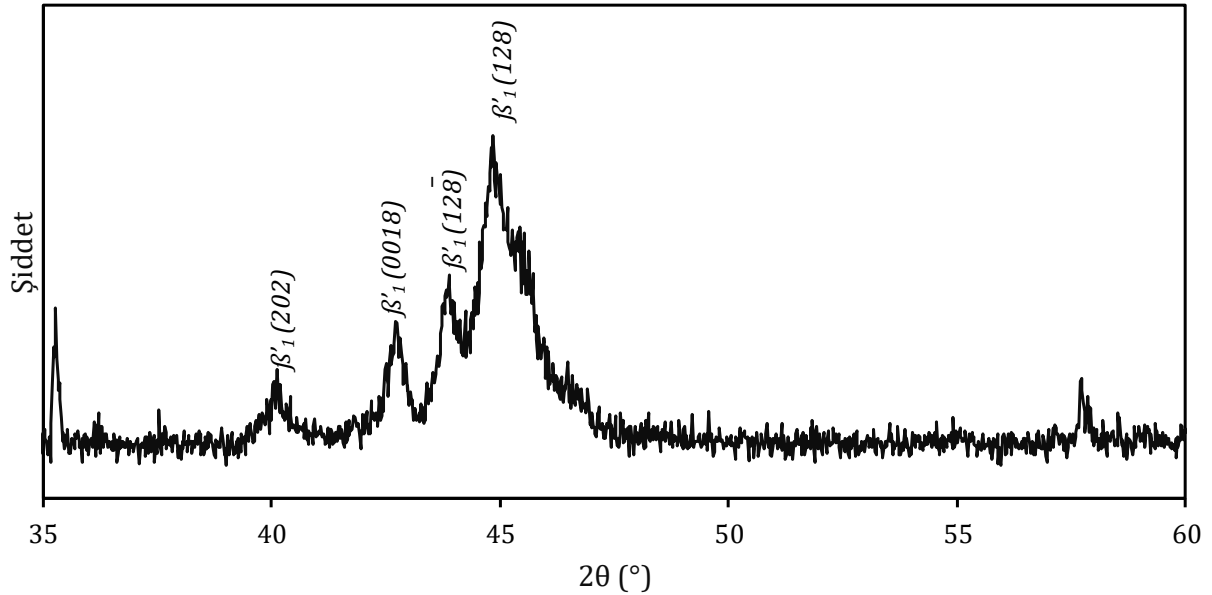
CAMF-4-350 numunesinin XRD analiz sonuçlarından elde edilen deseni Şekil 4.45 'da verilmiştir. Genel olarak desen üzerindeki piklerin β'_1 fazına ait olduğu saptanmış ve (202), (0018), (128), (1210) ve (2010) düzlemlerinin yansımaları görülmüştür.



Şekil 4.45. CAMF-4-350 numunesine ait XRD grafiği

4.2.6. CAMF-5-350 Numunesi XRD Analiz Sonuçları

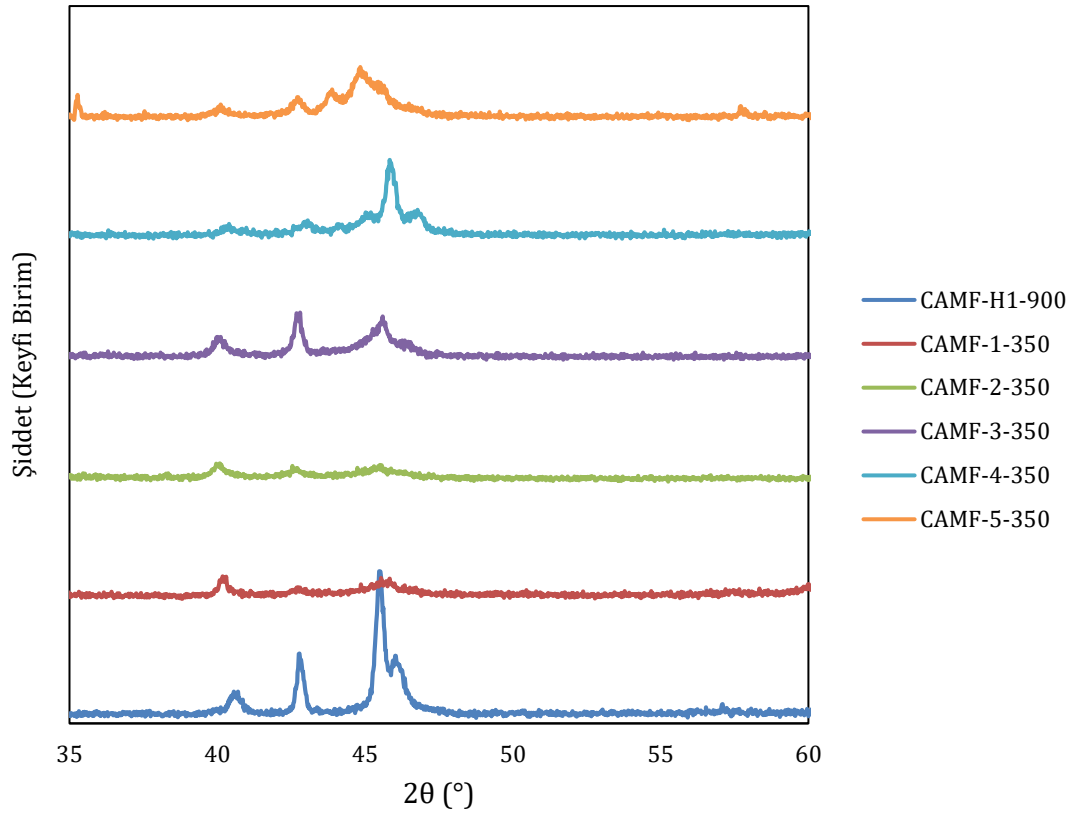
CAMF-5-350 numunesinin XRD analiz sonuçlarından elde edilen deseni Şekil 4.46 'da verilmiştir. Genel olarak desen üzerindeki piklerin β'_1 fazına ait olduğu saptanmış ve (202), (0018), $(12\bar{8})$ ve (128) düzlemlerinin yansımaları görülmüştür.



Şekil 4.46. CAMF-5-350 numunesine ait XRD grafiği

4.2.7. XRD Analiz Sonuçları Karşılaştırması

Numunelere ait XRD analiz sonuçlarından elde edilen deseni Şekil 4.47 'de verilmiştir. Numunelere ait desenler incelendiğinde genel olarak piklerin β_1 fazına ait olduğu saptanmış ve özellikle (202), (0018), (128) düzlemlerinin yansımaları görülmüştür.



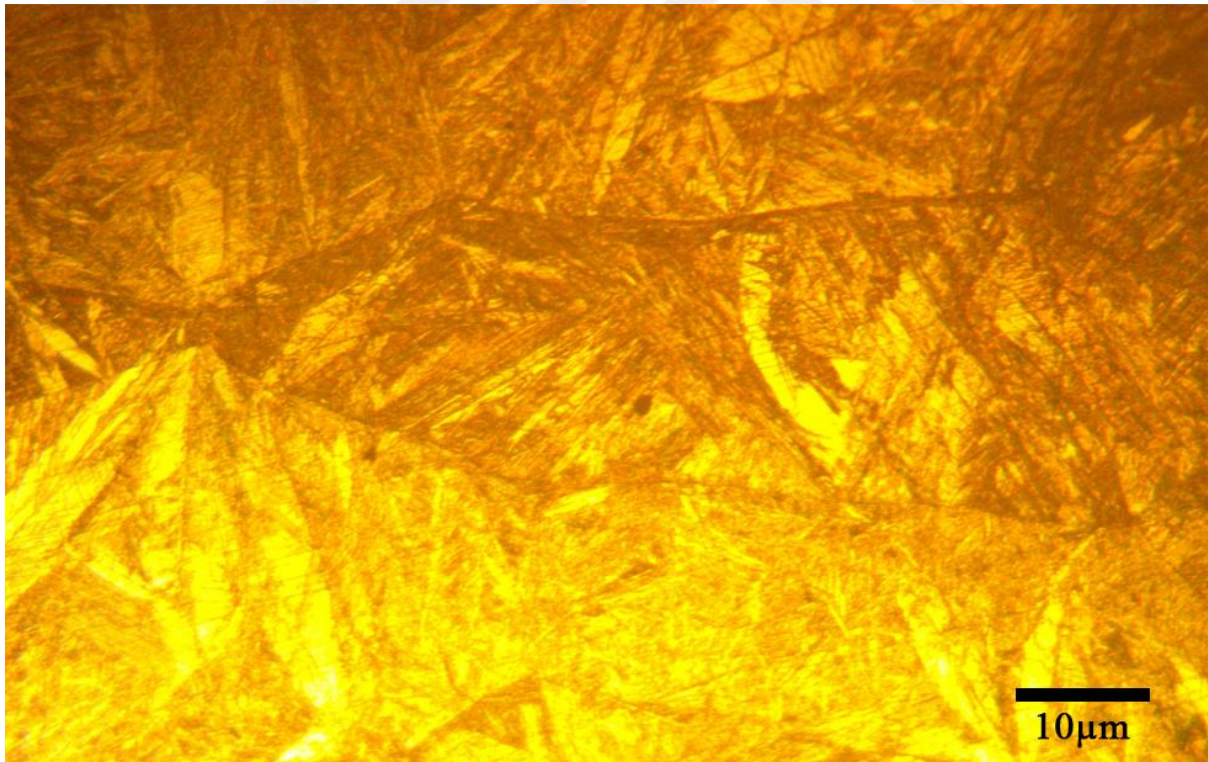
Şekil 4.47. Numunelere ait XRD grafikleri

