

**Cu-Al-Mn ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMINDA
YAŞLANDIRMANIN FİZİKSEL
ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ**

Samet GÜDELOĞLU

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Canan Aksu CANBAY

Mart-2014

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Cu-Al-Mn ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMINDA YAŞLANDIRMANIN FİZİKSEL
ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet GÜDELOĞLU

(112114107)

**Anabilim Dalı: Fizik
Programı: Genel Fizik**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY
Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Şubat 2014**

**Mart 2014
ELAZİĞ**

**T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Cu-Al-Mn ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMINDA YAŞLANDIRMANIN FİZİKSEL
ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Samet GÜDELOĞLU

(112114107)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 11 Şubat 2014

Tezin Savunulduğu Tarih : 13 Mart 2014

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Fahrettin YAKUPHANOĞLU (F.Ü)

Prof. Dr. Raşit ZENGİN (F.Ü)

MART-2014

ANNE VE BABAM' a...

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmasının hazırlık aşamasında benden maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen, bilgi ve görüşlerinden faydalandığım danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Canan AKSU CANBAY' ya;

Deneysel çalışmalar sırasında gerekli ortamı oluşturan Prof. Dr. Memet ŞEKERCİ'ye;

Termal ölçümlerin alınması aşamasında benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Dr. Zuhal KARAGÖZ GENÇ'e;

Tez aşamasında en sıkıntılı anlarımda öğütleriyle ve deneyimleriyle bana yol gösteren Yrd. Doç. Dr. Murat GENÇ'e;

Bu zaman zarfında her zaman yanımda olan beni iyi ve güzel ahlaklı bir insan olabilmem için adım adım büyüten, yetiştiren bu değerlerden asla kopmamamı sağlayan değerli Annem – Babam, Sabire - Hüsnü GÜDELOĞLU'na ve tüm GÜDELOĞLU ailesine;

En içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi FÜBAP tarafından **FÜBAP-FF.12.36** nolu proje olarak desteklenmiştir.

Samet GÜDELOĞLU
ELAZIĞ – 2014

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	XIII
SEMBOLLER LİSTESİ.....	XV
1. GİRİŞ	1
2. MARTENSİTİK DÖNÜŞÜMLER.....	4
2.1. Termoelastik Martensitik Dönüşümler	5
2.1.1. Atermal Martensitik Dönüşümler	6
2.1.2. İzotermal Martensitik Dönüşümler	6
2.2. Martensitik Dönüşümlerin Karakteristiği	7
2.2.1. Zamana Bağımlılık	7
2.2.2. Sıcaklığa Bağımlılık	7
2.2.3. Dönüşümün Tersinirliği	7
2.2.4. Uygulanan Gerilmenin Etkisi	7
2.2.5. Yönlenme İlişkisi	7
2.2.6. Kararlılık	8
2.3. Martensitik Dönüşümlerin Kristalografik Özellikleri	9
2.4. Martensitik Dönüşümün Termodinamiği	10
3. ŞEKİL HATIRLAMA OLAYI	12
3.1. Tek Yönlü (Tersinmez) Şekil Hatırlama Olayı	15
3.2. Çift Yönlü (Tersinir) Şekil Hatırlama Olayı.....	17
4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİLERİ	18
4.1. Korozyon Dayanımı Arttırıcı Alaşım Elementleri	18
4.2. Aşınma Dayanımını Arttırıcı Alaşım Elementleri.....	18
4.3. Mukavemet Arttırıcı Alaşım Elementleri	19
4.4. Renk Değiştirici Alaşım Elementleri.....	19
4.5. İşlenebilirliği Arttırıcı Alaşım Elementleri.....	19
4.6. Katkı Elementlerinin Bakıra Etkileri	20
5. YAŞLANDIRMA OLAYI	22
5.1. Ana Fazda Yaşlandırma Olayı.....	22
5.2. Martensit Fazda Yaşlandırma Olayı	25
6. MATERYAL VE METOT	27
6.1. Materyal.....	27

6.2.	Metot.....	30
6.2.1.	X-Işını Kırınım (XRD) Analizleri.....	30
6.2.2.	Metelografik Gözlemler	30
6.2.3.	Termal Analiz Yöntemi.....	31
7.	BULGULAR	32
7.1.	X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları	32
7.1.1.	CAM-1 Alaşımına Ait X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları.....	33
7.1.2.	CAM-2 Alaşımına Ait X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları.....	39
7.1.3.	CAM-3 Alaşımına Ait X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları.....	45
7.2.	Metalografik Gözlemler	51
7.3.	Termal Analiz Sonuçları.....	60
7.3.1.	CAM-1 Alaşımı Termal Analiz Sonuçları	61
7.3.2.	CAM-2 Alaşımı Termal Analiz Sonuçları	81
7.3.3.	CAM-3 Alaşımı Termal Analiz Sonuçları	101
8.	SONUÇ VE TARTIŞMA.....	130
9.	KAYNAKLAR.....	132
	ÖZGEÇMİŞ.....	136

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Cu-Al-Mn ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMINDA YAŞLANDIRMANIN FİZİKSEL ÖZELLİKLER ÜZERİNE ETKİSİ

Samet GÜDELOĞLU

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Sayfa: 135 + XV

2014

Bu çalışmada atomikçe Cu-%23,01 Al- %4,34 Mn, Cu-%26,56 Al- %3,06 Mn ve Cu-%27,96 Al- %4,60 Mn kompozisyonlu şekil hatırlamalı alaşımlar ergitme yöntemi ile elde edilip, yaşlandırma işleminin Cu-Al-Mn üçlü alaşımı üzerindeki fiziksel etkileri incelendi.

Çalışmanın amacına yönelik olarak her bir alaşım ayrı ayrı 200, 300, 400, 500 °C’ de yaşlandırılıp oda sıcaklığındaki suda soğutulmuştur. Daha sonra yaşlandırmış numuneler ve yaşlandırmadan önceki numunelerin karakteristik dönüşüm sıcaklıkları, entalpi, entropi değerleri Diferansiyel Tarama Kalorimetrisi (DSC) kullanılarak belirlendi. Yaşlandırılmış numunelerde karakteristik dönüşüm sıcaklıklarında artışlar tespit edildi. Bu artışların çökelti fazlarından kaynaklandığı, yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak çökelti fazların artışı, buna bağlı olarak martensit yüzeylerin kaybolup yerini çökelti fazlarına bıraktığı, metalografik gözlemler ile tespit edilip desteklenmiştir. Alaşımlara ait örgü parametreleri, kristal yapı tayinleri ve yansıma veren düzlemler oda sıcaklığında X-ışını analizi yapılarak hesaplanmış ve incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Şekil hatırlamalı alaşım, çökelti faz, martensit

SUMMARY

M.Sc. Thesis

THE EFFECT OF AGEING ON PHYSICAL PROPERTIES OF Cu-Al-Mn SHAPE MEMORY ALLOYS.

Samet GÜDELOĞLU

Fırat University

Institute of Science and Technology

Department of Physics

Pages 135 + XV

2014

In this study, Cu-%23,01 Al-%4,34Mn (%at.), Cu-%26,56Al-%3,06Mn (%at.) and Cu-%27,96Al-%4,60Mn (%at.) shape memory alloys were fabricated by melting method and the effect of ageing process on physical properties Cu-Al-Mn ternary shape memory alloys were investigated.

In the aim of this work, each alloy was aged at 200, 300, 400 and 500 °C for 1 hour and then quenched in water at room temperature. After this process, the un-aged and aged samples were thermally investigated by Differential Scanning Calorimetry (DSC) to determine the characteristic transformation temperatures, enthalpy, entropy, values. It was observed that the characteristic transformation temperatures were increased in aged samples. The increase of the characteristic transformation temperatures is due to the precipitate phase and the formation of the precipitate phase was changed according to ageing temperature and also the martensite variants were disappeared with the increase of precipitate phase and this result was supported with the metallographic observations. The lattice parameters crystal structures and diffraction patterns of the alloys were calculated by X-Ray analysis at room temperature.

Key Words: Shape memory alloy, precipitate phase, martensite

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Austenit - Martensit yapıları arasındaki (a) Austenit → Martensit Dönüşüm, (b) Martenit → Austenit Dönüşüm [15].	5
Şekil 2.2. Martensit yapıların oluşum yüzdesinin sıcaklık ve zamana bağlı değişimi; (a) Atermal Dönüşüm. (b) İzotermal Dönüşüm [15].	6
Şekil 2.3. Martensit dönüşüm sonrası martensit faz ile austenit faz arasındaki düzlem şekli [16, 21].	8
Şekil 2.4. Bain modeline göre f.c.c. yapının küçük şekil değişimleri ile b.c.c. (hacim merkezli kübik) yapıya dönüşmesi [17].	9
Şekil 3.1. Şekil hafızalı alaşımların hal değişimleri [24].	13
Şekil 3.2. FeNi (termoelastik olmayan) ve AuCd (termoelastik olan) alaşımlarında ısıtma ve soğutma sıcaklıkları arasındaki farkın histerisis eğrileri [29].	15
Şekil 3.3. (a) Numunenin martensit hali, (b) $T \leq M_f$ sıcaklığında deformasyon hali, (c) Isıtma işlemi (austenit hal), (d) $T \leq M_f$ sıcaklığında soğutma işlemi [31].	16
Şekil 3.4. (a) Numunenin martensit hali, (b) Deforme edilmiş martensit, (c) Isıtma işlemi uygulanmış, (d) Soğutulmaya tabi tutulmuş [31].	17
Şekil 4.1. Alaşım element etkilerinin etkileri [33].	18
Şekil 4.2. Alüminyum ve mangan miktarı ile M_s ve M_f sıcaklıkları değişimi [36].	21
Şekil 4.3. Cu-Al-Mn üçlü şekil hafızalı alaşımda Al ve Mn alaşım elementlerinin dönüşüm sıcaklıklarına etkisi [37].	22
Şekil 5.1. 300°C de yaşlandırılmış numunelere ait çökelti fazlarının optik mikrograf görüntüleri [37].	23
Şekil 5.2. 500°C de yaşlandırılmış numunelere ait çökelti fazlarının optik mikrograf görüntüleri [37].	24
Şekil 5.3. Cu-%14.1Al-%4.0Ni (%wt.) alaşımına ait DSC ölçümleri [40].	24
Şekil 5.4. A_f ve A_s Sıcaklıklarının yaşlanma zamanı ile değişimi [41].	26
Şekil 6.1. Edmund Buehler Arc Melter ergitme fırını.	27
Şekil 6.2. Carbolite CWF-1200 kül fırını.	28
Şekil 6.3. Shimadzu DSC-60A Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı.	28
Şekil 6.4. Olympus BX41M model optic mikrograf.	29
Şekil 6.5. DSC eğrisinden A_s ve A_f dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi [17].	32
Şekil 7.1. CAM-1 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	33
Şekil 7.2. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	34
Şekil 7.3. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	35
Şekil 7.4. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	36
Şekil 7.5. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	37
Şekil 7.6. CAM-1, CAM-1 200, CAM-1 300, CAM-1 400, CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları.	38
Şekil 7.7. CAM-2 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	39

Şekil 7.8. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	40
Şekil 7.9. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	41
Şekil 7.10. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı. ..	42
Şekil 7.11. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı. ..	43
Şekil.7.12. CAM-2, CAM-2 200, CAM-2 300, CAM-2 400, CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları.....	44
Şekil 7.13. CAM-3 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.	45
Şekil 7.14. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı. ..	46
Şekil 7.15. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı. ..	47
Şekil 7.16. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı. ..	48
Şekil 7.17. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı. ..	49
Şekil 7.18. CAM-3, CAM-3 200, CAM-3 300, CAM-3 400, CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları.....	50
Şekil 7.19. CAM-1 alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.	51
Şekil 7.20. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	52
Şekil 7.21. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	52
Şekil 7.22. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	53
Şekil 7.23. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	53
Şekil 7.24. CAM-2 alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.	54
Şekil 7.25. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	55
Şekil 7.26. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	55
Şekil 7.27. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	56
Şekil 7.28. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	56
Şekil 7.29. CAM-3 alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.	57
Şekil 7.30. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	58
Şekil 7.31. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	58
Şekil 7.32. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	59
Şekil 7.33. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.....	59
Şekil 7.34. Shimadzu DSC-60A Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı.	60

Şekil 7.35. CAM-1 numunesine ait 5 °C/dakikak ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	62
Şekil 7.36. CAM-1 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	62
Şekil 7.37. CAM-1 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	63
Şekil 7.38. CAM-1 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	63
Şekil 7.39. CAM-1 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	64
Şekil 7.40. CAM-1 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	64
Şekil 7.41. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	66
Şekil 7.42. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	66
Şekil 7.43. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	67
Şekil 7.44. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	67
Şekil 7.45. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	68
Şekil 7.46. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	68
Şekil 7.47. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	70
Şekil 7.48. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	70
Şekil 7.49. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	71
Şekil 7.50. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	71
Şekil 7.51. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	72
Şekil 7.52. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	72
Şekil 7.53. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	74
Şekil 7.54. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	74
Şekil 7.55. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	75
Şekil 7.56. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	75
Şekil 7.57. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	76

Şekil 7.58. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	76
Şekil 7.59. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	78
Şekil 7.60. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	78
Şekil 7.61. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	79
Şekil 7.62. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	79
Şekil 7.63. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	80
Şekil 7.64. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	80
Şekil 7.65. CAM-2 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	82
Şekil 7.66. CAM-2 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	82
Şekil 7.67. CAM-2 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	83
Şekil 7.68. CAM-2 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	83
Şekil 7.69. CAM-2 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	84
Şekil 7.70. CAM-2 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	84
Şekil 7.71. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	86
Şekil 7.72. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	86
Şekil 7.73. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	87
Şekil 7.74. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	87
Şekil 7.75. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	88
Şekil 7.76. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	88
Şekil 7.77. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	90
Şekil 7.78. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	90
Şekil 7.79. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	91
Şekil 7.80. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	91

Şekil 7.81. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	92
Şekil 7.82. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	92
Şekil 7.83. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	94
Şekil 7.84. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	94
Şekil 7.85. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	95
Şekil 7.86. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	95
Şekil 7.87. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	96
Şekil 7.88. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	96
Şekil 7.89. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	98
Şekil 7.90. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	98
Şekil 7.91. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	99
Şekil 7.92. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	99
Şekil 7.93. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	100
Şekil 7.94. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	100
Şekil 7.95. CAM-3 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	102
Şekil 7.96. CAM-3 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	102
Şekil 7.97. CAM-3 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	103
Şekil 7.98. CAM-3 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	103
Şekil 7.99. CAM-3 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	104
Şekil 7.100. CAM-3 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	104
Şekil 7.101. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	106
Şekil 7.102. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	106
Şekil 7.103. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	107

Şekil 7.104. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	107
Şekil 7.105. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	108
Şekil 7.106. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	108
Şekil 7.107. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	110
Şekil 7.108. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	110
Şekil 7.109. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	111
Şekil 7.110. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	111
Şekil 7.111. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	112
Şekil 7.112. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	112
Şekil 7.113. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	114
Şekil 7.114. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	114
Şekil 7.115. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	115
Şekil 7.116. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	115
Şekil 7.117. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	116
Şekil 7.118. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	116
Şekil 7.119. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	118
Şekil 7.120. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	118
Şekil 7.121. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	119
Şekil 7.122. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	119
Şekil 7.123. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.	120
Şekil 7.124. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.	120

Şekil 7.125. CAM-1 alaşımı ve CAM-1 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C sıcaklığında 1 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımlara ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrileri.....	122
Şekil 7.126. CAM-2 alaşımı ve CAM-2 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C sıcaklığında 1 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımlara ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrileri.....	123
Şekil 7.127. CAM-3 alaşımı ve CAM-3 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C sıcaklığında 1 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımlara ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrileri.....	124
Şekil 7.128. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-1 alaşımlarına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen Af – Ms sıcaklık farkında meydana gelen değişim.....	125
Şekil 7.129. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-2 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen Af – Ms sıcaklık farkında meydana gelen değişim.....	125
Şekil 7.130. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-3 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen Af – Ms sıcaklık farkında meydana gelen değişim.....	126
Şekil 7.131. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-1 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entalpi değerlerinde meydana gelen değişim.	126
Şekil 7.132. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-2 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entalpi değerlerinde meydana gelen değişim.	127
Şekil 7.133. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-3 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entalpi değerlerinde meydana gelen değişim.	127
Şekil 7.134. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-1 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entropi değerlerinde meydana gelen değişim.	128
Şekil 7.135. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-2 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entropi değerlerinde meydana gelen değişim.	128
Şekil 7.136. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-3 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entropi değerlerinde meydana gelen değişim.	129

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 3.1. Şimdiye kadar bulunan şekil hafızalı alaşımlar [28].	14
Tablo 5.1. Yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin dönüşüm sıcaklıkları üzerindeki değişimi [37]	23
Tablo 5.2. Cu-%14.1Al-%4.0Ni (%wt.) alaşımına ait yaşlandırma öncesi ve sonrası dönüşüm sıcaklıkları ile histerisisi [40].	25
Tablo 6.1. Cu-Al-Mn alaşımlarının kimyasal kompozisyonları.	29
Tablo 6.2. Numunelerin farklı sıcaklıklarda yaşlandırma işlemi	30
Tablo 7.1. CAM-1 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	33
Tablo 7.2. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	34
Tablo 7.3. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	35
Tablo 7.4. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	36
Tablo 7.5. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	37
Tablo 7.6. CAM-1, CAM-1 200 , CAM-1 300, CAM-1 400, CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarına ait X-ışınları analizlerinden elde edilen tane büyüklükleri.	38
Tablo 7.7. CAM-2 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	39
Tablo 7.8. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	40
Tablo 7.9. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	41
Tablo 7.10. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	42
Tablo 7.11. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	43
Tablo 7.12. CAM-2, CAM-2 200, CAM-2 300, CAM-2 400, CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarına ait X-ışınları analizlerinden elde edilen tane büyüklükleri.	44
Tablo 7.13. CAM-3 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	45
Tablo 7.14. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	46
Tablo 7.15. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	47
Tablo 7.16. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	48
Tablo 7.17. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.	49
Tablo 7.18. CAM-3, CAM-3 200, CAM-3 300, CAM-3 400, CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarına ait X-ışınları analizlerinden elde edilen tane büyüklükleri.	50
Tablo 7.19. CAM-1 numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	65
Tablo 7.20. CAM-1 200 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	69
Tablo 7.21. CAM-1 300 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	73

Tablo 7.22. CAM-1 400 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	77
Tablo 7.23. CAM-1 500 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	81
Tablo 7.24. CAM-2 numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	85
Tablo 7.25. CAM-2 200 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	89
Tablo 7.26. CAM-2 300 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	93
Tablo 7.27. CAM-2 400 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	97
Tablo 7.28. CAM-2 500 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	101
Tablo 7.29. CAM-3 numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	105
Tablo 7.30. CAM-3 200 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	109
Tablo 7.31. CAM-3 300 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	113
Tablo 7.32. CAM-3 400 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	117
Tablo 7.33. CAM-3 500 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.	121
Tablo 7. 34. Cam-1 Numunesine ait farklı yaşlandırma sıcaklıklarına bağlı 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları değişimi.	122
Tablo 7.35. Cam-2 numunesine ait farklı yaşlandırma sıcaklıklarına bağlı 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları değişimi.	123
Tablo 7.36. Cam-3 Numunesine ait farklı yaşlandırma sıcaklıklarına bağlı 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları değişimi.	124

SEMBOLLER LİSTESİ

- Af** : Martensit → austenit faz dönüşümünde austenit yapının tamamlandığı sıcaklık
- As** : Martensit → austenit faz dönüşümünde austenit yapının başlama sıcaklığı
- ao** : Austenit örgünün örgü parametreleri
- bcc** : Cisim merkezli kübik yapı
- bct** : Cisim merkezli tetragonal
- fcc** : Yüz merkezli kübik
- fct** : Yüzey merkezli tetragonal yapı
- hkl** : Kristal yapı düzlemlerini belirleyen indis sistemi (Miller indisi)
- Mf** : Austenit → martensit faz dönüşümünde austenit yapının tamamlandığı sıcaklık
- Ms** : Austenit → martensit faz dönüşümünde austenit yapının başlama sıcaklığı
- T** : Sıcaklık
- Tc** : Kritik sıcaklık
- T₀** : Austenit yapının termodinamik dengedeki sıcaklığı
- Tm** : Maksimum pik sıcaklığı
- β1** : DO3 türü ana faz yapısı (bcc)
- β2** : B2 türü ana faz yapısı (bcc)
- β1'** : 18R tipindeki martensit yapı
- β2'** : 9R tipindeki martensit yapı
- γ** : Çökelti fazı
- Δd** : Kristal yapıda düzlemler arası mesafe farkı
- θ** : Difraksiyon açısı
- ΔH_{M→A}** : Martensite-austenite entalpi değişimi
- ΔH_{A→M}** : Austenite-martensite entalpi değişimi
- ΔS_{M→A}** : Martensite-austenite entropi değişimi
- ΔS_{A→M}** : Austenite-martensite entropi değişimi
- DSC** : Diferansiyel tarama kalorimetres

1. GİRİŞ

Günümüzde metal ve metal alaşımları bakırın bulunmasından bu yana kullanılmaya başlanmış; gündelik yaşantımızdan sanayiye, ulaşımdan tıp alanına kadar birçok birimde gerekli ve ihtiyaç duyulan ana malzeme olma özelliğini göstermektedir. Bundan dolayı metal ve alaşımlarının gösterdiği özellikler keşfedildiği dönemden günümüze kadar araştırılmıştır [1].

Şekil hafızalı alaşımlarla alakalı çalışmalar 1930'lu yıllara kadar dayanmaktadır. Bu alaşımların keşfinin başlangıcı Chang ve Read'in 1932 yılında bulduğu Au-Cd alaşımı ile başlamaktadır. Sonrasında Au-Cd alaşımları geliştirilerek bu alaşımda bulunan özellikleri Arne Olander 1938 yılında Cu-Zn alaşımında gözlemlemiştir [2]. 1960'lı yıllara kadar şekil hafızalı alaşımlar önemli çalışmalara konu olmuştur. 1961 yılında W.J. Buehler ve arkadaşları ilk olarak Ni-Ti alaşımındaki şekil hafıza etkisini bir rastlantı sonucu bulmuştur. Aynı zamanda maliyetinin düşük olmasından dayanımı ve iyi bir şekil değiştirme özelliği, kolay üretilmesinden kaynaklı olarak da Cu-bazlı, Cu-Zn-Al ve Cu-Al-Ni alaşımları üzerinde çok fazla çalışılmıştır [3-5].

Şekil hatırlamalı alaşımlar plastik deformasyon öncesi şeklini hatırlayarak bu eşsiz özelliği ile kullanışlı akıllı malzemeler grubuna girmektedirler. Bilindik malzemeden yapılan şekil hatırlamalı alaşımlar çok farklı termomekanik davranış sergileyebilirler. Bunlardan Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar da pratik kullanımı ve yüksek geri kazanma gücü açısından da gelecek vaat eden alaşımlardandır. Cu bazlı alaşımlardan en bilinen 2 grup alaşım vardır; bunlar Cu-Al-Ni ve Cu-Zn-Al alaşımlarıdır. Bu alaşımlardan Cu-Zn-Al alaşımı Cu-Al-Ni alaşımından daha ucuzdur, fakat Cu-Al-Ni alaşımları çok daha iyi termal kararlılığa ve yüksek çalışma sıcaklığına sahiptirler. Son Yıllarda Cu bazlı alaşımlar içinde Mn içeren şekil hatırlamalı alaşımlar da önem kazanmaktadır. Mangan alaşımlarda mangan; işlenebilirliği ve çok amaçlı olarak alaşımın fonksiyonel özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir. Bununla birlikte Cu-Al-Ni-Mn alaşımından mangan dönüşüm sıcaklıklarında az da olsa düşürücü bir etki meydana getirmektedir. Aynı zamanda da Mangan içeren 3'lü alaşımlarda Mn süperelastikliği etkilemekte ve böylece Cu bazlı alaşımlarda arzu edilen dönüşüm sıcaklıkları elde edilebilmektedir. Ayrıca Kainuma ve arkadaşları düşük Al içerikli şekil hatırlamalı alaşımların mükemmel süneklilik gösterdiğini bulmuştur bunun sebebi ise alaşımın $L2_1$ ana faz düzeninde olmasından kaynaklandığı vurgulamıştır [6-8].

Yüksek mukavemet ve yüksek sönümleme kapasitesine sahip bir malzeme üretebilmek için mühendislik uygulamalarına ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yüksek mukavemet ve yüksek sönümleme kapasitesine sahip alaşımlar üretmek oldukça zordur. Bu özellikler yalnızca martensitik dönüşüm sergileyen alaşımlarda gözlemlenebilir. Bu nedenle bu amaca en uygun malzeme şekil hatırlamalı alaşımlardır. Uzun yıllar şekil hatırlamalı alaşımlar ve martensitik dönüşümler ile ilgili araştırmalar yapılmış ve iyi bilinen Ni-Ti, Cu bazlı ve Fe bazlı alaşımlarda şekil hatırlama etkisi ve martensitik dönüşüm incelenmiştir. Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar 1960'lı yıllarda geliştirilmiş ve basit üretimi, daha düşük maliyetleri göz önünde bulundurulduğunda Ni-Ti alaşımından daha iyi olduğu görülmüştür [8].

Şekil hafızalı alaşımların en bilindik özellikleri; belli bir sıcaklığın altında ve üzerinde birbirlerinden farklı kristal yapılara sahip olmalarıdır. Düşük sıcaklıklarda çeşitli işlemlerle alaşım deforme edildiğinde daha sonra bu malzemeler yüksek sıcaklığa çıkarıldığında alaşım eski halini alıyorsa yani deforme edilmeden önceki halini alıyorsa, işte bu şekil hafızalı alaşımların karakteristik özelliğini göstermektedir. Diğer bir özelliği ise bu alaşımlarda iki faz mevcuttur. Birisi yüksek sıcaklık fazı austenit faz diğeri ise düşük sıcaklık fazı martensit fazdır. Genellikle dönüşüm öncesi faz ana faz olarak adlandırılır ve ilk olarak Bain adlı bilim adamı, bu ana fazın dışarıdan çeşitli kuvvetler yani basınç, sıcaklık zor, zorlanma veya hepsinin birlikte uygulanması ile yeni faza yani martensitik faza geçtiğini göstermiştir [9].

Martensitik dönüşümlerin en önemli özelliği; birinci dereceden yapısal faz dönüşümü ve atomların ilk komşuluklarını koruyarak dönüşüm sonrasında da aynı komşu atomlara sahip olması ile difüzyonsuz gerçekleşen bir dönüşüm olmasıdır. Martensitik Dönüşümler iki farklı şekilde meydana gelmektedir;

- 1-) Termoelastik martensitik dönüşüm.
- 2-) Termoelelastik olmayan martensitik dönüşüm.

Bu iki dönüşüm arasında bir histerisis farkı vardır. Termoelelastik olmayan sönüşümlerde histerisis geniş ve dönüşüm yüzdesi oldukça azdır. Termoelastik martensitik dönüşümlerde dönüşüm histerisisi dar ve yüzdesi fazladır. Şekil hafızalı alaşımlarda dar histerisise ve büyüme kinetiklerine sahip olmalarından dolayı termoelastik martensitik dönüşüm sergileyen malzemelerdir. Bu malzemelerde numunenin sıcaklığı düşürülmeye başlandığında martensit başlama (M_s) sıcaklığında martensit yapılar oluşmaya başlamakta ve martensit bitiş (M_f) sıcaklığına gelindiğinde malzeme içinde tamamıyla martensit yapılar bulunmaktadır. Aynı şekilde numunenin sıcaklığını arttırdığımızda belirli bir austenit başlama

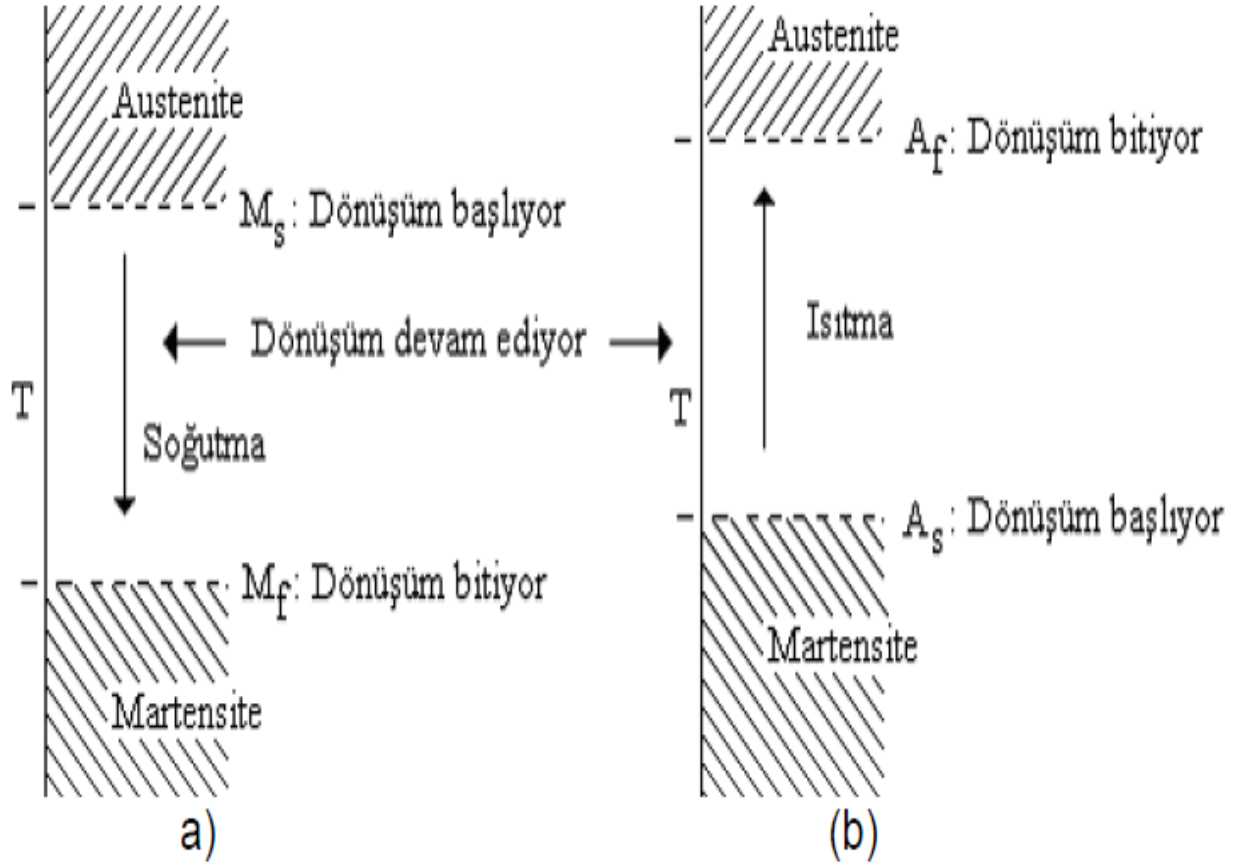
(A_s) sıcaklığına gelindiğinde numune ana faza geçmekte ve austenit bitiş (A_f) sıcaklığı ile de son bulmaktadır [10,11].

Cu bazlı şekil hatırlamalı alaşımlar ticari olarak büyük öneme sahiptir, fakat martensit faz kararlılığı ve ana faz yaşlanması şekil hatırlama özelliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil hatırlamalı alaşımlar genellikle termomekanik döngü ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında termal kararlılık problemlerinde ana faz yaşlanması bizim için kilit noktadır. Yaşlanma Cu bazlı alaşımlarda her zaman bir sorun teşkil etmektedir. Alaşım martensit ve yarı kararlı ana faz formunda ya da β faz, yaşlandırma işlemi ile kolaylıkla kararlı hale getirilebilir [12]. Yaşlandırmanın alaşımın mikroyapı ve fiziksel özellikleri üzerine önemli etkileri de söz konusudur. Lumley ve arkadaşları Al-Cu-Mg-Ag alaşımını yaşlandırmış ve yoğun bir yaşlandırma işlemine maruz bırakılmasından sonra alaşımın kayma direncinin arttığı önemli ölçüde belirlemiştir [13]. Cu-Al-Mn alaşımında austenit fazda yaşlanmaya maruz kalan bir numune içerisinde çökeltiler oluşmaktadır. Karakteristik sıcaklıklar ve martensit dönüşüm histerisisi çökeltilerin boyutu ve sayısına göre değişebilmektedir [14].

Bu çalışmada atomikçe Cu-%23,01 Al- %4,34 Mn, Cu-%26,56 Al- %3,06 Mn ve Cu-%27,96 Al- %4,60 Mn kompozisyonlu şekil hatırlamalı 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.

2. MARTENSİTİK DÖNÜŞÜMLER

İlk defa martensitik dönüşümleri Alman bilim adamı A. Martens bulduğu için dönüşüm bu bilim adamının adıyla bilinir. Martensitik dönüşüm, belli bir kristal yapıda bulunan numuneye dışarıdan herhangi bir etki ile zor, zorlanma, basınç, sıcaklık ya da bunların farklı şekillerde uygulanması ile numunenin kendi enerji seviyesindeki kristal yapısından daha düşük enerji seviyeli bir kristal yapıya dönüşmesi olayıdır. Yüksek sıcaklıklarda numuneler ana faz denilen bir fazdadırlar ve bu fazın diğer adı ise “austenit” faz olarak da adlandırılmaktadır. Düşük sıcaklık fazına ise ürün faz bir diğer adı ise “martensit” faz olarak adlandırılmaktadır. Yüksek sıcaklıktaki numunenin kristal yapısı belli bir T_0 sıcaklığında termodinamik olarak denge halindedir. Austenit kristal yapıya sahip numune T_0 denge sıcaklığından itibaren hızlı bir şekilde sıcaklık düşürülürse kritik bir sıcaklık değerinden sonra austenit kristal yapı içerisinde martensit yapılar oluşmaya başlar. Martensit yapıların oluşmaya başladığı sıcaklığa (M_s), martensit başlama sıcaklığı denir. Bu sıcaklık ile martensit yapılar oluşur ve numune içinde martensit yapıya dönüşebilecek yapılar tamamen dönüşür ve martensit oluşumu biter bu bitiş sıcaklığına ise (M_f), martensit bitiş sıcaklığı denir. Aynı şekilde bunun tam terside şekil 2.1. de görüldüğü gibi mümkündür. Yani martensit haldeki bir numunede sıcaklık arttırıldığında belirli bir kritik sıcaklığa gelindiğinde martensit haldeki numne içinde austenit yapılar oluşmaya başlar ve bu başlama sıcaklığına (A_s), austenit başlama sıcaklığı denir. Martensit halden austenit hale dönüşmeye başlayan numune içinde martensit yapılar tamamıyla austenit yapı haline geldiği sıcaklığa ise (A_f), austenit bitiş sıcaklığı denir. Bu (A_s , A_f , M_s , M_f) dönüşüm sıcaklıkları farklı alaşımlar için farklı değerlere sahiptir [15].



Şekil 2.1. Austenit - Martensit yapıları arasındaki **(a)** Austenit $\rightarrow$ Martensit Dönüşüm, **(b)** Martenit $\rightarrow$ Austenit Dönüşüm [15].

2.1. Termoelastik Martensitik Dönüşümler

Alaşım sistemine göre iki farklı martensitik dönüşüm vardır. Bu dönüşümler sıcaklığın etkisi ile meydana gelen martensitik dönüşümlerdir;

- 1-) Atermal martensitik dönüşüm,
- 2-) İzotermal martensitik dönüşüm.

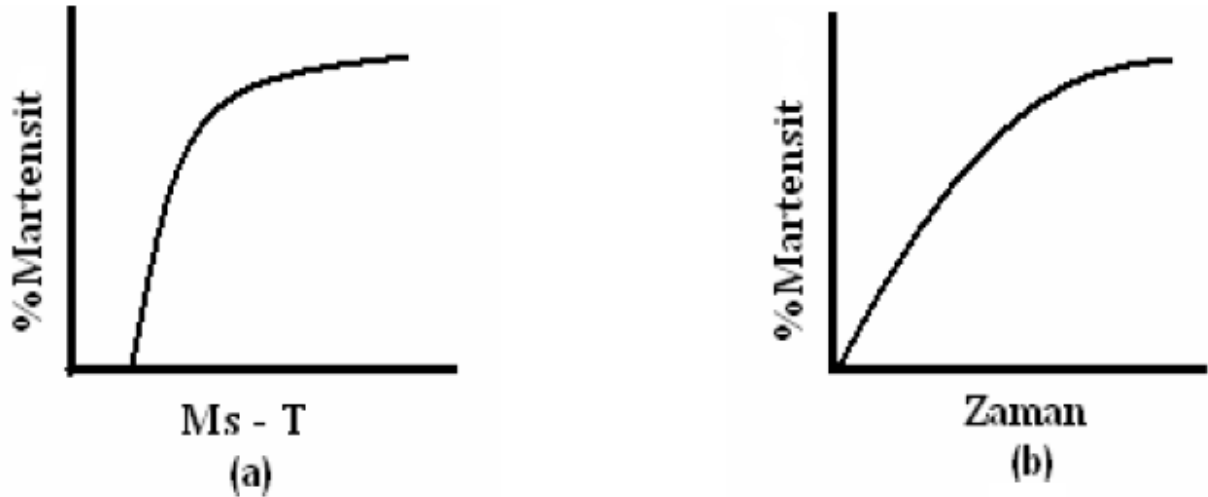
Numunenin geçireceği martensitik dönüşüm çeşidi alaşımın kimyasal bileşimine bağlı değildir. Bundan dolayıdır ki aynı numune içerisinde her iki dönüşümde gerçekleşebilir. Aynı zamanda izotermal ve atermal martensitik dönüşümlerin dönüşüm sıcaklıkları ve dönüşüm sonrasında oluşan yapıları tamamı ile birbirlerinden farklıdır [16]

2.1.1. Atermal Martensitik Dönüşümler

Bu dönüşümde; ana fazdaki numunede sıcaklık düşürülerek M_s sıcaklığına gelindiğinde austenitin içerisinde martensit yapılar oluşmaya başlar. Bu dönüşüm devam eder ve ta ki M_f sıcaklığına kadar. Sıcaklık M_f sıcaklığına geldiğinde alaşımda martensit yapıya dönüşecek numunenin tamamı dönüşmüş olur ve dönüşüm tamamlanır. Dönüşüm çok hızlı ve ani bir şekilde patlama reaksiyonları şeklinde meydana geldiğinden bu tip martensitik dönüşümlerde şekil hatırlama olayı gözlenmez [17].

2.1.2. İzotermal Martensitik Dönüşümler

İzotermal martensitik dönüşümlerde ise austenit haldeki numunede sıcaklık düşürülmesi sonucunda bir kritik M_s sıcaklığına ulaşıldığında austenit yapıdaki numune içinde martensit yapılar oluşmaya başlar. M_f sıcaklığına kadar bu dönüşüm devam eder ve M_f sıcaklığına gelindiğinde numune içerisindeki austenit yapı tamamıyla martensit yapıya dönüşmüştür. Bu dönüşüm tersinirdir. Sıcaklık arttırılırsa matensit plakalar kaybolmaya başlar. Bu defa da martensit haldeki numune içerisinde A_s sıcaklığına gelindiğinde austenit yapılar oluşmaya başlar, A_f sıcaklığına gelindiğinde ise numune içerisinde sadece austenit yapılar mevcuttur ve böylece dönüşüm tamamlanır [18].



Şekil 2.2. Martensit yapıların oluşum yüzdesinin sıcaklık ve zamana bağlı değişimi; **(a)** Atermal Dönüşüm. **(b)** İzotermal Dönüşüm [15].

2.2. Martensitik Dönüşümlerin Karakteristiği

Alaşımalar termodinamik ve kristal özellikleri açısından birbirlerinden farklı olabilmektedir. Faz dönüşümleri sıcaklık değişimi, zor zorlanma ya da hepsinin birlikte uygulanması ile de gerçekleşebilmektedir. Alaşımalar faz dönüşümü geçirirken kristal yapıları da değişime uğrar. Kristal yapıları oluşturan atomların komşulukları dönüşüm sonrası yerlerini değiştiriyorsa oluşan bu dönüşüm “difüzyonlu faz dönüşümü”, eğer dönüşüm sonrasında kristal yapıları meydana getiren atomların komşulukları aynı kalıyorsa “difüzyonsuz faz dönüşümü” olarak adlandırılır. Martensitik dönüşümlerde kristal yapı içerisindeki atomlar komşuluklarını koruyarak ve birlikte hareket ettikleri için difüzyonsuz faz dönüşümü sergilerler [19].

2.2.1. Zamana Bağımlılık

Martensitik dönüşüm zamandan bağımsızdır. Sabit sıcaklıkta Orijinal fazın bir kısmı çok hızlı bir şekilde değişir. Bu martensitik dönüşümlerin birincil özelliğidir. Martensitik dönüşümün reaksiyonları izotermik olarak gerçekleşmektedir [20].

2.2.2. Sıcaklığa Bağımlılık

Dönüşüm, tanecik boyutu gibi diğer değişkenler sabit tutulmak koşulu ile karakteristik sıcaklığa bağlıdır. Dönüşüm hızı ise genellikle çok hızlı ve sıcaklıktan bağımsızdır. Soğuma hızı malzemenin kimyasal kompozisyonu ve aynı zamanda da bir ölçüde tane büyüklüğüne bağlıdır [20].

2.2.3. Dönüşümün Tersinirliği

Martensitik reaksiyonlar ilk atomik konfigürasyon içerisinde tekrar tekrar ortaya çıktığında tersine çevrilebilir. Soğuma sırasında oluşan martensit yapılar ısıtma işlemi ile kristalografik olarak tersinir özellik gösterir [20].

2.2.4. Uygulanan Gerilmenin Etkisi

Uygulanan gerilmenin aynı zamanda da M_s sıcaklığı üzerinde etkileri mevcuttur. M_s sıcaklığının altında herhangi bir değerde uygulanan plastik deformasyon martensit miktarı ve kararlı olmayan fazın deformasyonunu artırır. Gerilme M_s sıcaklığının azalmasına sebep olur ve bu durum da çekirdekli büyüyen martensite neden olur [17,20].

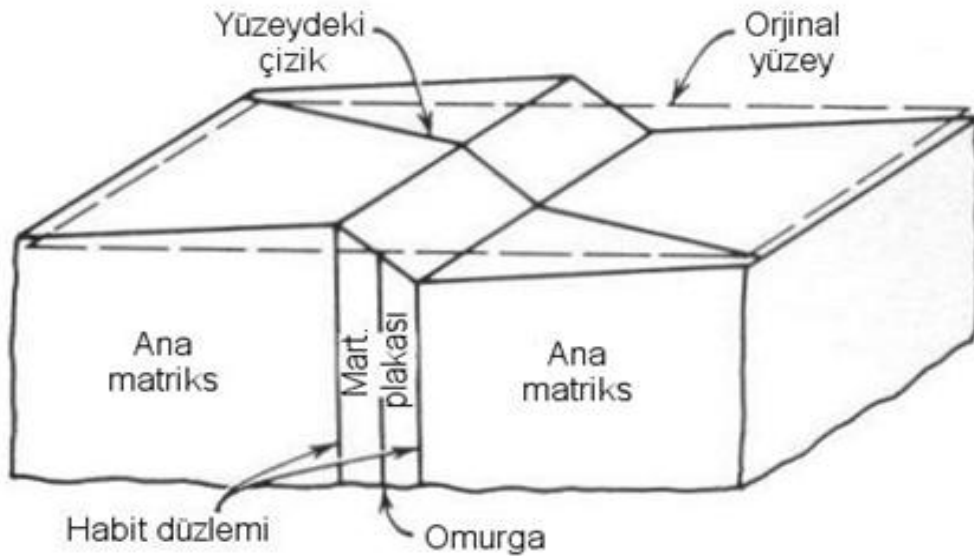
2.2.5. Yönlenme İlişkisi

Martensit reaksiyonlar dönüşüm öncesi komşuluklarını dönüşüm sonrası da koruduğundan ana faz ile ürün faz arasında değişmeden kalan düzlemler bulunur [20].

2.2.6. Kararlılık

Numune dönüşüm sıcaklığı aralığındaki bir sıcaklığa soğutulup ve bu sıcaklıkta belli bir süre bekletildikten sonra tekrar soğutulursa dönüşüm hemen başlamaz. Sonraki tüm sıcaklıklarda dönüşüm miktarı, doğrudan soğutma ile üretilen dönüşüm miktarından daha azdır. Bu olguya “Kararlılık” adı verilmektedir. Numune belirli bir sıcaklıkta tutulduğunda kararlılık zamanla artar [20]. Martensitik dönüşümlerin karakteristik özellikleri şu şekilde özetlenebilir;

- Dönüşümde numune içerisindeki kristal yapılarda örgü kusurları meydana gelir.
- Martensit faz ara bir katı çözelti halindedir.
- Austenit ve martensit fazları arasında sınırlı bir dönme şekli mevcuttur.
- Martensitik dönüşümde ana faz ile ürün faz belirli bir yerleşim şekline sahiptir ve değişmeden kalan aynı zamanda da martensit faz ile austenit fazı birbirinden ayıran düzlem vardır. Bu düzleme Şekil 2.3. deki gibi “habit plane” yerleşme düzlemi denir.
- Sıcaklığın azalması ile hızlı bir hacim dönüşümü vardır.
- Ana fazdaki numunenin yüzeyi düzeltilip parlatıldıktan sonra sıcaklığı düşürülürse yüzeyde çizikler meydana gelir meydana gelen çiziklerin diğer bir adı bozulma çizgisidir. Bu bozulma çizgisi şekil değişikliğinden kaynaklanır ve şekil hatırlama olayında önemli rol oynar [16,21].



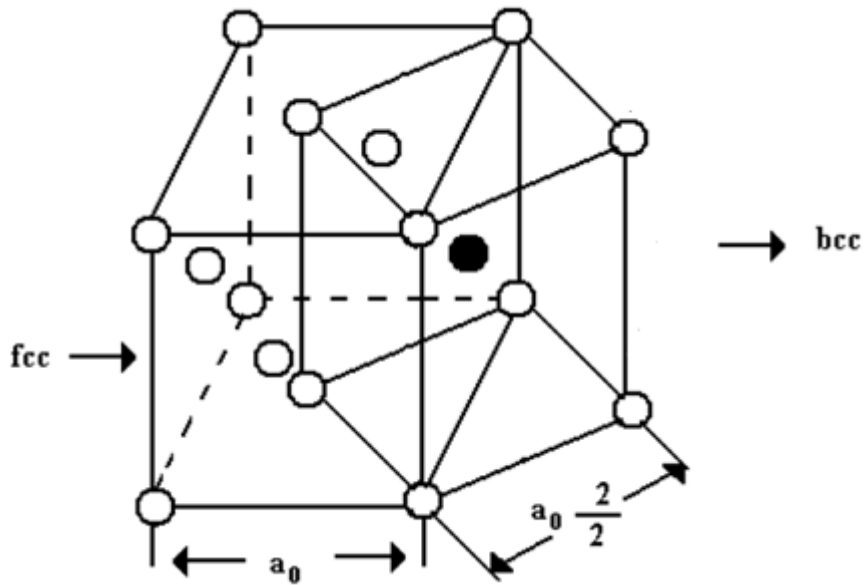
Şekil 2.3. Martensit dönüşüm sonrası martensit faz ile austenit faz arasındaki düzlem şekli [16, 21].

Martensitik dönüşümler 3 tür fiziksel etki ile oluşmaktadırlar.

- i. Soğuma ile oluşan martensitler yalnızca sıcaklığın etkisi ile oluşan martensitik dönüşümler
- ii. Martensit başlama sıcaklığının hemen altında elastik sınırı aşmayan zor uygulanıp, soğuma ile meydana gelen martensitik dönüşümler.
- iii. Martensit başlama sıcaklığı üzerinde zorlanma uygulanarak oluşan martensitik dönüşümler [9].

2.3. Martensitik Dönüşümlerin Kristalografik Özellikleri

Martensitik dönüşüm katı içinde çok kısa bir zaman diliminde çok hızlı gerçekleştiğinden oluşum sırasında gözlenemez. Gözlenemediği için numune içerisindeki kristal yapıların anlaşılması da dönüşüm öncesi ve dönüşüm sonrası kristalografik yapılara bakılarak araştırılır. Bu dönüşümün ilk kristalografik özellikleri Bain tarafından incelenmiştir. Bain kendine ait oluşturduğu bir modelde f.c.c $\rightarrow$ b.c.c geçişlerini anlatabilmek için numune içindeki kristal örgünün dönüşüm sırasında deformasyona uğradığını ileri sürmüştür. Bain bu modelinde f.c.c. yapıya sahip bir kristal örgünün atomlar arası komşuluklarını değiştirmeden sadece atomların birbirleri arasındaki mesafesinin değişmesi ile b.c.c. veya b.c.t yapıya dönüşebileceğini savunmuştur [22].



Şekil 2.4. Bain modeline göre f.c.c. yapının küçük şekil değişimleri ile b.c.c. (hacim merkezli kübik) yapıya dönüşmesi [17].

2.4. Martesitik Dönüşümün Termodinamiği

(T_0-M_s) sıcaklık farkı bir kimyasal serbest enerji açığa çıkarır. Kimyasal serbest enerji sıcaklık ve basınçtan etkilenir. Belirli bir T_0 denge sıcaklığında austenit martensit fazları arasında kimyasal serbest enerjiler eşittir. Eğer numune sıcaklığı bu denge sıcaklığından daha düşük değerlere soğutulursa bir sürücü kuvvet meydana gelir. Bu sürücü kuvvet dönüşümün olabilmesi için önemli bir faktördür. Numuneye dışarıdan zor uygulanarak serbest enerjiyi ortaya çıkararak dönüşüm sağlanabilir. Aynı zamanda da bu zor M_s sıcaklığını, dönüşen hacim miktarını artırır. Bu durumda sabit basınç altında hacim değiştirilecek olursa, termodinamik yasalarına (1. Kanun) göre enerjilerinde de bir değişim söz konusu olur [15,17,21]. Bu enerji değişimi de şu şekildedir;

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \Delta Q - P (V_2 - V_1) \quad [2.1]$$

Enerji değişimini sistemin ısı değişimi cinsinden yazacak olursak;

$$\Delta Q = (E_2 + P V_2) - (E_1 + P V_1) \quad [2.2]$$

olur.

Genel olarak $(E + P V)$ terimine burada “Entalpi” adı verilip, “H” ile gösterilmektedir.

$$H = E + P V \quad [2.3]$$

[2.3] denklemi [2.2] denkleminde yerine yazılırsa sıcaklığın entalpiye bağlı olarak bir değeri ortaya çıkar.

$$\Delta Q = H_2 - H_1 \quad [2.4]$$

olur.

Eğer entalpi ifadesinin türevi alınırsa entropi değeri bulunur. [2.3] türevi alınırsa;

$$\Delta H = \Delta E + P \Delta V \quad [2.5]$$

Buradan termodinamiğin 1. Kanunu uygulanırsa;

$$\Delta E = \Delta Q - P \Delta V \quad [2.6]$$

$$\Delta H = \Delta Q \quad [2.7]$$

olur.

Düzensizlik “Entropi” adını alır. “S” ile gösterilir. Sabit basınçtaki durumu;

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T} = \frac{\Delta H}{T} \quad [2.8]$$

Prado ve arkadaşları bu genel ifadeyi;

$$\Delta S_{M \rightarrow A} = \frac{\Delta H_{M \rightarrow A}}{T_0} \quad [2.9]$$

Şeklinde ifade etmiştir. Buradaki T_0 denge sıcaklığıdır ve bu denge sıcaklığına bağlı olarak iki görüş vardır. Bunlar;

1-) Salzbrenner ve Cohen tarafından öne sürülen denge sıcaklığı;

$$T_0 = \frac{1}{2} (M_s + A_s) \quad [3.0]$$

2-) Tang ve Wayman tarafından öne sürülen denge sıcaklığı;

$$T_0 = \frac{1}{2}(A_f + M_s) \quad [3.1]$$

Fazlar arasında geçişin gerçekleşebilmesi, kararsız fazdan daha kararlı faza geçiş ile mümkündür Sabit basınç ve sabit sıcaklıkta sistem için kararlılık;

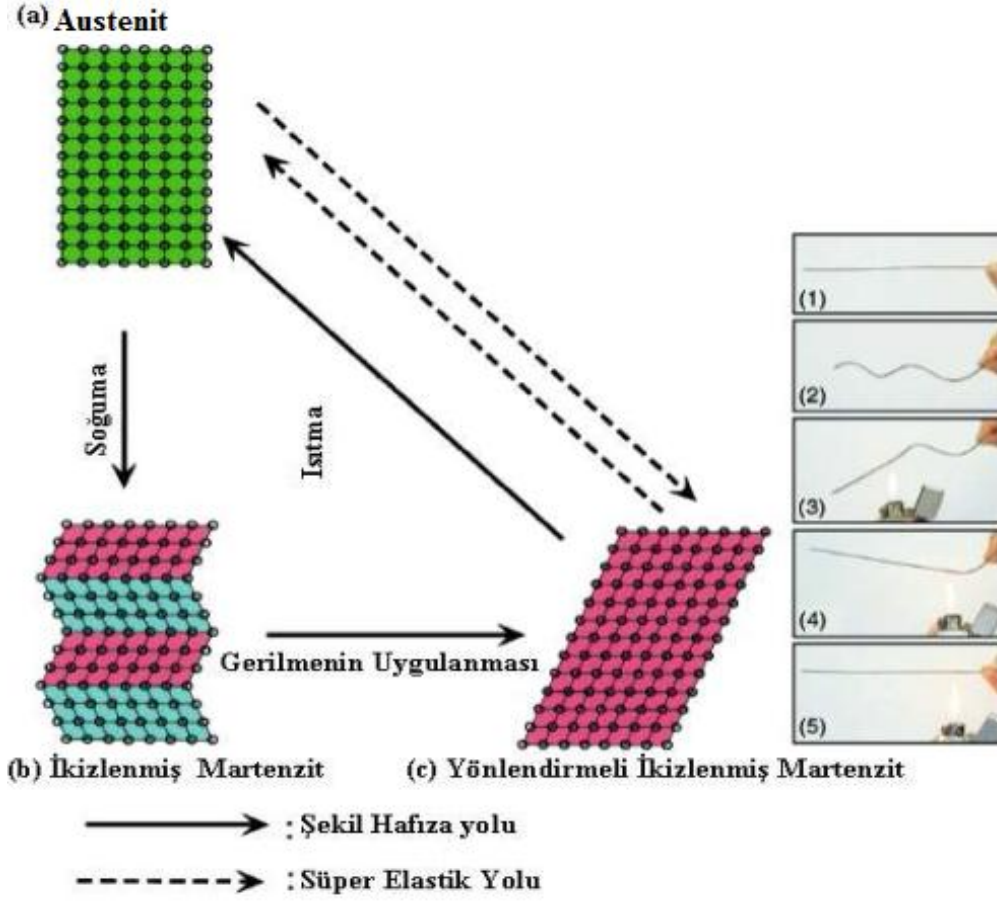
$$G = H - T \Delta S \quad [3.2]$$

olur. G: Gibbs serbest enerjisi

Bir sistemin kararlı olup olmadığı enerjisi ile bilinebilir. Sistemin sahip olduğu şartlar değiştirildiğinde, buna bağlı atomların enerjisi, bundan sebeple hareket enerjisi de değişti için denge yapıları da değişmektedir. Sistem her zaman az enerjili bir duruma gelip daha kararlı hale gelme eğilimi içerisinde. Sistem bu kararlı hale gelirken de faz dönüşümü gerçekleşir. Sabit basınç ve sabit sıcaklıkta sistemin kararlılığı Gibbs serbest enerjisi ile ölçülür [9,15,17,21].

3. ŞEKİL HATIRLAMA OLAYI

Şekil hafızalı alaşım ifadesi; herhangi bir ısı altında alaşımın önceki şeklini veya önceki boyutunu kazanabilme yeteneğine sahip olan malzemeler için kullanılan genel bir ifadedir. Şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit haldeki numuneyi deforme edebilmek çok kolaydır. Deforme edilen bu numune austenit dönüşüm sıcaklığı üzerinde ısıtıldığında önceki şeklini hatırlayabiliyorsa bu özelliği nedeniyle şekil hafızalı alaşım ismini almaktadır [23]. Şekil hafızalı alaşımlar genellikle termoelestatik martensitik dönüşüm sergilerler. Martensit halde numune ikizlenme ve kayma mekanizması ile deforme edilebilir. Deforme edilen numune ısıtılıp deformasyon yok edilir ve şekil 3.1 de gösterildiği gibi eski haline döner [24].



