Bor Katkılı Polikristal Metamanyetik Şekil Hafızalı Alaşımların Üretimi, Karakterizasyonu ve Teknolojik Uygulamaları

Program Kodu: 1001

Proje No: 113F234

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Yıldırım AYDOĞDU

Araştırmacılar:

Prof.Dr.Mehmet Eyyüphan YAKINCI
Prof.Dr.Ayşe AYDOĞDU
Prof.Dr.Mehmet Ali AKSAN
Doç.Dr.Mediha KÖK
Doç.Dr.Zehra Deniz YAKINCI

Bursiyerler:

Gökhan Kırat
Gökhan Kılıç

Ekim 2017
ANKARA

ÖNSÖZ

Bu proje Gazi Üniversitesi, Fırat Üniversitesi, İnönü Üniversitesi ve Amerika Birleşik Devletlerinde Kentucky eyaletinde bulunan Kentucky Üniversitesi'nde görevli öğretim üyelerinin işbirliği içerisinde hazırlanmış ve sonuçlandırılmıştır.

Teknolojik gelişmelerin hızla arttığı günümüzde, teknolojik öneme sahip yeni malzemelerin üretilmesi, geliştirilmesi ve bu konuda eleman yetiştirilmesi büyük öneme sahiptir. Bu tür teknolojik öneme sahip malzemelerin üretilme aşamalarının ülkemizde yaygınlaştırılması ve bu konuda uzman eleman yetiştirilmesi ülkemiz teknolojisinin gelişmesine büyük katkı sağlayacaktır. Teknolojik malzemelerin ülkemizde üretilme aşamaları ilk adımda pahalı olacaktır, ancak üretilme aşamalarının adım adım uygulanarak teknolojik malzeme üretiminde ülkemizinde varlık göstermesi ile dışa bağımlılığımız azalacaktır.

Bu kapsamda sunulan ve sonuçlandırılan çalışmada, NiMn esaslı ve Bor katkılı NiMnGaB, NiMnSnB, NiMnCoInB, NiMnSbB, NiMnSbFeB, NiMnCoSnB ve NiMnCoSbB alaşımları ile CuAlMnB alaşımları ark ergitme metodu ile elde edildi. Elde edilen ingot şeklindeki alaşımlar yüksek saflıkta argon atmosferi altında alaşımların beta faz bölgesini içeren sıcaklıklardhomojenleştirme işlemine tabi tutuldu. Isıl işlem uygulanan alaşımlar tuzlu-buzlu suda ani olarak soğutuldular. Tüm alaşımlar aynı ısıl işlemlere ve ani soğutmalara tabi tutuldular. Üretilen bu alaşımlara bor katkısının etkisi sistematik olarak araştırıldı.

NiMn esaslı ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlara veya diğer şekil hafızalı alaşımlara bor katkılandığında, termal, manyetik ve mekanik özelliklerinde bor oranına bağlı olarak değişimlerin meydana geldiği görüldü. Düşük sıcaklık veya yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar ile yüksek manyetik momente sahip şekil hafızalı alaşımlar elde etmek için bor katkılanarak istenilen dönüşüm sıcaklıklarına sahip yeni tür şekil hafızalı alaşımların elde edilebileceği ve bu alaşımların termal, manyetik ve mekanik özelliklerinin bor katkısı ile kontrol edilebileceği görüldü.

Bu çalışma "Bor Katkılı Polikristal Metamanyetik Şekil Hafızalı Alaşımların Üretimi, Karakterizasyonu ve Teknolojik Uygulamaları" adlı TÜBİTAK 113F234 nolu proje kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ I
İÇİNDEKİLER II
TABLOLAR LİSTESİ V
ŞEKİLLER LİSTESİ VII
ÖZET XI
ABSTRACT XII
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 3
3. GEREÇ VE YÖNTEM 8
3.1. Alaşım Oranlarının Belirlenmesi ve Metal Tozlarının Pelet Haline Getirilmesi 8
3.2. Ark Ergitme Sistemi 9
3.3. Homojenleştirme İşlemi 9
3.4. Numune Kesme İşlemi 10
3.5. Termal Analiz Ölçümleri 10
3.6. XRD Analizleri 12
3.7. SEM-EDX Analizleri 12
3.8. Manyetik Ölçümler 13
3.9. Mekanik Ölçümler 13
4. BULGULAR 15
4.1. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımları 15
4.1.1. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Alaşım Oranları 15
4.1.2. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 15
4.1.3. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının XRD Analizleri 16
4.1.4. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Metal Mikroskobu Analizleri 17
4.1.5. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi 17
4.1.6. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 19
4.2. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımları 21
4.2.1. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Alaşım Oranları 21
4.2.2. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 21
4.2.3. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının XRD Analizleri 23
4.2.4. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 23
4.2.5. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Metal Mikroskobu Ölçümleri 26

4.2.6. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi 27
4.2.7. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi ..30
4.3. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımları 32
4.3.1. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Alaşım Oranları 32
4.3.2. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 33
4.3.3. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının XRD Analizleri 34
4.3.4. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 35
4.3.5. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi 38
4.3.6. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x=0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 40
4.4. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımları 42
4.4.1. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları 42
4.4.2. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 43
4.4.3. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri 44
4.4.4. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 45
4.4.5. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 47
4.5. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımları 48
4.5.1. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımlarının Alaşım Oranları 48
4.5.2. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 48
4.5.3. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımlarının XRD Analizleri 49
4.5.4. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri .50
4.5.5. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 53
4.6. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları 54
4.6.1. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları 54
4.6.2. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 54
4.6.3. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri 56
4.6.4. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 56
4.6.5. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi 59
4.7. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları 61
4.7.1. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları 61
4.7.2. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 61
4.7.3. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri 63
4.7.4. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 64

4.7.5. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi 67
4.8. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları 69
4.8.1. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları 69
4.8.2. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 69
4.8.3. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri 71
4.8.4. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 71
4.9. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları 74
4.9.1. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları 74
4.9.2. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 74
4.9.3. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri 75
4.9.4. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 75
4.10. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımları 78
4.10.1. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Alaşım Oranları 78
4.10.2. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 78
4.10.3. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının XRD Analizleri 80
4.10.4. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 81
4.10.5. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi 84
4.10.6. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 87
4.11. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları 88
4.11.1. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları 88
4.11.2. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları 88
4.11.3. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri 89
4.11.4. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri 90
4.11.5. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi 92
4.11.6. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 94
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA 96
6. KAYNAKLAR 100

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Dökümü yapılan $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşım oranları 15

Tablo 4.2. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının DSC ölçüm sonuçları.....15

Tablo 4.3. Dökümü yapılan $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşım oranları.....21

Tablo 4.4. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının DSC ölçüm sonuçları 22

Tablo 4.5. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları.....26

Tablo 4.6. Dökümü yapılan $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşım oranları.....33

Tablo 4.7. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının DSC ölçüm sonuçları.....34

Tablo 4.8. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları 36

Tablo 4.9. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşım oranları 42

Tablo 4.10. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dakika ısıtma hızında alınan DSC ölçüm sonuçları.....43

Tablo 4.11. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının 5, 10, 15, 20 ve 25 ^oC/dakika tarama hızlarında alınan DSC sonuçları 43

Tablo 4.12. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları.....45

Tablo 4.13. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşım oranları ..48

Tablo 4.14. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarının 20 ^oC/dakika ısıtma hızında alınan DSC ölçüm sonuçları 49

Tablo 4.15. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları.....53

Tablo 4.16. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları 54

Tablo 4.17 $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları.....55

Tablo 4.18. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımlarının 10, 15, 20 ve 25 ^oC/dakika tarama hızlarında alınan DSC sonuçları 56

Tablo 4.19. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları 58

Tablo 4.20 Dökümü yapılan $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları 61

Tablo 4.21. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları.....62

Tablo 4.22. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımlarının 10, 15, 20 ve 25 ^oC/dakika tarama hızlarında alınan DSC sonuçları 63

Tablo 4.23. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları 66

Tablo 4.24. Dökümü yapılan $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları 69

Tablo 4.25. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları.....71

Tablo 4.26. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları 73

Tablo 4.27. Dökümü yapılan $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları 74

Tablo 4.28. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları.....75

Tablo 4.29. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları.....77

Tablo 4.30. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşım oranları 78

Tablo 4.31. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) alaşımlarının 10 ^oC/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları.....79

Tablo 4.32. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları.....81

Tablo 4.33. Dökümü yapılan $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4)alaşım oranları 88

Tablo 4.34. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları.....89

Tablo 4.35. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları.....90

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.Döküm için hazırlanan metal tozları 8

Şekil 3.2. Hidrolik pelet makinası 8

Şekil 3.3. Ark ergitme sistemi ve numune haznesi 9

Şekil 3.4. Elde edilen ingot şeklindeki alaşımları 9

Şekil 3.5. Homojenleştirme işlemlerinde kullanılan spektroskopik argon atmosferine(%99,999 saflıkta) alınmış tüp fırın ve quartz tüp içerisine yerleştirilmiş ingot halindeki alaşımlar 10

Şekil 3.6. Mikro metal kesme cihazı 10

Şekil 3.7. Perkin Elmer Pyris 6 DSC ve simultane SEIKO EXSTAR SII TG/DTA 6300 11

Şekil 3.8. Rigaku RadB-DMAX XRD Cihazı 12

Şekil 3.9. LEO-EVO 40 taramalı elektron mikroskobu ve Bruker-125 eV Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ünitesi 12

Şekil 3.10. Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi (Physical Properties Measurement System, QUANTUM DESIGN 7 PPMS) 13

Şekil 3.11. a) MTS landmar servohydraulic test sistemi (Haluk Ersin Karaca, Kentucky Üniversitesi) ve b) Hitachi marka TMA 7100 cihazları(Gazi Üniversitesi) 14

Şekil 4.1. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının 10 ^oC/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri 16

Şekil 4.2. a) Oda sıcaklığında alınan $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının XRD difraktogramları, b) 200 ^oC sıcaklığında $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$) alaşımının XRD difraktogramı, ...16

Şekil 4.3. a) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$, b) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$, c) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$ ve d) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımlarının yüzey mikrografları 18

Şekil 4.4. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının a) -30 ^oC de b) oda sıcaklığında alınan M-H eğrileri 19

Şekil 4.5. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 3) alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi 20

Şekil 4.6. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 3) alaşımlarının oda sıcaklığında bor oranı ile Vickers sertliğinin değişimi 20

Şekil 4.7. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının 10 ^oC/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri 22

Şekil 4.8. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının a) e/a oranının kalay oranı ile değişimi, b) martensit başlama sıcaklığı M_s nin e/a oranı ile değişimi 22

Şekil 4.9. $Ni_{50}Mn_{50-x}Sn_x$ (x= 10, 11, 12, 13) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 23

Şekil 4.10. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 24

Şekil 4.11. a) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, b) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve c) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri 25

Şekil 4.12. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının yüzey mikrografları 26

Şekil 4.13. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ numunelerine ait manyetik moment-manyetik alan (M-H) eğrileri (-100 ^oC, 30 ^oC ve 250 ^oC sıcaklıklarında) 27

Şekil 4.14. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının a) -100 ^{o}C, , b) 30 ^{o}C ve c) 250 ^{o}C de alınan M-H ölçümleri 28

Şekil 4.15. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 ^{o}C-277 ^{o}C aralığında M-T ölçümleri 29

Şekil 4.16. Uygulanan sabit basma gerilimleri altında a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının basma gerinimi-sıcaklık eğrileri.....31

Şekil 4.17. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi.....32

Şekil 4.18. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ alaşımlarının oda sıcaklığında geri kazanılabilir gerinim eğrileri.32

Şekil 4.19. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6) alaşımlarının 10 ^{o}C/dakika ısıtma hızında alınan DSC eğrileri 33

Şekil 4.20. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6) alaşımlarının; a) martensit başlama sıcaklığı M_s' nin e/a oranı ile değişimi, b) martensit başlama sıcaklığı M_s nin bor oranı ile değişimi 34

Şekil 4.21. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4,6,8) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları.....35

Şekil 4.22. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 37

Şekil 4.23. a) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$, b) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$, c) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$, d) $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$, e) $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve f) $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri 38

Şekil 4.24. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının a) 100 ^{o}C, b) 30 ^{o}C ve c) 250 ^{o}C de alınan M-H ölçümleri.....39

Şekil 4.25. a) $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4) ve b) $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 6, 8) alaşımlarının 5 Tesla sabit manyetik alan altında 40 -280 ^{o}C aralığında M-T ölçümleri 40

Şekil 4.26. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 4, 6, 8) alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi.....41

Şekil 4.27. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$ ve c) $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ alaşımlarının uygulanan sabit basma gerilimleri altında basma gerinimi-sıcaklık eğrileri 42

Şekil 4.28. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2) alaşımlarının 10 ^{o}C/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri.....43

Şekil 4.29. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının 5,10,15,20 ve 25 ^{o}C/dakika hızlarında alınan DSC grafikleri.....44

Şekil 4.30. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımlarının Kissinger eğrileri 44

Şekil 4.31. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 45

Şekil 4.32. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 46

Şekil 4.33. a) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ ve b) $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri 47

Şekil 4.34. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımlarının 5 MPa sabit basınç altında alınan basma gerinimi sıcaklık eğrileri 47

Şekil 4.35. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{10-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8) alaşımlarının 20 ^{o}C/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri 49

Şekil 4.36. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 50

Şekil 4.37.$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları.....51

Şekil 4.38. a) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{10}B_2$, b) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_8B_4$, c) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_6B_6$, d) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_4B_8$, e) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_2B_{10}$ ve f) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5B_{12}$ ve alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri 52

Şekil 4.39. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8) alaşımlarının 5 MPa sabit basınç altında alınan basma gerinimi sıcaklık eğrileri 53

Şekil 4.40. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}$ B_x (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dakika tarama hızında alınan DSC grafikleri 55

Şekil 4.41. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}$ B_x (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 56

Şekil 4.42. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 57

Şekil 4.43. a) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$, b) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$, c) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$ ve d) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri 58

Şekil 4.44. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının a) 30 ^oC, b) 350 ^oC de alınan M-H ölçümleri 60

Şekil 4.45. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri 61

Şekil 4.46. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dakika tarama hızında alınan DSC grafikleri 62

Şekil 4.47. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$, $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$, $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$, $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının Kissinger eğrileri 63

Şekil 4.48. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ B_x (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 64

Şekil 4.49. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 65

Şekil 4.50. a) $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$, b) $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$, c) $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve d) $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri 66

Şekil 4.51. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının a) 30 ^oC, b) 350 ^oC de alınan M-H ölçümleri 68

Şekil 4.52. a) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$, b) $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$ c) $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$ d) $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve e) $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri. 69

Şekil 4.53. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri 70

Şekil 4.54. $Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$, $Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$ ve $Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$ alaşımlarının 10 ^oC/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri 70

Şekil 4.55. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 71

Şekil 4.56. $Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 72

Şekil 4.57. a) $Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$, b) $Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$, c) $Ni_{49}Mn_{37}Co_1Sn_{10}B_3$ ve d) $Ni_{49}Mn_{36}Co_1Sn_{10}B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri 73

Şekil 4.58. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 ^oC/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri 74

Şekil 4.59. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 75

Şekil 4.60. $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 76

Şekil 4.61. a) $Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_1$, b) $Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_2$, c) $Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_3$ ve d) $Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri.....77

Şekil 4.62. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının 10 ^oC/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri 78

Şekil 4.63. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının; a) martensit başlama sıcaklığı M_s nin e/a oranı ile değişimi, b) martensit başlama sıcaklığı M_s nin bor oranı ile değişimi 79

Şekil 4.64. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının Kissinger eğrileri.....80

Şekil 4.65. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları81

Şekil 4.66. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları 82

Şekil 4.67. a) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, b) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, c) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, d) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve e) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri.....83

Şekil 4.68. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının a) -100 ^oC a) 30 ^oC, b) 350 ^oC de alınan M-H ölçümleri.....85

Şekil 4.69. a) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, b) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, c) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, d) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, e) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve f) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri. 86

Şekil 4.70. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri. 86

Şekil 4.71. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi 87

Şekil 4.72. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının alaşımlarının 10 ^oC/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri 88

Şekil 4.73. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının M_s sıcaklıklarının bor oranı (atm.%) ile değişimi.....89

Şekil 4.74. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları 90

Şekil 4.75. $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları.....91

Şekil 4.76. a) $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$, b) $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$, c) $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ ve d) $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri.....92

Şekil 4.77. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının a) -100 ^oC a) 27 ^oC, b) 227 ^oC de alınan M-H ölçümleri 93

Şekil 4.78. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi 94

Şekil 4.79. a) $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$, b) $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$ ve c) $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarının uygulanan sabit basma gerilimleri altında basma gerinimi-sıcaklık eğrileri 95

ÖZET

Ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar şekil hafıza ve ferromanyetik özelliklerin birleştiği malzemeler sınıfında olup mühendislikte ve teknolojide geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Bu alaşımlar uygulanan manyetik alan, zor ve sıcaklığa karşı tepki verdiklerinden akıllı sistemlerde, algılayıcı ve transdüserlerde kullanılmaktadırlar.

Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, ferromanyetik şekil hafızalı alaşımların yeni bir sınıfı olan NiMn-temelli Heusler tipi polikristal metamanyetik şekil hafızalı alaşımlar, NiMnGa sistemlerinde Ga yerine In, Al, Sn veya Sb gibi bazen de Co elementi kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Ferromanyetik alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarda bor katkılı çalışmalar bulunmasına rağmen bor katkısının NiMn sistemleri üzerine etkisi sistematik olarak araştırılmamıştır.

Bu çalışmada, NiMn esaslı $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0,1,2,3), $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0,1,2,3), $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4,6,8), $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x=0,2,4), $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x=0,2,4,6,8,10,12), $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x=0,1,2,3,4,5) alaşımları ile $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x=0,1,2,3,4) alaşımı ark ergitme metodu ile üretildi. Elde edilen ingot şeklindeki alaşımlar yüksek saflıktaki argon gazı atmosferi altında alaşımların beta faz bölgesini içeren sıcaklıklarda homojenleştirme işlemine tabi tutularak, tuzlu-buzlu suda ani olarak soğutuldular. Şekil hafızalı alaşımlarda meydana gelen fiziksel değişimlerin alaşım element oranlarına bağlı olduğu gibi, ısıl işlemlere de bağlı olduğu göz önüne alındığında ısıl işlemlerden etkilenmemek için tüm alaşımlar aynı ısıl işlemlere ve ani soğutmalara tabi tutuldular. Elde edilen bor katkılı alaşımların termal, yapısal, manyetik ve mekanik özellikleri incelendi ve bor katkısının etkisi sistematik olarak araştırıldı.

Yapılan çalışmalar sonucunda, NiMn esaslı ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlara veya diğer şekil hafızalı alaşımlara bor katkılanarak ısıl işlemlerden bağımsız olarak alaşımların dönüşüm (A_s, A_f, M_s ve M_f) ve Curie sıcaklıklarında, manyetik ve mekanik özelliklerinde kontrollü değişimler yapılabildi. Bor katkılanarak istenilen dönüşüm sıcaklıklarına ve yüksek manyetik momente sahip yeni tür şekil hafızalı alaşımların elde edilebileceği bulundu. Bu alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının, manyetik ve mekanik özelliklerinin bor katkısı ile kontrol edilebileceği görüldü.

Anahtar kelimeler: NiMn-esaslı alaşımlar, Heusler alaşımları, Basma gerilmesi-gerinimi, termal ve manyetik özellikler

ABSTRACT

Ferromagnetic shape memory alloys that are in the class of materials combining shape memory and ferromagnetic properties have a wide range of applications in engineering and technology. These alloys have been used in intelligent systems, sensors and transducers due the responding to applied magnetic field, stress and temperature.

In recent researches, as a new class of ferromagnetic shape memory alloys, NiMn-based polycrystalline metamagnetic shape memory alloys have been produced by using In, Al, Sn and Sb or sometimes Co elements instead of Ga in NiMnGa systems. Although, in literature there are studies about the addition of boron in ferromagnetic alloys, the effect of boron addition on NiMn systems has not been systematically investigated.

In this work, NiMn based $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0,1,2,3), $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0,1,2,3), $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4,6,8), $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x=0,2,4), $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x=0,2,4,6,8,10,12), $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x=0,1,2,3,4), $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x=0,1,2,3,4,5) and $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x=0,1,2,3,4) alloys were produced by arc melting method. The obtained ingot alloys were quenched in ice brine by subjecting to homogenization at temperatures containing the beta phase zone of the alloys under a high-purity argon gas atmosphere. By taking into consideration that the physical changes in shape memory alloys depend on heat treatments as well as the ratio of element of alloys, all alloys were subject to the same heat treatments and quenching in order not to be affected by heat treatment. The thermal, structural, magnetic and mechanical properties of the boron added alloys were investigated and the effect of boron addition was investigated systematically.

As a result of the research done, it was possible to make controlled changes in magnetic and mechanical properties of alloys, transformation temperatures (A_s, A_f, M_s and M_f) and Curie temperatures irrespective of heat treatment by adding boron to NiMn based ferromagnetic shape memory alloys or other shape memory alloys. It has been found that boron can be added to obtain new shape memory alloys with desired conversion temperatures and high magnetic moment. It has been observed that the transformation temperatures, magnetic and mechanical properties of these alloys can be controlled by the contribution of boron.

Keywords: NiMn-base alloys, Heusler Alloys, Compressive stress-strain, Thermal and manyetik properties

1. GİRİŞ

Bir ülkenin teknolojinin gelişmesi, yeni tür teknolojik malzemelerin elde edilmesinin yanı sıra mevcut olan teknolojik malzemelerin geliştirilmesi ile mümkün olmaktadır. Bundan dolayı gelişmekte olan ekonomisi güçlü ülkeler teknolojik öneme sahip malzeme üretmeye büyük önem vermekte ve bu malzemelerin kullanılabilirliğini ve fonksiyonelliğini arttırmaya yönelik araştırmalara büyük bütçeler ayırmaktadırlar. Şekil hafızalı alaşımlarda (shape memory alloys) bu tür teknolojik malzemeler sınıfında önemli bir yer işgal etmektedirler. Şekil hafızalı alaşımların temelini martensit-austenit faz dönüşümleri oluşturmaktadır. Şekil hafıza özelliği 1930'lu yıllarda bilinmesine rağmen en büyük gelişme, 1960 lı yıllarda Naval Ordnance laboratuvarında Nikel-Titanyum alaşımlarında şekil hafıza etkisinin keşfedilmesi ile başlamıştır. Elde edilen bu şekil hafızalı alaşıma NITINOL adı verilmiştir. NiTi alaşımlarının elde edilip teknolojiye aktarılması ile birlikte bu alaşımlara olan ilgi hızla artmış, demir-platin, indiyum-kadmiyum, nikel-alüminyum ve bakır bazlı alaşımların farklı dönüşüm sıcaklıklarında şekil hafıza olayı gösterdikleri bulunmuştur.

Yaygın olarak kullanılmaya başlanılan şekil hafızalı alaşımların geliştirilmesi çalışmaları ile son zamanlarda, şekil hafıza etkisi ile ferromanyetik davranışı aynı anda gösteren yeni bir akıllı malzeme olan ferromanyetik şekil hafızalı alaşımların varlığını ortaya çıkarmıştır. Ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar (FSMA) ilk kez Webster (Goryczka vd., 2008) tarafından rapor edildikten sonra geniş bir şekilde çalışılmış ve manyetik şekil hafıza etkisi ise ilk kez 1996 da Ullakko tarafından çalışılmıştır (Ullakko, vd., 1996). Paramanyetik olan geleneksel şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza etkisi, uygulanan sıcaklıkla veya zorla ya da her ikisi ile değişirken aynı etki, ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlarda sadece sıcaklıkla ve zorla değil uygulanan manyetik alanla da değişmektedir. Bu yüzden bu alaşımlara teknolojik malzemeler arasında oldukça büyük bir talep vardır. Ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar eş zamanlı olarak şekil hafıza etkisi ve manyetiklik gösteren ilginç malzemelerdir (Xuan vd.,2008). Uygulanan manyetik alanın, sıcaklığa göre daha çabuk arttırılıp azaltılabildiği için bu alaşımlar hızlı aktüatör olarak da adlandırılmaktadırlar. Büyük avantajlarına karşın aktüatörü harekete geçirmek için gerekli manyetik alanı azaltacak çalışmaların yapılması gerekmektedir.

Yapılan araştırmalarda alaşım elementleri ve oranları değiştirilerek dönüşüm sıcaklıkları (A_s; Austenit başlama, A_f; Austenit bitiş, M_s; Martensit başlama ve M_f; Martensit bitiş sıcaklıkları) farklı yeni tür alaşımlar elde edilmektedir. Bunun yanı sıra elde edilen alaşımların manyetik özellikleri, curie sıcaklıkları, sertlik, süneklik, gibi mekanik özellikleri de araştırılmaktadır.

Bu proje kapsamında yapılan çalışmalarımızda, farklı element oranlarına sahip yeni tür polikristal alaşımlar (NiMnGaB, NiMnSn, NiMnSnB, NiMnCoIn, NiMnCoInB, NiMnFeSbB, NiMnCoSnB, NiMnSbB, NiMnCoSbB, CuAlMn) elde edildi. Bor katkılanarak dönüşüm

sıcaklıklarının kontrol edilmesi hedeflendi. Yapılan çalışmalarımızda özellikle bor katkılı NiMn esaslı yeni tür alaşımlar üretilerek, elde edilen bu alaşımların kristal yapıları, termal, mekanik ve manyetik özellikleri üzerine bor elementinin katkısının etkileri sistematik olarak araştırıldı. Literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırıldı.

NiMn esaslı şekil hafızalı alaşımlara bor katkılanması sonucunda dönüşüm sıcaklıklarında büyük değişimler gözlendi. Aynı zamanda bu alaşımların manyetik ve mekanik özelliklerinin de bor katkısından etkilendikleri bulundu.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Şekil hafıza özelliği, ilk olarak 1932' de Ölander'in Au-Cd alaşımı üzerine yaptığı, ve 1938' de Greninger ve Mooradian' nın Cu-Zn alaşımı üzerine yaptığı çalışmalarında gözlemlenmiştir. 1951 yılında Chang ve Read şekil dönüşümü (Shape Recovery) terimini ilk kez kullanmışlardır. 1962' de William J. Buehler ve çalışma arkadaşları, Naval Ordnance laboratuvarında Nikel-Titanyum alaşımlarının şekil hafıza etkisini keşfetmişlerdir. Bu alaşıma NiTiNOL (Nikel-Titanyum Naval Ordnance Lab.) ismi verilmiştir. Bu çalışmalarında düşük sıcaklıktaki numune deforme edildikten sonra sıcaklığı artırıldığında numunenin orijinal haline geri döndüğü gözlemlemişlerdir. Bu olay, alışılmış plastik deformasyon göz önüne alındığında büyük ilgi çekmiştir. Daha sonraki yıllarda yapılan çalışmalarda demir-platin, indiyum-kadmiyum, nikel- alüminyum ve paslanmaz çelik gibi farklı alaşımların farklı dönüşüm sıcaklıklarında şekil hafıza olayı gösterdikleri bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda ortak özellik bu alaşımların martensitik dönüşüm göstermeleridir. Bundan dolayı şekil hafıza olayı martensitik faz dönüşümüne gore farklı görülmekle birlikte şekil hafıza olayının temeli martensitik dönüşümdür. Martensitik faz dönüşümü olayı ilk olarak, Alman metalurjist A. Martens tarafından demir bazlı alaşımlarda gözlemiştir. Daha sonraları yapılan çok sayıda araştırma ile büyük bir gelişmeye sahip olan martensitik dönüşümler, demir bazlı alaşımların yanı sıra geniş çapta soy metal bakır bazlı alaşımlarda ve metalik özellik taşımayan maddelerde de gözlenmiştir. Martensitik dönüşümlerde kristaldeki atomların dönüşüm öncesindeki komşulukları dönüşüm sonrasında da korunur yani dönüşüm difüzyonsuzdur. Sıcaklık ve zora bağlı durumlarda şekil hafızalı alaşımlar austenit -martensit faz dönüşümü sergilerler. Martensit faz dönüşümü, yüksek simetri fazından düşük simetri fazına difüzyonsuz olarak atomların ortak hareketi olarakta tanımlanabilir.(Thamburaja ve Nikabdullah, 2009).

Son zamanlarda, şekil hafıza etkisi ile ferromanyetik davranışı aynı anda gösteren yeni bir akıllı malzeme olan ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlara oldukça talep vardır. Bu malzemelerin çoğu aynı zamanda Heusler alaşım özelliği de göstermektedir. Ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar (FSMA) ilk kez Webster (Goryczka vd., 2008) tarafından bildirildikten sonra geniş bir şekilde çalışılmış ve manyetik şekil hafıza etkisi ise ilk kez 1996 da Ullakko tarafından çalışılmıştır (Ullakko, vd., 1996). Paramanyetik olan geleneksel şekil hafızalı alaşımların şekil hafıza etkisi, uygulanan sıcaklıkla veya zorla ya da her ikisi ile değişirken aynı etki, ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlarda sadece sıcaklıkla ve zorla değil uygulanan manyetik alanla da değişir. Bu yüzden bu alaşımlara aktif malzemeler arasında oldukça büyük bir talep vardır. Ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar eş zamanlı olarak şekil hafıza etkisi ve manyetiklik gösteren ilginç malzemelerdir (Xuan vd., 2008). Uygulanan manyetik alan, sıcaklığa göre daha çabuk arttırılıp azaltılabildiği için bu alaşımlar hızlı aktüatör olarak da adlandırılabilirler.

Bunun dışındaki yaygın olarak üzerinde çalışılmış olan Fe-Pb, Fe-Pt, Ni-Mn-(Al, Sn, Sb, In), Co-Ni-(Al,Ga), Ni-Fe-(Al,Ga), Cu-Mn-(Al, Ga) alaşımları bulunmaktadır (Tanaka, vd., 2006; Liu, vd., 2005; Liu, vd., 2006). Bu alaşımlar içinde Ni-Mn-Ga alaşımları yoğunlukla çalışılmıştır. Bu alaşımlar, geniş manyetokristal anizotropi, yüksek ikiz sınır mobilitesi ve FSMA larda beklenen ayarlanabilir manyetik ve martensit geçiş sıcaklığı gibi özellikler gösterirler (Jin, 2009). Ni-Mn-Ga sisteminde şekil hafıza etkisinin manyetik alanla kontrolü, deneysel olarak ilk kez 1996' da Ulakko ve arkadaşları tarafından keşfedilmiş (Ullakko, vd., 1996) ve günümüze kadar bu konu üzerinde oldukça fazla çalışmalar yapılmıştır. Son yıllarda şekil hafızalı veya manyetik şekil hafızalı alaşımlara farklı elementler katkılanarak fiziksel ve manyetik özelliklerinin değiştirilmesi ile yeni fonksiyonel malzemelerin elde edilmesi çalışmaları ağırlık kazanmıştır. Katkı elementi ile bu alaşımların daha üstün özellik sergilemelerinin sağlanması çalışmaları devam etmektedir. Malzemelerin sertlik ve dayanırlıklarını artırmada katkı elementi olarak kullanılan bor elementi aynı zamanda malzemelerin manyetik ve fiziksel özelliklerini değiştirmede de katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Mathur ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada $Ni_{50}Mn_{30}Ga_{15}Al_{5-x}B_x$ (x = 0, 1 ve 4) alaşımında alüminyum yerine bor katkılanmış ve 1000 ^oC de ısıl işlem görmüş alaşımların dönüşüm sıcaklıklarında yükselme olduğu gözlenmiştir (Mathur, vd., 2012). Bir başka araştırmacı grubunun yapmış olduğu çalışmada ise $Ni_{53.5}Mn_{26.0}Ga_{20.5}$ alaşımına bor katkılanmış ve kristal yapı değişimleri ve manyetik özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir (Ramudu, vd., 2012). Nong ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada Ni50Mn38Sb12 alaşımına bor ilave ederek kristal yapıları ile manyetik ve manyetokalorik özelliklerindeki değişimleri araştırmıştır.(Nong, vd., 2011).

Xuan ve arkadaşları, $Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}$ ferremanyetik şekil hafızalı alaşıma Bor katkılayarak Bor'un $Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}B_3$; alaşımının martensit dönüşüm sıcaklığına ve manyetokalorik özelliğe etkisini incelemişlerdir (Xuan, vd., 2008).

Gautam ve arkadaşları, Ni_2MnGa ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlara Bor katkılayarak yeni meydana gelen dörtlü alaşımların faz geçişlerini, manyetik özelliklerini ve kristal yapılarını incelemişlerdir. $Ni_2Mn_{1-x}B_xGa$ ($0 \leq x \leq 0,25$) alaşımlarında Curie sıcaklığının artan boron miktarı ile azaldığı göstermişlerdir (Gautam, vd., 2009).

Luo ve arkadaşları NiMnSb alaşımına bor katkılayarak; $Ni_{50}Mn_{36,5}Sb_{13,5-x}B_x$ (x=0-0,5-1-1,5) alaşımında Bor katkısının martensit ve manyetik dönüşüme etkisini incelemişlerdir. Bor katkısı artıkça manyetizasyon değerinin düştüğü ve tam tersi olarak bor katkısı arttıkça martensit dönüşüm sıcaklığının arttığı görülmüştür (Luo, vd., 2010).