4.3. Mikro Yapı Analizleri

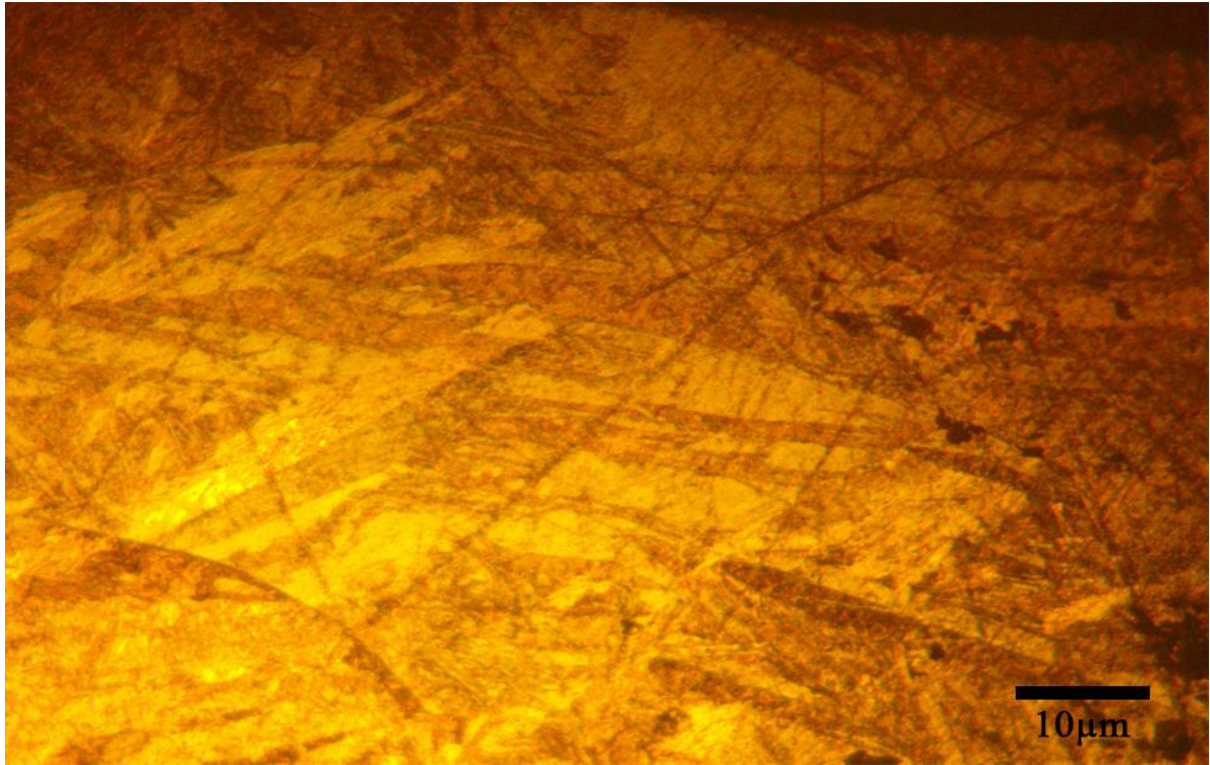
CAMF-H1-900, CAMF-1-350, CAMF-2-350, CAMF-3-350, CAMF-4-350 ve CAMF-5-350 numunelerinin zımpara kullanılarak numunelerin parlatma işlemi sonrası dağlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Dağlama işlemi için 2.5 gr ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 48 ml CH_3OH ve 10ml HCl dağlama çözeltisi kullanılmıştır. Bu işlemlerden sonra Şekil 3.9 'da görseli bulunan, mikroskopta numunelerin mikroyapısal özellikleri incelenmiştir. CAMF-H1-900, CAMF-1-350, CAMF-2-350, CAMF-3-350, CAMF-4-350 ve CAMF-5-350 numunelerine ait mikro yapı görüntüleri Şekil 4.48 – Şekil 4.53 ile verilmiştir. Mikro yapı görüntüleri incelemeleri sonucunda oda sıcaklığında lamel tipi martenzit plakalar görülmüş, çökelti fazları tespit edilmiş ve yaşlandırma süresinin artışı tane boyutlarında artışa sebep olduğu görülmüştür.



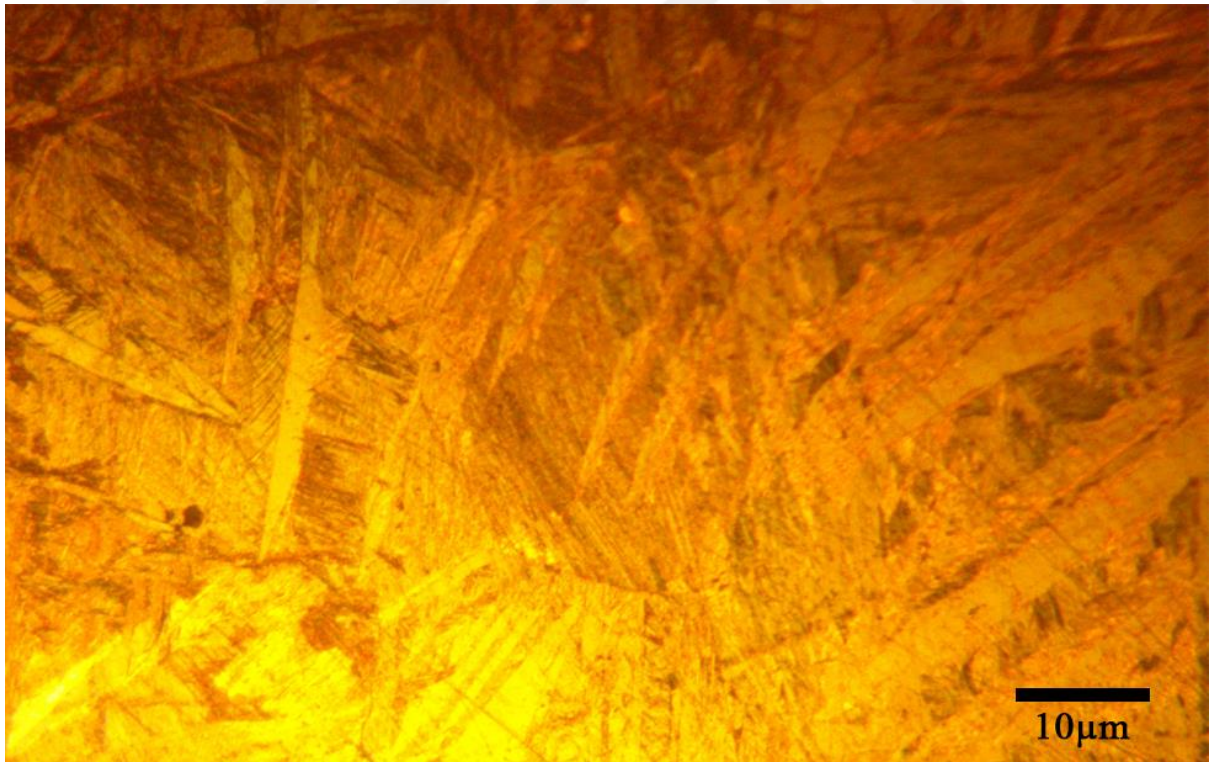
Şekil 4.48. CAMF-H1-900 numunesine ait mikro yapı görüntüsü



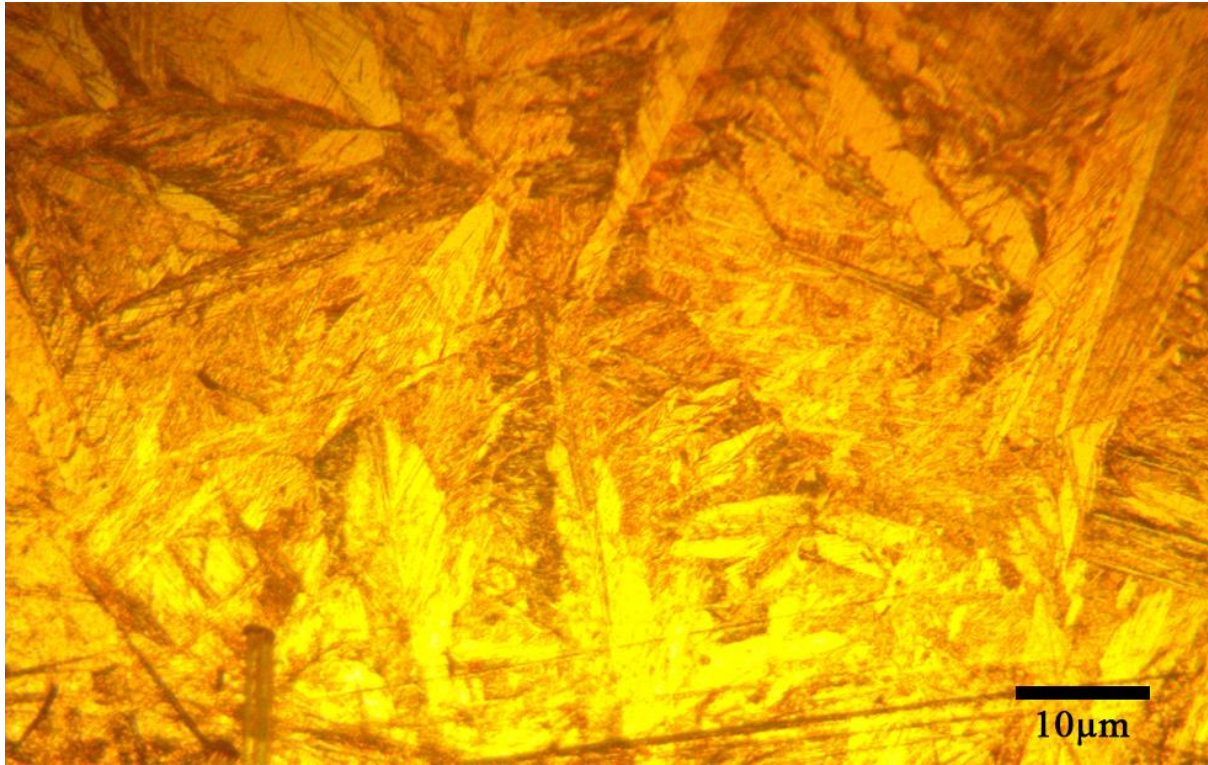
Şekil 4.49. CAMF-1-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü



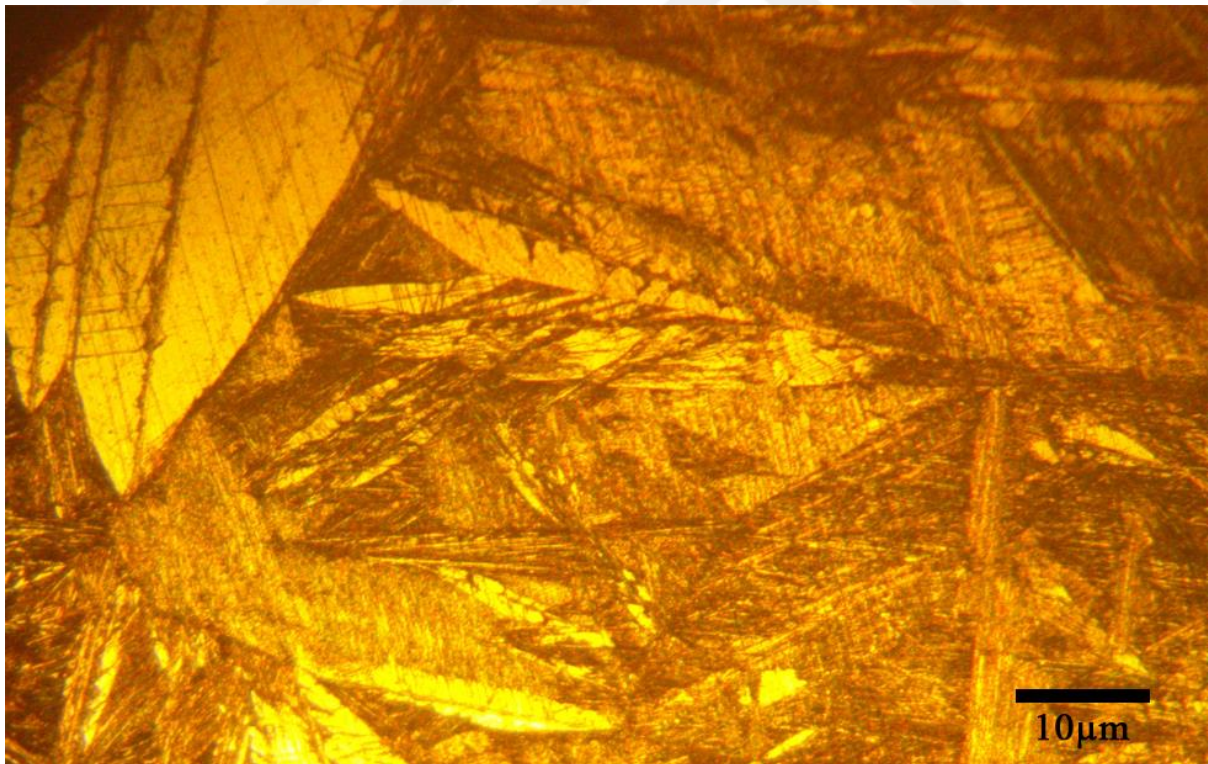
Şekil 4.50. CAMF-2-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.51. CAMF-3-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü



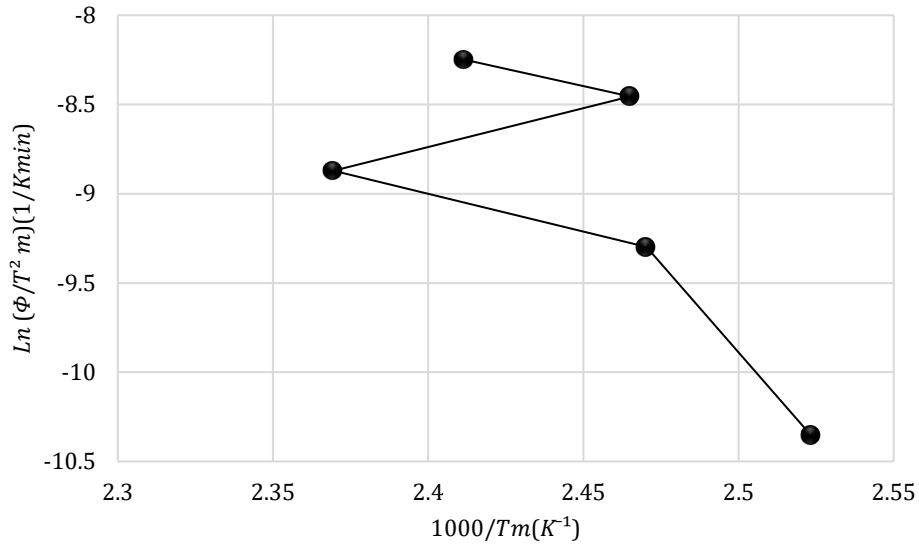
Şekil 4.52. CAMF-4-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü



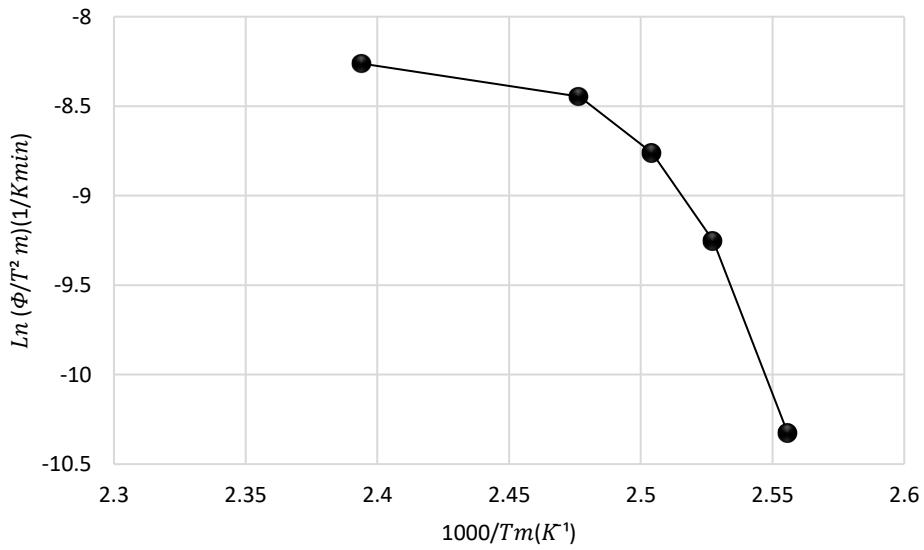
Şekil 4.53. CAMF-5-350 numunesine ait mikro yapı görüntüsü

4.4. Aktivasyon Enerjisi Hesaplamaları

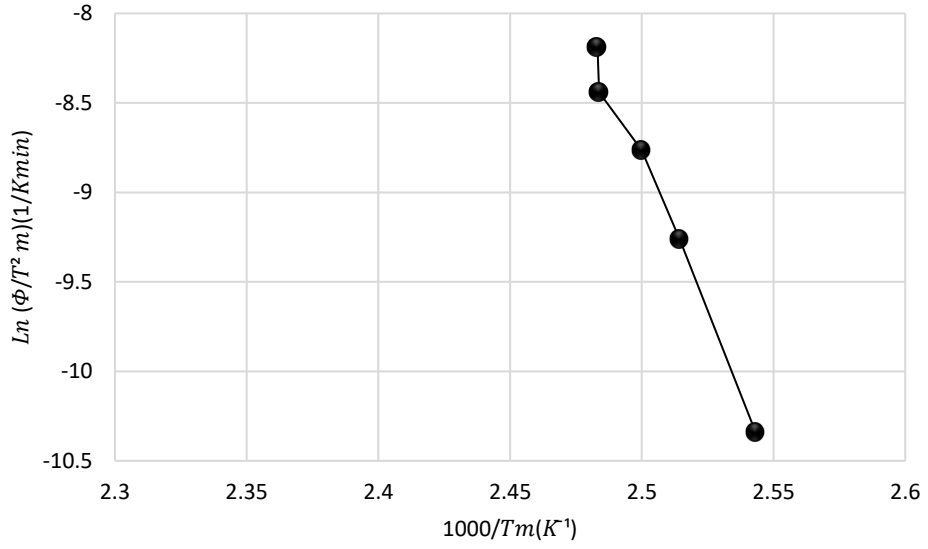
Yaşlandırma deneylerinde kullanılmak üzere üretilen CAMF-H1-900, CAMF-1-350, CAMF-2-350, CAMF-3-350, CAMF-4-350 ve CAMF-5-350 kodlu numunelerine yapılan 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika tarama hızı aralıklarında yapılan DSC analizlerinin sonuçlarına istinaden Denklem 3 'e göre numunelerin aktivasyon enerjileri ayrı ayrı hesaplanmış ve Şekil 4.54 – Şekil 4.60 arasında grafik olarak sunulmuştur.