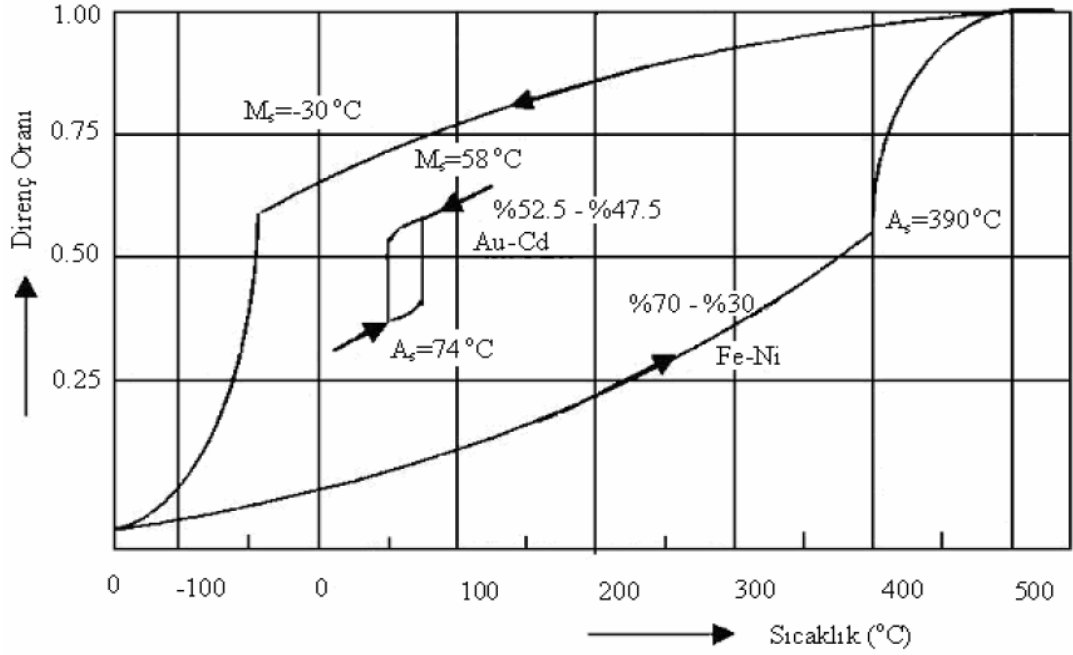
Şekil 3.1. Şekil hafızalı alaşımların hal değişimleri [24].

Şekil hafıza etkisi, kristalografik olarak tersinir dönüşüm ve difüzyon özelliği gösteren bazı alaşımlarda gözlenmektedir [25]. Şekil hafızalı alaşımlara örnek olarak; Cu bazlı şekil hafızalı alaşımlar, demir bazlı şekil hafızalı alaşımlar, Ni-Ti alaşımları, şekil hafızalı polimerler, şekil hafızalı seramikler verilebilir. Bu alaşımlar içinde en önemlileri iyi biyo-uyumlulukları, korozyon ve mekanik özelliklerinden dolayı Ni-Ti alaşımlarıdır [26]. Araştırmalarda şimdiye kadar birçok şekil hafızalı alaşım bulunmuştur. Bulunan bu şekil hafızalı alaşımlar tablo 3.1 de gösterilmektedir [27].

Tablo 3.1. Şimdiye kadar bulunan şekil hafızalı alaşımlar [28].

ALAŞIM	KİMYASAL BİLEŞİM	DÖNÜŞÜM SICAKLIK ARALIĞI (°C)	YAKLAŞIK DÖNÜŞÜM HİSTERİZİSİ (°C)
Ag-Cd	44-49 %Cd	-190~-50	15
Au-Cd	46.5-50 %Cd	30~100	15
Cu-Al-Ni	14-14.5 %Al	-140~100	35
	3-4.5 %Ni		
Cu-Sn	yaklaşık 15 %Sn	-120~30	-
Cu-Zn	38.5-41.5 %Zn	-180~-10	10
Cu-Zn-X(X= Si,Sn,Al)	az %X	-180~200	10
In-Ti	18-23 %Ti	60~100	4
Ni-Al	36-38 %Al	-180~100	10
Ni-Ti	49-51 %Ni	-50~110	30
Fe-Pt	yaklaşık 25 %Pt	yak.-130	4
Mn-Cu	5-35 %Cu	-250~180	25
Fe-Mn-Si	32 %Mn, 6 %Si	-200~150	100

Martensit $\leftrightarrow$ Austenit dönüşüm çoğu zaman dar bir sıcaklık aralığında meydana gelmektedir. Bu dönüşüm süresince ısıtma ve soğutma sıcaklıkları arasındaki fark histerisis olarak adlandırılmaktadır ve tablo 3.1 de ki gibi aynı zamanda da bu histerisis alaşım sistemine de bağlıdır. Buradaki histerisis aralığı çok önemlidir. Çünkü numunenin iyi bir dönüşüm sergileyip sergilemeyeceği bu histerisise bakılarak anlaşılabilir. Histerisis eğrisi dar ise yani ısıtma ve soğutma sıcaklıkları arasındaki fark ne kadar az ise numune o kadar iyi, bu histerisis eğrisi ne kadar geniş ise numunenin de şekil hatırlama özelliği de o kadar kötüdür. Şekil 3.2 de FeNi ve AuCd alaşımlarına ait histerisisler gösterilmiştir. Şekil hatırlamalı malzemelerde şekil hatırlama olayı tek yönlü şekil hatırlama olayı ve çift yönlü şekil hatırlama olayı olarak iki şekilde gerçekleşir [29].



Şekil 3.2. FeNi (termoelastik olmayan) ve AuCd (termoelastik olan) alaşımlarında ısıtma ve soğutma sıcaklıkları arasındaki farkın histeresis eğrileri [29].

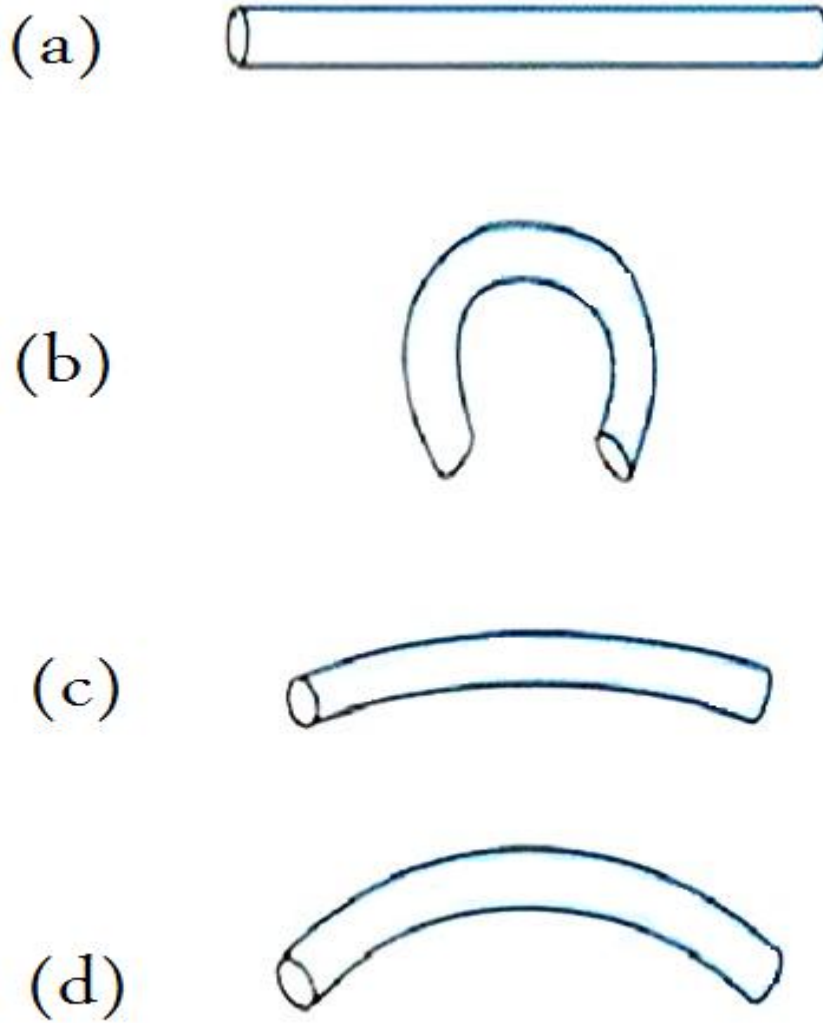
3.1. Tek Yönlü (Tersinmez) Şekil Hatırlama Olayı

Alaşımında $T < M_f$ yani martensit başlama sıcaklığı altındaki bir sıcaklıkta deformasyon meydana getirilince, uygulanan zorun ortadan kaldırılmasıyla numune eski orijinal şekline geri dönemez. Isıtma ile numunedeki zor, sıcaklık belli bir kritik sıcaklıktan daha yüksek değerlere yükseltilmeye başlandığında aşamalı olarak geri gelir. Sıcaklığın tekrar düşürülmesi ile numune deforme olmuş haldeki şeklini hatırlayamaz [29]. Tek yönlü şekil hatırlama olayının gözlemlendiği birçok alaşım vardır. Bunlardan bazıları; NiTi, TiNb, NiAl, FePt, CuZnSi, CuZnSn, FeMnC alaşımlarıdır [30].



Şekil 3.3. (a) Numunenin martensit hali, (b) $T \leq M_f$ sıcaklığında deformasyon hali, (c) Isıtma işlemi (austenit hal), (d) $T \leq M_f$ sıcaklığında soğutma işlemi [31].

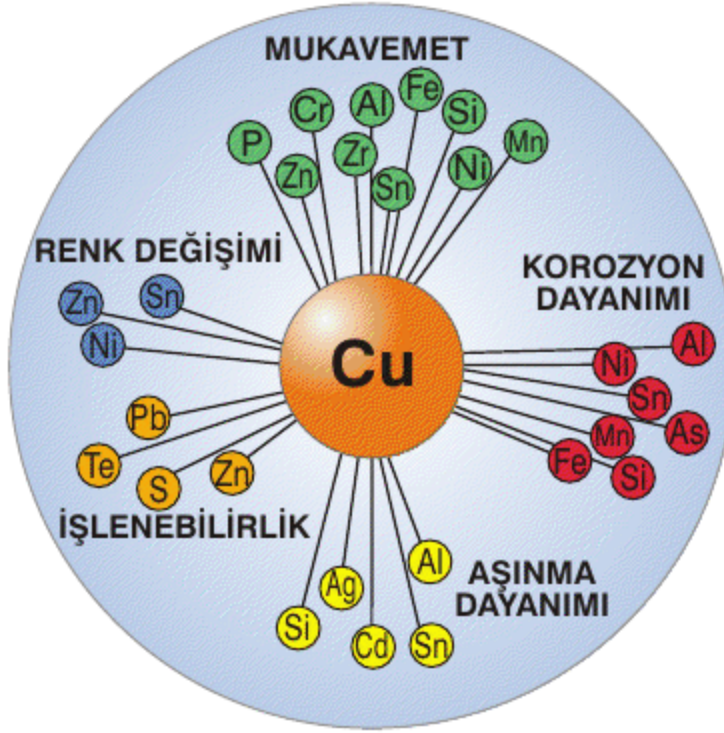
3.2. Çift Yönlü (Tersinir) Şekil Hatırlama Olayı



Şekil 3.4. (a) Numunenin martensit hali, (b) Deforme edilmiş martensit, (c) Isıtma işlemi uygulanmış, (d) Soğutulmaya tabi tutulmuş [31].

Çift yönlü şekil hatırlama olayında $T < M_f$ sıcaklığında martensit haldeki numuneye dışarıdan herhangi bir zor uygulanarak şekil verilip deforme edilir. Uygulanan bu deformasyondan sonra numuneye dışarıdan uygulanan zor kaldırılırsa numune deforme edilmiş halde kalır. Daha sonra deforme halindeki numune ısıtmaya başlandığında $T > A_f$ sıcaklığında üzerindeki plastik deformasyon yok olmaya başlar ve numune orijinal şeklini alır. Tekrar sıcaklık düşürülüp $T < M_f$ sıcaklığına gelindiğinde numune deforme edilmiş şeklini alır. Böylece çift yönlü şekil hatırlama olayı gerçekleşmiş olur [32].

4. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİLERİ



Şekil 4.1. Alaşım element etkilerinin etkileri [33].

Şekil 4.1 de gösterilen saf bakıra ilave edilen alaşım elementlerinin sağlayacağı özellikler aşağıdaki gruplara ayrılabilir.

4.1. Korozyon Dayanımı Arttırıcı Alaşım Elementleri

- Nikel (Ni)
- Arsenik (As)
- Alüminyum (Al)
- Demir (Fe)
- Kalay (Sn)
- Silisyum (Si)
- Manganez (Mn)

4.2. Aşınma Dayanımını Arttırıcı Alaşım Elementleri

- Alüminyum (Al)
- Kalay (Sn)
- Gümüş (Ag)

- Berilyum (Be)
- Silisyum (Si)
- Kobalt (Co)
- Kadmiyum (Cd)

4.3. Mukavemet Arttırıcı Alaşım Elementleri

- Krom (Cr)
- Silisyum (Si)
- Kalay (Sn)
- Alüminyum (Al)
- Manganez (Mn)
- Nikel (Ni)
- Fosfor (P)
- Çinko (Zn)
- Berilyum (Be)
- Demir (Fe)
- Zirkonyum (Zr)
- Kobalt (Co)

4.4. Renk Değiştirici Alaşım Elementleri

- Çinko (Zn)
- Nikel (Ni)
- Kalay (Sn)

4.5. İşlenebilirliği Arttırıcı Alaşım Elementleri

- Tellür (Te)
- Kükürt (S)
- Kurşun (Pb)
- Çinko (Zn)

Endüstriyel alanda kullanılan bakır, plastik şekil verilebilir olmasının yanı sıra elektrik ve ısıl iletkenlik özelliğinden dolayı da ön plana çıkmaktadır. Bunlardan dolayı bakır;

- a) Hediyeelik eşya kullanımında işlenebilirliğinden dolayı,

- b) Kablo üretiminde elektrik iletkenliğinden dolayı,
- c) Isıtma/soğutma işlemlerinde de ısı iletkenliğinden dolayı yaygın olarak kullanım alanı bulmaktadır [33].

Isı ve elektrik iletkenliği açısından bakırla alüminyum kıyaslandığında alüminyumun bakıra göre daha düşük olduğu görülmektedir. Fakat alüminyumun kendine özel ısı iletkenliği (ısı iletkenliği / yoğunluk) ve spesifik elektrik iletkenliği (elektrik iletkenliği / yoğunluk) değerleri karşılaştırıldığında bakıra göre daha iyi olduğu görülmektedir. Alüminyumun bu özelliklerinden dolayı hava akım hatlarında kullanılmaktadır ayrıca maliyeti bakımından da alüminyum bakırdan daha az maliyete sahiptir. Yüzeyleri oksit tabakası ile kaplanarak alüminyum alaşımları pek çok korozyon ortam şartlarında, sıcak ve soğuk şekil verilebilme özelliğinden kaynaklı olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarını kimyasal fiziksel ve mekanik özellikleri alaşım sistemin bileşimi veya mikro yapısına bağlı olarak değişebilmekte, alüminyuma katılan elementlerden bazıları ise bakır, mangan, silisyum, magnezyum ve çinko dur [34].

4.6. Katkı Elementlerinin Bakıra Etkileri

a. Alüminyum: Bakırın içinde %8 oranına kadar çözünür. Alüminyumca zengin bir bileşik oluşabilmesi için oranını %12 ye çıkarmak gerekir. Eğer bileşik içerisinde alüminyum fazla ise bu alaşımı sert ve kırılgan olmasına ve aynı zamanda da akıcılığın azalmasına sebep olur.

b. Mangan: Bronzlara mangan eklendiğinde sertlik ve basınç dayanımının arttığı gözlemlenir. Alaşımlarda ergime derecesi azaltarak gazların rahatça çıkışını sağlar. Bakırın sığağa karşı olan dayanımını yükseltirken tane inceltmede de rol oynar.

c. Nikel: Mangan gibi nikel elementi de tane inceltme etkisine sahiptir. Aynı zamanda da alaşımın hem mekanik hem de korozyon direncini artırır.

d. Çinko: Manganda olduğu gibi alaşımın ergime sıcaklığını düşürür akıcılığı artırır. Bakıra eklendiğinde sertliğini ve dayanımını artırır. Bu alaşım elementinin oranının artması rengi sarıya doğru döndürür.

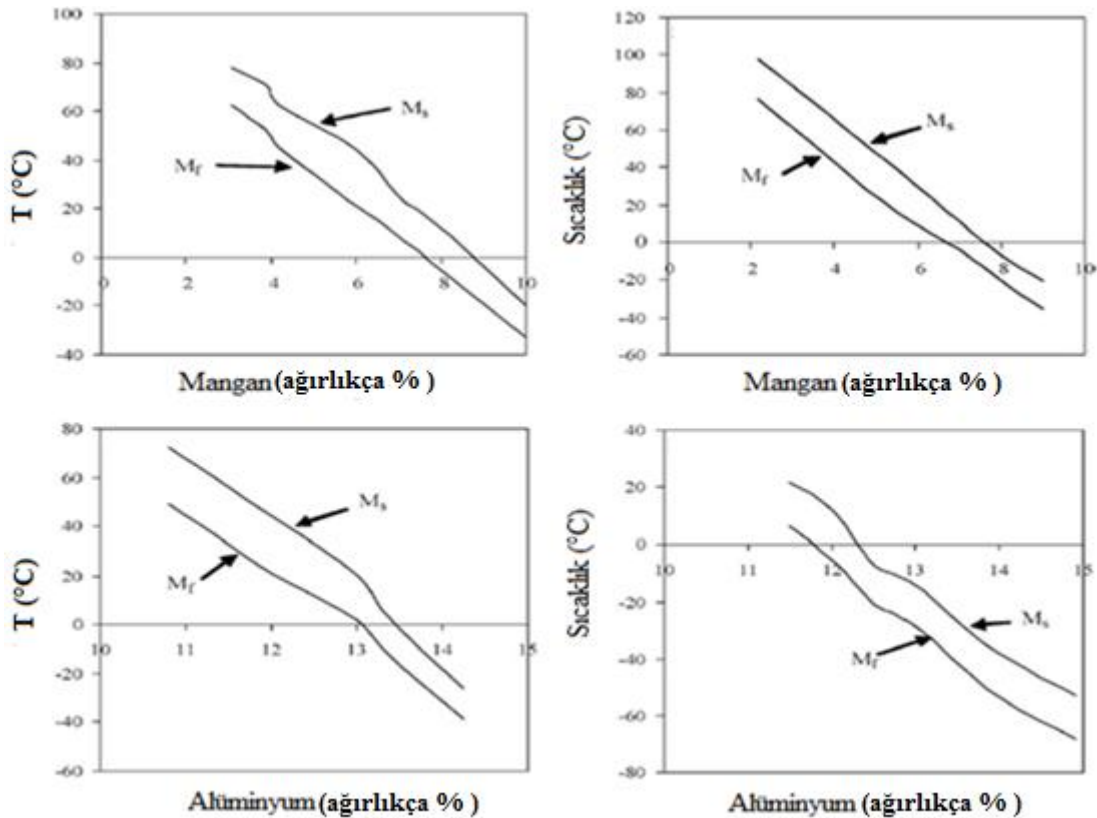
e. Kalay: Bakırın içinde %13 oranında bulunabilir ve katı eriyik halindedir. Dayanım ve dökülebilme özelliği üzerine etkisi mevcuttur. Alaşımda akıcılığı artırır ve eğime derecesini düşürür.

f. Fosfor: Alaşımda sert ve kırılgan yapı üzerine etkisi olup oksit giderici olarak da kullanılır.

g. Silisyum: Fosfor gibi silisyum da alaşımda oksit giderici olarak kullanılmaktadır. Bakıra eklenmesinin sebebi döküm özellikleri ve mekanik özellikleri iyileştirmek içindir. Bakıra %10 oranında eklenerek yaygın olarak kullanılan “Bakır Silisyum” alaşımlarını oluştururlar.

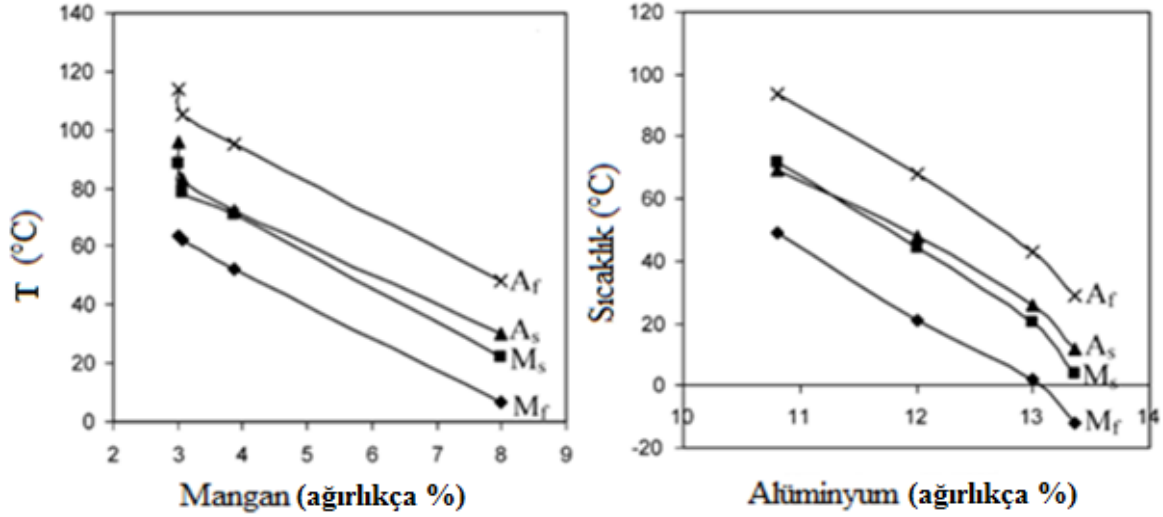
h. Demir: Bakır ve alüminyum demiri çözer ve alaşımların mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılır [35].

Yapılan bazı çalışmaları incelediğimiz zaman, alaşımların oranlarına bakılarak alüminyum ve manganezin dönüşüm sıcaklıklarını nasıl etkilediğini görebiliriz. Alaşımların alüminyum konsantrasyonu sabit, mangan konsantrasyonunun artmasıyla, alaşımların dönüşüm sıcaklıklarına bakıldığında; A_f , A_s , M_f , M_s sıcaklıklarının azaldığı görülmektedir. Aynı zamanda da mangan konsantrasyonu sabit tutulup alüminyum konsantrasyonu artırıldığında dönüşüm sıcaklıklarında da azalma görülmektedir. Dönüşüm sıcaklıklarının azalmasında alüminyum manganeden daha etkindir. Çünkü Mn konsantrasyonu sabit tutulup %1 Al konsantrasyonu artmasına karşılık M_f sıcaklığında 21 °C azalma, Al konsantrasyonu sabit tutulup %1 Mn konsantrasyonu artmasına karşılık M_f sıcaklığında 13 °C azalma gözlenmiştir. Bundan dolayı şekil 4.2 de de görüldüğü gibi alaşımda Al konsantrasyonu Mn konsantrasyonundan daha etkindir [36].



Şekil 4.2. Alüminyum ve mangan miktarı ile M_s ve M_f sıcaklıkları değişimi [36].

Alaşımında her iki element de dönüşüm sıcaklıklarını düşürücü etki yapar. Fakat şekil 4.3 de alüminyuma bakıldığında ağırlıkça %13 den sonra dönüşüm sıcaklığında ani bir düşüş ile mangandan daha etkin olduğu açıkça görülmektedir [37].



Şekil 4.3. Cu-Al-Mn üçlü şekil hafızalı alaşımda Al ve Mn alaşım elementlerinin dönüşüm sıcaklıklarına etkisi [37].

5. YAŞLANDIRMA OLAYI

Elde edilen veriler ve yapılan deneyler sonucunda yaşlandırma işleminin, austenit fazda ya da ürün fazda uygulanması, numunenin mikro yapısı ve düzen derecesi değişmesinin alaşımların şekil hatırlama etkisi üzerine önemli etkisi bulunmaktadır. Yaşlandırma işleminin çökelti fazlarının meydana gelmesi gibi numunenin iç yapısındaki homojenliği bozan etkileri de görülmektedir. Yaşlandırma işlemi sıcaklığa göre ana faz ve martensit faz da yaşlandırma olarak iki şekilde ortaya çıkar [38].

5.1. Ana Fazda Yaşlandırma Olayı

Cu bazlı alaşımlar A_f sıcaklığı üzerinde belirli bir sıcaklıkta tutulduğunda ana faz düzeninde bulunur ve soğuma esnasındaki düzen durumu reaksiyonu iki şekilde ortaya çıkar. Birinci aşamada düzensiz örgüler yüksek sıcaklıklarda B₂ tipi süper örgüye, ikinci aşamada ise bu düzensiz örgüler düşük bir sıcaklık bölgesi civarında B₂ tipi süper örgüden DO₃ tipi süper örgüye dönüşür. Cu-Zn-Al alaşım sisteminde β→B₂ geçişi 500 °C civarında, β→DO₃ geçişi ile M_s sıcaklığı ise alaşımı oluşturan elementlerin kompozisyonu ile önemli bir şekilde bağlantılıdır. β→B₂ ve β→DO₃ geçişleri belli bir sıcaklık aralığında

meydana gelir. Numunelere oda sıcaklığı üstünde yaşlandırma işlemi uygulanırsa M_s ve A_f dönüşüm sıcaklıkları da yaşlanma süresiyle artar [39].

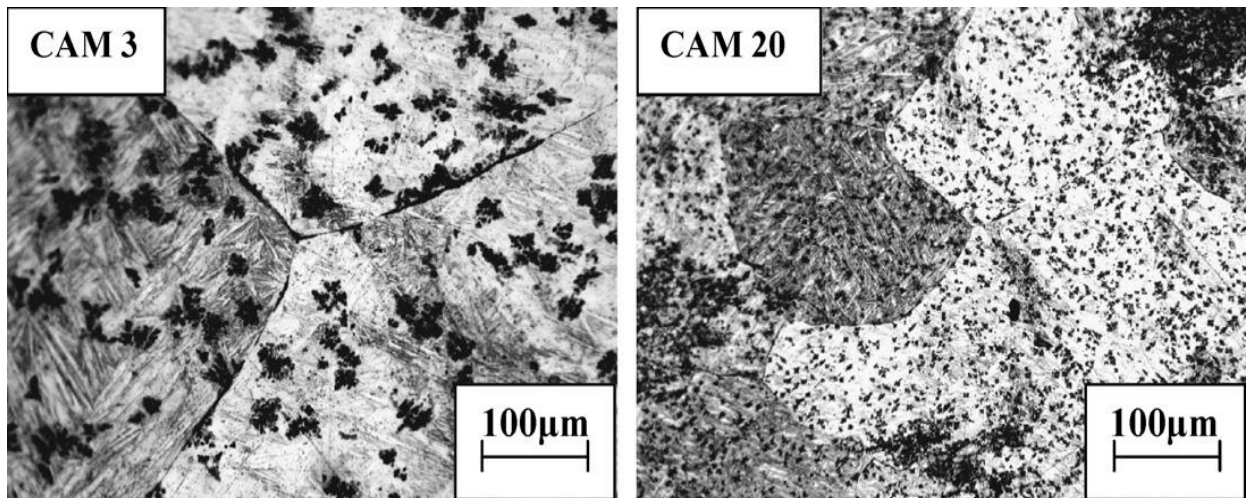
Cu-Al-Mn üçlü alaşım sisteminde numunede yaşlandırma işlemi sıcaklığına bağlı olarak dönüşüm sıcaklıkları artar. Yani numunelere yaşlandırma işlemi uygulanırsa dönüşüm sıcaklıkları da tablo 5.1. de görüldüğü gibi artmaktadır [37].

Tablo 5.1. Yaşlandırma işlemi uygulanmış numunelerin dönüşüm sıcaklıkları değişimi [37].

Alaşım Kodu	Dönüşüm Sıcaklığı (°C)							
	Soğutma Adımı				300 °C de Yaşlandırma			
	Mf	Ms	As	Af	Mf	Ms	As	Af
CAM3	63,4	88,1	96	114,2	110,2	128,2	132,4	168,5
CAM18	35	56	68	94	59,6	84,2	89,3	114,9
CAM20	25	55	68	94	52,9	65,1	86	99
CAM21	30	53,2	50,3	72,1	40,5	74,2	63,8	78,1

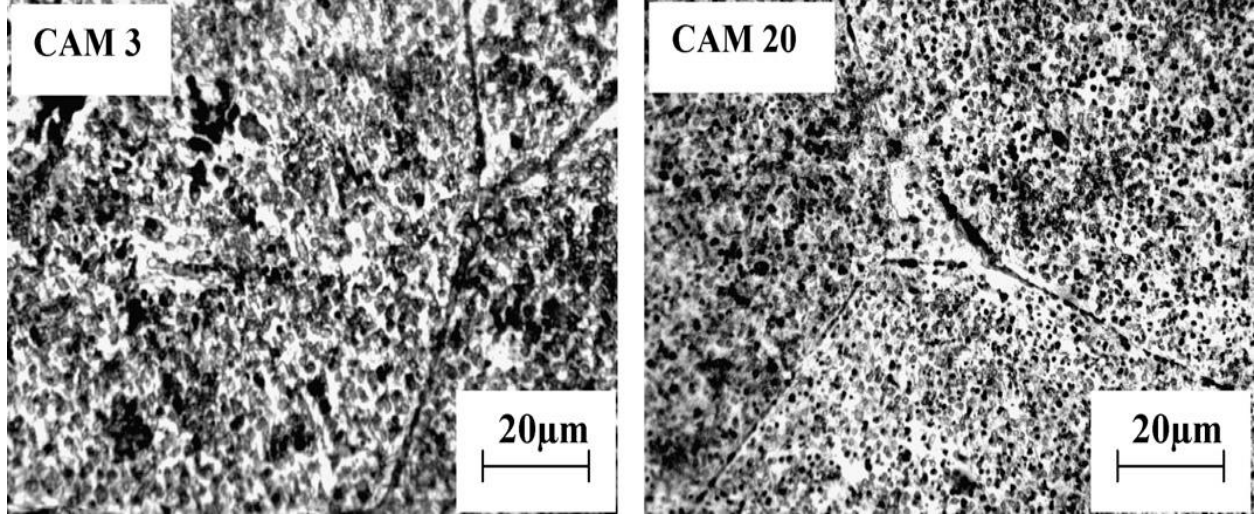
Dönüşüm Yok

Aynı zamanda yaşlandırmaya bağlı olarak şekil 5.1.'de optik mikrografda çekilen görüntülerden de anlaşılacağı gibi yüksek sıcaklıklarda yaşlandırılmaya maruz bırakılan numunelerde homojenliği bozan çökelti fazları oluşur. Bu çökelti fazlarının oluşması numunenin dönüşüm sıcaklıklarını arttırmaktadır. 300 °C yaşlandırmaya bırakılmış bir numunede austenit ve martensit dönüşümler gözlenmiş ve dönüşüm sıcaklıklarında artışlar meydana gelirken, 500 °C de yaşlandırılma işlemi uygulanan numunelerde çok fazla çökelti fazları olduğundan dönüşüm gözlenmemiştir [37].



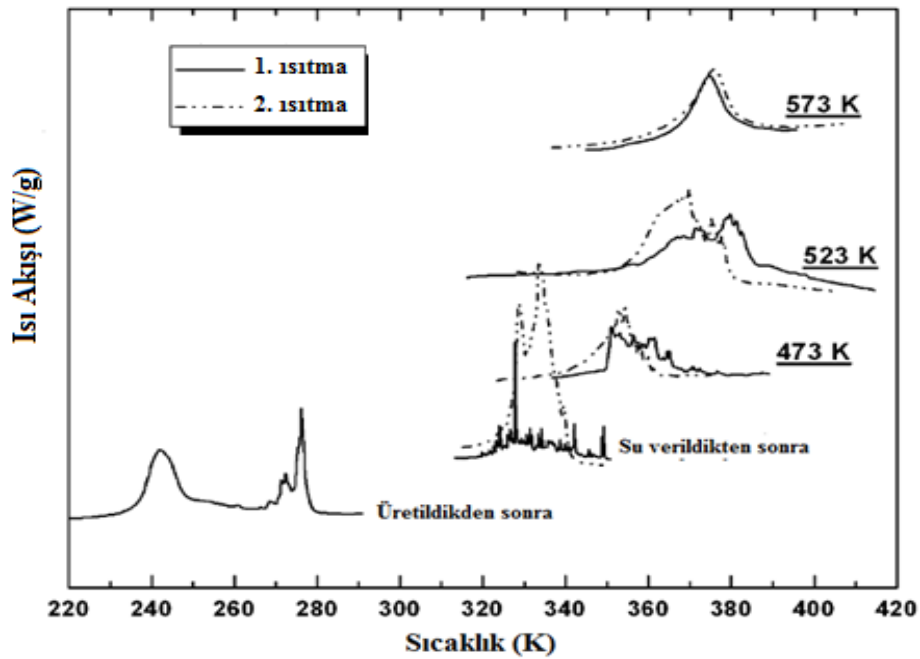
Şekil 5.1. 300°C de yaşlandırılmış numunelere ait çökelti fazlarının optik mikrograf görüntüleri [37].

Şekil 5.2 de 500°C de dönüşüm gözlenmemesinin sebebi; çok yüksek sıcaklıkta yaşlandırmaya bırakılan numunelerde çökelti fazlarının çok fazla olması ve taneler arası enerjinin aktarılamamasından kaynaklanmaktadır. Bu çökelti fazları da optik mikrografa açıkça görülmektedir [37].



Şekil 5.2. 500°C de yaşlandırılmış numunelere ait çökelti fazlarının optik mikroskop görüntüleri [37].

Cu-%14.1Al-%4.0Ni (% ağırlıkça) alaşımının dönüşüm sıcaklıkları şekil 5.3. de DSC ölçümü ile belirlenmiş olup yaşlandırma sıcaklığındaki artış sebebi ile dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler görülür. Yaşlandırma sıcaklıkları arttıkça dönüşüm sıcaklıkları (A_s , A_f , M_s , M_f) da artar [40].



Şekil 5.3. Cu-%14.1Al-%4.0Ni (% ağırlıkça) alaşımına ait DSC ölçümleri [40].

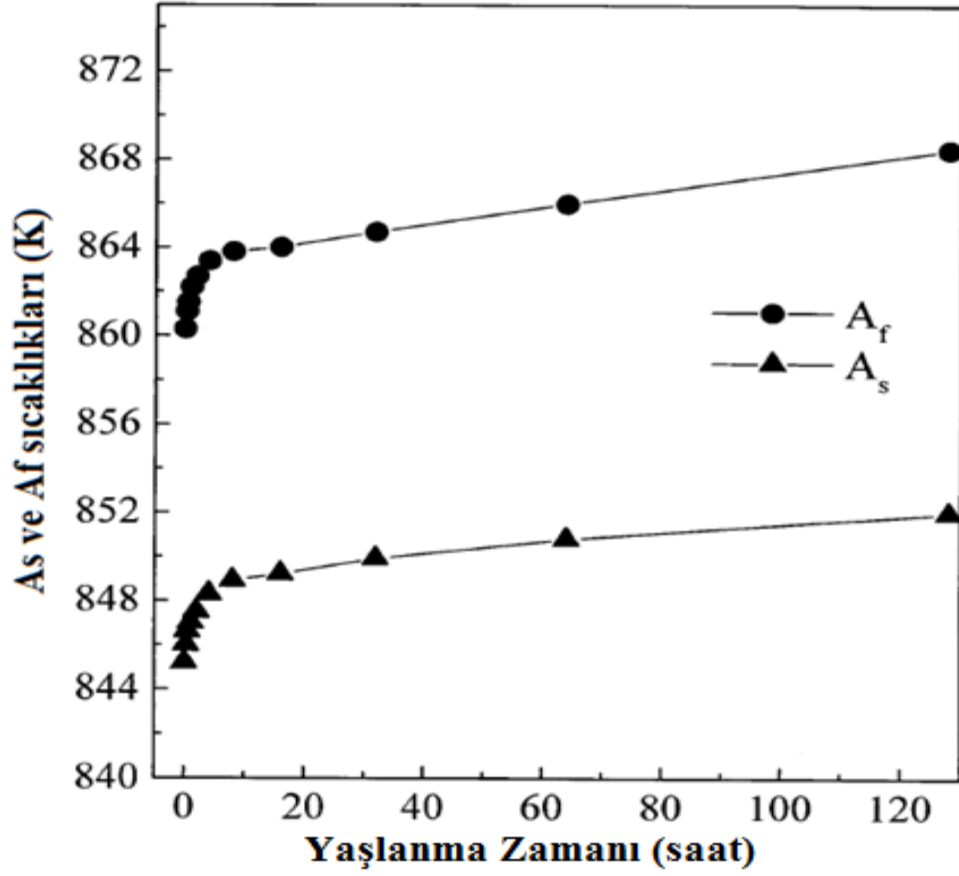
Tablo 5.2. de numunelerin yaşlandırılmadan önce ve yaşlandırıldıktan sonra dönüşüm sıcaklıkları verilmiştir. Burada bir gün boyunca aynı numunelere farklı sıcaklıklarda yaşlandırma işlemi uygulanmış ve buna bağlı olarak dönüşüm sıcaklıkları artmıştır [40].

Tablo 5.2. Cu-%14.1Al-%4.0Ni (% ağırlıkça) alaşımına ait yaşlandırma öncesi ve sonrası dönüşüm sıcaklıkları ile histerisi [40].

Durum	Dönüşüm Sıcaklıkları (K)								Histerisi (K)	
	1. Isıtma				2. Isıtma				Af1-Ms1	Af2-Ms2
	As1	Af1	Ms1	Mf1	As2	Af2	Ms2	Mf2		
Üretilikten sonra	235	279	235	223	—	—	—	—	44	—
Su Vermeden sonra	320	350	294	289	328	340	292	289	56	48
473 K de yaşlandırma	350	368	322	306	343	362	323	316	46	39
523 K de yaşlandırma	357	385	337	334	355	381	—	—	48	—
573 K de yaşlandırma	367	381	340	322	365	383	342	321	41	41

5.2. Martensit Fazda Yaşlandırma Olayı

Şekil hatırlamalı alaşımlarda martensit fazda yaşlandırma işleminin alaşımın karakteristik dönüşüm sıcaklıklarını ve karakteristik özellikleri üzerine etkileri bulunmaktadır. Martensit başlama sıcaklığının üzerinde ya da altında uygulanan yaşlandırma işlemiyle dönüşüm sıcaklığı değiştirilebilir. Yaşlandırma şekil hafızalı alaşımlarda martensit fazın kararlılığını da olumlu yönde etkilemektedir. Martensit durumun bu kararlılığı tersinir dönüşümü engelleyebilir [16,22].



Şekil 5.4. A_f ve A_s Sıcaklıklarının yaşılanma zamanı ile değişimi [41].

Şekil 5.4. de görüldüğü gibi yaşılandırma işleminin ilk saatlerinde dönüşüm sıcaklıklarında değişimler gözlemlenirken, yaşılanma zamanı artıkça bu dönüşüm sıcaklıklarındaki değişimlerde azalmaktadır. Buradan da şu sonuca ulaşılır; martensit fazda yaşılandırma süresi arttırıldıkça malzeme kararlı hale gelir [41].

6. MATERYAL VE METOT

6.1. Materyal

Bu çalışmada 3 adet farklı kompozisyonlara sahip Cu-Al-Mn üçlü şekil hatırlamalı alaşım numunelerini oluşturabilmek için %99 saflık derecesinde toz halinde bulunan Cu, Al, Mn elementleri kullanıldı. Toz halindeki elementler toplamda 10 gr olacak şekilde tüplere alınarak önceden belirlenen oranda Clifton Cyclone marka vorteks ile homojen şekilde karıştırılıp peletlenmeye hazır hale getirildi. Peletleme işleminde ise 10 gramlık toz karışımlara 4 MPa lık basınç altında Graseby Specac marka presleme cihazı ile pres işlemi uygulandı. Bozuk para şeklinde 1 cm inceliğinde preslenmiş numuneler elde edildi. Pelet haline gelen toz karışım argon gazı atmosferinde 12-24 V ve 75-150 A aralığında Şekil 6.1 de gösterilen ark melter (Edmund Buehler Arc Melter) ergitme fırınında eritildi ve alaşım haline getirildi. Külçe haline gelen numune küçük parçalar halinde kesilerek deneysel işlemler için hazırlandı. Kesme işleminin ardından numunler, Şekil 6.2. deki (Carbolite CWF-1200) kül fırını kullanılarak β -faz bölgesinde 900 °C sıcaklıkta 1 saat bekletilerek homojenleştirme işlemi gerçekleştirildi. Ardından tuzlu buzlu suda soğutulup numunede martensit yapıların oluşması sağlandı.



Şekil 6.1. Edmund Buehler Arc Melter ergitme fırını.



Şekil 6.2. Carbolite CWF-1200 kül fırını.

Bu işlemler yapıldıktan sonra tezin amacına yönelik olarak dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için DSC ölçümleri şekil 6.3 deki Shimadzu DSC-60A marka cihaz ile, yüzey morfolojisini incelemek için optik mikroskop görüntülerini şekil 6.4 deki Olympus BX41M model optik mikroskop ile, kristalografik olarak yapısal analiz için Rigaku RadB-DMAX II marka cihaz ile ölçümler alındı ve incelendi.



Şekil 6.3. Shimadzu DSC-60A Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı.



Şekil 6.4. Olympus BX41M model optik mikroskop.

Tablo 6.1. Cu-Al-Mn alaşımlarının kimyasal kompozisyonları.

Alaşım Kodu	Kimyasal Kompozisyon (at %)		
	Cu	Al	Mn
CAM-1	72,65	23,01	4,34
CAM-2	70,38	26,56	3,06
CAM-3	67,45	27,96	4,60

Tablo 6.1 de tezde kullanılan Cu-Al-Mn alaşımlarının atomikçe yüzdeleri verilmiştir.

Numuneler hazırlanıp ölçüm ve incelemeler yapıldıktan sonra yaşlandırma işlemine geçildi. Yaşlandırma işlemi, Carbolite CWF-1200 marka kül fırın kullanılarak gerçekleştirilmiş olup her bir numune ayrı ayrı tablo 6.2. gibi 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C sıcaklıklarında 1 saat yaşlandırılmaya bırakıldı ve ardından oda sıcaklığındaki suda soğutuldu. Yaşlandırmaya tabi tutulmadan önceki ölçüm ve incelemeler, yaşlandırılma işleminin ardından da aynı şekilde alındı. Böylece yaşlandırmanın numune üzerinde meydana gelen termal etkileri, kristaloğrafik yapı değişimleri, dönüşüm sıcaklıklarına etkisi, fiziksel özelliklerinin değişimi ve yüzey morfolojisi değişimi incelendi.

Tablo 6.2. Numunelerin farklı sıcaklıklarda yaşlandırma işlemi

Alaşım Kodu	1.	2.	3.	4.	Yaşlandırma Süresi (saat)
	Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	
CAM-1	200	300	400	500	1
CAM-2	200	300	400	500	1
CAM-3	200	300	400	500	1

6.2. Metot

6.2.1. X-Işını Kırınım (XRD) Analizleri

X-ışını kırınımı analizi, kristal yapı analizlerinde numunelerin atomik boyutta incelenmesini sağlayan bir analiz yöntemidir. Bu difraksiyon yöntemi kristallerin içyapıları hakkında bilgi edinilmesi konusunda kesin ve iyi sonuçlar sunmaktadır. Kristal yapılar, üç boyutlu atomların veya atom topluluklarının bir araya gelmesi ile oluşan yapılardır. İyi yapılan bir yapı analizi numune içindeki kristal yapıları bir araya getiren atom gruplarının etkileşimleri hakkında net bilgi verir. X-ışını kırınımında numune üzerine gönderilen ışınlar Bragg yasasına göre yansımaya uğrar. Daha sonra yansımaya uğrayan ışınlar bir detektör yardımı ile analiz edilir ve yansıma açılarına göre şiddetli ya da küçük pikler oluşur. Bu pikler PDF(Pattern Indexing File) kartları kullanılarak kristal yapı parametreleri ve fazlar belirlenir.

1-) Kırınım şiddeti

2-) Kırınım pozisyonu

3-) Kırınım açısı

gibi parametreleri kullanılarak numunenin örgü parametreleri ve kristal düzlemleri hesapları yapılabilir. Bu parametreler numunelerin özelliklerini belirlemede etkin rol oynamaktadır.[9, 17, 42].

6.2.2. Metelografik Gözlemler

Hazırlanan numunenin yüzeyindeki değişiklikleri gözlemek, yüzey morfolojisini incelemek için optik mikroskop ile numunenin yüzey resimleri alınır. Numuneye ısı işlem uygulanıp, gerekli işlemlerden sonra numune yüzeyi parlatılıp yüzey fotoğrafı çekildiğinde fotoğrafta martensit yapılar gözlemlenir. Bu martensit yapı çeşitleri alaşımın kimyasal

kompozisyonu, alaşıma uygulanan ısıtılma işleme göre farklılıklar gösterebilir. Numuneye yaşlandırılıp yüzey fotoğrafı alındığında, bu işlemten sonra tane ve tane sınırları belirgin bir hal aldığı optik mikroskop ile çekilen görüntülerden anlaşılabilir. Yaşlandırma süresi artışına bağlı olarak çekilmiş yüzey fotoğraflarından çeşitli yorumlar yapılabilir. Çok fazla yaşlanmaya maruz kalan numunelerde yüzeyinde çökelti fazları oluşmakla beraber bu fazları gözlemlemek için yine optik mikroskop gözlemleri ve incelemeleri kullanılır [15, 16].

Optik mikroskop gözlemlerin amacı yüzey morfolojisini inceleyerek numune içerisindeki kristal yapılar hakkında daha kesin ve net sonuçlara ulaşabilmek, X-ışını Kırınımı (XRD) ölçüm ve inceleme sonuçlarının metalografik gözlemlerle tutarlı bir ölçekte birbirini destekler nitelikte olması için çekilmektedir.

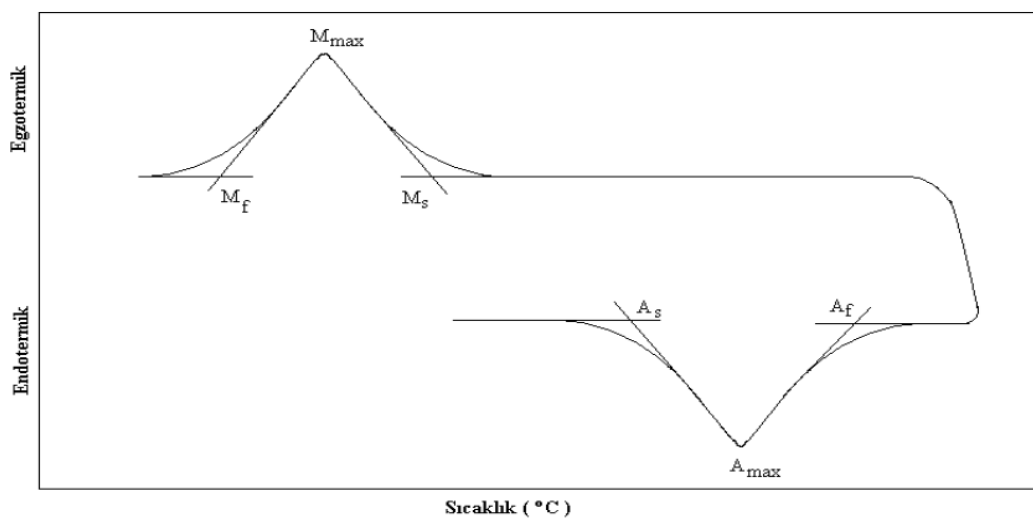
Çalışmanın amacına yönelik olarak alaşımların üzerlerine uygulanan ısıtılma işlemlerden sonra numune yüzeyindeki değişimleri gözlemlemek amacı ile numuneler soğuk kalıplama yöntemi ile bakalite gömüldü. Bakalite gömülen numuneler kalıptan çıkarılıp sırası ile önce 600 lük sonra 800'lük ve son olarak 1200'lük zımparalar ile su altında zımparalanarak yüzeylerindeki çizikler giderildi. Bu işlemlerin ardından numunelerin yüzeyleri 1 mikronluk elmas pasta ile kadife çuhada parlatıldı. Parlatılan alaşımlar 10 gr ($\text{FeCl}_3 - 6 \text{H}_2\text{O}$) - 192 ml metanol ve 40 ml HCl çözeltisi ile birkaç dakika dağlandıktan sonra yüzeylerinde oluşan martensitik yapıları ve morfolojisindeki değişimleri gözlemlemek için şekil 6.4 deki Olympus BX41M model optik mikroskop kullanıldı.

6.2.3. Termal Analiz Yöntemi

Alaşımda meydana gelen şekil hafıza etkisini incelemek dönüşüm sıcaklıkları ve faz geçiş sıcaklıklarını, kinetik parametrelerin (entalpi ve entropi) değerlerinin hesaplanması, aynı zamanda yaşlandırma işleminin bu parametreler üzerine etkisinin incelenmesi için DSC (diferansiyel taramalı kalorimetri) yöntemi kullanıldı.

DSC ölçümlerinde numunelerdeki enerji değişimleri endotermik ve ekzotermik olarak gerçekleşmektedir. Endotermik ve ekzotermik pikler austenit ve martensit faz geçişlerinde gözlenmektedir. Numune ısıtılmaya başlandığında ölçümü alınan numune verilen ısıyı alır ve belirli bir sıcaklık aralığına geldiğinde şekil 6.5. deki gibi endotermik pik oluşmaya başlar. Bu endotermik pikin oluşmaya başladığı sıcaklığa A_s ; austenit başlama sıcaklığı denir. Daha sonra maksimum pik oluşur, sıcaklık artışına bağlı olarak endotermik pik son bulur. Pikin bittiği sıcaklığa da A_f ; austenit bitiş sıcaklığı denir. Bu şekilde endotermik pik tamamlanır. DSC cihazı, belirlenen sıcaklığa çıkar ve bu sıcaklıktan tekrar soğumaya başlar. Numune soğuma esnasında austenit fazda iken aldığı ısı enerjisini belli bir sıcaklık değerine geldiğinde

geri vermeye başlar. Bu durumda şekil 6.5. deki gibi ekzotermik pik oluşur. Pikin oluşmaya başladığı bu sıcaklığa M_s ; martensit başlama sıcaklığı denir. Sıcaklık düşüşüne bağlı olarak maksimum pik oluşur. Belli bir sıcaklığa gelindiğinde ekzotermik pik tamamlanır. Bu bitiş sıcaklığına M_f ; martensit bitiş sıcaklığı denir. Böylece ekzotermik pik tamamlanmış olur [17]. Genel olarak ısıtma sürecinde endotermik pikler gözlemlenirken, soğutma sırasında ise ekzotermik pikler gözlemlenmiştir. Aynı numuneye ait farklı ısıtma hızları ile ölçüm alındığında dönüşüm sıcaklıklarında da farklı değişimler gözlemlenmiştir.



Şekil 6.5. DSC egrisinden A_s ve A_f dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi [17].

7. BULGULAR

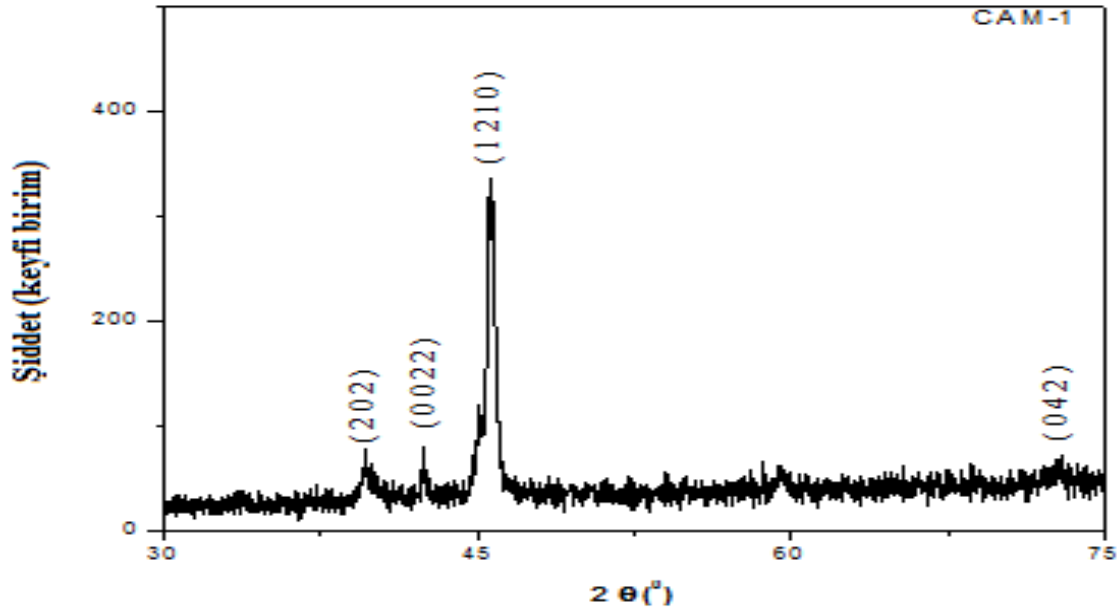
7.1. X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları

Bu çalışmada külçe halinde kesilen, yaşlandırılma işlemi uygulanan ve yaşlandırılma işlemine tabi tutulmamış alaşımların X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II marka bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α ($\lambda=1.5405 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak $2^\circ/\text{dakika}$ tarama hızında $2\theta = 30^\circ$ den 75° ye kadar alınmıştır. Oda sıcaklığında aldığımız ölçümlerdeki düzlemler belirlenip bu düzlemler X-ışını difraktogramı üzerinde belirtilmiştir. Bu parametrelerden yararlanılarak tane büyüklükleri hesaplanmıştır.

7.1.1. CAM-1 Alaşımına Ait X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları

CAM-1 alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.1’de verilmiştir. CAM-1 alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.1’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,700^\circ$ dir.



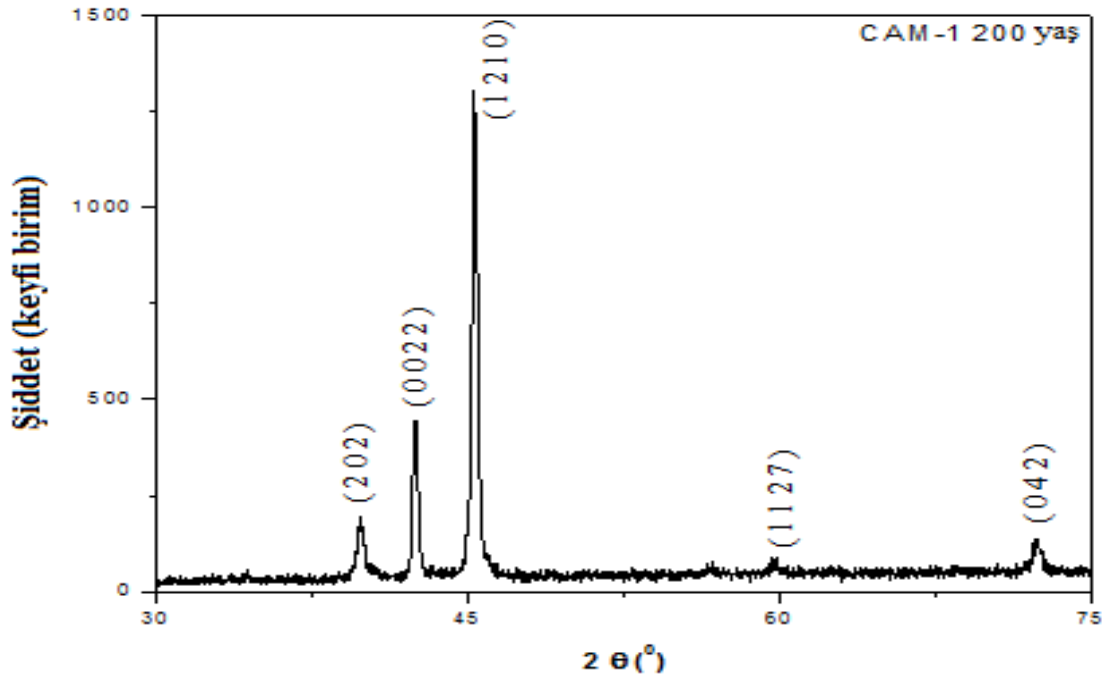
Şekil 7.1. CAM-1 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.1. CAM-1 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	45,700	1,9836	(1210)
	42,472	2,1266	(0022)
	39,643	2,2716	(202)

CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.2’de verilmiştir. Bu CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (1127), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.2’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,281^\circ$ dir.