Bir başka çalışmada; Sanguinetti Ferreira ve arkadaşları, CuZnAl şekil hafızalı alaşım sistemine B, Fe ve Ti-B elementleri katkılayarak bu alaşımların fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Bor katkısıyla tane büyüklülerinde artışlar gözlenmiştir (Sanguinetti Ferreira, vd., 2000).

Suziki ve arkadaşları Bor katkısının Ti-Pd-Ni sisteminin sünekliğini artırdığını tespit etmişlerdir (Suziki vd., 1998). Bor katkısının NiMn bazlı sistemlerde sünekliğe etkisi araştırılmamıştır.

Ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar şekil hafıza davranışı ve ferromanyetik özelliklerin birleştiği aktif malzemeler içerisinde yeni bir sınıf olup mühendislikte ve teknolojide geniş kullanım alanına sahiptir. Bu alaşımlar yüksek harekete geç irme frekansı, enerji yoğunluğu ve manyetik alan uygulanması sonucunda boyca uzama özelliklerine sahip olduklarından akıllı sistemlerde, algılayıcı ve transdüserlerde kullanılmaktadırlar (Pirge, 2005). Bu alaşımlar uygulanan manyetik alan, zor ve sıcaklığa karşı tepki verirler. Ferromanyetik şekil hafızalı malzemelerin en popüleri Ni_2MnGa Heusler alaşımlardır. NiMnGa alaşımları çok yaygın olarak araştırılmış manyetik şekil hafızalı alaşımlardır (Kök ve Aydogdu, 2013-a,b,c,d). Bu alaşımda manyetik alan indüklü zorlanma (MFIS), martensite ikizlerin alan-indüklü olarak yeniden yönlenmesine dayanmaktadır (Marioni, vd., 2005; Karaca, vd., 2006; Ulakko vd., 1996; Murray vd., 2000; O'Handley, 1998; Sozinov vd., 2002; Karaca vd., 2007). 1996'da, Ulakko ve arkadaşları. NiMnGa alaşımlarında %0.2 manyetik alan indüklü zorlanma (MFIS) olduğunu göstermişlerdir (Ulakko vd., 1996).

Daha sonra, tek kristallerde yeniden yönlenme mekanizması kullanılarak 1 Tesla dan daha düşük manyetik alan altında NiMnGa alaşımlarının 10M ve 14M martensitik yapılarında MFIS seviyeleri, %5 ve %10 artırılmıştır (O'Handley, 1998; Sozinov vd., 2002). Bu alaşımlarda, eğer manyetik alan kaynaklı martensit varyantın manyetokristal anizotropi enerjisi (MAE) ikizlenme sınır hareketi için gerekli enerjiden daha büyükse, manyetik alan destekli martensit varyanlar diğerleri lehine büyüyecektir. Bu mekanizma, tersinir şekil değişimi elde etmek için dış zorun ve manyetik alanın eş zamanlı olarak uygulanmasını gerektirir. Kolay ve zor eksenler boyunca ferromanyetik martensitin manyetizasyon tepkileri arasında kalan alanı veren maksimum manyetokristal anizotropi enerjisinin şematik olarak verilmiştir (O'Handley, 1998; Sozinov vd., 2002; Karaca vd., 2007; Kök ve Aydoğdu, 2013).

Manyetokristal anizotropi enerjisi (MAE) yönelime bağlıdır (O'Handley, 1998; Straka, vd., 2004). MAE ikiz sınır hareketi için sadece birkaç MPa lık (<5MPa) stres sağladığından, yüksek manyetokristal anizotropi enerjisi ve düşük enerjili ikiz sınır hareketine sahip materyallerde alan-indüklü martensit ikiz yeniden-yönlenmesi (reorientation) mümkündür (Karaca, vd., 2006) Manyetokristal anizotropi enerjisi üzerindeki sınırlamalardan dolayı, alan-indüklü varyant yeniden yönlenme mekanizması tek kristaller ile sınırlanmıştır. Polikristallerde böyle bir mekanizmayı denemek çok zordur (Marioni, vd., 2005; Karaca, vd., 2006; 1996; Murray vd., 2000; Sozinov vd., 2002; Sozinov, vd., 2004; Heczko, vd., 2004; Albertini, vd., 2001). Ayrıca, NiMnGa alaşımları çok kırılgandır ve maksimum çalışma sıcaklığı dönüşüm sıcaklıkları (TTs) ile sınırlanmıştır. Bu nedenle, tek kristallerin yüksek

maliyetli ve düşük çalışma stres seviyeleri bu mekanizmayı kullanan manyetik şekil hafızalı alaşımların potansiyel uygulamalarını sınırlamaktadır.

NiMn (In, Sn, Sb) bazlı manyetik şekil hafızalı Heusler alaşımlar manyetik alan etkisi ile faz dönüşümü göstermelerinden dolayı yoğun ilgi görmektedirler. Bu alaşımlarda metamanyetik faz dönüşümü için manyetik itici güç Zeeman enerjisi tarafından sağlanmaktadır. İki faz arasındaki manyetizasyon farkı Zeeman enerjisini oluşturur Zeeman enerjisi ZE= ΔM.H ifadesi ile bulunabilir; Burada ΔM austenit ile martensit faz arasındaki doyum mıknatıslanması farkı ve B ise uygulanan manyetik alanın mukavemetidir (Tan, vd., 2017; Xuan, vd., 2015).). Uygulanan manyetik alanın kuvveti ile birlikte Zeeman enerjisi de artar. Zeeman enerjisi oryantasyona bağlı değildir ve bundan dolayı çok kristalli malzemelerde de Zeeman enerjisi sayesinde manyetik alan etkisi ile şekil hafıza özelliği görülebilir.

Son yıllarda, metamanyetik şekil hafızalı alaşımlar olarak isimlendirilen yeni tip manyetik şekil hafızalı alaşımlar (MSMA), NiMnGa sisteminde Ga yerine In, Al veya Sb katkılamaları ve bazen de Co eklemesi yapılarak ortaya çıkarılmıştır. Curie sıcaklığını ve Zeeman enerjisini de yükselten austenite fazın doyma manyetizasyonunu artırmak için genellikle Co eklemesi yapılmaktadır (Kainuma, vd., 2006-2; Krenke, vd., 2005; Moya, vd., 2006-1; Moya, vd., 2006-2; Khan, vd., 2007; Kainuma, vd., 2008-1; Kainuma, vd., 2008-2; Sutou, vd., 2004; Du, vd., 2007; Moya, vd., 2008; Manosa, vd., 2004; Ito, vd, 2007). Metamanyetik SMA'lar teknolojik açıdan önemli malzemeler sınıfında ilk sıralarda yer alan yeni nesil enerji dönüştürücüler, manyetik aktüatörler, sensörler, manyetokalorik malzemeler ve karşılıklı ısı ileticileri içeren akıllı malzemelerin yeni bir sınıfıdır. Genel olarak aktüasyon (harekete geçirme) mekanizmaları alan indüklü faz dönüşümüne dayanmaktadır. 2006 yılında, metamanyetik alaşımlarında ilk defa Kainuma ve arkadaşları oda sıcaklığında NiMnCoIn tek-kristalinde ilk uygulanan zorun %3 ünü geri kazanmak için 4 Tesla lık uygulanan alanın yeterli olduğunu göstermişlerdir (Kainuma, vd., 2006-1). Bu çalışma meta-manyetik SMA' lar üzerine yapılan birkaç yeni çalışmaya öncülük yapmıştır. Ancak bu çalışmalar esasen manyetokalorik özelliklere ve dönüşüm sıcaklıklarına kompozisyonel etkiler üzerine yoğunlaşmıştır (Krenke, vd., 2005; Moya, vd., 2006-a; Khan, vd., 2007; Kainuma, vd., 2008-a; Du, vd., 2007; Han, vd., 2006; Han, vd., 2007; Koyama, vd., 2007; Sharma, vd., 2007-a; Sharma, vd., 2007-b; Krenke, vd., 2007; Chattopadhyay, vd., 2008). Daha sonra, NiMnCoIn alaşımında, 50 MPa lık sıkıştırma yükü altında tersinir MFIS gözlenmiştir. 50 MPa lık basınç NiMnGa alaşımlarındaki harekete geçirici zordan daha büyüktür (Wang, vd., 2008).

Manyetik aktüatörler gibi metamanyetik şekil hafızalı alaşımlar (SMA), NiMnGa bazlı manyetik şekil hafızalı alaşımların (MSMA) bütün avantajlarını (ağırlık korunumu, yüksek konumlandırma hassasiyeti, kısa yükselme zamanı ve yüksek zorlanmalar) sağlarlar

(Soderberg, vd., 2008). Ayrıca, metamanyetik SMA larda manyetik enerji katkısı kristal yöneliminden bağımsızdır ve çalışma zorunda sürekli artmaya neden olan manyetik alan ile sınırlanmazlar (Karaca, vd., 2007; O'Handley, 2000; Kainuma, vd., 2006-a). Bu durum polikristal metamanyetik SMA ların düşük maliyetteki aktüatörler olarak kullanılmalarına imkan sağlayacaktır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Günümüze kadar yapılan çalışmalarda gerek tek kristal ve gerekse polikristal manyetik şekil hafızalı alaşımlar üretilmiş ve sanayide de kullanılmaktadırlar. Bu çalışmada NiMn esaslı yeni polikristal metamanyetik şekil hafızalı alaşımlara bor katkısı yapılmıştır. Bor katkısının NiMn esaslı alaşımların fiziksel, manyetik ve mekanik özelliklerine etkisi sistematik olarak araştırılmıştır. Bu amaçla aşağıdaki metotlar takip edilmiştir.

3.1. Alaşım Oranlarının Belirlenmesi ve Metal Tozlarının Pelet Haline Getirilmesi

Atomikçe yüzdeleri belirlenen alaşımların ağırlıkça yüzdeleri ve elektron/atom oranları hesaplanmıştır. Ağırlıkça alaşım oranları belirlenen alaşımların döküm işlemleri için yüksek saflıktaki metal tozlarından her numune için 25 er gramlık iki toz karışımı yapılmıştır (Şekil 3.1). Hazırlanan toz numuneler, ark ergitme fırınında vakumlama esnasında vakumla gitmemesi için 1 cm çaplı die ler kullanılarak yaklaşık 6-10 ton basınç altında peletler haline getirildiler (Şekil 3.2).



Şekil 3.1.Döküm için hazırlanan metal tozları



Şekil 3.2. Hidrolik pelet makinası

3.2. Ark Ergitme Sistemi

Pelet haline getirilen numuneler, şekil 3.3 de verilen ark ergitme (arc melter) sisteminde 25 gramlık ingotlar halinde elde edildi (şekil 3.4).



Şekil 3.3. Ark ergitme sistemi ve numune haznesi



Şekil 3.4. Elde edilen ingot şeklindeki alaşımları

3.3. Homojenleştirme İşlemi

Elde edilen ingot şeklindeki alaşımlar yüksek saflıkta (%99.999) argon atmosferi altında (6-70 saat zaman aralıklarında) quartz tüpler içerisinde (şekil 3.5) alaşımların beta faz bölgesini içeren sıcaklıklarda (800-900 ^{o}C sıcaklıkları arasında) homojenleştirme işlemine tabi tutularak, tuzlu-buzlu suda ani olarak soğutuldular.



Şekil 3.5. Homojenleştirme işlemlerinde kullanılan spektroskopik argon atmosferine(%99,999 saflıkta) alınmış tüp fırın ve quartz tüp içerisine yerleştirilmiş ingot halindeki alaşımlar

3.4. Numune Kesme İşlemi

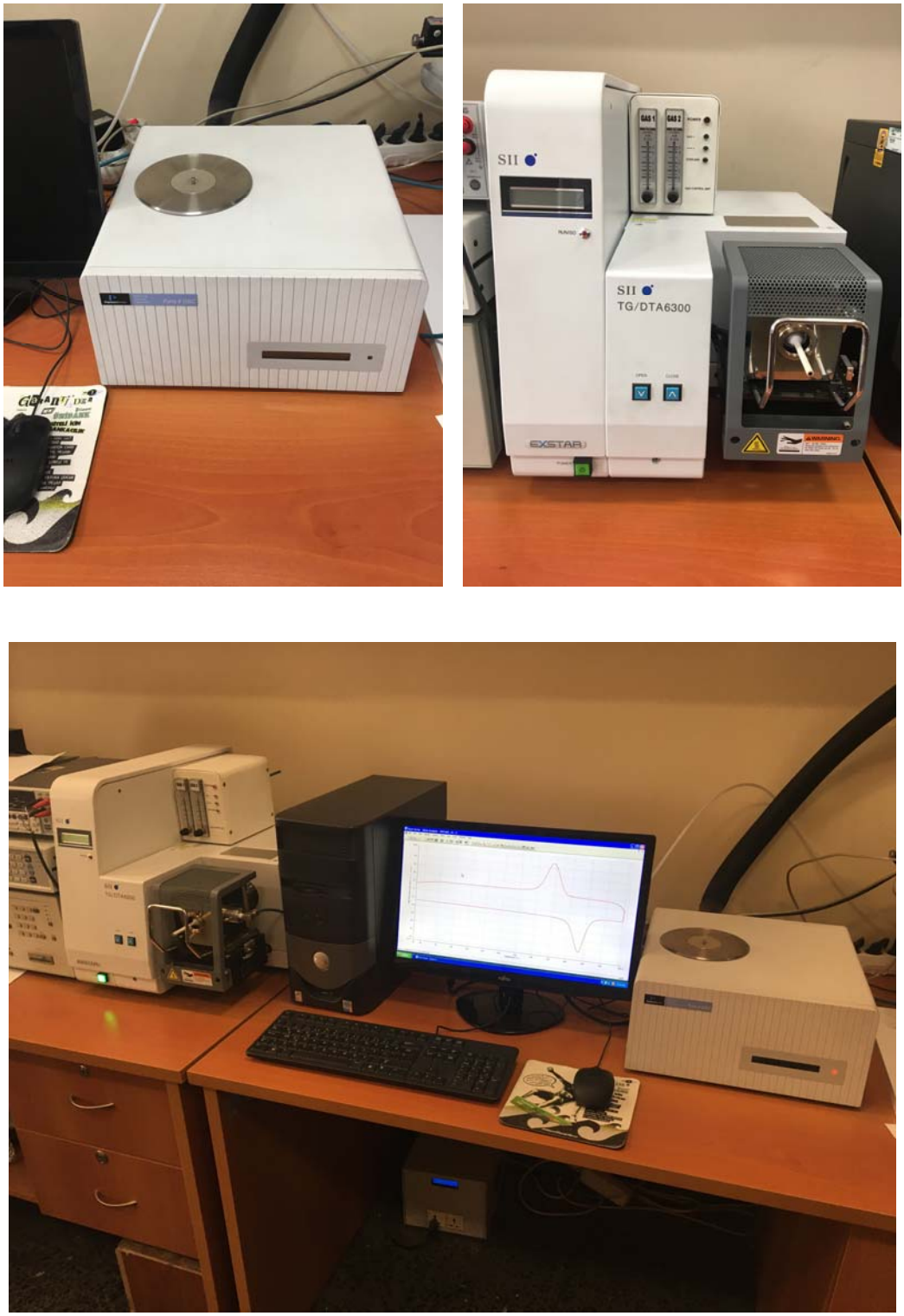
Ani soğutma yapılan numunelerden şekil 3.6 da verilen mikro metal kesme cihazı kullanılarak DSC, SEM- EDX, XRD ve mekaniksel ölçümler için parçalar kesildi. Kesme işleminde soğutma sıvısı kullanıldığından numunelerin ısıl işleme maruz kalmaması sağlandı. Buna rağmen ölçüm için kesilmiş numuneler yüksek saflıkta argon atmosferi altında alaşımların beta faz sıcaklıklarında 30 dakika ısıl işleme tabi tutulup tuzlu-buzlu suda ani soğutmaya tabi tutularak kesme esnasında oluşabilecek zorlar numune üzerinden alındı.



Şekil 3.6. Mikro metal kesme cihazı

3.5. Termal Analiz Ölçümleri

Mikro metal cihazı ile kesme işlemine tabi tutulan alaşımlardan elde edilen örnekler beta faz sıcaklıklarında 30 dakika ısıl işleme tabi tutulup tuzlu-buzlu suda ani soğutulduktan sonra dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için Perkin Elmer Pyris 6 DSC ve simultane SEIKO EXSTAR SII TG/DTA 6300 cihazları (şekil 3.7) kullanıldı. Ölçümler esnasında numunelerin oksitlenmelerini önlemek için 100 -200 ml/dakika akış hızında yüksek saflıkta azot veya argon gazları kullanıldı.



Şekil 3.7. Perkin Elmer Pyris 6 DSC ve simultane SEIKO EXSTAR SII TG/DTA 6300

3.6. XRD Analizleri

Numunelerin XRD analizleri Rigaku RadB-DMAX cihazı (şekil 3.8) kullanılarak ölçümler genellikle oda sıcaklığında, 2θ= 20-80^{o} arasında 2 ^{o}/dakika tarama hızlarında alındı.



Şekil 3.8. Rigaku RadB-DMAX XRD Cihazı

3.7. SEM-EDX Analizleri

Numunelerin mikro yapı analizleri LEO-EVO 40 taramalı elektron mikroskobu ve Bruker-125 eV Energy Dispersive X-Ray Spectroskopy ünitesi (şekil 3.9) ile yapıldı.



Şekil 3.9. LEO-EVO 40 taramalı elektron mikroskobu ve Bruker-125 eV Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy ünitesi

3.8. Manyetik Ölçümler

Alaşımların magnetik ölçümleri Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi (Physical Properties Measurement System, QUANTUM DESIGN 7 PPMS) ile yapıldı (şekil 3.10).



Şekil 3.10. Fiziksel Özellikler Ölçüm Sistemi (Physical Properties Measurement System, QUANTUM DESIGN 7 PPMS)

3.9. Mekanik Ölçümler

3x3x6 mm^3 veya 4x4x8 mm^3 ebatlarında kesilmiş olan alaşımların mekanik ölçümleri Kentucky Universitesi Laboratuvarlarında bulunan MTS Landmark Servohydraulic test sistemi ve Laboratuvarımızda bulunan Hitachi marka TMA 7100 cihazları (şekil 3.11) kullanılarak yapıldı. Numunelerin sertlik ölçümleri Kentucky Üniversitesi Laboratuvarlarında bulunan Micro Vickers Hardness tester Model 900-391 veya Fırat Üniversitesi Laboratuvarlarında bulunan Emco Test Durascan sertlik ölçme cihazları ile ölçüldü.



- a -



- b -

Şekil 3.11. a) MTS landmar servohydraulic test sistemi (Haluk Ersin Karaca, Kentucky Üniversitesi) ve b) Hitachi marka TMA 7100 cihazları(Gazi Üniversitesi)

4. BULGULAR

4.1. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımları

4.1.1. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Alaşım Oranları

Ön hazırlık aşamasında hazırlanan farklı atomik yüzdelere sahip ve e/a oranları 7,71-7,65 aralığında seçilen ve atomikçe Ni ve Mn oranı sabit tutulup galyum yerine bor katkılanan $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının atomik ve ağırlıkça yüzdeleri tablo 4.1 de verildi.

Tablo 4.1. Dökümü yapılan $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşım oranları

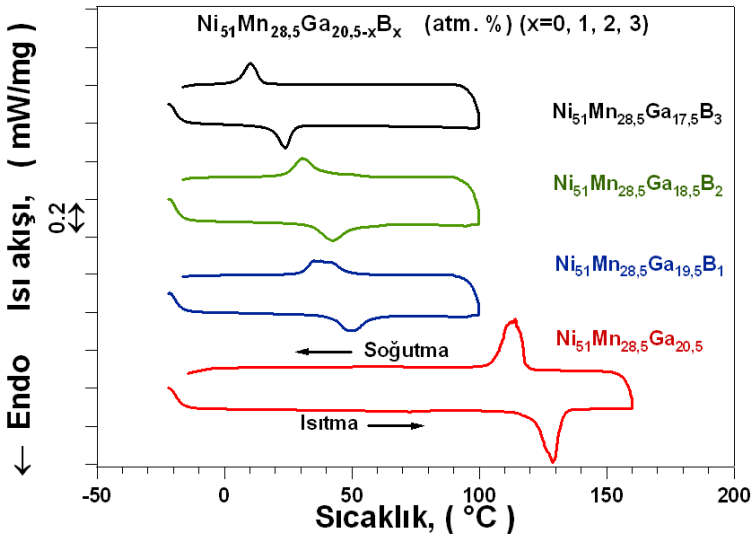
Alaşım	Atomik yüzde				Ağırlıkça Yüzde				e/a
	Ni	**Mn**	**Ga**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Ga**	**B**	
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$	51	28,5	20,5	0	49,99	26,15	23,87	0	**7,71**
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$	51	28,5	19,5	1	50,48	26,41	22,93	0,18	**7,69**
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$	51	28,5	18,5	2	50,99	26,67	21,97	0,37	**7,67**
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$	51	28,5	17,5	3	51,59	26,94	20,99	0,56	**7,65**

4.1.2. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için 5, 10,15, 20 ve 25 ^oC/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanılarak DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 10 ^oC/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri şekil 4.1 de verildi. Bulunan dönüşüm sıcaklıkları tablo 4.2 de topluca verildi. Bor katkı oranının artışı ve galyum oranının azalması ile birlikte $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında da düşüşler gözlendi.

Tablo 4.2. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının DSC ölçüm sonuçları

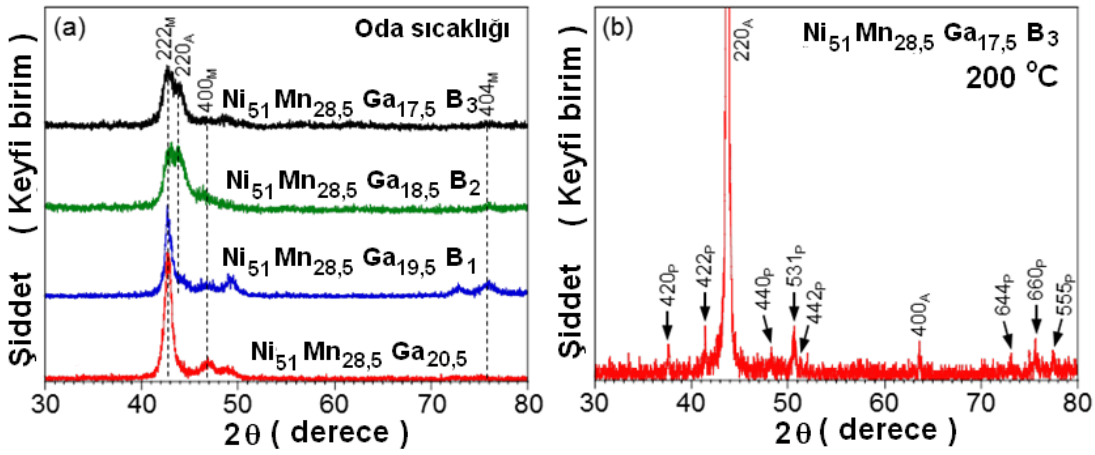
Numune adı	$A_s\ ^oC$	$A_p\ ^oC$	$A_f\ ^oC$	$M_s\ ^oC$	$M_p\ ^oC$	$M_f\ ^oC$	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$	121,4	128,7	132,4	117,9	114,0	106,5	13,76
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$	46,9	53,7	60,0	50,7	45,3	39,5	3,86
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$	34,2	42,7	51,8	38.2	30,7	24,3	7,15
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$	18,6	24,0	27,5	14,9	10,2	5,2	4,61



Şekil 4.1. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının 10 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri

4.1.3. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının XRD difraktogramları Kentucky üniversitesi laboratuvarlarında Bruker AXS D8 DISCOVER cihazı kullanılarak oda sıcaklığı (martensit durumunda) ve $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımı için ise ayrıca 200 °C de (austenit durumunda) alındı. Oda sıcaklığında $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$ alaşımı tamamen martensit durumda iken, Bor katkılanmış $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$ ve $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımları oda sıcaklığında austenit ve martensit fazından oluşmaktadır (şekil 4.2). DSC grafiklerinden elde edilen ve tablo 4.2 de verilen dönüşüm sıcaklıkları incelendiğinde $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$ alaşımı hariç bor katkılı $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 1, 2, 3) alaşımlarının martensit dönüşüm sıcaklıklarının oda sıcaklığına yakın sıcaklıklar olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. a) Oda sıcaklığında alınan $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının XRD difraktogramları, b) 200 °C sıcaklığında $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$) alaşımının XRD difraktogramı,

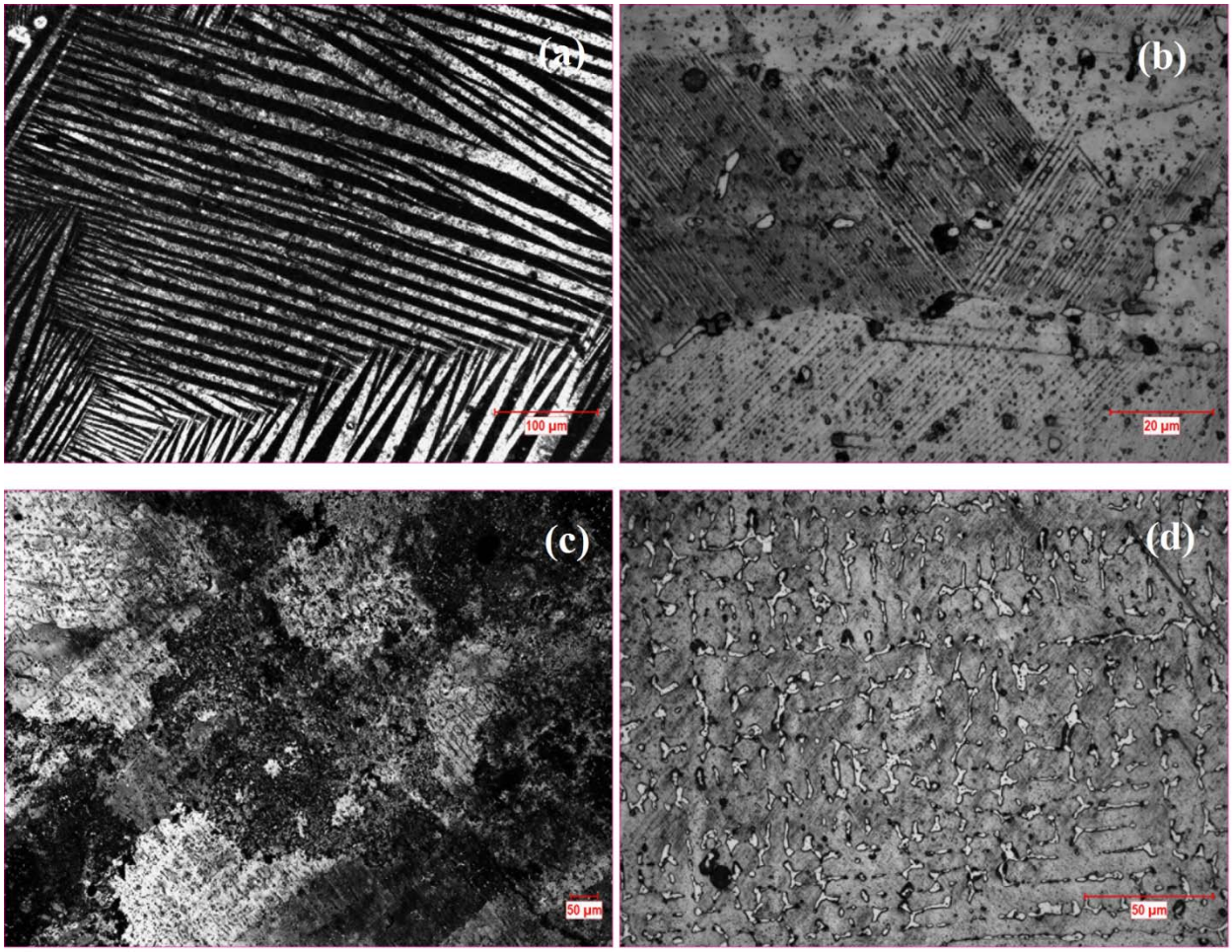
4.1.4. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Metal Mikroskobu Analizleri

$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının metal mikroskop analizleri yapılabilmesi için alaşımlara polyester reçine ile soğuk kalıplama yapıldı. Soğuk kalıplama yapılan alaşımlara, ipek ve kadife çuha ile parlatma işleminden sonra, 20 ml HCl, 5 g $FeCl_3$-H_2O ve 96 ml methanol ile hazırlanan çözelti ile kimyasal dağlama yapıldı. Bu şekilde hazırlana alaşımların metal mikroskop ölçümleri Nikon Eclipse MA200 marka cihaz ile alındı ve görüntüler şekil 4.3 de verildi. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$ alaşımının oda sıcaklığında alınan ve şekil 4.3.a da verilen yüzey mikrografında martensit yapılar açıkça görünmektedir. Benzer durum şekil 4.3.b de verilen $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$ alaşımında da gözlenmiştir. Bu alaşımların oda sıcaklığında martensit fazında olduğu DSC ölçümlerinde de görülmektedir. Bor oranı artışı ile dönüşüm sıcaklıklarında düşüşler gözlenmiştir. DSC analizlerinde de görüldüğü gibi $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$ ve $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımları oda sıcaklığında austenit fazında bulunduğu için martensit plakalar gözlenmemiştir.

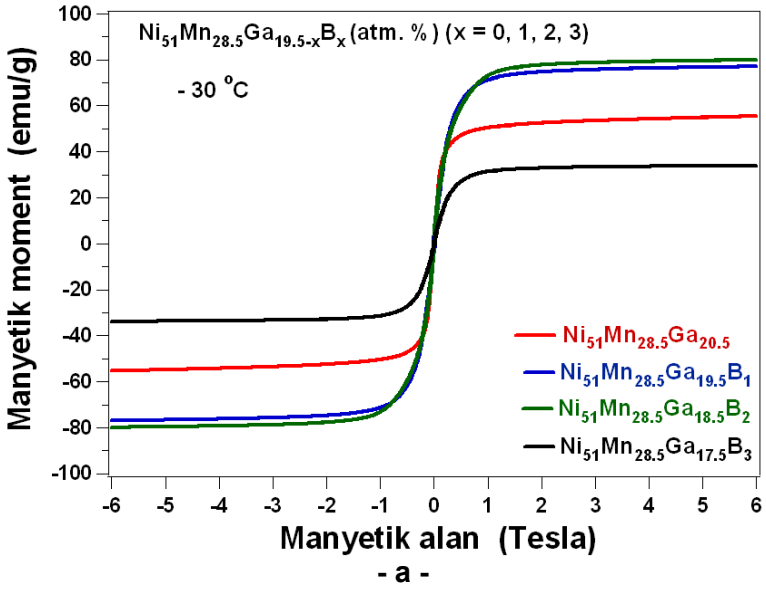
4.1.5. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$ ve $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ (atomik yüzde) alaşımlarının manyetik alan altındaki davranışları “Quantum Design-9T PPMS” sisteminin VSM aparatı ile gerçekleştirildi. Ölçüm alınacak alaşımların kütleleri belirlenerek elde edilen manyetik moment değerleri emu/g cinsinden grafiğe aktarıldı. M-H ölçümleri ise -5 Tesla ile 5 Tesla aralığında değişen manyetik alan altında, oda sıcaklığı ve -30 ^oC sabit sıcaklıkları için gerçekleştirildi (şekil 4.4). Martensit bölgesinde (-30 ^oC) galyum oranı azalıp bor oranı arttıkça manyetik moment değerleri artmaktadır (şekil 4.4.a). Ancak bor oranı atomikçe % 3 olduğu durumda manyetik moment değerinde düşüş gözlenmiştir. Benzer durum oda sıcaklığında da gözlenmiştir (şekil 4.4.b).

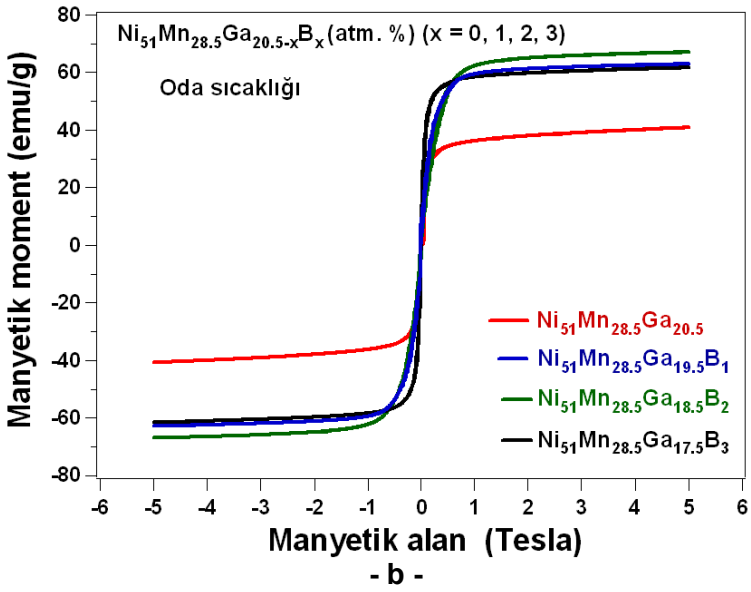
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$ ve $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ (atomik yüzde) alaşımlarının curie sıcaklıkları sırasıyla 76,3 ^oC, 97,4 ^oC, 98,2 ^oC ve 99,2 ^oC olarak bulundu.