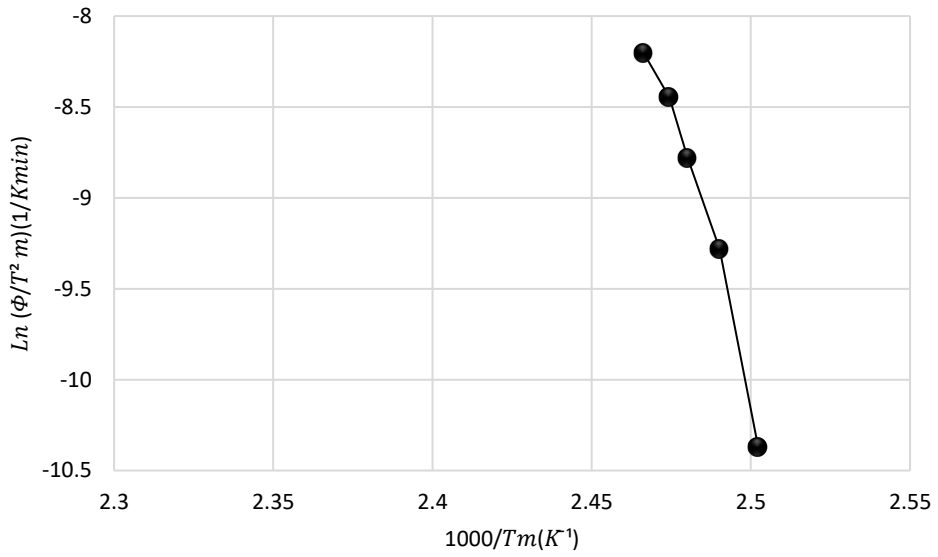
Şekil 4.54 CAMF-H1-900 numunesine ait Kissinger eğrisi



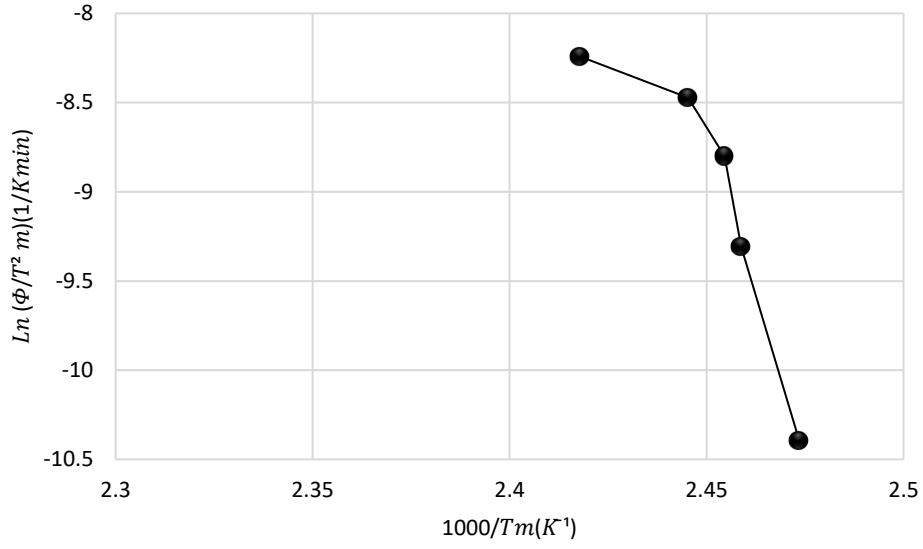
Şekil 4.55 CAMF-1-350 numunesine ait Kissinger eğrisi



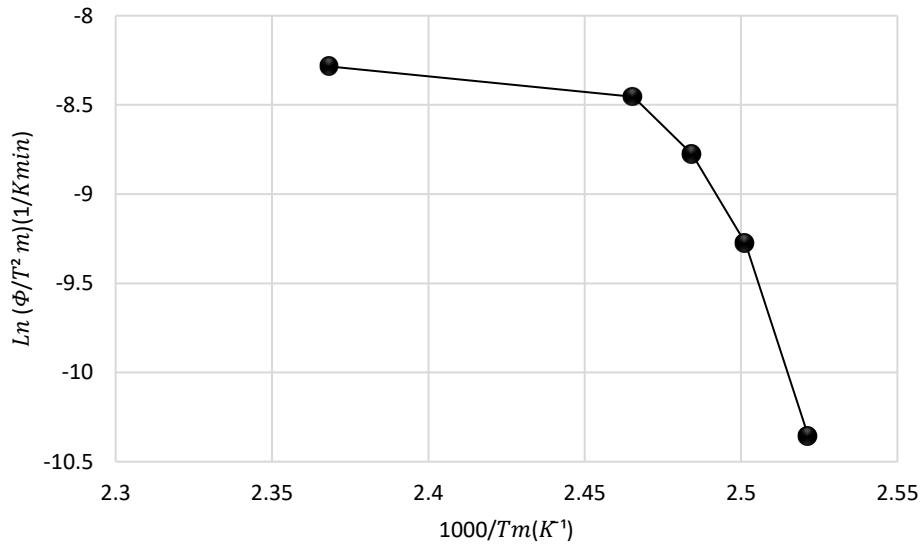
Şekil 4.56 CAMF-2-350 numunesine ait Kissinger eğrisi



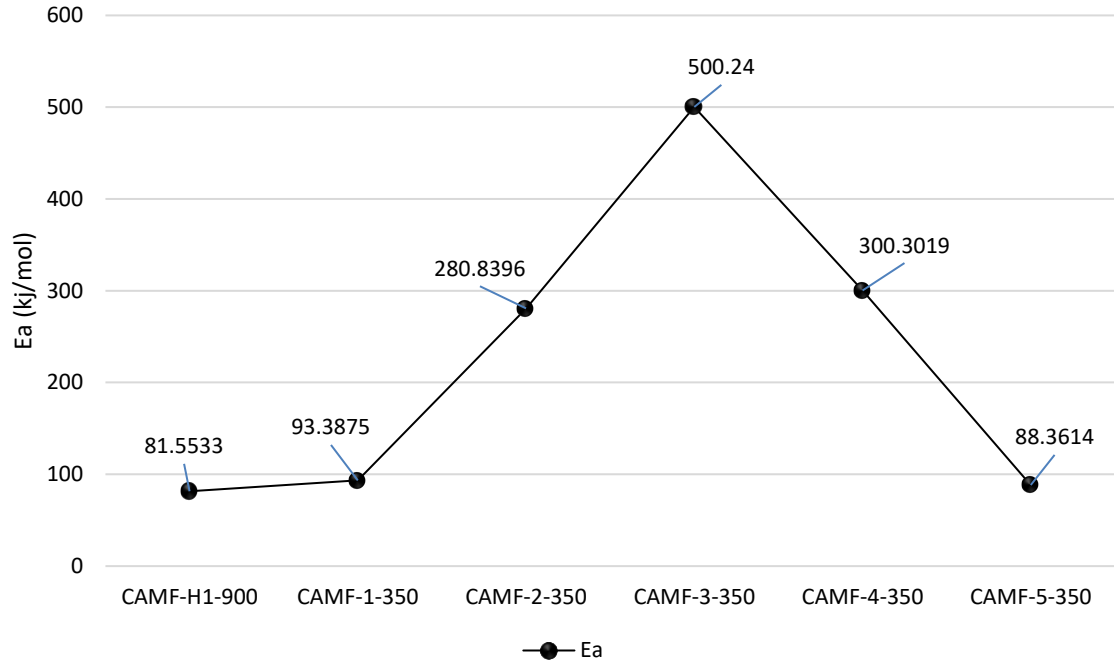
Şekil 4.57 CAMF-3-350 numunesine ait Kissinger eğrisi



Şekil 4.58 CAMF-4-350 numunesine ait Kissinger eğrisi



Şekil 4.59 CAMF-5-350 numunesine ait Kissinger eğrisi



Şekil 4.60 Aktivasyon enerjileri eğrisi

Aktivasyon enerjisinin özellikle 180 dakika yaşlandırma sonucunda en yüksek seviyeye çıktığı ve 180 dakika yaşlandırma üzerine çıkıldığında tekrar düştüğü görülmektedir. Bunun nedeni olarak 350 °C deki yaşlandırma süresinin atomlar arasındaki difüzyon miktarını artırması olarak gösterilebilir. Bir başka deyişle, 350 °C deki ve 180 dakika üzerinde bir yaşlandırma süresinin yapı içerisindeki dönüşüm sonucu azalan kafes gerilmelerinden dolayı malzemenin iç enerjisinin azaldığı bilgisine ulaşılabilir.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Farklı özelliklere sahip ve elektriksel, kimyasal veya mekanik gibi farklı çevresel uyarılara karşı dinamik olarak tepki veren akıllı malzemeler tasarımcılar için yeni ufuklar açmaktadır. Son yıllarda akıllı malzemeler konusunda artan araştırma ve geliştirme faaliyetleri hem akademik hem de endüstriyel alanda artmaktadır. Özellikle otomotivde, medikalde, havacılık ve elektronik gibi sanayi dallarında akıllı malzemelere olan ilgi artmaktadır.