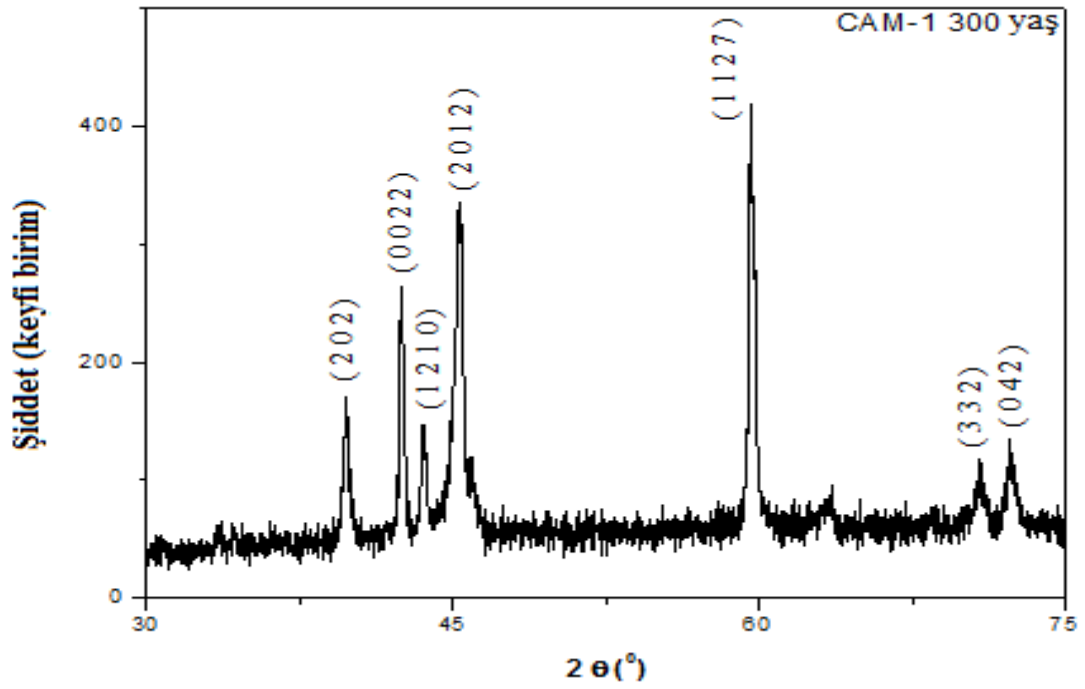
Şekil 7.2. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.2. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	45,281	2,0010	(1210)
	42,401	2,1300	(0022)
	39,839	2,2609	(202)
	59,822	1,5447	(1127)
	72,437	1,3036	(042)

CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.3’de verilmiştir. Bu CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (2012), (1127), (332), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.3’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1127) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 59,580^\circ$ dir.



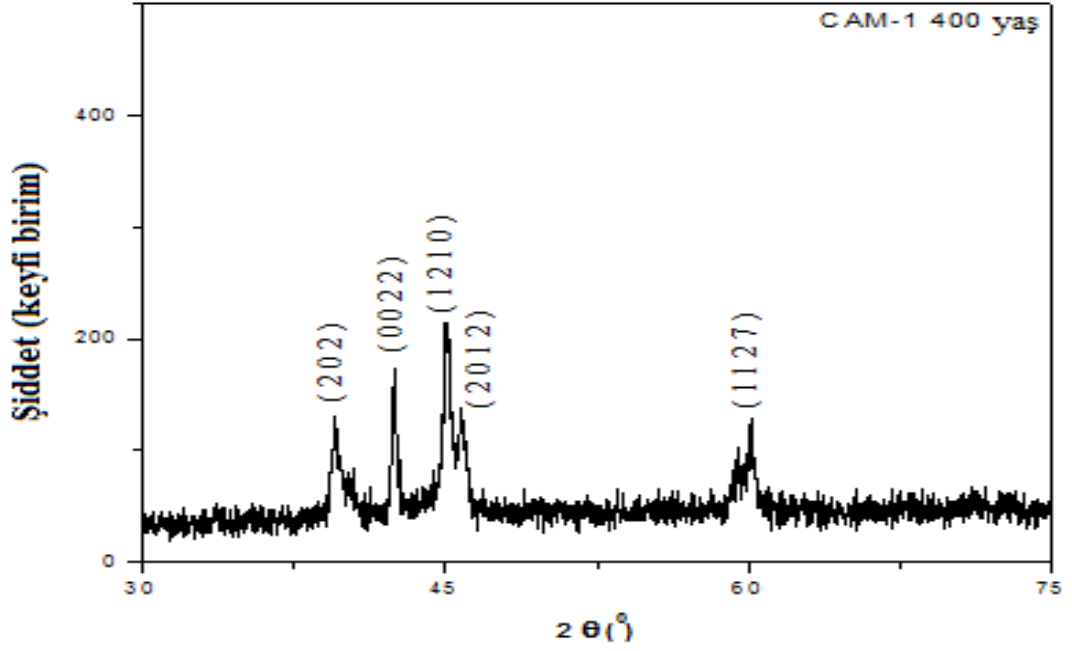
Şekil 7.3. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.3. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	43,560	2,0760	(1210)
	42,460	2,1272	(0022)
	39,781	2,2640	(202)
	59,580	1,5504	(1127)
	72,300	1,3058	(042)
	45,300	2,0002	(2012)
	70,897	1,3281	(332)

CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.4’de verilmiştir. Bu CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (2012), (1127) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.4’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,139^\circ$ dir.



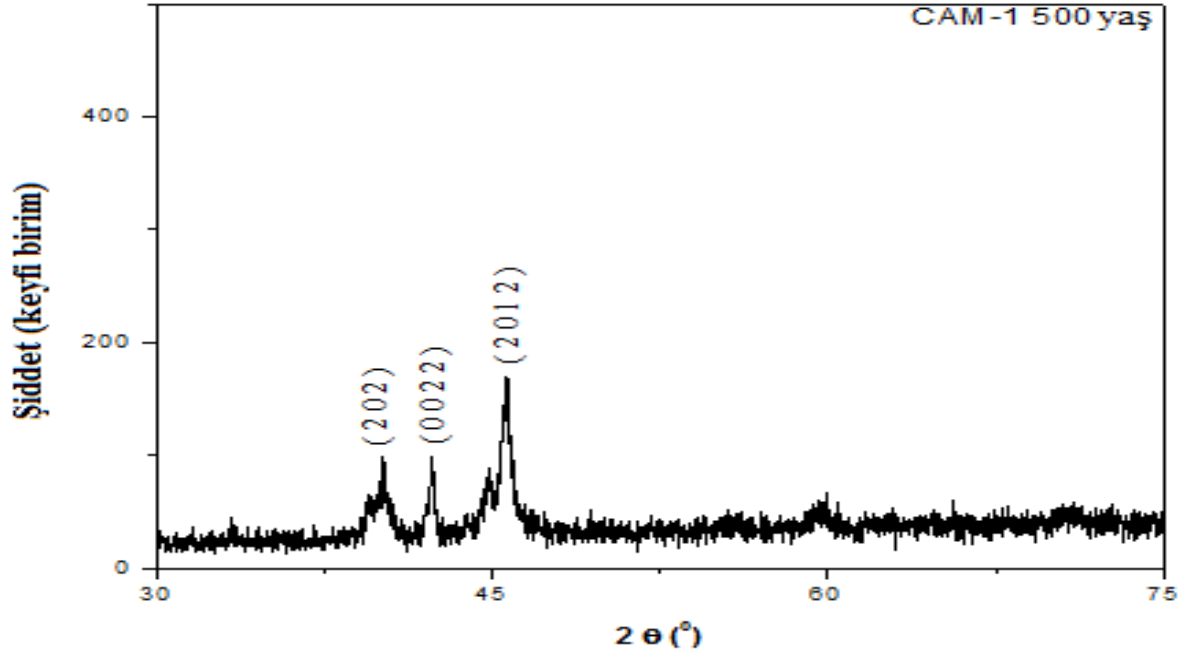
Şekil 7.4. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.4. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	45,139	2,0069	(1210)
	42,520	2,1243	(0022)
	45,878	1,9763	(2012)
	60,159	1,5369	(1127)
	39,521	2,2784	(202)

CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.5’de verilmiştir. Bu CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (2012) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.5’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (2012) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,641^\circ$ dir.

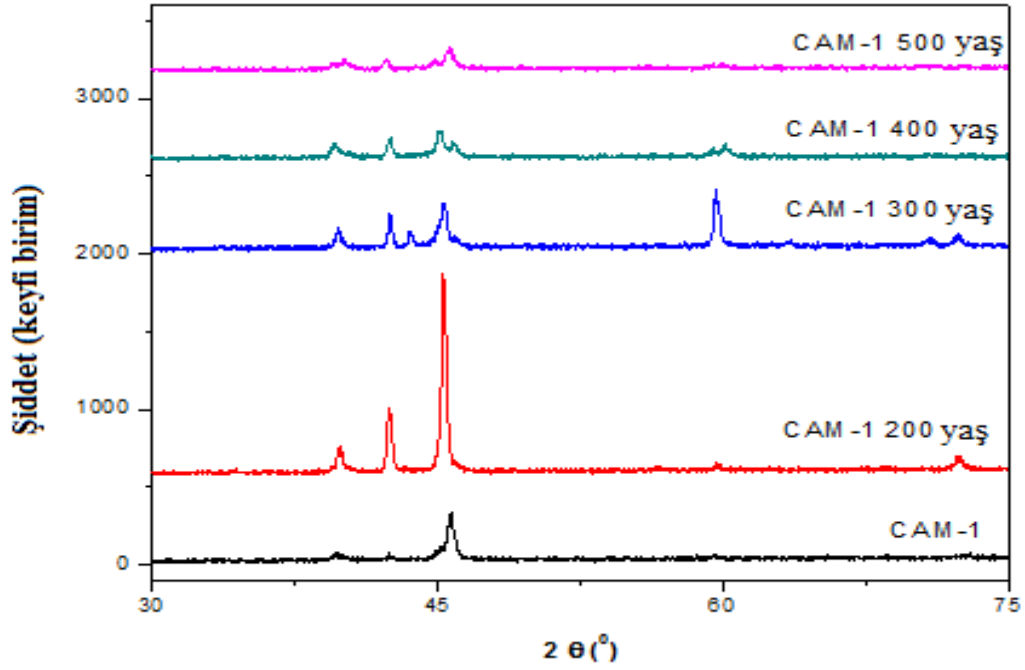


Şekil 7.5. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.5. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	40,138	2,2447	(202)
	42,297	2,1350	(0022)
	45,641	1,9861	(2012)

CAM-1, CAM-1 200, CAM-1 300, CAM-1 400, CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlardan elde edilen X-ışını difraktogramları şekil 7.6’da verilmiştir. Bu alaşımlara ait X-ışını difraktogramlarında yaşlandırma sıcaklığı arttıkça difraksiyon veren pikler birbirinden ayrılmış, aynı zamanda piklerin genişliği azalıp keskinleşmiş ve bu yansıma veren piklerin şiddetinde azalmalar tespit edilmiştir [10,16,37]



Şekil 7.6. CAM-1, CAM-1 200, CAM-1 300, CAM-1 400, CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları.

Cu-Al-Mn üçlü alaşımında yaşlandırma sıcaklığı arttıkça tane büyüklüğünde de değişimler tespit edilmiş, bu bulgular optik mikroskop görüntüleri ile de desteklenmiştir.

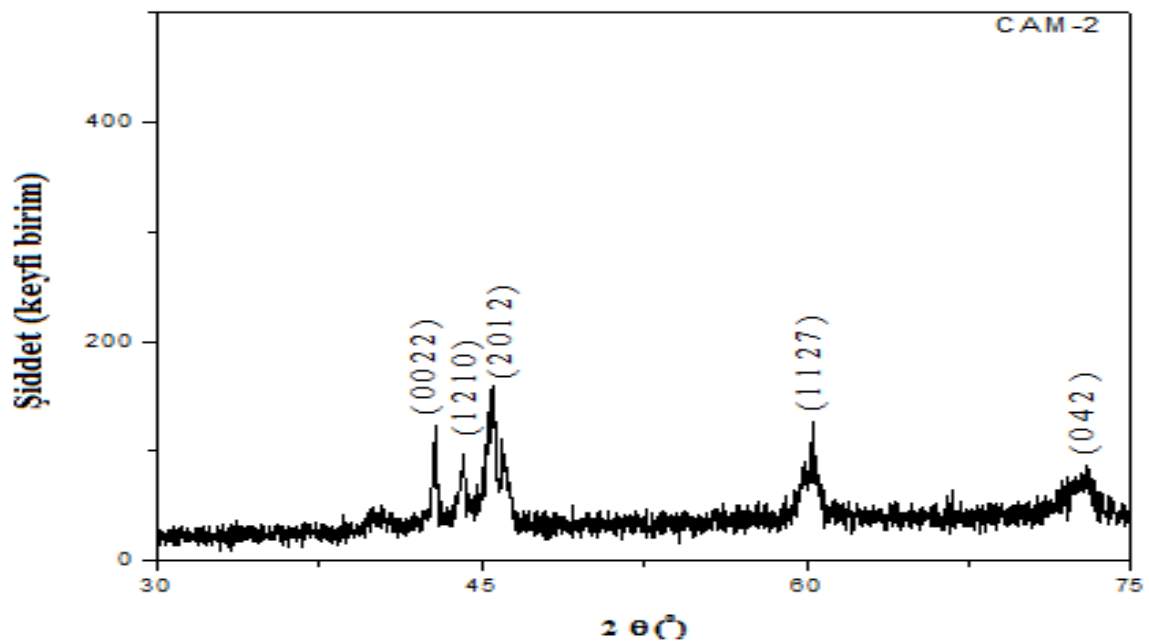
Tablo 7.6. CAM-1, CAM-1 200, CAM-1 300, CAM-1 400, CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarına ait X-ışınları analizlerinden elde edilen tane büyüklükleri.

Alaşım Kodu	Tane Büyüklüğü (nm)
CAM-1	19,37
CAM-1 200 yaş	28,70
CAM-1 300 yaş	19,74
CAM-1 400 yaş	16,69
CAM-1 500 yaş	22,89

7.1.2. CAM-2 Alaşımına Ait X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları

CAM-2 alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.7’de verilmiştir. Bu CAM-2 alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (0022), (1210), (2012), (1127), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.7’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (2012) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,461^\circ$ dir.



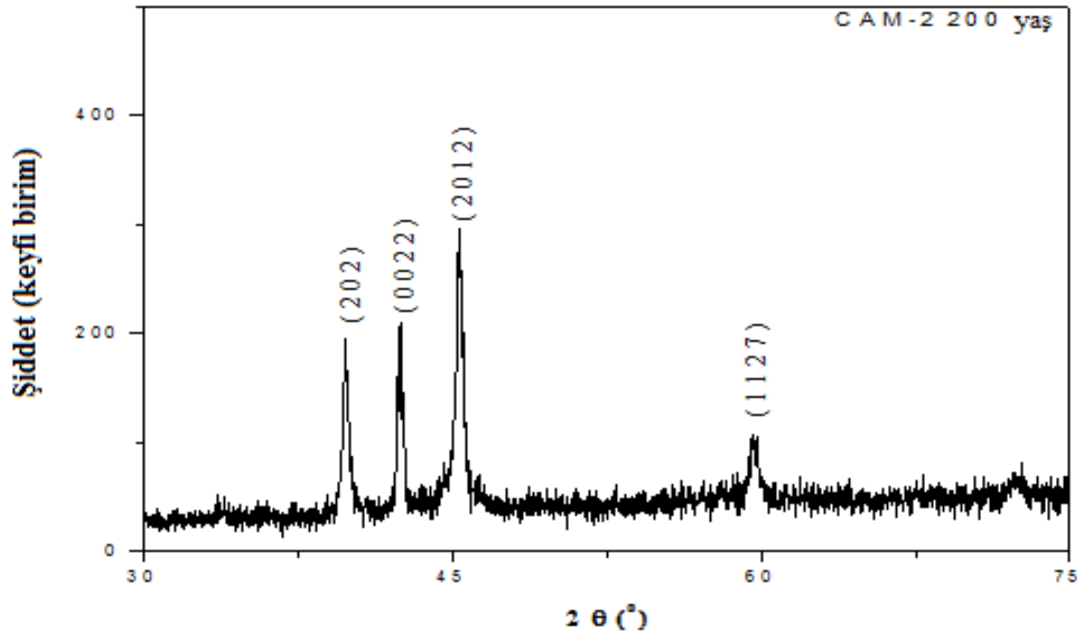
Şekil 7.7. CAM-2 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.7. CAM-2 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	42,822	2,1100	(0022)
	44,101	2,0518	(1210)
	45,461	1,9935	(2012)
	60,341	1,5327	(1127)
	72,961	1,2956	(042)

CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.8’de verilmiştir. Bu CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (2012), (1127) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.8’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (2012) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,360^\circ$ dir.



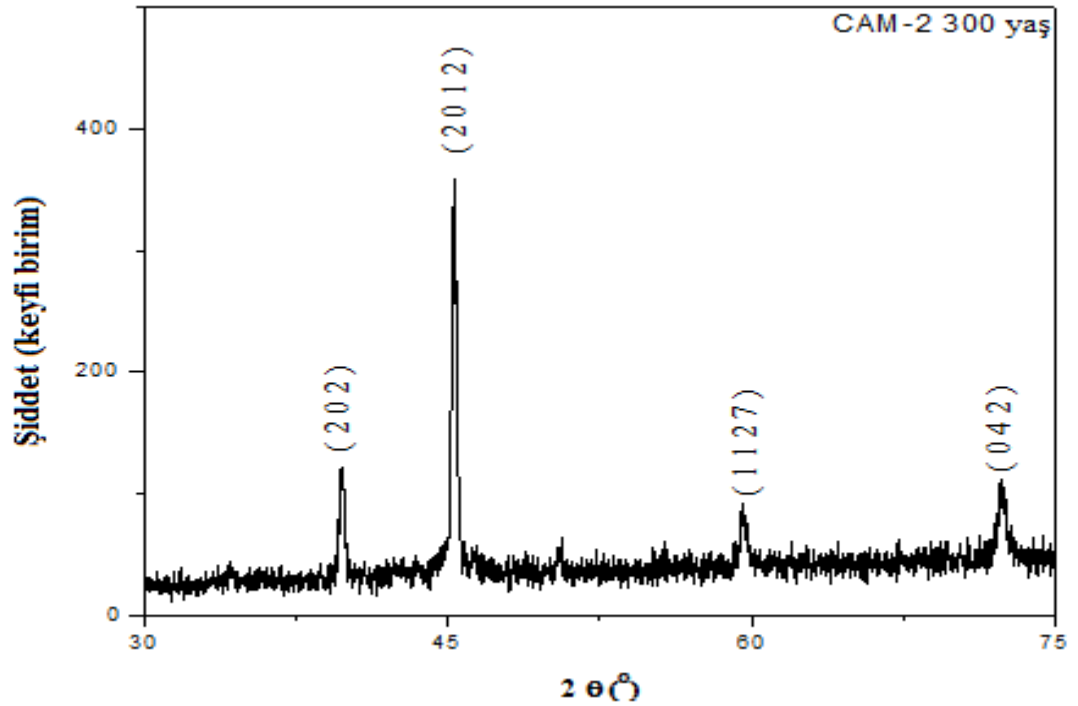
Şekil 7.8. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.8. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,839	2,2609	(202)
	42,478	2,1263	(0022)
	45,360	1,9977	(2012)
	59,679	1,54,81	(1127)

CAM-2 300 °C de yaşılandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.9’de verilmiştir. Bu CAM-2 300 °C de yaşılandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (2012), (1127), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.9’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (2012) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,300^\circ$ dir.



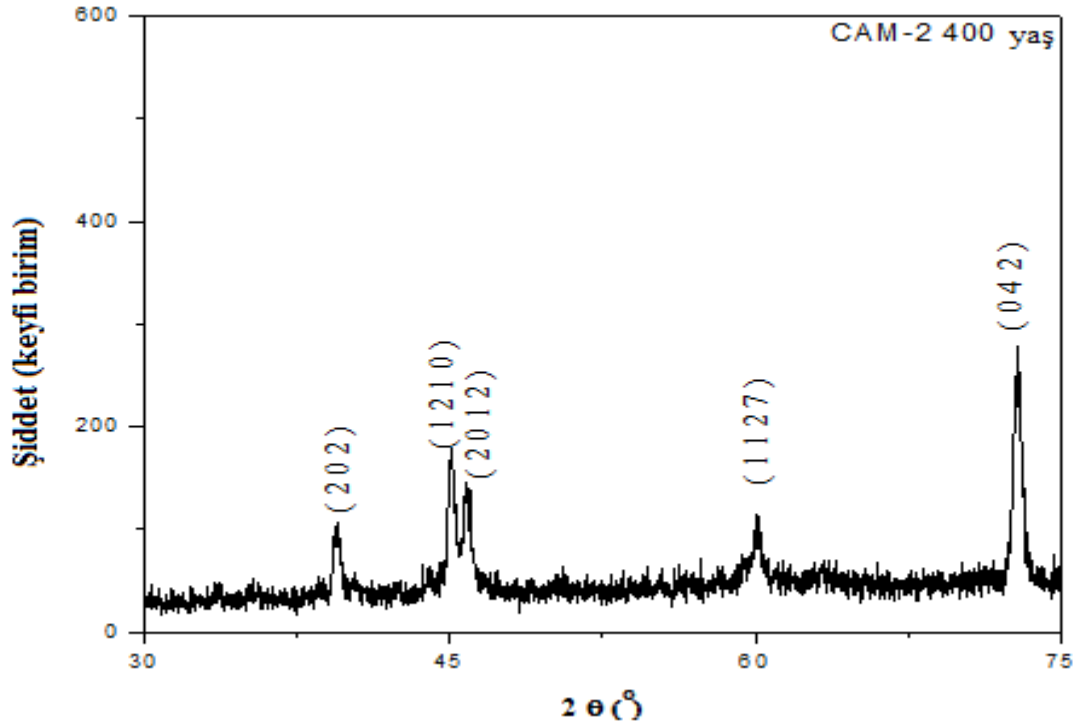
Şekil 7.9. CAM-2 300 °C de yaşılandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.9. CAM-2 300 °C de yaşılandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,762	2,2651	(202)
	45,300	2,0002	(2012)
	59,580	1,5504	(1127)
	72,437	1,3036	(042)

CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.10'da verilmiştir. Bu CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (1210), (2012), (1127), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.10'da verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (042) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 72,839^\circ$ dir.



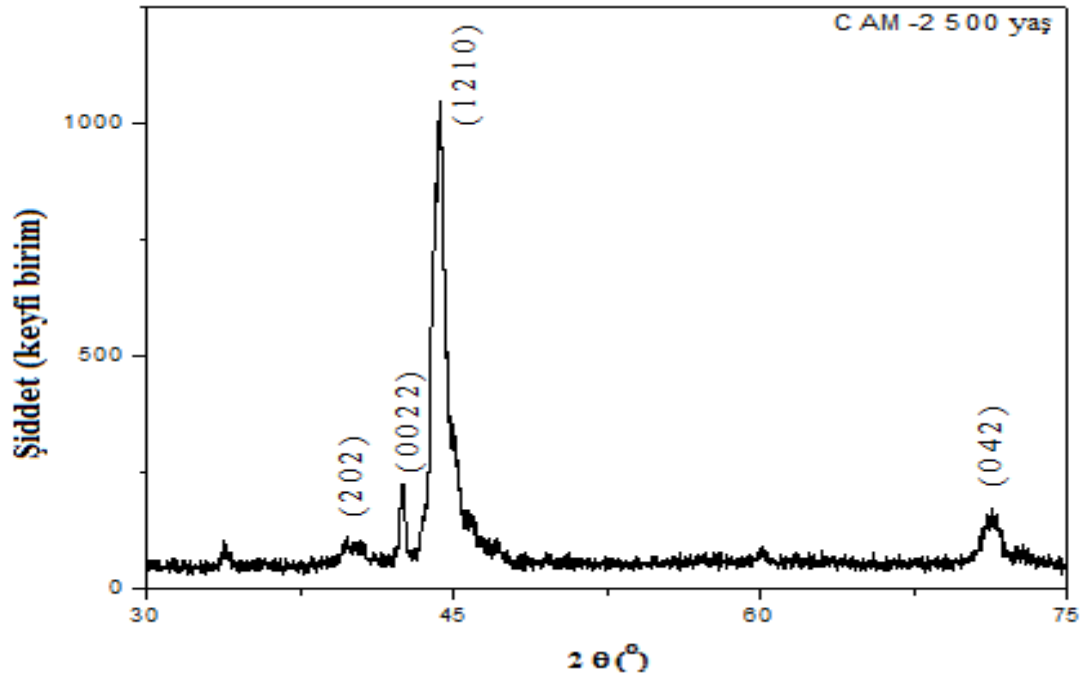
Şekil 7.10. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.10. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,499	2,2795	(202)
	45,061	2,0103	(1210)
	45,839	1,9779	(2012)
	60,116	1,5379	(1127)
	72,839	1,2974	(042)

CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.11’de verilmiştir. Bu CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.11’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 44,320^\circ$ dir.

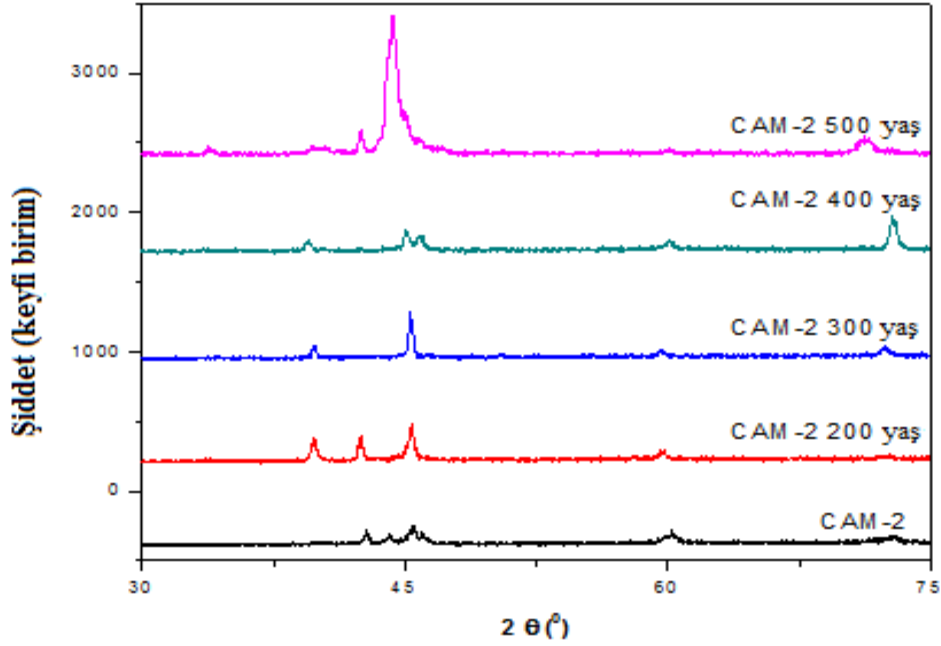


Şekil 7.11. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.11. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,818	2,2620	(202)
	42,519	2,1244	(0022)
	44,320	2,0421	(1210)
	71,519	1,3181	(042)

CAM-2, CAM-2 200, CAM-2 300, CAM-2 400, CAM-2 500 °C de yaşılandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları şekil 7.12’de verilmiştir. Bu alaşımlara ait X-ışını difraktogramlarında genel olarak yaşılandırma sıcaklığı arttıkça difraksiyon veren pikler birbirinden ayrılmış, aynı zamanda piklerin genişliği azalıp keskinleşmiş ve bu yansıma veren piklerin şiddetinde azalmalar tespit edilmiştir [10,16,37]. Fakat CAM-2 500 °C de yaşılandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramında çok fazla ve kesin yansıma veren pikler oluşmuştur.



Şekil.7.12. CAM-2, CAM-2 200, CAM-2 300, CAM-2 400, CAM-2 500 °C de yaşılandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları.

Cu-Al-Mn üçlü alaşımında yaşılandırma sıcaklığı arttıkça tane büyüklüğünde de değişimler tespit edilmiş, bu bulgular optik mikrograf görüntüleri ile de desteklenmiştir.

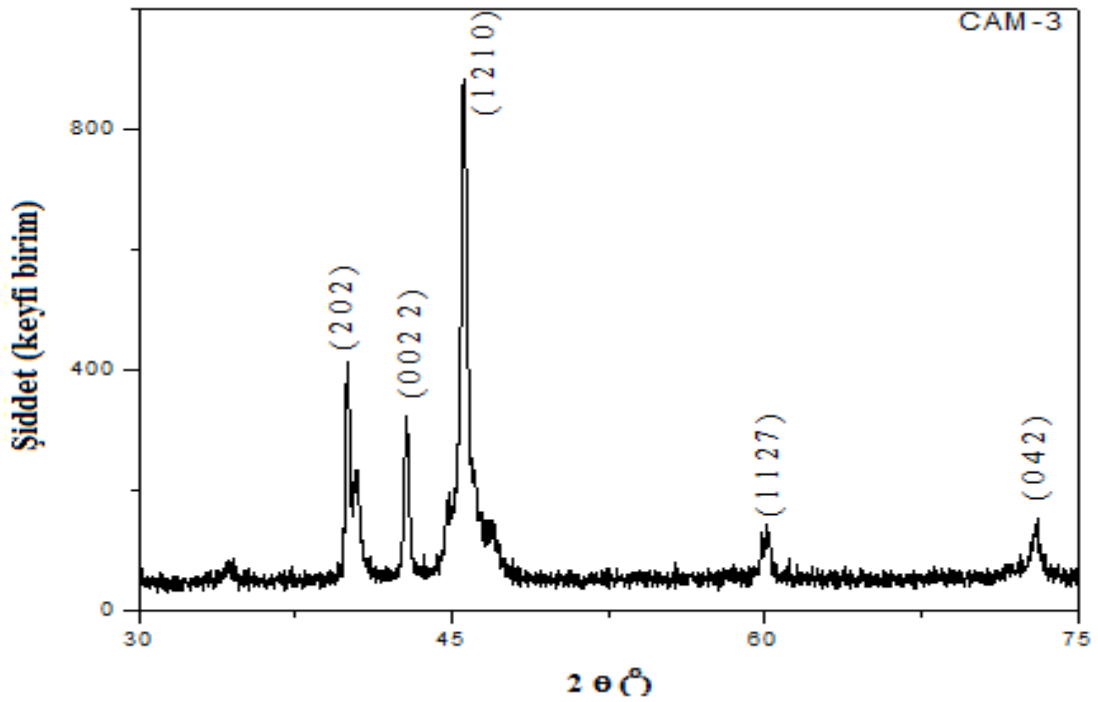
Tablo 7.12. CAM-2, CAM-2 200, CAM-2 300, CAM-2 400, CAM-2 500 °C de yaşılandırılmış alaşımlarına ait X-ışınları analizlerinden elde edilen tane büyüklükleri.

Alaşım Kodu	Tane Büyüklüğü (nm)
CAM-2	14,43
CAM-2 200 yaş	21,61
CAM-2 300 yaş	32,39
CAM-2 400 yaş	22,19
CAM-2 500 yaş	10,72

7.1.3. CAM-3 Alaşımına Ait X-Işını Kırınım (XRD) Analiz Sonuçları

CAM-3 alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.13’de verilmiştir. Bu CAM-3 alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (1127), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.13’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,540^\circ$ dir.



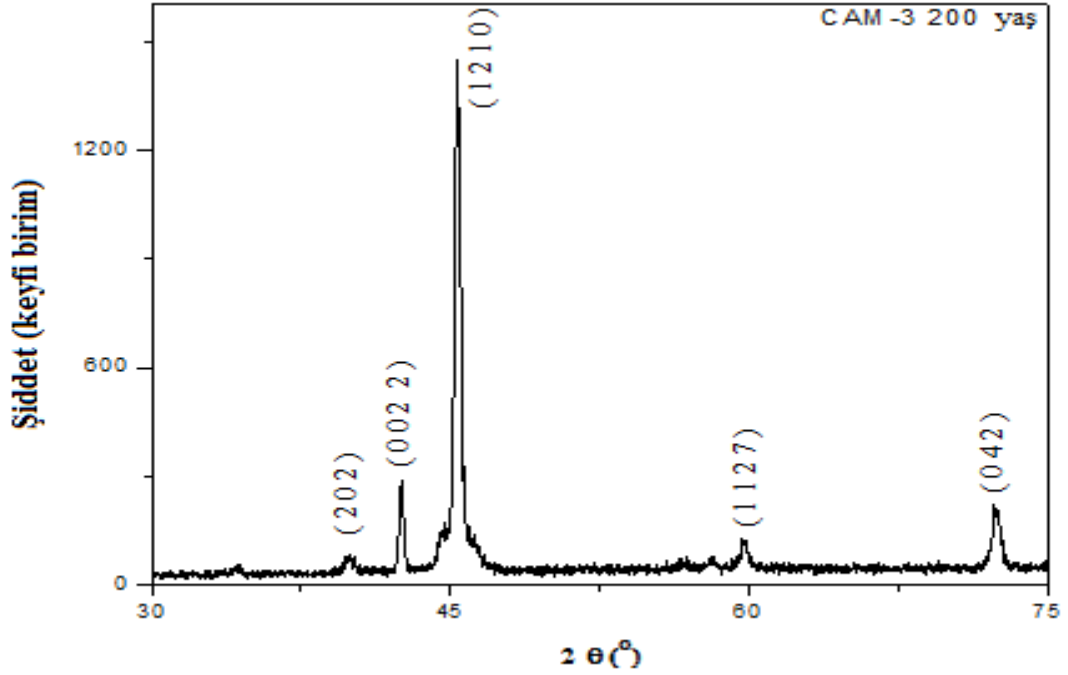
Şekil 7.13. CAM-3 alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.13. CAM-3 alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,961	2,2543	(202)
	42,820	2,1101	(0022)
	45,540	1,9902	(1210)
	60,200	1,5359	(1127)
	73,035	1,2944	(042)

CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.14’de verilmiştir. Bu CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (1127), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.14’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,340^\circ$ dir.



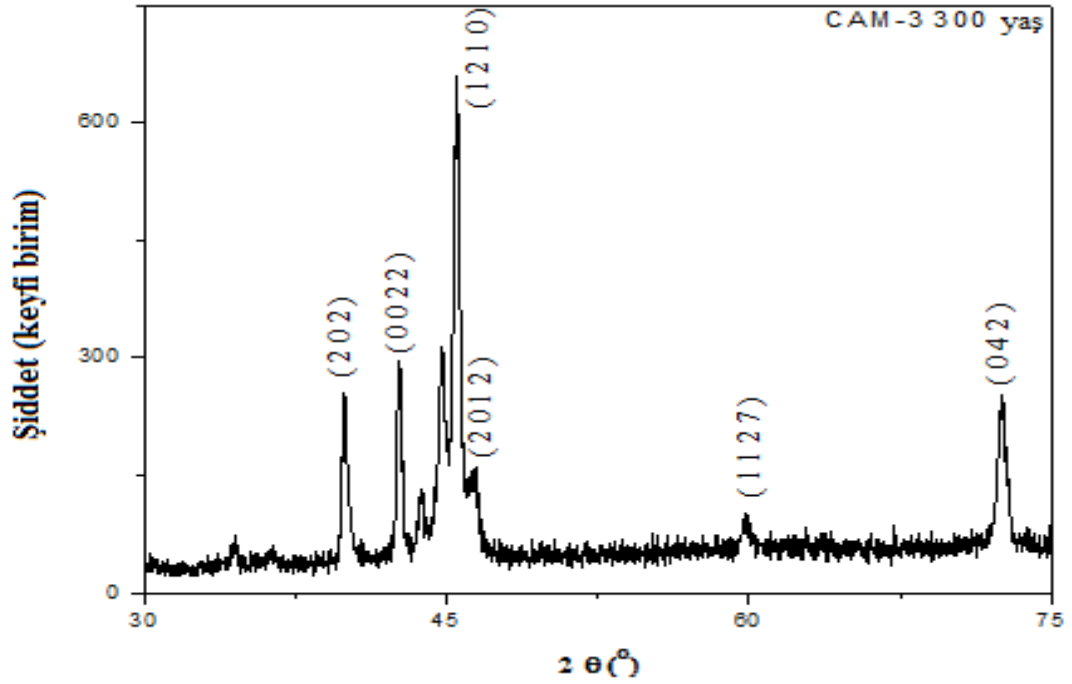
Şekil 7.14. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.14. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,939	2,2554	(202)
	42,505	2,1252	(0022)
	45,340	1,9985	(1210)
	59,819	1,5448	(1127)
	72,399	1,3042	(042)

CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.15’de verilmiştir. Bu CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (2012), (1127), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.15’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,500^\circ$ dir.



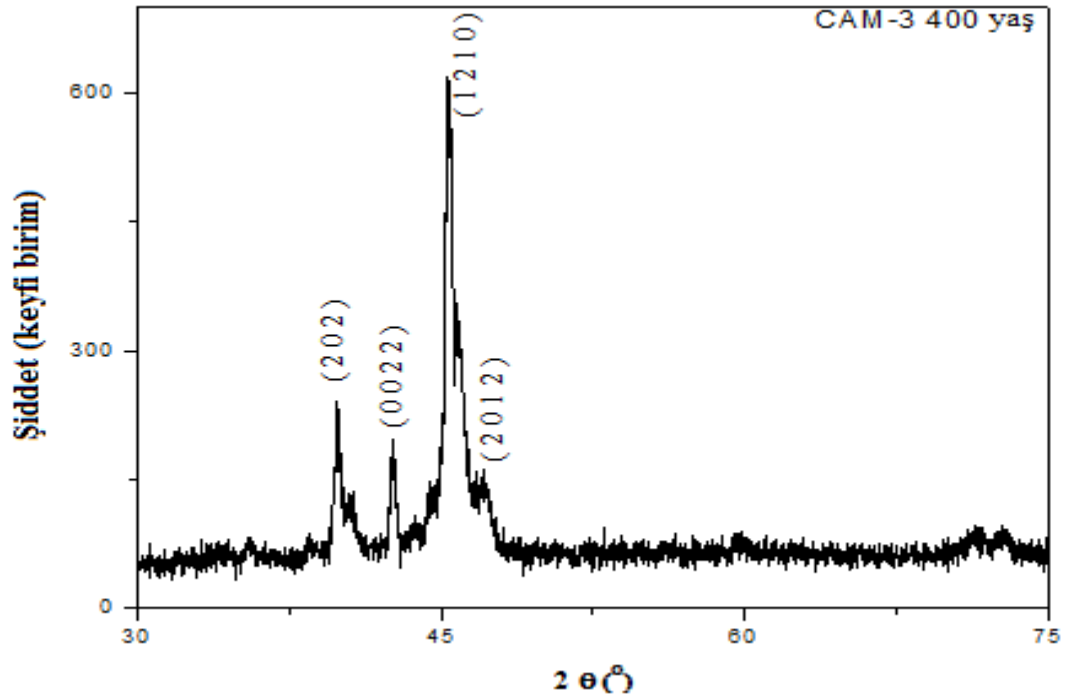
Şekil 7.15. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.15. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,938	2,2555	(202)
	42,622	2,1195	(0022)
	45,500	1,9919	(1210)
	46,459	1,9530	(2012)
	72,618	1,3008	(042)

CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.16’da verilmiştir. Bu CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (1210), (2012) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.16’da verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (1210) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 45,379^\circ$ dir.



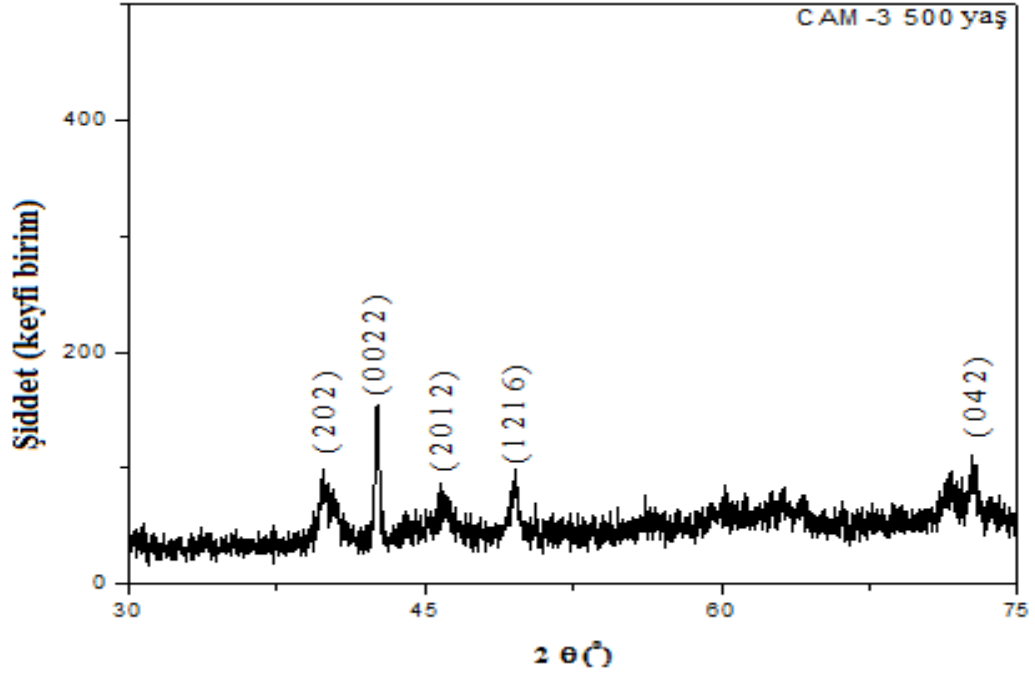
Şekil 7.16. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımından elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.16. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,880	2,2586	(202)
	42,639	2,1186	(0022)
	45,379	1,9969	(1210)
	47,076	1,9288	(2012)

CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait X-ışını difraktogramı şekil 7.17’de verilmiştir. Bu CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait difraksiyon veren düzlemler sırasıyla (202), (0022), (2012), (1216), (042) düzlemleridir. Bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Difraksiyon veren düzlemlere ait 2θ değerleri tablo 7.17’de verilmiştir.

Düzlemler arasından en şiddetli yansıma veren düzlem (0022) düzlemidir ve yansıma açısı $2\theta = 42,577^\circ$ dir.

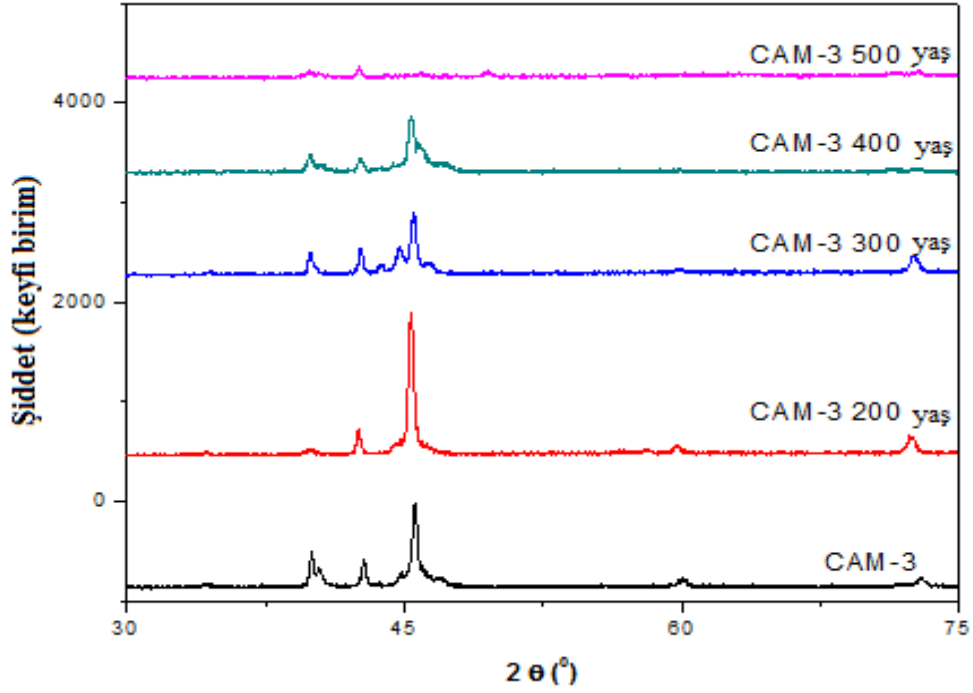


Şekil 7.17. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımdan elde edilen X-ışını difraktogramı.

Tablo 7.17. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait yansıma veren düzlemler ve açılar.

Kristal Yapısı	2θ (°)	$d(\text{\AA})$	(hkl)
Ortorombik	39,840	2,2608	(202)
	42,577	2,1216	(0022)
	46,041	1,9697	(1210)
	49,540	1,8384	(1216)
	72,801	1,2980	(042)

CAM-3, CAM-3 200, CAM-3 300, CAM-3 400, CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları şekil 7.18’de verilmiştir. Bu alaşımlara ait X-ışını difraktogramlarında genel olarak yaşlandırma sıcaklığı arttıkça difraksiyon veren pikler birbirinden ayrılmış, aynı zamanda piklerin genişliği azalıp keskinleşmiş ve bu yansıma veren piklerin şiddetinde azalmalar tespit edilmiştir [10,16,37].



Şekil 7.18. CAM-3, CAM-3 200, CAM-3 300, CAM-3 400, CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarından elde edilen X-ışını difraktogramları.

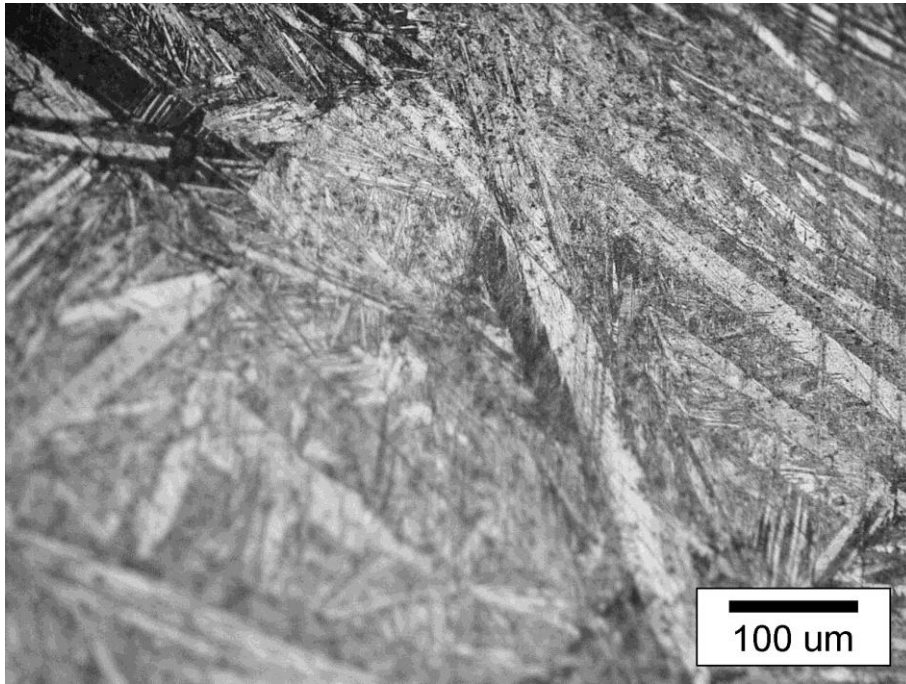
Cu-Al-Mn üçlü alaşımında yaşlandırma sıcaklığı arttıkça tane büyüklüğünde de değişimler tespit edilmiş, bu bulgular optik mikroskop görüntüleri ile de desteklenmiştir.

Tablo 7.18. CAM-3, CAM-3 200, CAM-3 300, CAM-3 400, CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarına ait X-ışınları analizlerinden elde edilen tane büyüklükleri.

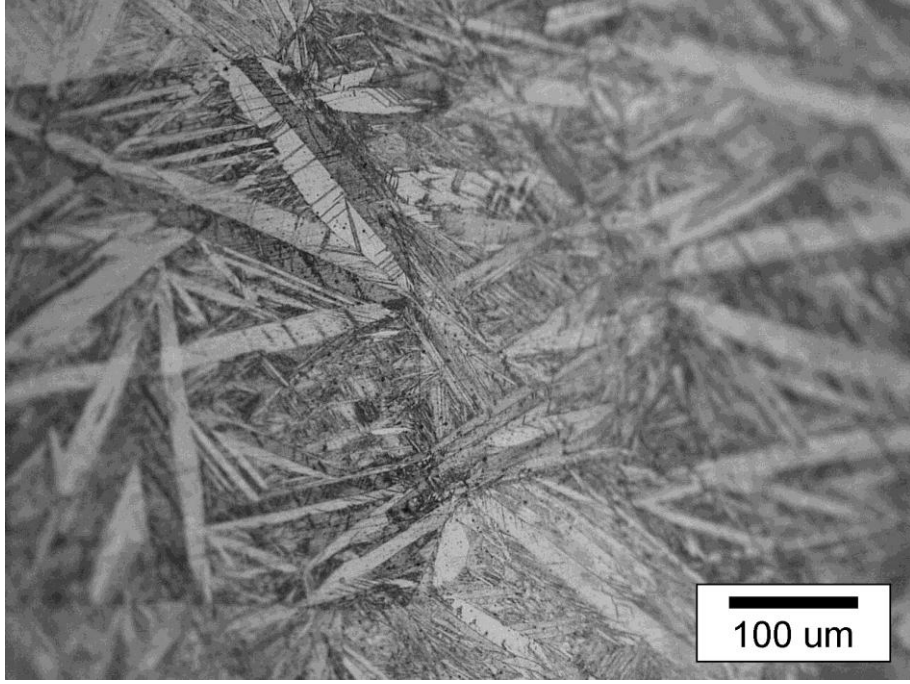
Alaşım Kodu	Tane Büyüklüğü (nm)
CAM-3	20,73
CAM-3 200 yaş	24,27
CAM-3 300 yaş	22,61
CAM-3 400 yaş	16,42
CAM-3 500 yaş	12,80

7.2. Metalografik Gözlemler

Şekil 7.19-7.23’de CAM-1 alaşımına ait 100 büyütme ile çekilen optik mikrograf resimleri görülmektedir. Oda sıcaklığında yapılar tamamen martensit fazdadır. Bu yapıların bazıları V-tipi bazıları ise iğne tipi martensitlerdir. Bu yüzey fotoğraflarında martensit yapılar farklı yönelimler de göstermektedir. CAM-1 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C’de sıcaklıklarında yaşlandırma işlemine tabi tutulan parçalarının yüzey fotoğrafları incelendiğinde; yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak numune içerisinde yavaş yavaş tane sınırları belirginleşirken martensit yüzeyler kaybolmaya başlamıştır. Ayrıca şekil hatırlama etkisini olumsuz yönde etkileyen çökelti fazları da mevcuttur. Buradan yaşlandırma sıcaklığı artıka çökelti fazları artmakta buna bağılı olarak da şekil hatırlama etkisinde değışimler olmaktadır.



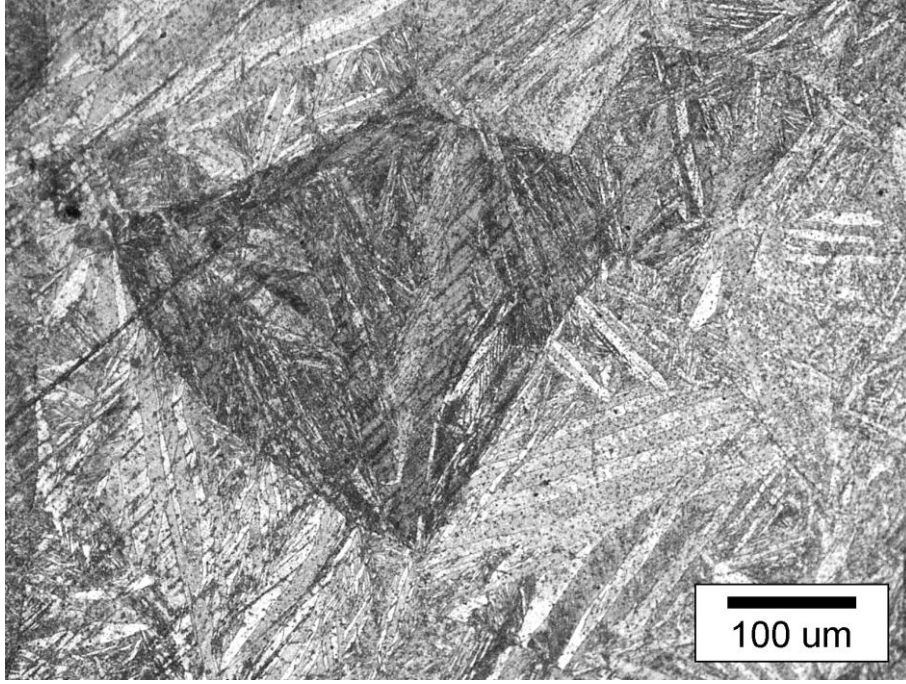
Şekil 7.19. CAM-1 alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



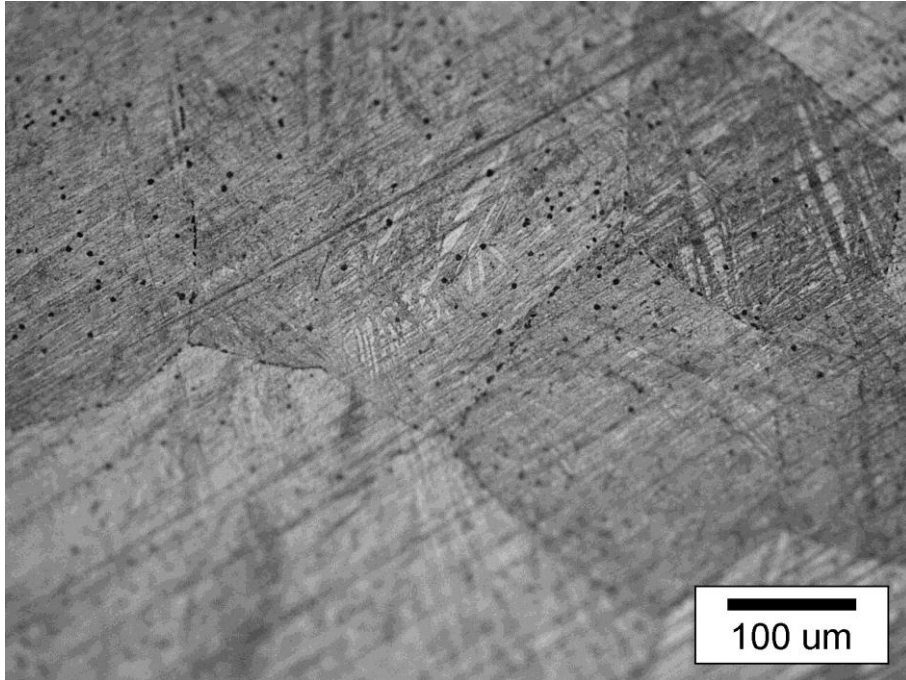
Şekil 7.20. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



Şekil 7.21. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.

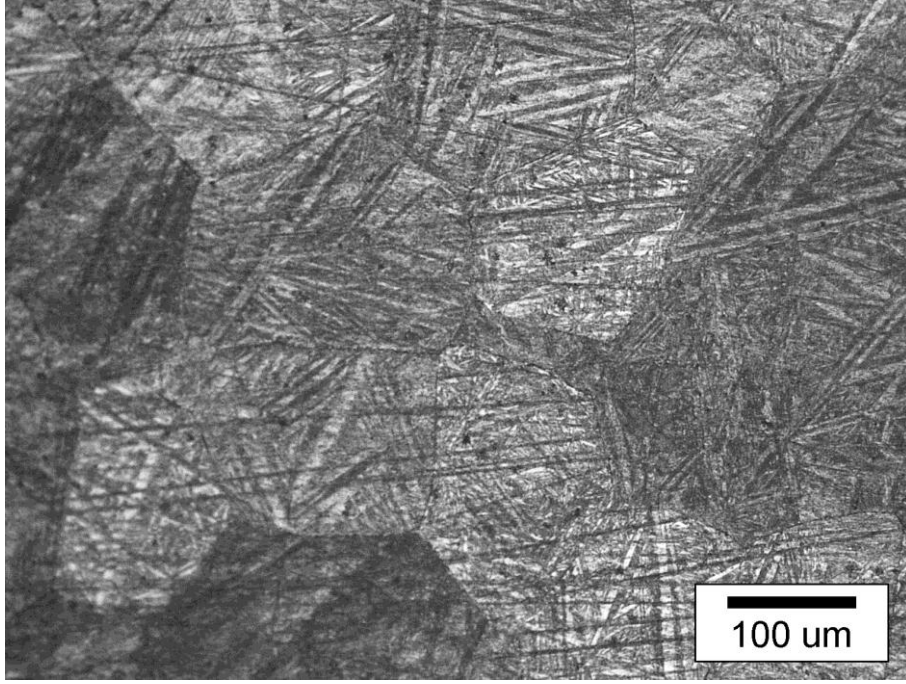


Şekil 7.22. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.