Şekil 4.3. a) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$, b) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$, c) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{18,5}B_2$ ve d) $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımlarının yüzey mikrografları



- a -



- b -

Şekil 4.4. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının a) -30 ^oC de b) oda sıcaklığında alınan M-H eğrileri

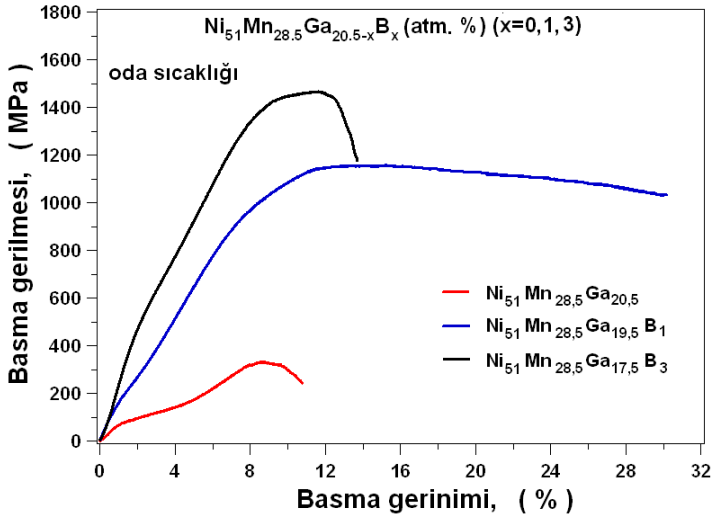
4.1.6. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

4x4x8 mm^3 ebatlarında kesilmiş olan alaşımların mekanik ölçümleri Kentucky üniversitesi laboratuvarlarında bulunan MTS Landmark Servohydraulic test sistemi (Şekil 3.11) ile alındı. Numunelerin sertlik ölçümleri Fırat Üniversitesi laboratuvarlarında bulunan Emco Test Durascan sertlik ölçme cihazları ile yapıldı.

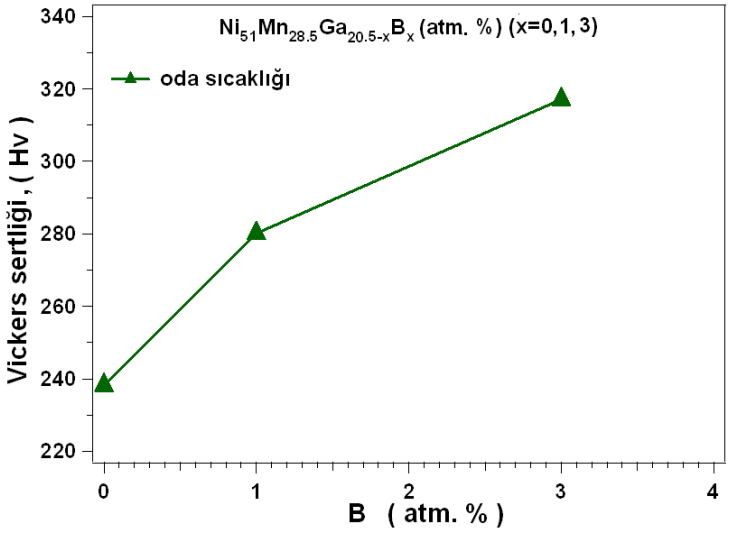
$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının basma gerinimi-basma gerilmesi (compressive stress-compressive strain) eğrileri şekil 4,5'de verilmştir.. Numuneler, oda sıcaklığında kırılana kadar yüklenmiştir. Oda sıcaklığında martensit olan numuneler için ($Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$ ve $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$), martensitin elastik deformasyonundan sonra martensit yönelimi, yönlendirilmiş martensitin elastik deformasyonu ve ardından plastik deformasyon izlenir. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$ alaşımında, martensit yeniden yönlendirme 70 MPa civarında başlar ve 300 MPa maksimum kırılma gerilmesine ulaşır ve %11.5 deformasyondan sonra bozulma olur. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$ alaşımında, martensitin yeniden yönlenmesi 130 MPa civarında başlar, maksimum kırılma gerilmesi 1100 MPa'dır ve %30 deformasyon sonrasında bozulma olur. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$ alaşıma yapılan % 1 bor katkısının hem basınç dayanımı hem de sünekliği arttırdığı gözlenmiştir. %30 süneklik, çok kırılgan olan NiMnGa alaşımlarının mekanik davranışında büyük bir gelişmedir. Bor ilavesi% 3'e yükseltildiğinde, başlangıç yapı austenit yapıdadır. Dolayısıyla yükleme esnasında faz dönüşümü 400 MPa civarında başlar. Bunu martensitin elastik deformasyonu ve plastik deformasyon takip eder. Maksimum basınç dayanımı 1500 MPa ve %14 deformasyon sonrasında $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ numunesi bozulur. Bor içeriğinin %1' den %3'e çıkarılması

durumu incelendiğinde bu alaşım için, bor katkısı ile mukavemetin arttığı ve sünekliğin azaldığı söylenebilir..

$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının mikrosertlik deneyleri de oda sıcaklığında gerçekleştirildi ve bor oranı ile Vickers sertlik değişimi şekil 4.6 da gösterildi. Vickers sertliği, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5}$ için 240Hv ve $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{19,5}B_1$ B1 alaşımları için 280Hv' ye yükseldi. Bor içeriğindeki artış ile $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımında Vickers sertlik değeri 320 HV değerine yükseldi. Bununla birlikte, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımının oda sıcaklığında austenit yapıda, diğerlerinin ise oda sıcaklığında martensit yapıda olduğu göz önüne alındığında, $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{17,5}B_3$ alaşımındaki sertliğin artmasının, bor katkısının artışından mı yoksa yapının austenit fazının etkisinden mi kaynaklandığı açık değildir.



Şekil 4.5. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 3) alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi



Şekil 4.6. $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 3) alaşımlarının oda sıcaklığında bor oranı ile Vickers sertliğinin değişimi

4.2. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımları

4.2.1. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Alaşım Oranları

Farklı atomik yüzdelere sahip ve e/a oranları 8,11-8,20 aralığında seçilen ve Atomikçe Ni oranı sabit tutulan $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının alaşım oranları tablo 4.3 de verilmiştir. Bu alaşımlar ark ergitme fırınında ingot halinde elde edildiler. Üretim esnasında ark ergitme işlemi birkaç kez tekrarlanarak homojen olmaları sağlanmaya çalışıldı.

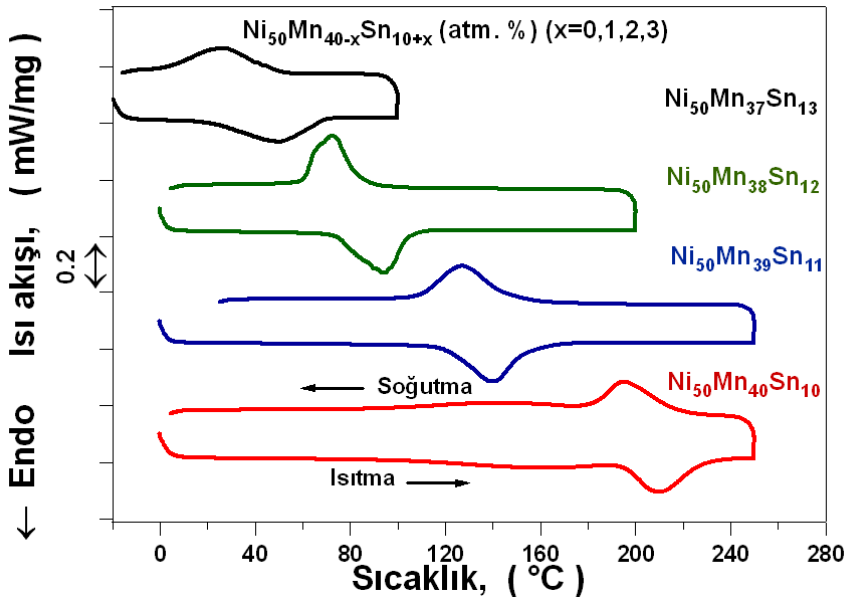
Tablo 4.3. Dökümü yapılan $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde			Ağırlıkça Yüzde			**e/a**
	Ni	**Mn**	**Sn**	**Ni**	**Mn**	**Sn**	
$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$	50	40	10	46,44	34,77	18,79	**8,20**
$Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$	50	39	11	45,98	33,57	20,46	**8,17**
$Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$	50	38	12	45,52	32,38	22,10	**8,14**
$Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$	50	37	13	45,08	31,22	23,70	**8,11**
$Ni_{50}Mn_{35}Sn_{15}$	50	35	15	44,21	28.97	26,82	**8,05**

4.2.2. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 5, 10, 15, 20 ve 25 ^{o}C/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 10 ^{o}C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri şekil 4.7 de verildi. Şekil 4.7 de görüldüğü gibi $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının austenit dönüşüm başlama sıcaklığının 100 ^{o}C (373 K) civarında çok geniş bir pike sahip olduğu görüldü. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının DSC eğrisinde entalpi değeri hesaplanırken başlangıç sıcaklığı 100 ^{o}C civarı seçildiğinde $\Delta H_{ort.}$ değeri 29.50 J/g olarak, başlangıç sıcaklığı 195.57 ^{o}C (~468 K) olarak seçilmesi durumunda ise $\Delta H_{ort.}$ değeri 12.64 J/g olarak bulunur. Benzer durum martensit bitiş sıcaklığı olan M_f sıcaklığında da görülmektedir. M_f sıcaklığı 181,99 C (455 K) olmasına rağmen dönüşüm geniş bir pike sahip olmuştur.

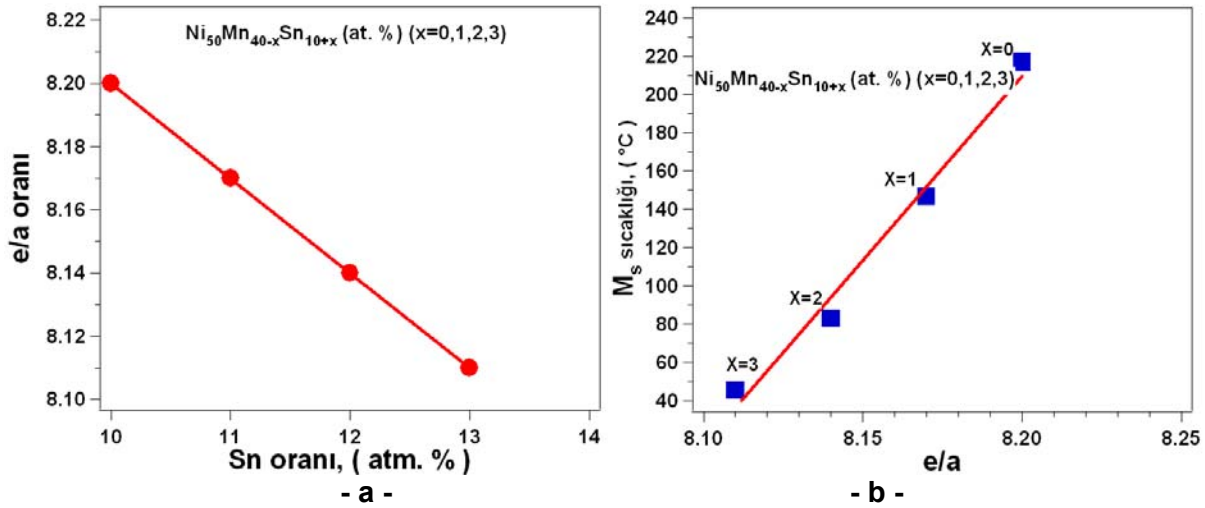
Sn oranı artışı ile e/a oranı azalmış ve e/a oranının azalışı ile birlikte $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında da düşüşler gözlenmiştir (şekil. 4.8.b). M_s, martensit başlama sıcaklığı $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımında 216.83 ^{o}C iken, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımında 45,48 ^{o}C ye düşmüştür. Atomikçe Sn oranı %15 olduğunda alaşımın dönüşüm sıcaklıkları ölçüm yapılan sistemin ölçüm aralığı (-40 ^{o}C ile 400 ^{o}C aralığında) dışında kaldığından dönüşüm gözlenmemiştir (tablo 4.4).



Şekil 4.7. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının 10 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri

Tablo 4.4. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının DSC ölçüm sonuçları

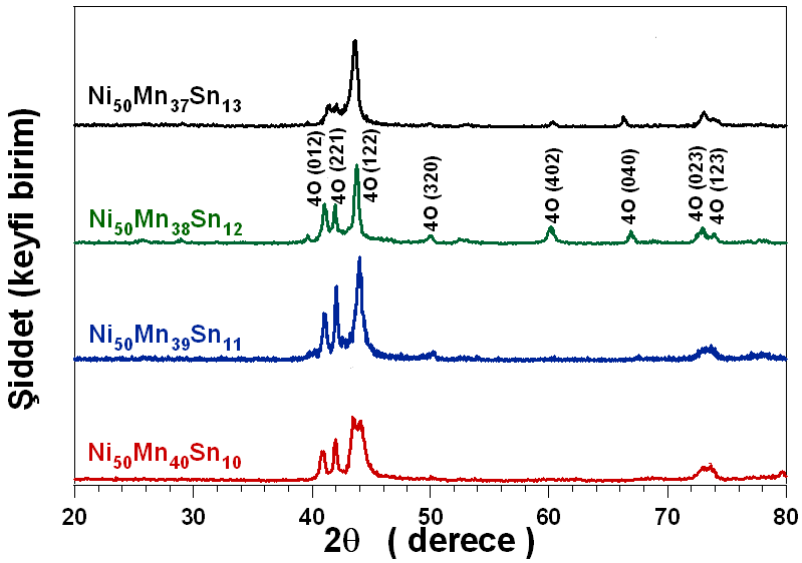
Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$	195.57	209.87	227.59	216.83	195.59	181.99	29.50
$Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$	120.23	139.94	154.65	146.84	127.21	108.27	19.96
$Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$	72.22	93.84	103.29	83.02	72.19	60.33	17.95
$Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$	22.91	49.42	66.06	45.48	26.39	2.69	14.30
$Ni_{50}Mn_{35}Sn_{15}$	-40 °C – 400 °C aralığında dönüşüm gözlenmedi.						



Şekil 4.8. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının a) e/a oranının kalay oranı ile değişimi, b) martensit başlama sıcaklığı M_s nin e/a oranı ile değişimi

4.2.3. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 20-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.9). $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ ve $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ ve $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ alaşımlarının 4O yapıda martensit fazında olduğu, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımının ise austenit fazında bulunduğu bulunmuştur (Wang, W., 2013). $Ni_{50}Mn_{35}Sn_{15}$ alaşımı dönüşüm sergilemediğinden XRD ölçümü alınmamıştır.



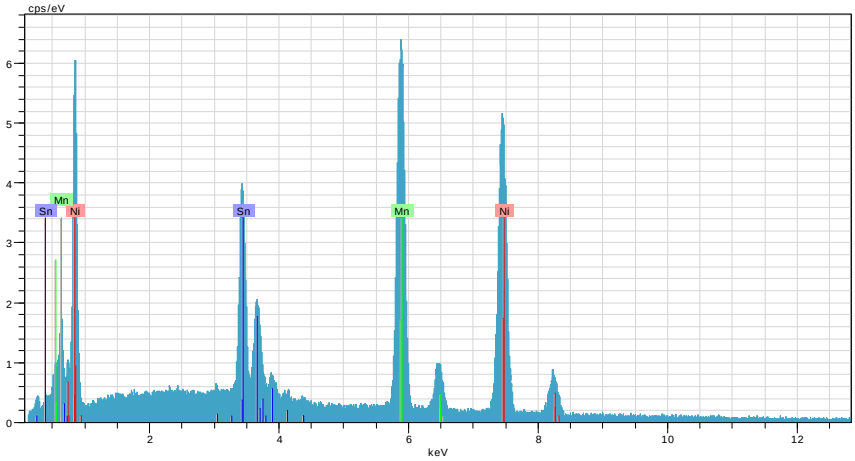
Şekil 4.9. $Ni_{50}Mn_{50-x}Sn_x$ (x= 10, 11, 12, 13) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

4.2.4. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımları 20 ml HCl, 5 g $FeCl_3$-H_2O and 96 ml methanol dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplandı ve şekil 4.10 da örnek olarak $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verildi. $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.11 de gösterildi. Şekil 4.11 de ki SEM görümtülerinde farklı yönelimlere sahip taneler net şekilde görülmektedir. Alınan EDX analizi sonuçlarından belirlenen alaşım oranlarına yakın değerlere sahip alaşımların elde edildiği görüldü.. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucundan bulunan alaşım oranları tablo 4.5 de topluca verildi.



$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$



1 HV:20.0kV Puls th.:7.26kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	30.00	33.22	38.46	0.8
Ni	28	K-series	42.46	47.02	50.96	1.2
Sn	50	L-series	17.84	19.76	10.59	0.6
		Total:	90.30	100.00	100.00	

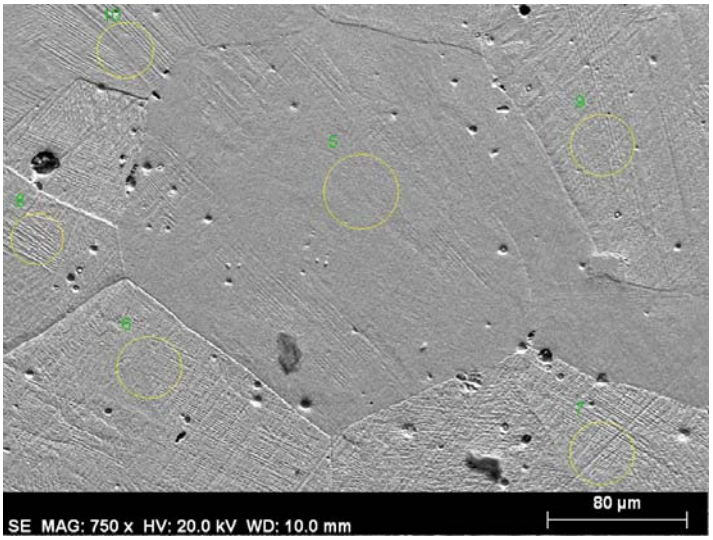
2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	31.26	34.94	40.41	0.9
Ni	28	K-series	40.49	45.26	48.99	1.1
Sn	50	L-series	17.71	19.80	10.60	0.6
		Total:	89.47	100.00	100.00	

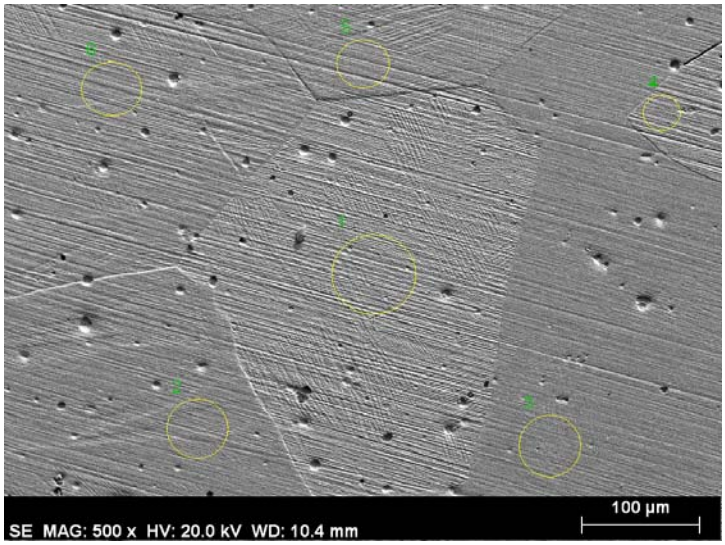
3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	29.34	32.33	37.59	0.8
Ni	28	K-series	42.86	47.23	51.41	1.2
Sn	50	L-series	18.55	20.44	11.00	0.6
		Total:	90.75	100.00	100.00	

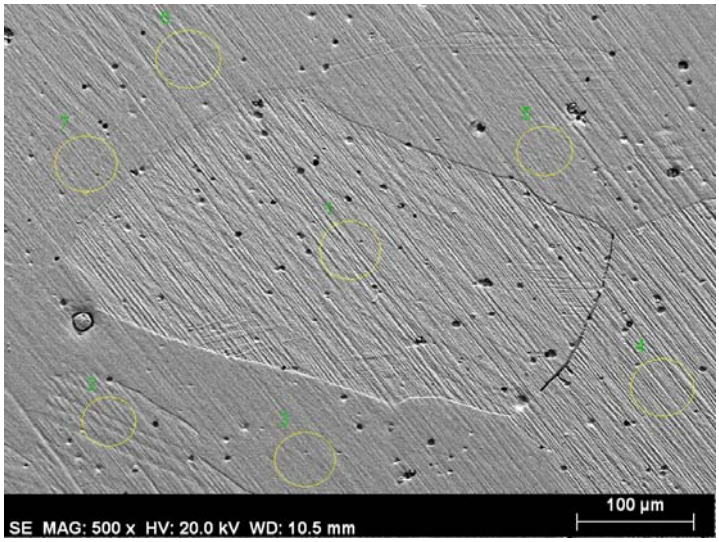
Şekil 4.10. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları



- a -



- b -



- c -

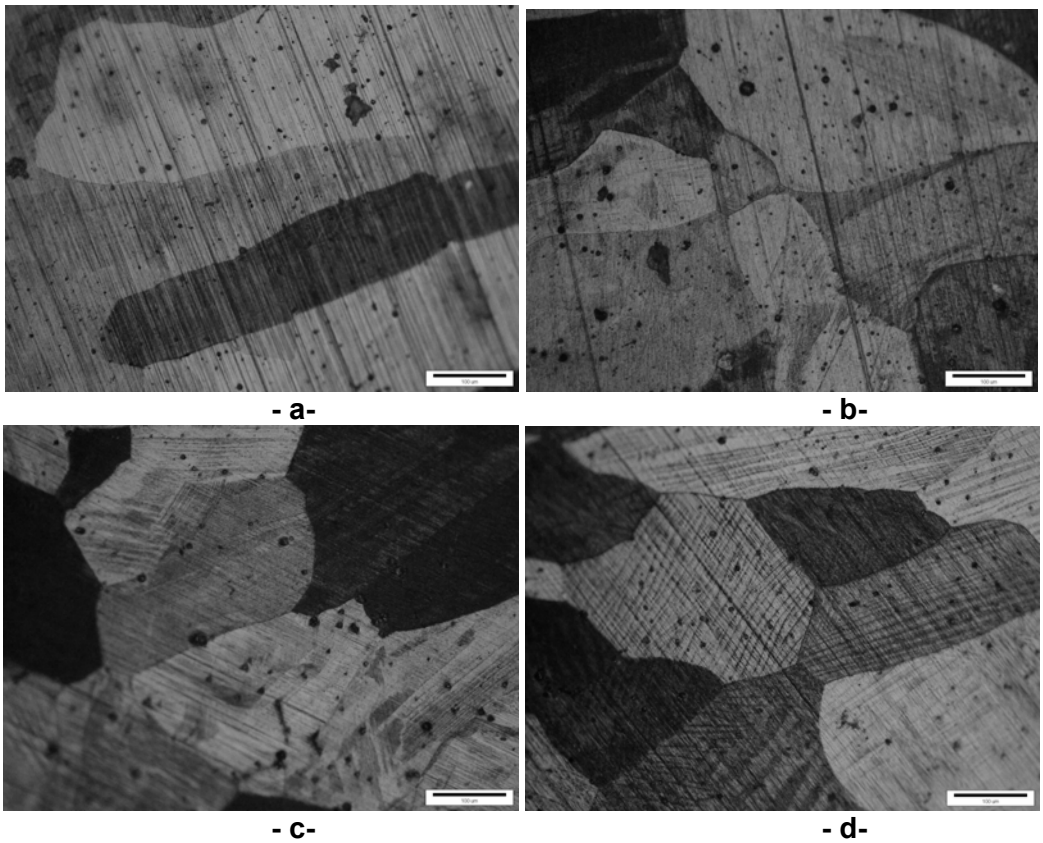
Şekil 4.11. a) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, b) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve c) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

Tablo 4.5. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi(atm.%)			EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi (atm.%)		
	Ni	**Mn**	**Sn**	**Ni**	**Mn**	**Sn**
$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$	50	40	10	50,45	38,82	10,73
$Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$	50	39	11	49,73	38,45	11,77
$Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$	50	38	12	49,46	36,21	13,70
$Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$	50	37	13	50,96	35,15	13,88

4.2.5. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Metal Mikroskobu Ölçümleri

Alaşımların tane boyutları malzemenin mekanik özelliklerini etkilediğinden tane büyüklüklerinin belirlenmesi amacıyla yüzey mikrograflarının alınması için kesilmiş olan parça alaşımların yüzeyleri parlatıldı. Parlatma esnasında sıcaklığa maruz kalmaması için parlatma işlemi su altında yapıldı. Parlatılmış numunelerin tane boyutlarının netleştirmek için 5 gr FeCl3+100 ml methanol+20 ml HCl çözeltisinde numuneler 30 saniye kadar dağlandı. Dağlama yapılmış alaşımların metal mikrografları Nikon Eclipse MA200 metal mikroskobu kullanılarak alındı ve şekil 4.12 de verildi. Elde edilen alaşımların tane boyutları 100 μm den büyük olduğu görüldü. Kalay oranı artışıyla tane büyüklüklerinin belirgin hale geldiği görüldü.



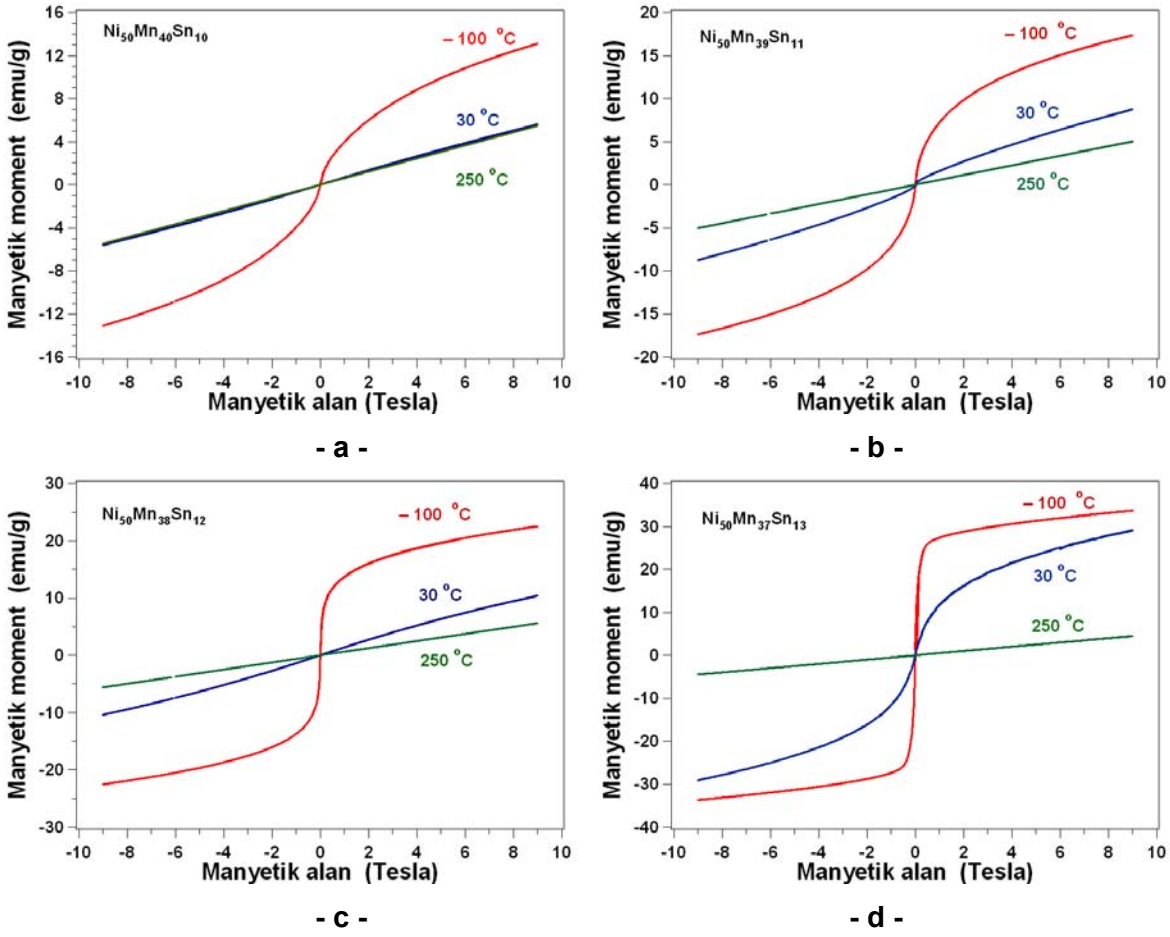
- a- **- b-**

- c- **- d-**

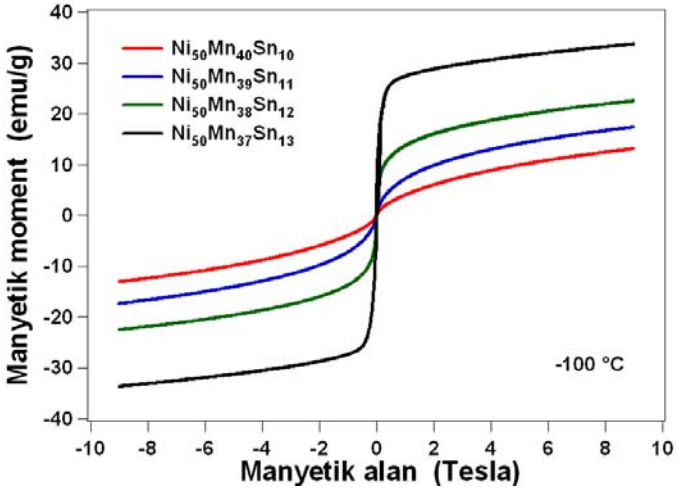
Şekil 4.12. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının yüzey mikrografları

4.2.6. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x= 0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

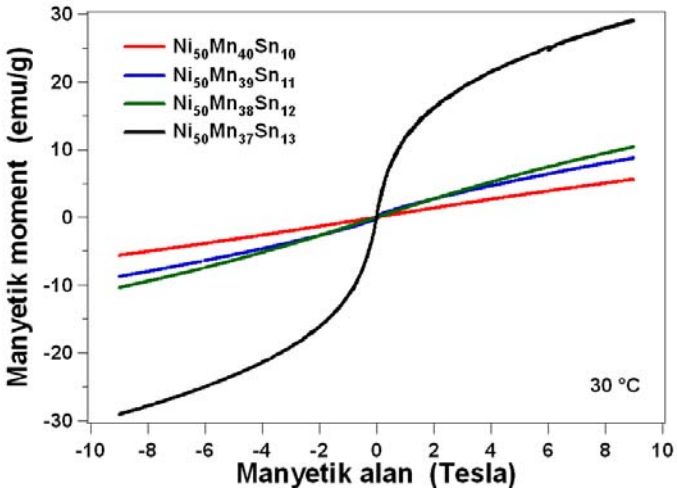
Atomikçe yüzde olarak verilen $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının manyetik alan altındaki davranışları "Quantum Design-9T PPMS" sisteminin VSM aparatı ile gerçekleştirildi. Ölçüm alınacak örneklerin kütleleri belirlenerek alaşımların elde edilen manyetik moment değerleri emu/g cinsinden grafiğe aktarıldı. M-H ölçümleri -9 ile +9 Tesla aralığında değişen manyetik alan altında -100, 30 ve 250 ^oC sabit sıcaklıkları için gerçekleştirildi. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ numunelerine ait manyetik moment-manyetik alan (M-H) eğrileri (-100^oC, 30 ^oC ve 250 ^oC de) her numune için ayrı ayrı olarak şekil 4.13 de verildi. Ayrıca $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının M-H ölçümleri -100 ^oC, 30 ^oC ve 250 ^oC sıcaklıkları için ayrı ayrı verildi (şekil 4.14). Düşük sıcaklıklarda ferromanyetik davranış sergileyen alaşımlar yüksek sıcaklıklara çıkıldıkça ferromanyetik özellikleri zayıflamaktadır. Curie sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda alaşımların paramanyetik özellik sergiledikleri görüldü. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ ve $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ alaşımlarının curie sıcaklıkları 30 ^oC nin altındadır. $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımı 30 ^oC nin üzerinde Curie sıcaklığına sahiptir.