Renk değiştiren malzemeler, fotovoltaiik malzemeler, piezo malzemeler ve şekil hafızalı malzemeler akıllı malzemelere örnektir. Şekil hafızalı alaşımlar, formlarını geçici olarak deforme olmuş hallerinden, daha önceden bazı işlemler ile programlanmış olan mevcut formlarına bir dış uyarıcı etkisi ile kontrollü bir şekilde değiştirme yeteneği olan malzemelerdir. Bahsi geçen şekil geri dönüşü sıcaklık, elektrik akımı, manyetik alan gibi herhangi bir uyarı tarafından tetiklenebilir [112].

NiTi alaşımı şekil hafızalı alaşımlar arasında nispeten düşük faz dönüşüm sıcaklığına sahip olup en popüler fakat yüksek maliyetlidir. Bakır bazlı alaşımlar daha düşük maliyetli ve geniş bir sıcaklık aralığında faz dönüşümü sağlamaktadır. Demir esaslı şekil hafızalı alaşımlar ise şekil geri dönüşü bakımından daha az iyi bir performans sergilemiştir.

Şekil hafıza etkisi malzemenin martenzit faz dönüşümü esasına dayanmaktadır. Şekil hafızalı alaşımlarda östenit fazdan martenzit fazına dönüşüm sıcaklığına bağımlı bir faz dönüşümü olduğundan bu faz dönüşümü aynı zamanda termoelastik bir dönüşüm olarak da adlandırılır. Termoelastik dönüşüm dışardan verilen sıcaklık ile kristal kafes yapısının daha düşük enerjili bir yapıya geçmesi sonucu atomik düzeyde hareketlilik sağlar ve bunun sonucu olarak şekil geri kazanımı gerçekleşir. Termoelastik dönüşüm atomik düzeylerde ortaya çıkar. Mikro düzeydeki toplu atom hareketleri maddenin tamamında makro düzeyde gözlemlenir. Ama bu atom hareketleri anında, atomların birbirlerine olan komşuluklarında değişiklik gözlenmez ve bu sayede malzeme şekil hafızası kazanmış olur.

Bakır bazlı şekil hafızalı alaşımlar, termal yaşlandırma işlemine karşı oldukça hassastırlar ve yaşlandırma işleme sonrası dönüşüm davranışlarında farklılık gösterdiği görülmüştür. Zamana bağlı yapılan yaşlandırma işleminde alaşımın martenzit yapısında değişiklikler gözlemlenir.

Yapılan bu tez çalışması kapsamında bakır bazlı şekil hafızalı alaşımlar içerisinde CuAlMnFe alaşımının %at. $\text{Cu}_{70.84}\text{Al}_{23.8}\text{Mn}_{4.14}\text{Fe}_{1.22}$ kompozisyonuna ait dönüşüm sıcaklıkları incelenmiştir. Deneyler için %at. $\text{Cu}_{70.84}\text{Al}_{23.8}\text{Mn}_{4.14}\text{Fe}_{1.22}$ kimyasal kompozisyona sahip alaşım ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen malzemelerden bir numune 900 °C 'de 1 saat kül fırınında tutulduktan sonra tuzlu buzlu suda soğutulularak homojenizasyon işlemine tabi tutulmuştur. Diğer 5 numune kül fırınında 350 °C sıcaklıkta 60, 120, 180, 240 ve 300 dakika

bekletilerek numunelerin oda sıcaklığında soğutulması sağlanmış ve DSC analizleri yapılmıştır. Yaşlandırma deneyleri sonrası elde edilen numuneler üzerinde daha sonra DSC, XRD analizleri ve mikroyapı gözlemleri yapılarak çalışma tamamlanmıştır.

5.1. DSC Analiz Sonuçları

Martenzitik faz dönüşümünde alaşım yüksek sıcaklıkta iken östenit fazdadır. Yüksek sıcaklıkta bulunan alaşım soğutulduğunda ise östenit fazdan martenzit faza geçiş olmaktadır. Termoelastik martenzitik dönüşümler genelde geri dönüşüm özelliği gösterir ve düşük miktarlarda faz dönüşüm sıcaklığı histerizisi sergilediği görülür. Şekil hafıza etkisinin gerçekleşmesi için düzgün şekilde yapılmış şekil değişikliğinin ve malzemenin şekil hafıza eğitiminin daha önceden verilmiş olması gereklidir [113]. Difüzyonsuz dönüşüm doğaları gereği, martenzit dönüşümlerde atomların yer değiştirme özelliği ile yeniden düzenlenmeleri pek mümkün değildir. Faz dönüşümü anında uygun kafes boşluklarının oluşturdukları atom hacimleri çok az miktarda değişiklik veya hiç değişiklik göstermezler [114, 115].

Tez çalışmasında elde edilen alaşımın diferansiyel taramalı kalorimetre cihazı yardımı ile içerisindeki ısı kapasitesinin farklı sürelerdeki sıcaklık karşısında nasıl değiştiği analiz edilerek, numunelerin göstermiş olduğu katı hal faz geçişlerinin başlangıç ve bitiş sıcaklıkları (M_s , M_f , A_s ve A_f) tespit edilmiştir. Yaşlandırma işlemi genel olarak, atomlar arası boşlukların azalmasından kaynaklı, malzemenin mekanik özelliklerini, dönüşüm sıcaklıklarını ve iç sürtünmelerinde değişikliklere neden olur [116].

Yaşlandırma süresinin artışı ile görülen faz dönüşümleri sıcaklıklarındaki artış östenit faz bitiş sıcaklığında görülmemiştir. Östenit faz dönüşüm sıcaklığında düşme eğilimi görülmüştür. Martenzit faz dönüşüm başlangıç ve bitiş sıcaklıklarındaki yükseliş özellikle 240 dakika yapılan yaşlandırma süresinde en yüksek değerlere çıktığı görülmüştür. 300 dakika sonrası elde edilen dönüşüm sıcaklıklarındaki değerlerin düşme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak 350 derecede ki bekletme süresinin atomlar arasındaki difüzyon miktarını artırması olarak gösterilebilir. Aktivasyon enerjisinin 180 dakika yaşlandırma sonrasında dönüşüm için gerekli miktarının azalmasının nedeni olarak, yapı içerisindeki dönüşüm sonucu azalan kafes gerilmelerinden dolayı malzemenin iç enerjisinin azaldığı bilgisine ulaşılabilir.

Deney numunelerinin tamamında martenzit faz dönüşümü gözlenmiştir. Yaşlandırma ile elde edilen sonuçlarda faz dönüşüm sıcaklıklarının zamana bağlı olarak grafik içerisinde ötelendiği saptanmıştır. Yaşlandırma sürecinde atomların difüzyon ile yer değiştirme eğilimleri yüzünden Gibbs enerjisi düşerek var oldukları yapıdan daha kararlı bir yapıya geçiş yaptıkları görülmektedir. Yaşlandırma sonucunda oluşan bu kararlı yapı ise faz dönüşüm sıcaklıklarını artırmaktadır [117].

5.2. XRD Analiz Sonuçları

Yaşlandırma deneyleri sonrasında numuneler, X ışını difraksiyon cihazı kullanılarak $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak 5° , 15° , 25° , 35° , 45° /dakika tarama ısıtma/soğutma hızında numunelerin XRD desenleri elde edilmiştir. Elde edilen desenlerin miller indisleri ve piklere ait fazlar grafikler üzerinde gösterilmiştir. XRD desenleri üzerinde farklı fazlara ait yapıların yansımalarına rastlanmıştır. Rastlanılan bu yapıların literatür ile uyum içerisinde olduğu saptanmıştır [60, 118-122]. β'_1 (18R) yapısının başlıca düzlem yansımaları $(12\bar{2})$, (202) , (0018) , (220) , $(12\bar{8})$, (208) , (1210) , $(20\bar{1}0)$ olarak desenlerde gözlemlenmiştir. α'_1 yapısında ise (111) desenine rastlanmıştır.

XRD sonuçlarından, tüm örnekler için β'_1 (18R) martenzit yapı tipindeki düzlemlerle eşleşen birçok tepe noktası, en yaygın kırılma tepe noktası olarak gözlemlenmiştir. Gözlemlenen bu yapılar literatür ile uyum içinde olduğu görülmüştür [108].

Yaşlandırma süresinin artması ile birlikte çökelen partikül miktarındaki artış ve partiküllerin büyümesi XRD 'de 42° civarındaki piklerinin şiddetlerinin artmasına sebep olmuştur. Fakat yaşlandırma süresinin 180 dakikayı geçmesi ile birlikte gerilim giderme mekanizmasının aktif hale gelmesi neticesinde çökelen partiküllerde bozulmalar meydana gelmiştir. Bu durum 42° civarındaki piklerin, yaşlanma süresinin artması ile birlikte kaybolması ile de açıkça görülmektedir.

5.3. Mikroyapı Analiz Sonuçları

Bakır bazlı şekil hafızalı alaşımlarda martenzit fazın yüzey metalografisi incelendiğinde γ_1 yapısında genellikle birbirine paralel plakalar gözlemlenirken β'_1 yapısında ise genel olarak birbiri ile uyumlu ve lamel tipi martenzit plaka oluşumları görülmüştür [123, 124].