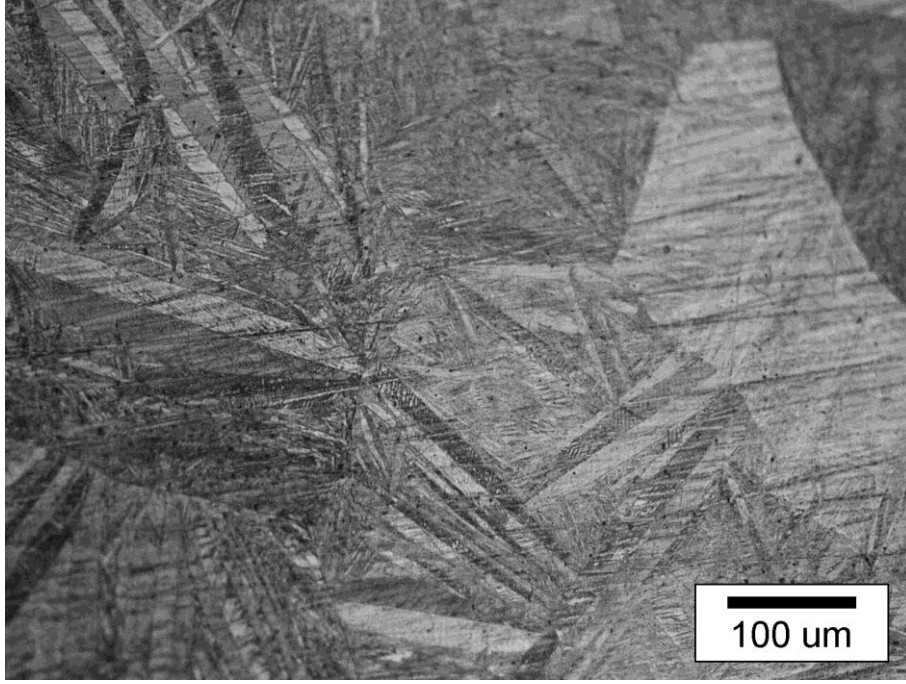


Şekil 7.23. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.

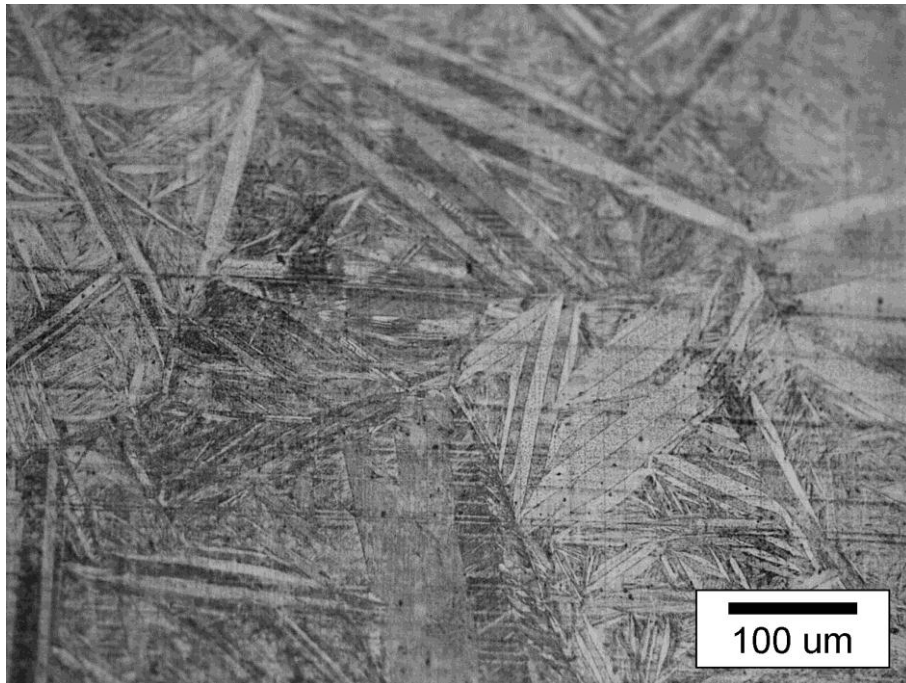
Şekil 7.24-7.28’de CAM-2 alaşımına ait 100 büyütme ile çekilen optik mikrograf resimleri görülmektedir. Oda sıcaklığında yapılar tamamen martensit fazdadır. Bu yapıların bazıları V-tipi bazıları ise iğne tipi martensitlerdir. Bu yüzey fotoğraflarında martensit yapılar farklı yönelimler de göstermektedir. CAM-2 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C sıcaklıklarında yaşlandırma işlemine tabi tutulan parçaların yüzey fotoğrafları incelendiğinde; yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak numune içerisinde yavaş yavaş tane sınırları belirginleşirken martensit yüzeyler kaybolmaya başlamıştır. Ayrıca şekil hatırlama etkisini olumsuz yönde etkileyen çökelti fazları da mevcuttur. Buradan yaşlandırma sıcaklığı arttıkça çökelti fazları artmakta buna bağlı olarak da şekil hatırlama etkisinde değişimler olmaktadır.



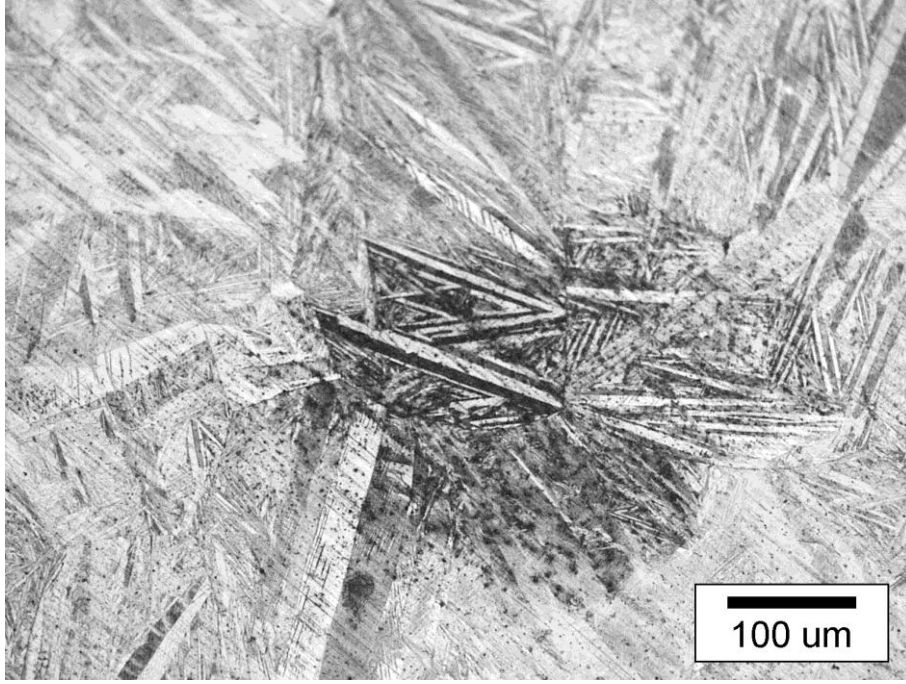
Şekil 7.24. CAM-2 alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



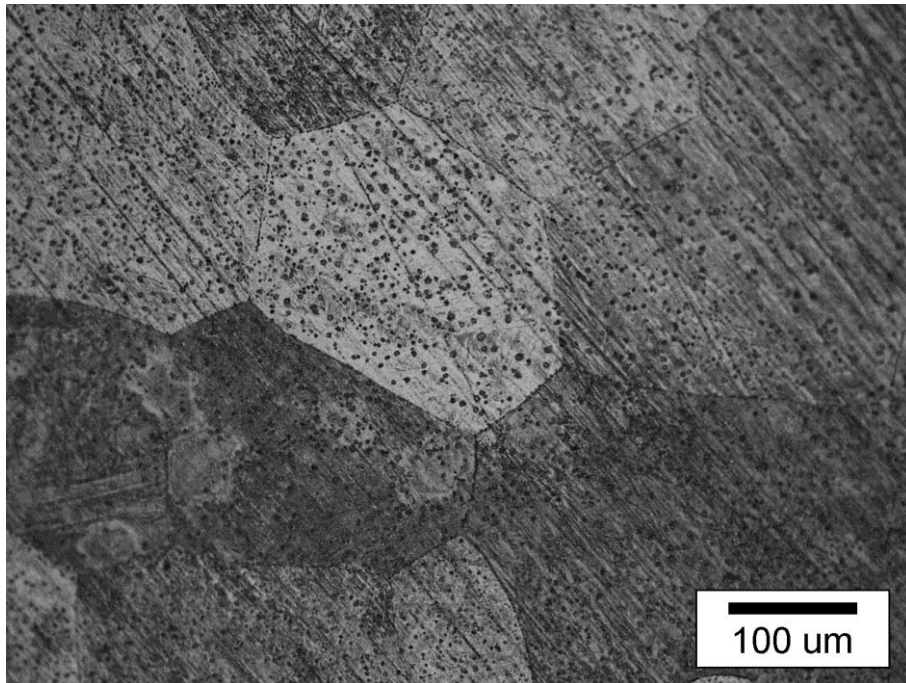
Şekil 7.25. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



Şekil 7.26. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.

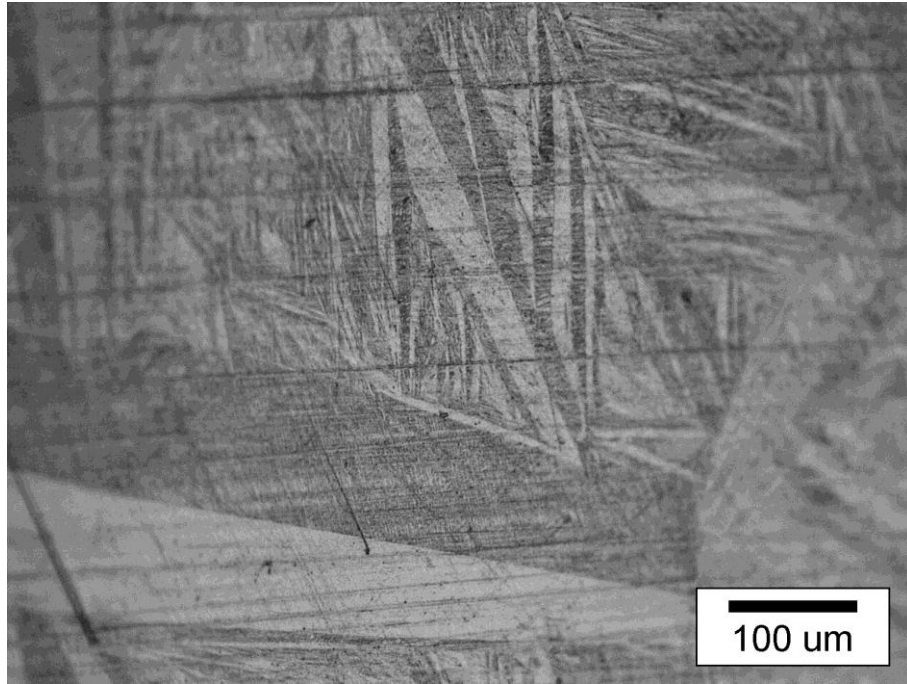


Şekil 7.27. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.

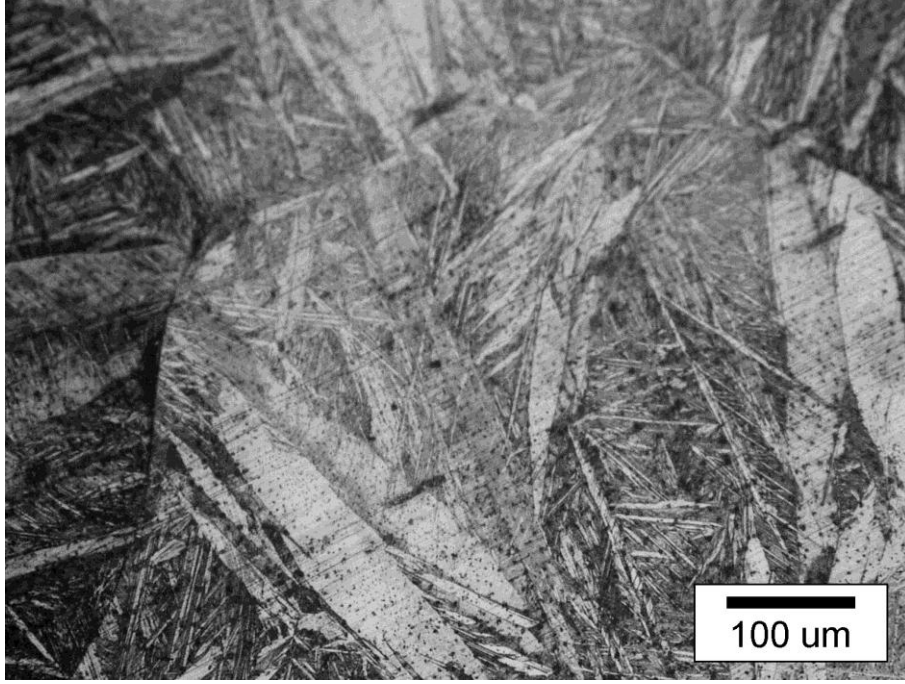


Şekil 7.28. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.

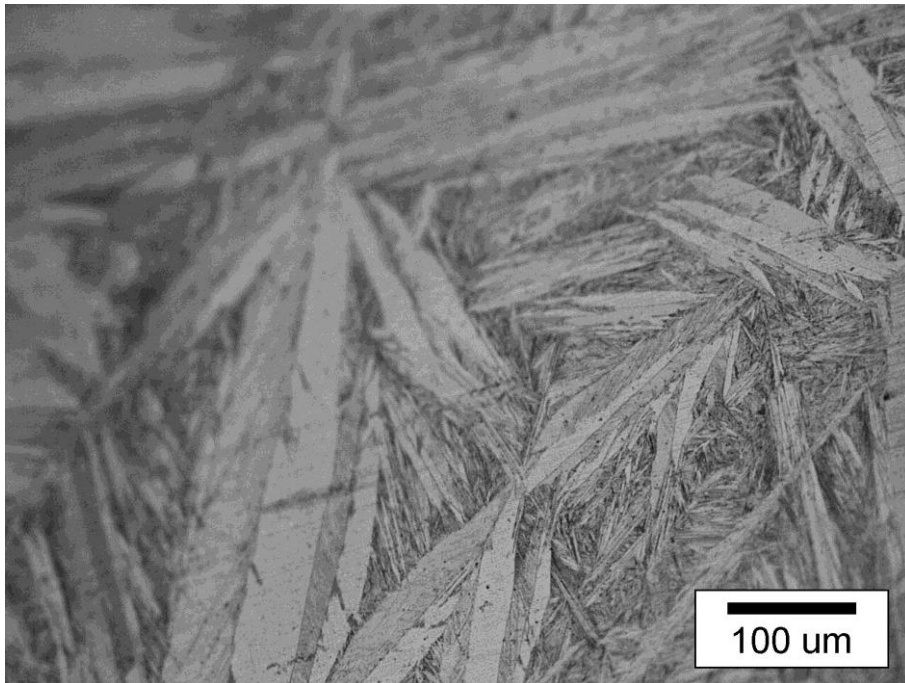
Şekil 7.29-7.33'de CAM-3 alaşımına ait 100 büyütme ile çekilen optik mikrograf resimleri görülmektedir. Oda sıcaklığında yapılar tamamen martensit fazdadır. Bu yapıların bazıları V-tipi bazıları ise iğne tipi martensitlerdir. Bu yüzey fotoğraflarında martensit yapılar farklı yönelimler de göstermektedir. CAM-3 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C'de sıcaklıklarında yaşlandırma işlemine tabi tutulan parçalarının yüzey fotoğrafları incelendiğinde; yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak numune içerisinde yavaş yavaş tane sınırları belirginleşirken martensit yüzeyler kaybolmaya başlamıştır. Ayrıca şekil hatırlama etkisini olumsuz yönde etkileyen çökelti fazları da mevcuttur. Buradan yaşlandırma sıcaklığı artıkça çökelti fazları artmakta buna bağlı olarak da şekil hatırlama etkisinde değişimler olmaktadır.



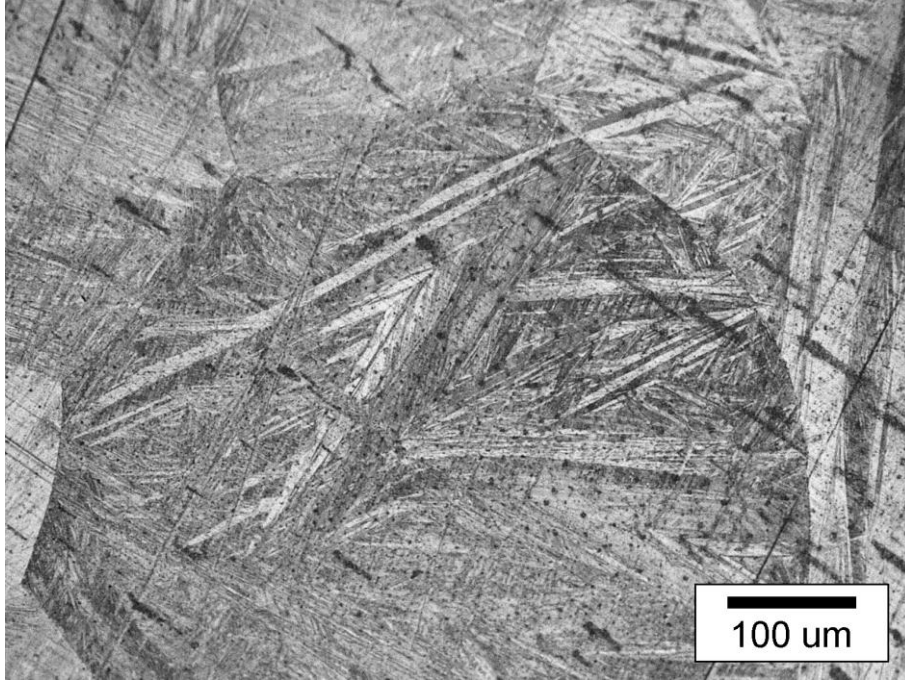
Şekil 7.29. CAM-3 alaşımına ait 100µm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



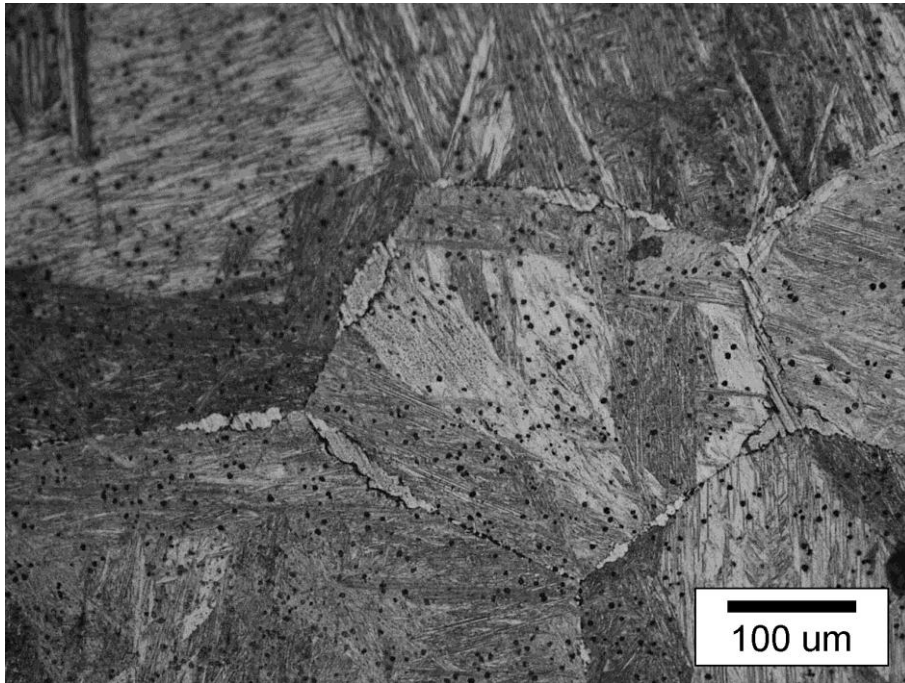
Şekil 7.30. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



Şekil 7.31. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



Şekil 7.32. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.



Şekil 7.33. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımına ait 100μm büyütme ile çekilen yüzey mikrografı.

7.3. Termal Analiz Sonuçları

Külçe şeklinde ergitme yöntemi ile elde edilen numunelerin austenit $\leftrightarrow$ martensit durumlarda dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek için DSC cihazına uyacak şekilde, CAM-1, CAM-2, CAM-3 numuneleri küçük külçeler halinde kesildi. Daha sonra bu küçük külçeler şeklinde kesilmiş bu numuneler ayrı ayrı 5 °C/dk, 15 °C/dk, 25 °C/dk, 35 °C/dk, 45°C/dk, farklı ısıtma hızları şekil 7.34 de Shimadzu DSC-60A marka cihaz ile DSC ölçümleri alındı. Aynı numuneye ait 4 farklı parça kesilip ayrı ayrı 200 °C, 300°C, 400 °C, 500 °C sıcaklıklarında 1 saat yaşlandırılma işlemine maruz bırakıldı. Bu yaşlandırma sonunda her bir yaşlanmış numune için ayrı ayrı 5 °C/dk, 15 °C/dk, 25 °C/dk, 35 °C/dk, 45°C/dk, farklı ısıtma hızları şekil 7.34 de Shimadzu DSC-60A marka cihaz ile DSC ölçümleri alındı. Her ısıtma hızına karşılık, A_f , A_s , M_f , M_s dönüşüm sıcaklıkları, A_{max} değerleri, ΔH entalpi değerleri Shimadzu DSC-60A marka cihaz ile belirlendi.



Şekil 7.34. Shimadzu DSC-60A Diferansiyel taramalı kalorimetri cihazı.

DSC ölçümlerinde dönüşüm sıcaklıkları, numuneye uygulanan işlemlere ve yaşlandırmaya bağlı olarak değişebilmektedir.

Bu çalışmada CAM-1, CAM-2, CAM-3 alaşımları yaşlandırma işlemine tabi tutulmadan önce kıyaslama yapmak için DSC ölçümleri ve analizleri yapıldı. Daha sonra numuneler ayrı ayrı farklı sıcaklıklarda 1 saat sürede 200, 300, 400, 500 °C de yaşlandırma işlemine tabi tutulup, oda sıcaklığındaki suda soğutup ölçümler alındığında; numunenin dönüşüm sıcaklıkları belirlendi.

Bu değerlerden yararlanılarak kinetik parametrelerin (entalpi, entropi) hesapları yapıldı. Yaşlandırmanın bu değerler üzerine etkileri incelendi.

Cu-Al-Mn üçlü alaşımında alaşım birleşim oranları dönüşüm sıcaklıkları üzerine etkileri mevcuttur. Al ve Mn elementleri dönüşüm sıcaklıklarına düşürücü etkileri vardır. Alaşım kompozisyonunda mangan oranı arttıkça dönüşüm sıcaklıkları da azalır [37].

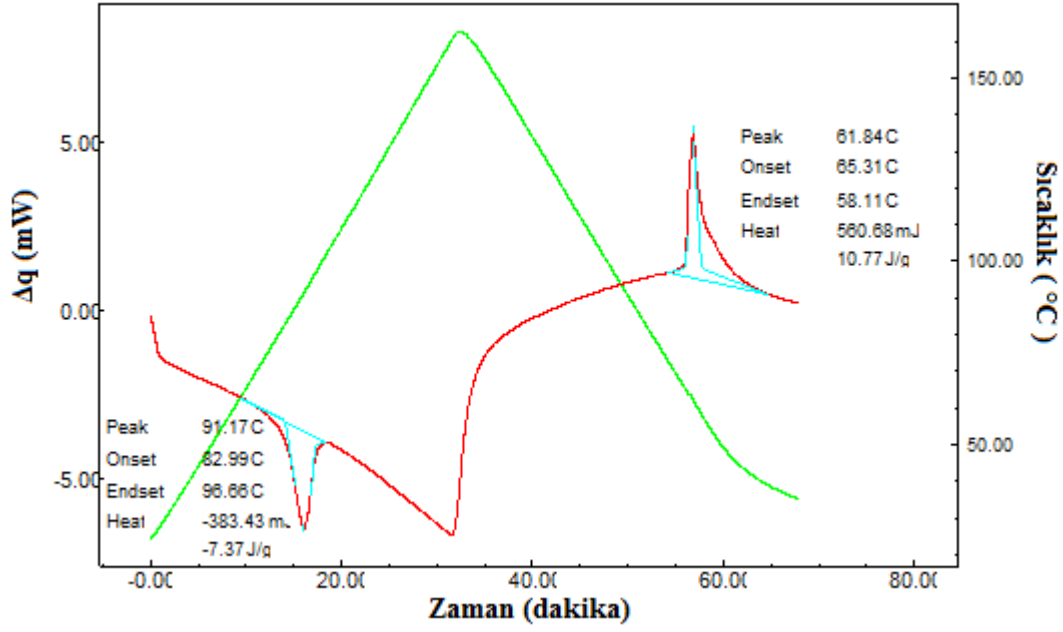
Cu-Al-Mn üçlü alaşımında yaşlandırmaya bağlı olarak alaşımın dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler söz konusudur. Alaşımında yaşlandırma sıcaklığı arttıkça genel olarak dönüşüm sıcaklıkları da artmaktadır. Aynı zamanda alaşımında yaşlandırmaya bağlı çökelti fazları mevcuttur bu çökelti fazları yaşlandırma sıcaklığı ile aynı oranda artış göstermektedir [36].

Cu-Al-Mn üçlü alaşımında yaşlandırma sıcaklığına artışına bağlı olarak çökelti fazları da artmaktadır. Bu çökelti fazları artışı dönüşüm sıcaklıklarında artışa sebep olurken aynı zaman da da martensit yüzeyler kaybolur. Tane sınırları genişler ve belirgin bir hal alır. [17, 37].

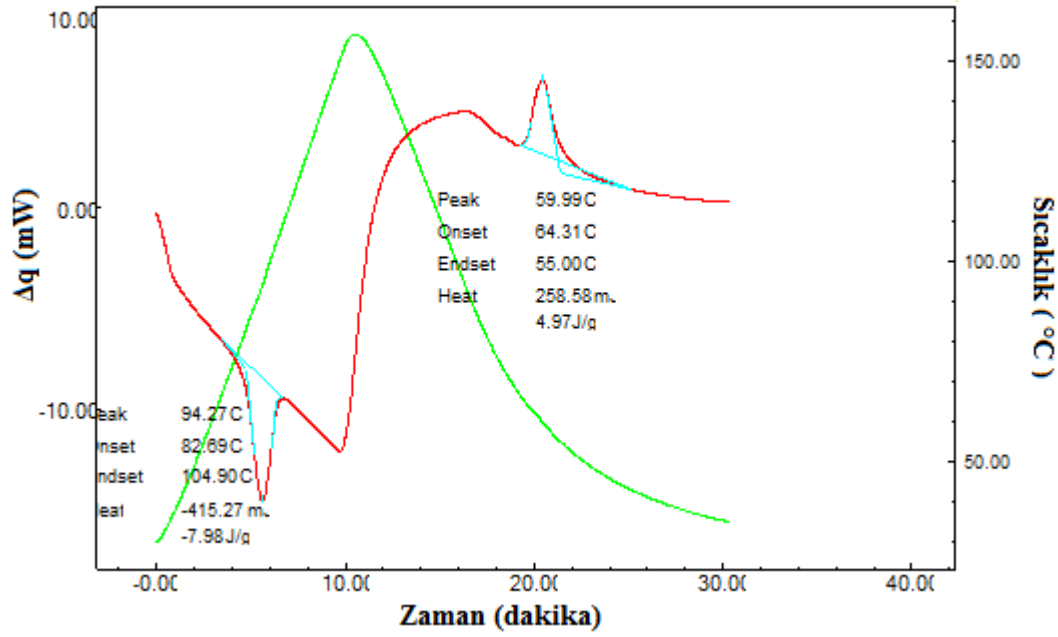
7.3.1. CAM-1 Alaşımı Termal Analiz Sonuçları

CAM-1 numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.35 – 7.39 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.19 de özetlenmiştir.

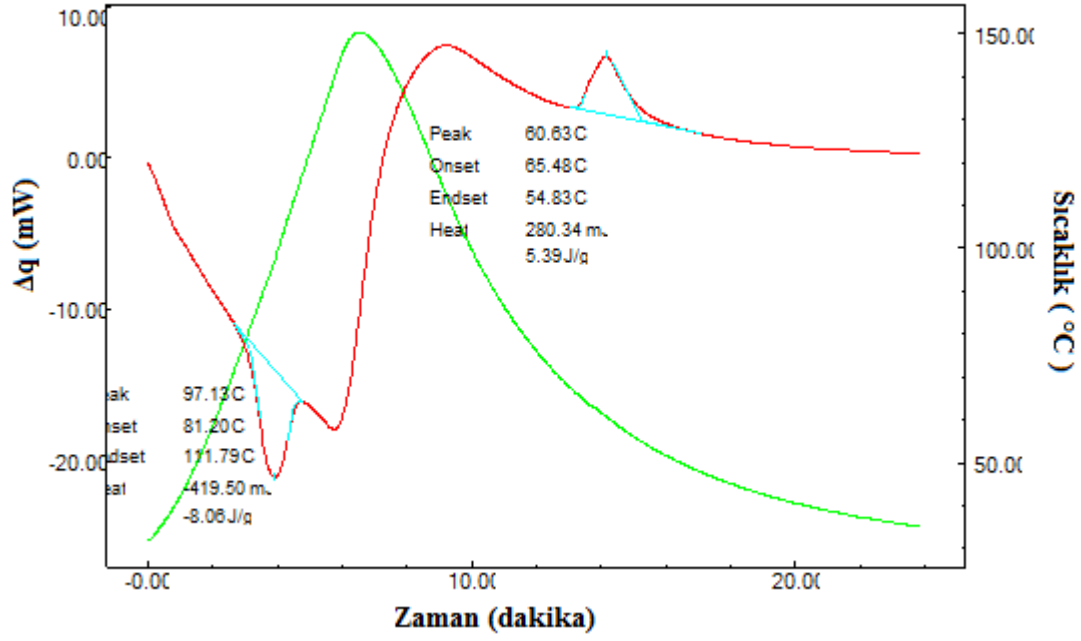
CAM-1 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile austenit başlama ve bitiş sıcaklıkları 82.99-96.66 °C, 82.69-104.90 °C, 81.20-111.79 °C, 79.85-118.35 °C, 88.16-112.16 °C dir. Her bir ısıtma hızı için martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 65.31-58.11 °C, 64.31-55.00 °C, 65.48-54.83 °C, 65.62-54.88 °C, 64.82-57.51 °C, olarak belirlenip tablo 7.19 da verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken M_s sıcaklıkları sabit kalmış A_s ve M_f sıcaklıklarında önce düşüş sonra artışlar tespit edilmiştir. Bu değişimler şekil 7.40 de DSC eğrisinde ve tablo 7.19 da açıkça belirtilmektedir.



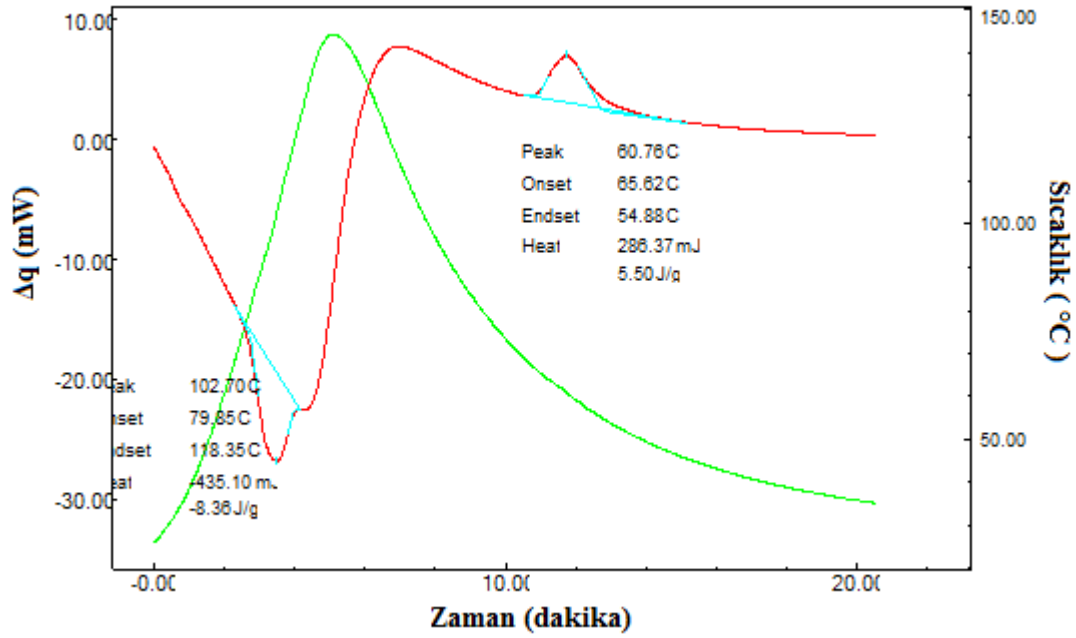
Şekil 7.35. CAM-1 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



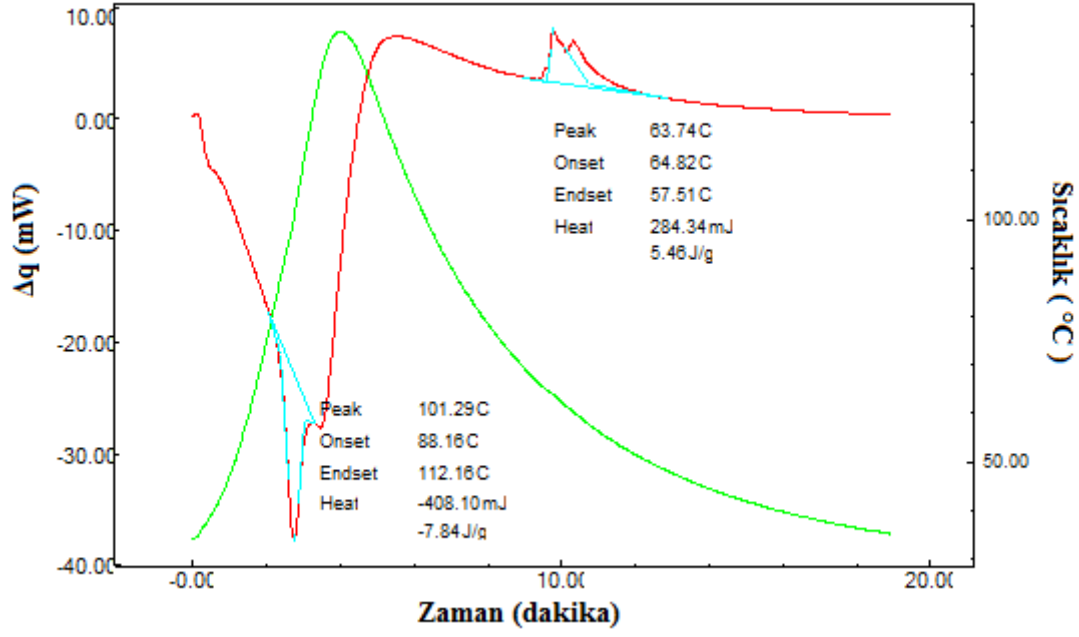
Şekil 7.36. CAM-1 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



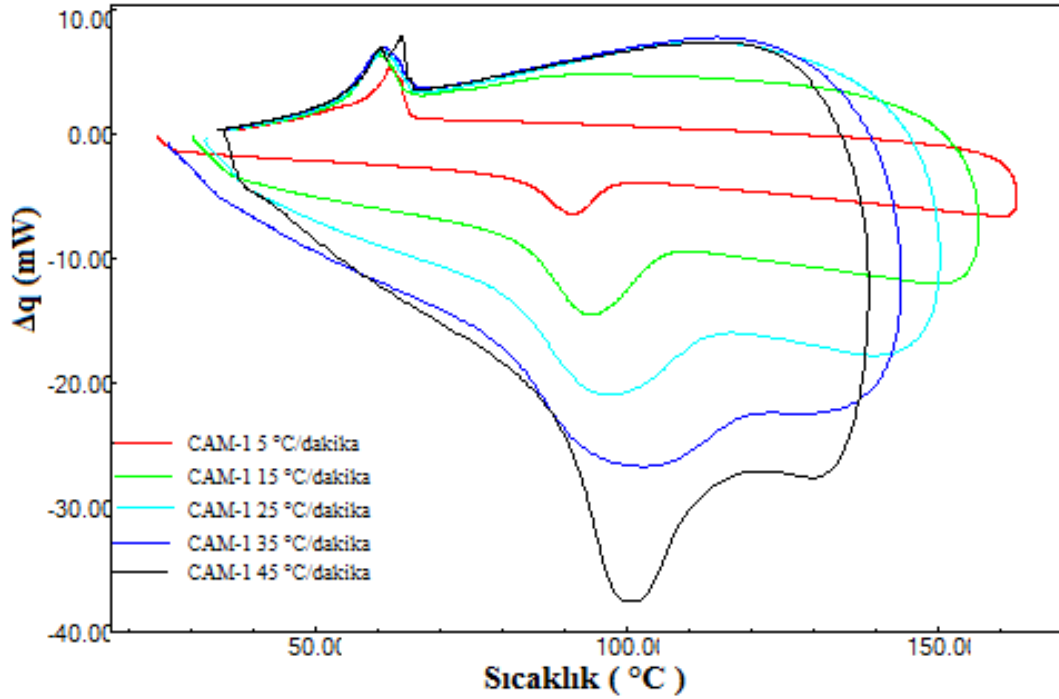
Şekil 7.37. CAM-1 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.38. CAM-1 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.39. CAM-1 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



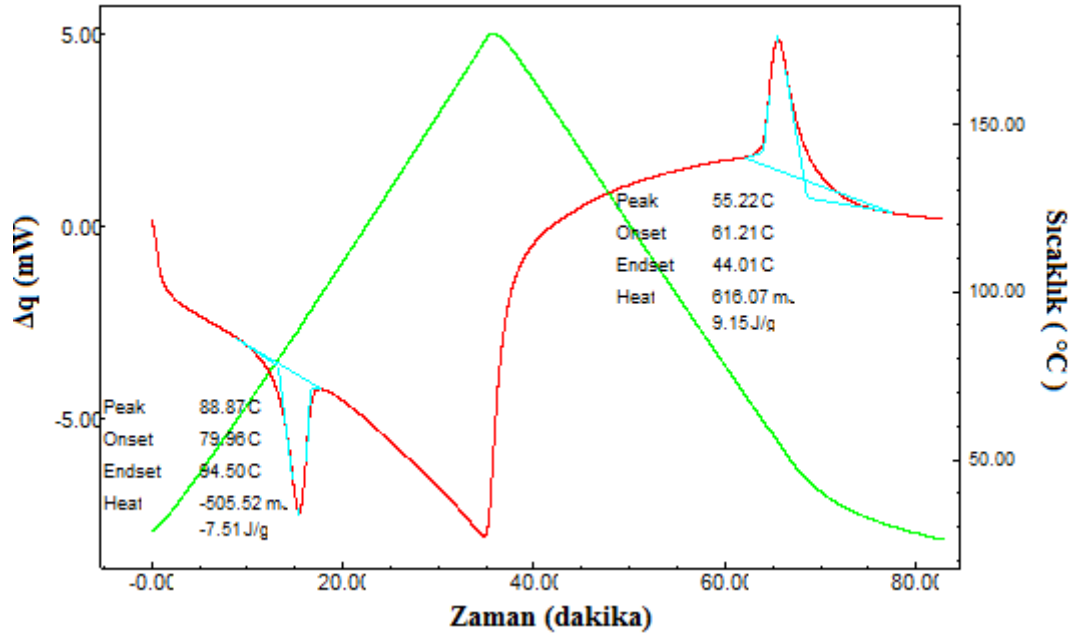
Şekil 7.40. CAM-1 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.19. CAM-1 numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

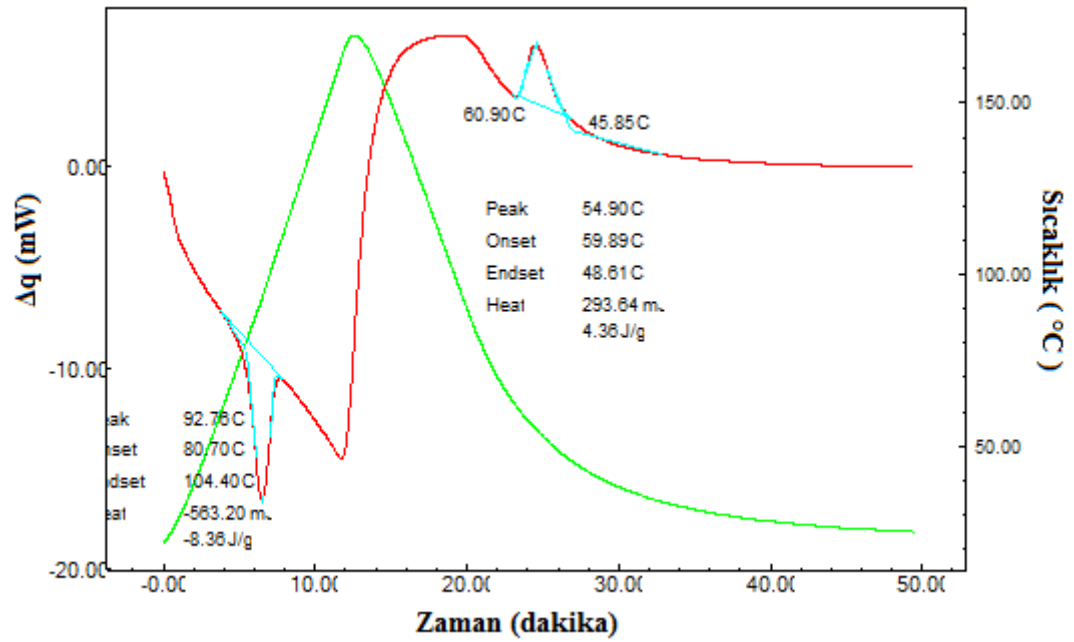
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	82.99	96.66	91.17	80.98	7.37	0.091	65.31	58.11	-10.77	-0.132
15	82.69	104.90	94.27	84.60	7.98	0.094	64.31	55.00	-4.97	-0.058
25	81.20	111.79	97.13	88.63	8.06	0.090	65.48	54.83	-5.39	-0.060
35	79.85	118.35	102.70	91.98	8.36	0.090	65.62	54.88	-5.50	-0.059
45	88.16	112.16	101.29	88.49	7.84	0.088	64.82	57.51	-5.46	-0.061

CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.41 – 7.45 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.20 de verilmiştir.

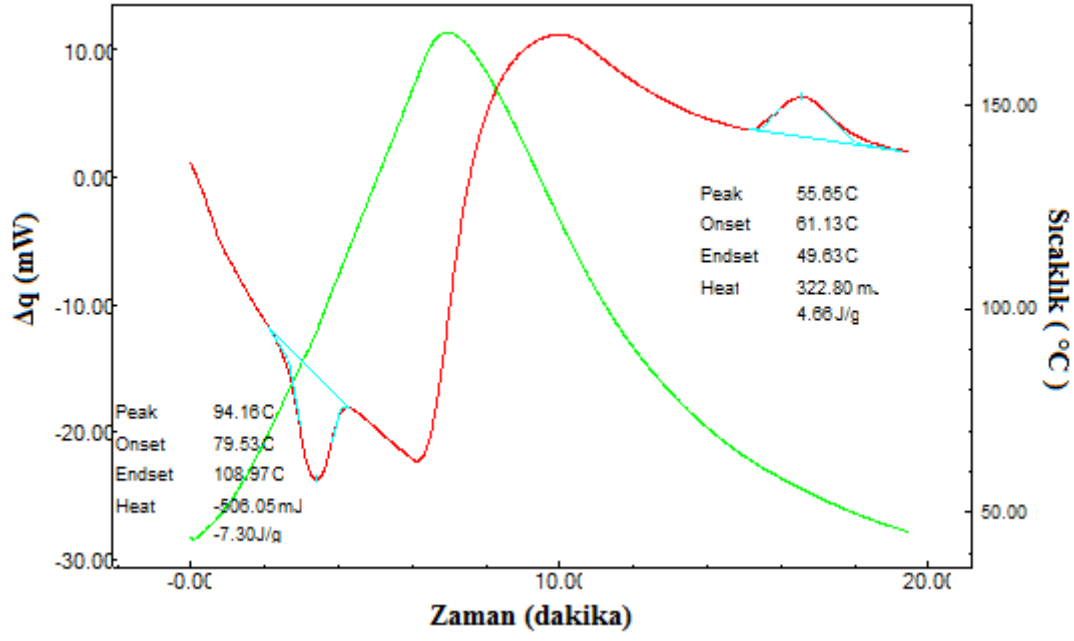
CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile austenit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları 79.96-94.50°C, 80.70-104.40°C, 79.53-108.97°C, 79.86-115.40°C, 88.47-119.85°C dir. Her bir ısıtma hızı için martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 61.21-44.01°C, 59.89-48.61°C, 61.13-49.63°C, 61.43-50.14°C, 60.72-48.16°C, olarak belirlenip tablo 7.20 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s , A_f ve M_s sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken M_f sıcaklıkları sabit kalmıştır şeklinde tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.46 de DSC eğrisinde ve tablo 7.20 de açıkça belirtilmektedir.



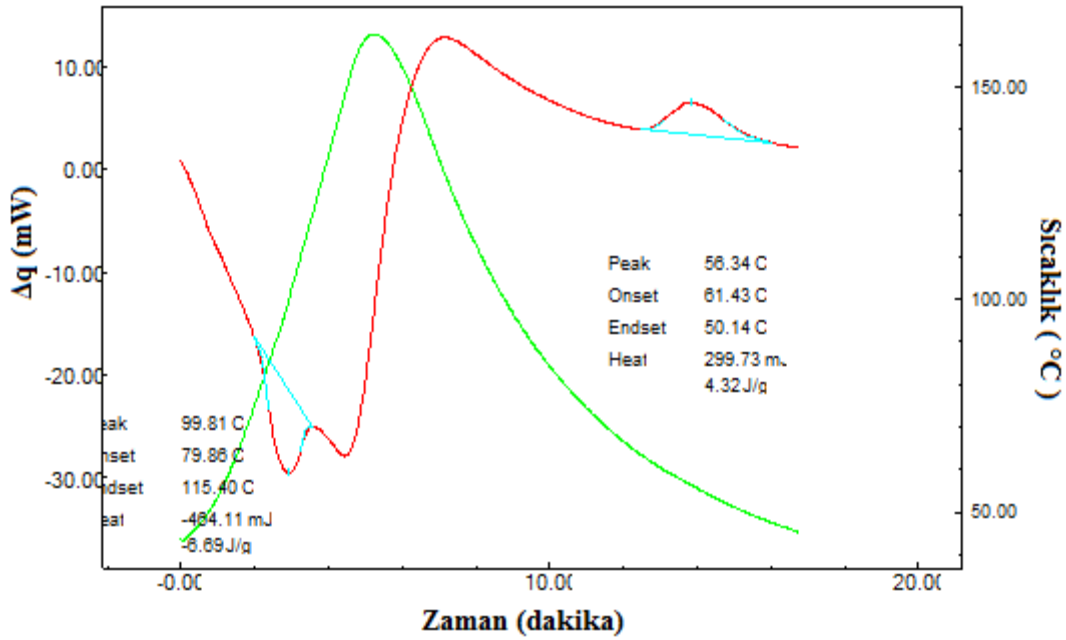
Şekil 7.41. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



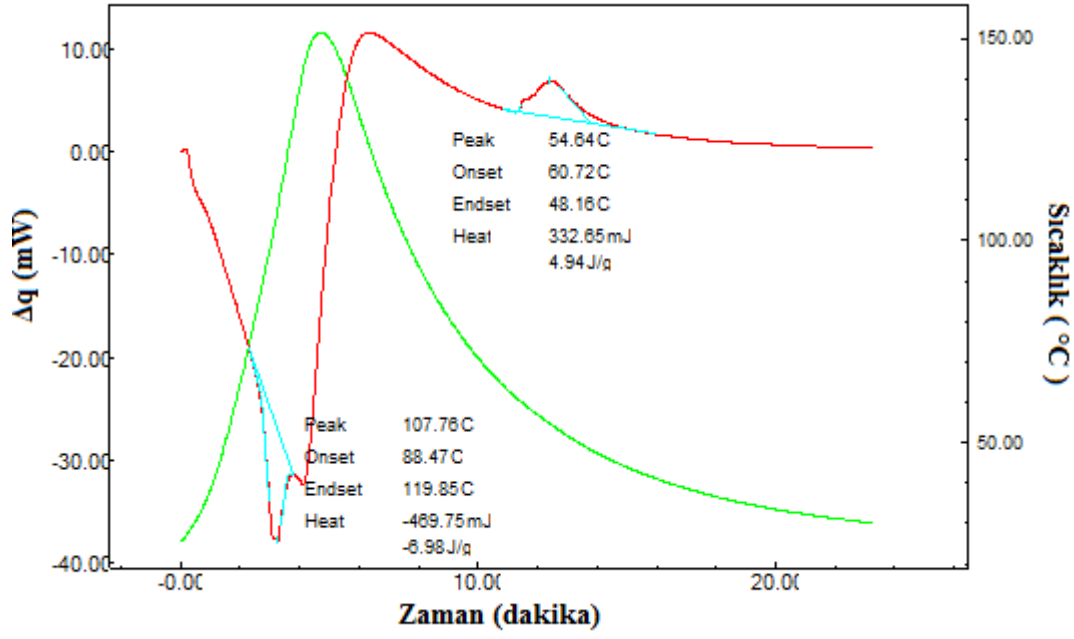
Şekil 7.42. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



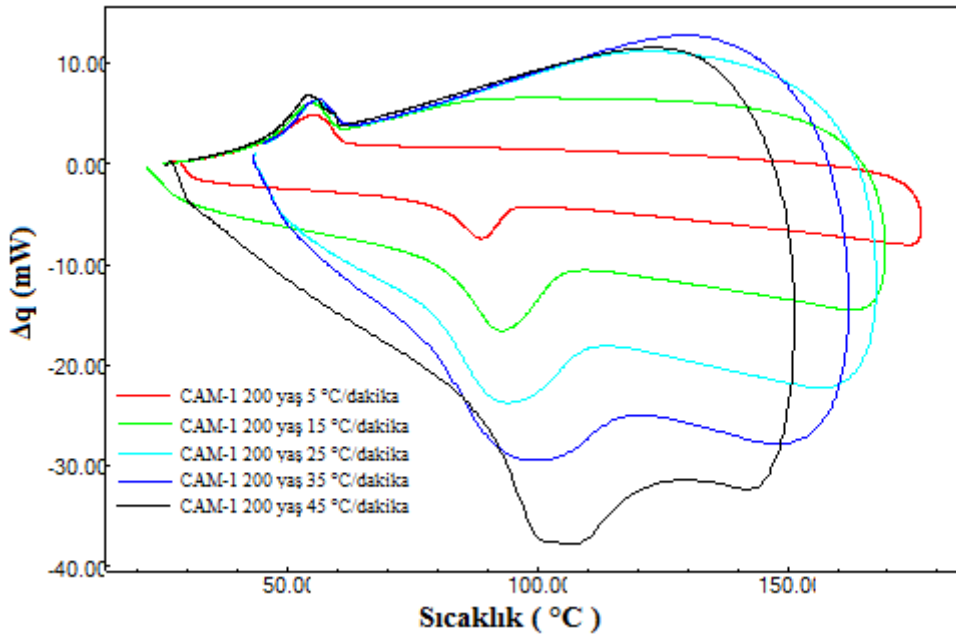
Şekil 7.43. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi



Şekil 7.44. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.45. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi



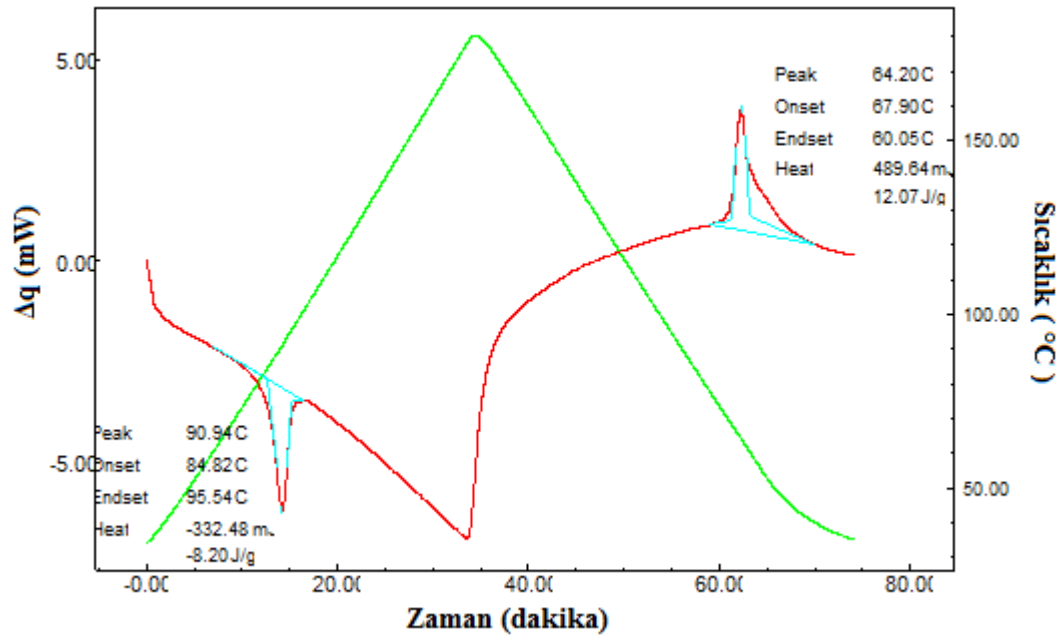
Şekil 7.46. CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.20. CAM-1 200 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

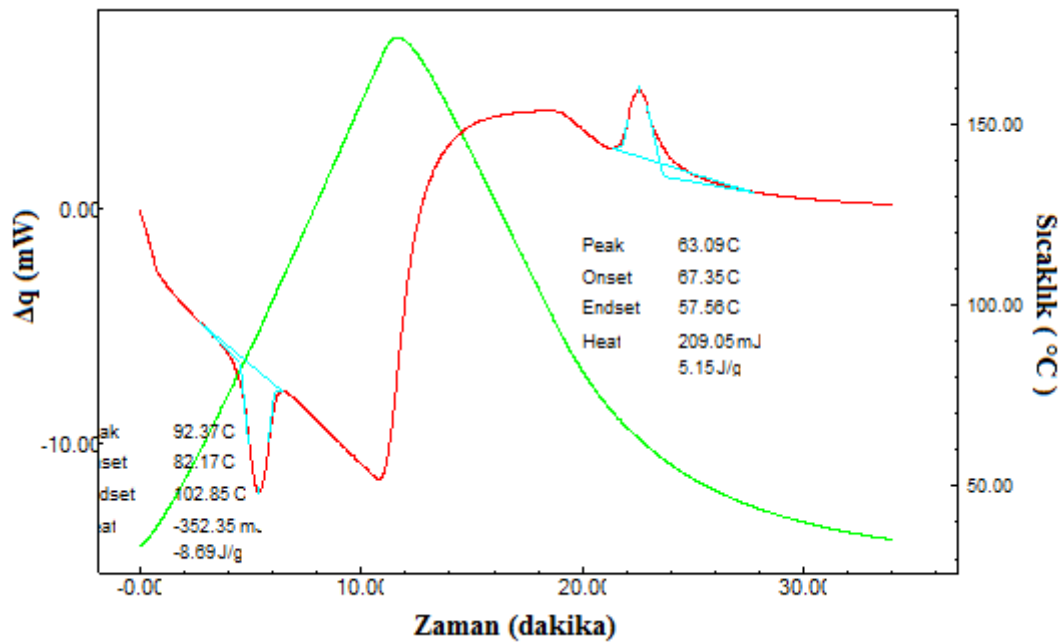
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	79.96	94.50	88.87	77.85	7.51	0.096	61.21	44.01	-9.15	-0.117
15	80.70	104.40	92.76	82.14	8.36	0.101	59.89	48.61	-4.36	-0.053
25	79.53	108.97	94.16	85.05	7.30	0.085	61.13	49.63	-4.66	-0.054
35	79.86	115.40	99.81	88.41	6.69	0.075	61.43	50.14	-4.32	-0.048
45	88.47	119.85	107.76	90.28	6.98	0.077	60.72	48.16	-4.94	-0.054

CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.47 – 7.51 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.21 de verilmiştir.