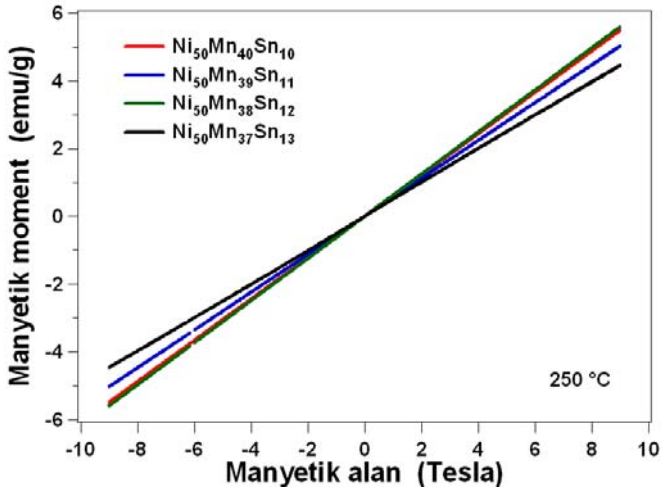
Şekil 4.13. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ numunelerine ait manyetik moment-manyetik alan (M-H) eğrileri (-100 ^oC, 30 ^oC ve 250 ^oC sıcaklıklarında)



- a -



- b -

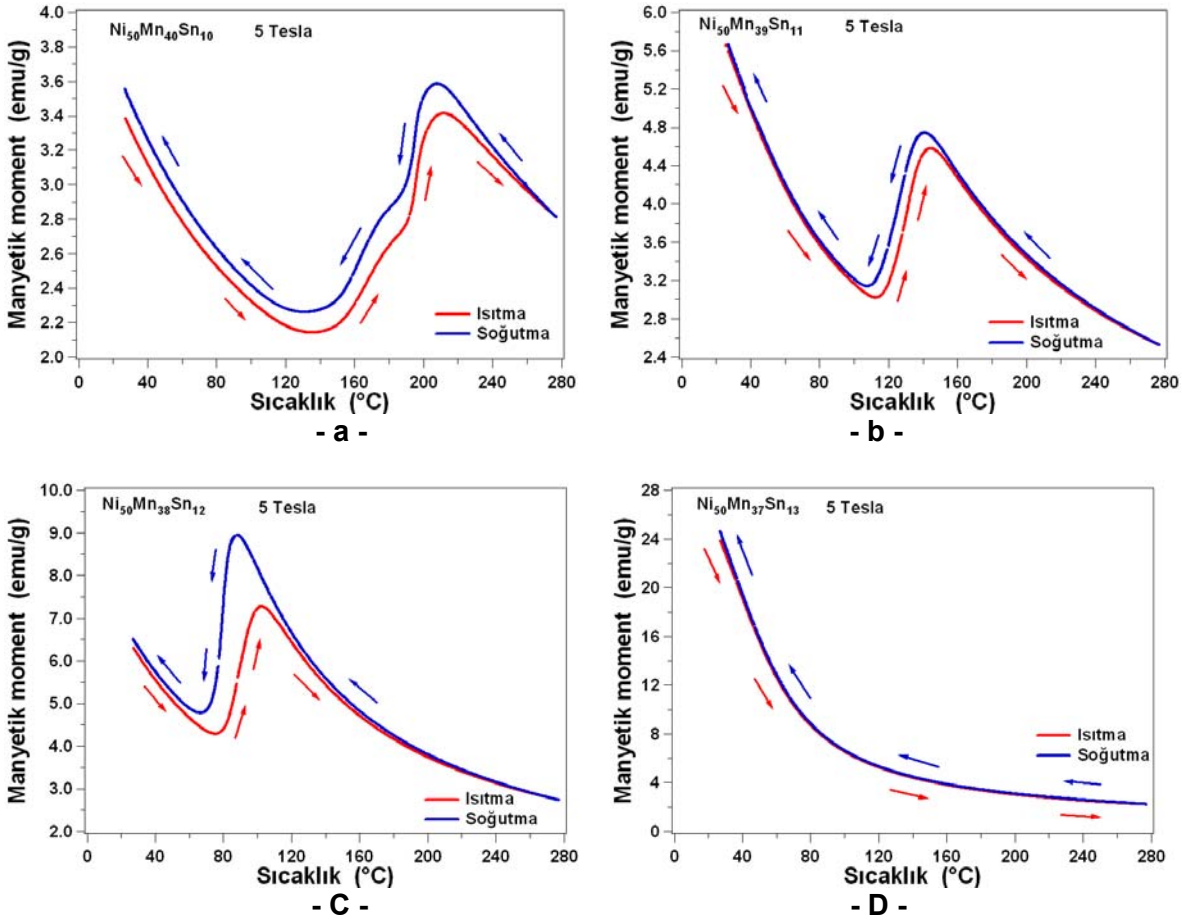


- c -

Şekil 4.14. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının a) -100 ^{o}C, , b) 30 ^{o}C ve c) 250 ^{o}C de alınan M-H ölçümleri

M-T ölçümleri ise 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 ^{o}C-277 ^{o}C sıcaklık aralığında alındı (şekil 4.15). Şekil 4.7.de verilmiş olan $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının DSC grafiğinde görüldüğü gibi austenit dönüşüm 100 ^{o}C civarında başladığı ancak çok geniş bir pik verdiği, austenit dönüşümün başlangıç sıcaklığı A_s nin 195.57 ^{o}C olduğu görülmektedir. Benzer durum şekil 4.15.a da verilen M-T grafiğinde de görülmektedir. Şekil 4.7 de verilen $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımının dönüşüm sıcaklığı oda sıcaklığı yakınında olduğundan $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımının 5 Tesla sabit manyetik alan altındaki grafiğinde dönüşüm ölçüm aralığının dışında kalmıştır. Yapılan manyetik ölçüm sonucunda bulunan değerler ile DSC ölçümlerinden bulunan değerler uyum içerisinde olduğu görüldü.

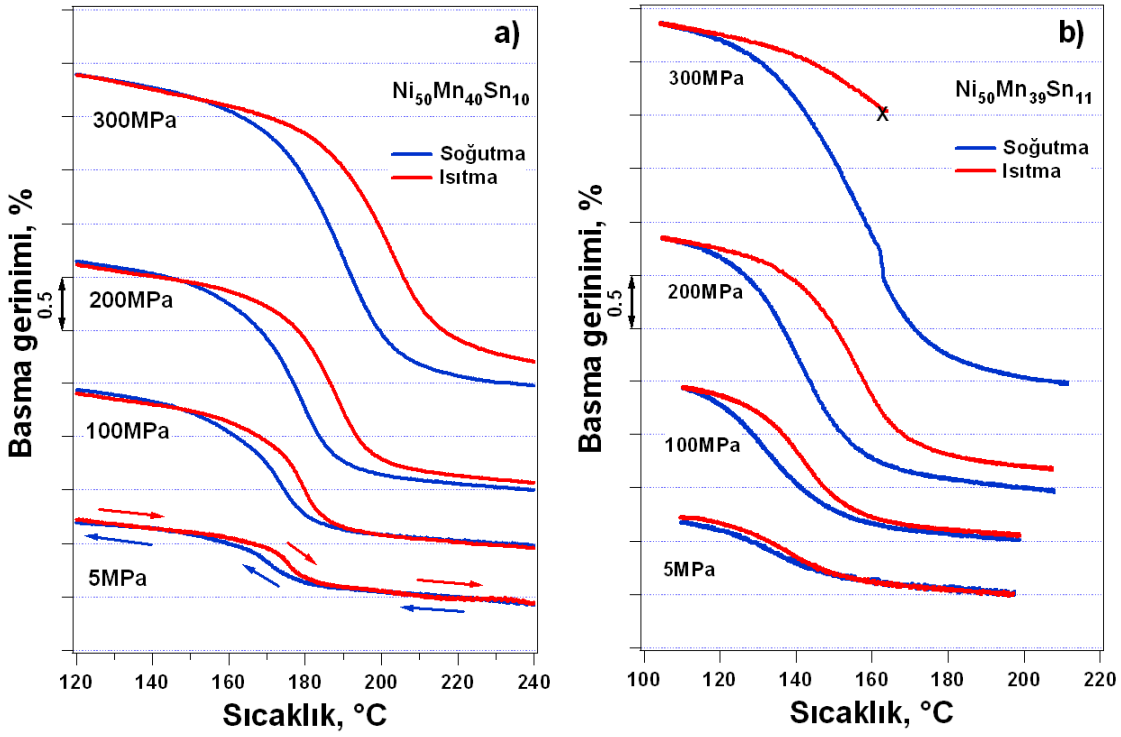
Alaşımlar oda sıcaklığından ısıtılmaya başlayınca Austenit başlangıç sıcaklıklarına kadar manyetizasyon değerlerinde düşüşler gözlenmekte, Austenit başlangıç sıcaklığından austenit bitiş sıcaklığına kadar olan sıcaklık bölgesinde manyetizasyon değerinde artış oluşmakta ve austenit bitiş sıcaklığından sonra manyetizasyon değerleri tekrar azalmaktadır.

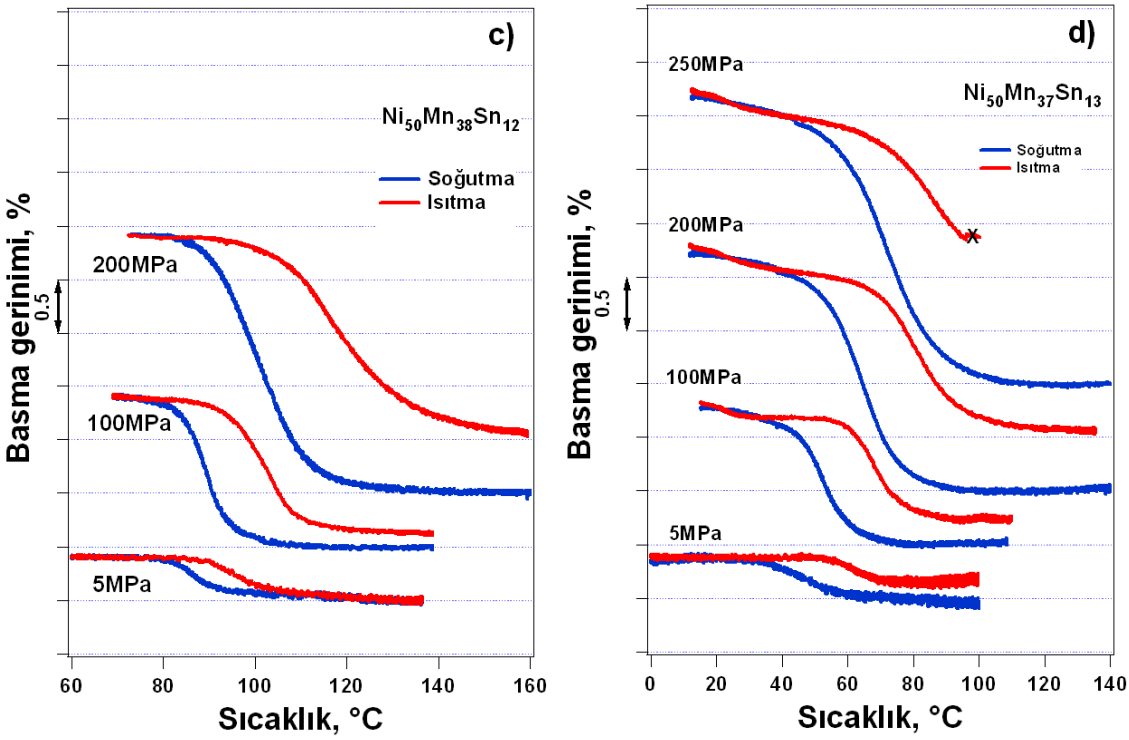


Şekil 4.15. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 ^{o}C-277 ^{o}C aralığında M-T ölçümleri

4.2.7. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

4x4x8 mm^3 ebatlarında kesilmiş olan alaşımlar üzerine 5 MPa, 100 MPa, 200 MPa ve 300 MPa değerlerinde sabit basınç uygulanarak sıcaklık değişimi ile basma gerinimi değişimleri incelendi. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının 5 MPa basınç altında M_s, M_f, A_s ve A_f sıcaklıkları sırasıyla 177.4, 160.8, 170 ve 180.3 ° C olarak bulundu. Aynı alaşımın 300 Mpa sabit basınç altında altında M_s, M_f, A_s ve A_f sıcaklıkları ise sırasıyla 203.8, 169.8, 186.9 ve 215 ° C olarak elde edildi. Ayrıca, DSC sonuçları ile iyi uyum gösteren Sn içeriği arttıkça dönüşüm sıcaklığı düştüğü gözlendi. 5 MPa sabit basınç altında, $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının martensit başlama sıcaklıkları (M_s) sırasıyla 177.4, 149.7, 91.3 ve 57.1 ° C olarak bulundu. Bulunan değerler DSC ile bulunan değerlere yakın değerler olup Sn oranı arttıkça M_s değerlerinin düştüğü gözlendi. $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının ölçümleri 300 MPa ve 250 MPa sabit basınç altında ısıtma sırasında başarısız oldu. $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ alaşımında 300 MPa sabit basınç altında ölçüm alınamadı.

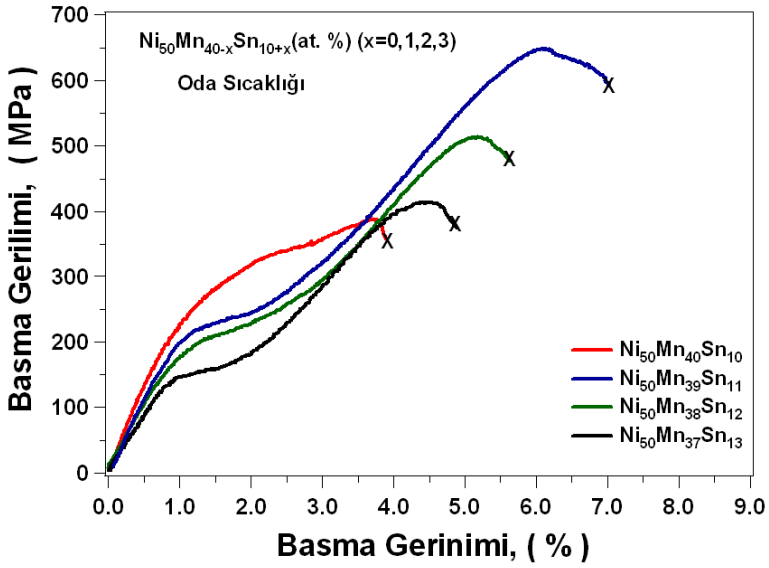




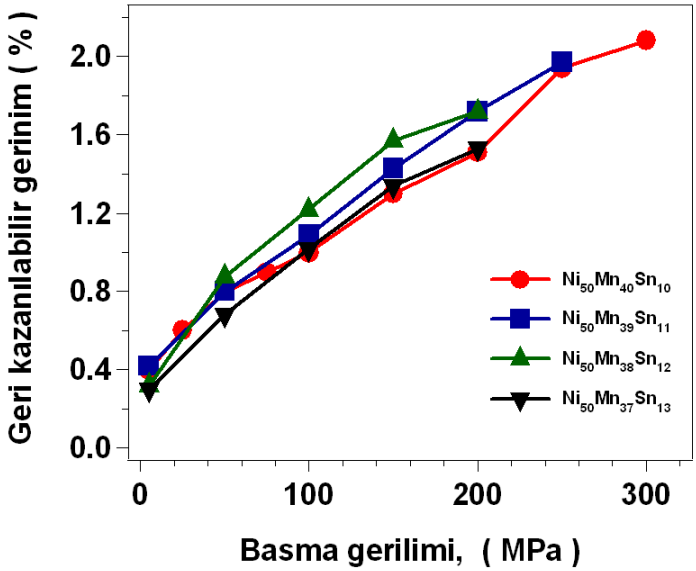
Şekil 4.16. Uygulanan sabit basma gerilimleri altında a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$, c) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ ve d) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımlarının basma gerinimi-sıcaklık eğrileri

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ alaşımlarına basınç dayanımları ve süneklikleri korununcaya kadar oda sıcaklığında yükleme yapıldı (şekil 4.17). Oda sıcaklığında martensit fazında bulunan $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ ve $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ alaşımlarının basma gerilimi-gerinimi değerlerinde kalay oranının artışıyla artışlar gözlendi. $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımının gerilim-gerinim değerlerinde ise $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ ve $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ alaşımlarına göre bir azalış gözlendi. Bunun nedenin bu alaşımın oda sıcaklığında austenit fazında olmasından kaynaklı olduğu söylenebilir. Test edilen alaşımlar içerisinde $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ alaşımı en yüksek basma gerilimi ve gerinimine sahip olduğu görüldü. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ için kırılma gerilimi ve gerinimi değerleri sırasıyla 390 MPa ve % 3.9 olarak, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$'in kırılma gerilimi ve gerinimi değerleri ise sırasıyla 650 MPa ve % 7 olarak bulundu.

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ alaşımlarının geri kazanılabilir gerinim değerleri basma gerilimine karşı değerleri oda sıcaklığı için şekil 4.18 de çizildi. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımında 300 MPa basınç altında geri kazanılabilir gerinim %2.1 olarak elde edildi. $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımında ise geri kazanılabilir gerinim 200 MPa da %1.5 civarında bulundu.



Şekil 4.17. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi



Şekil 4.18. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ alaşımlarının oda sıcaklığında geri kazanılabilir gerinim eğrileri

4.3. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımları

4.3.1. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Alaşım Oranları

Proje önerisinde belirlediğimiz NiMn temelli farklı atomik yüzdelere sahip NiMnSn alaşımları dökümü yapılıp, termal özellikleri belirlendikten sonra, dönüşüm sergileyen $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımında Ni ve Sn oranları sabit tutularak, Mn oranı azaltılıp, yukarıda belirtilen NiMnSn alaşımı üretim işlemleri tekrarlanarak Tablo 4.6 da verilen farklı atomik yüzdelere sahip Bor katkılı $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x=0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımları üretilmiştir. Üretilen atomikçe yüzdeye sahip $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$, $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$, $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımları yüksek saflıkta (%99.999) argon atmosferi altında 900 ^oC de 20 saat homojenleştirme işlemine tabi tutularak, tuzlu-buzlu suda ani soğutma uygulandı.

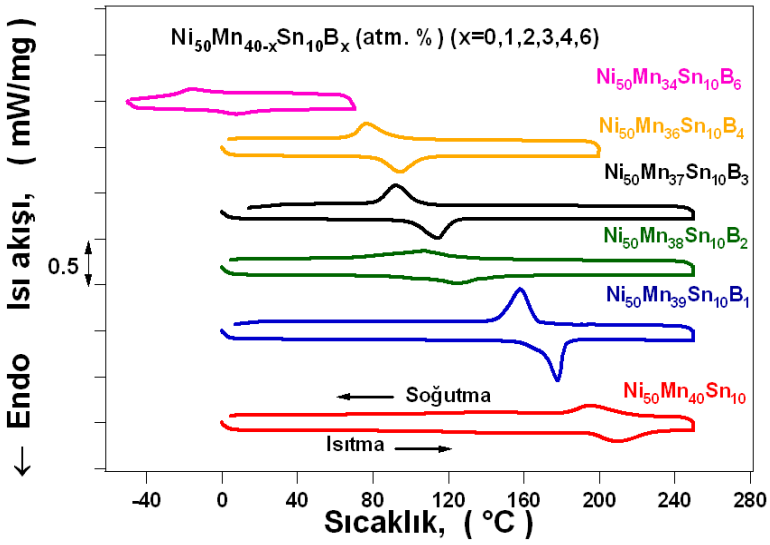
Tablo 4.6. Dökümü yapılan $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde				Ağırlıkça yüzde				e/a
	Ni	**Mn**	**Sn**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Sn**	**B**	
$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}B_0$	50	40	10	0	46,44	34,77	18,79	0	**8,20**
$Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$	50	39	10	1	46,77	34,14	18,92	0,17	**8,16**
$Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$	50	38	10	2	47,10	33,50	19,05	0,35	**8,12**
$Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$	50	37	10	3	47,43	32,85	19,19	0,52	**8,08**
$Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$	50	36	10	4	47,77	32,20	19,33	0,70	**8,04**
$Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$	50	34	10	6	48,47	30,85	19,61	1,07	**7,96**
$Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$	50	32	10	8	49.19	29.47	19.90	1.45	**7.88**

4.3.2. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 5, 10,15, 20 ve 25 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 10 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri Şekil 4.19 da verildi. Bor oranı artıp Mangan oranı azaldıkça $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında düşüşler gözlenmiştir (Tablo 4.7). Atomikçe Bor oranı %8 olduğunda alaşımın dönüşüm sıcaklıkları ölçüm yapılan sistemin ölçüm aralığı (-40 °C ile 400 °C aralığında) dışında kaldığından dönüşüm gözlenmemiştir.

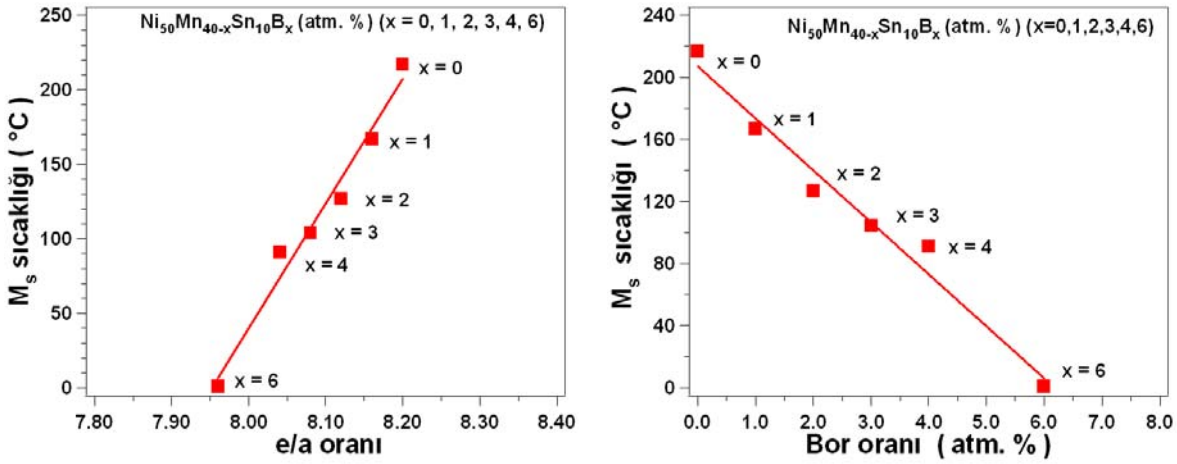
Bölüm 4.2.2 de verildiği gibi $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının DSC eğrisinde entalpi değeri hesaplanırken başlangıç sıcaklığı 100 °C civarı seçildiğinde $\Delta H_{ort.}$ değeri 29.50 J/g olarak, başlangıç sıcaklığı 195.57 °C (~468 K) olarak seçilmesi durumunda ise $\Delta H_{ort.}$ değeri 12.64 J/g olarak bulunur.



Şekil 4.19. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6) alaşımlarının 10 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC eğrileri

Tablo 4.7. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$	195,5	209,9	227,6	216,9	195,6	181,9	29,5
$Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$	169,3	178,0	181,8	167,0	158,2	146,9	29,0
$Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$	103,6	124,6	141,5	126,9	107,4	72,4	21,5
$Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$	100,3	114,2	122,2	104,1	92,3	82,0	18,5
$Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$	82,9	94,5	105,8	91,1	76,7	68,2	17,3
$Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$	−5,7	7,4	21,0	0,9	−16,3	−26,5	6,8
$Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$	-40 °C – 400 °C aralığında dönüşüm gözlenmedi.						

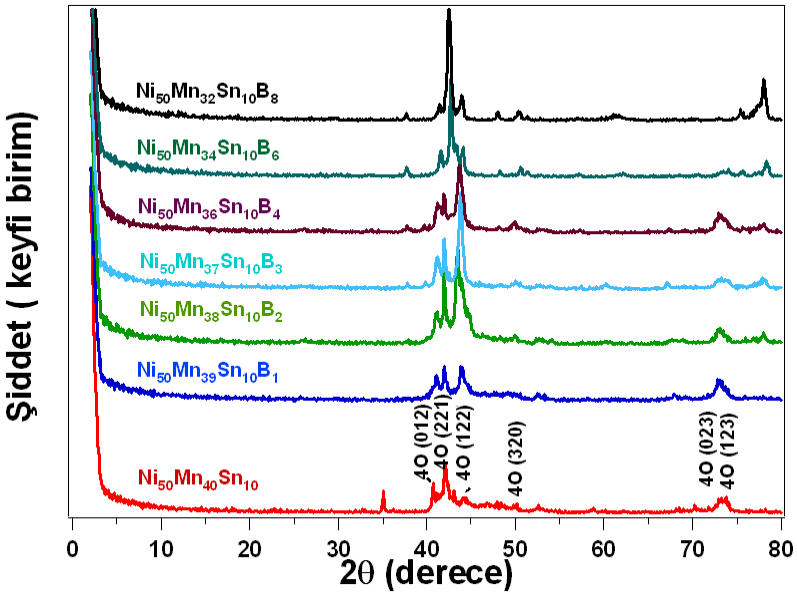


Şekil 4.20. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6) alaşımlarının; a) martensit başlama sıcaklığı M_s' nin e/a oranı ile değişimi, b) martensit başlama sıcaklığı M_s nin bor oranı ile değişimi

4.3.3. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 2-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.21).

$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımı 4O yapıda martensit fazında olduğu bulunmuştur (Wang, W., 2013). $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$ alaşımları oda sıcaklığında martensit fazında olup ortorombik yapıdadırlar (Wang, W., 2013). $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımları ise oda sıcaklığında austenit fazdadırlar..



Şekil 4.21. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x=0,1,2,3,4,6,8) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

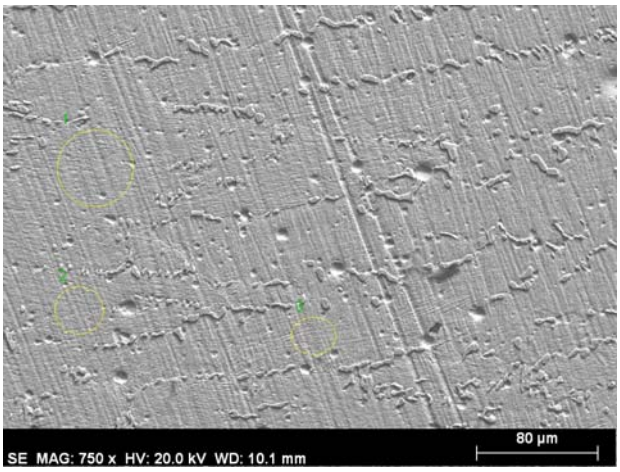
4.3.4. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımları 20 ml HCl, 5 g $FeCl_3$-H_2O and 96 ml methanol dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmış ve şekil 4.22 de örnek olarak $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$, $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$, $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$, alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.23 de verilmiştir. Alınan EDX analizlerinde SEM-EDX sistemi, sodyumdan (Na) daha düşük atom numarasına sahip hafif elementleri belirleyemediğinden dolayı bor oranı tespit edilememiştir. Bu nedenle normalize edilmiş değerlerde sapmalar gözlenmektedir.

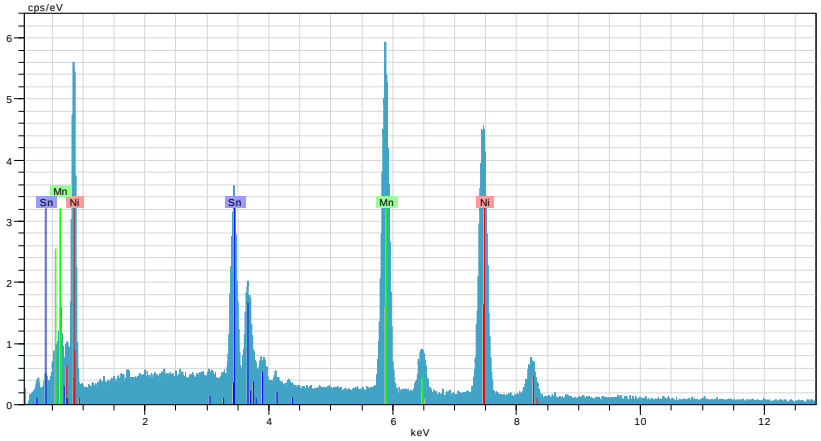
Bor katkısız $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının EDX analizi sonuçlarından belirlenen alaşım oranlarına yakın değerlere sahip alaşımın elde edildiği görülmüştür. $Ni_{50}Mn4_{0-x}Sn10_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucundan bulunan alaşım oranları tablo 4.8 de topluca verilmiştir. Tablo 4. 8 de verildiği gibi, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$ alaşımının SEM görüntüsünün 3 nolu bölgesinde, $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$ alaşımının SEM görüntüsünün 3 nolu bölgesinde, $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ alaşımının SEM görüntüsünün 5 nolu bölgesinde ve $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımının SEM görüntüsünün 2 nolu bölgesinde alaşım oranlarında büyük sapmalar gözlenmiştir. Bu bölgelerde Mn ve Sn oranlarında büyük düşüşler gözlenmiş, Mn oranı %30 civarına düşmüş ve Nikel oranı ise %70 lerin üzerine çıkmıştır. Bu bölgeler Ni_3Mn fazına karşı gelmektedir (Elwindari ve Manaf, 2016; Barnsley, 2012).

Tablo 4.8. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%				EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%			
	Ni	**Mn**	**Sn**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Sn**	**B**
$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$	50	40	10	0	51,32	38,03	10,65	_
$Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$	50	39	10	1	48,22	40,67	11,10	_
$Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$	50	38	10	2	50,91	38,25	10,83	_
$Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$	50	37	10	3	50,44	38,60	10,95	_
$Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$	50	36	10	4	46,88	40,04	13,03	_
$Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$	50	34	10	6	49,45	38,01	12,53	_
$Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$	50	32	10	8	50,02	36,81	13,16	_



$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$



1 HV:20.0kV Puls th.:6.52kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	28.65	33.66	38.69	0.8
Ni	28	K-series	40.72	47.85	51.47	1.1
Sn	50	L-series	15.74	18.49	9.84	0.5
		Total:	85.10	100.00	100.00	

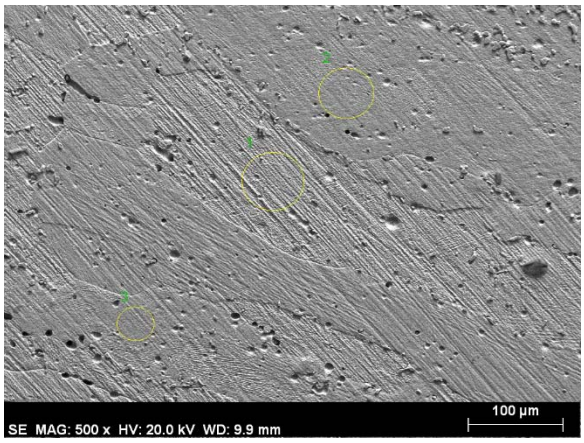
2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]

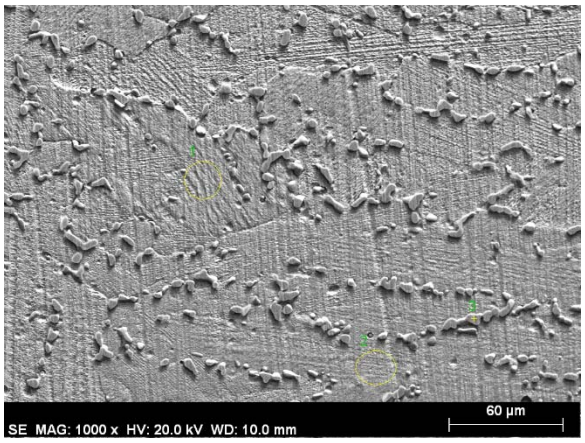
Mn 25 K-series	28.99	33.29	38.85	0.8
Ni 28 K-series	39.63	45.51	49.71	1.1
Sn 50 L-series	18.46	21.20	11.45	0.6
Total:	87.07	100.00	100.00	

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	28.17	31.52	36.56	0.8
Ni	28	K-series	43.46	48.62	52.78	1.2
Sn	50	L-series	17.75	19.86	10.66	0.6
Total:			89.38	100.00	100.00	

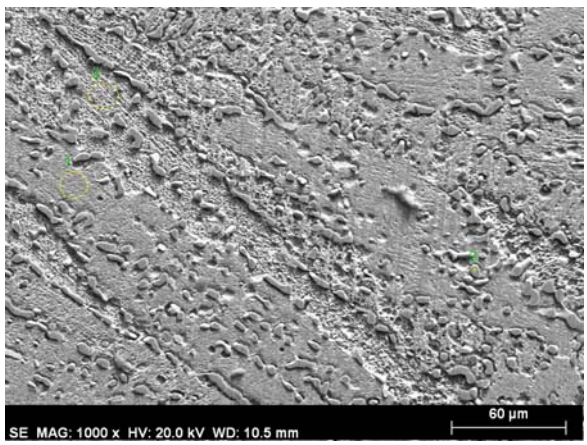
Şekil 4.22. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları



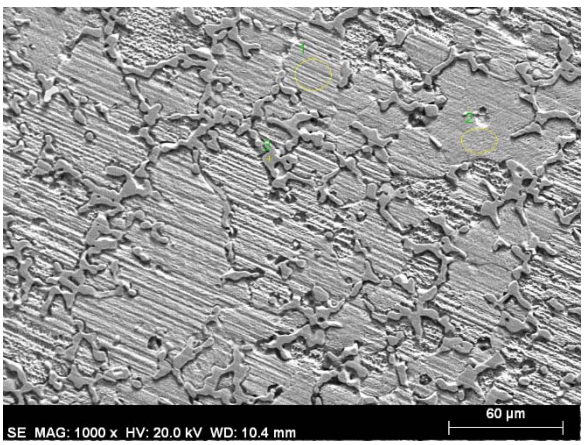
- a -



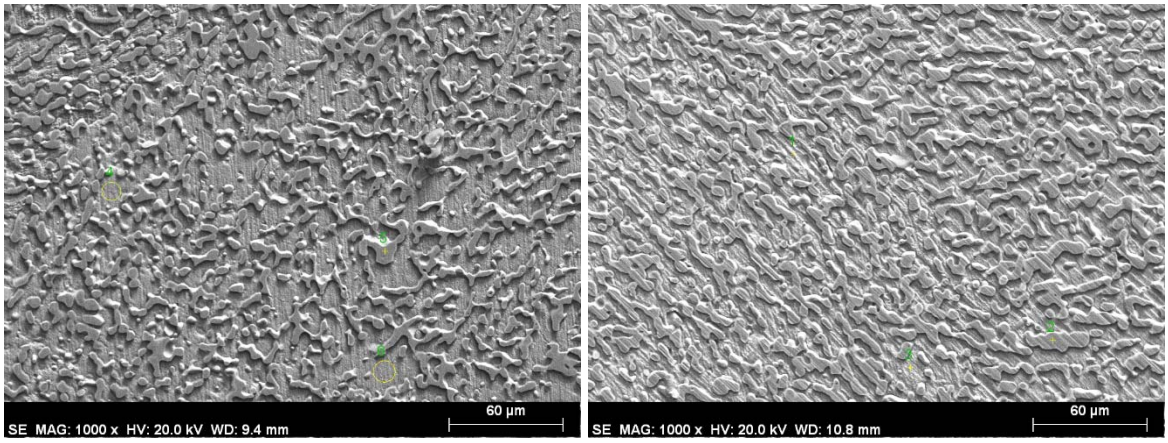
- b –



- c -



- d –



- e - **- f -**

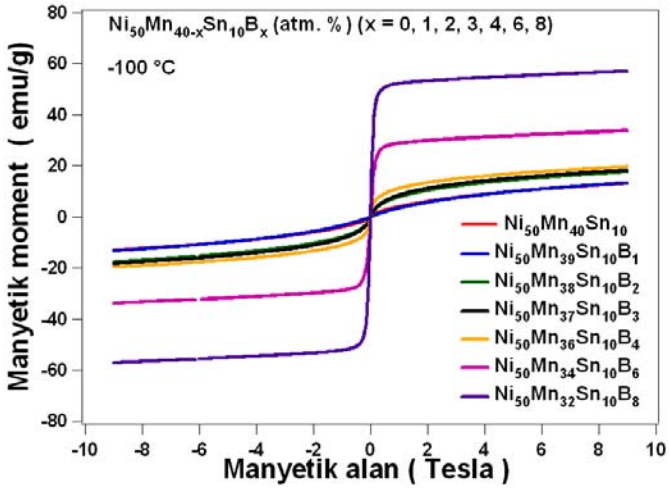
Şekil 4.23. a) $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$, b) $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$, c) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$, d) $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$, e) $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve f) $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

4.3.5. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

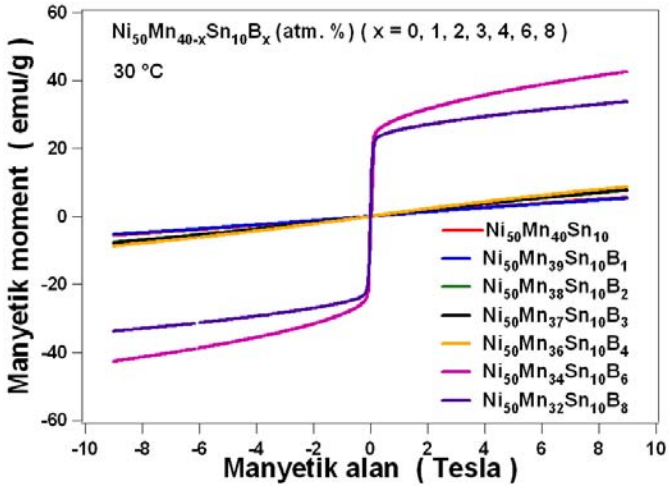
Atomikçe yüzde olarak verilen $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının manyetik alan altındaki davranışları "Quantum Design-9T PPMS" sisteminin VSM aparatı ile gerçekleştirildi. Ölçüm alınacak örneklerin kütleleri belirlenerek alaşımların elde edilen manyetik moment değerleri emu/g cinsinden grafiğe aktarıldı. M-H ölçümleri ise – 9 Tesla ile +9 Tesla (-90 kOe ile +90 kOe aralığında) değişen manyetik alan altında -100 ^oC, 30 ^oC ve 250 ^oC sabit sıcaklıklarında alındı (şekil 4.24). M-T ölçümleri 5 Tesla (50 kOe' lik) sabit manyetik alan altında 40 -280 ^oC aralığında alındı (şekil 4.25).