Yaşlandırma işlemleri sonrası elde edilen numuneler parlatma cihazında parlatılıp dağlandıktan sonra görüntü alabilmek için hazırlanmıştır. Bazı çalışmalarda yaşlandırma sonrasında çökelti fazları görülmektedir, bu çökelti bu çalışmada yaşlandırma yapılan numunelerde gözlemlenmemiştir. Bu durumun XRD de görülmesine karşın optik incelemede görülmemesinin tek bir sebebi vardır. Çökelen partiküllerin belli bir çapa ulaşmadan yaşlandırmanın 180. dakikası ile birlikte yapı içerisinde bozulmuş olmasından kaynaklıdır. Çökelti yapısı optik mikroskopta görülebilecek belli bir büyüklüğe gelemediğinden dolayı optik mikroskopta gözlemlenememiştir. Görüntülerin literatür ile uyum sağladığı tespit edilmiştir [59, 125, 126].

5.4. Öneriler

Yapmış olduğumuz tezde %at. $\text{Cu}_{70.84}\text{Al}_{23.8}\text{Mn}_{4.14}\text{Fe}_{1.22}$ kompozisyonuna oranlarına sahip CuAlMnFe alaşımı üzerine DSC, XRD ve mikroyapı analizleri yapılmıştır. Bu çalışmalara benzer şekilde aşağıdaki araştırmalar yapılabilir.

- Alaşımın kimyasal kompozisyon türü değiştirilerek farklı ısı işlemler altında değişik sonuçlar belirlenebilir.
- Alaşımların iletkenlik, manyetik ve kimyasal korozyon gibi özellikleri analiz edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1]. Ashby, M. F., *Materials selection in mechanical design* (Burlington, MA. 4 th ed; Butterworth-Heinemann: 2011; p 1-3.
- [2]. Porter, D. A., Easterling, K. E. and Sherif, M., *Phase Transformations in Metals and Alloys, (Revised Reprint)*. CRC press: 2009; p 383.
- [3]. Murty, B. S., Yeh, J.-W., Ranganathan, S. and Bhattacharjee, P., *High-entropy alloys*. Elsevier: 2019; p 10-23.
- [4]. International, A., Committee, A. I. H. and Committee, A. I. A. P. D., *Metals Handbook: Properties and selection*. ASM International: 1990; p 1-89.
- [5]. Ziolkowski, A., *Pseudoelasticity of shape memory alloys: theory and experimental studies*. Butterworth-Heinemann: 2015; p 1-10.
- [6]. Mizutani, U., Hume-Rothery rules for structurally complex alloy phases. *MRS Bulletin* **2012**, 37, (2), 169-169.
- [7]. Lagoudas, D. C., *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. Springer: 2008; p 1-40.
- [8]. Jani, J. M., Design optimisation of shape memory alloy linear actuator applications, RMIT University, 2016.
- [9]. Kauffman, G. B. and Mayo, I., The story of nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications. *The chemical educator* **1997**, 2, (2), 1-21.
- [10]. Buehler, W. J., Gilfrich, J. and Wiley, R., Effect of low-temperature phase changes on the mechanical properties of alloys near composition TiNi. *Journal of applied physics* **1963**, 34, (5), 1475-1477.
- [11]. Butera, F., Coda, A., Vergani, G. and SpA, S. G., Shape memory actuators for automotive applications. *Nanotec IT Newsletter. Roma: Airi/Nanotec IT* **2007**, 12-6.
- [12]. Stoeckel, D., Shape memory actuators for automotive applications. *Materials & Design* **1990**, 11, (6), 302-307.
- [13]. Butera, F., Shape memory actuators. *Advanced Materials and Processes* **2008**, 166, (3), 37-40.
- [14]. Gheorghita, V., Gümpel, P., Strittmatter, J., Anghel, C., Heitz, T. and Senn, M., *Using Shape memory alloys in automotive safety systems*, Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress, pp.909-917.
- [15]. Luchetti, T., Zanella, A., Biasiotto, M. and Saccagno, A., Electrically actuated antiglare rear-view mirror based on a shape memory alloy actuator. *Journal of materials engineering and performance* **2009**, 18, (5-6), 717-724.
- [16]. Hartl, D. J. and Lagoudas, D. C., Aerospace applications of shape memory alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* **2007**, 221, (4), 535-552.
- [17]. Van Humbeeck, J., Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A* **1999**, 273, 134-148.
- [18]. Schetky, L. M., Shape memory alloy applications in space systems. *Materials & Design* **1991**, 12, (1), 29-32.
- [19]. Godard, O. J., Lagoudas, M. Z. and Lagoudas, D. C., *Design of space systems using shape memory alloys*, Smart Structures and Materials 2003: Smart Structures and Integrated Systems, pp.545-558.
- [20]. Singh, K. and Chopra, I., *Design of an improved shape memory alloy actuator for rotor blade tracking*, Smart Structures and Materials 2002: Smart Structures and Integrated Systems, pp.244-266.
- [21]. Peng, F., Jiang, X.-X., Hu, Y.-R. and Ng, A., *Application of shape memory alloy actuators in active shape control of inflatable space structures*, 2005 IEEE Aerospace Conference, pp.1-10.
- [22]. Roh, J.-H., Han, J.-H. and Lee, I., *Finite element analysis of adaptive inflatable structures with SMA strip actuator*, Smart structures and materials 2005: smart structures and integrated systems, pp.460-471.

- [23]. Prahlad, H. and Chopra, I., *Design of a variable twist tilt-rotor blade using shape memory alloy (SMA) actuators*, Smart Structures and Materials 2001: Smart Structures and Integrated Systems, pp.46-59.
- [24]. Birman, V., Review of mechanics of shape memory alloy structures. *Applied mechanics reviews* **1997**, 50, (11), 629-645.
- [25]. Landis, G. A. and Jenkins, P. P., *Dust on Mars: Materials adherence experiment results from Mars Pathfinder*, Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1997, pp.865-869.
- [26]. Fujita, H., *Studies of micro actuators in Japan*, Proceedings, 1989 International Conference on Robotics and Automation, pp.1559-1564.
- [27]. Honma, D. and Miwa, Y., Iguchi, 1985, "Micro Robots and Micro Mechanisms Using Shape Memory Alloy to Robotic Actuators," *J. Rob. Syst* 2, (1), 3-25.
- [28]. Colorado, J., Barrientos, A., Rossi, C. and Breuer, K. S., Biomechanics of smart wings in a bat robot: morphing wings using SMA actuators. *Bioinspiration & biomimetics* **2012**, 7, (3), 036006.
- [29]. Jani, J. M., Leary, M., Subic, A. and Gibson, M. A., A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design (1980-2015)* **2014**, 56, 1078-1113.
- [30]. Furst, S. J., Bunget, G. and Seelecke, S., Design and fabrication of a bat-inspired flapping-flight platform using shape memory alloy muscles and joints. *Smart Materials and Structures* **2012**, 22, (1), 014011.
- [31]. Bunget, G. and Seelecke, S., *Actuator placement for a bio-inspired bone-joint system based on SMA*, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2009, pp.72880L.
- [32]. Andreasen, G. F. and Hilleman, T. B., An evaluation of 55 cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics. *The Journal of the American Dental Association* **1971**, 82, (6), 1373-1375.
- [33]. Idelsohn, S., Pena, J., Lacroix, D., Planell, J., Gil, F. and Arcas, A., Continuous mandibular distraction osteogenesis using superelastic shape memory alloy (SMA). *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* **2004**, 15, (4), 541-546.
- [34]. Sattapan, B., Palamara, J. E. and Messer, H. H., Torque during canal instrumentation using rotary nickel-titanium files. *Journal of Endodontics* **2000**, 26, (3), 156-160.
- [35]. Stirling, L., Yu, C.-H., Miller, J., Hawkes, E., Wood, R., Goldfield, E. and Nagpal, R., Applicability of shape memory alloy wire for an active, soft orthotic. *Journal of materials engineering and performance* **2011**, 20, (4-5), 658-662.
- [36]. Choudhary, R. K., Theruvil, B. and Taylor, G. R., First metatarsophalangeal joint arthrodesis: a new technique of internal fixation by using memory compression staples. *The Journal of foot and ankle surgery* **2004**, 43, (5), 312-317.
- [37]. Machado, L. and Savi, M., Medical applications of shape memory alloys. *Brazilian journal of medical and biological research* **2003**, 36, (6), 683-691.
- [38]. Song, C., Frank, T. and Cuschieri, A., Shape memory alloy clip for compression colonic anastomosis. *Journal of biomechanical engineering* **2005**, 127, (2), 351-354.
- [39]. Cwikiel, W., Willen, R., Stridbeck, H., Lillo-Gil, R. and von Holstein, C. S., Self-expanding stent in the treatment of benign esophageal strictures: experimental study in pigs and presentation of clinical cases. *Radiology* **1993**, 187, (3), 667-671.
- [40]. Tanaka, M., Hirano, K., Goto, H., Namima, T., Uchi, K., Jiang, Z., Matsuki, H., Tanahashi, Y., Orikasa, S. and Chonan, S., Artificial SMA valve for treatment of urinary incontinence: upgrading of valve and introduction of transcatheter transformer. *Bio-medical materials and engineering* **1999**, 9, (2), 97-112.
- [41]. Himpens, J. M., Laparoscopic inguinal hernioplasty. *Surgical endoscopy* **1993**, 7, (4), 315-318.
- [42]. Qian, H., Li, H., Song, G., Chen, H., Ren, W. and Zhang, S., Seismic vibration control of civil structures using shape memory alloys: a review. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments* **2010**, 3377-3395.