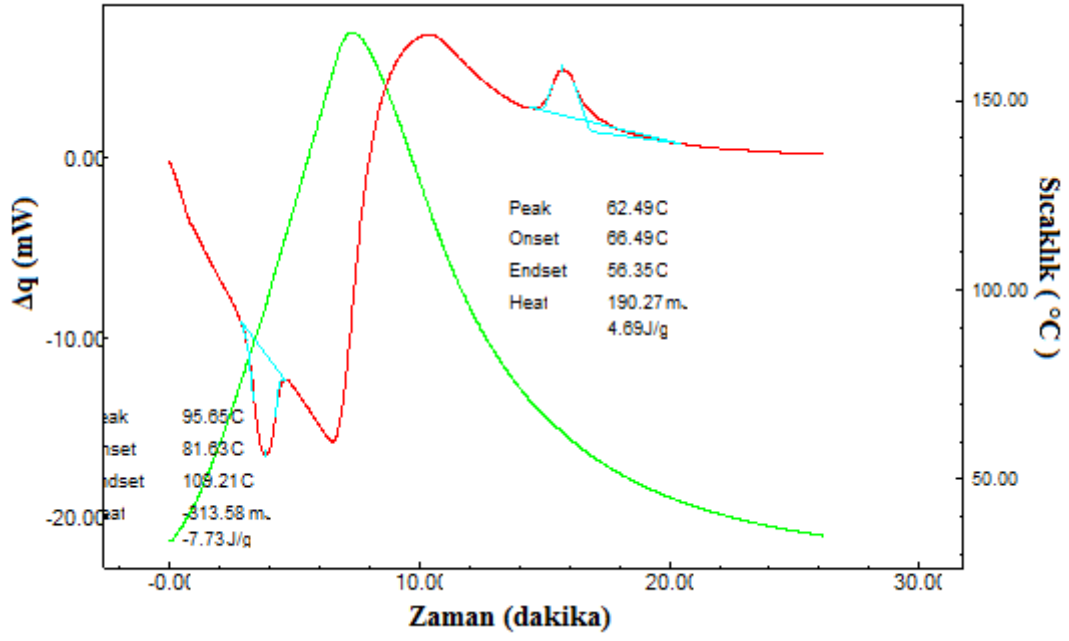
CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile austenit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları 84.82-95.54°C, 82.17-102.85°C, 81.63-109.21°C, 78.19-116.01°C, 76.89-121.50°C dir. Martensit başlama ve bitiş sıcaklıkları sırası ile 67.90-60.05°C, 67.35-57.56°C, 66.49-56.35°C, 66.28-55.90°C, 66.67-55.34°C, olarak belirlenip tablo 7.21 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken M_f , M_s ve A_s sıcaklıklarında azalış tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.52 da DSC eğrisinde ve tablo 7.21 de açıkça belirtilmektedir.



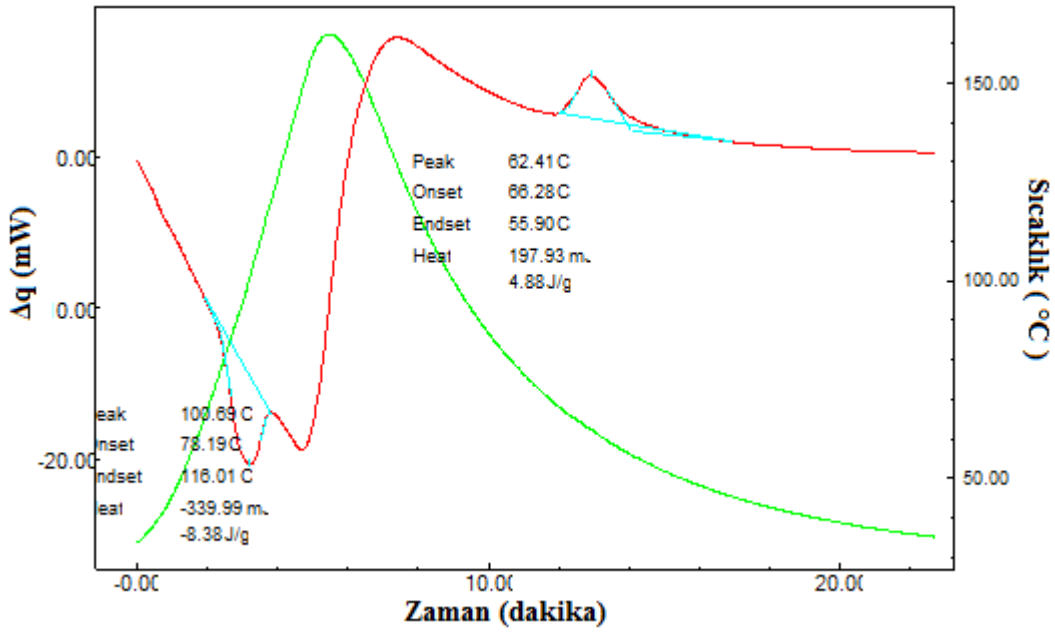
Şekil 7.47. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



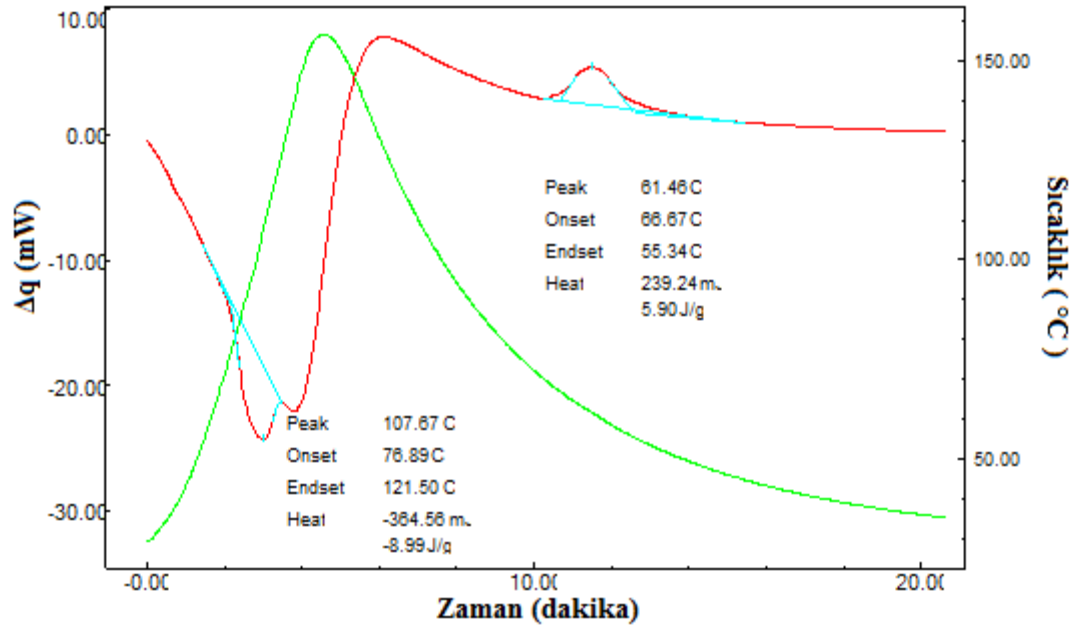
Şekil 7.48. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



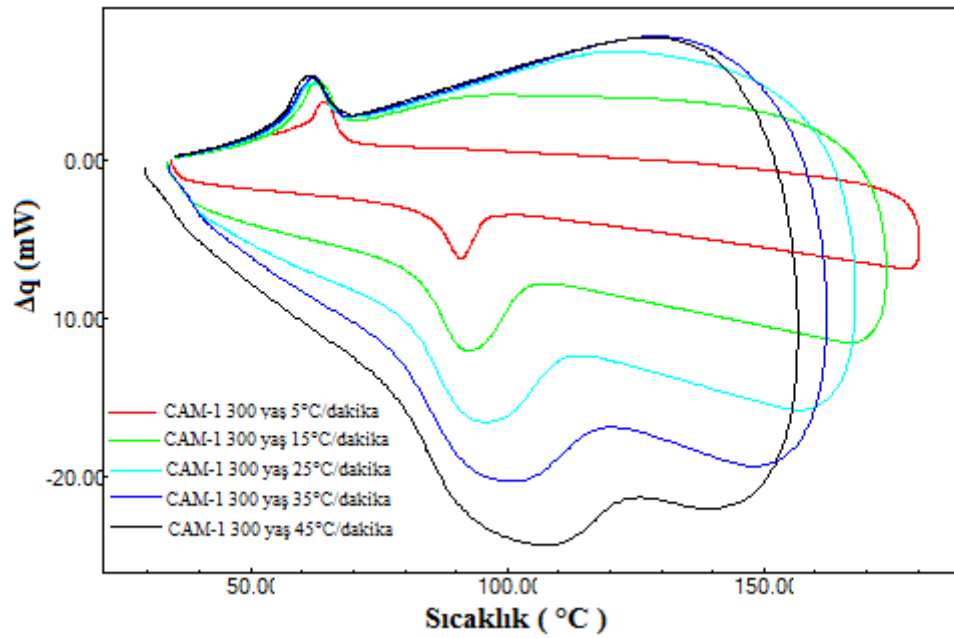
Şekil 7.49. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.50. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.51. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



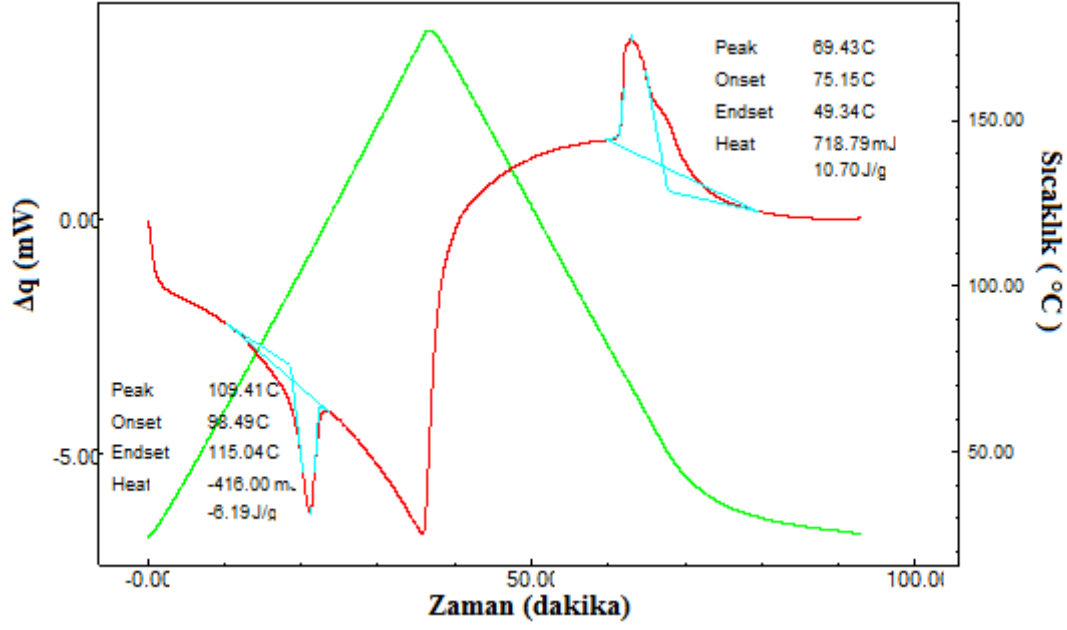
Şekil 7.52. CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.21. CAM-1 300 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

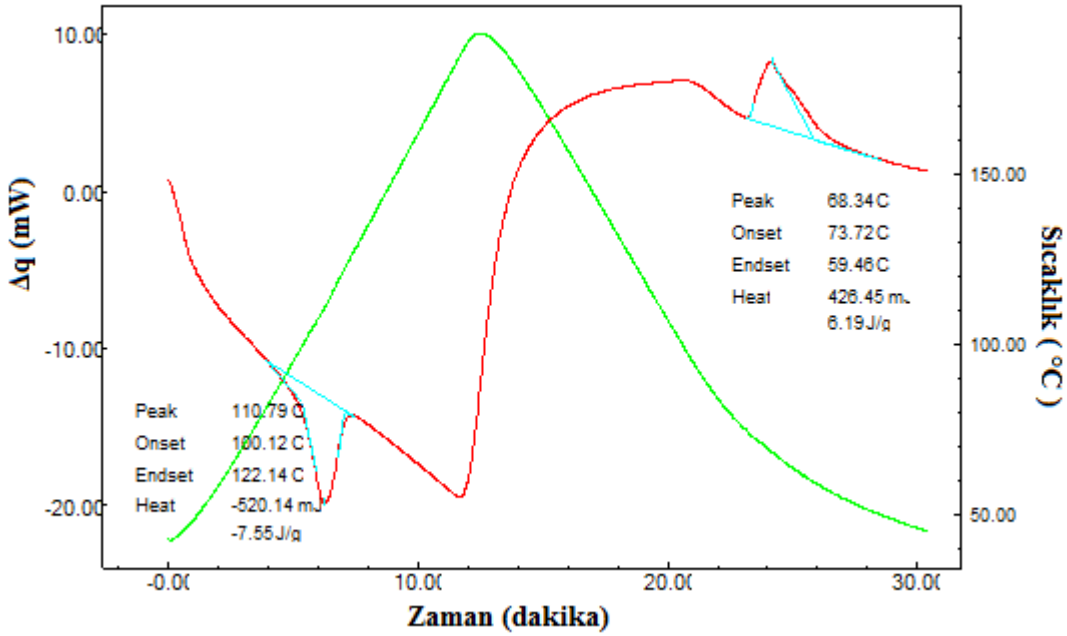
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	84.82	95.54	90.94	81.72	8.20	0.100	67.90	60.05	-12.07	-0.147
15	82.17	102.85	92.37	85.10	8.69	0.102	67.35	57.56	-5.15	-0.060
25	81.63	109.21	95.65	87.85	7.73	0.087	66.49	56.35	-4.69	-0.053
35	78.19	116.01	100.69	91.14	8.38	0.091	66.28	55.90	-4.48	-0.049
45	76.89	121.50	107.67	94.08	8.99	0.095	66.67	55.34	-5.90	-0.062

CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.53 – 7.57 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.22 de verilmiştir.

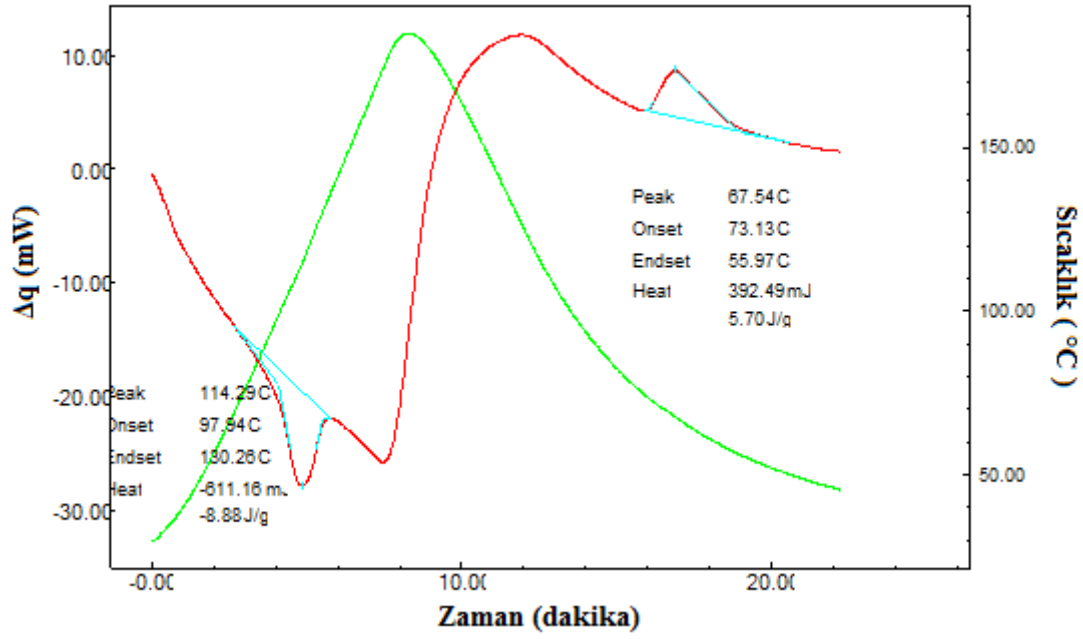
CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile austenit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları 98.49-115.04°C, 100.12-112.14°C, 97.94-130.26°C, 95.09-137.01°C, 98.72-138.56°C dir. Her bir ısıtma hızı için elde edilen martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 75.15-49.34°C, 73.72-59.46°C, 73.13-55.97°C, 74.47-57.36°C, 71.86-63.20°C, olarak belirlenip tablo 7.22 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_f , M_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, M_s sıcaklıklarında düşüş A_s sıcaklıklarında önce artış sonra düşüşler tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.58 da DSC eğrisinde ve tablo 7.22 de açıkça belirtilmektedir.



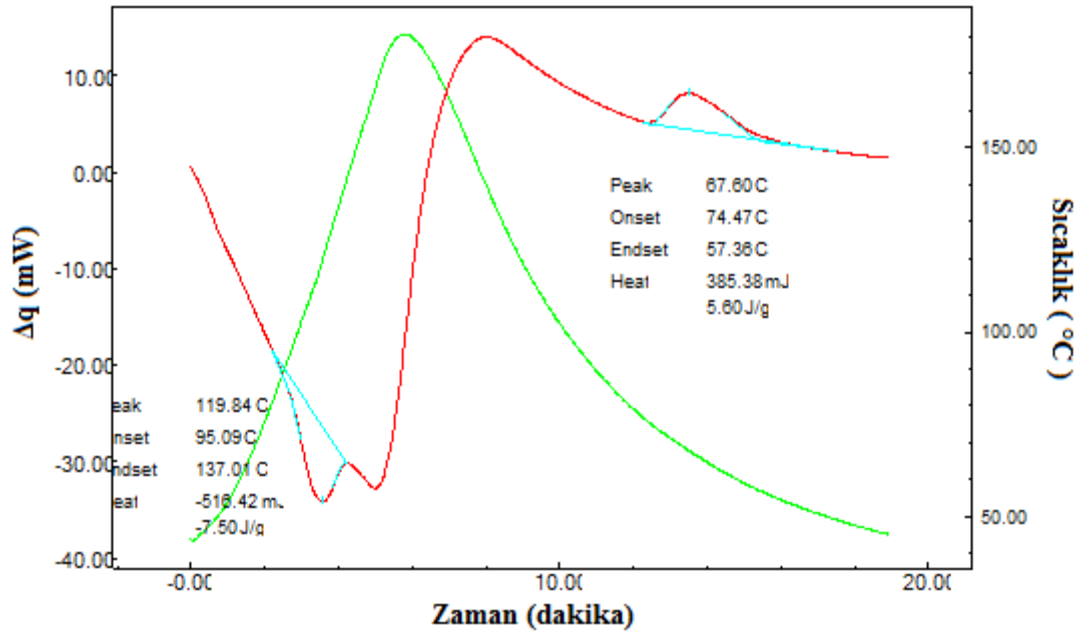
Şekil 7.53. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



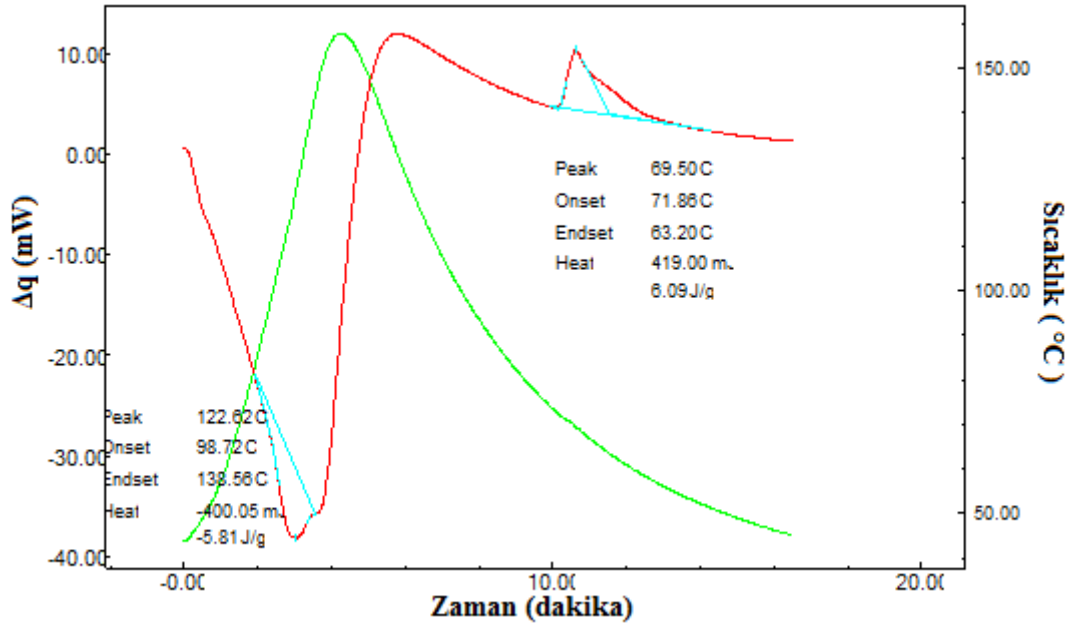
Şekil 7.54. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



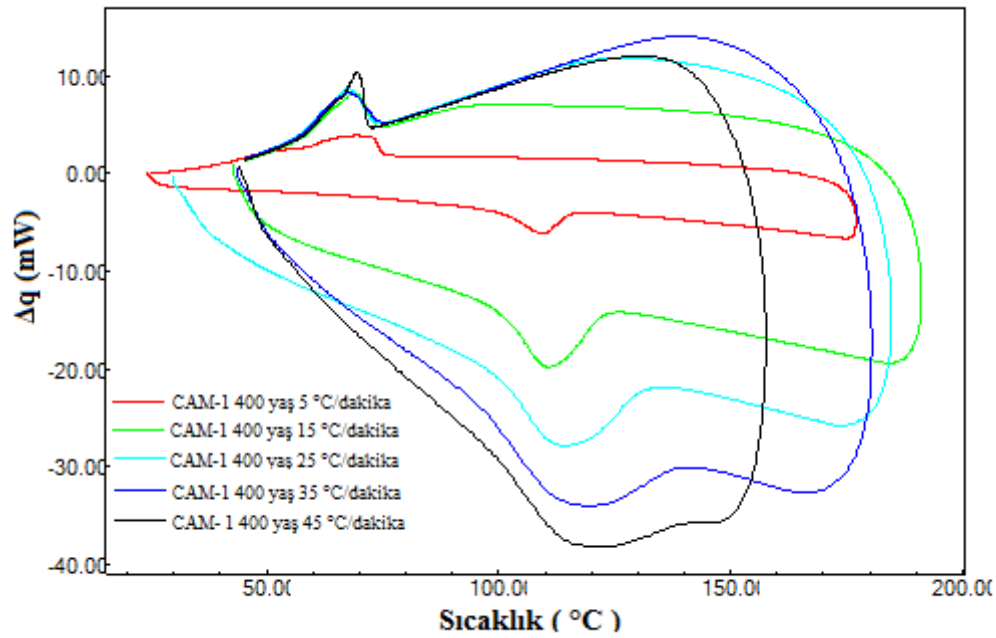
Şekil 7.55. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.56. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.57. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



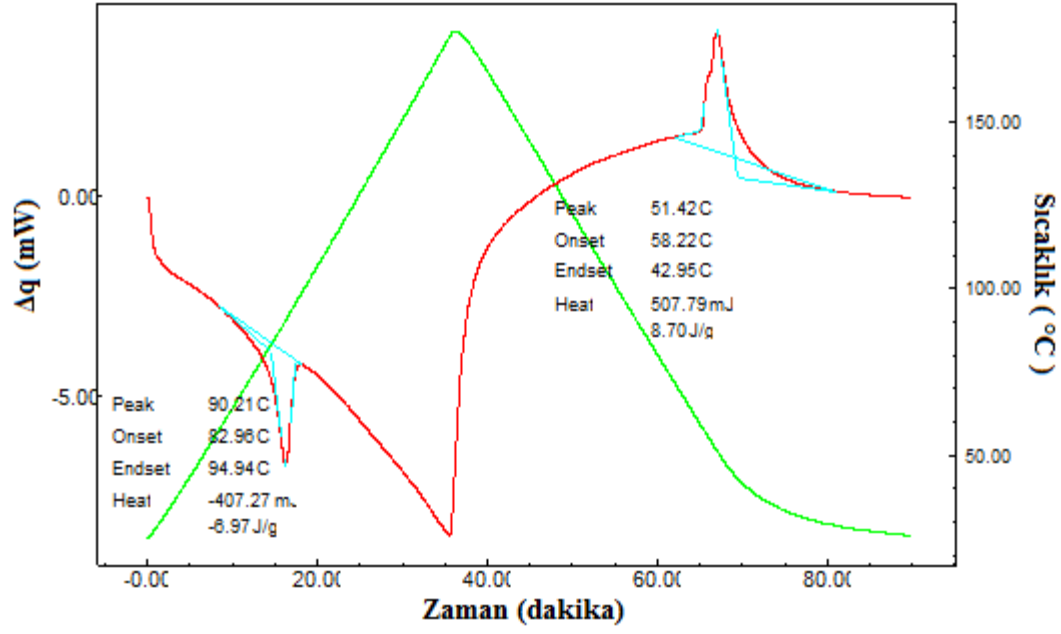
Şekil 7.58. CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.22. CAM-1 400 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

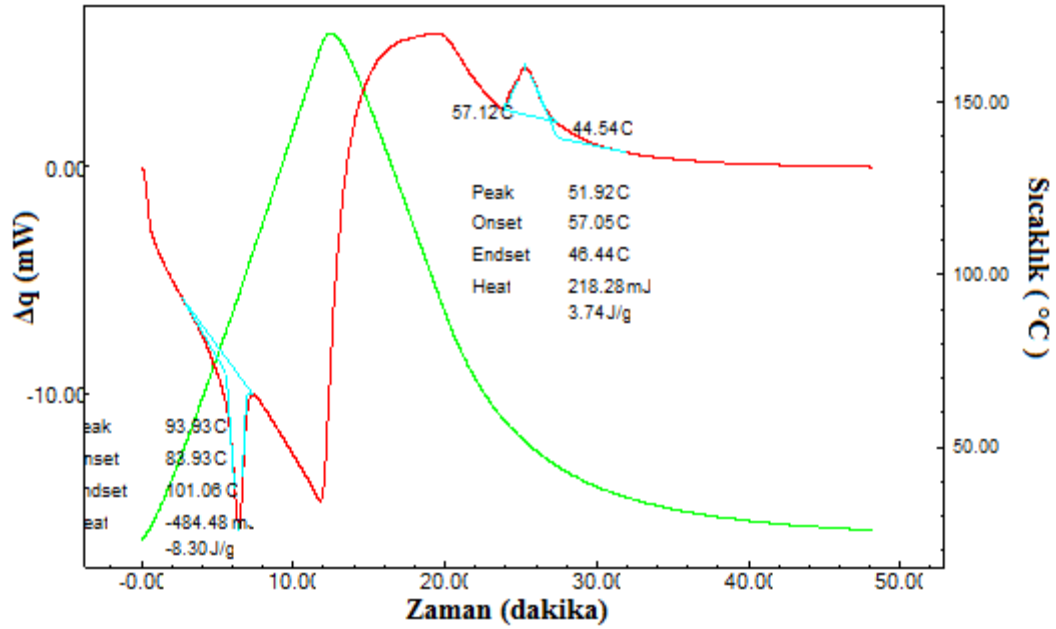
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	98.49	115.04	109.41	95.09	6.19	0.065	75.15	49.34	-10.70	-0.112
15	100.12	112.14	110.79	92.93	7.55	0.081	73.72	59.46	-6.19	-0.066
25	97.94	130.26	114.29	101.69	8.88	0.087	73.13	55.97	-5.70	-0.056
35	95.09	137.01	119.84	105.74	7.50	0.070	74.47	57.36	-5.60	-0.052
45	98.72	138.56	122.62	105.21	5.81	0.055	71.86	63.20	-6.09	-0.057

CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.59 – 7.63 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.23 de verilmiştir.

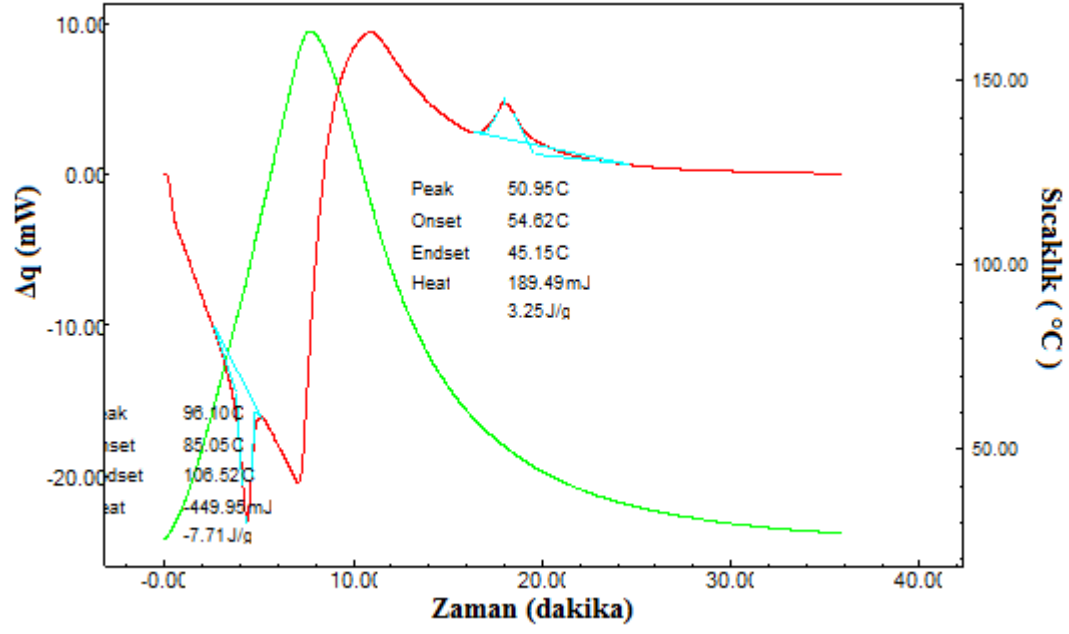
CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları sırası ile austenit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları 82.96-94.94°C, 83.93-101.06°C, 85.05-106.52°C, 84.32-109.92°C, 84.68-114.14°C dir. Her bir ısıtma hızı için elde edilen martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 58.22-42.95°C, 57.05-46.44°C, 54.62-45.15°C, 55.33-44.77°C, 55.97-45.31°C, olarak belirlenip tablo 7.23 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s , A_f ve M_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, M_s sıcaklıkları önce azalmış sonra artışlar tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.64 da DSC eğrisinde ve tablo 7.23 de açıkça belirtilmektedir.



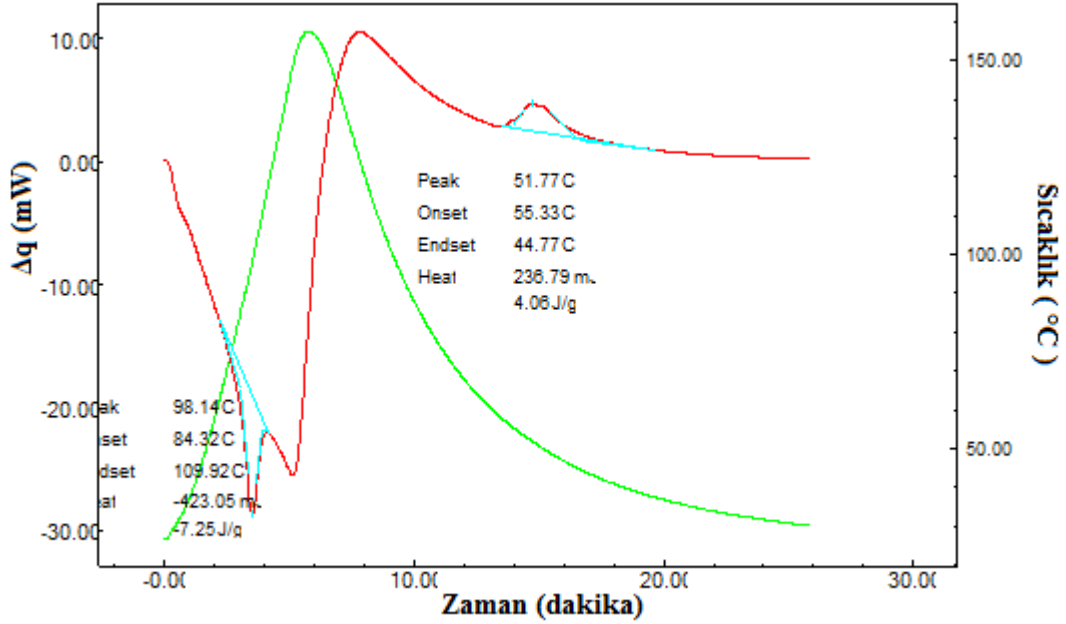
Şekil 7.59. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



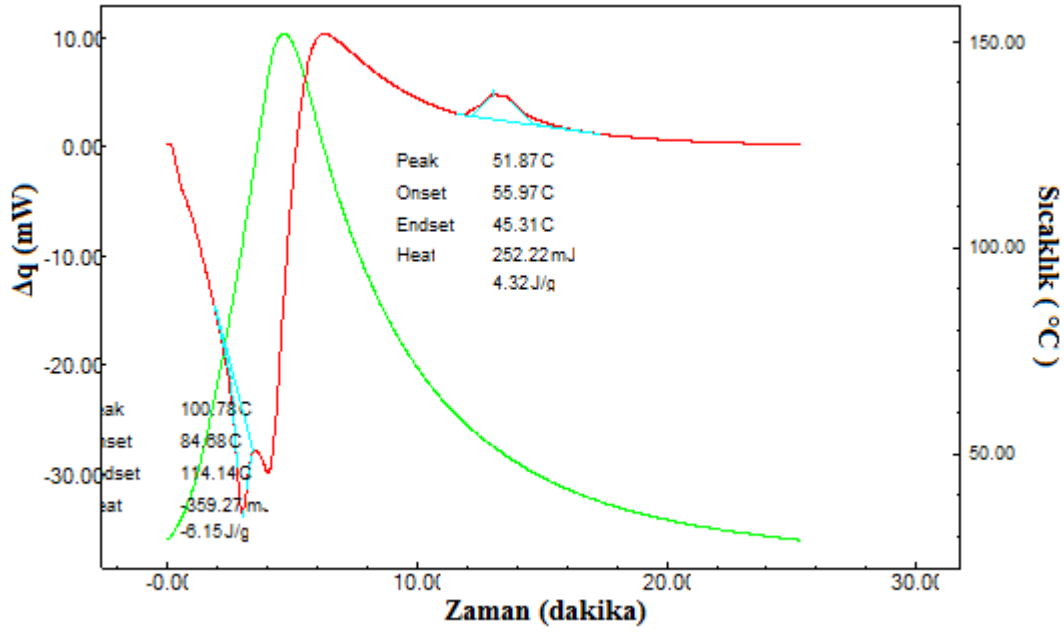
Şekil 7.60. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



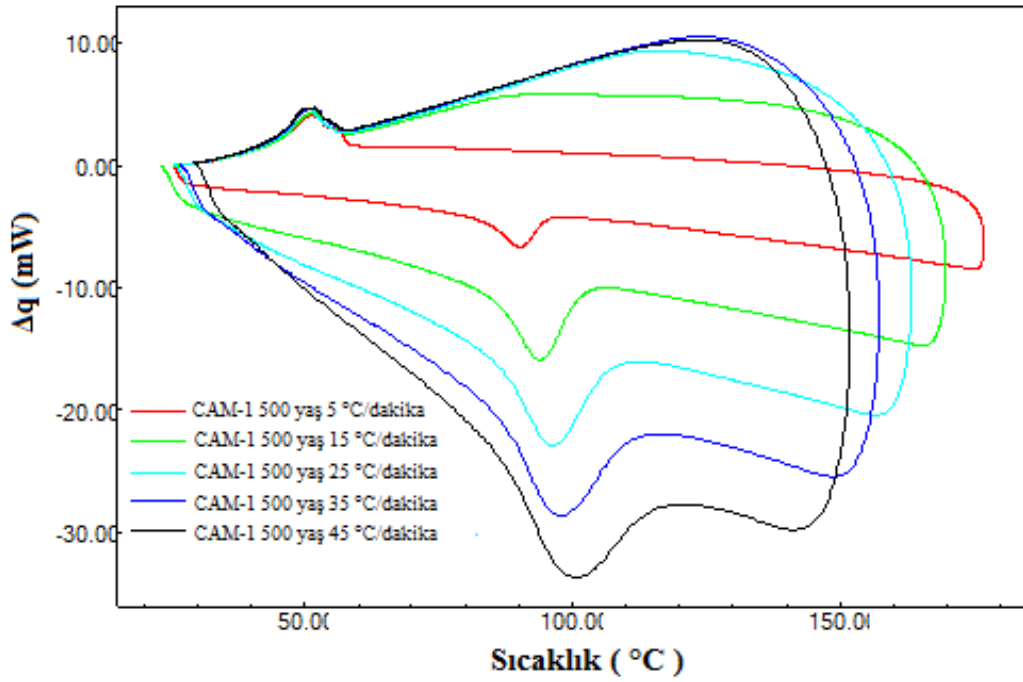
Şekil 7.61. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.62. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.63. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.64. CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

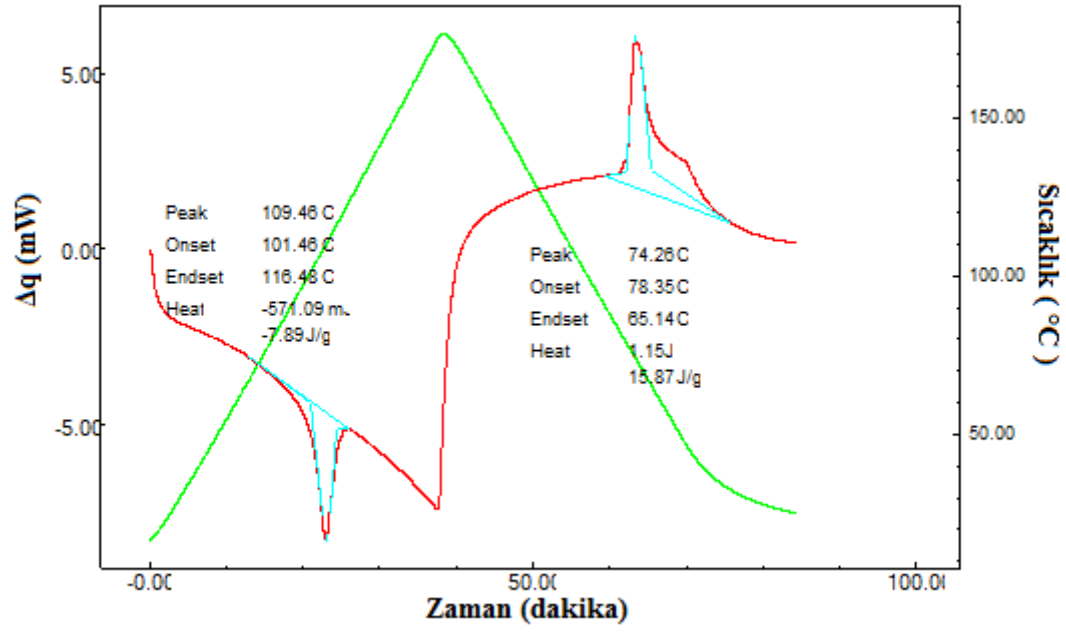
Tablo 7.23. CAM-1 500 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	82.96	94.94	90.21	76.58	6.97	0.091	58.22	42.95	-8.70	-0.113
15	83.93	101.06	93.93	79.05	8.30	0.104	57.05	46.44	-3.74	-0.047
25	85.05	106.52	96.10	80.57	7.71	0.095	54.62	45.15	-3.25	-0.040
35	84.32	109.92	98.14	82.62	7.25	0.087	55.33	44.77	-4.06	-0.049
45	84.68	114.14	100.78	85.05	6.15	0.072	55.97	45.31	-4.32	-0.050

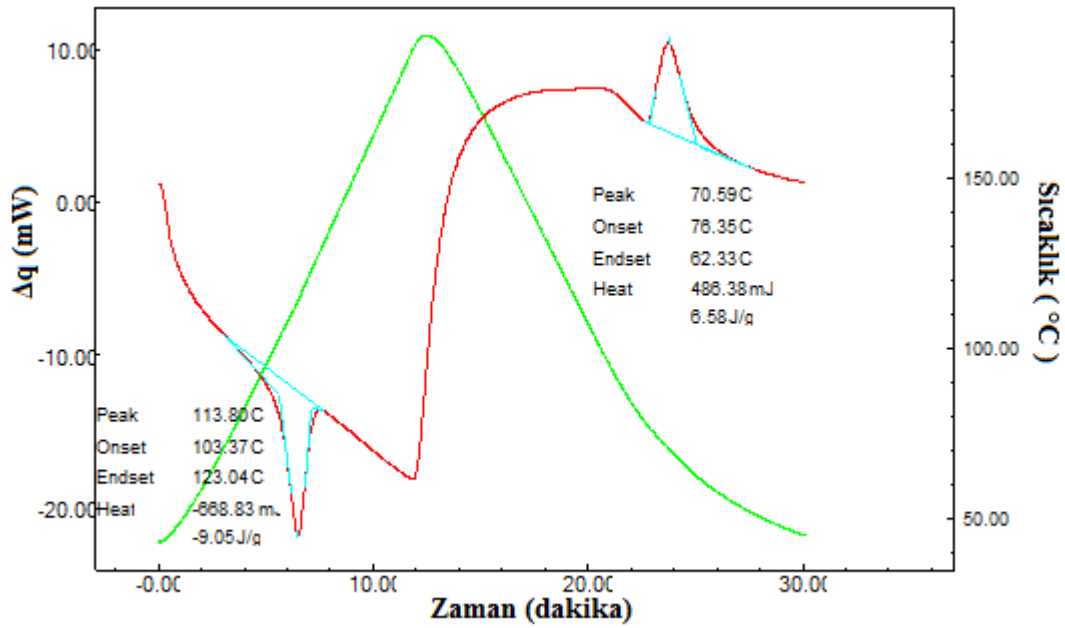
7.3.2. CAM-2 Alaşımı Termal Analiz Sonuçları

CAM-2 numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.65 – 7.69 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.24 de verilmiştir.

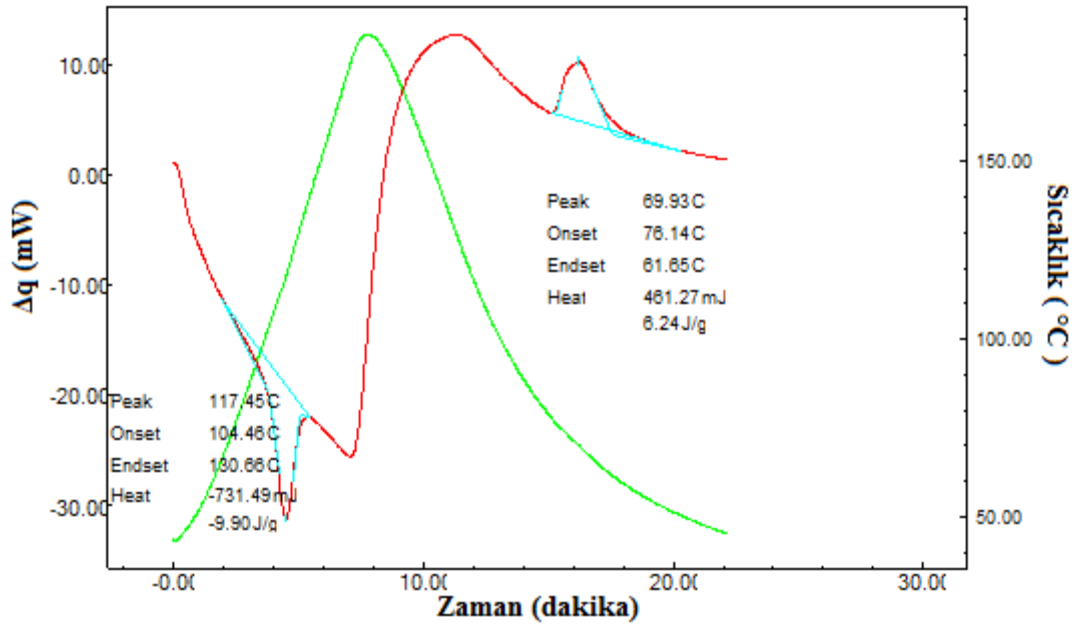
CAM-2 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen sırası ile austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklıkları sıcaklık aralıkları sırası ile 101.46-116.48°C, 103.37-123.04°C, 104.46-130.66°C, 104.07-137.12°C, 101.24-147.52°C dir. Her bir ısıtma hızı için elde edilen martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 78.35-65.14°C, 76.35-62.33°C, 76.14-61.65°C, 74.56-62.25°C, 76.12-62.36°C, olarak belirlenip tablo 7.24 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça, A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, A_s sıcaklıkları önce artmış sonra azalmış, M_s sıcaklıkları sabit kalmış, M_f sıcaklıklarında düşüşler tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.70 de DSC eğrisinde ve tablo 7.24 da açıkça belirtilmektedir.



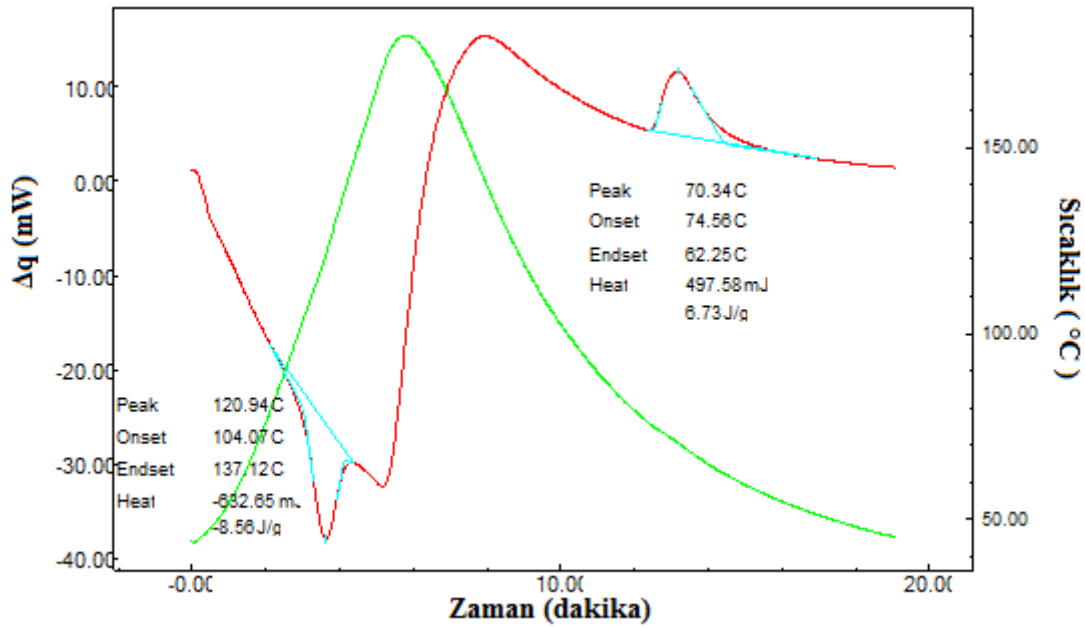
Şekil 7.65. CAM-2 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



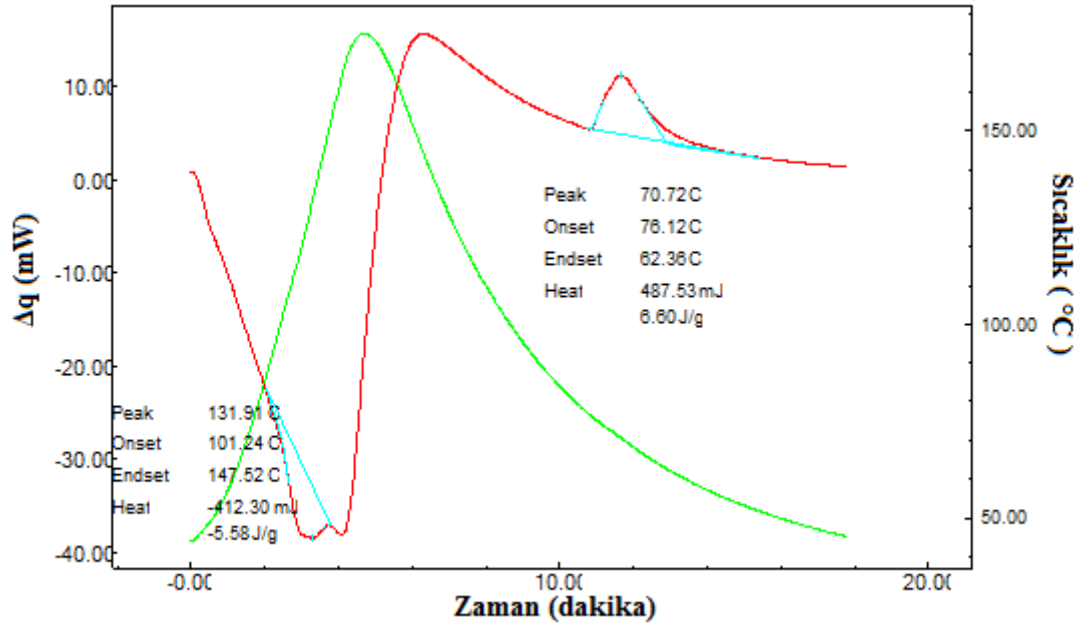
Şekil7.66. CAM-2 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



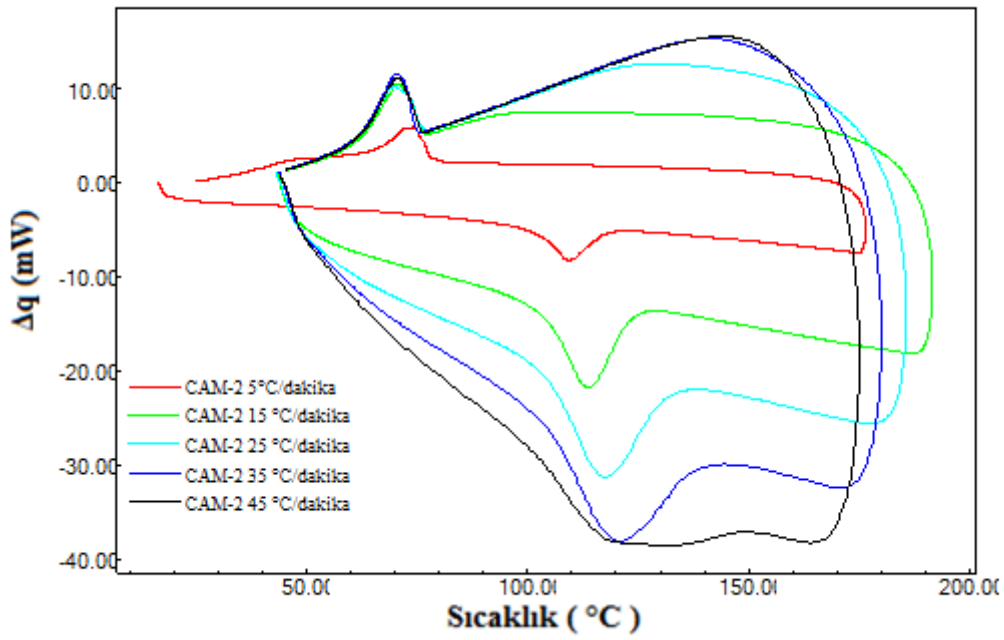
Şekil 7.67. CAM-2 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.68. CAM-2 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.69. CAM-2 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



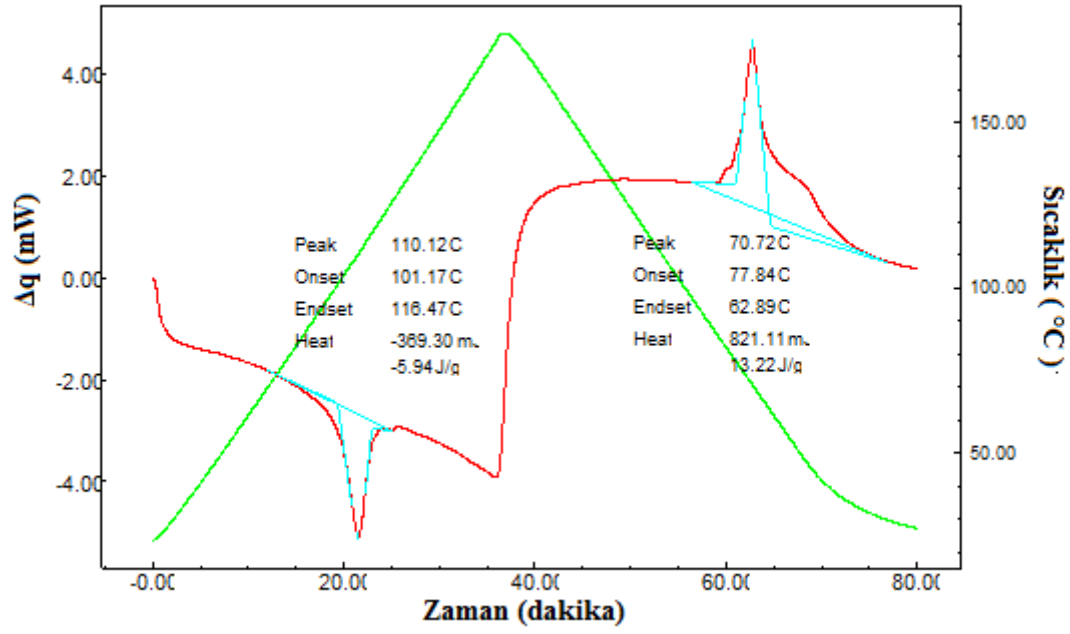
Şekil 7.70. CAM-2 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.24. CAM-2 numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

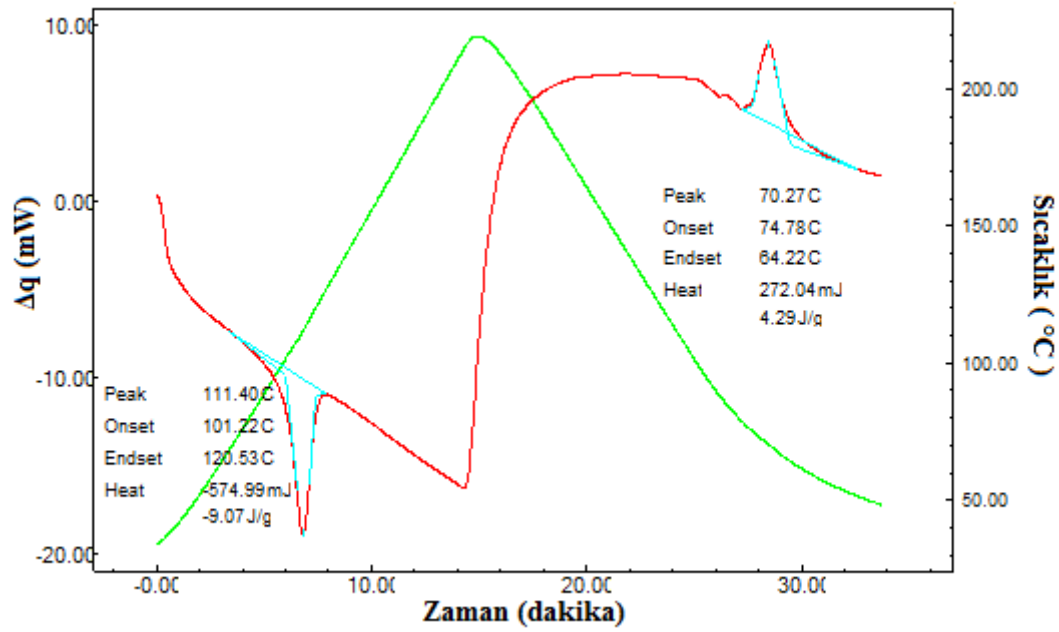
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	101.46	116.48	109.46	97.41	7.89	0.080	78.35	65.14	-15.87	-0.162
15	103.37	123.04	113.80	99.69	9.05	0.090	76.35	62.33	-6.58	-0.066
25	104.46	130.66	117.45	103.04	9.90	0.096	76.14	61.65	-6.24	-0.060
35	104.07	137.12	120.94	105.84	8.56	0.080	74.56	62.25	-6.73	-0.063
45	101.24	147.52	131.91	111.82	5.58	0.049	76.12	62.36	-6.60	-0.059

CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.71 – 7.75 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.25 de verilmiştir.