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının tamamı -100 ^oC de martensit fazında olup, bor oranının artışıyla doyum manyetizasyonu değerlerinde artışlar gözlenmiştir (şekil 4.24.a). Oda sıcaklığında alınan ölçümlerde $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$ alaşımları martensit fazda, $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımları ise austenit fazdadır. $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımlarının curie sıcaklığı oda sıcaklığının üzerinde olduğundan doyum manyetizasyonu görülmekte, bor oranı düşük olan alaşımlar da ise curie sıcaklığı oda sıcaklığından düşük olduğundan doyum manyetizasyonu gözlenmemektedir. 250 ^oC de tüm numuneler austenit fazında olup, paramanyetik durumdadırlar.

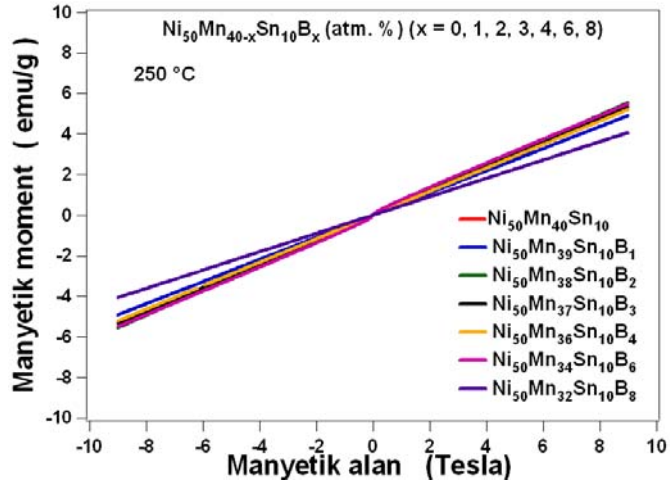
Şeki,l 4.25.a da verilen $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$, $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{10}B_2$, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{36}Sn_{10}B_4$ alaşımlarına ait sıcaklık-manyetik moment eğrilerinde martensit ve austenit dönüşüm sıcaklıkları DSC eğrileri ile uyum içerisinde oldukları görüldü. Şekil 4.25.b de verilen $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ ve $Ni_{50}Mn_{32}Sn_{10}B_8$ alaşımlarına ait sıcaklık-manyetik moment eğrilerinde ise sistem yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa geçerken minumum oda sıcaklığı civarına sıcaklığı düşürebildiği için ölçümler tamamlanamamıştır.



- a -

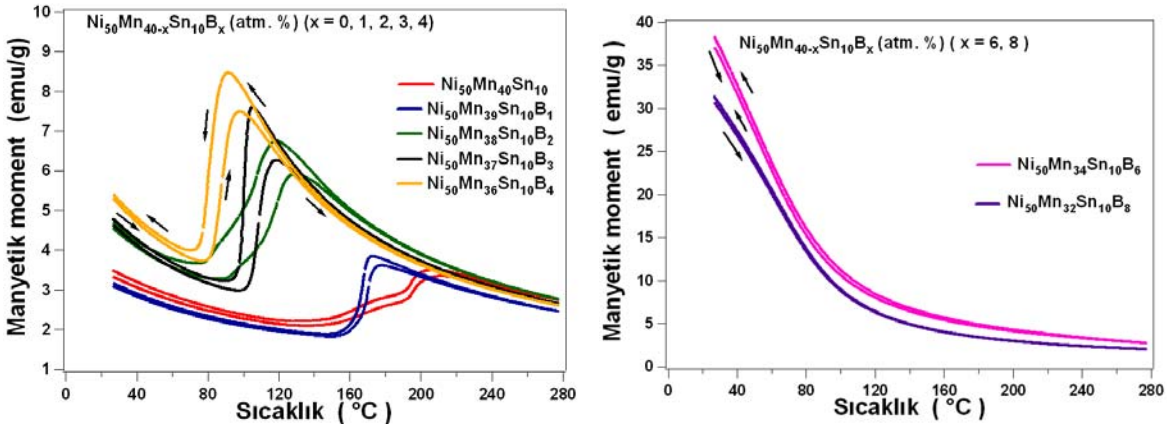


- b -



- c -

Şekil 4.24. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarının a) 100 ^oC, b) 30 ^oC ve c) 250 ^oC de alınan M-H ölçümleri

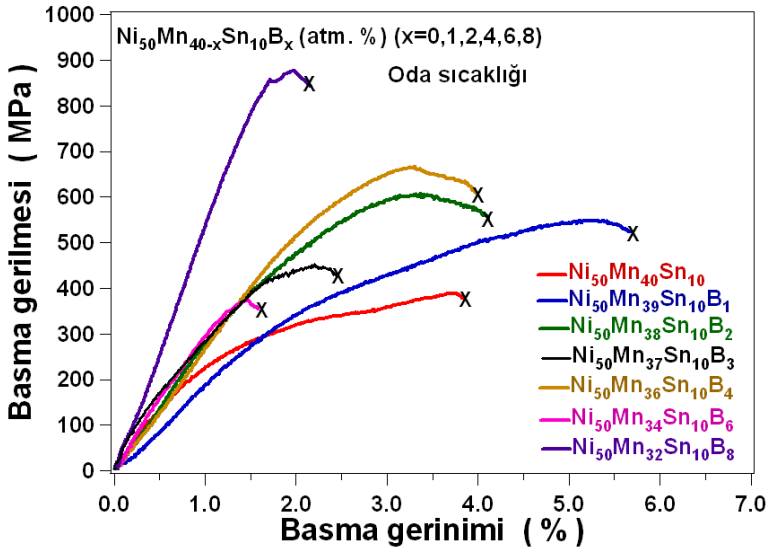


Şekil 4.25. a) $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4) ve b) $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 6, 8) alaşımlarının 5 Tesla sabit manyetik alan altında 40 -280 ^oC aralığında M-T ölçümleri

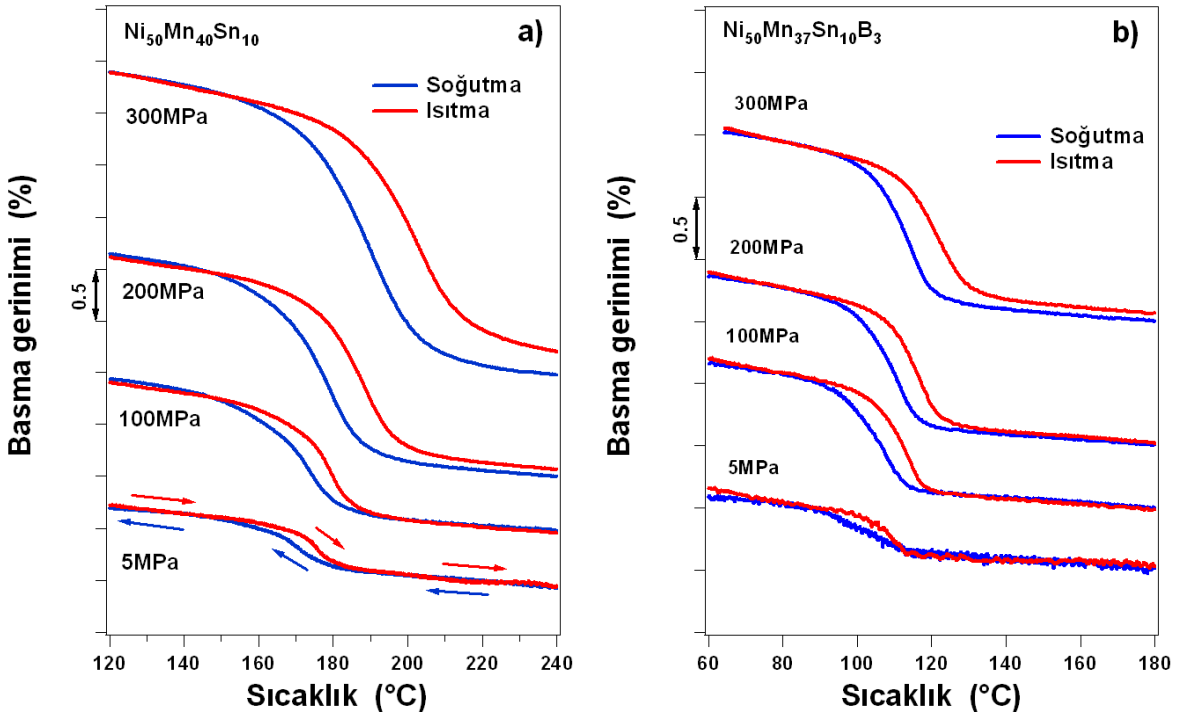
4.3.6. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x=0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

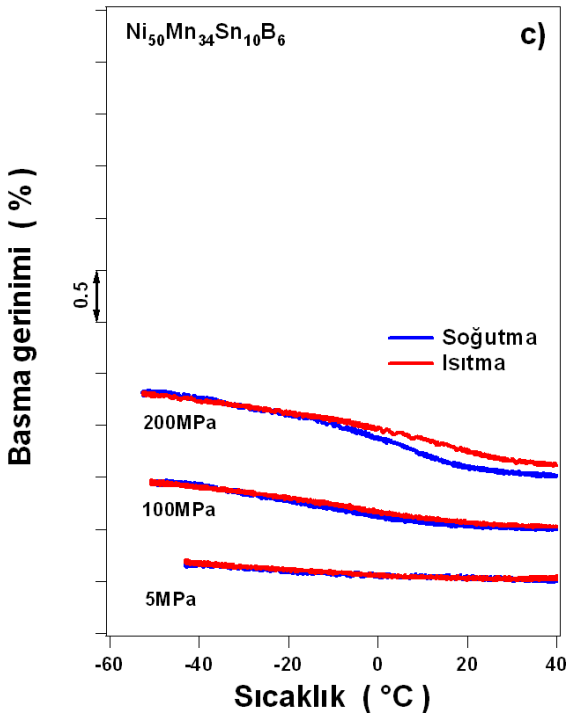
4x4x8 mm^3 ebatlarında kesilmiş olan $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x= 0,1,2,4,6,8) alaşımlarının mukavemet ve süneklik davranışlarını belirlemek için oda sıcaklığında kırılana kadar basma gerilmesi uygulanarak basma gerilme-gerinim eğrileri elde edildi (şekil 4.26). %1 bor katkısı hem sünekliği hemde mukavemeti artırmıştır. Ancak bor oranı arttıkça mukavemeti (basma gerilmesi) artmasına rağmen sünekliği azalmaktadır. Bor katkısı ile bu alaşımların kırılganlığının arttığı görülmüştür.

$Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$, alaşımlarının uygulanan 5, 100, 200, ve 300 MPa sabit basma gerilimleri altında basma gerinimi-sıcaklık ölçümleri yapıldı ve bulunan eğriler şekil 4.27.a-c de verildi. Numuneler sabit basma gerilimleri altında austenit bitiş sıcaklıklarının üzerine kadar ısıtıldı. Alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının uygulanan gerilme ile arttığı gözlendi. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımında martensit başlama sıcaklığı 5 MPa sabit basınç altında 177.4 ^oC olarak ve 300 MPa sabit basınç altında ise 203.8 ^oC olarak bulundu. $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$, alaşımlarının 5 MPa sabit basınç altında Ms dönüşüm sıcaklıkları sırasıyla 177.4 ^oC, 114.0 ^oC ve -8 ^oC olarak bulundu. Artan bor oranı ile dönüşüm sıcaklıklarında azalmalar gözlenmiştir. Bu sonuçlar DSC ölçüm sonuçları ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.26. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 4, 6, 8) alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi





Şekil 4.27. a) $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, b) $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{10}B_3$ ve c) $Ni_{50}Mn_{34}Sn_{10}B_6$ alaşımlarının uygulanan sabit basma gerilimleri altında basma gerinimi-sıcaklık eğrileri

4.4. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımları

4.4.1. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları

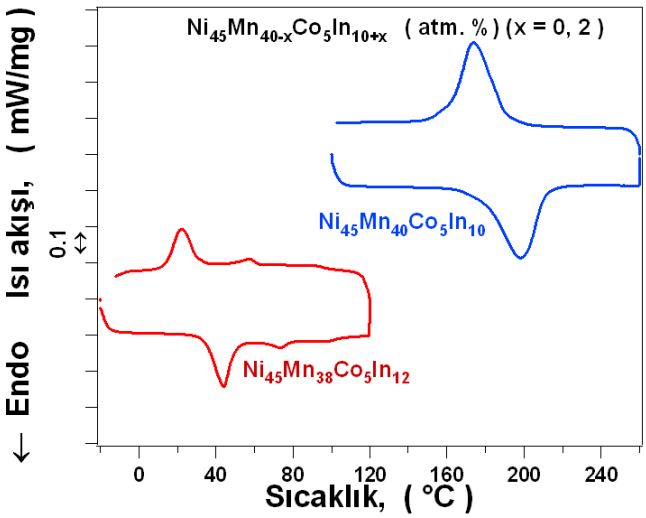
Bor katkılamak amacıyla dönüşüm sergileyen NiMnCoIn alaşımının dökümünü yapmak için, atomikçe %45 Ni ve %5 Co oranları sabit olan ve Mn ile In oranları (Tablo 4.9) değiştirilen $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımları ark ergitme fırınında ingot halinde elde edildi. Elde edilen alaşımlara %99.999 saflıktaki argon atmosferinde 900 ^oC de 20 saat homojenleştirme işlemi uygulandı ve tuzlu buzlu suda ani soğutmaya tabi tutuldular. DSC, SEM, XRD, manyetik ve mekanik ölçümler için uygun büyüklükte numuneler kesme esnasında ısınmadan etkilenmemesi için kesme sıvısı kullanılarak mikro metal kesme cihazı ile kesildi.

Tablo 4.9. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde				Ağırlıkça yüzde				e/a
	Ni	**Mn**	**Co**	**In**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**In**	
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$	45	40	5	10	42,05	34,98	4,69	18,28	**8,05**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$	45	38	5	12	41,26	32,61	4,60	21,52	**7,97**
$Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$	45	36	5	14	40,50	30,33	4,52	24,65	**7,89**

4.4.2. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının 5, 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika ısıtma hızlarında DSC ölçümleri yapıldı(şekil 4.28). $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımının dönüşüm sıcaklığı ölçüm aralığı dışında kalmıştır. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının 10 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC ölçüm sonuçları tablo 4.10 da verilmiştir. Ayrıca $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının 5, 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafiklerinden (şekil 4.29) bulunan sonuçlar (tablo 4.11) değerlendirilerek, austenit dönüşüm aktivasyon enerji değeri Kissinger metodu kullanılarak hesaplanmıştır (şekil 4.30).



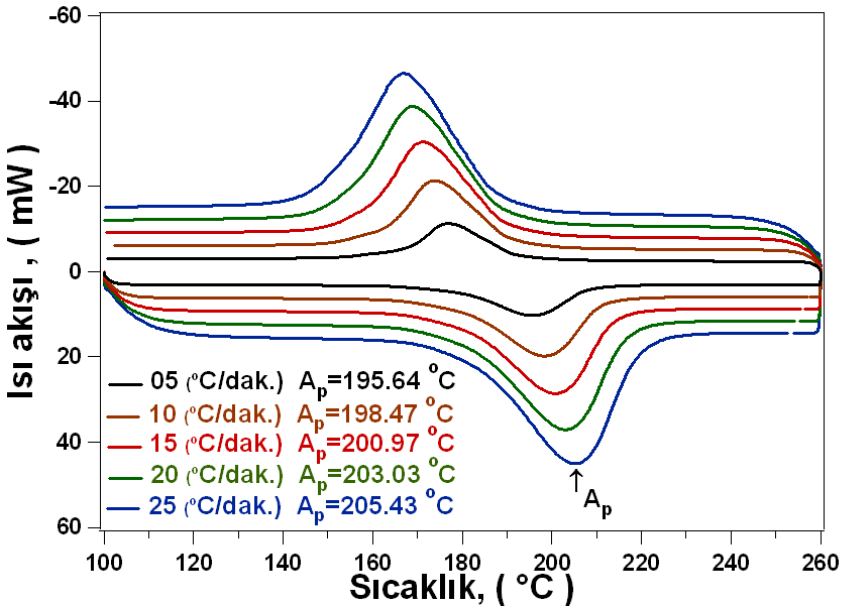
Şekil 4.28. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2) alaşımlarının 10 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri

Tablo 4.10. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının 10 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

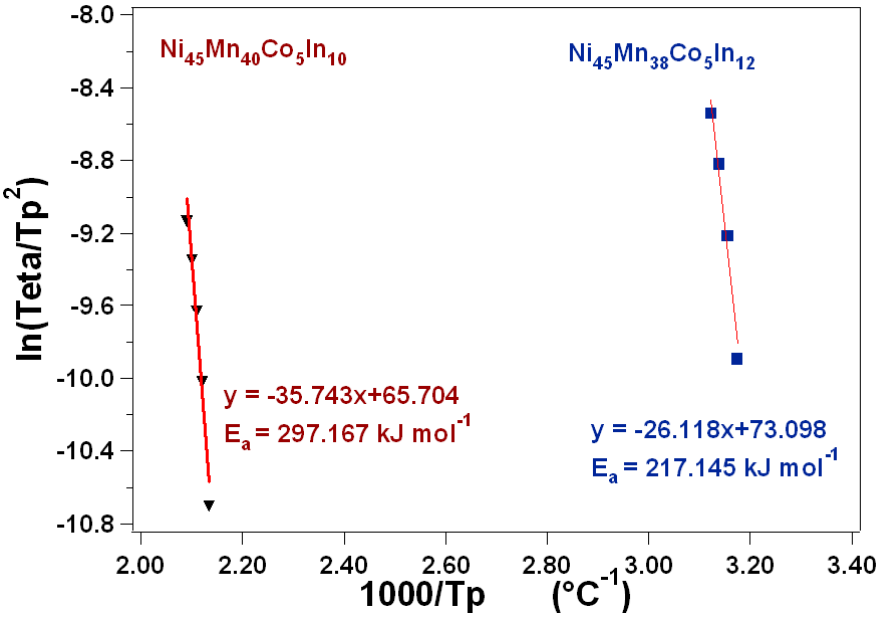
Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$	178.07	198,47	211,10	191,31	173,88	161,28	26,98
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$	34,64	43,90	49,96	30,87	22,25	14,14	51,39
$Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$	-40 °C – 400 °C aralığında dönüşüm gözlenmedi.						

Tablo 4.11. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının 5, 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC sonuçları

Ni40Mn5Co10In	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C
5 °C/dakika	177,74	195,64	208,59	191,55	179,95	166,25
10 °C/dakika	178,07	198,47	211,10	191,31	173,88	161,28
15 °C/dakika	178,80	200,97	213,84	190,22	171,30	157,02
20 °C/dakika	179,55	203,03	216,70	189,35	169,00	152,81
25 °C/dakika	180,75	205,43	209,48	188,27	167,10	149,39



Şekil 4.29. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının 5,10,15,20 ve 25 °C/dakika hızlarında alınan DSC grafikleri

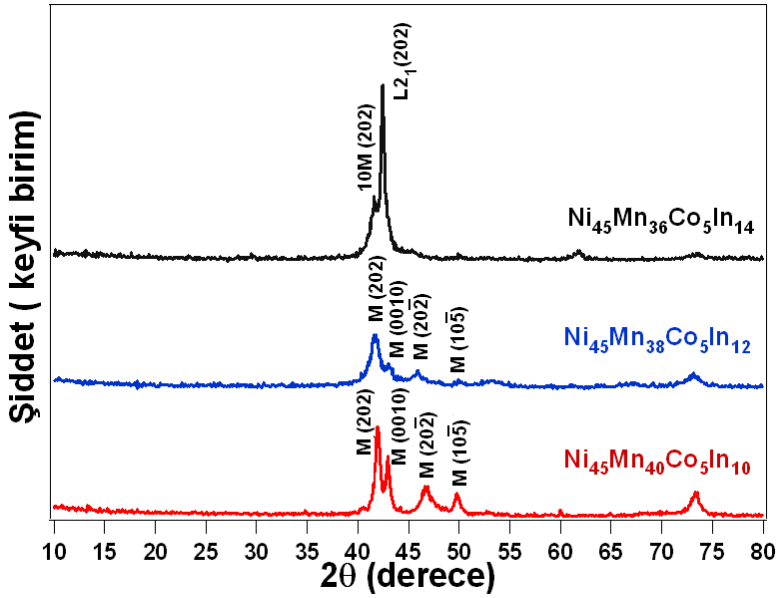


Şekil 4.30. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımlarının Kissinger eğrileri

4.4.3. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının X-ışını analizleri CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 20-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.31). $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımlarının martensit fazında oldukları bulunmuştur. İndiyum oranı %14 olduğunda $L2_1$ fazında austenit

fazında olduğu görülmüştür (Huang, Y. J vd, 2013; Huang, Y.J., vd., 2015). DSC analizlerinde de görüldüğü gibi İndiyum oranı arttıkça dönüşüm sıcaklıklarında büyük düşüş gözlenmiş ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımı oda sıcaklığı civarında martensit fazında bulunmasına rağmen, $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımının dönüşüm sıcaklıkları oda sıcaklığından çok düşük olduğu için DSC ölçümü alınamamış, bu durumda $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımının oda sıcaklığında austenit fazında olduğu söylenebilir.



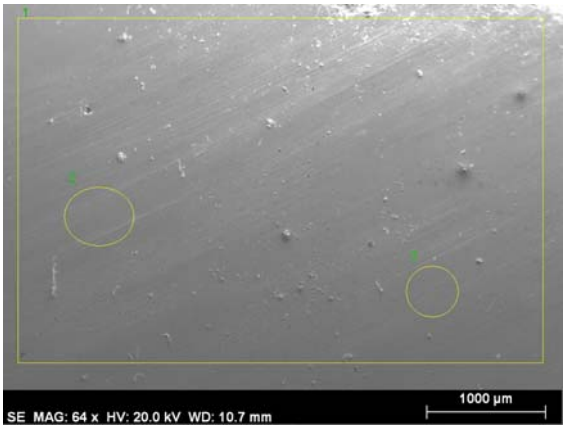
Şekil 4.31. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

4.4.4. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

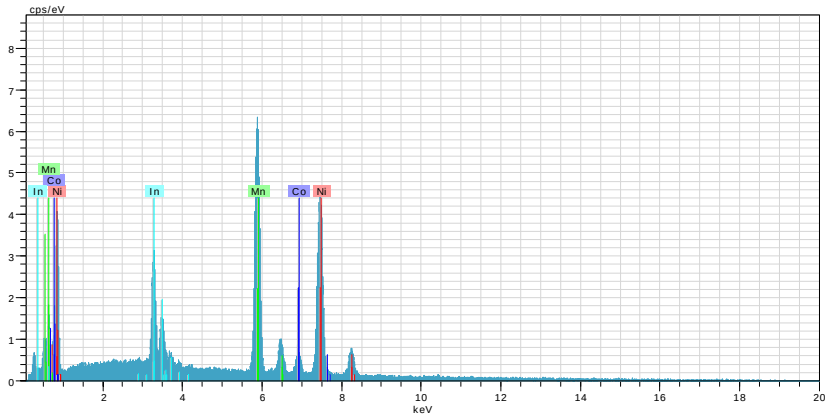
$Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımları 20 ml HCl, 5 g $FeCl_3$-H_2O and 96 ml methanol dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplandı ve bulunan değerler tablo 4.12 de verildi. Şekil 4.32 de örnek olarak $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$, $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ ve $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.33 de verilmiştir.

Tablo 4.12. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%				EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%			
	Ni	**Mn**	**Co**	**In**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**In**
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$	45	40	5	10	48.22	38.46	5.17	7.94
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$	45	38	5	12	46.37	35.49	5.38	12.75
$Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$	45	36	5	14	46.11	34.28	5.27	14.32



$Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$



1 HV:20.0kV Puls th.:6.30kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	33.61	34.96	39.18	0.9
Co	27	K-series	4.86	5.05	5.28	0.2
Ni	28	K-series	43.85	45.60	47.83	1.2
In	49	L-series	13.83	14.39	7.72	0.5
		Total:	96.15	100.00	100.00	

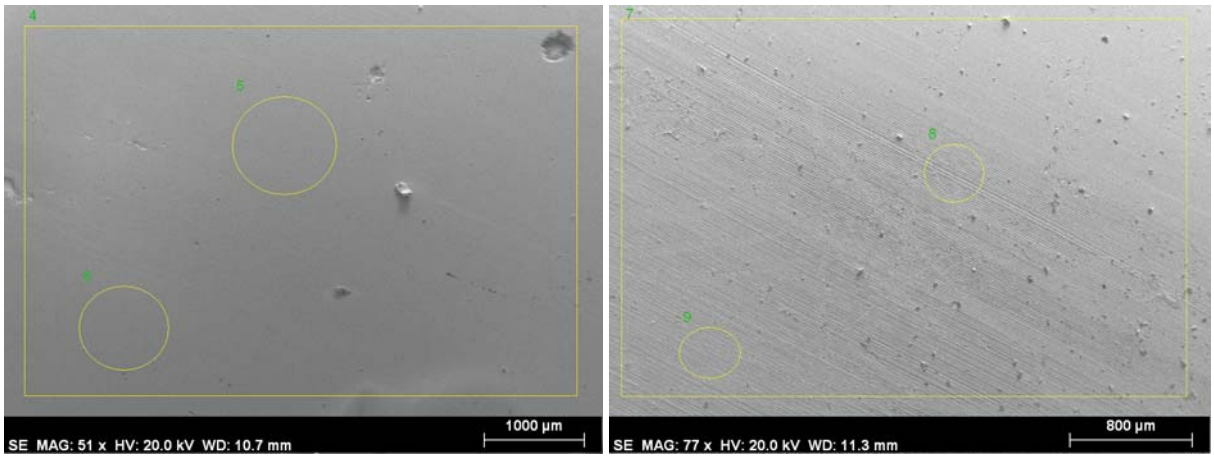
2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	31.25	34.25	38.32	0.9
Co	27	K-series	4.44	4.87	5.08	0.2
Ni	28	K-series	42.80	46.91	49.13	1.2
In	49	L-series	12.74	13.97	7.48	0.4
		Total:	91.23	100.00	100.00	

3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	32.00	33.59	37.99	0.9
Co	27	K-series	4.66	4.89	5.16	0.2
Ni	28	K-series	43.39	45.55	48.21	1.2
In	49	L-series	15.21	15.96	8.64	0.5
		Total:	95.27	100.00	100.00	

Şekil 4.32. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları



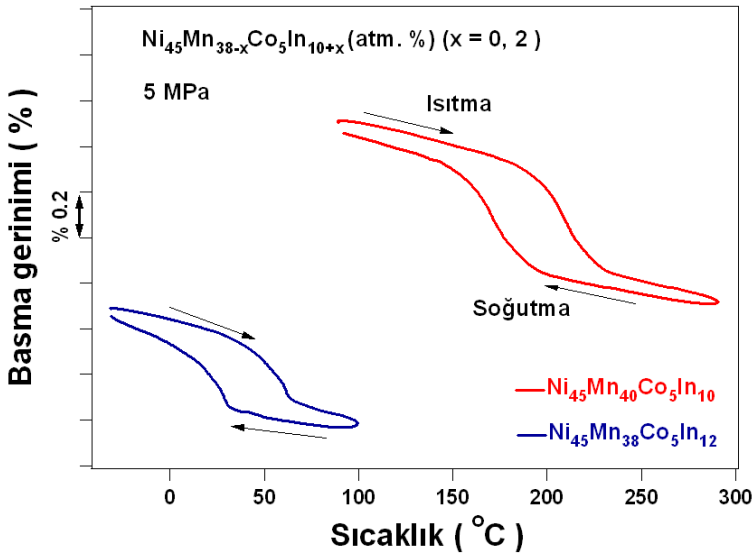
- a - **- b -**

Şekil 4.33. a) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ ve b) $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

4.4.5. $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

4x4x8 mm^3 ebatlarında kesilmiş olan $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımlarına 5 MPa sabit basınç altında basma gerinimi-sıcaklık ölçümleri yapıldı ve bulunan eğriler şekil 4.34 de verildi. $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımında ölçüm alınamadı. Numuneler sabit basma gerilimleri altında austenit bitiş sıcaklıklarının üzerine kadar ısıtıldı.

Bu sonuçlar DSC ölçüm sonuçları ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.34. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımlarının 5 MPa sabit basınç altında alınan basma gerinimi sıcaklık eğrileri

4.5. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımları

4.5.1. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımlarının Alaşım Oranları

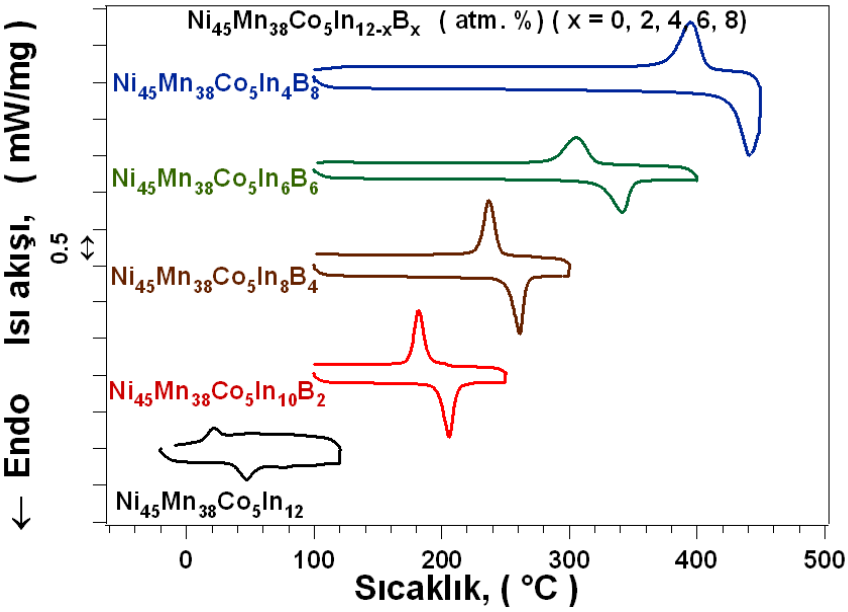
Laboratuvarlarımızda bulunan sistemlerin ölçüm sıcaklıkları aralığına uygun dönüşüm sergileyen $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımı referans seçilerek, Ni, Mn ve Co oranı sabit tutulup, In oranı azaltılıp Bor katkılanan $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımları (Tablo 4.13) ingot halinde elde edildiler. Elde edilen alaşımlara %99.999 saflıktaki argon atmosferinde 900 ^oC de 20 saat homojenleştirme işlemine tabi tutulduktan sonra tuzlu buzlu suda ani soğutma işlemi uygulandı.