- [43]. Song, G., Ma, N. and Li, H.-N., Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering structures* **2006**, 28, (9), 1266-1274.
- [44]. Mirzaeifar, R., DesRoches, R., Yavari, A. and Gall, K., Coupled thermo-mechanical analysis of shape memory alloy circular bars in pure torsion. *International Journal of Non-Linear Mechanics* **2012**, 47, (3), 118-128.
- [45]. Kuribayashi, K., Improvement of the response of an SMA actuator using a temperature sensor. *The International Journal of Robotics Research* **1991**, 10, (1), 13-20.
- [46]. Ikuta, K., Tsukamoto, M. and Hirose, S., *Shape memory alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope*, Proceedings. 1988 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.427-430.
- [47]. Schiedeck, F. and Mojzisch, S., Design of a robust control strategy for the heating power of shape memory alloy actuators at full contraction based on electric resistance feedback. *Smart Materials and Structures* **2011**, 20, (4), 045002.
- [48]. Meier, H., Czechowicz, A., Haberland, C. and Langbein, S., Smart control systems for smart materials. *Journal of materials engineering and performance* **2011**, 20, (4-5), 559-563.
- [49]. Langbein, S. and Czechowicz, A., Adaptive resetting of SMA actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* **2012**, 23, (2), 127-134.
- [50]. Huang, W., Ding, Z., Wang, C., Wei, J., Zhao, Y. and Purnawali, H., Shape memory materials. *Materials today* **2010**, 13, (7-8), 54-61.
- [51]. Doraiswamy, S., Rao, A. and Srinivasa, A., Combining thermodynamic principles with Preisach models for superelastic shape memory alloy wires. *Smart Materials and Structures* **2011**, 20, (8), 085032.
- [52]. Van Humbeeck, J., Shape memory alloys: a material and a technology. *Advanced engineering materials* **2001**, 3, (11), 837-850.
- [53]. Nishiyama, Z., *Martensitic transformation*. Elsevier: 2012; p 104.
- [54]. Otsuka, K. and Wayman, C. M., *Shape memory materials*. Cambridge university press: 1999; p 17-64.
- [55]. Mayergoyz, I., *The Science of Hysteresis: Physical modeling, micromagnetics, and magnetization dynamics*. Gulf Professional Publishing: 2006; p 3-58.
- [56]. Özkul, İ., Cu bazlı şekil hafızalı metallerin üretimindeki alaşım miktarlarının faz dönüşüm sıcaklıklarına etkisi ve karakterizasyonu, 2016.
- [57]. Durak, G., CoMnGe_{1-x}Ga_x sistemlerinin 0≤x≤0.1 bileşikleri için yapısal, ısısal, manyetik ve manyetokalorik özelliklerinin incelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Fen bilimleri Enstitüsü, Ankara Üniversitesi, Ankara 2010.
- [58]. Yüzüak, E., Tb₅Si_{2-x}Ge_{2-x} (T=Fe,Mn) Alaşımlarının Yapısal ve Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2008.
- [59]. Pourkhorshidi, S., Parvin, N., Kenevisi, M., Naeimi, M. and Khaniki, H. E., A study on the microstructure and properties of Cu-based shape memory alloy produced by hot extrusion of mechanically alloyed powders. *Materials Science and Engineering: A* **2012**, 556, 658-663.
- [60]. Amini, R., Mousavizad, S., Abdollahpour, H., Ghaffari, M., Alizadeh, M. and Okay, A. K., Structural and microstructural phase evolution during mechano-synthesis of nanocrystalline/amorphous CuAlMn alloy powders. *Advanced Powder Technology* **2013**, 24, (6), 1048-1053.
- [61]. Rottiers, W., Van den Broeck, L., Peeters, C. and Arras, P., *Shape memory materials and their applications*, Korolev's Reading, Rusia, pp.250-251.
- [62]. Worden, K. and Haywood, J., *Smart technologies*. World Scientific: ABD, 2003;
- [63]. Güdeloğlu, S., Cu-Al-Mn şekil hafızalı alaşımında yaşlandırmanın fiziksel özellikler üzerine etkisi/The effect of ageing on physical properties of Cu-Al-Mn shape memory alloys, 2014.
- [64]. Duerig, T. W., Melton, K. and Stöckel, D., Engineering aspects of shape memory alloys. **2013**,
- [65]. Huang, W. and Toh, W., Training two-way shape memory alloy by reheat treatment. *Journal of materials science letters* **2000**, 19, (17), 1549-1550.
- [66]. Su, Ş., 2XXX Grubu Alaşımlarda Katı Eriyiğe Alma Sıcaklık ve Süresinin Yaşlanma Sonrası Özelliklere Etkileri, Y. Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Konya, 1988.

- [67]. Savaşkan, T., *Malzeme bilgisi ve muayenesi*. Derya Kitabevi: 1999; p 97-104.
- [68]. Tarhan, E., Bakır esaslı hafızalı alaşımlarda yaşlanma davranışı, Doktora Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara 2004.
- [69]. Cantor, B., *Stable and metastable multicomponent alloys*, Annales de chimie, pp.245-256.
- [70]. Morgan, N., Medical shape memory alloy applications—the market and its products. *Materials Science and Engineering: A* **2004**, 378, (1-2), 16-23.
- [71]. Yamauchi, K., Ohkata, I., Tsuchiya, K. and Miyazaki, S., *Shape memory and superelastic alloys: Applications and technologies*. Elsevier: 2011; p 3-27.
- [72]. Ölander, A., An electrochemical investigation of solid cadmium-gold alloys. *Journal of the American Chemical Society* **1932**, 54, (10), 3819-3833.
- [73]. Buehler, W. J. and Wiley, R. C., Nickel-based alloys *US Patent* **1965**, (174), 851.
- [74]. Van Humbeeck, J., Chandrasekaran, M. and Delaey, L., Shape memory alloys: materials in action. *Endeavour* **1991**, 15, (4), 148-154.
- [75]. Lecce, L., Shape memory alloy engineering: for aerospace, structural and biomedical applications. **2014**, p 18-24.
- [76]. Chang, L. and Read, T., Plastic deformation and diffusionless phase changes in metals—The gold-cadmium beta phase. *JOM* **1951**, 3, (1), 47-52.
- [77]. Srinivasan, A. V. and McFarland, D. M., Smart structures, analysis and design. **2001**,
- [78]. Lagoudas, D. C., *Shape memory alloys*. ABD, 2008; p 1-13.
- [79]. Es-Souni, M., Es-Souni, M. and Fischer-Brandies, H., Assessing the biocompatibility of NiTi shape memory alloys used for medical applications. *Analytical and bioanalytical chemistry* **2005**, 381, (3), 557-567.
- [80]. Šittner, P., Landa, M., Lukáš, P. and Novák, V., R-phase transformation phenomena in thermomechanically loaded NiTi polycrystals. *Mechanics of Materials* **2006**, 38, (5-6), 475-492.
- [81]. Okamoto, H., *Phase diagrams for binary alloys. Desk handbook*. ASM International: ABD, 2000; p-117.
- [82]. Wayman, C., Some applications of shape-memory alloys. *JOM* **1980**, 32, (6), 129-137.
- [83]. Perkins, J. and Sponholz, R., Stress-induced martensitic transformation cycling and two-way shape memory training in Cu-Zn-Al alloys. *Metallurgical transactions A* **1984**, 15, (2), 313-321.
- [84]. Morris, M., High temperature properties of ductile Cu–Al–Ni shape memory alloys with boron additions. *Acta metallurgica et materialia* **1992**, 40, (7), 1573-1586.
- [85]. Isalgue, A., Torra, V., Yawny, A. and Lovey, F., Metastable effects on martensitic transformation in SMA: Part VI. The Clausius-Clapeyron relationship. *Journal of thermal analysis and calorimetry* **2008**, 91, (3), 991-998.
- [86]. Lexcelent, C., *Shape-memory alloys handbook*. John Wiley & Sons: 2013; p 3-28.
- [87]. Canbay, C. A. and Aydoğdu, A., Thermal analysis of Cu-14.82 wt% Al-0.4 wt% Be shape memory alloy. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* **2013**, 113, (2), 731-737.
- [88]. Dutkiewicz, J. and Cesari, E., Phase transitions during continuous heating of martensitic CuAlMn alloys. *Le Journal de Physique IV* **1995**, 5, (C2), C2-199-C2-204.
- [89]. Canbay, C. A., Genc, Z. K. and Sekerci, M., Thermal and structural characterization of Cu–Al–Mn–X (Ti, Ni) shape memory alloys. *Applied Physics A* **2014**, 115, (2), 371-377.
- [90]. Canbay, C. A., Gudeloglu, S. and Genc, Z. K., Investigation of the enthalpy/entropy variation and structure of Cu–Al–Mn–Fe shape memory alloys. *International Journal of Thermophysics* **2015**, 36, (4), 783-794.
- [91]. Canbay, C. A. and Karagoz, Z., The effect of quaternary element on the thermodynamic parameters and structure of CuAlMn shape memory alloys. *Applied Physics A* **2013**, 113, (1), 19-25.
- [92]. Hartl, D. and Lagoudas, D., *Thermomechanical characterization of shape memory alloy materials*. Springer: ABD, 2008;
- [93]. Jiao, Y., Wen, Y., Li, N., He, J. and Teng, J., Effect of solution treatment on damping capacity and shape memory effect of a CuAlMn alloy. *Journal of Alloys and Compounds* **2010**, 491, (1-2), 627-630.