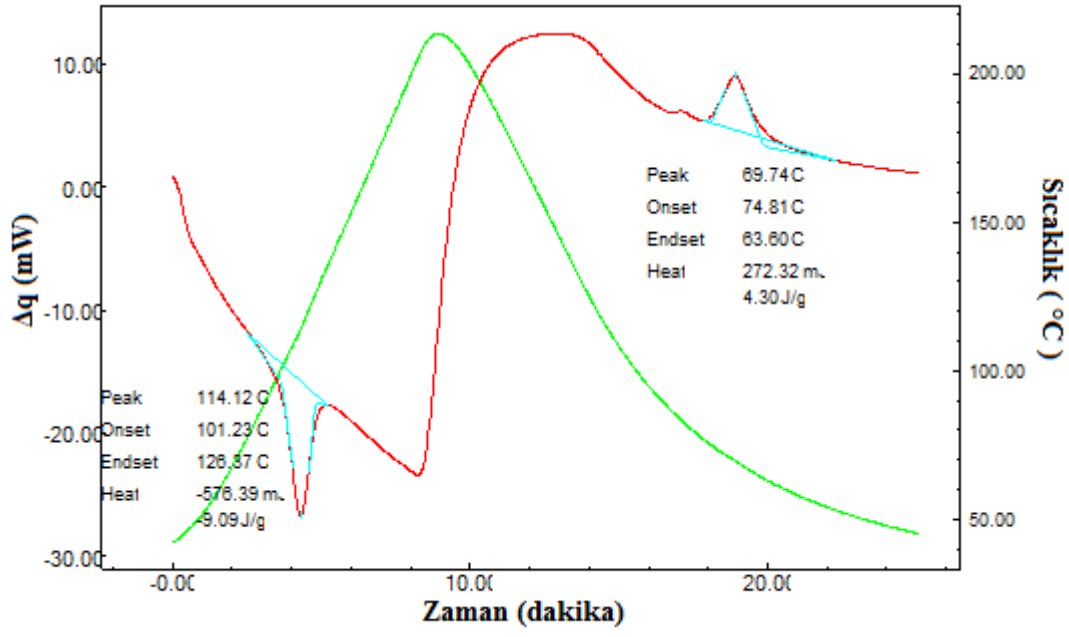
CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 101.17-116.47°C, 101.22-120.53°C, 101.23-126.37°C, 101.00-132.15°C, 99.30-138.14°C dir. Her bir ısıtma hızı için martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 77.84-62.89°C, 74.78-64.22°C, 74.81-63.60°C, 75.06-62.96°C, 75.11-63.92°C, olarak belirlenip tablo 7.25 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça, A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken M_s ve M_f sıcaklıkları önce artmış sonra azalmış, A_s sıcaklıklarında düşüşler tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.76 da DSC eğrisinde ve tablo 7.25 de açıkça belirtilmektedir.



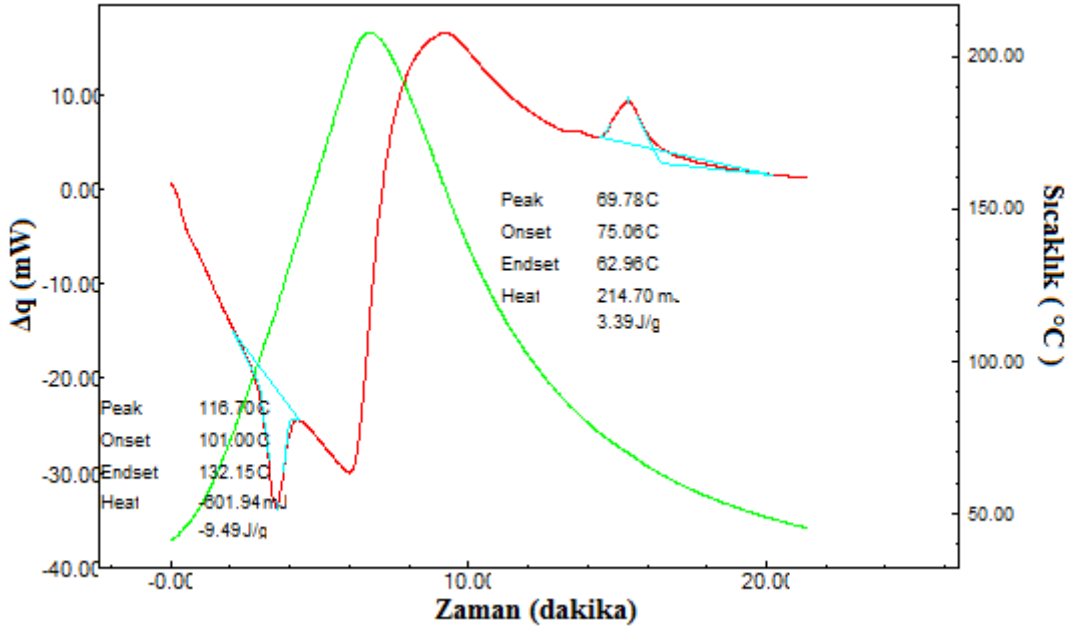
Şekil 7.71. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



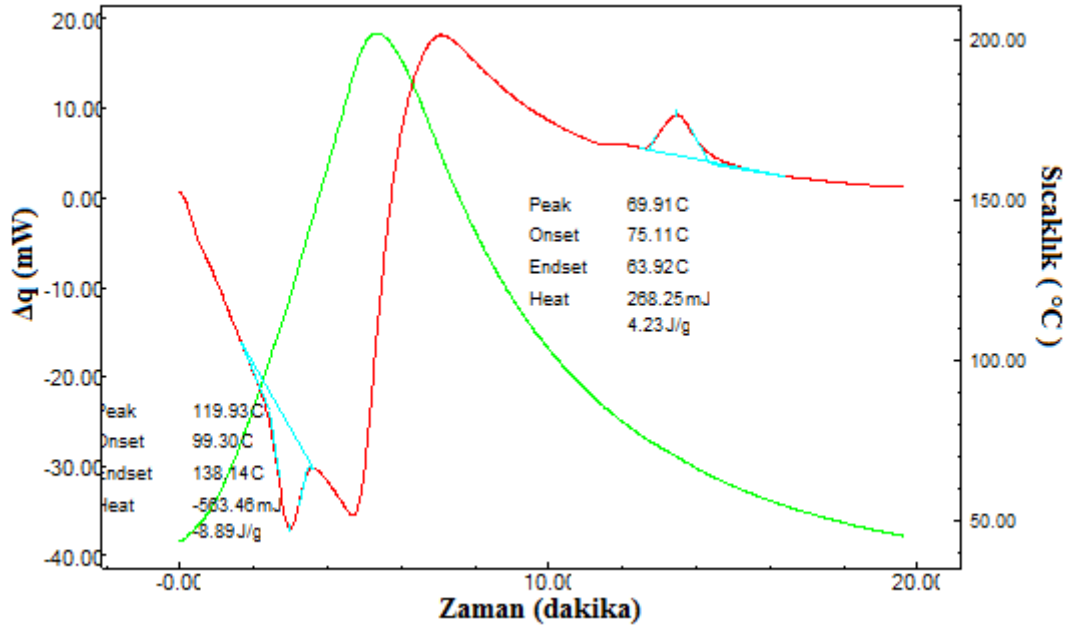
Şekil 7.72. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



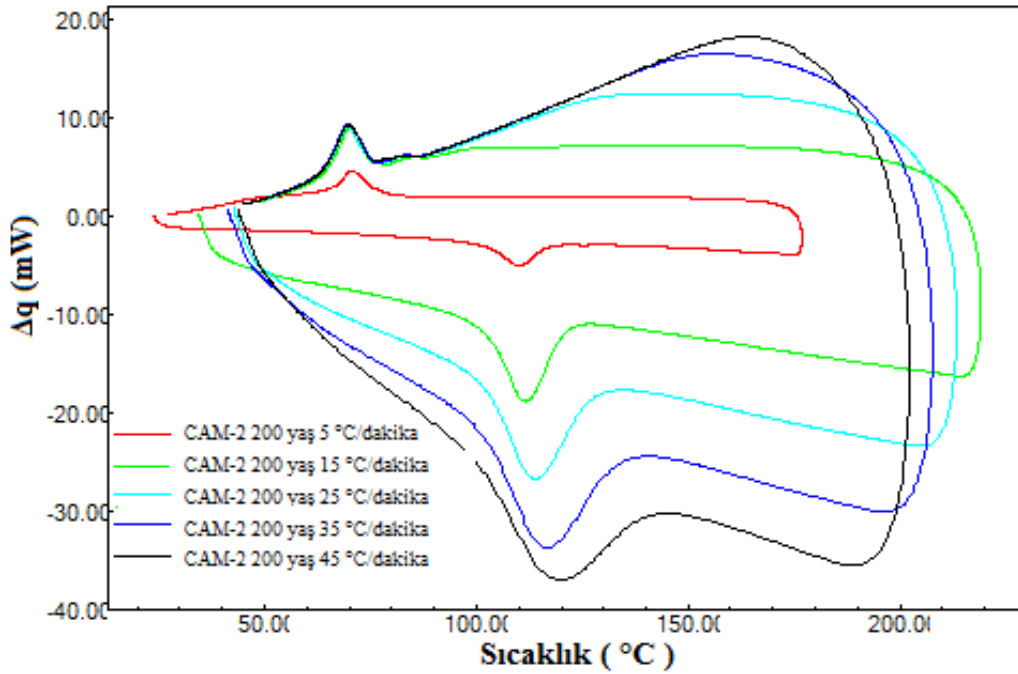
Şekil 7.73. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.74. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.75. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



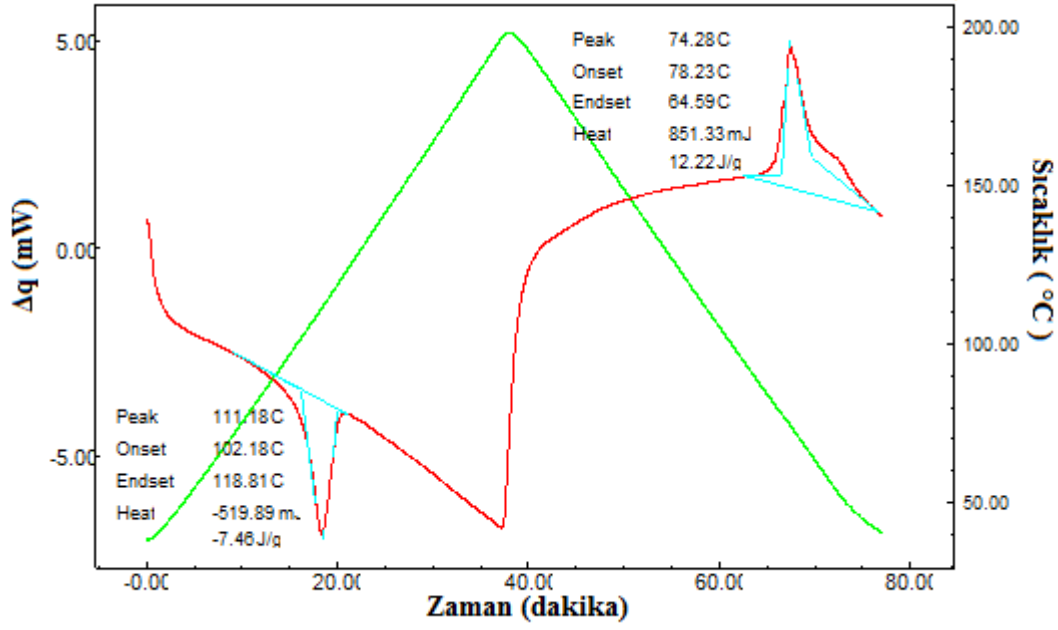
Şekil 7.76. CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.25. CAM-2 200 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

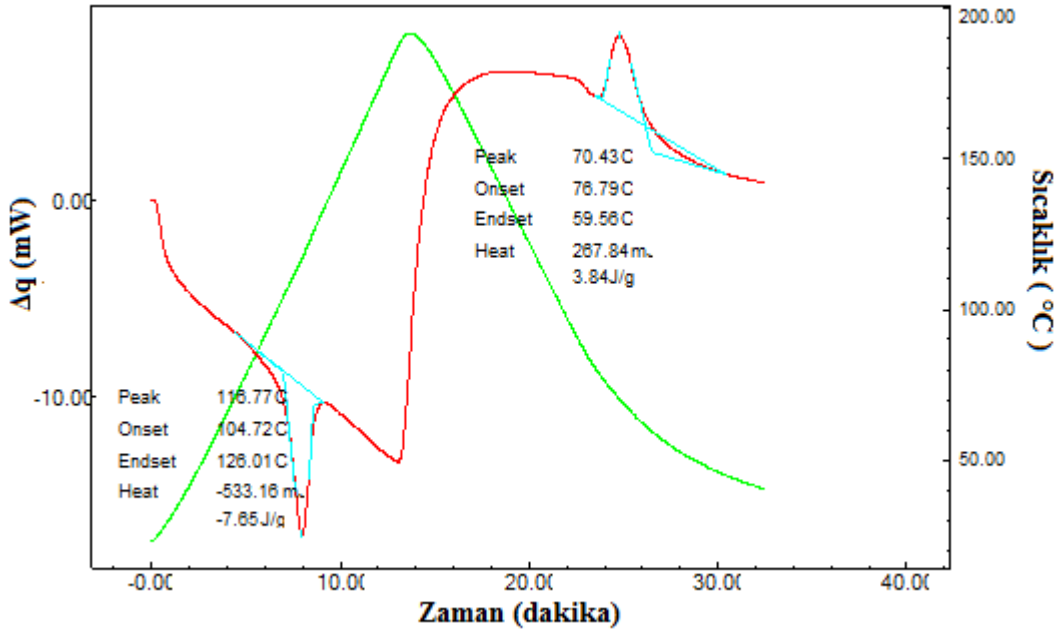
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	101.17	116.47	110.12	97.15	5.94	0.061	77.84	62.89	-13.22	-0.136
15	101.22	120.53	111.40	97.65	9.07	0.092	74.78	64.22	-4.29	-0.043
25	101.23	126.37	114.12	100.59	9.09	0.090	74.81	63.60	-4.30	-0.042
35	101.00	132.15	116.70	103.60	9.49	0.091	75.06	62.96	-3.39	-0.032
45	99.30	138.14	119.93	106.62	8.89	0.083	75.11	63.92	-4.23	-0.039

CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.77 – 7.81 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.26 de verilmiştir.

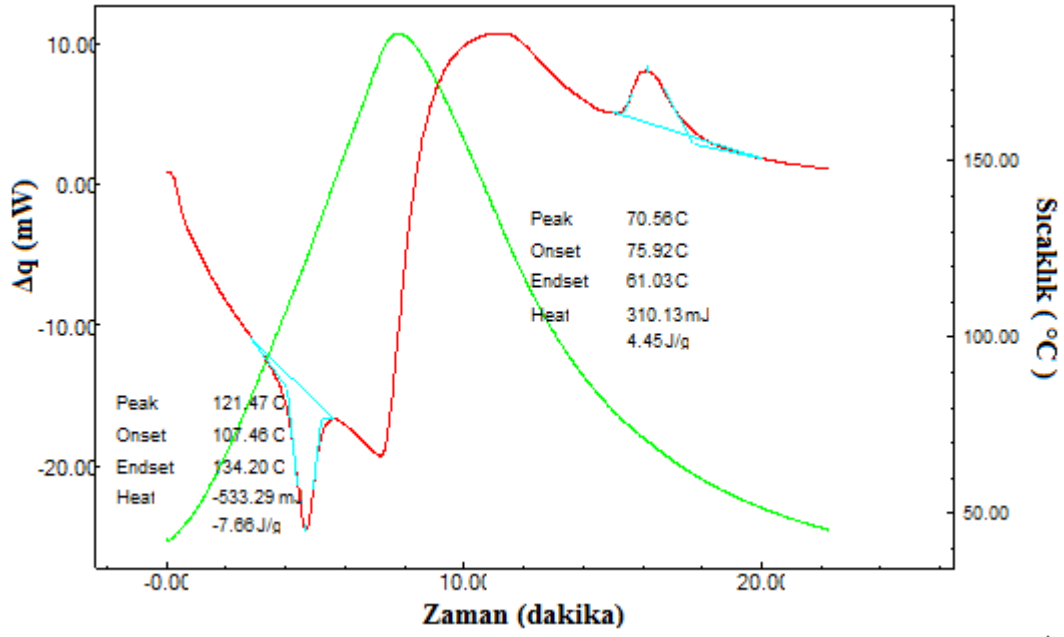
CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 102.18-118.81°C, 104.72-126.01°C, 107.46-134.20°C, 109.38-141.06°C, 111.38-147.21°C dir. Her bir ısıtma hızı için martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 78.23-64.59°C, 76.79-59.56°C, 75.92-61.03°C, 77.44-60.60°C, 76.55-61.85°C, olarak belirlenip tablo 7.26 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça, A_s ve A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, M_s ve M_f sıcaklıklarında düşüşler tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.82 da DSC eğrisinde ve tablo 7.26 de açıkça belirtilmektedir.



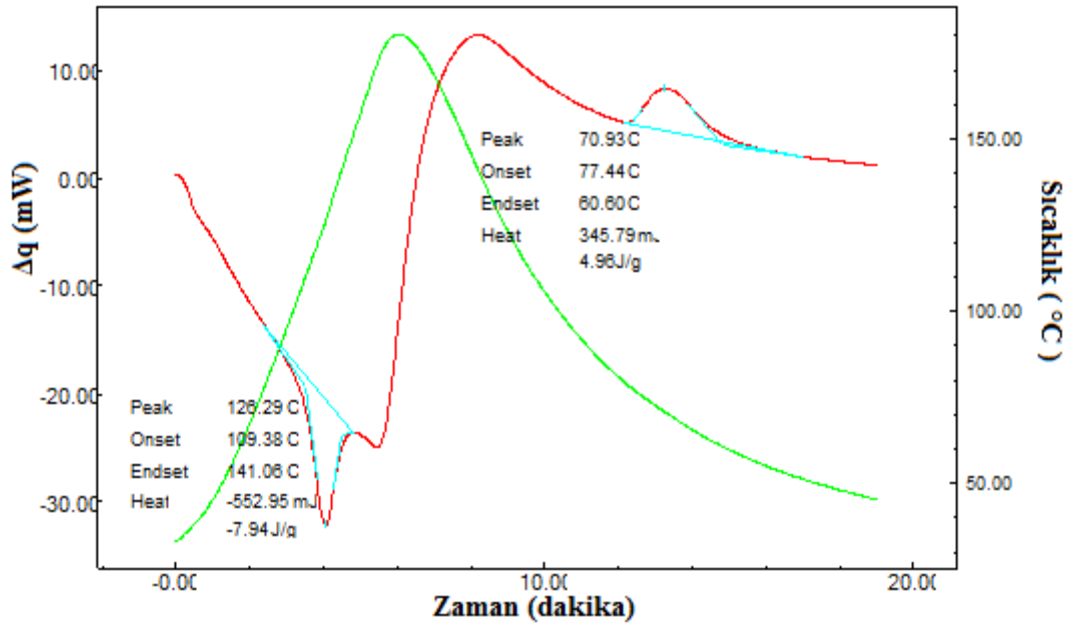
Şekil 7.77. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



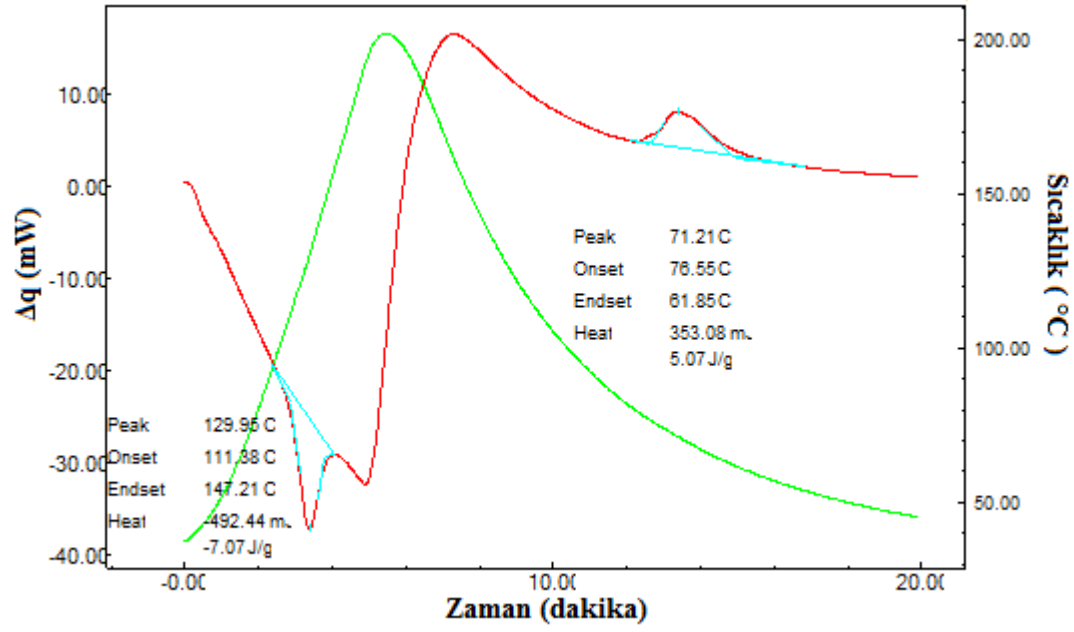
Şekil 7.78. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



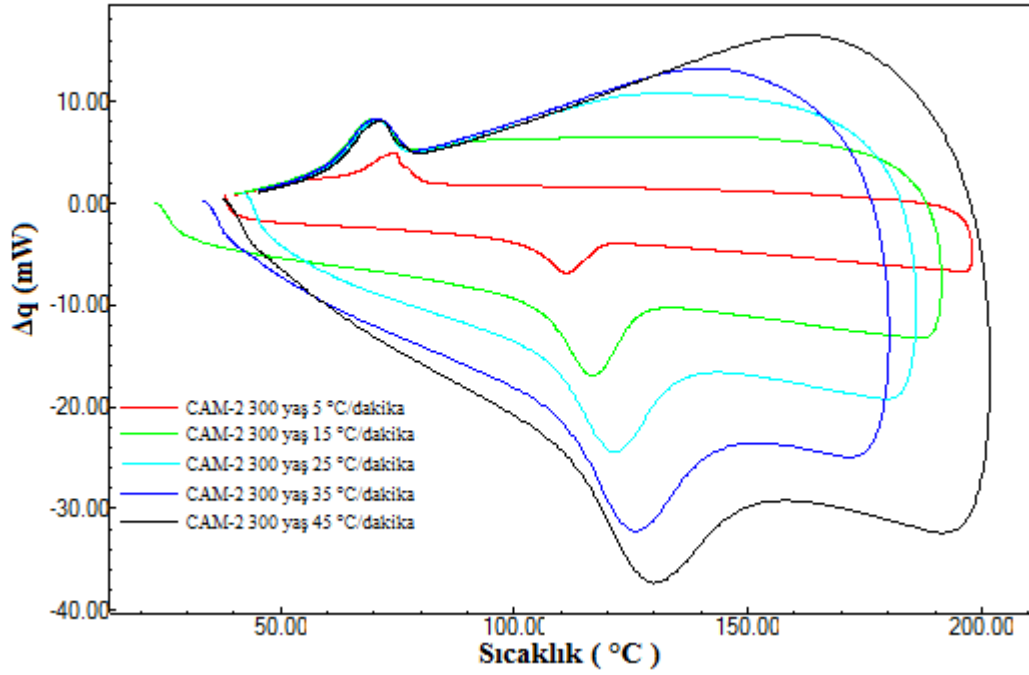
Şekil 7.79. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.80. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.81. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



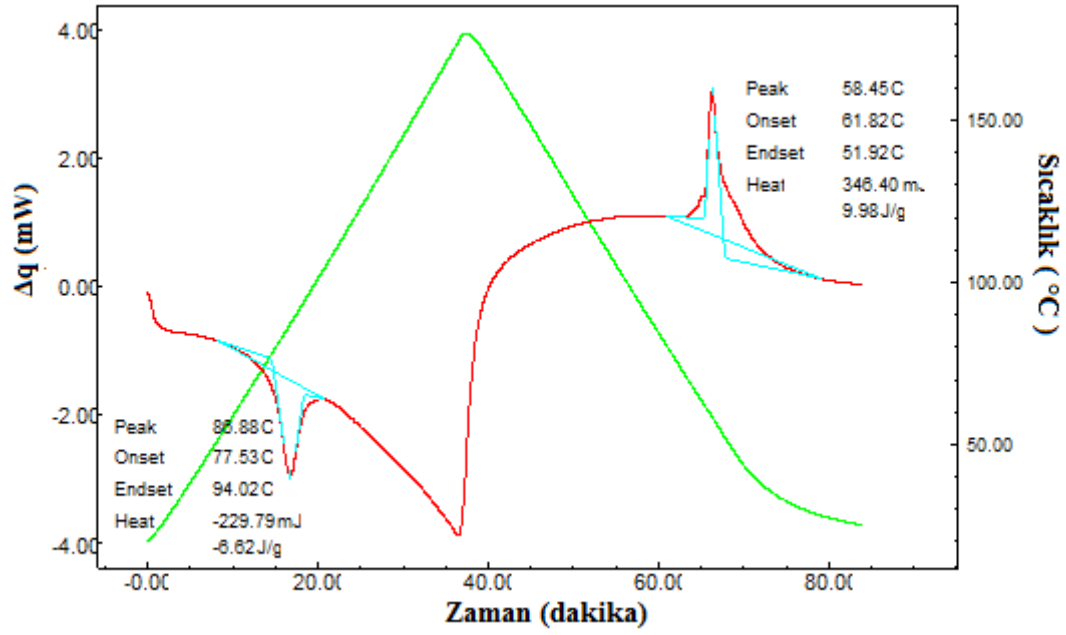
Şekil 7.82. CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.26. CAM-2 300 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

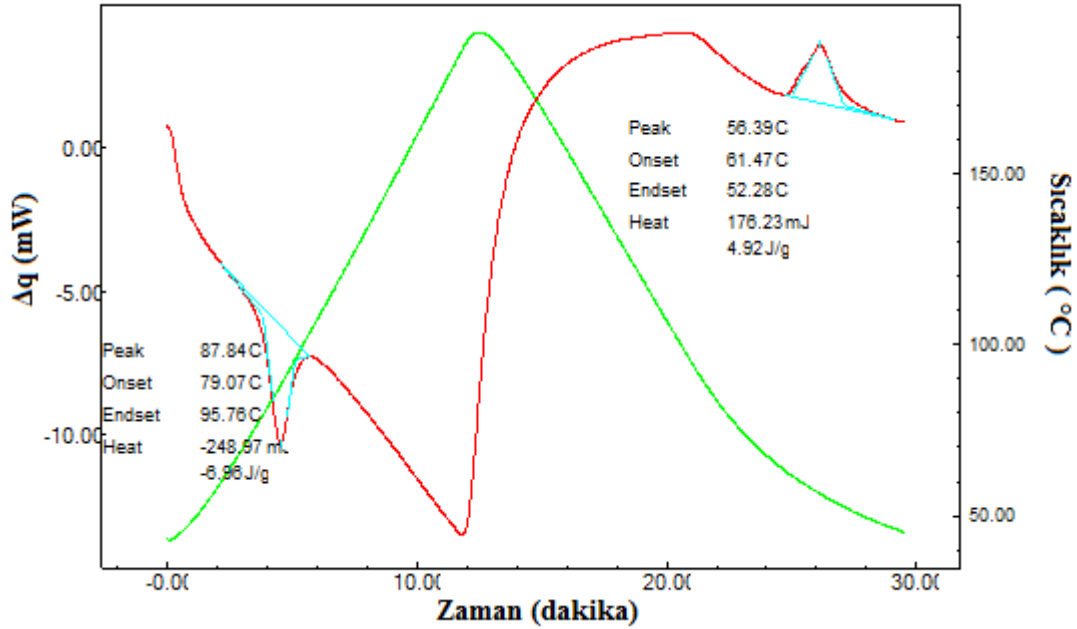
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	102.18	118.81	111.18	98.52	7.46	0.075	78.23	64.59	-12.22	-0.124
15	104.72	126.01	116.77	101.40	7.65	0.075	76.79	59.56	-3.84	-0.037
25	107.46	134.20	121.47	105.06	7.66	0.072	75.92	61.03	-4.45	-0.042
35	109.38	141.06	126.29	109.25	7.94	0.072	77.44	60.60	-4.96	-0.045
45	111.38	147.21	129.95	111.88	7.07	0.063	76.55	61.85	-5.07	-0.047

CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.83 – 7.87 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.27 de verilmiştir.

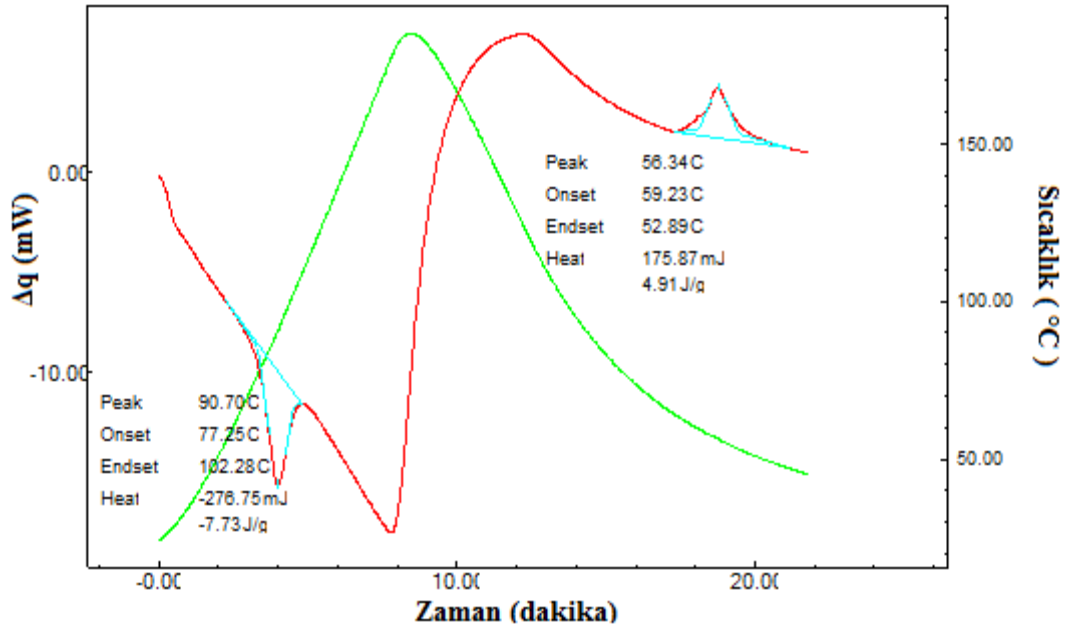
CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 77.53-94.02°C, 79.07-95.76°C, 77.25-102.28°C, 76.32-111.38°C, 79.93-109.27°C dir. Her bir ısıtma hızı için martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 61.82-51.92°C, 61.47-52.28°C, 59.23-52.89°C, 58.97-51.43°C, 59.92-52.94°C, olarak belirlenip tablo 7.27 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken A_s ve M_f sıcaklıkları önce artmış sonra azalmış en sonunda artmış, M_s sıcaklıklarında da düşüşler tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.88 da DSC eğrisinde ve tablo 7.27 de açıkça belirtilmektedir.



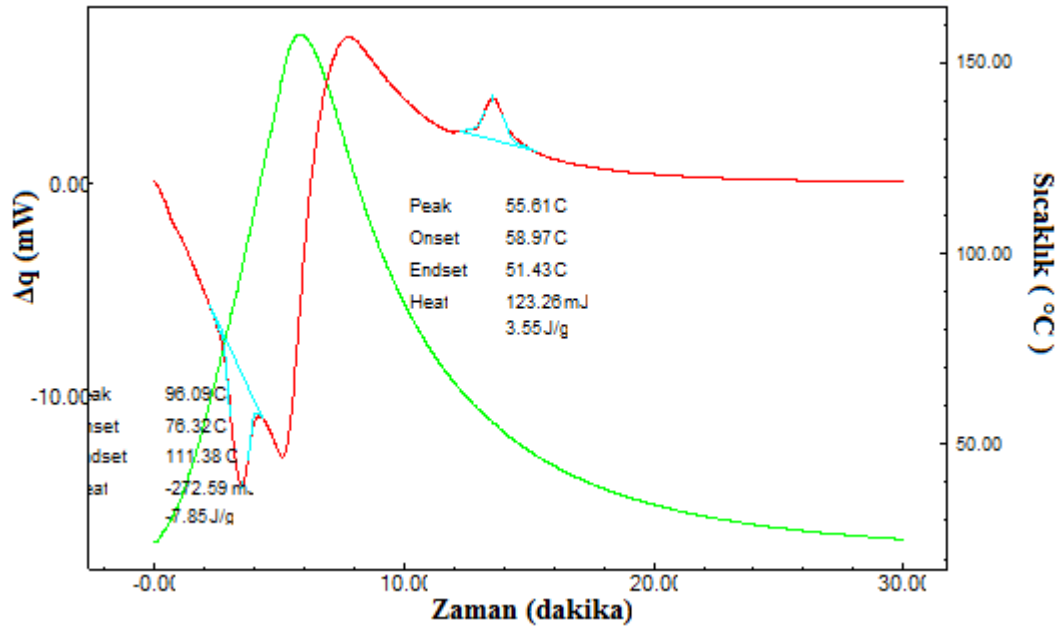
Şekil 7.83. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



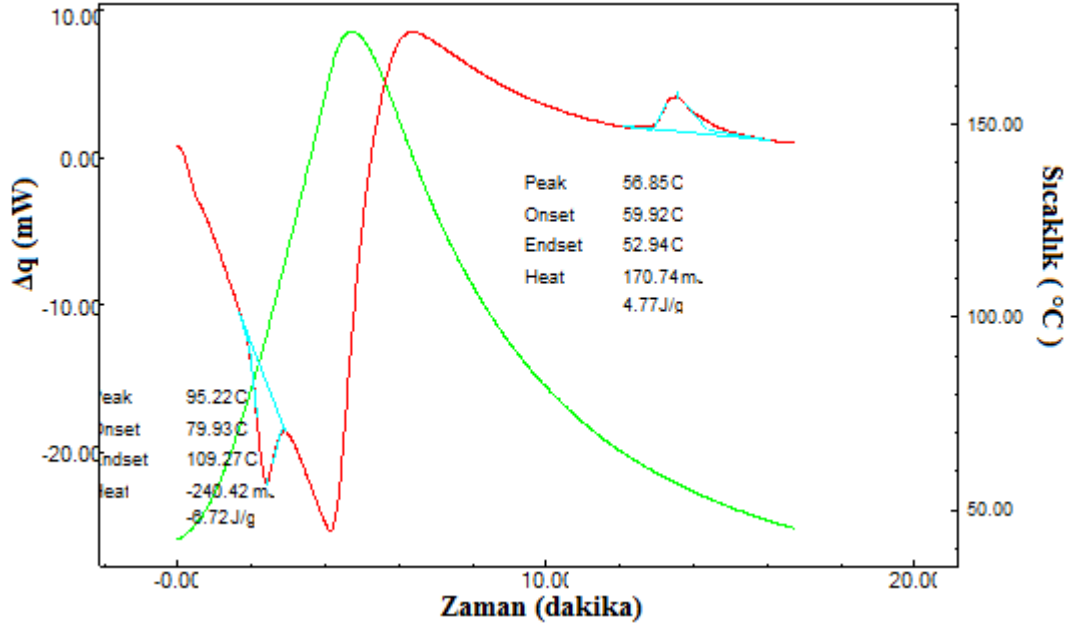
Şekil 7.84. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



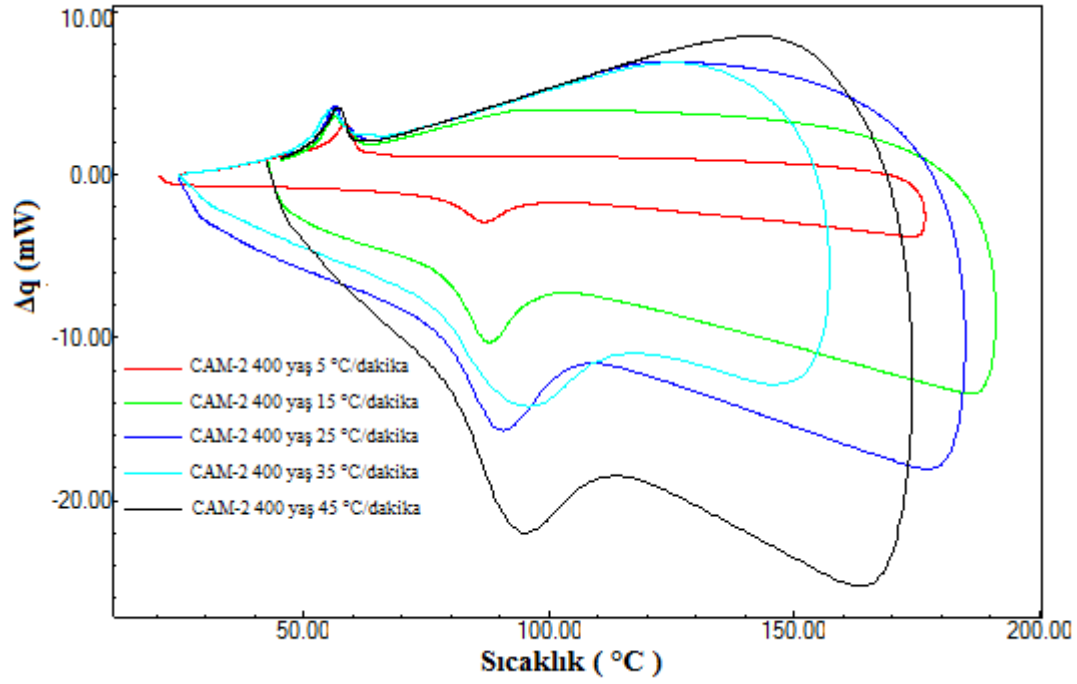
Şekil 7.85. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.86. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.87. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



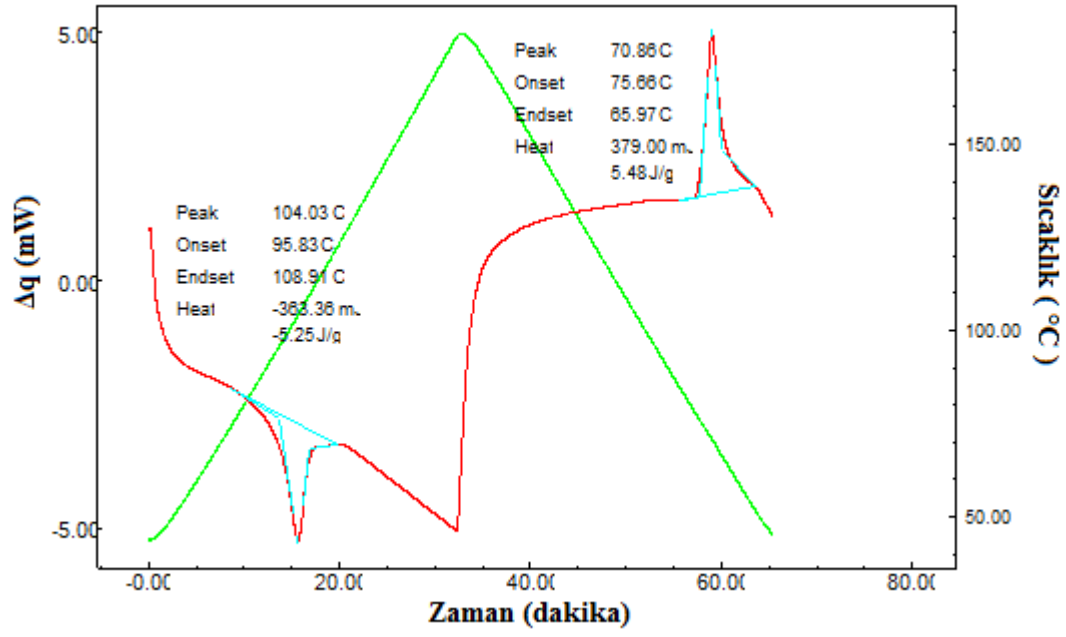
Şekil 7.88. CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.27. CAM-2 400 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

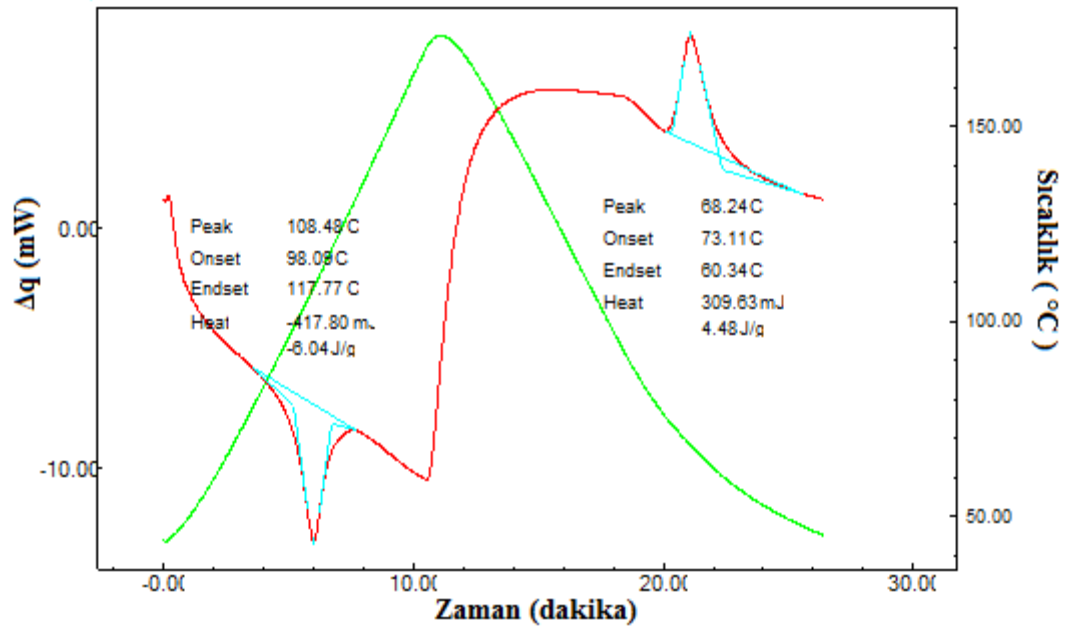
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	77.53	94.02	86.88	77.92	6.62	0.084	61.82	51.92	-9.98	-0.128
15	79.07	95.76	87.84	78.61	6.96	0.088	61.47	52.28	-4.92	-0.062
25	77.25	102.28	90.70	80.75	7.73	0.095	59.23	52.89	-4.61	-0.057
35	76.32	111.38	96.09	85.17	7.85	0.092	58.97	51.43	-3.55	-0.041
45	79.93	109.27	95.22	84.59	6.72	0.079	59.92	52.94	-4.77	-0.056

CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.89 – 7.93 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.28 de verilmiştir.

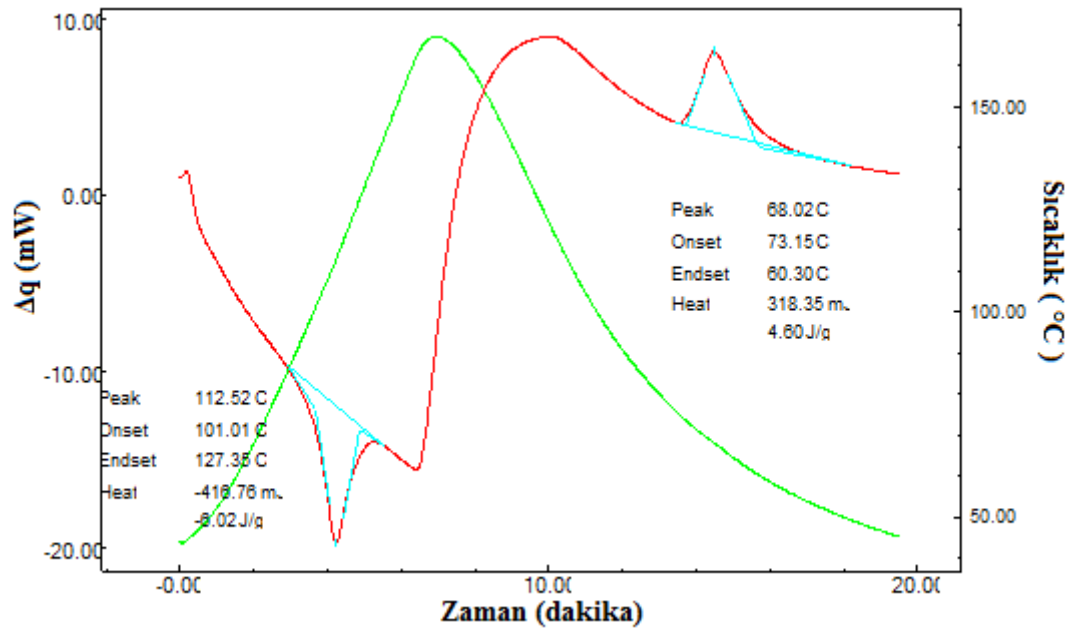
CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 95.83-108.91°C, 98.09-117.77°C, 101.01-127.35°C, 102.80-132.68°C, 104.44-139.06°C dir. Her bir ısıtma hız için elde edile martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 75.66-65.97°C, 73.11-60.34°C, 73.15-60.30°C, 73.17-59.93°C, 72.99-60.32°C, olarak belirlenip tablo 7.28 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s ve A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, M_s sıcaklıkları sabit, M_f sıcaklıklarında da düşüşler tespit edilmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.94 de DSC eğrisinde ve tablo 7.28 de açıkça belirtilmektedir.



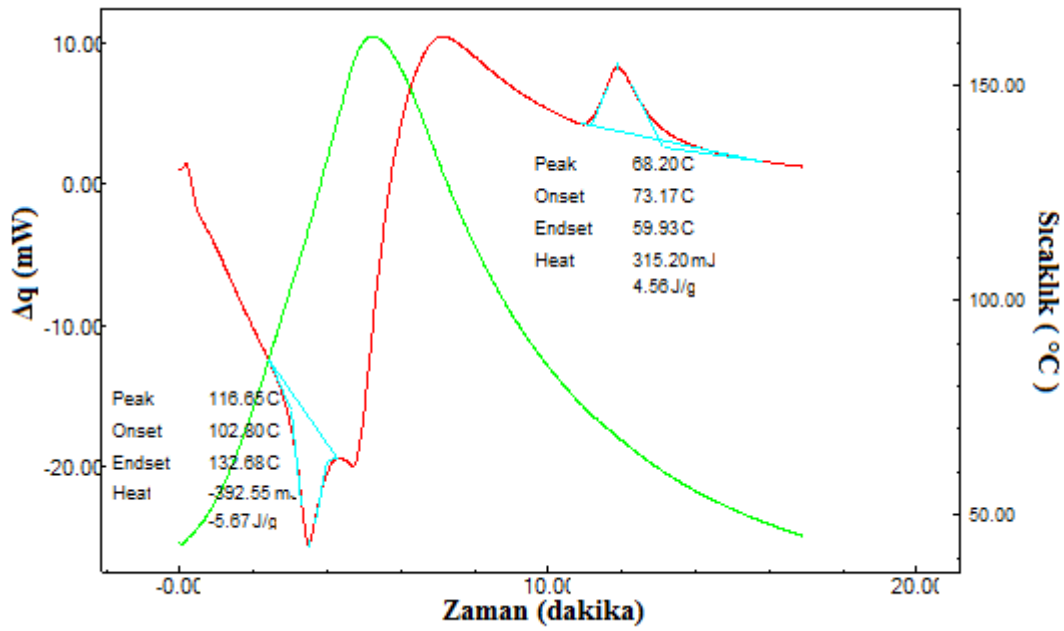
Şekil 7.89. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



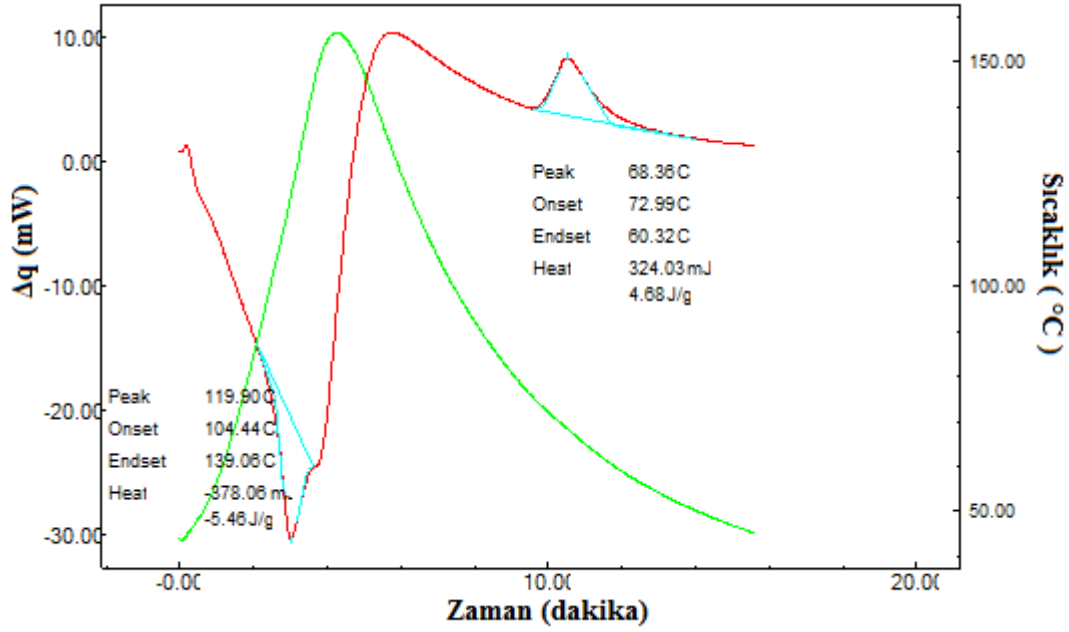
Şekil 7.90. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



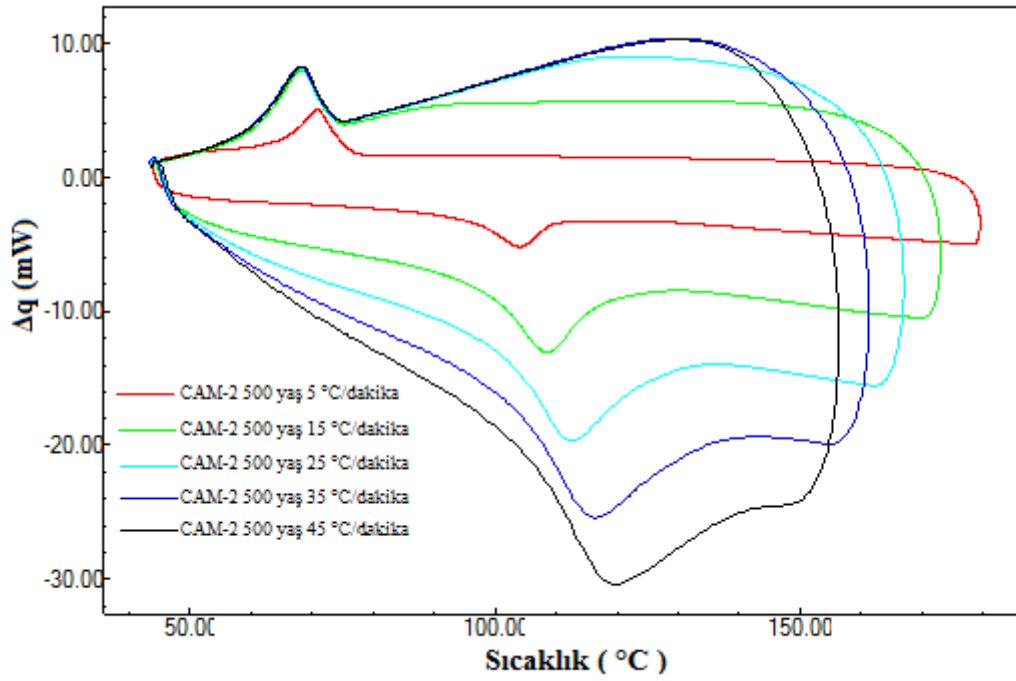
Şekil 7.91. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.92. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.93. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.94. CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

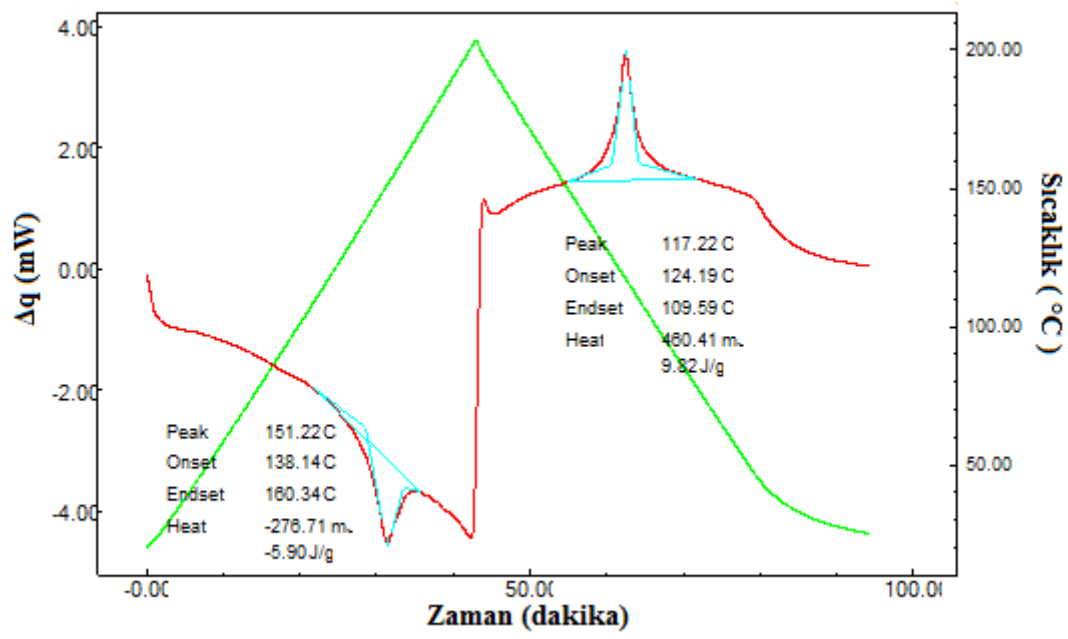
Tablo 7.28. CAM-2 500 °C’de yaşılandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	95.83	108.91	104.03	92.28	5.25	0.056	75.66	65.97	-5.48	-0.059
15	98.09	117.77	108.48	95.44	6.04	0.063	73.11	60.34	-4.48	-0.046
25	101.01	127.35	112.52	100.25	6.02	0.060	73.15	60.30	-4.60	-0.045
35	102.80	132.68	116.65	102.92	5.67	0.055	73.17	59.93	-4.56	-0.044
45	104.44	139.06	119.90	106.02	5.46	0.051	72.99	60.32	-4.68	-0.044

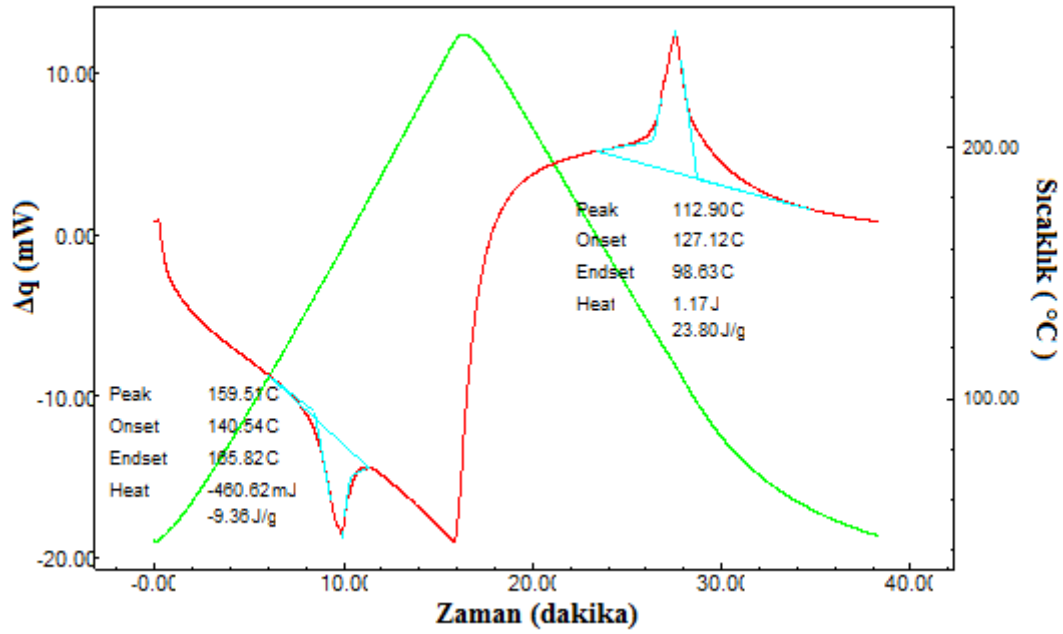
7.3.3. CAM-3 Alaşımı Termal Analiz Sonuçları

CAM-3 numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.95 – 7.99 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.29 de verilmiştir.