Tablo 4.13. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde					Ağırlıkça yüzde					e/a
	Ni	**Mn**	**Co**	**In**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**In**	**B**	
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$	45	38	5	12	-	41,26	32,61	4,60	21,52	-	**7,97**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{10}B_2$	45	38	5	10	2	42,65	33,71	4,76	18,54	0,35	**7,93**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_8B_4$	45	38	5	8	4	44,13	34,88	4,92	15,35	0,72	**7,89**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_6B_6$	45	38	5	6	6	45,72	36,13	5,10	11,92	1,12	**7,85**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_4B_8$	45	38	5	4	8	47,42	37,48	5,29	8,25	1,55	**7,81**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_2B_{10}$	45	38	5	2	10	49,27	38,94	5,50	4,28	2,02	**7,77**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5B_{12}$	45	38	5	0	12	51,25	40,51	5,72	0	2,52	**7,73**

4.5.2. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x= 0, 2, 4, 6, 8) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 20 ^oC/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 20 ^oC/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri şekil 4.35 de verildi. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_2B_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{38}Co_5B_{12}$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıkları DSC cihazının ölçüm aralığı dışında (-40 ^oC – 400 ^oC) kaldığından, bu alaşımların dönüşüm sıcaklıkları TG/DTA cihazı kullanılarak alındı. Bor oranı artırılıp indiyum oranı azaldıkça alaşımların dönüşüm sıcaklıklarında artışlar meydana gelmiştir (tablo 4.14).



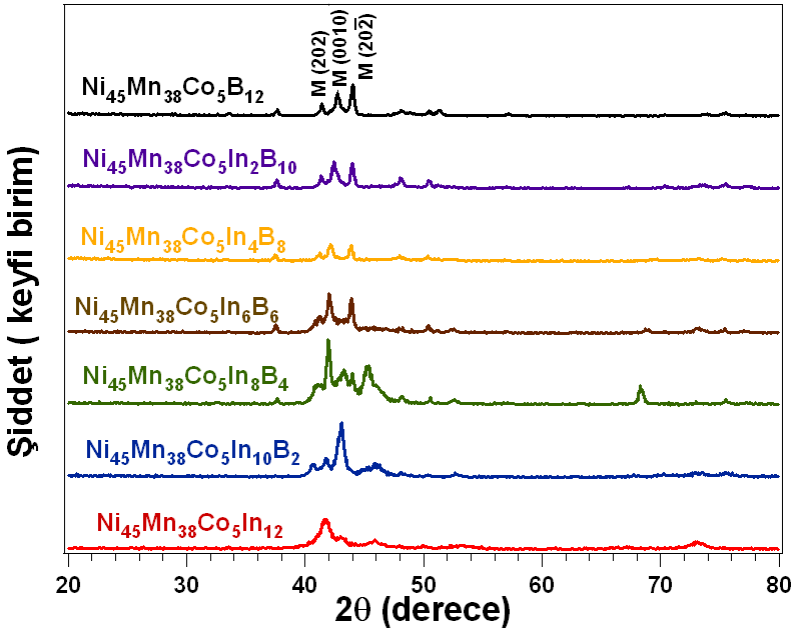
Şekil 4.35. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{10-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8) alaşımlarının 20 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC grafikleri

Tablo 4.14. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarının 20 °C/dakika ısıtma hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	**A_s °C**		**A_p °C**		**A_f °C**		**M_s °C**	**M_p °C**	**M_f °C**	**$\Delta H_{ort.}$ (J/g)**
	DSC	DT	DSC	DT	DSC	DT	DSC	DSC	DSC	
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$	36,9		47,2	-	56,6	-	29,5	21,1	13,7	6,63
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{10}B_2$	196,2	176	205,4	203	211,5	226	189,5	181,6	174,8	24,2
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_8B_4$	251,2	226	261,6	250	266,5	292	246,0	237,5	229,3	25,4
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_6B_6$	324,8	300	341,7	320	349,9	361	320,4	305,4	287,3	24,2
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_4B_8$	424,6	397	-	420	-	432	407,2	394,9	373,	-
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_2B_{10}$	-	542	-	559	-	572	-	-		
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5B_{12}$	-	709	-	721	-	743	-	-		

4.5.3. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımlarının XRD Analizleri

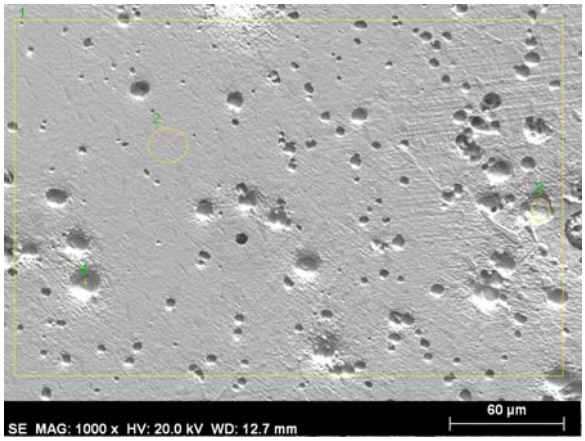
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarının X-ışını analizleri CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 20-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.36). DSC analizlerinden de görüldüğü gibi $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımıın oda sıcaklığında austenit fazında olduğu söylenebilir. Diğer alaşımlar ise oda sıcaklığında martensit fazındadır. Bu nedenle XRD analizleri de martensit fazına göre indislenmiştir (Huang, Y. J vd, 2013; Huang, Y.J., vd., 2015).



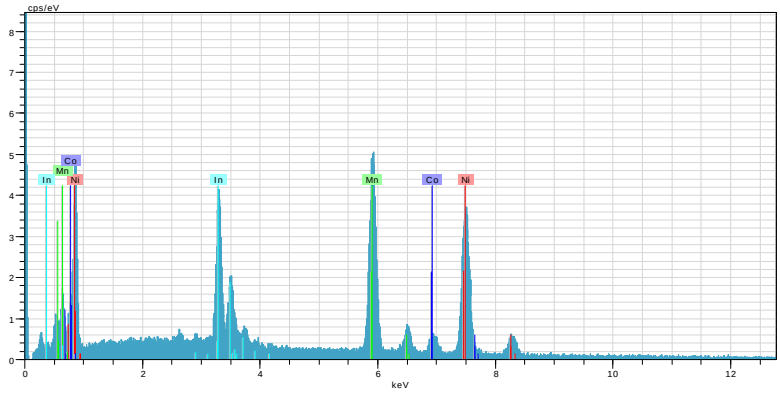
Şekil 4.36. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

4.5.4. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımları 20 ml HCl, 5 g $FeCl_3$-H_2O and 96 ml methanol dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmış ve şekil 4.37 da örnek olarak $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5In_{10}$, $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ ve $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.38 de verilmiştir. Bu bölgelerden alınan EDX analizlerinde cihazın ölçüm aralığı dışında olduğu için bor elementi tespit edilemediğinden bulunan ortalama atomik yüzdeler tablo 4.15 de verildi. İndiyum oranındaki azalma tablo 4.15 de belirgin şekilde görülmektedir.



$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$



1 HV:20.0kV Puls th.:6.31kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	27.76	31.45	36.53	0.8
Co	27	K-series	5.81	6.58	7.12	0.2
Ni	28	K-series	36.39	41.24	44.83	1.0
In	49	L-series	18.30	20.73	11.52	0.6
Total:			88.26	100.00	100.00	

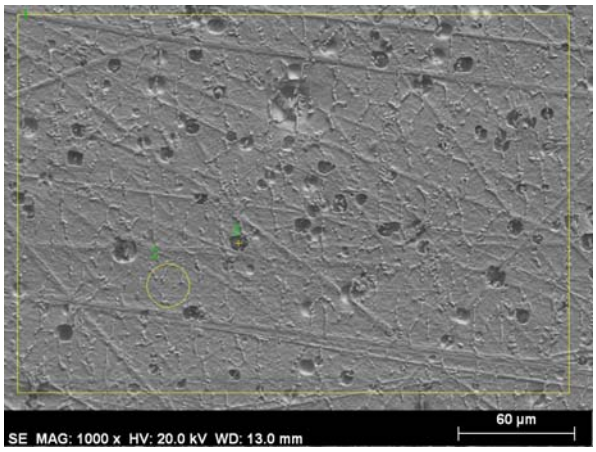
2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	26.69	29.98	35.43	0.8
Co	27	K-series	5.07	5.69	6.27	0.2
Ni	28	K-series	36.07	40.51	44.82	1.0
In	49	L-series	21.21	23.82	13.47	0.7
Total:			89.04	100.00	100.00	

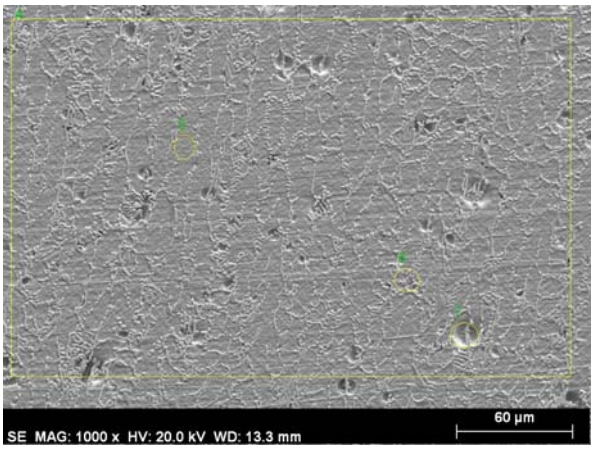
3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	27.35	31.18	36.56	0.8
Co	27	K-series	5.83	6.64	7.26	0.2
Ni	28	K-series	34.79	39.66	43.54	1.0
In	49	L-series	19.76	22.52	12.64	0.6
Total:			87.72	100.00	100.00	

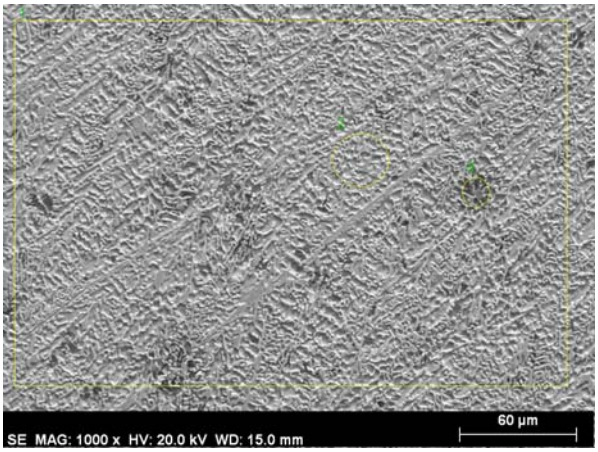
Şekil 4.37.$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları



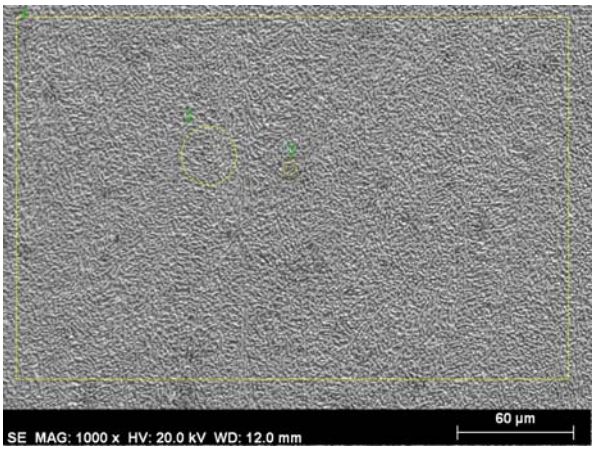
- a -



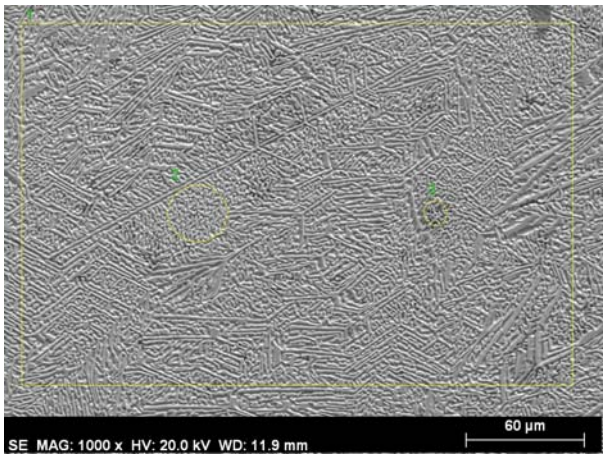
- b -



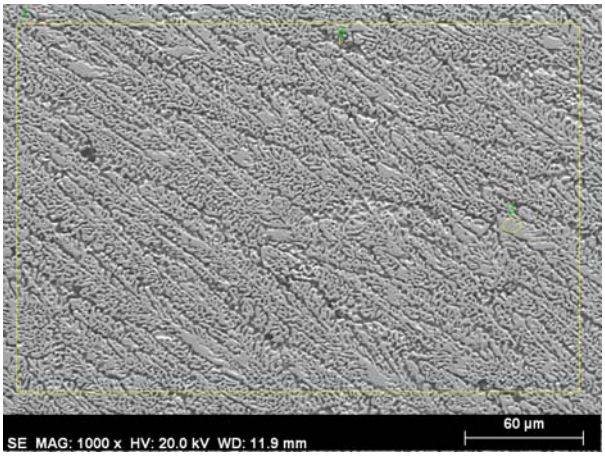
- c -



- d -



- e -



- f -

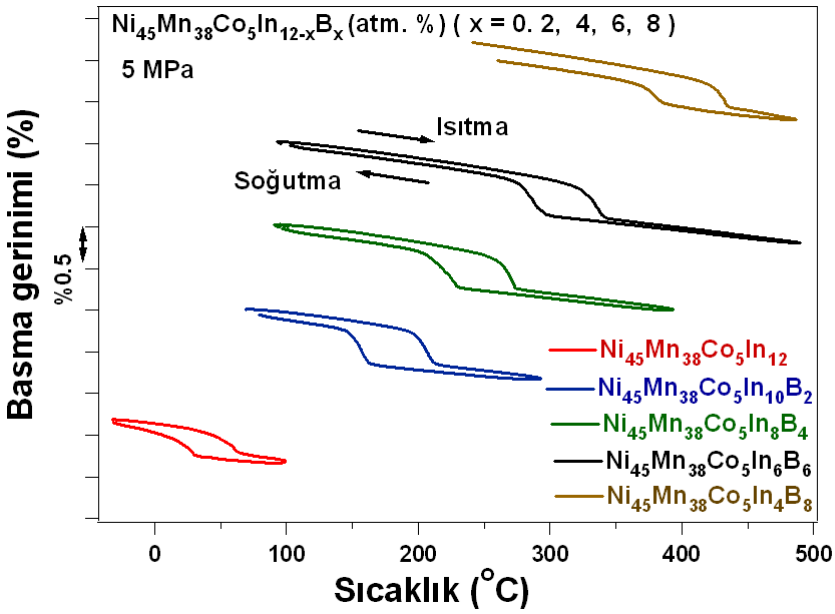
Şekil 4.38. a) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{10}B_2$, b) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_8B_4$, c) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_6B_6$, d) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_4B_8$, e) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_2B_{10}$ ve f) $Ni_{45}Mn_{38}Co_5B_{12}$ ve alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

Tablo 4.15. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%					EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%				
	Ni	**Mn**	**Co**	**In**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**In**	**B**
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12}$	45	38	5	12	-	44,39	36,17	6,88	12,54	-
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{10}B_2$	45	38	5	10	2	44,03	37,97	7,81	10,21	-
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_8B_4$	45	38	5	8	4	45,29	38,28	10,02	7,08	-
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_6B_6$	45	38	5	6	6	46,15	38,13	12,24	3,46	-
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_4B_8$	45	38	5	4	8	48,44	36,99	12,31	2,25	-
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_2B_{10}$	45	38	5	2	10	49,30	38,31	10,87	1,47	-
$Ni_{45}Mn_{38}Co_5B_{12}$	45	38	5	0	12	51,99	36,76	11,25	-	-

4.5.5. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

4x4x8 mm^3 ebatlarında kesilmiş olan $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8) alaşımlarına 5 MPa sabit basma gerilimi altında basma gerinimi-sıcaklık ölçümleri yapıldı ve bulunan eğriler şekil 4.39 da verildi. Numuneler sabit basma gerilimleri altında austenit bitiş sıcaklıklarının üzerine kadar ısıtıldı. Alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının bor oranının artışı ile arttığı gözlendi. Bu sonuçlar DSC ölçüm sonuçları ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.39. $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}$ B_x (x = 0, 2, 4, 6, 8) alaşımlarının 5 MPa sabit basınç altında alınan basma gerinimi sıcaklık eğrileri

4.6. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları

4.6.1. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları

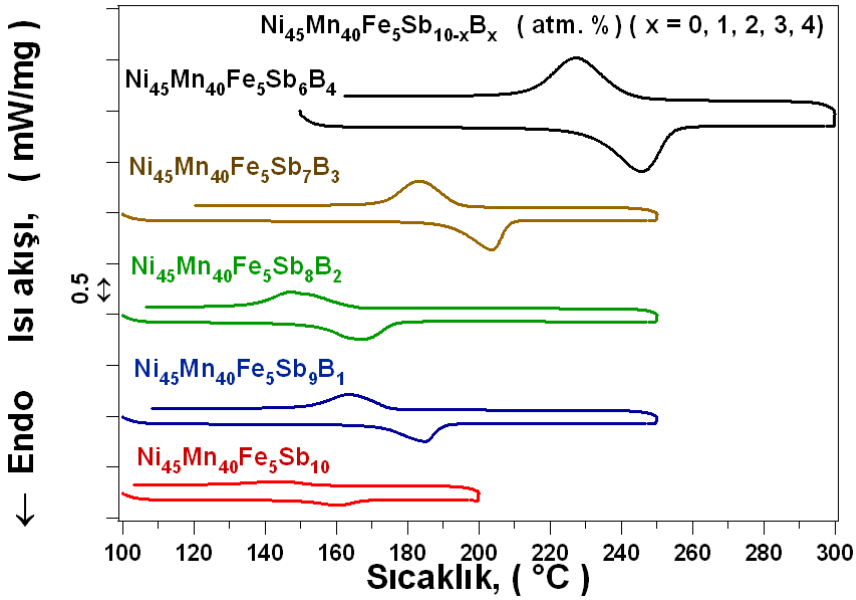
Atomikçe %45 Ni, %40 Mn ve %5 Fe oranları (tablo 4.16) sabit olan ve Sb ile B oranları değiştirilen $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları ark ergitme metodu ile ingot halinde elde edildiler. Elde edilen alaşımlara %99.999 saflıktaki argon atmosferinde 900 ^oC de 20 saat homojenleştirme işlemi uygulandı ve tuzlu buzlu suda ani soğutmaya tabi tutuldular.

Tablo 4.16. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde					Ağırlıkça yüzde					**e/a**
	Ni	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**	
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	45	40	5	10	-	41,69	34,69	4,41	19,22	-	**8,20**
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$	45	40	5	9	1	42,43	35,30	4,49	17,60	0,17	**8,16**
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$	45	40	5	8	2	43,20	35,94	4,57	15,93	0,35	**8,12**
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$	45	40	5	7	3	44,00	36,61	4,65	14,20	0,54	**8,08**
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$	45	40	5	6	4	44,83	37,30	4,74	12,40	0,73	**8,04**

4.6.2. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 10, 15, 20 ve 25 ^oC/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 10 ^oC/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri şekil 4.40 de verildi. Bor oranı artıp antimon oranı azaldıkça $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında artışlar gözlenmiştir (tablo 4.17). Ancak $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$ alaşımının dönüşüm sıcaklıkları bu uyum içerisinde bulunmamıştır. Bu uyumsuzluğun nedeni, ısıl işlem esnasında fırının sıcak bölgesi dışında kalması, ani soğutmanın yapılamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.40. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC grafikleri

Tablo 4.17 $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)	Ea kJ/mol
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	148,7	160,7	167,9	155,5	144,2	126,2	4,07	286,08
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$	171,7	185,0	189,7	175,3	163,7	151,8	13,01	315,45
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$	153,7	167,2	176,5	164,8	147,2	135,7	17,44	280,16
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$	191,2	203,7	208,4	194,4	183,3	173,2	20,76	285,91
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$	230,7	245,7	254,4	241,8	227,4	214,2	23,99	204,79

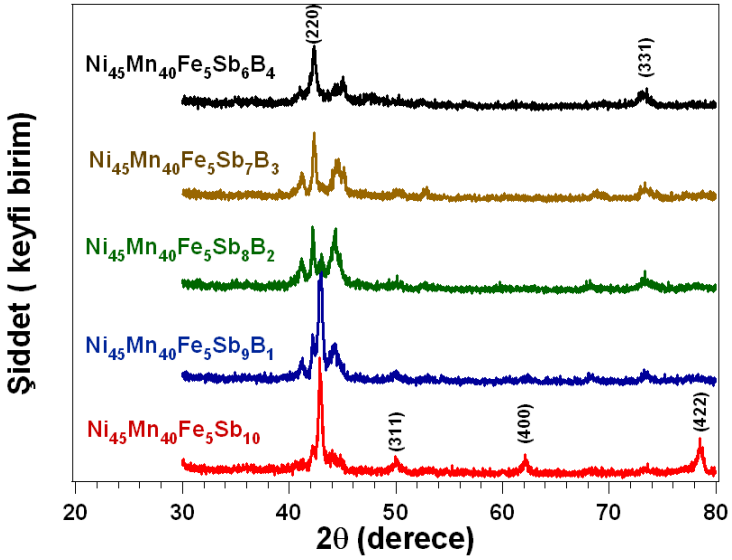
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımlarının 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC eğrilerinden bulunan dönüşüm sıcaklıklarında (tablo 4.18), Ap sıcaklığı kullanılarak aktivasyon enerjisi (Ea) Kissinger metodu ile 286, 08 kJ/mol olarak bulundu. Benzer işlemler yapılarak, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$ alaşımlarının aktivasyon enerjileri de sırasıyla 315.45, 280.16, 285.91 ve 204.79kJ/mol olarak bulundu.

Tablo 4.18. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımlarının 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC sonuçları

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
10 °C/dakika	148,78	160,71	167,96	155,48	144,23	126,17	4,07
15 °C/dakika	149,68	162,30	170,56	154,36	141,36	122,68	4,17
20 °C/dakika	150,88	164,13	173,30	152,82	138,82	119,20	3,98
25 °C/dakika	151,84	165,56	175,81	151,42	136,43	115,77	4,07

4.6.3. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}$ B_x (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 30-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.41). Oda sıcaklığında tüm alaşımlar martensit fazında olup indislemeler yapılan çalışmalar referans alınarak yapılmıştır (Kushwaha, vd., 2013).



Şekil 4.41. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}$ B_x (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

4.6.4. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

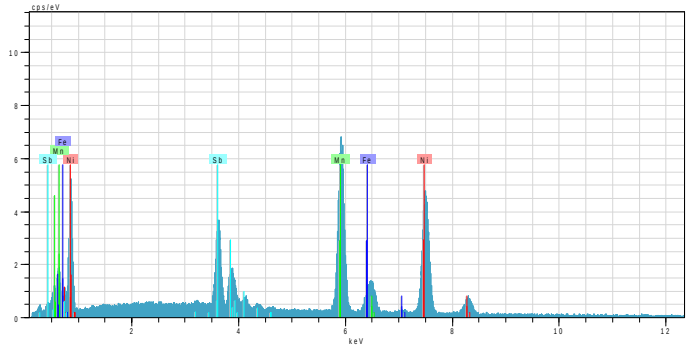
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının, 75 ml HCl, 75 ml ethanol, 15 g CuSO4 ve 10 ml saf su çözeltisi ile Polikristal $Ni_{45}Mn_{36,5}Co_5In_{13,5}$ alaşımı ise 20 ml HCl, 5 g $FeCl_3$-H_2O ve 96 ml methanol dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmıştır.

Şekil 4.42 de örnek olarak bor katkısı olmayan $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. Bulunan değerler belirlenen oranlar ile uyum

içerisindedir. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.43 de verilmiştir.



$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$



1 HV:20.0kV Puls th.:7.22kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	33.13	33.74	38.83	0.9
Fe	26	K-series	3.63	3.70	4.19	0.2
Ni	28	K-series	43.11	43.90	47.30	1.2
Sb	51	L-series	18.32	18.66	9.69	0.6
		Total:	98.18	100.00	100.00	

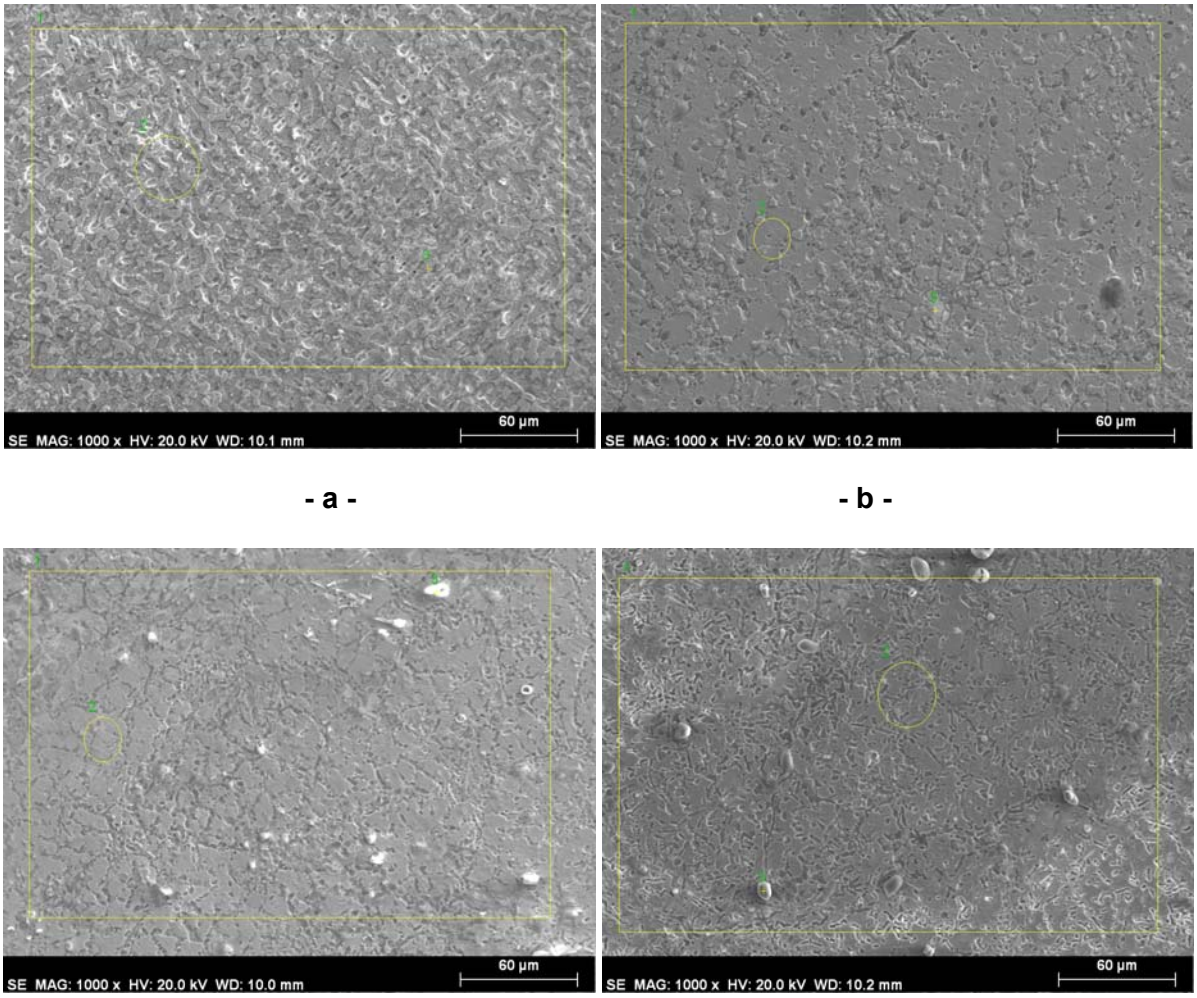
2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	33.95	40.52	46.50	1.0
Fe	26	K-series	2.32	2.77	3.13	0.1
Ni	28	K-series	31.64	37.77	40.57	0.9
Sb	51	L-series	15.86	18.93	9.80	0.5
		Total:	83.77	100.00	100.00	

3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	32.47	34.33	39.64	0.9
Fe	26	K-series	3.31	3.50	3.98	0.1
Ni	28	K-series	40.50	42.82	46.29	1.2
Sb	51	L-series	18.31	19.35	10.09	0.6
		Total:	94.58	100.00	100.00	

Şekil 4.42. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları



Şekil 4.43. a) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$, b) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$, c) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$ ve d) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

Tablo 4.19. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%					EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%				
	Ni	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	45	40	5	10	-	44,72	41,65	3,76	9,86	-
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$	45	40	5	9	1	45,43	39,86	5,30	9,49	-
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$	45	40	5	8	2	44,9	39,07	6,43	9,59	-
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$	45	40	5	7	3	46,03	38,90	5,92	9,14	-
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$	45	40	5	6	4	47,39	39,76	6,05	6,84	-

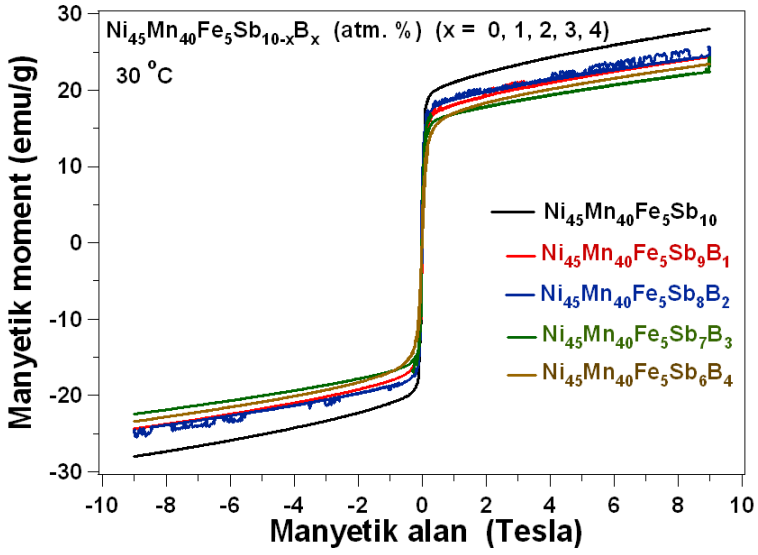
4.6.5. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

Atomikçe yüzde olarak verilen $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0,1,2,3,4) alaşımlarının manyetik alan altındaki davranışları "Quantum Design-9T PPMS" sisteminin VSM aparatı ile gerçekleştirildi. Ölçüm alınacak örneklerin kütleleri belirlenerek alaşımların elde edilen manyetik moment değerleri emu/g cinsinden grafiğe aktarıldı.

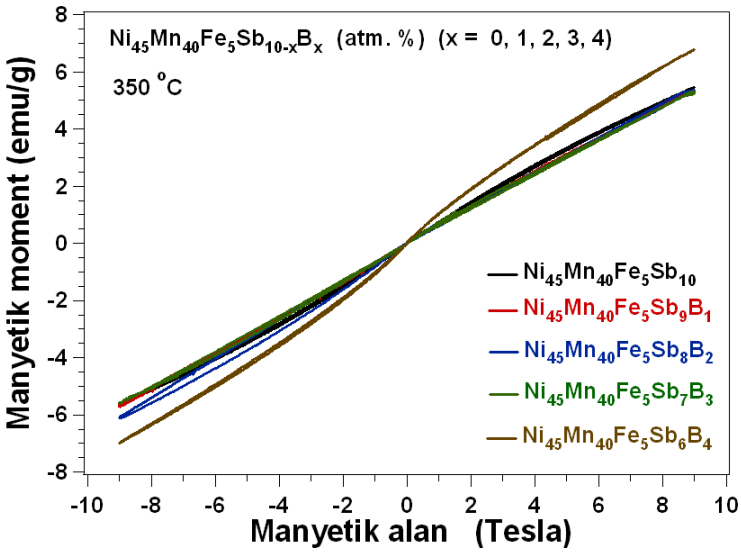
M-H ölçümleri – 9 Tesla ile +9 Tesla (-90 kOe ile +90 kOe) aralığında değişen manyetik alan altında martensit bölgesinde 30 ^oC de ve austenit bölgesinde ise 350 ^oC sabit sıcaklıklarında alındı (şekil 4.44). M-T ölçümleri ise 5 Tesla (50 kOe' lik) sabit manyetik alan altında 30 -350 ^oC aralığında alındı (şekil 4.45).

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları oda sıcaklığında martensit fazında olup ferromanyetik özellik sergilemektedirler. Doyum manyetizasyonu değeri $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımında en yüksek değeri almıştır. Bor katkısı ile doyum manyetizasyon değerlerinde azalmalar gözlenmiştir. DSC analizlerinde de görüldüğü gibi 280 ^oC nin üzerinde tüm alaşımlar austenit fazında olup, 350 ^oC de alınan ve şekil 4.44.b de verilen M-H grafiklerinden de görüldüğü gibi 350 ^oC de alaşımlarda doyum manyetizasyonu gözlenememekte ve alaşımlar paramanyetik özellik sergilemektedirler. Şekil 4.45 de verilen 1 Tesla ve 5 Tesla manyetik alan altında alınan M-T grafiklerinde dönüşüm sıcaklıkları DSC analiz ile elde edilen dönüşüm sıcaklıkları ile uyum içerisindedir. Alaşımlar martensit fazından austenit fazına geçerken manyetizasyon değerleri artmakta olup austenit fazında sıcaklığın artırılması ile manyetizasyon değerleri tekrar azalmakatadır.