- [94]. Charfi, A., Bouraoui, T., Feki, M., Bradai, C. and Normand, B., Surface treatment and corrosion behaviour of Fe–32Mn–6Si shape memory alloy. *Comptes Rendus Chimie* **2009**, 12, (1-2), 270-275.
- [95]. Wen, Y., Xie, W., Li, N. and Li, D., Remarkable difference between effects of carbon contents on recovery strain and recovery stress in Fe–Mn–Si–Cr–Ni–C alloys. *Materials Science and Engineering: A* **2007**, 457, (1-2), 334-337.
- [96]. Bouraoui, T., Jemal, F. and Zineb, T. B., Tensile properties of a Fe-32Mn-6Si shape memory alloy. *Strength of Materials* **2008**, 40, (2), 203.
- [97]. Mohd Jani, J., Design optimisation of shape memory alloy linear actuator applications, 2016.
- [98]. Ullakko, K., Magnetically controlled shape memory alloys: A new class of actuator materials. *Journal of materials Engineering and Performance* **1996**, 5, (3), 405-409.
- [99]. Ma, J., Karaman, I. and Noebe, R. D., High temperature shape memory alloys. *International Materials Reviews* **2010**, 55, (5), 257-315.
- [100]. Lendlein, A. and Kelch, S., Shape-memory polymers. *Angewandte Chemie International Edition* **2002**, 41, (12), 2034-2057.
- [101]. Ochoński, W., Application of shape memory materials in fluid sealing technology. *Industrial Lubrication and Tribology* **2010**, 62, (2), 99-110.
- [102]. Hirai, T., Maruyama, H., Suzuki, T. and Hayashi, S., Effect of chemical cross-linking under elongation on shape restoring of poly (vinyl alcohol) hydrogel. *Journal of applied polymer science* **1992**, 46, (8), 1449-1451.
- [103]. Lojen, G., Anžel, I., Kneissl, A., Križman, A., Unterweger, E., Kosec, B. and Bizjak, M., Microstructure of rapidly solidified Cu–Al–Ni shape memory alloy ribbons. *Journal of Materials Processing Technology* **2005**, 162, 220-229.
- [104]. Skoog, D. A., Holler, F. J. and Crouch, S. R., Instrumental analysis. **2007**, 47,
- [105]. Pungor, E. and Horvai, G., *A practical guide to instrumental analysis*. CRC press: 1994;
- [106]. Dean, J. A. and Dean, J., *Analytical chemistry handbook*. McGraw-Hill New York: 1995;
- [107]. Canbay, C. A., Bakır bazlı şekil hatırlamalı alaşım üretimi ve alaşımların yapısal, termal ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi/The production of copper based shape memory alloys and investigation of the structural, thermal and electrical properties of alloys, 2010.
- [108]. Canbay, C. A., Karaduman, O. and Özkul, İ., Investigation of varied quenching media effects on the thermodynamical and structural features of a thermally aged CuAlFeMn HTSMA. *Physica B: Condensed Matter* **2019**, 557, 117-125.
- [109]. Kissinger, H. E., Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical chemistry* **1957**, 29, (11), 1702-1706.
- [110]. Salzbrenner, R. and Cohen, M., On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations. *Acta Metallurgica* **1979**, 27, (5), 739-748.
- [111]. Prado, M., Decorte, P. and Lovey, F., Martensitic transformation in Cu-Mn-Al alloys. *Scripta metallurgica et materialia* **1995**, 33, (6),
- [112]. Bedeloğlu, A. Ç., Şekil Hafızalı Alaşımlar ve Tekstil Malzemelerindeki Uygulamaları. *Tekstil ve Mühendis* **2011**, 18, (83), p 27-37.
- [113]. Olson, G. and Cohen, M., Thermoelastic behavior in martensitic transformations. *Scripta Metallurgica* **1975**, 9, (11), 1247-1254.
- [114]. Caneiro, A. and Chandrasekaran, M., Thermoelastic martensitic transformation in β Cu-Zn-Al studied by density changes. *Scripta Metallurgica* **1988**, 22, (11), 1797-1800.
- [115]. Saule, F., Ahlers, M., Kropff, F. and Rivero, E., The martensitic phases and their stability in Cu Zn and Cu Zn Al alloys—IV. The influence of lattice parameter changes and evaluation of phase stabilities. *Acta Metallurgica et Materialia* **1992**, 40, (12), 3229-3238.
- [116]. Schofield, D. and Miodownik, A., Aging effects in copper-based shape-memory alloys. *Metals Technology* **1980**, 7, (1), 167-173.
- [117]. Ahlers, M. and Pelegrina, J., Ageing of martensite: stabilisation and ferroelasticity in Cu-based shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A* **2003**, 356, (1), 298-315.
- [118]. Aldirmaz, E. and Aksoy, I., Effects of heat treatment and deformation on 2H and 18R martensites in Cu–9.97% Al–4.62% Mn alloy. *Arabian Journal for Science and Engineering* **2014**, 39, (1), 575-580.

- [119]. Jiao, Y.-q., Wen, Y.-h., Ning, L., He, J.-q. and Jin, T., Effect of environmental temperature on damping capacity of Cu-Al-Mn alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* **2009**, 19, (3), 616-619.
- [120]. Zhou, L., Ming-pu, W., Ling-fei, C., Yu-chang, S. and Gen-ying, X., Crystal structure and thermal stability of martensite in Cu-24Al-3Mn alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* **2002**, 12, (1), 6-10.
- [121]. Obradó, E., Mañosa, L. and Planes, A., Stability of the bcc phase of Cu-Al-Mn shape-memory alloys. *Physical Review B* **1997**, 56, (1), 20-23.
- [122]. Wang, R., Gui, J., Chen, X. and Tan, S., EBSD and TEM study of self-accommodating martensites in Cu 75.7 Al 15.4 Mn 8.9 shape memory alloy. *Acta Materialia* **2002**, 50, (7), 1835-1847.
- [123]. Swann, P. and Warlimont, H., The electron-metallography and crystallography of copper-aluminum martensites. *Acta metallurgica* **1963**, 11, (6), 511-527.
- [124]. Vajpai, S., Dube, R. and Sangal, S., Microstructure and properties of Cu-Al-Ni shape memory alloy strips prepared via hot densification rolling of argon atomized powder preforms. *Materials Science and Engineering: A* **2011**, 529, 378-387.
- [125]. Stanciu, S., Bujoreanu, L. G., Ioniță, I., Sandu, A. V. and Enache, A., A structural-morphological study of a Cu₆₃Al₂₆Mn₁₁ shape memory alloy, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IV, Romanya, pp.72970C-1-72970C-4.
- [126]. Eskil, M., Şekil Hatırlamalı CuZnAl alaşımlarında soğutma hızı etkileri ve çökelti kinetikleri, Yüksek lisans tezi, Fırat üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Elazığ 2000.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Mehmet Ali KURGUN

Doğum Tarihi : 15.05.1985

E-mail : mehmetalikurgun@gmail.com

Öğrenim Durumu :

Derece	Bölüm/Program	Üniversite	Yıl
Lisans	Makine Mühendisliği	Dicle Üniversitesi	2005-2009
Yüksek Lisans	Makine Mühendisliği	Mersin Üniversitesi	2017-2019
Doktora			

Görevler :

Görev Unvanı	Görev Yeri	Yıl
Satın Alma Mühendisi	Ditaş	2011-2012
Proje Mühendisi	TCV Danışmanlık Mühendislik A.Ş.	2012-2013
Ar-Ge Mühendisi	Koluman Otomotiv Endüstri A.Ş.	2013 -

Uluslararası SCI, SCI-Expanded, kapsamındaki dergilerde yayımlanan tam metin makaleler

1. Özkul, İ.; Kurgun, M.; Kalay, E.; Canbay, C.; Aldaş, K., Shape Memory Alloys Phenomena, Classification of the Shape Memory Alloys (SMAs) Production Techniques and Application Fields. *The European Physical Journal Plus* **2019**, 134 (585), 1-15.

Uluslararası Bilimsel Toplantılar- Tam Metin - Sözlü

2. Kurgun, M. Kalay, E. Özkul, İ. Canbay, C. *Kinetic Characteristic Analysis of Elasto Caloric Copper Based Alloy*, 2nd Cilicia International Symposium on Engineering and Technology, 2019, pp. 479-483.
3. Kurgun, M.; Kalay, E.; Özkul, İ., *Yol Süpürgelerinde Kullanılan Hidrostatik Tahrik Yöntemi ile Yardımcı Motorlu Tahrik Yönteminin Yakıt Tüketim Mukayesesi*. I. Uluslararası Mersin Sempozyumu, 2018, pp. 300-316, Mersin.
4. Kurgun, M.; Kalay, E.; Özkul, İ.; Çağan, S.; Buldum, B.; Canbay, C., *Belediyelerde Kullanılan Damperli Kamyonların Seyir Halinde Damper Açma Problemini Engelleme Tasarımı*, Uluslararası Erdemli Sempozyumu, 2018, pp. 27-29, Mersin.
5. Kalay, E.; Kurgun, M.; Özkul, İ.; Çağan, S.; Buldum, B.; Canbay, C., *Pankek Yapımında Kullanılan CNC Tezgâh Tasarımı*. Uluslararası Erdemli Sempozyumu, pp. 21-24, 2018, Mersin.
6. Kurgun, M.; Özkul, İ.; Canbay, C. *Addition of Fe Elements for CuAlMn Shape Memory Alloy*, 2. Uluslararası Mersin Sempozyumu, 2019, pp. 289-294, Mersin.
7. Kurgun, M.; Özkul, İ.; Canbay, C. *Basic of Cu Based Shape Memory Alloys*, 2. Uluslararası Mersin Sempozyumu, pp. 295-303, Mersin.