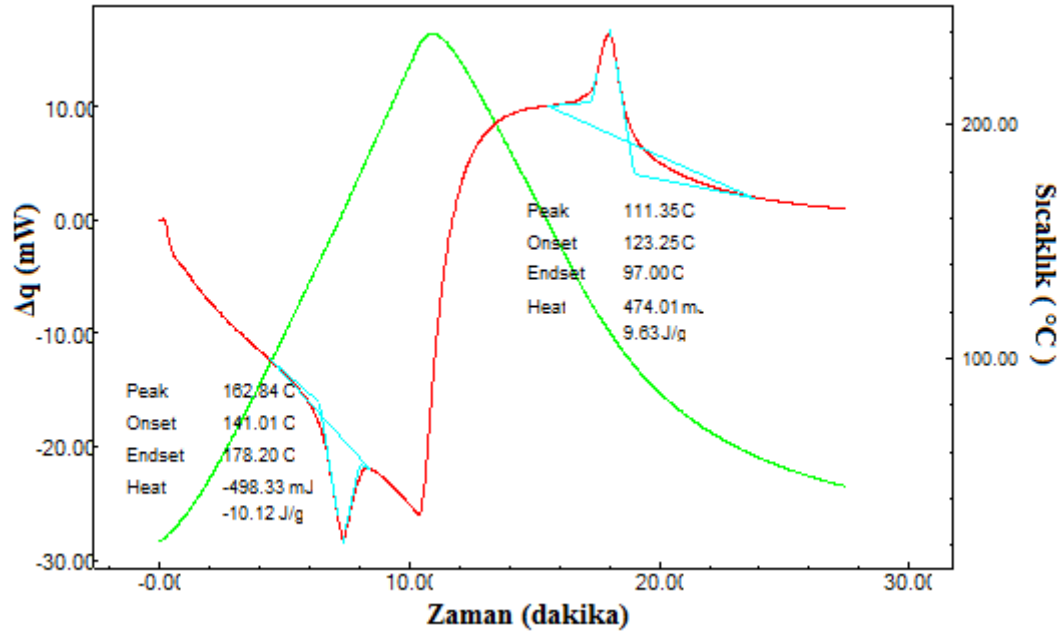
CAM-3 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 138.14- 160.34°C, 140.54- 165.82°C, 141.01- 178.20°C, 146.16- 181.54°C, 145.70- 185.86°C dir. Her bir ısıtma hızı için martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 124.19- 109.59°C, 127.12- 98.63°C, 123.25- 97.00°C, 122.38- 97.45°C, 122.51- 97.49°C, olarak belirlenip tablo 7.29 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s ve A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, M_s sıcaklıkları önce artmış sonra azalmış, M_f sıcaklıklarında da önce azalmış sonra sabit kalmış. Elde edilen değişimler şekil 7.100 da DSC eğrisinde ve tablo 7.29 de açıkça belirtilmektedir.



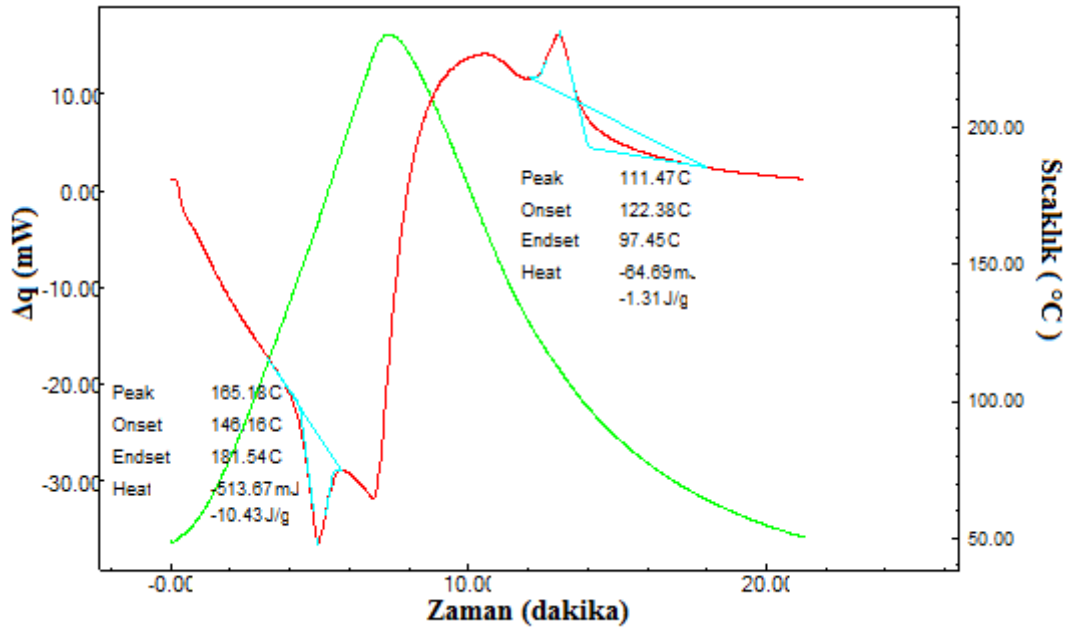
Şekil 7.95. CAM-3 numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



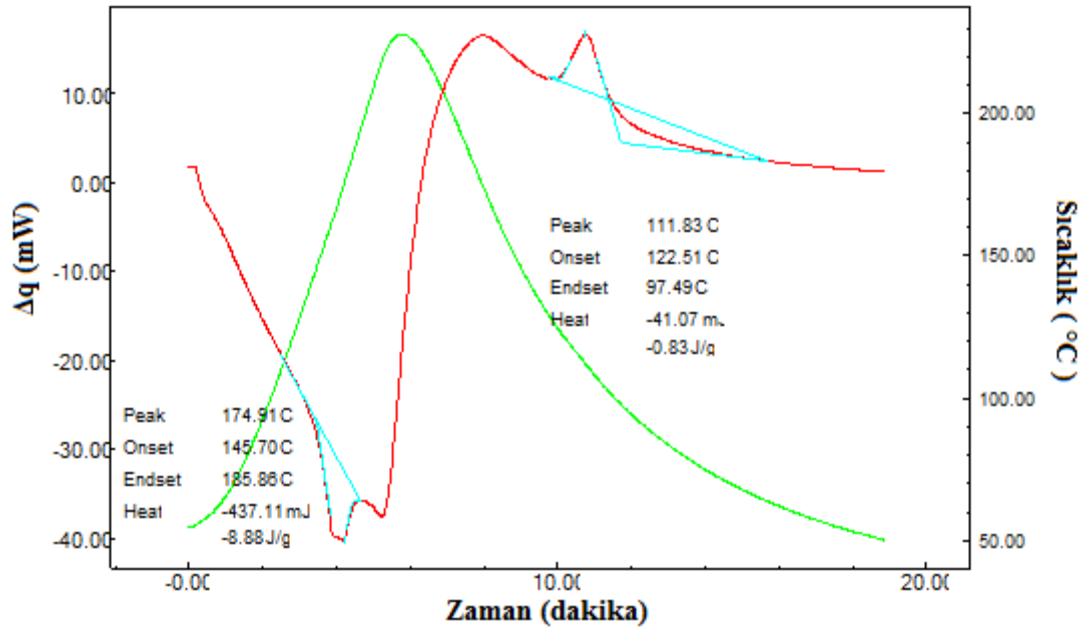
Şekil 7.96. CAM-3 numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



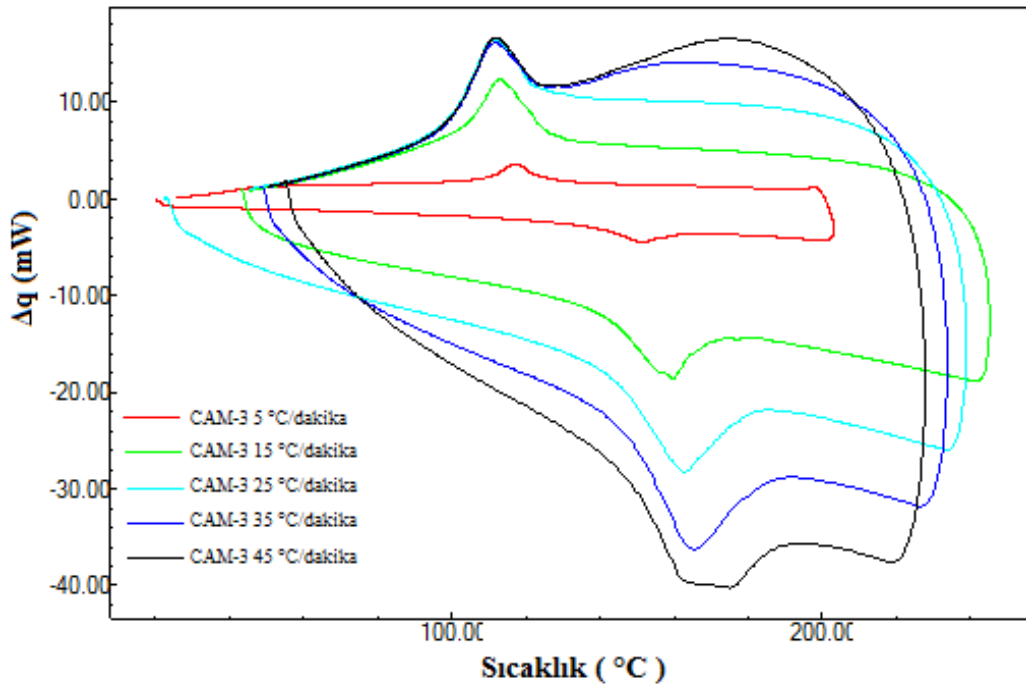
Şekil 7.97.CAM-3 numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.98. CAM-3 numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.99. CAM-3 numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



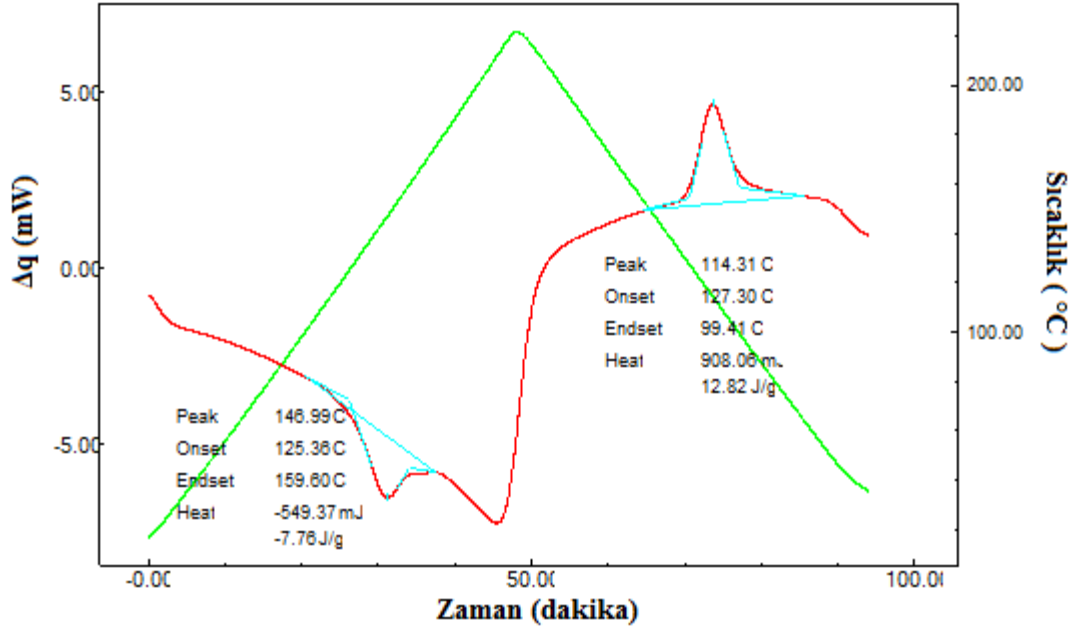
Şekil 7.100. CAM-3 numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.29. CAM-3 numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

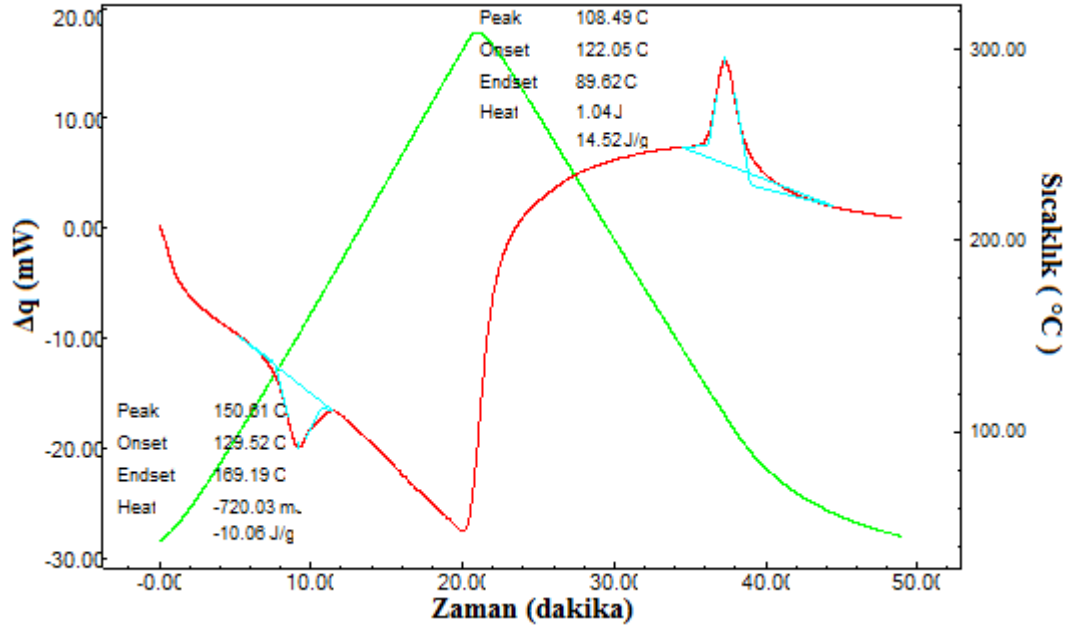
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	138.14	160.34	151.22	142.26	5.90	0.041	124.19	109.59	-9.82	-0.069
15	140.54	165.82	159.51	146.47	9.36	0.063	127.12	98.63	-23.80	-0.162
25	141.01	178.20	162.84	150.72	10.12	0.067	123.25	97.00	-9.63	-0.063
35	146.16	181.54	165.18	151.96	10.43	0.068	122.38	97.45	-1.31	-0.0086
45	145.70	185.86	174.91	154.18	8.88	0.057	122.51	97.49	-0.83	-0.0053

CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.101 – 7.105 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.30 de verilmiştir.

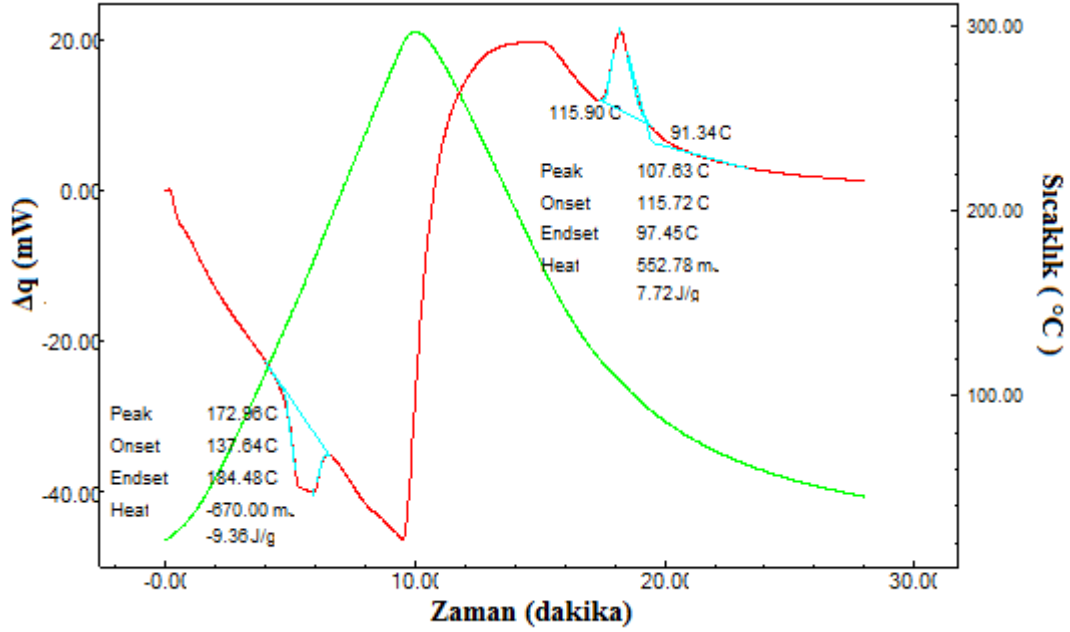
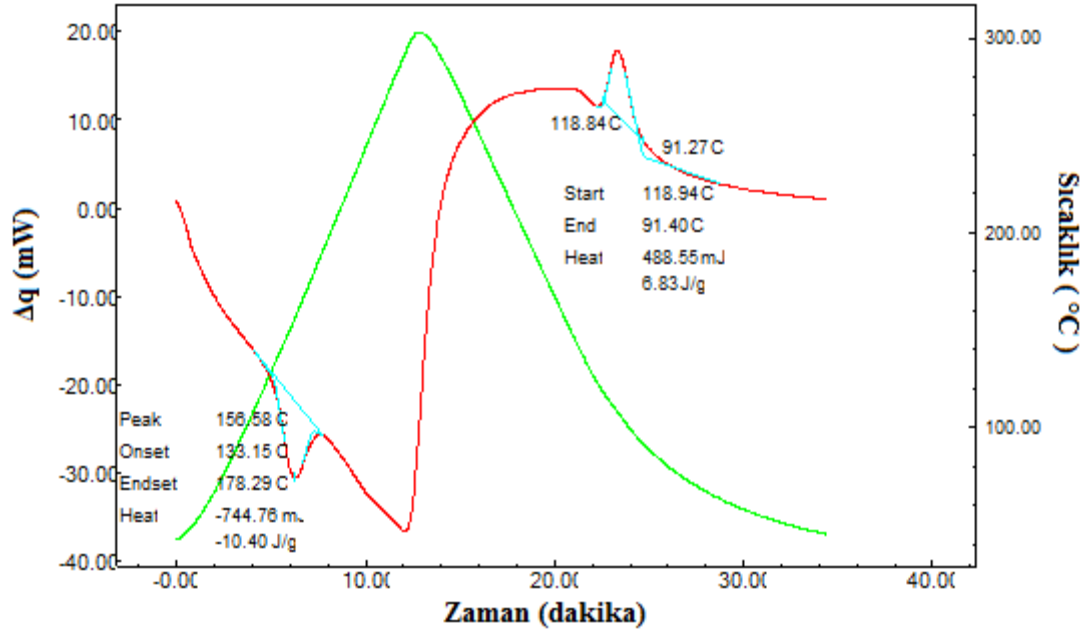
CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 125.36-159.60°C, 129.52- 169.19°C, 133.15- 178.29°C, 137.64- 184.48°C, 137.81- 194.36°C dir. Her bir ısıtma hızı için elde edilen martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 127.30-99.41°C, 122.05- 89.62°C, 118.94- 91.40°C, 115.72- 97.45°C, 117.08- 93.69°C, olarak belirlenip tablo 7.30 da verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s ve A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, M_s sıcaklıkları önce azalmış sonra artmış, M_f sıcaklıklarında da önce azalmış sonra artmış, sonra tekrar düşüşler tespit edilmiş. Elde edilen değişimler şekil 7.106 de DSC eğrisinde ve tablo 7.30 da açıkça belirtilmektedir.

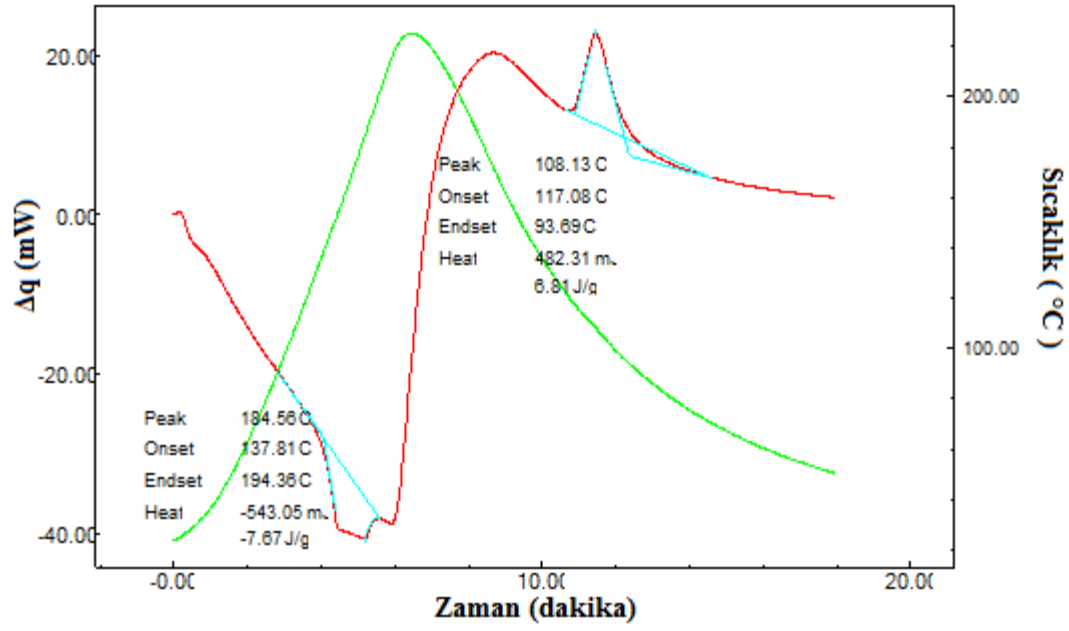


Şekil 7.101. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.

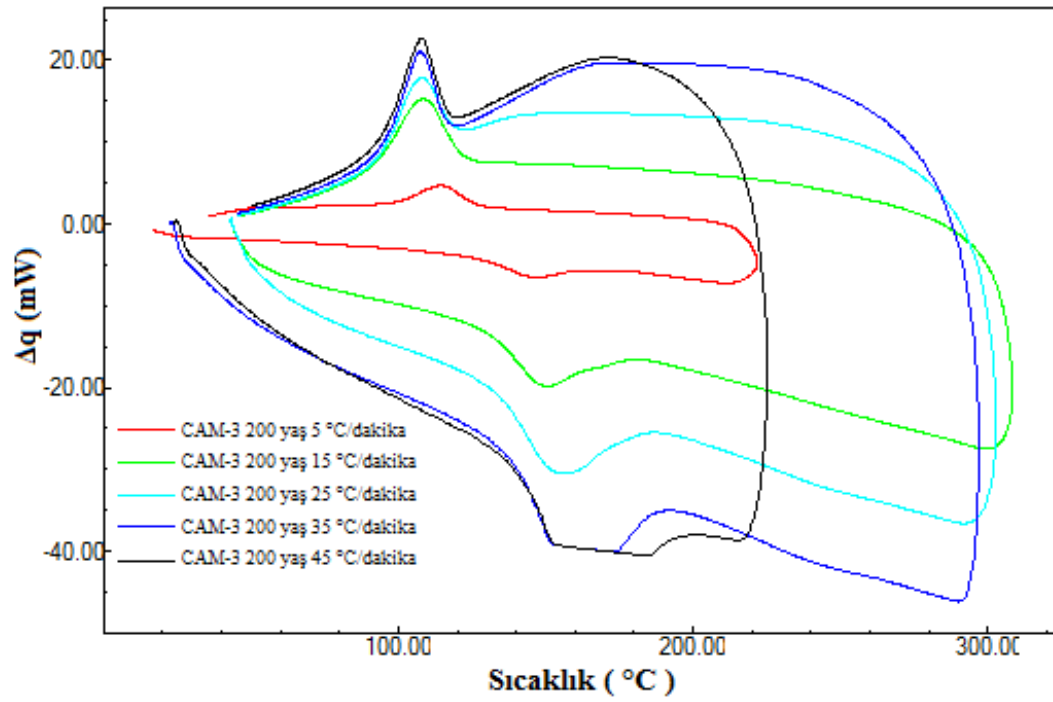


Şekil 7.102. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.





Şekil 7.105. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



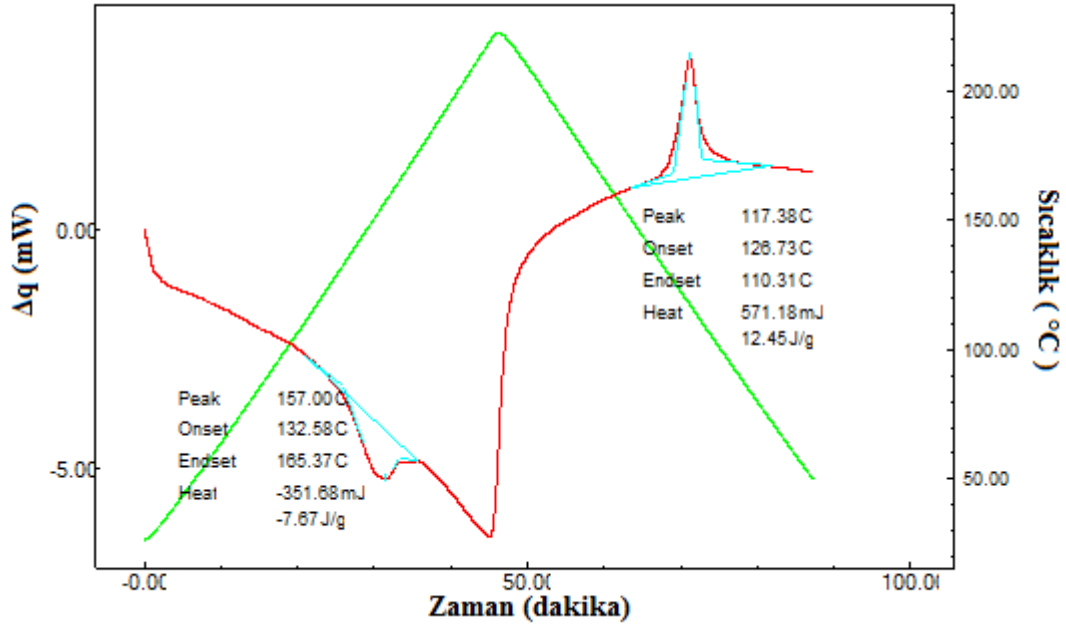
Şekil 7.106. CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.30. CAM-3 200 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

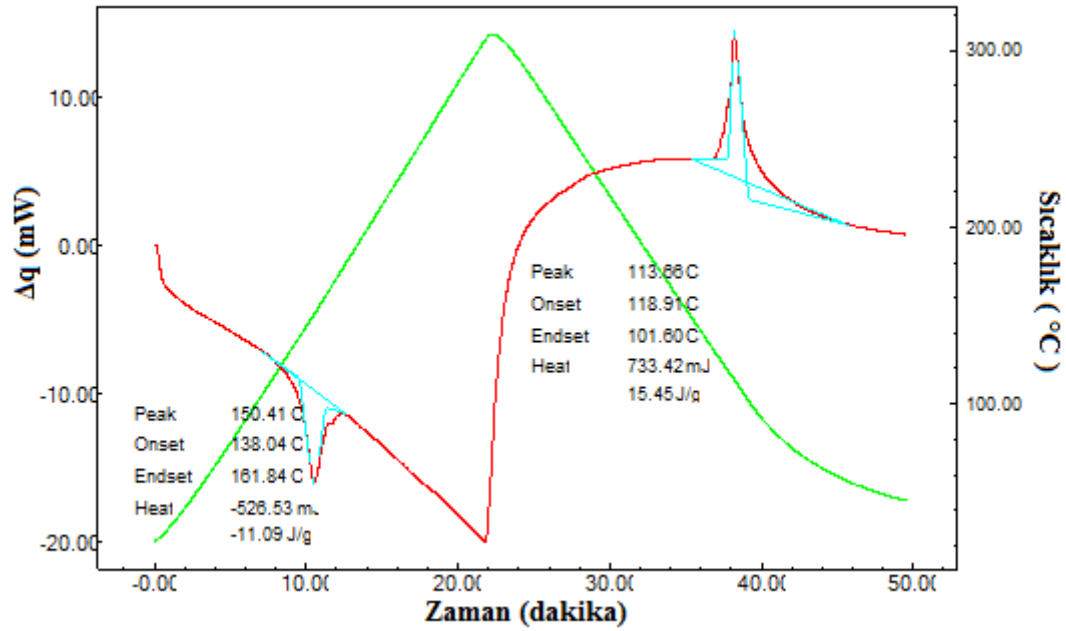
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	125.36	159.60	146.99	143.45	7.76	0.054	127.30	99.41	-12.82	-0.089
15	129.52	169.19	150.61	145.62	10.06	0.069	122.05	89.62	-14.52	-0.099
25	133.15	178.29	156.58	148.61	10.40	0.069	118.94	91.40	-6.83	-0.045
35	137.64	184.48	172.96	150.10	9.36	0.062	115.72	97.45	-7.72	-0.051
45	137.81	194.36	184.56	155.72	7.67	0.049	117.08	93.69	-6.81	-0.043

CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.107 – 7.111 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.31 de verilmiştir.

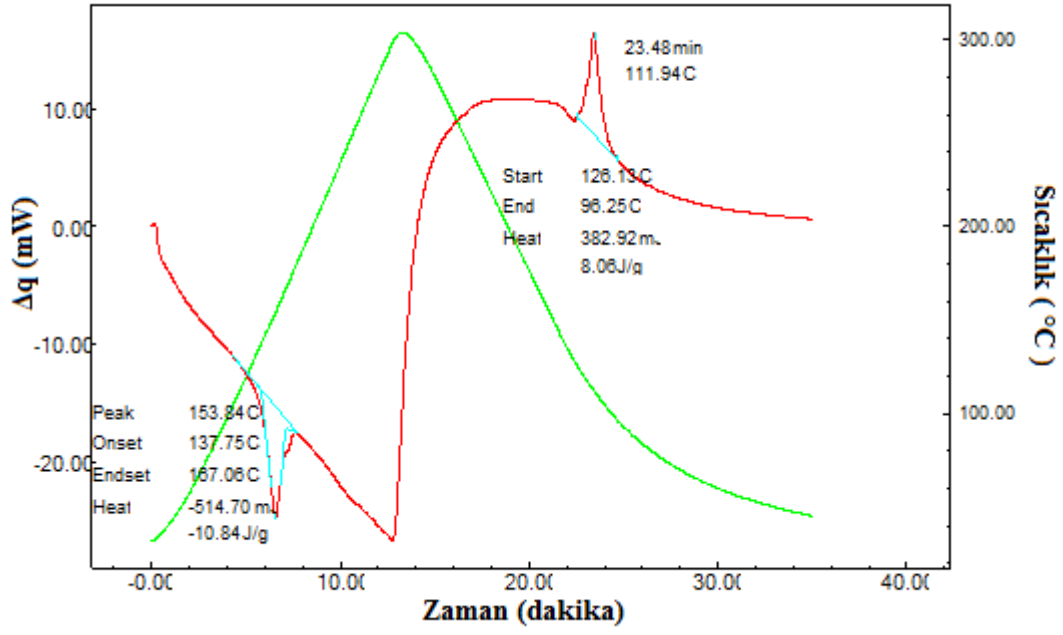
CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 132.58-165.37°C, 138.04- 161.84°C, 137.75- 167.06°C, 141.82- 171.26°C, 141.71- 180.63°C dir. Her bir ısıtma hızı için elde edilen martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 126.73-110.31°C, 118.91- 101.60°C, 126.13- 96.25°C, 117.46- 104.93°C, 124.93- 98.59°C, olarak belirlenip tablo 7.31 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s ve A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken, M_s sıcaklıkları azalış ve artışlar gözlemlenmiş. M_f sıcaklıklarında da düşüşler tespit edilmiş. Elde edilen değişimler şekil 7.112 de DSC eğrisinde ve tablo 7.31 de açıkça belirtilmektedir.



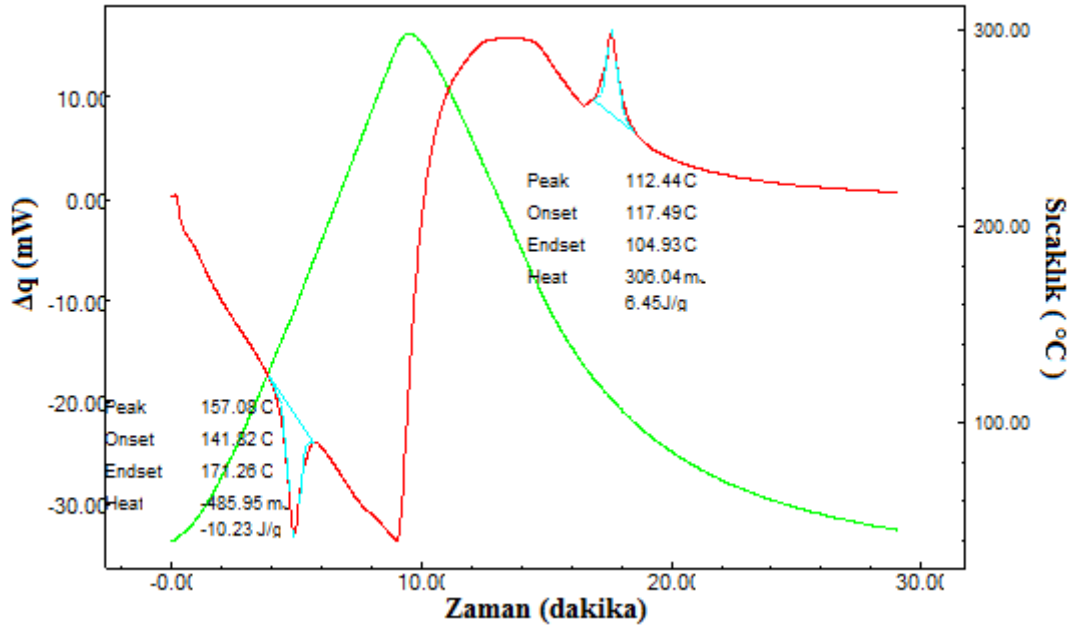
Şekil 7.107. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



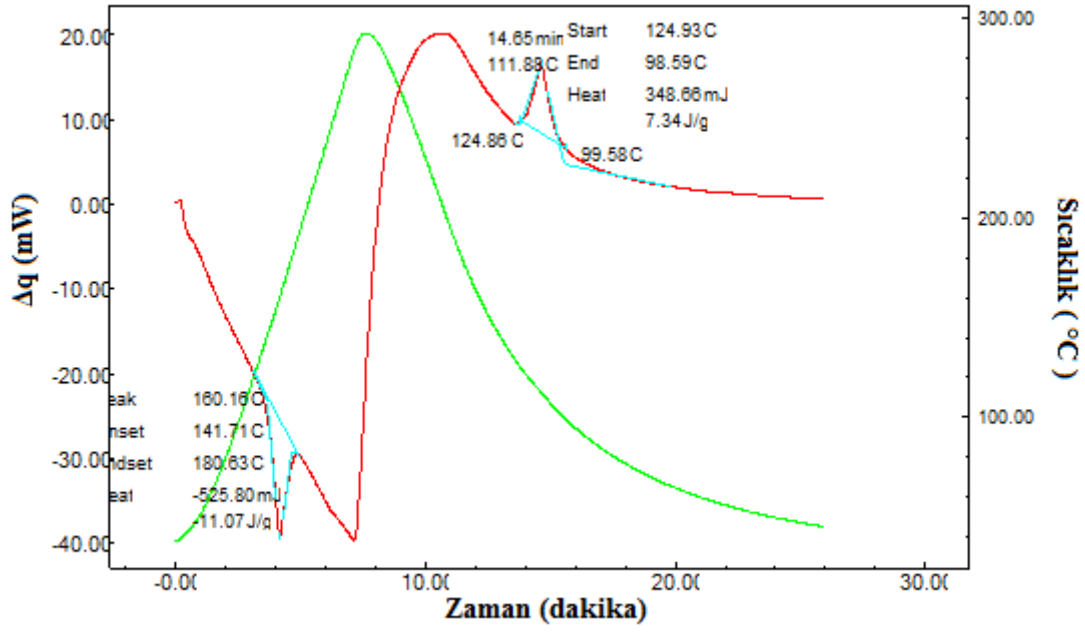
Şekil 7.108. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



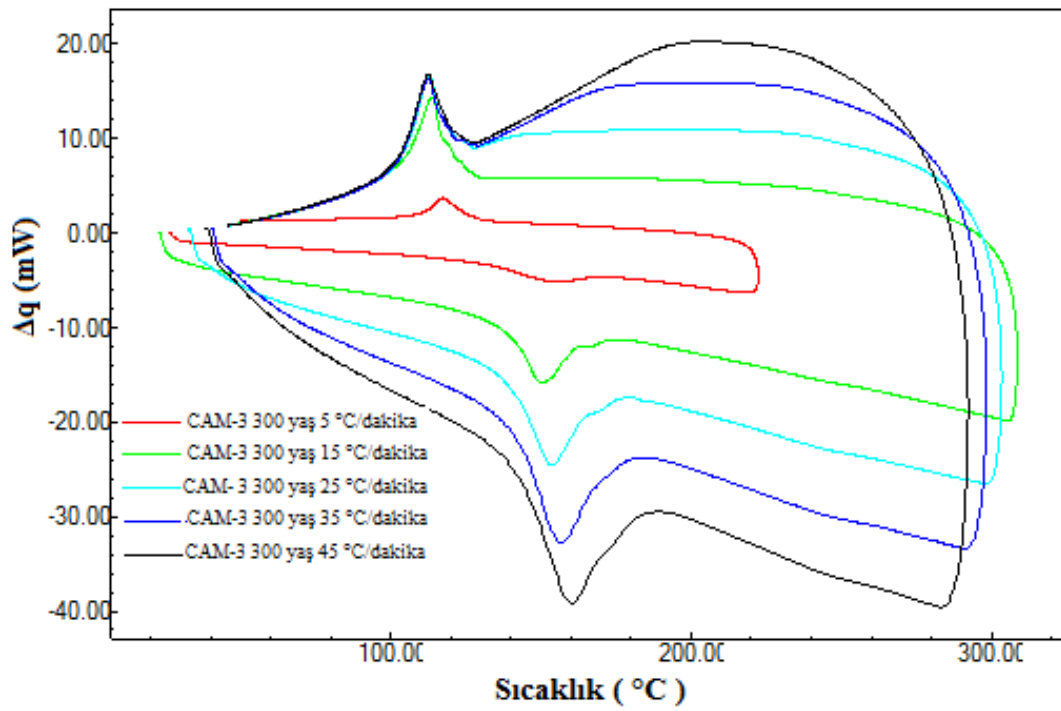
Şekil 7.109. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.110. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.111. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



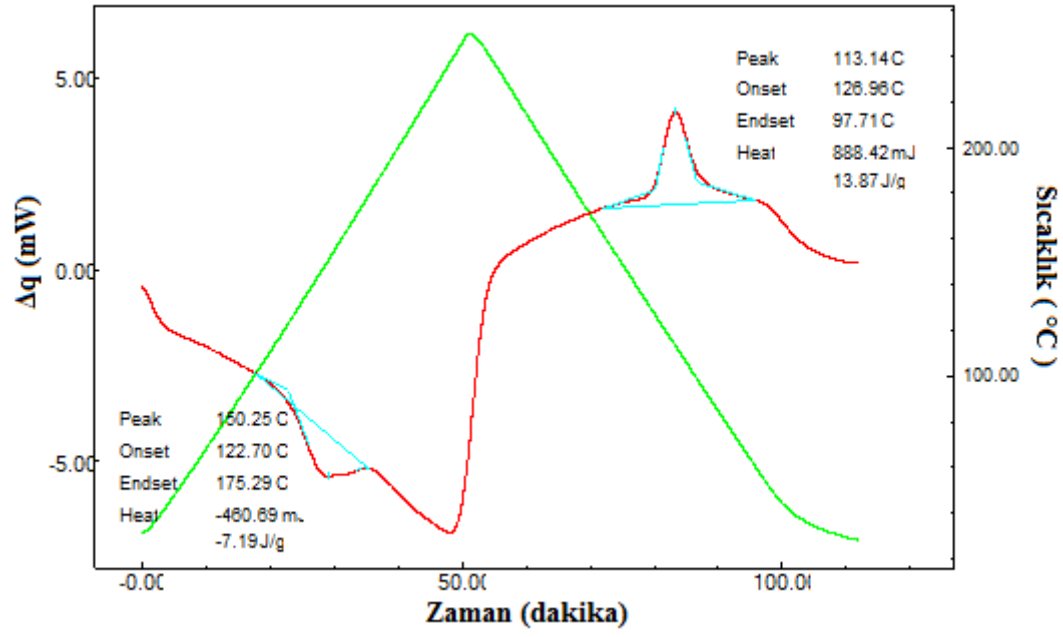
Şekil 7.112. CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.31. CAM-3 300 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

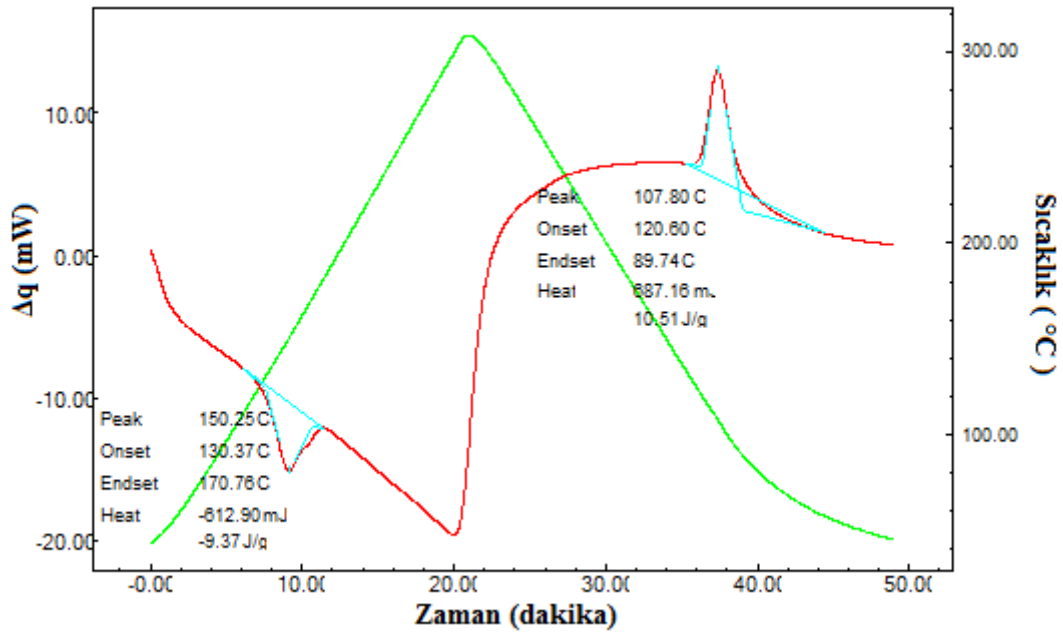
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	132.58	165.37	157.00	146.05	7.67	0.052	126.73	110.31	-12.45	-0.082
15	138.04	161.84	150.41	140.37	11.09	0.079	118.91	101.60	-15.45	-0.110
25	137.75	167.06	153.84	146.59	10.84	0.073	126.13	96.25	-8.06	-0.054
35	141.82	171.26	157.08	144.36	10.23	0.070	117.46	104.93	-6.45	-0.044
45	141.71	180.63	160.16	152.78	11.07	0.072	124.93	98.59	-7.34	-0.048

CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.113 – 7.117 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.32 de verilmiştir.

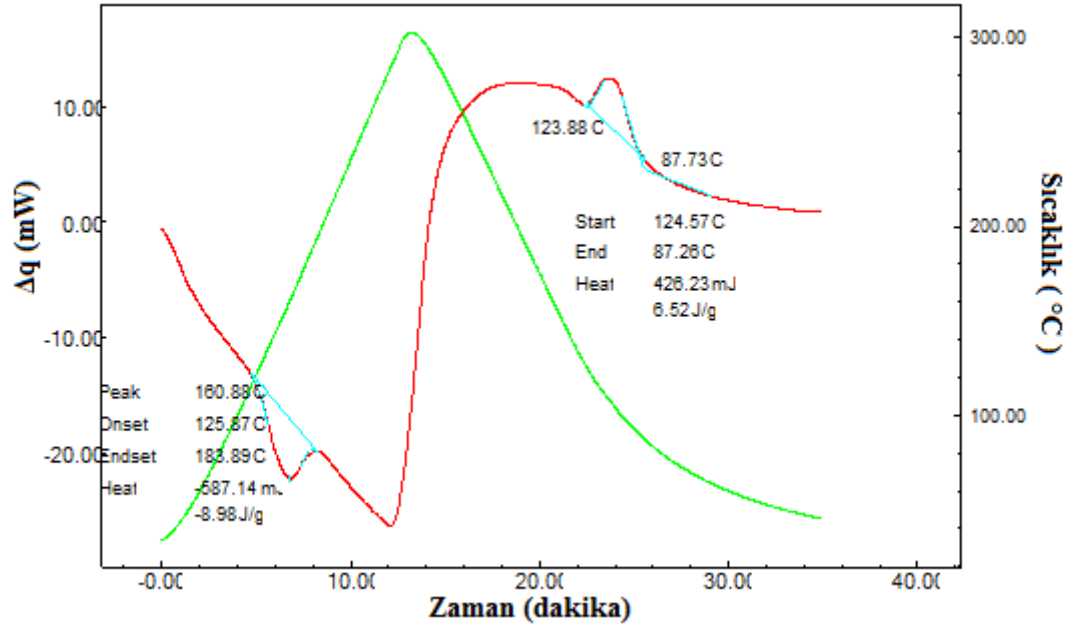
CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 122.70-175.29°C, 130.37- 170.76°C, 125.87- 183.89°C, 132.05- 184.54°C, 131.68- 193.61°C dir. Her bir ısıtma hızı için elde edilen martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 126.96-97.71°C, 120.60- 89.74°C, 124.57- 87.26°C, 116.42- 95.63°C, 118.60- 90.93°C, olarak belirlenip tablo 7.32 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s ve A_f sıcaklıkları genel olarak artması şeklinde gözlemlenirken M_s ve M_f sıcaklıklarında azalış ve artışlar gözlemlenmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.118 de DSC eğrisinde ve tablo 7.32 de açıkça belirtilmektedir.



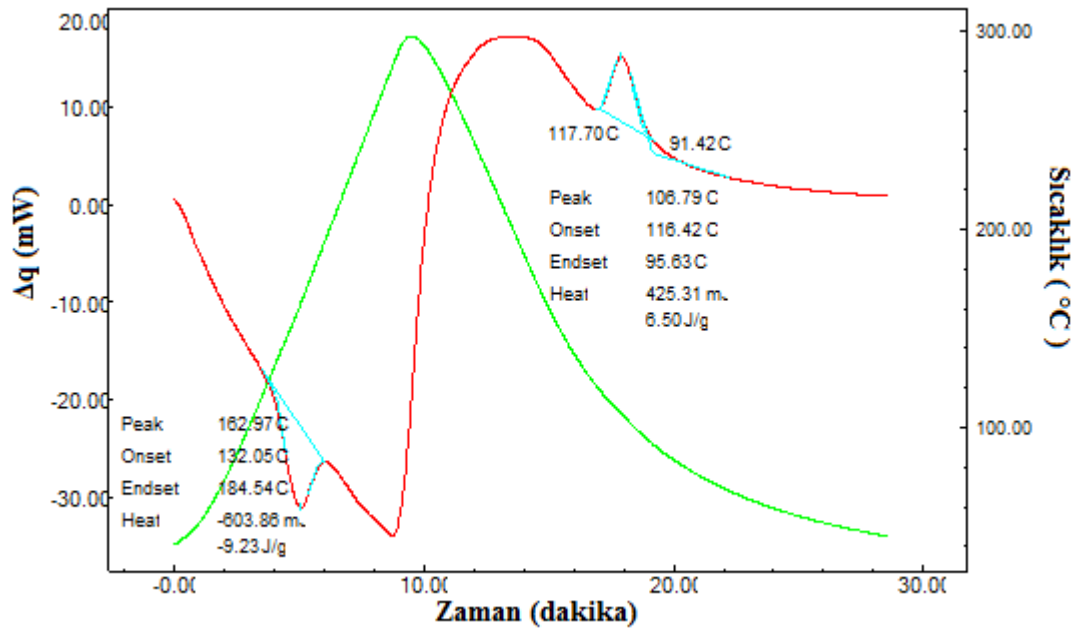
Şekil 7.113. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



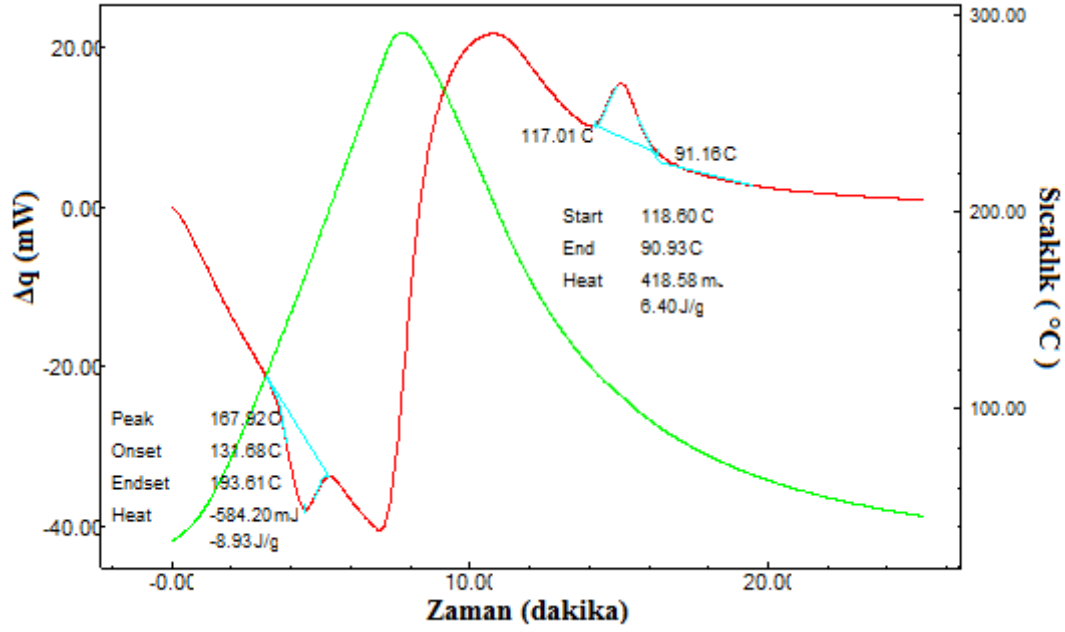
Şekil 7.114. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



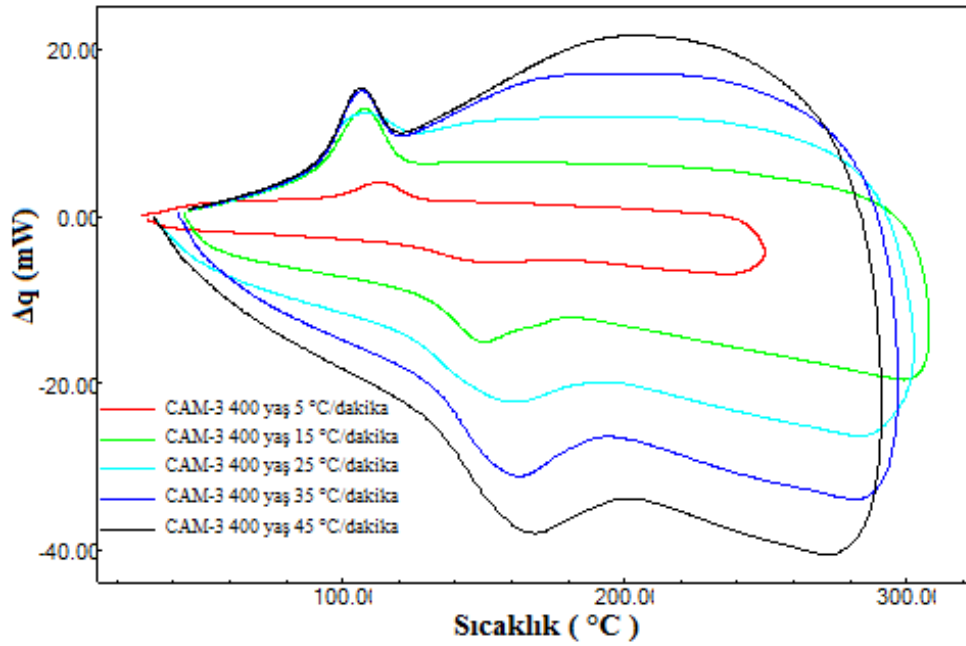
Şekil 7.115. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.116. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.117. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



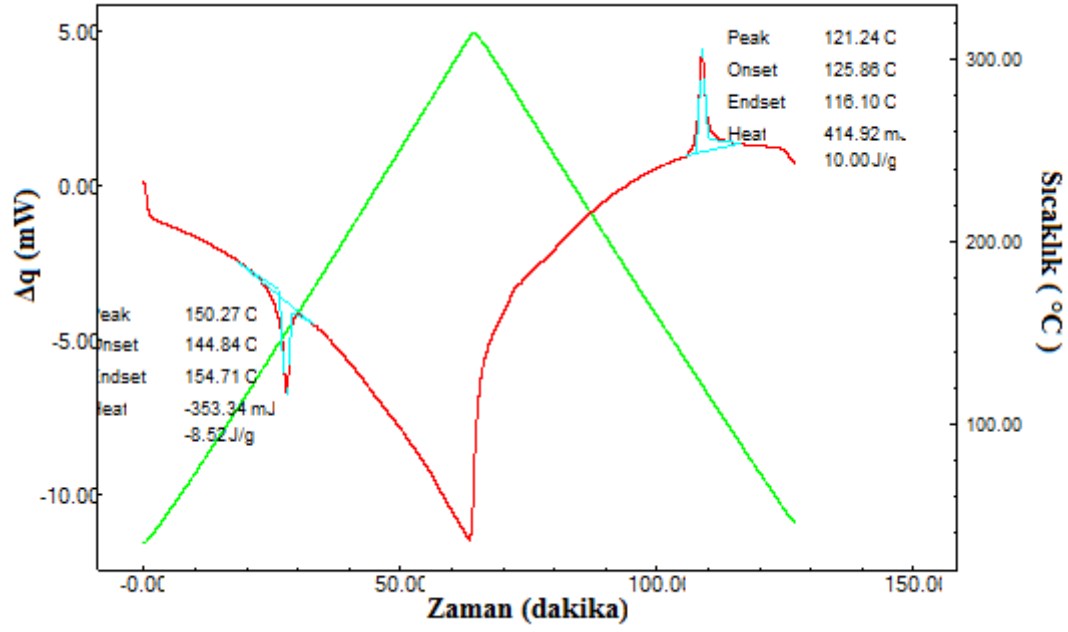
Şekil 7.118. CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.32. CAM-3 400 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

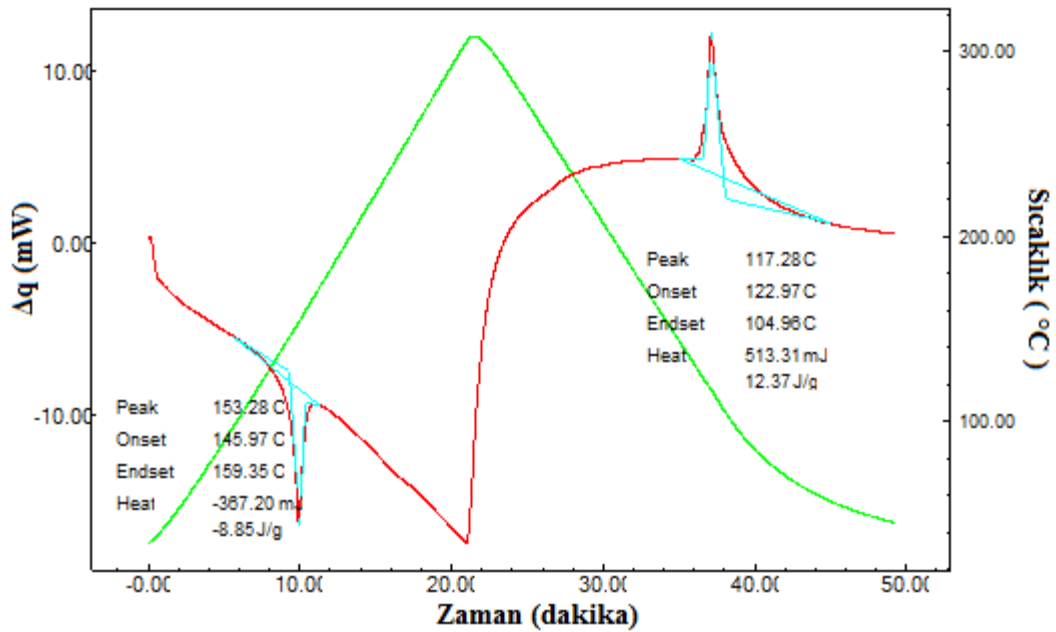
Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	122.70	175.29	150.25	151.12	7.19	0.047	126.96	97.71	-13.87	-0.091
15	130.37	170.76	150.25	145.68	9.37	0.064	120.60	89.74	-10.51	-0.072
25	125.87	183.89	160.88	154.23	8.98	0.058	124.57	87.26	-6.52	-0.042
35	132.05	184.54	162.97	150.48	9.23	0.061	116.42	95.63	-6.50	-0.043
45	131.68	193.61	167.92	156.10	8.93	0.057	118.60	90.93	-6.40	-0.040

CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait farklı ısıtma hızları ile (5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika) elde edilen DSC eğrileri şekil 7.119 – 7.123 ile verilmiştir. Elde edilen bu eğrilerden dönüşüm sıcaklıkları, entalpi değerleri belirlenip, denge sıcaklıkları denklem 3.1, entropi değerleri denklem 2.9 dan hesaplanıp, tablo 7.33 de verilmiştir.