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$,, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_7B_3$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_6B_4$ alaşımlarının Curie sıcaklıkları sırasıyla 79 ^oC, 90 ^oC, 60 ^oC, 80 ^oC ve 72^oC olarak bulundu.

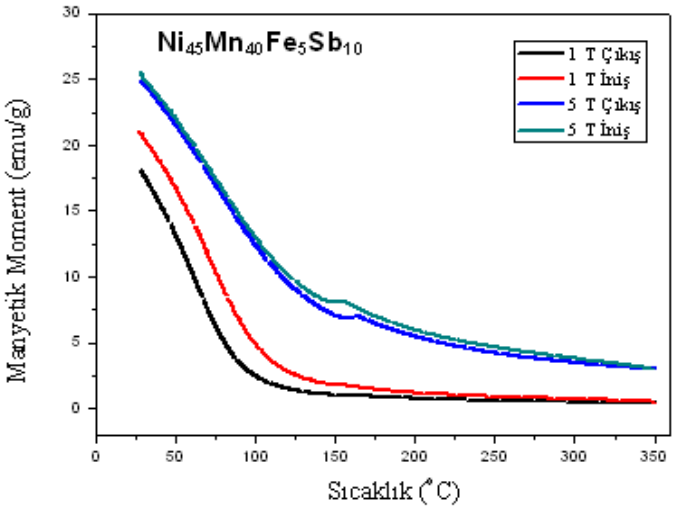


- a -

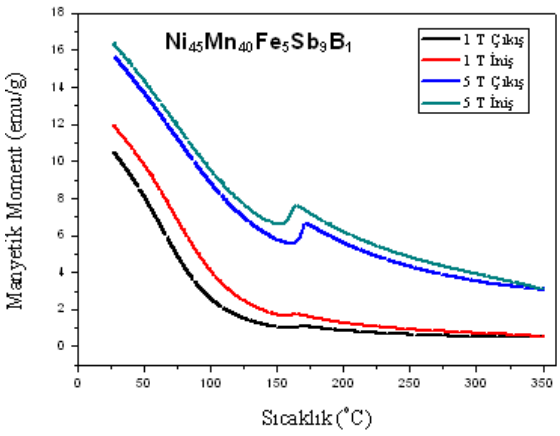


- b –

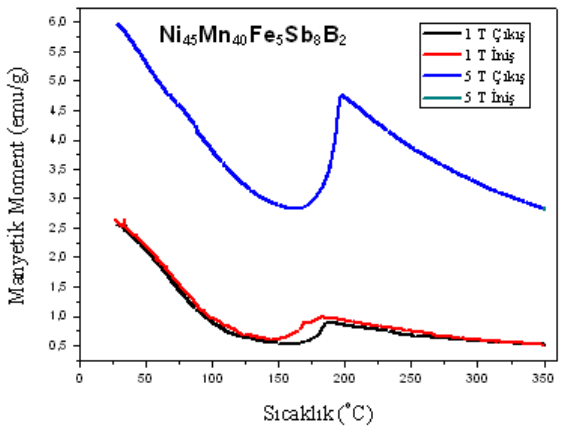
Şekil 4.44. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının a) 30 °C, b) 350 °C de alınan M-H ölçümleri



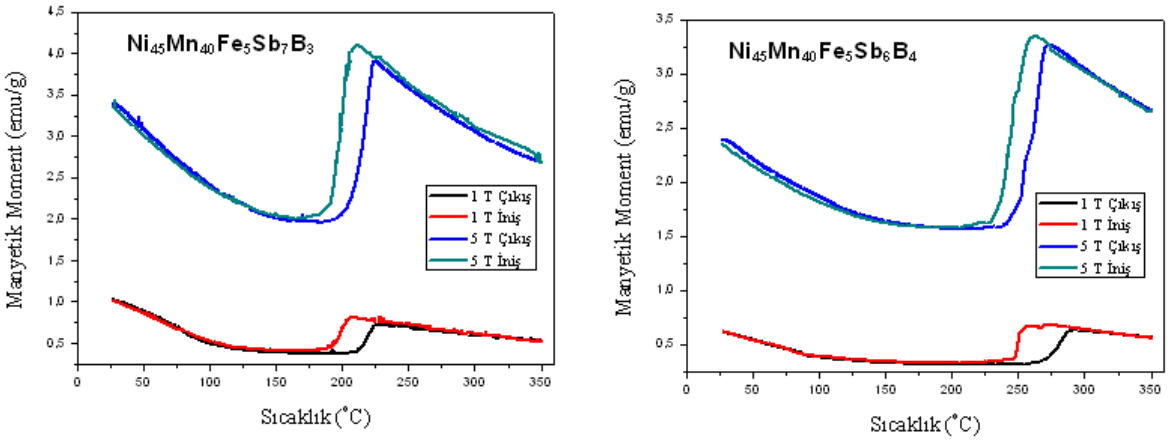
- a -



- b -



- c -



- d - **- e -**

Şekil 4.45. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 °C aralığında M-T ölçümleri.

4.7. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları

4.7.1. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları

Bölüm 4.6 da verilen çalışmada Ni, Mn ve Fe sabit tutulup Sb ve B oranları değiştirilmişti. Bu çalışmada ise Mn, Fe, Sb oranları sabit tutulup Ni ve B oranları değiştirilerek atomikçe %40 Mn, %5 Fe ve %10Sb oranları sabit olan ve Ni ile B oranları değiştirilen (tablo 4.20) $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları ark ergitme metodu ile ingot halinde elde edildi. Elde edilen ingot halindeki alaşımlara %99.999 saflıktaki argon atmosferinde 900 °C de 20 saat homojenleştirme işlemi uygulandı ve tuzlu buzlu suda ani soğutmaya tabi tutuldular.

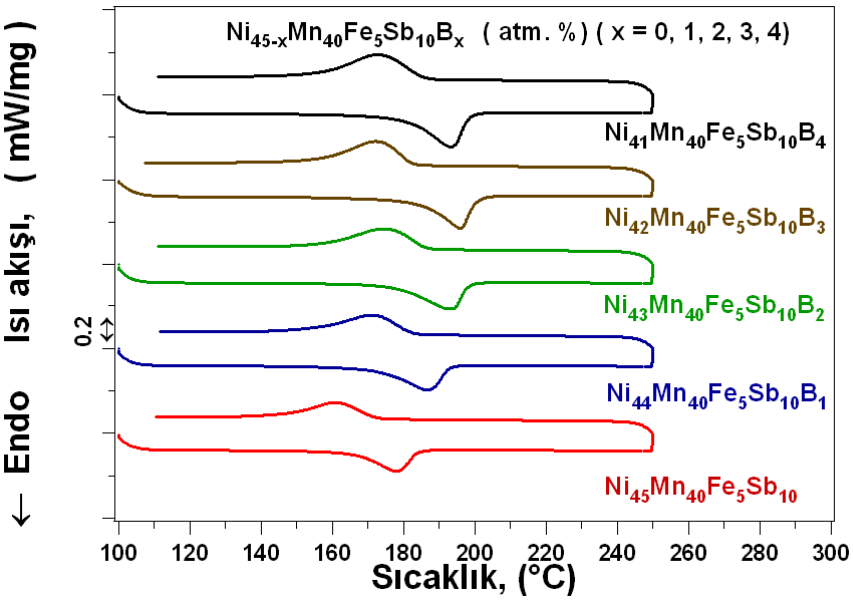
Tablo 4.20 Dökümü yapılan $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde					Ağırlıkça yüzde					e/a
	Ni	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**	
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	45	40	5	10	-	41,69	34,69	4,41	19,22	-	**8,20**
$Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$	44	40	5	10	1	41,07	34,95	4,44	19,36	0,17	**8,11**
$Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$	43	40	5	10	2	40,45	35,22	4,47	19,51	0,35	**8,02**
$Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$	42	40	5	10	3	39,81	35,49	4,51	19,66	0,52	**7,93**
$Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$	41	40	5	10	4	39,17	35,77	4,54	19,82	0,70	**7,84**

4.7.2. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 10,15, 20 ve 25 °C/dakika ısıtma

ve soğutma hızları kullanıldı. 10 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri Şekil 4.46 de verildi. Bor oranı artıp antimon oranı azaldıkça $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında artışlar gözlenmiştir (tablo 4.21). Ancak $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımının dönüşüm sıcaklıkları bu artışa uymamıştır.



Şekil 4.46. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC grafikleri

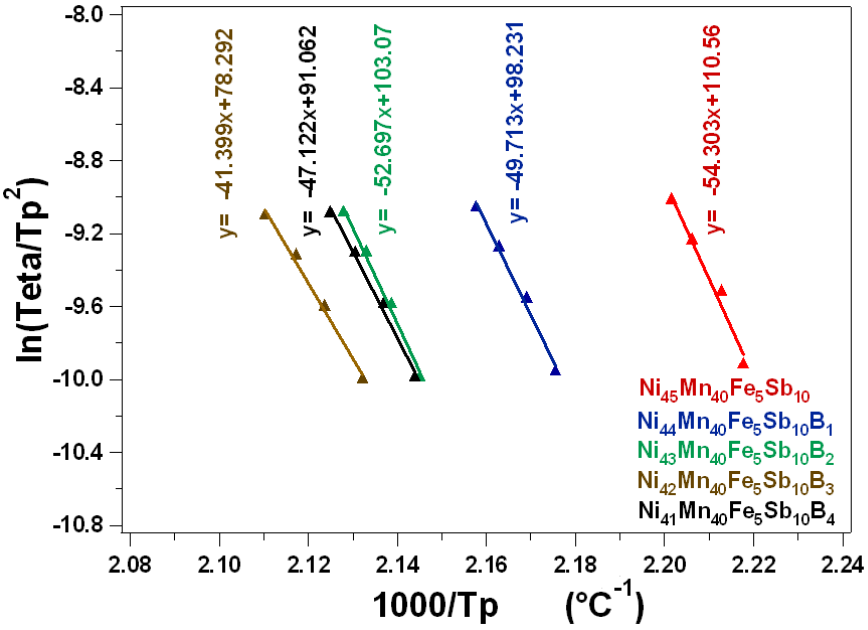
Tablo 4.21. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	166,1	177,9	184,0	172,3	160,9	145,5	7,25
$Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$	172,3	186,6	192,9	182,5	171,4	153,2	10,10
$Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$	177,0	193,2	199,0	186,4	174,5	156,3	10,78
$Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$	184,2	196,0	200,2	182,6	172,3	155,6	11,64
$Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$	180,2	193,5	198,4	185,6	172,9	156,0	12,91

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımının 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC eğrilerinden bulunan dönüşüm sıcaklıkları kullanılarak (tablo 4.22) aktivasyon enerjisi Kissinger metodu ile hesaplandı ve 451,47 kJ/mol olarak bulundu. $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$, $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$, $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının aktivasyon enerjileri de sırasıyla Şekil 4.47 de verilen Kissinger eğrileri kullanılarak 413.31, 438.12, 344.19 ve 391,77 kJ/mol olarak bulundu. Ni oranının azalması ve bor oranının artması ile martensit-austenit dönüşümde entalpi değerlerinde artışlar gözlenmiştir.

Tablo 4.22. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımlarının 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC sonuçları

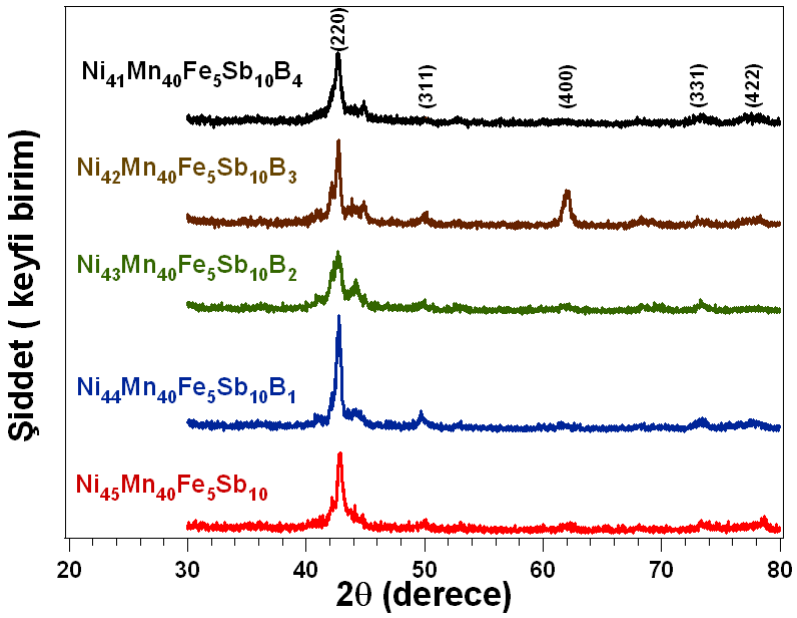
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	**A_s °C**	**A_p °C**	**A_f °C**	**M_s °C**	**M_p °C**	**M_f °C**	**$\Delta H_{ort.}$ (J/g)**
10 °C/dakika	166,1	177,9	184,0	172,3	160,9	145,5	7,25
15 °C/dakika	166,2	178,9	185,4	170,2	157,9	141,4	7,01
20 °C/dakika	166,9	180,3	187,4	168,7	155,6	137,4	7,24
25 °C/dakika	167,1	181,2	189,1	167,0	152,8	133,4	7,32



Şekil 4.47. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$, $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$, $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$, $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının Kissinger eğrileri

4.7.3. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ B_x (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 30-80° arasında 2 °/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.48). Oda sıcaklığında tüm alaşımlar martensit fazında olup indislemeler yapılan çalışmalar referans alınarak yapılmıştır (Kushwaha, vd., 2013).

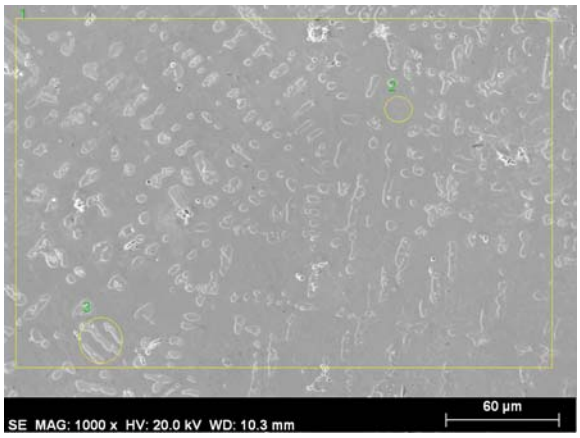


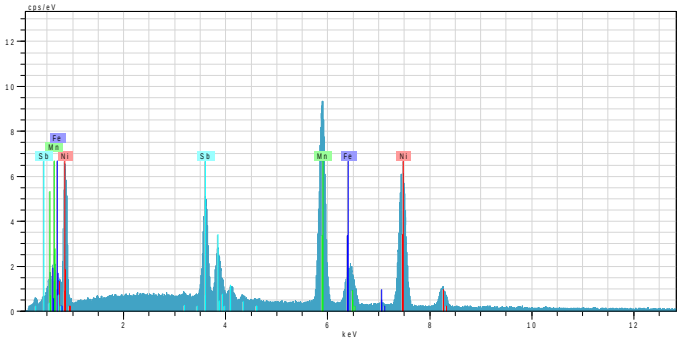
Şekil 4.48. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}\ B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

4.7.4. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının, 75 ml HCl, 75 ml ethanol, 15 g CuSO4 ve 10 ml saf su dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmış ve bulunan değerler tablo 4.23 de verilmiştir.

Şekil 4.49 da örnek olarak $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$, $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$, $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.50 de verilmiştir.





1 HV:20.0kV Puls th.:9.87kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	30.90	33.10	37.99	0.9
Fe	26	K-series	5.36	5.74	6.48	0.2
Ni	28	K-series	40.02	42.87	46.05	1.1
Sb	51	L-series	17.08	18.29	9.47	0.5
Total:			93.36	100.00	100.00	

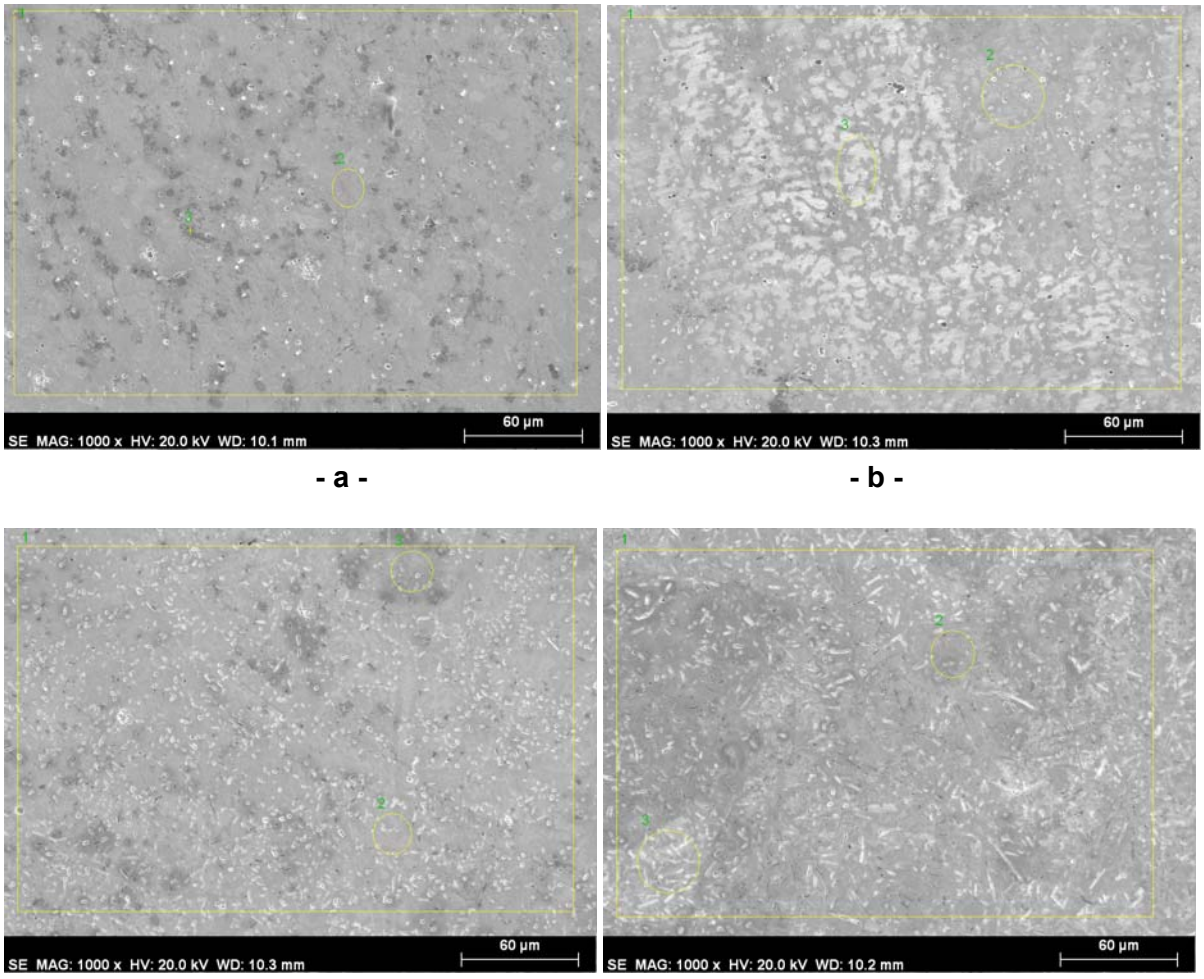
2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	30.44	34.76	41.38	0.9
Fe	26	K-series	3.07	3.50	4.10	0.1
Ni	28	K-series	32.42	37.02	41.25	0.9
Sb	51	L-series	21.64	24.71	13.27	0.7
Total:			87.57	100.00	100.00	

3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	30.71	33.63	37.64	0.9
Fe	26	K-series	7.73	8.46	9.32	0.3
Ni	28	K-series	40.03	43.83	45.92	1.1
Sb	51	L-series	12.86	14.08	7.11	0.4
Total:			91.33	100.00	100.00	

Şekil 4.49. $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları



- a - **- b -**

- c - **- d -**

Şekil 4.50. a) $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$, b) $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$, c) $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve d) $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

Tablo 4.23. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%					EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%				
	Ni	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Fe**	**Sb**	**B**
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	45	40	5	10	-	44,40	39,00	6,63	9,95	-
$Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$	44	40	5	10	1	45,76	38,40	5,41	10,42	-
$Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$	43	40	5	10	2	46,00	37,29	5,61	11,71	-
$Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$	42	40	5	10	3	45,28	38,11	5,62	10,98	-
$Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$	41	40	5	10	4	44,12	38,94	5,79	11,14	-

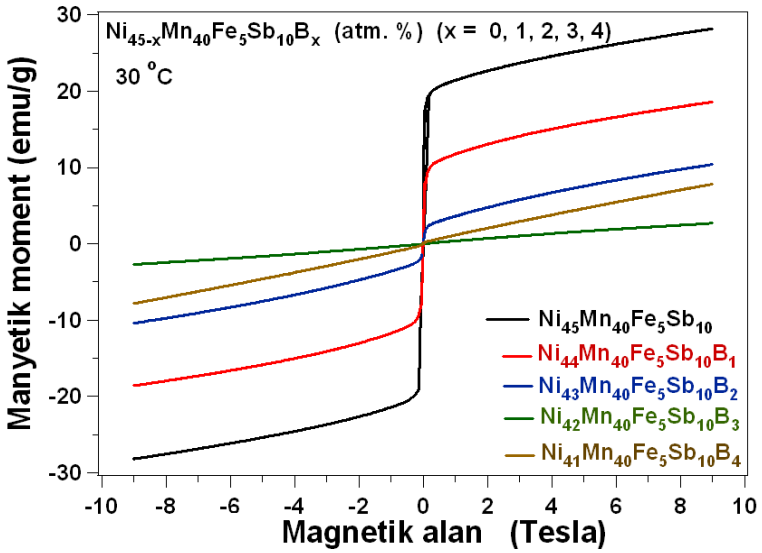
4.7.5. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

Atomikçe yüzde olarak verilen $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının manyetik alan altındaki davranışları "Quantum Design-9T PPMS" sisteminin VSM aparatı ile gerçekleştirildi. Ölçüm alınacak örneklerin kütleleri belirlenerek alaşımların elde edilen manyetik moment değerleri emu/g cinsinden grafiğe aktarıldı.

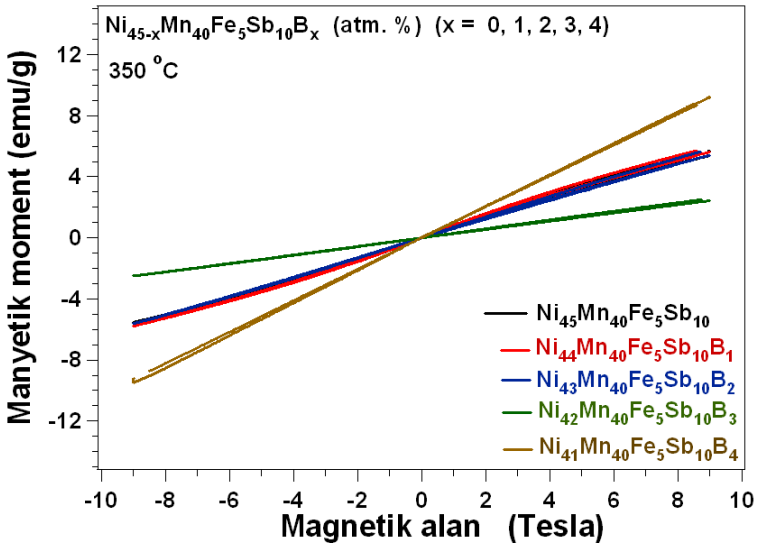
M-H ölçümleri – 9 Tesla ile +9 Tesla (-90 kOe ile +90 kOe) aralığında değişen manyetik alan altında martensit bölgesinde 30 ^oC de ve austenit bölgesinde ise 350 ^oC sabit sıcaklıklarında alındı (şekil 4.51). M-T ölçümleri ise 5 Tesla (50 kOe' lik) sabit manyetik alan altında 30-350 ^oC aralığında alındı (Şekil 4.50). Alaşımların 30 ^oC alınan M-H ölçümlerinde (şekil 4.51.a) bor oranı arttıkça dokum manyetizasyonu değerlerinin azaldığı görülmüştür. $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımları oda sıcaklığı (30 ^oC) civarında paramanyetik durumdadır. 350 ^oC sıcaklığında alınan M-H ölçümlerinde de görüldüğü gibi tüm alaşımlar bu sıcaklıkta paramanyetik durumdadırlar.

Şekil 4.52 de $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30-350 ^oC aralığında alınmış M-T ölçümleri verilmiştir. Bu grafiklerde dönüşüm sıcaklıklarının uygulanan manyetik alan artışıyla arttığı gözlenmiştir. Ayrıca martensit fazından austenit fazına geçerken manyetik moment değerleri artmış ve austenit fazında tekrar düşmüştür.

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$, $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$, $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$, $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının Curie sıcaklıkları sırasıyla 75 ^oC, 92 ^oC, 96 ^oC, 100 ^oC ve 113 ^oC olarak bulundu.

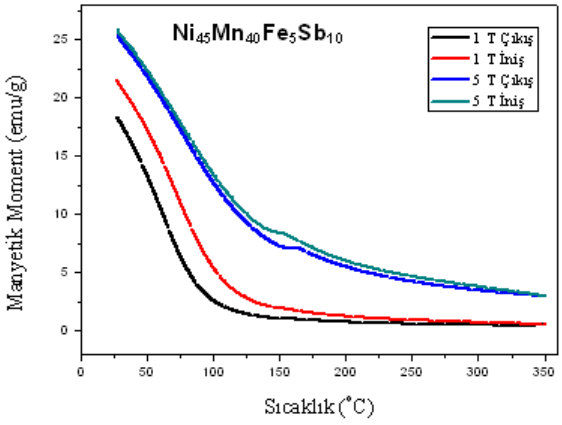


- a -

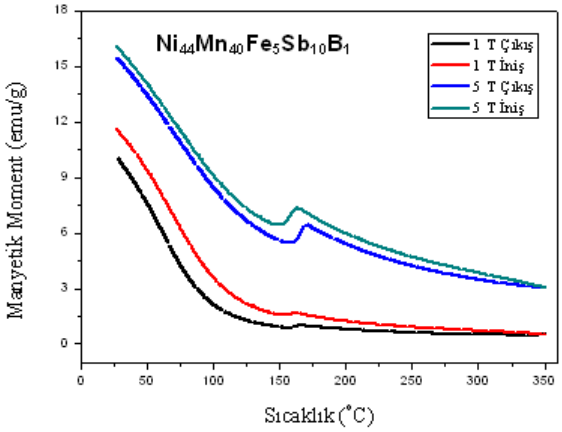


- b -

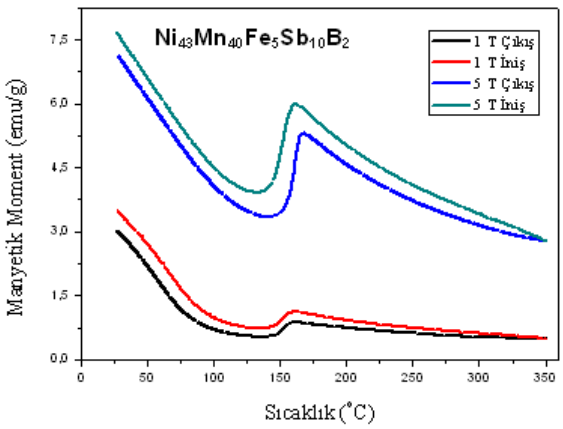
Şekil 4.51. $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının a) 30 °C, b) 350 °C de alınan M-H ölçümleri



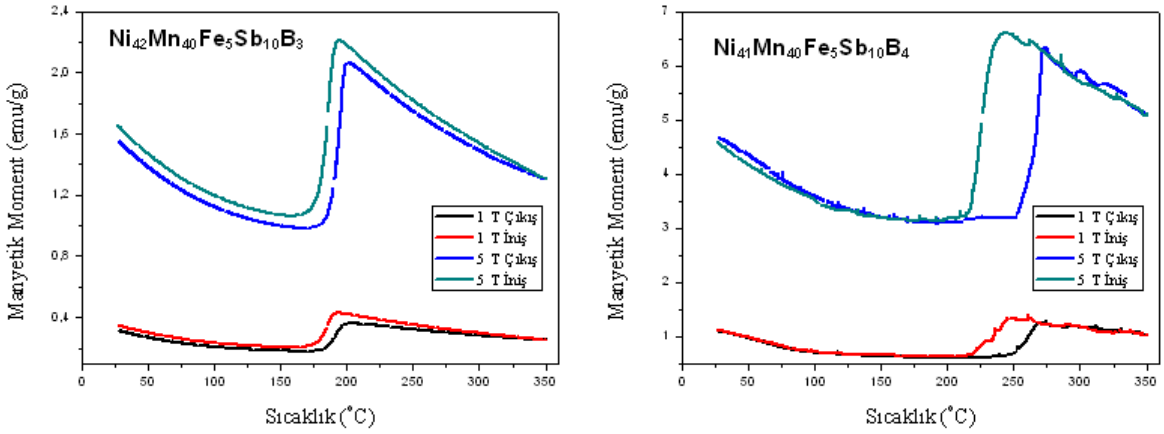
- a -



- b -



- c -



- d - **- e -**

Şekil 4.52. a) $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$, b) $Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$ c) $Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$ d) $Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$ ve e) $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımlarının 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri.

4.8. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları

4.8.1. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları

Atomikçe %49 Ni, %1 Co ve %10Sn, oranları sabit olan ve Mn ile B oranları (tablo 4.24) değiştirilen $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları ark ergitme metodu ile elde edildi. Elde edilen alaşımlara %99.999 saflıktaki argon atmosferinde 900 ^oC de 20 saat homojenleştirme işlemi uygulandı ve tuzlu buzlu suda ani soğutmaya tabi tutuldular.

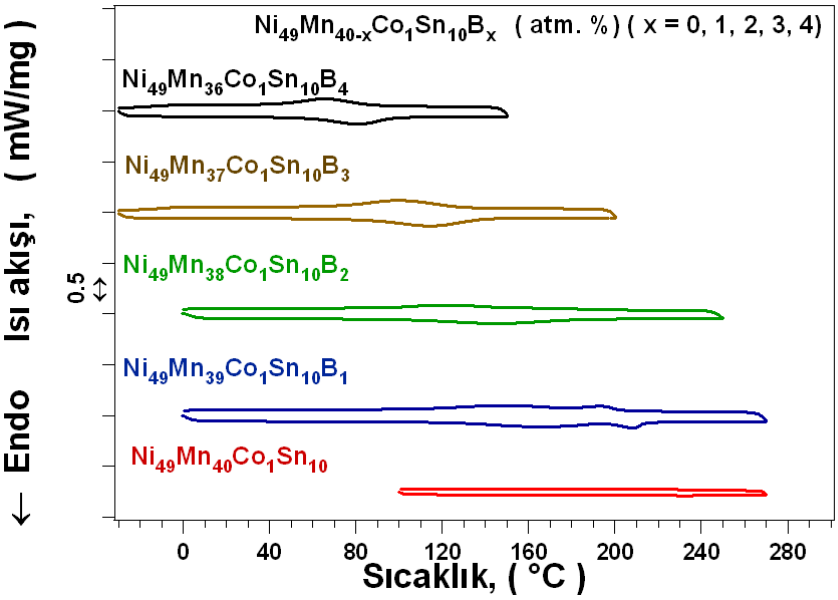
Tablo 4.24. Dökümü yapılan $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde					Ağırlıkça yüzde					**e/a**
	Ni	**Mn**	**Co**	**Sn**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**Sn**	**B**	
$Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$	49	40	1	10	0	45,51	34,77	0,93	18,78	0	**8,19**
$Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$	49	39	1	10	1	45,83	34,14	0,94	18,92	0,17	**8,13**
$Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$	49	38	1	10	2	46,15	33,50	0,95	19,05	0,35	**8,07**
$Ni_{49}Mn_{37}Co_1Sn_{10}B_3$	49	37	1	10	3	46,48	32,85	0,95	19,19	0,52	**8,01**
$Ni_{49}Mn_{36}Co_1Sn_{10}B_4$	49	36	1	10	4	46,82	32,19	0,96	19,32	0,70	**7,95**

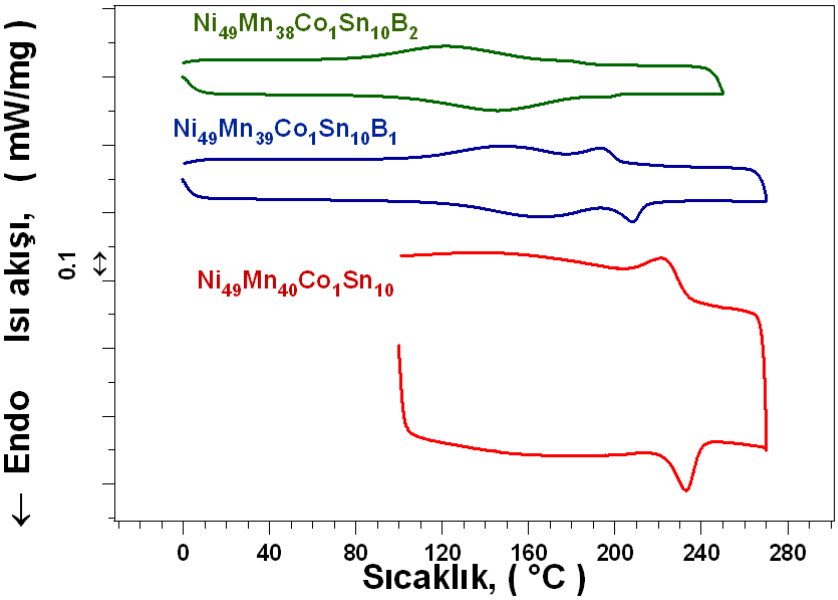
4.8.2. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 5, 10,15, 20 ve 25 ^oC/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 10 ^oC/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri Şekil 4.53 de verildi. Bor oranı artıp Mangan oranı azaldıkça $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında düşüş gözlenmiştir (tablo 4.25).