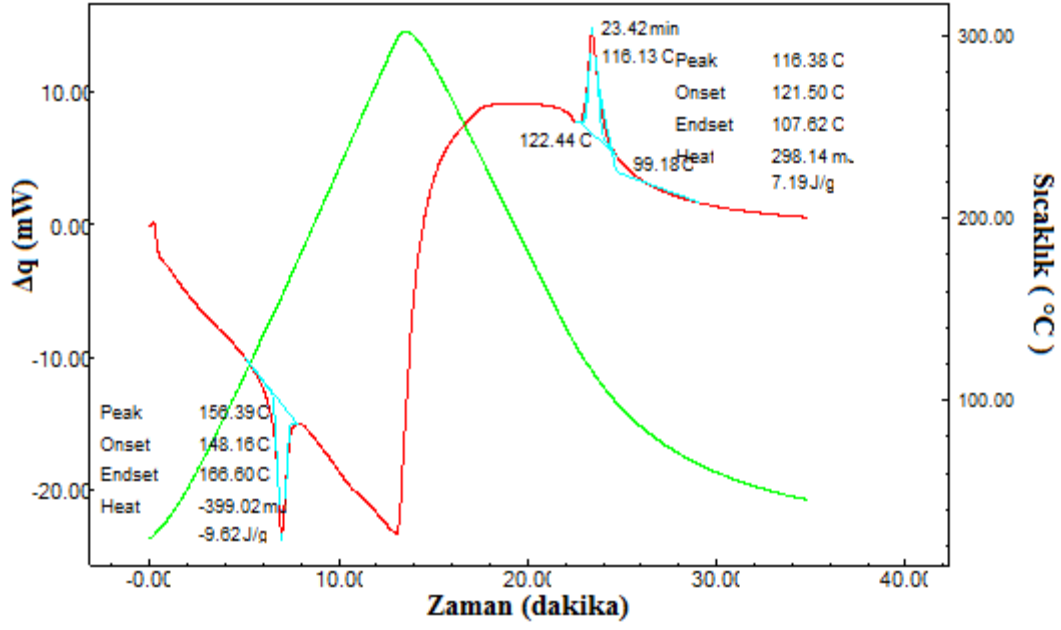
CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen austenit başlama ve bitiş dönüşüm sıcaklık aralıkları sırası ile 144.84-154.71°C, 145.97- 159.35°C, 148.16- 166.60°C, 148.98- 171.21°C, 149.10- 175.61°C dir. Her bir ısıtma hızı için martensit başlama ve bitiş sıcaklık aralıkları sırası ile 125.86- 116.10°C, 122.97- 104.96°C, 121.50- 107.62°C, 123.26- 100.46°C, 121.73- 104.39°C, olarak belirlenip tablo 7.33 de verilmiştir. Farklı ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde ısıtma hızı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında da değişimler gözlemlenmiştir. Bu değişimler; ısıtma hızı arttıkça A_s ve A_f sıcaklıkları artması şeklinde gözlemlenirken M_s ve M_f sıcaklıklarında genel bir düşüş gözlemlenmiştir. Elde edilen değişimler şekil 7.124 de DSC eğrisinde ve tablo 7.33 de açıkça belirtilmektedir.



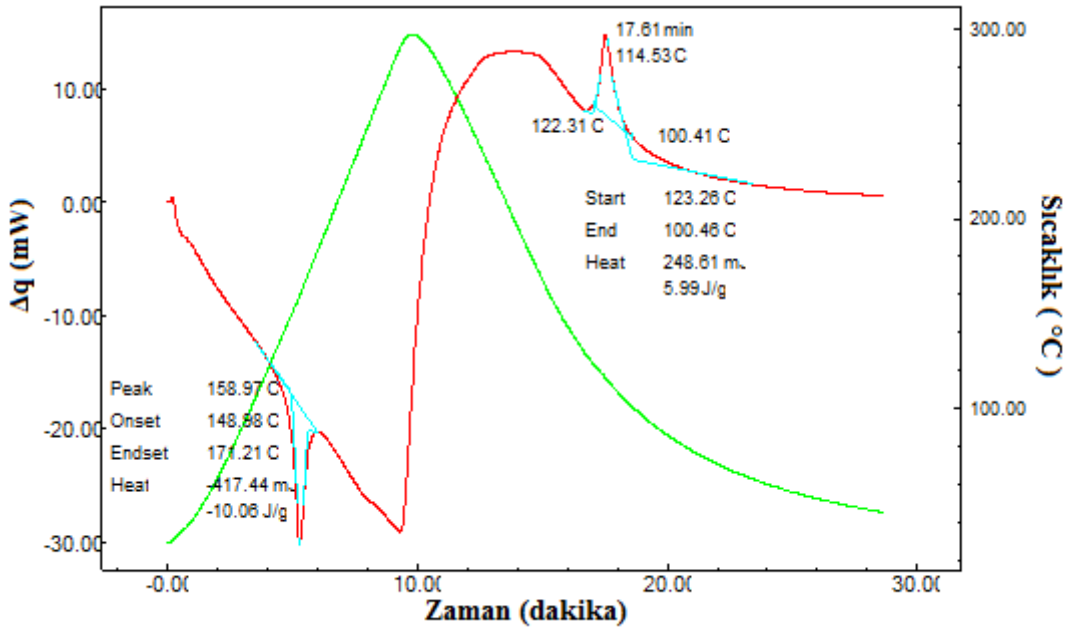
Şekil 7.119. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



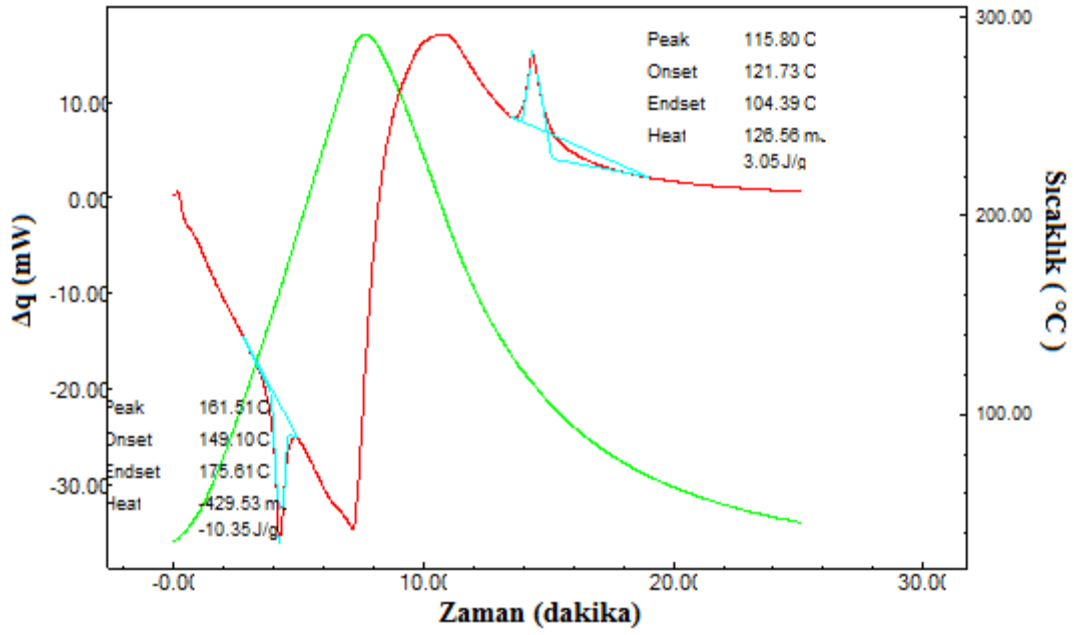
Şekil 7.120. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 15 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



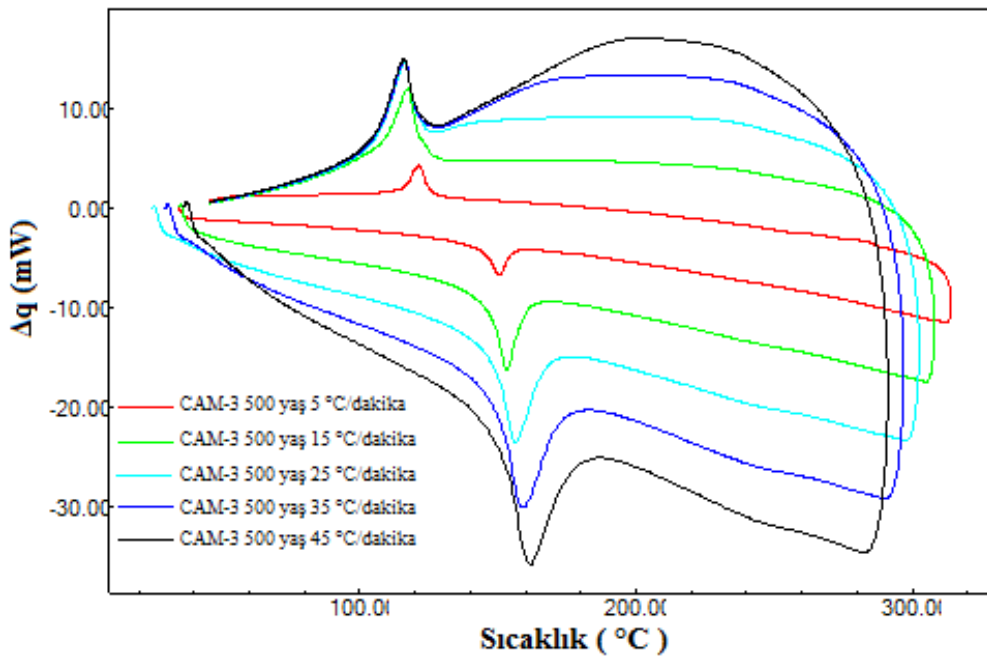
Şekil 7.121. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.122. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 35 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.



Şekil 7.123. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 45 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrisi.

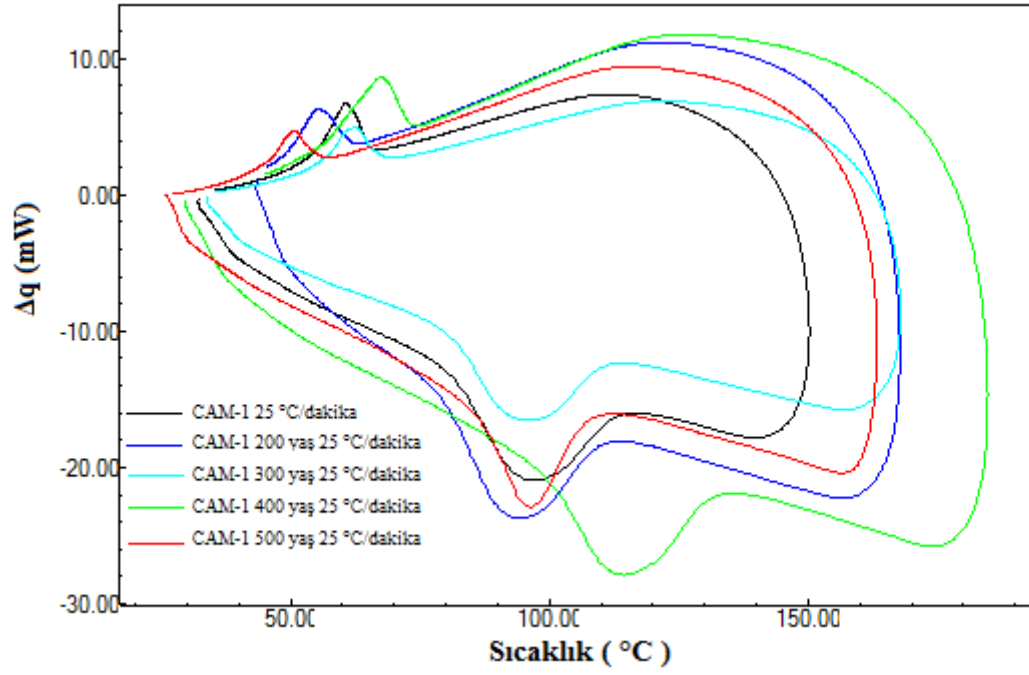


Şekil 7.124. CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış numunesine ait 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.33. CAM-3 500 °C’de yaşlandırılmış numunesine ait elde edilen dönüşüm sıcaklıkları.

Isıtma / Soğutma Hızı (°C/dakika)	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
5	144.84	154.71	150.27	140.28	8.52	0.060	125.86	116.10	-10.00	-0.071
15	145.97	159.35	153.28	141.16	8.85	0.062	122.97	104.96	-12.37	-0.087
25	148.16	166.60	156.39	144.05	9.62	0.066	121.50	107.62	-7.19	-0.049
35	148.98	171.21	158.97	147.23	10.06	0.068	123.26	100.46	-5.99	-0.040
45	149.10	175.61	161.51	148.67	10.35	0.069	121.73	104.39	-3.05	-0.020

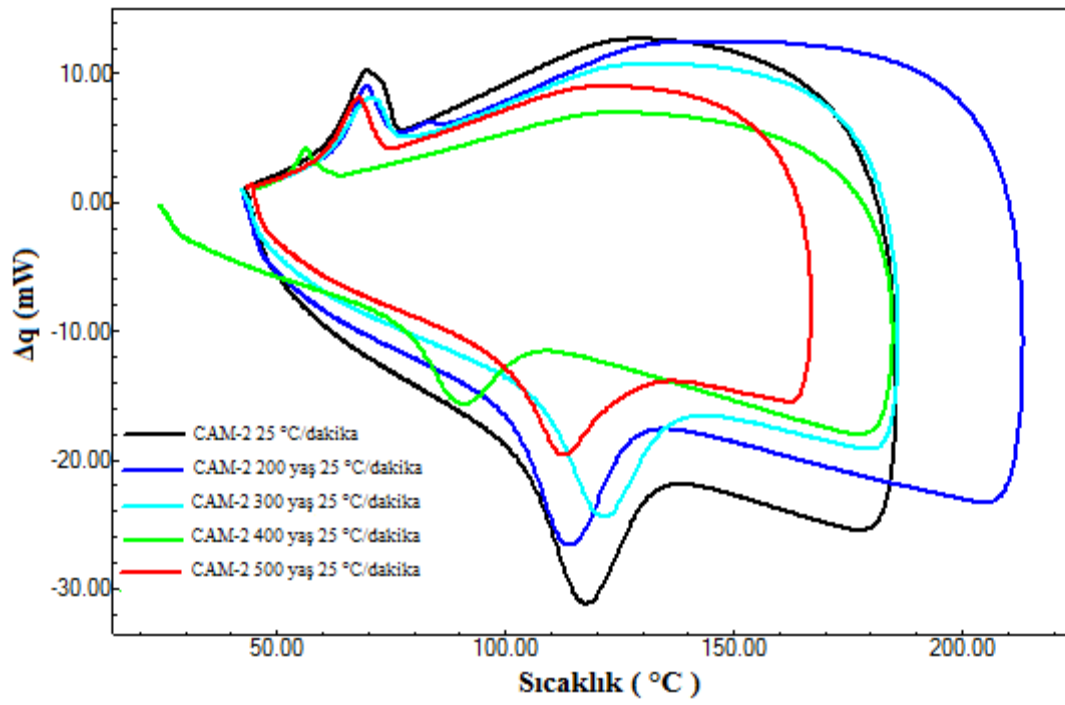
CAM-1, CAM-1 200 °C de yaşlandırılmış, CAM-1 300 °C de yaşlandırılmış, CAM-1 400 °C de yaşlandırılmış, CAM-1 500 °C de yaşlandırılmış, CAM-2, CAM-2 200 °C de yaşlandırılmış, CAM-2 300 °C de yaşlandırılmış, CAM-2 400 °C de yaşlandırılmış, CAM-2 500 °C de yaşlandırılmış, CAM-3, CAM-3 200 °C de yaşlandırılmış, CAM-3 300 °C de yaşlandırılmış, CAM-3 400 °C de yaşlandırılmış, CAM-3 500 °C de yaşlandırılmış alaşımlarına ait dönüşüm sıcaklıkları ve kinetik parametreleri (entalpi, entropi) 25 °C/dakika ısıtma hızı ile alınmış DSC ölçümleri ile belirlenmiştir ve bu ölçümler tablo 7.34 - 7.36 de özetlenmiştir. Alaşımlarda dönüşüm sıcaklıklarında, kinetik parametrelerde yaşlanma sıcaklığına bağlı değişimler gözlenmiştir. Alaşımlarda yaşlandırma işleminde yaşlandırma sıcaklığı arttırıldıkça dönüşüm sıcaklıklarında da genel olarak artışlar tespit edilmiştir. Bu değişimler şekil 7.125, şekil 7.126, şekil 7.127’ de DSC eğrileri ile ve tablo 7.34, tablo 7.35, tablo 7.36’da açıkça belirtilmektedir.



Şekil 7.125. CAM-1 alaşımı ve CAM-1 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C sıcaklığında 1 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımlara ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7. 34. CAM-1 numunesine ait farklı yaşlandırma sıcaklıklarına bağlı 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları değişimi.

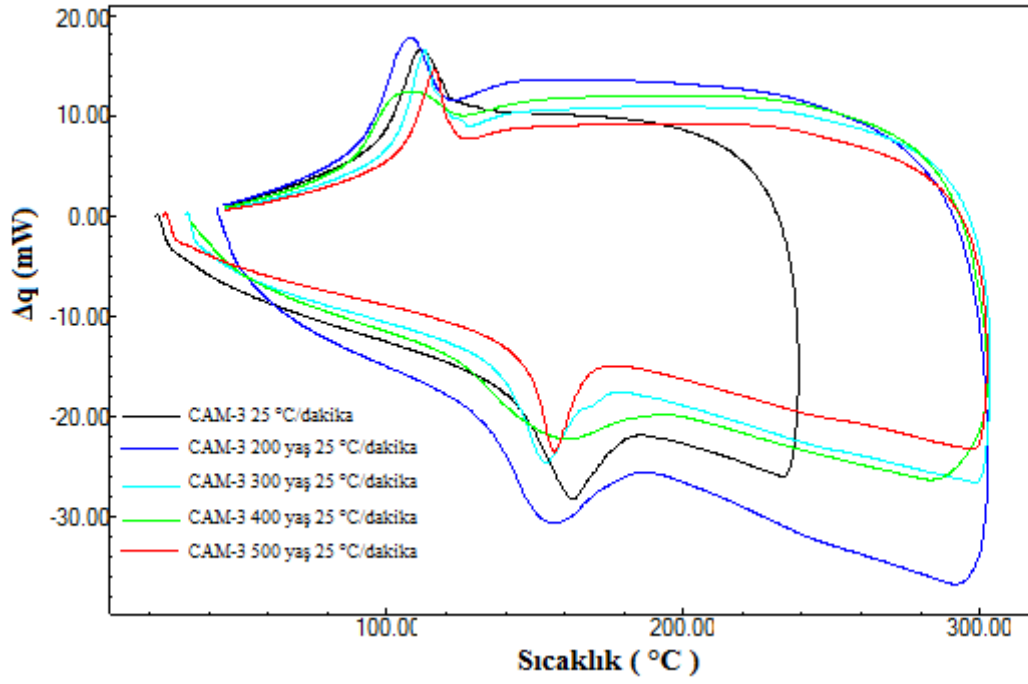
Alaşım Kodu	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
CAM-1	81.20	111.79	97.13	88.63	8.06	0.090	65.48	54.83	-5.39	-0.060
CAM-1 200 yaş	79.53	108.97	94.16	85.05	7.30	0.085	61.13	49.63	-4.66	-0.054
CAM-1 300 yaş	81.63	109.21	95.65	87.85	7.73	0.087	66.49	56.35	-4.69	-0.053
CAM-1 400 yaş	97.94	130.26	114.29	101.69	8.88	0.087	73.13	55.97	-5.70	-0.056
CAM-1 500 yaş	85.05	106.52	96.10	80.57	7.71	0.095	54.62	45.15	-3.25	-0.040



Şekil 7.126. CAM-2 alaşımı ve CAM-2 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C sıcaklığında 1 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımlara ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrileri.

Tablo 7.35. CAM-2 numunesine ait farklı yaşlandırma sıcaklıklarına bağlı 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları değişimi.

Alaşım Kodu	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
CAM-2	104.46	130.66	117.45	103.04	9.90	0.096	76.14	61.65	-6.24	-0.060
CAM-2 200 yaş	101.23	126.37	114.12	100.59	9.09	0.090	74.81	63.60	-4.30	-0.042
CAM-2 300 yaş	107.46	134.20	121.47	105.06	7.66	0.072	75.92	61.03	-4.45	-0.042
CAM-2 400 yaş	77.25	102.28	90.70	80.75	7.73	0.095	59.23	52.89	-4.61	-0.057
CAM-2 500 yaş	101.01	127.35	112.52	100.25	6.02	0.060	73.15	60.30	-4.60	-0.045

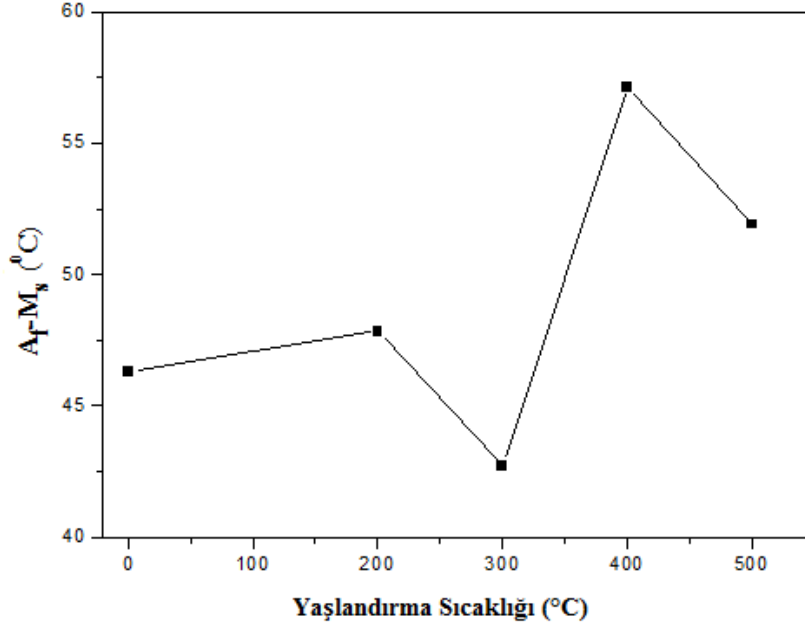


Şekil 7.127. CAM-3 alaşımı ve CAM-3 alaşımına ait 200, 300, 400, 500 °C sıcaklığında 1 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulan alaşımlara ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen DSC eğrileri.

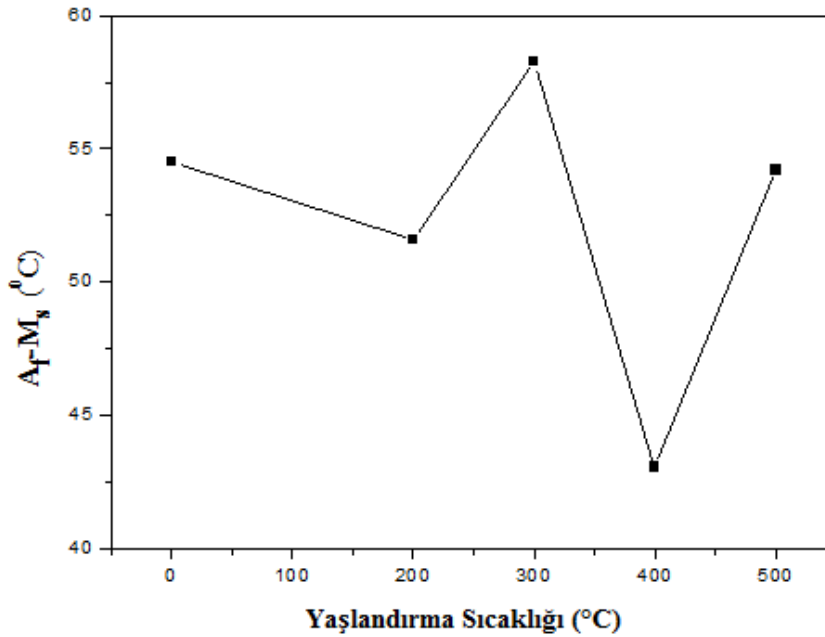
Tablo 7.36. CAM-3 Numunesine ait farklı yaşlandırma sıcaklıklarına bağlı 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları değişimi.

Alaşım Kodu	A_s (°C)	A_f (°C)	A_{max} (°C)	T_0 (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	$\Delta S_{M \rightarrow A}$ (J/g°C)	M_s (°C)	M_f (°C)	$\Delta H_{A \rightarrow M}$ (J/g)	$\Delta S_{A \rightarrow M}$ (J/g°C)
CAM-3	141.01	178.20	162.84	150.72	10.12	0.067	123.25	97.00	-9.63	-0.063
CAM-3 200 yaş	133.15	178.29	156.58	148.61	10.40	0.069	118.94	91.40	-6.83	-0.045
CAM-3 300 yaş	137.75	167.06	153.84	146.59	10.84	0.073	126.13	96.25	-8.06	-0.054
CAM-3 400 yaş	125.87	183.89	160.88	154.23	8.98	0.058	124.57	87.26	-6.52	-0.042
CAM-3 500 yaş	148.16	166.60	156.39	144.05	9.62	0.066	121.50	107.62	-7.19	-0.049

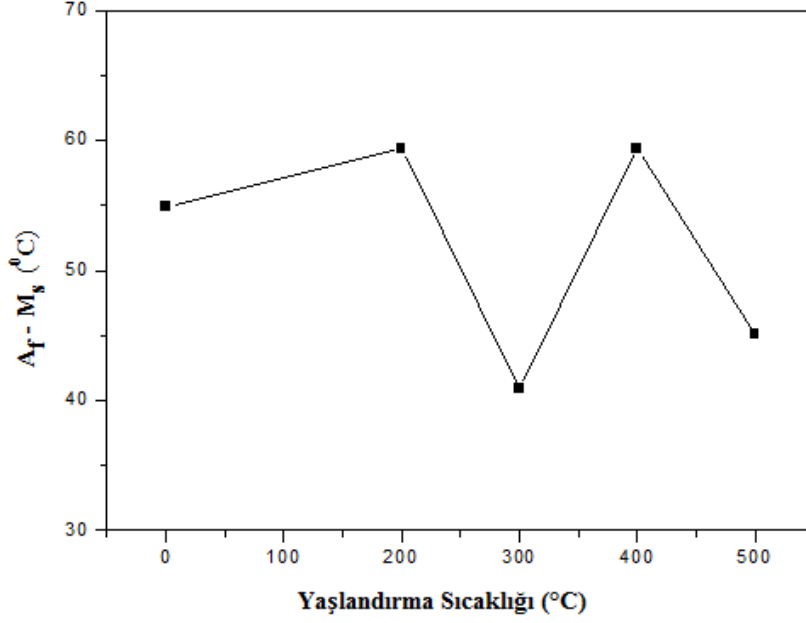
CAM-1, CAM-2, CAM-3 alaşımlarına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile alınan DSC ölçümlerinden elde edilen A_f ve M_s değerleri ile yaşlandırma sıcaklığı arasındaki ilişkiyi görebilmek için şekil 7.128, şekil 7.129, şekil 7.130'daki $A_f - M_s$ histerisisi çizilmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı artışına bağlı olarak $A_f - M_s$ değerlerinin de değiştiği belirlendi.



şekil 7.128. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM1 alaşımlarına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen $A_f - M_s$ sıcaklık farkında meydana gelen değişim.

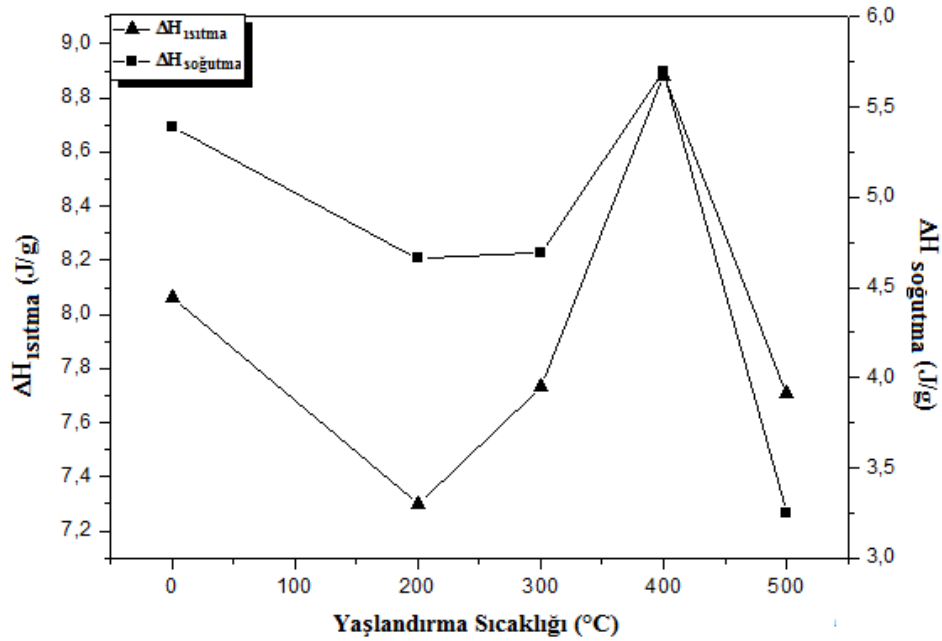


şekil 7.129. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM2 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen $A_f - M_s$ sıcaklık farkında meydana gelen değişim.

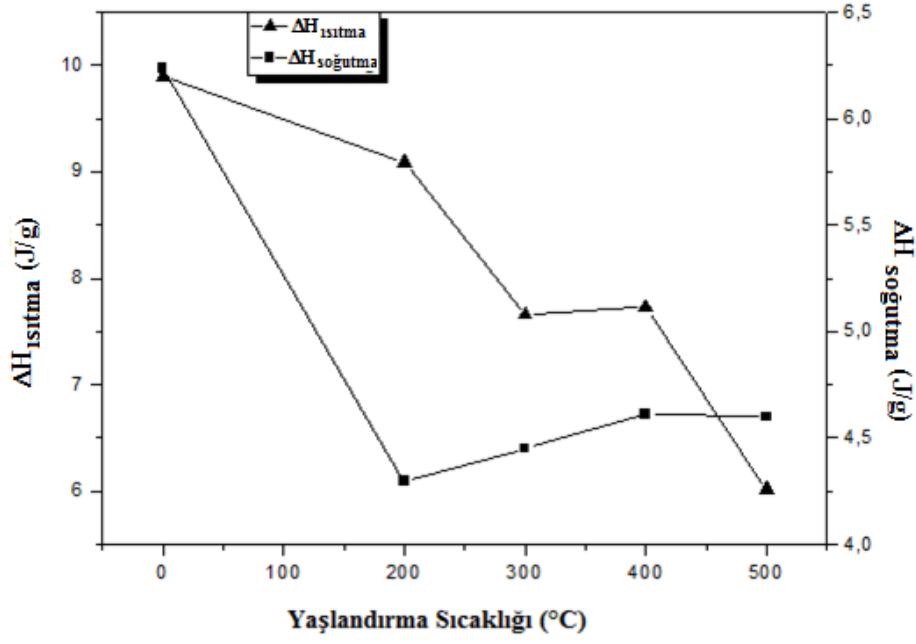


Şekil 7.130. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM3 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen $A_f - M_s$ sıcaklık farkında meydana gelen değişim.

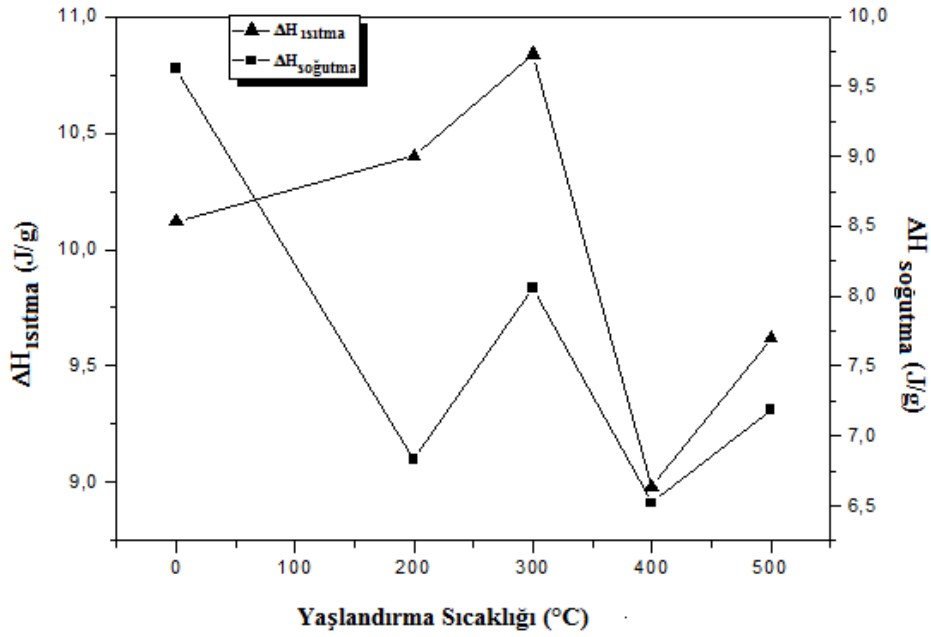
CAM-1, CAM-2, CAM-3 alaşımlarına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile alınan DSC ölçümlerinden elde edilen entalpi değerleri kullanılarak yaşlandırma sıcaklığı arasındaki ilişkiyi görebilmek için şekil 7.131, şekil 7.132, şekil 7.133'deki grafikler çizilmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı artışına bağlı olarak entalpi değerlerinde genel bir düşüş belirlendi.



Şekil 7.131. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-1 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entalpi değerlerinde meydana gelen değişim.

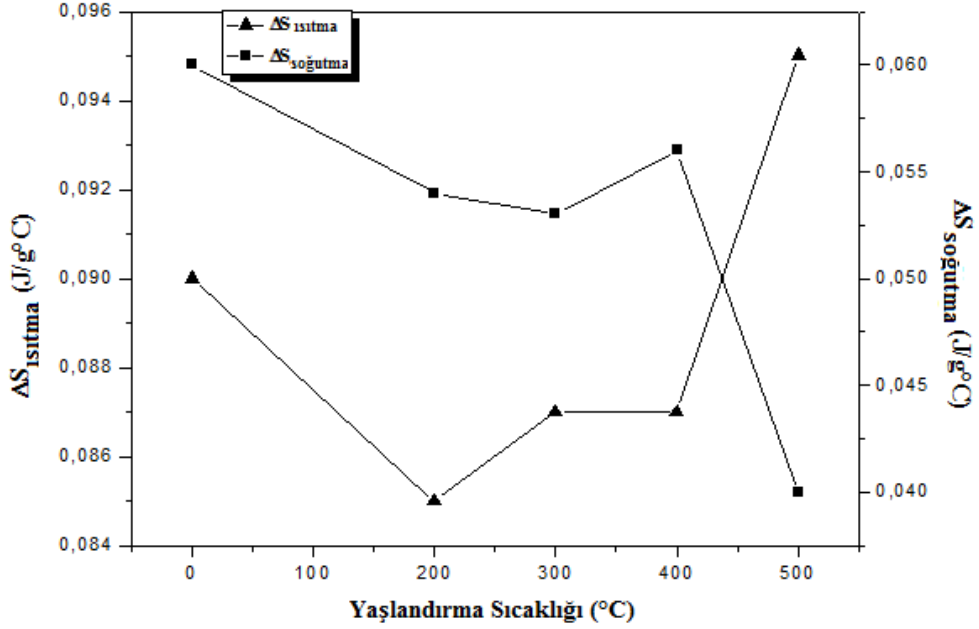


Şekil 7.132. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-2 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entalpi değerlerinde meydana gelen değişim.

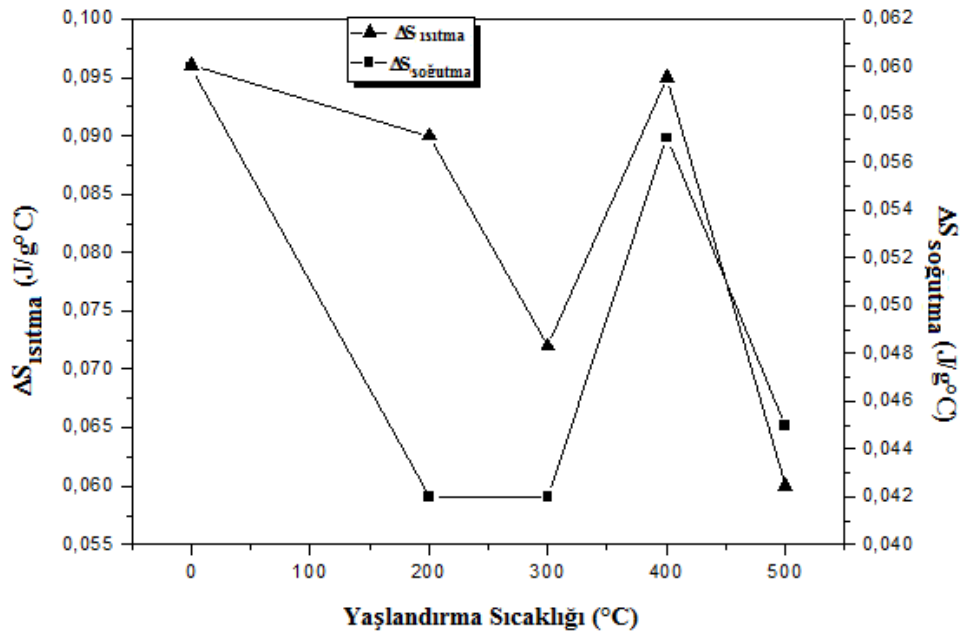


Şekil 7.133. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-3 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entalpi değerlerinde meydana gelen değişim.

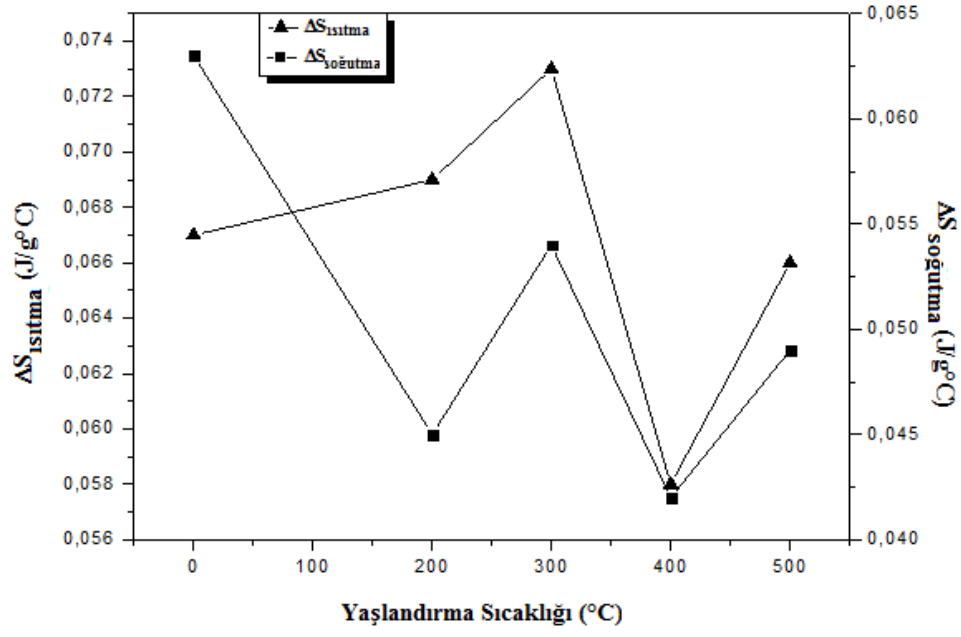
CAM-1, CAM-2, CAM-3 alaşımlarına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile alınan DSC ölçümlerinden elde edilen entropi değerleri kullanılarak yaşlandırma sıcaklığı arasındaki ilişkiyi görebilmek için şekil 7.134, şekil 7.135, şekil 7.136'deki grafikler çizilmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı artışına bağlı olarak entropi değerlerinde genel olarak bir azalış belirlendi.



Şekil 7.134. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-1 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entropi değerlerinde meydana gelen değişim.



Şekil 7.135. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-2 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entropi değerlerinde meydana gelen değişim.



Şekil 7.136. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı CAM-3 alaşımına ait 25 °C/dakika ısıtma hızı ile elde edilen entropi değerlerinde meydana gelen değişim.

8. SONUÇ VE TARTIŞMA

Bu çalışmada Cu-%23,01 Al- %4,34 Mn (%at.), Cu-%26,56 Al- %3,06 Mn (%at.) ve Cu-%27,96 Al- %4,60 Mn (%at.) kompozisyonlu şekil hatırlamalı 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. Bu çalışma sonunda şu sonuçlara ulaşıldı.

I. X-Işını Difraksiyon Sonuçları

Yukarıda belirtilen oranlara sahip Cu-Al-Mn üçlü şekil hafızalı alaşımların X-ışını difraktogramlarında 2θ değerlerine karşılık gelen yansıma veren düzlemleri ve şiddetleri belirlendi.

X-ışını ölçümlerinde yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak yaşlandırma sıcaklığı arttıkça piklerdeki keskinliği artmakta aynı zamanda da şiddeti de azalmaktadır. Alaşımlarda yaşlandırılma işlemi uygulanmadan önce geniş pikler gözlemlenmiş ve pikler iç içe geçmiş ve yarılmalarda şeklinde bir bütün halinde ayrılmamıştır. Fakat alaşımda yaşlandırma işlemi uygulandıktan sonra alınan X-ışını difraktometresinden de anlaşıldığı üzere piklerin keskinliği artmış, pikler ayrılmaya başlamış ve piklerin şiddeti de azalmıştır. Elde edilen X-ışınları difraktometresinden elde edilen düzlemlere ait keskin piklerin temel fazlara ait düzlemler olduğu literatür araştırmaları ile de doğrulanmıştır [9,15,17].

Yapılan bu çalışmada X-ışını difraktogramlarında da anlaşıldığı üzere temel pikler (1210), (0022) ve (202) düzlemleridir. Yansıma veren bu düzlemlere ait parametreler $a = 4,494 \text{ Å}$; $b = 5,189 \text{ Å}$; $c = 46,610 \text{ Å}$ olarak bulundu. Bundan dolayı bu düzlemlerin ortorombik kristal yapıya sahip oldukları belirlenmiştir. Yaşlandırma sıcaklığı arttıkça ana piklerin şiddeti azalmakta farklı yansıma veren pikler de oluşmaktadır.

II. Metalografik Gözlem Sonuçları

CAM-1, CAM-2, CAM-3 alaşımları ve bu alaşımlara ait 200, 300, 400, 500 °C’de yaşlandırılmış numunelerinin yüzeyleri parlatılıp dağlandıktan sonra optik mikroskop yardımı ile görüntüleri aynı büyütme (100 μm) ile çekilip incelendi.

Çekilen bu optik görüntülerde şekil 7.19, şekil 7.24, şekil 7.29’da görüldüğü gibi oda sıcaklığında yapılar tamamen martensit fazdadırlar. Bu yapıların bazıları V-tipi bazıları ise iğne tipi martensitlerdir. Bu çekilen yüzey fotoğraflarında martensit yapılar farklı yönelimler de göstermektedir.

CAM-1, CAM-2, CAM-3 alaşımına ait sırası ile şekil 7.23, şekil 7.28, şekil 7.33’de 500 °C’ de yaşlandırılmış numunesine ait yüzey fotoğrafları incelendiğinde çökelti fazları açıkça görülmektedir. Ayrıca yaşlandırma sıcaklığı artıkça martensit yüzeylerin kaybolduğunu, alaşımdaki yaşlandırma işleminden önceki tane sınırlarının yaşlandırıldıktan sonra daha genişleyip, belirginleştiğini çekilen bu yüzey fotoğrafları ile tespit edildi.

Alaşım içerisinde yaşlandırma sıcaklığının artışına bağlı olarak oluşan bu çökelti fazları numunenin dönüşüm sıcaklıkları ve kinetik parametrelerini de etkilemektedir. Çökelti fazları şekil hatırlama etkisini olumsuz yönde etkilemektedir. Çökelti fazları ne kadar fazla ise şekil hatırlama etkisi de o kadar düşük çökelti fazları az ise şekil hatırlama özelliği o kadar yüksektir. Dolayısı ile yaşlandırma sıcaklığı ile şekil hatırlama özelliği arasında da bir ilişki olduğu söylenebilir. Yaşlandırma sıcaklığı artıkça çökelti fazları artmakta çökelti fazları artıkça şekil hatırlama özelliği o oranda azalmaktadır [22, 37, 40].

III. Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC) Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmadaki farklı kompozisyonlu Cu-Al-Mn üçlü alaşımında; dönüşüm sıcaklıkları, entalpi, entropi, değerlerini elde etmek için farklı ısıtma hızları ile DSC ölçümleri alındı. Alaşımların ayrı ayrı 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızlarına karşı dönüşüm sıcaklıkları ve kinetik parametreleri belirlendi.

200, 300, 400, 500 °C’de yaşlandırılmış numunelerinin ayrı ayrı 5, 15, 25, 35, 45 °C/dakika ısıtma hızları ile alınan DSC ölçümlerinde de ısıtma hızı artıkça dönüşüm sıcaklıkları, $\Delta H_{M \rightarrow A}$ ve $\Delta S_{M \rightarrow A}$ ve $\Delta H_{A \rightarrow M}$ ve $\Delta S_{A \rightarrow M}$ kinetik parametreleri de değişmektedir. Buna ek olarak yaşlandırma sıcaklığı artıkça şekil hatırlama özelliği azalmakta dönüşüm sıcaklıkları artmaktadır. Bunun sebebi ise çökelti fazlarından kaynaklanmaktadır. Çekilen optik mikroskop görüntüleri ve literatür araştırmaları ile bu sonuç desteklenmektedir. Çökelti fazları şekil hatırlama özelliğini olumsuz yönde etkilediği gibi kinetik parametreler ve dönüşüm sıcaklıklarını da etkilemektedir [17, 22, 37, 40].

9. KAYNAKLAR

- [1]. **Sarı, U.**, 2004 “Şekil Hatırlamalı Cu%11.92Al%3.78Ni Alaşımında Martensitik dönüşümler Üzerinde Termal ve Mekanik Etkiler” *Doktora Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [2]. **Baksan, B., Gürler, R.**, 2006 “Bakır Esaslı Şekil Bellekli Alaşımların Üretimi ve Çekme Deneyi ile Karakterizasyonu” *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 10 Cilt, 1. Sayı.
- [3]. **Haberkorn, N., Lovey, F.C., Condo, A.M., Guimpel, J.**, 2010 “Development and Characterization of Shape Memory Cu-Zn-Al Thin Films” *Materials Science and Engineering B* 170, 5-8.
- [4]. **Perez-Landazabal, J.I., Recarte, V., Sanchez-Alarcos, V., No, M.L., San Juan, J.**, 2006 “Study of the Stability and Decomposition Process of the β Phase in Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys” *Materials and Engineering A* 438-440, 734-737.
- [5]. **Lopez, G.A., Barrado, M., San Juan, J.M., No, M.L.**, 2008 “Interaction of Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys Particles with Molten In and In+Sn Matrices” *Materials Science and Engineering A* 495, 304-309.
- [6]. **S. Pourkhorshidi., N.Parvin., M.S.Kenevisi., M.Naeimi., H.EbrahimniaKhaniki.**, 2012 “A Study on the Microstructure and Properties of Cu-Based Shape Memory Alloy Produced by Hot Extrusion of Mechanically Alloyed Powders” *Materials and Engineering A* 556, 658-663.
- [7]. **G. Lojen., M. Gojic., I. Anzel.**, 2013 “Continuously Cast Cu–Al–Ni Shape Memory Alloy Properties in As-Cast Condition” *Journal of Alloys and Compounds* 580, 497-505.
- [8]. **M. Reza Rezvani., A. Shokuhfar.**, 2012 “Synthesis and Characterization of Nano Structured Cu–Al–Mn Shape Memory Alloy by Mechanical Alloying” *Materials Science and Engineering A* 532, 282-286.
- [9]. **Özcan, G.**, 2010 “Şekil Hafızalı Alaşımların Farklı Sıcaklıklarda (5-300 °K) Magnetik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi” *Yüksek Lisans Tezi*, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
- [10]. **Eskil, M.**, 2000 “Şekil Hatırlamalı CuZnAl Alaşımlarında Soğutma Hızı Etkileri ve Çökelti Kinetikleri” *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [11]. **Akis, A.Ç., Eskil M., Seval E.**, “Farklı Etkiler Altında Şekil Hatırlamalı CoNiAl Alaşımlarının Martensitik Dönüşüm Sıcaklıklarındaki Değişimler” Muallim Rıfat Eğitim Fakültesi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi, 79000 Kilis.

- [12]. **C.Y. Chung., C.W.H. Lam., S.S. Tan.,** 1998 “Effect of Parent Phase Ageing on CuZnAl Shape Memory Alloys With Mn and Zr Addition” *Materials Letters* 33, 291-296.
- [13]. **Xiao Yan Liu., Qing Lin Pan., Li Yun Zheng., Quan Rong Fu., Fei Gao., Mei Xia Li., Yong Mei Bai.,** 2013 “Effect of Aging Temper on the Thermal Stability of Al–Cu–Mg–Ag Heat-Resistant Alloy” *Materials and Design* 46, 360-365.
- [14]. **V.V. Kokorin., L.E. Kozlova., A.N. Titenko.,** 2002 “Temperature Hysteresis of Martensite Transformation in Aging Cu–Mn–Al Alloy” *Scripta Materialia* 47, 499–502.
- [15]. **Çavdar, E.,** 2006 “Şekil Hatırlamalı Ni-Ti Alaşımında Difüzyonsuz Faz Dönüşümünün Termodinamik Özellikleri” *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [16]. **Sel, N.,** 2009 “Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni ve Cu-Al-Be Alaşımlarında Termal Yaşlandırma Etkileri” *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [17]. **Canbay, C. A.,** 2010 “Bakır Bazlı Şekil Hatırlamalı Alaşım Üretimi ve Alaşımların Yapısal, Termal ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi” *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [18]. **Kaya, M.,** 2008 “Toz Metalurjisi İle Üretilen Ni-Ti Şekil Hatırlamalı Alaşımların Metalurjik ve Mekanik Karakteristiklerinin İncelenmesi” *Doktora Tezi*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [19]. **James, R. D. And Hane, K. F.,** 2000 “Martensitic Transformations and Shape Memory Materials” *Acta Mater* 48, 197-222.
- [20]. **J. W. Christian.,** 2002 “The Theory of Transformation in Metals and Alloys” *Pergamon*, Part 1, 3rd ed., Oxford.
- [21]. **Gökdemir, N.,** 2006 “Şekil Hatırlamalı Cu- % 14,70 Al - %4,72 Ni Alaşımında Martensitik Dönüşümün Kristalografik ve Kinetik Özellikleri” *Yüksek Lisans Tezi*, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [22]. **Özcan, F.,** 2009 “Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni-Mn Alaşımında Martensitik Dönüşüm Üzerinde Termal Yaşlandırma Etkileri” *Yüksek Lisans Tezi*, Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [23]. **Kurt, B., Orhan, N.,** 2002 “Şekil Hafızalı Alaşımların Kullanım Alanları Üzerine Son Gelişmeler” *9. Denizli Malzeme Sempozyumu PAÜ-Mühendislik Fakültesi Denizli*, p 459-465.
- [24]. **Otsuka, K., Kakeshita, T.,** 2002 “Science and Technology of Shape-Memory Alloys:New Developments” *MRS Bulletin*.
- [25]. **Işık, A.,** 2007 “FePd Ferromagnetik Şekil Hafıza Alaşımının Kristalografisi” *Yüksek Lisans Tezi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.

- [26]. **Otsuka, K. and Ren, X.**, 1999 “Recent Developments in the Research of Shape Memory Alloys” *Review, Intermetallics* 7, p.526,526.
- [27]. **Kurt, B., Orhan, N.**, 2003 “Şekil Hafızalı Alaşımlarının Kaynak Edilebilirliği” *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları* 4, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- [28]. **Akdoğan, A., Nurveren, K.**, 2004, “Şekil Hafızalı Alaşımlar” İstanbul.
- [29]. **Soğuksu, A. K.**, “Şekil Hatırlamalı Cu-Al-Ni ve Cu-Zn-Al Alaşımların Üretilmesi ve Özelliklerinin İncelenmesi” *Yüksek Lisans Tezi*, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- [30]. **Tautzenberger, P.**, 1989 “Properties and Applications of Shape Memory Actuators” *The Martensitic Transformation in Science and Technology (Eds. E. Hornbogen and N. Jost)*, DGM Informations Gesellshapt, 213-222, Verlag, Germany.
- [31]. **Zanaboni, E.**, 2007/2008 “One Way and Two Way–Shape Memory Effect: Thermo–Mechanical Characterization of Ni–Ti Wires” *Yüksek Lisans Tezi*, Pavia Üniversitesi, Italya.
- [32]. **Perkins, J. ve Sponholz, R.O.**, 1984. “Stress-Induced Martensitic Transformation Cycling and Two- Way Shape Memory Training in Cu-Zn-Al Alloys” *Metall. Trans. A*, 15 A, 313-321.
- [33]. **Akdoğan, A.**, 2008. “Bakır ve Bakır Alaşımları Ders Notları” Kasım 2008.
- [34]. **Akdoğan, A.**, 2008 “Al ve Alaşımları Ders Notları” Kasım 2008.
- [35]. **Keskin A.**, 2013 “Cu-Al-Mn Şekil Hafızalı Alaşımında Vanadyum ve Kadminyum Katkısının Termal Özellikler Üzerine Etkisinin İncelenmesi” *Yüksek Lisans Ders Semineri*, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [36]. **U.S. Mallik, V. Sampath.**, 2008 “Influence of Aluminum and Manganese Concentration on the Shape Memory Characteristics of Cu–Al–Mn Shape Memory Alloys” *Journal of Alloys and Compounds*, 459, 142–147.
- [37]. **U.S. Mallik, V. Sampath.**, 2008 “Effect of Composition and Ageing on Damping Characteristics of Cu–Al–Mn Shape Memory Alloys” *Materials Science and Engineering A*, 478, 48–55.
- [38]. **Lam, C.W.H., Chung, C.Y., Ling, C. C., Fung, S., Beling, C.D.**, 1997 “Removal of Martensite Stabilisation in CAMTİM Shape Memory Alloy by Post-quench Ageing” *Jurnal of Materials Processing Tecnology* 63, 600-603.
- [39]. **Miyazaki, S., Otsuka, K.**, 1989 “Development of Shape Memory Alloys” *ISIJ International*, Vol. 29, No. 5, pp., 353-377.

- [40]. **Suresh, N., Ramamurty, U.**, 2007 “Effect of Aging on Mechanical Behavior of Single Crystal Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys” *Materials Science and Engineering A*, 454-455, 492-499.
- [41]. **Cai, W., Otsuka, K.**, 1999 “Martensite Aging Effect In A $Ti_{50}Pd_{50}$ High Temperature Shape Memory Alloy” *Pergamon*, PII S1359-6462, 00289-4.
- [42]. **KOŞAR, B.**, 2008 “4-Metoksi ve 3-Hidroksi Salisilaldehit Türevi Bazı Schiff Bazlarının Yapısal Özelliklerinin Deneysel X-Işını Kırınımı Ve Kurumsal Yöntemlerle İncelenmesi” *Doktora Tezi*, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.

ÖZGEÇMİŞ

Samet GÜDELOĞLU

Kişisel Bilgiler:

Doğum Tarihi : 1988

Doğum Yeri : SAMSUN

Uyruğu : T.C.

Medeni Hali : Bekar

Eğitim:

İlköğretim:

Samsun, Karadeniz İlköğretim Okulu

Ortaöğretim:

Samsun, Mithatpaşa Lisesi

Lisans: (2007-2011)

Fırat Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü (Elazığ)