Belirgin olabilmesi için yeniden çizilen (şekil 4.54) $Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$, $Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$ ve $Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$ alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC eğrilerinde görüldüğü gibi birden fazla faz olduğundan dönüşüm eğrileri geniş bir aralığı kapsamaktadır. X-ışınları analizlerinde NiMnCoSn fazının yanı sıra Ni_3Mn ve Ni_2MnSn fazlarının da bulunduğu görülmüştür (şekil 4.53).



Şekil 4.53. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri



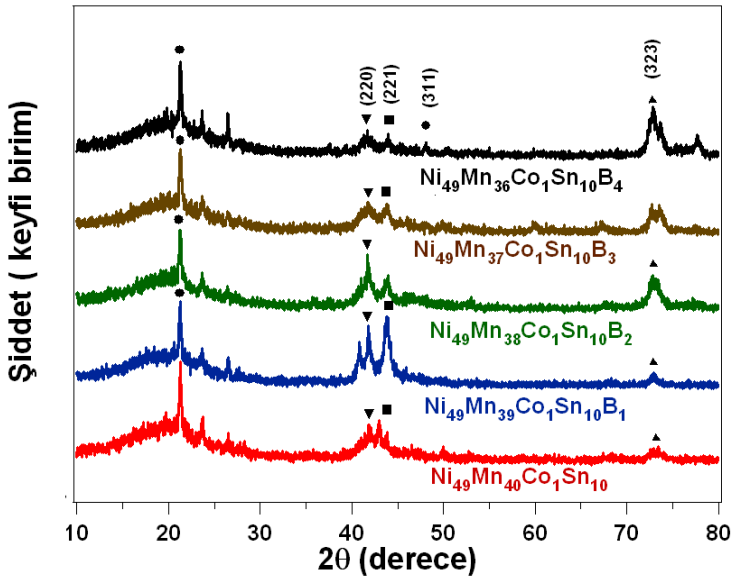
Şekil 4.54. $Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$, $Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$ ve $Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$ alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri

Tablo 4.25. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$	223,7	234,3	240,9	231,1	220,3	199,7	1,69
$Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$	198,6	208,4	213,6	201,5	193,8	180,4	2,54
$Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$	100,9	145,8	203,0	188,9	123,1	80,7	16,67
$Ni_{49}Mn_{37}Co_1Sn_{10}B_3$	83,1	114,1	138,3	128,3	99,9	70,3	16,32
$Ni_{49}Mn_{36}Co_1Sn_{10}B_4$	57,6	80,6	99,0	88,6	65,9	41,4	13,19

4.8.3. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 30-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.55). Bu alaşımlar oda sıcaklığında martensit fazındadırlar ve indislemeler ilgili referans ile yapılmıştır (Elwindari, vd., 2017).

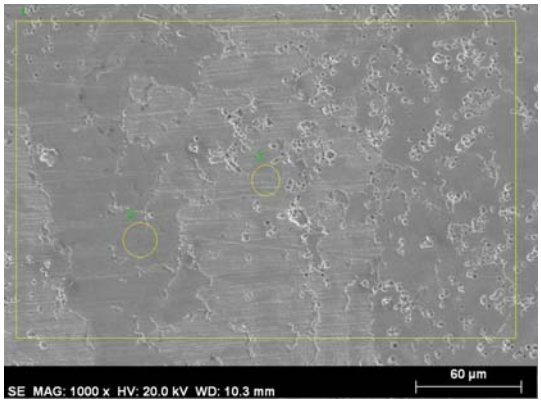


Şekil 4.55. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

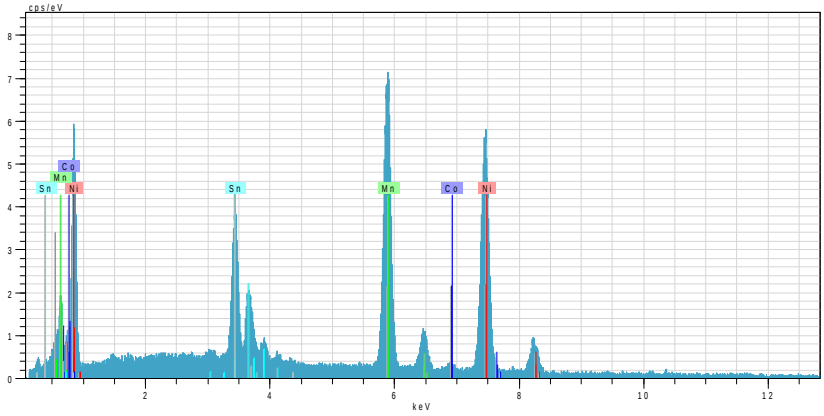
4.8.4. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları, 75 ml HCl, 75 ml ethanol, 15 g CuSO4 ve 10 ml saf su dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmış ve bulunan değerler tablo 4.26 da verilmiştir.

Şekil 4.56 da örnek olarak $Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$, $Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$, $Ni_{49}Mn_{37}Co_1Sn_{10}B_3$ ve $Ni_{49}Mn_{36}Co_1Sn_{10}B_4$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.57 de verilmiştir.



$Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$



1 HV:20.0kV Puls th.:7.56kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	30.90	32.05	36.84	0.9
Co	27	K-series	1.47	1.53	1.64	0.1
Ni	28	K-series	46.42	48.15	51.80	1.3
Sn	50	L-series	17.61	18.27	9.72	0.6
		Total:	96.41	100.00	100.00	

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	29.79	31.48	36.48	0.8
Co	27	K-series	1.48	1.56	1.69	0.1
Ni	28	K-series	44.71	47.25	51.25	1.3
Sn	50	L-series	18.65	19.71	10.57	0.6
		Total:	94.64	100.00	100.00	

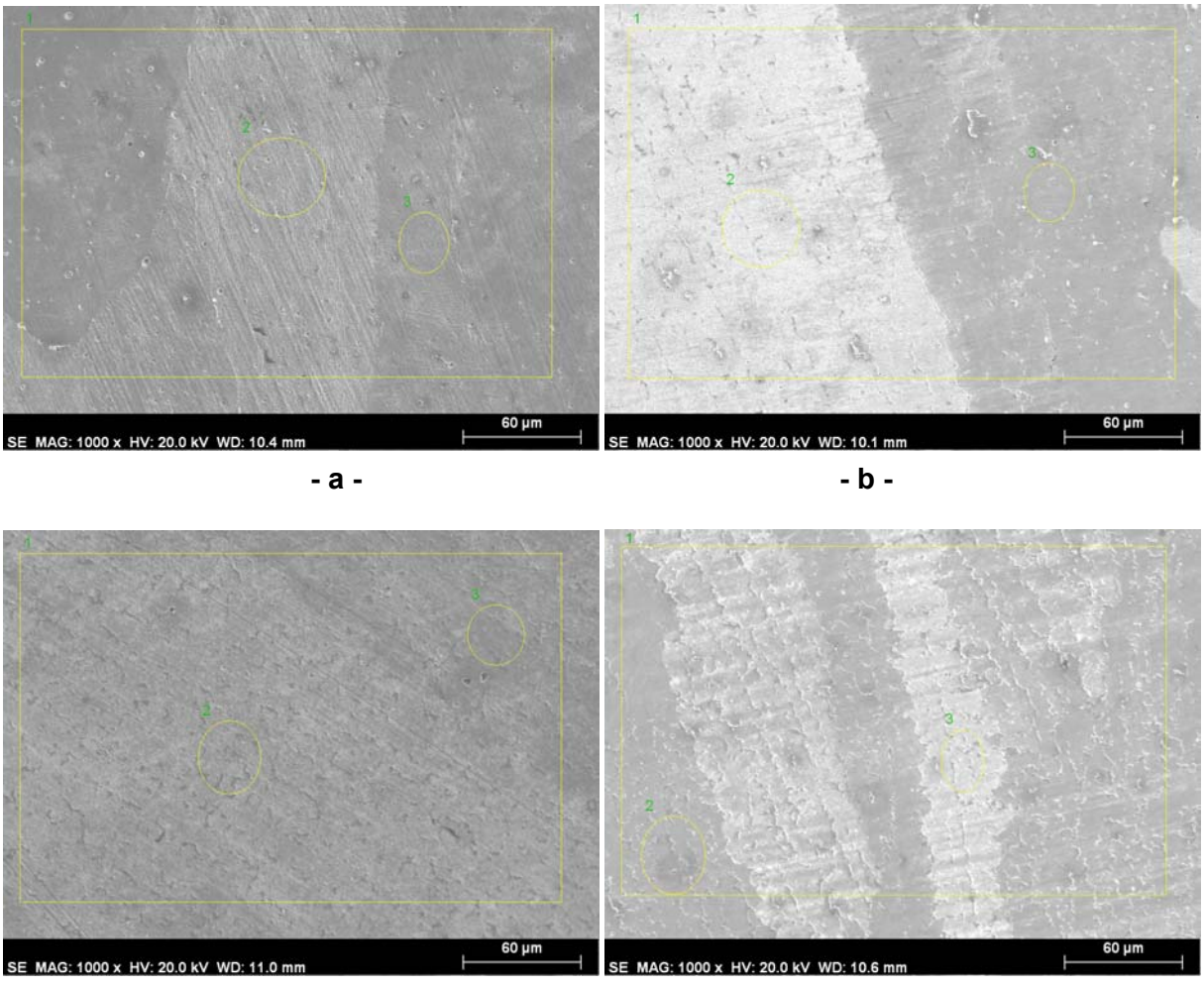
3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	28.79	29.80	35.27	0.8
Co	27	K-series	1.25	1.30	1.43	0.1
Ni	28	K-series	44.09	45.64	50.56	1.2
Sn	50	L-series	22.48	23.27	12.74	0.7
		Total:	96.62	100.00	100.00	

Şekil 4.56. $Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları

Tablo 4.26. $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%					EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%				
	Ni	**Mn**	**Co**	**Sn**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**Sn**	**B**
$Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$	49	40	1	10	-	51,20	36,19	1,58	11,01	-
$Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$	49	39	1	10	1	51,13	37,12	1,64	10,09	-
$Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$	49	38	1	10	2	51,18	37,23	1,60	9,98	-
$Ni_{49}Mn_{37}Co_1Sn_{10}B_3$	49	37	1	10	3	51,92	35,85	1,69	10,52	-
$Ni_{49}Mn_{36}Co_1Sn_{10}B_4$	49	36	1	10	4	52,98	35,38	1,63	10,00	-



- a - **- b -**

- c - **- d -**

Şekil 4.57. a) $Ni_{49}Mn_{39}Co_1Sn_{10}B_1$, b) $Ni_{49}Mn_{38}Co_1Sn_{10}B_2$, c) $Ni_{49}Mn_{37}Co_1Sn_{10}B_3$ ve d) $Ni_{49}Mn_{36}Co_1Sn_{10}B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

4.9. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları

4.9.1. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları

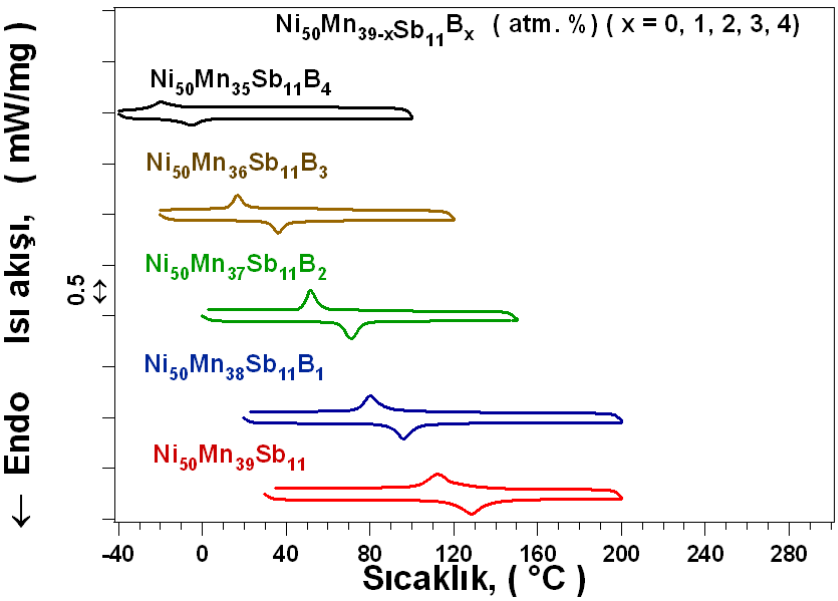
Atomikçe %50 Ni ve %11 Sb oranları sabit olan ve Mn ile B oranları değiştirilen, $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x=0,1, 2, 3, 4) alaşımlarına (tablo 4.27) %99.999 saflıkta argon atmosferinde 900 °C de 20 saat homojenleştirme işlemi uygulandı ve tuzlu buzlu suda ani soğutmaya tabi tutuldular.

Tablo 4.27. Dökümü yapılan $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde				Ağırlıkça yüzde				e/a
	Ni	Mn	Sb	B	Ni	Mn	Sb	B	e/a
$Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$	50	39	11	0	45,74	33,39	20,87	0	**8,28**
$Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_1$	50	38	11	1	46,05	32,76	21,02	0,042	**8,24**
$Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_2$	50	37	11	2	46,37	33,12	21,17	0,085	**8,20**
$Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_3$	50	36	11	3	46,70	31,47	21,31	0,129	**8,16**
$Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$	50	35	11	4	47,03	30,81	21,46	0,693	**8,12**

4.9.2. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 5, 10,15, 20 ve 25 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 10 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri Şekil 4.58 de verildi. Bor oranı artıp Mangan oranı azaldıkça $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında düşüş gözlenmiştir (tablo 4.25). $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}B_1$ ve $Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_2$ alaşımları oda sıcaklığında martensit fazında iken, $Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_4$ alaşımları oda sıcaklığında austenit fazındadırlar.



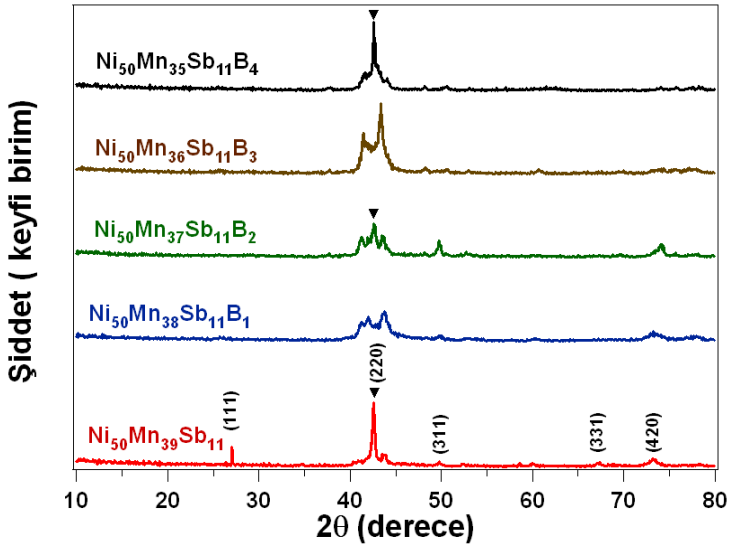
Şekil 4.58. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri

Tablo 4.28. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$	117,2	128,9	137,3	121,1	112,3	102,5	13,95
$Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_1$	89,3	96,1	103,5	87,6	80,2	74,3	10,38
$Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_2$	65,6	71,2	76,7	56,8	51,6	47,7	9,14
$Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_3$	31,9	36,2	41,1	21,7	16,7	12,9	5,13
$Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$	-13,9	-5,2	2,4	-11,1	-19,7	-25,4	4,76

4.9.3. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 10-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.59). XRD ölçümlerinde $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}B_1$ ve $Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_2$ alaşımları oda sıcaklığında martensit fazında iken, $Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_4$ alaşımları oda sıcaklığında austenit fazındadırlar. $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$ alaşımının kristalografik indislenmesinde ilgili referans kullanılmıştır (Rayba, vd., 2014).

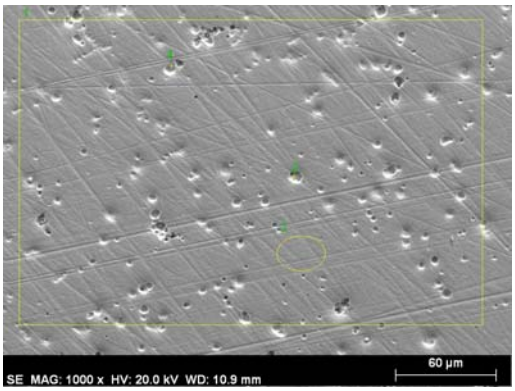


Şekil 4.59. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

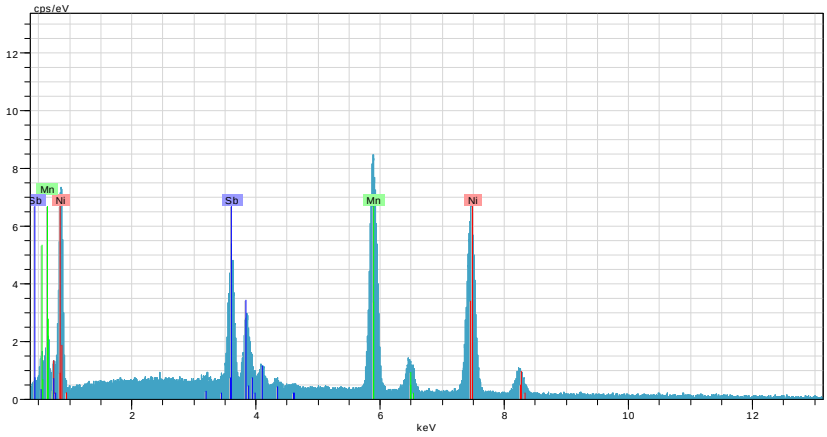
4.9.4. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları, 75 ml HCl, 75 ml ethanol, 15 g CuSO4 ve 10 ml saf su dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmış ve bulunan değerler tablo 4.29 de verilmiştir.

Şekil 4.60 da örnek olarak $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_1$, $Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_2$, $Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.61 de verilmiştir.



$Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$



1 HV:20.0kV Puls th.:9.65kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	29.35	32.76	38.27	0.8
Ni	28	K-series	41.60	46.44	50.77	1.2
Sb	51	L-series	18.63	20.80	10.96	0.6
Total:			89.59	100.00	100.00	

2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	29.00	31.81	36.90	0.8
Ni	28	K-series	44.46	48.77	52.94	1.3
Sb	51	L-series	17.70	19.42	10.16	0.6
Total:			91.15	100.00	100.00	

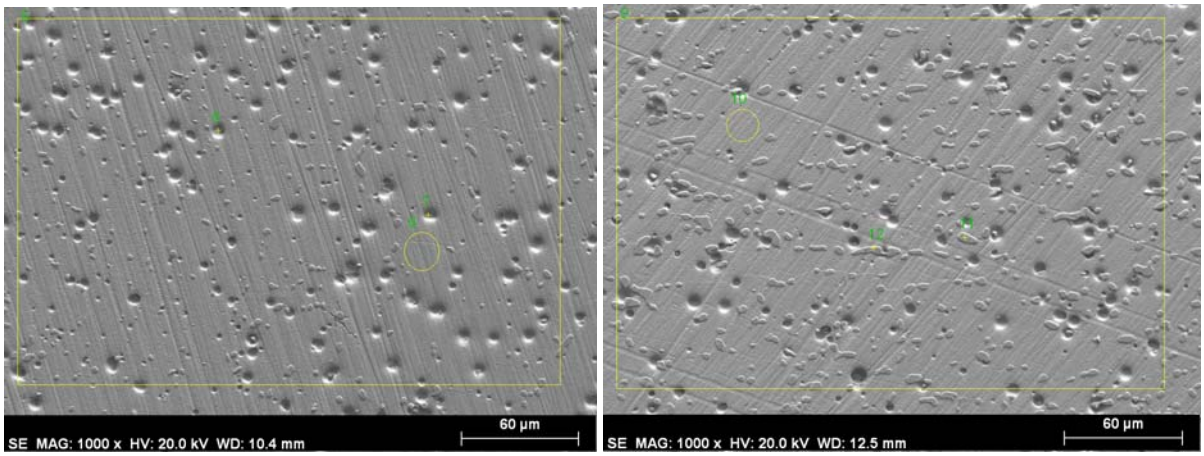
3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	32.85	34.11	40.33	0.9
Ni	28	K-series	41.21	42.79	47.35	1.2
Sb	51	L-series	22.24	23.09	12.32	0.7
Total:			96.30	100.00	100.00	

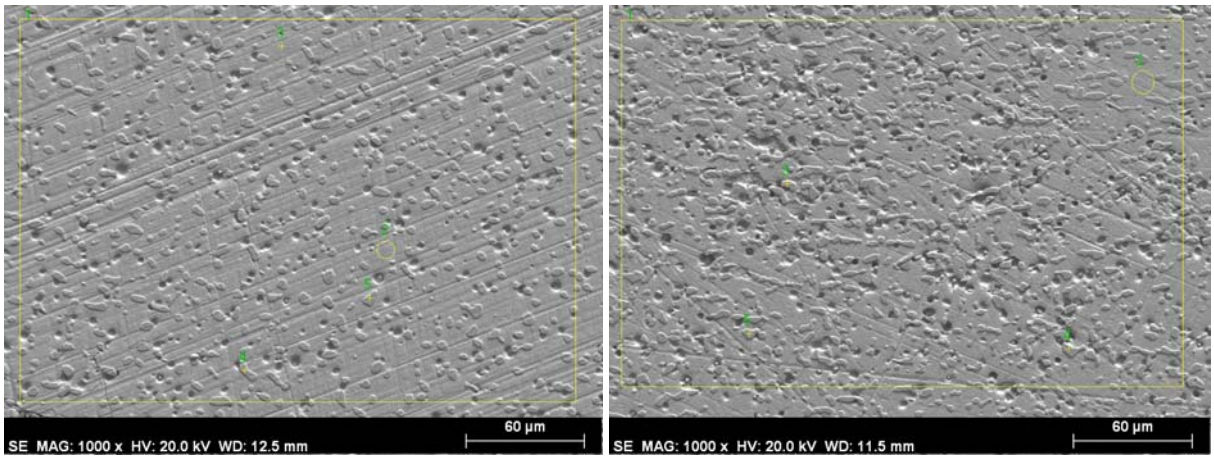
Şekil 4.60. $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları

Tablo 4.29. $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%				EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%			
	Ni	**Mn**	**Sb**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Sb**	**B**
$Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$	50	39	11	0	50,35	38,50	11,14	-
$Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_1$	50	38	11	1	49,16	39,14	11,69	-
$Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_2$	50	37	11	2	49,37	39,39	11,23	-
$Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_3$	50	36	11	3	49,05	38,89	12,05	-
$Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$	50	35	11	4	49,93	37,16	12,89	-



- a - **- b -**



- c - **- d -**

Şekil 4.61. a) $Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_1$, b) $Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_2$, c) $Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_3$ ve d) $Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

4.10. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımları

4.10.1. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Alaşım Oranları

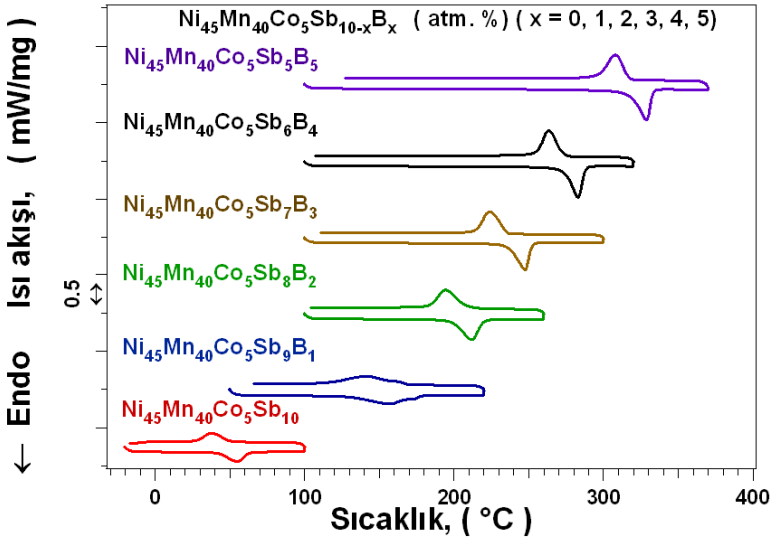
Atomikçe %45 Ni, %40Mn ve%5 Co oranları sabit olan ve Sb ile B oranları değiştirilen, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarına (tablo 4.30) %99.999 saflıkta argon atmosferinde 900 °C de 20 saat homojenleştirme işlemi uygulandı ve tuzlu buzlu suda ani soğutmaya tabi tutuldular.

Tablo 4.30. Dökümü yapılan $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde					Ağırlıkça yüzde					e/a
	Ni	**Mn**	**Co**	**Sb**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**Sb**	**B**	
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$	45	40	5	10	0	41,59	34,60	4,64	19,17	0	**8,25**
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$	45	40	5	9	1	42,33	35,22	4,72	17,56	0,17	**8,23**
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$	45	40	5	8	2	43,09	35,85	4,81	15,89	0,35	**8,21**
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$	45	40	5	7	3	43,89	36,51	4,87	14,16	0,54	**8,19**
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$	45	40	5	6	4	44,71	37,20	4,99	12,37	0,73	**8,17**
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$	45	40	5	5	5	45,57	37,92	5,083	10,50	0,93	**8,15**

4.10.2. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 5, 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 10 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri şekil 4.62 da verildi. Bor oranı artıp Antimon oranı azaldıkça $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında artış gözlenmiştir (tablo 4.31).



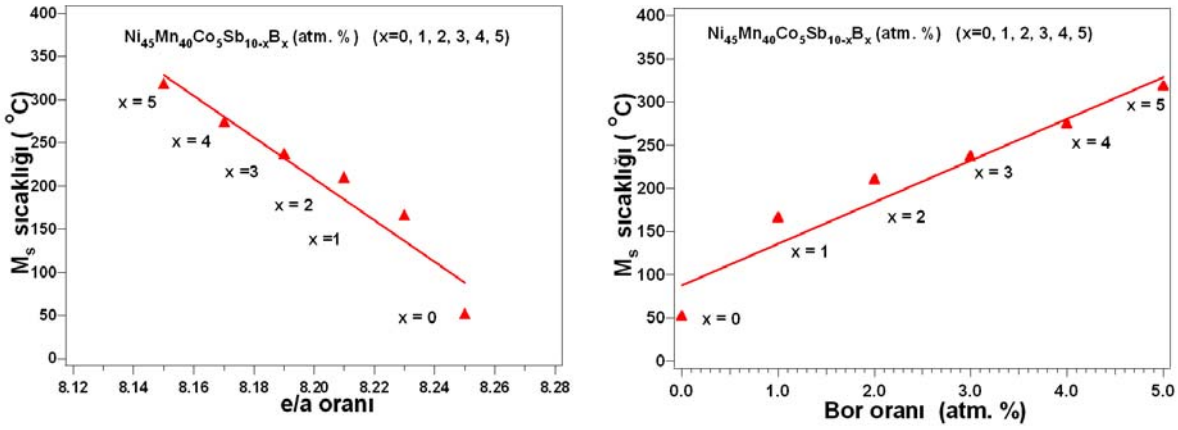
Şekil 4.62. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri

$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x= 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımları oda sıcaklığında martensit fazında olup, bor katkısız $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımı oda sıcaklığına yakın sıcaklıklarda (M_f = 27.61 °C) austenit fazına geçmektedir. e/a oranının azalması ve bor oranının artışı ile dönüşüm sıcaklıklarında artışlar meydana gelmiştir (şekil 4.63). Martensit başlama sıcaklıkları M_s; $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımları için sırasıyla 49.99 °C, 164.68 °C, 208.23 °C, 235.33 °C, 272.83 °C ve 316.79 °C olmuştur. Benzer şekilde martensit-austenit dönüşümde $\Delta H_{ort.}$ (J/g) entalpi değerlerinde de bor oranının artışı ile artışlar gözlenmiştir (tablo 4.31).

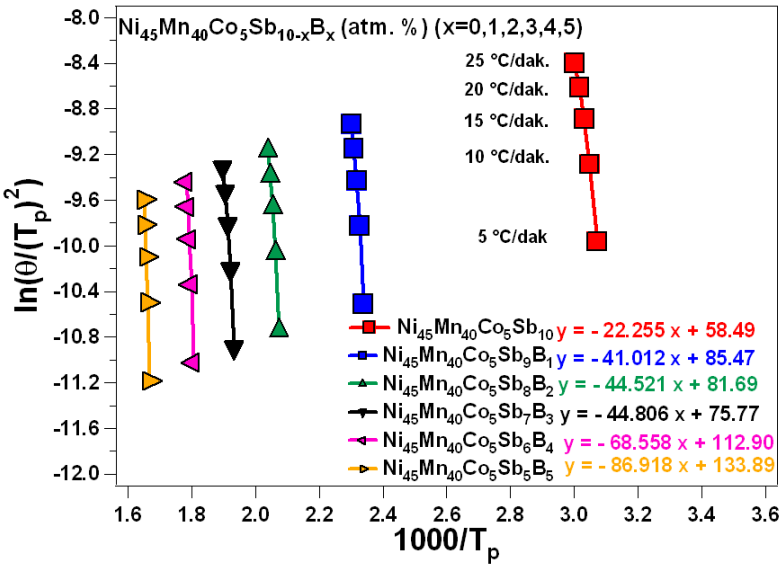
Ayrıca $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) alaşımlarının 5, 10, 15, 20 ve 25 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafiklerinden bulunan sonuçlar değerlendirilerek, austenit dönüşüm aktivasyon enerji değeri Kissinger metodu kullanılarak hesaplanmıştır (şekil 4.64). $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının austenit-martensit geçişi için aktivasyon enerji değerleri sırasıyla 185.0, 341.0, 370.2, 372.5, 570.0 ve 722,6 kJ/mol olarak bulundu.

Tablo 4.31. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) alaşımlarının 10 °C/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$	42,60	55,03	62,80	49,99	37,80	27,61	10,27
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$	128,10	156,87	178,75	164,68	141,11	114,74	20,98
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$	198,93	211,79	219,50	208,23	194,49	184,06	23,75
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$	236,15	247,61	251,59	235,33	223,90	214,84	24,51
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$	273,38	282,90	287,78	272,83	263,47	255,24	26,67
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$	317,49	328,61	332,78	316,79	307,84	296,50	29,03



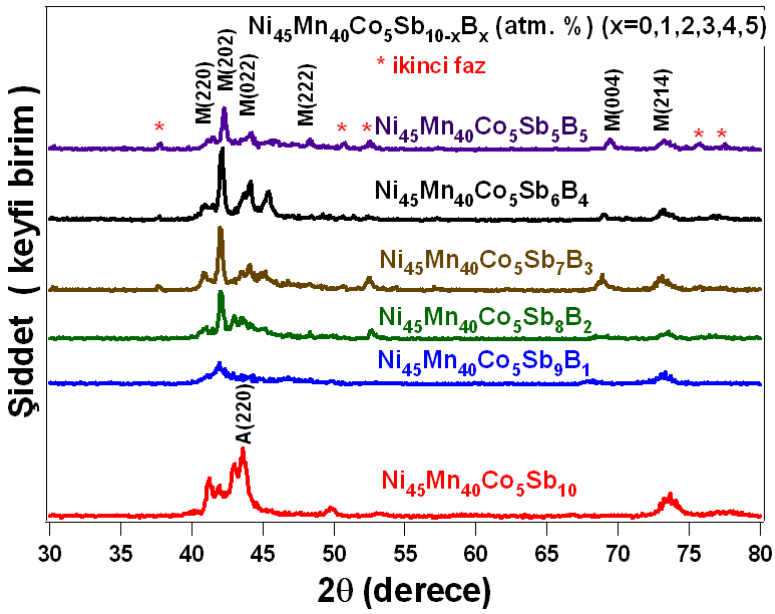
Şekil 4.63. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının; a) martensit başlama sıcaklığı M_s nin e/a oranı ile değişimi, b) martensit başlama sıcaklığı M_s nin bor oranı ile değişimi



Şekil 4.64. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının Kissinger eğrileri

4.10.3. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 20-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.65). Şekil 4.60 da verilen DSC eğrilerinde görüldüğü gibi $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, alaşımı oda sıcaklığında austenit fazında olup, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ alaşımları ise oda sıcaklığına martensit fazındadır. XRD grafikleri literaurlere göre indislendi (Han, Z.D, vd., 2008). İndislemelerde (M), martensiti (A) ise austenit fazı göstermektedir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, alaşımında etkin pik A (220) pikidir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ alaşımları ise etkin pik M(202) pikine karşı gelmektedir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, alaşımına bor katkılanarak oda sıcaklığında austenit fazında olan alaşımlar martensit fazına dönüşmüşlerdir. Ayrıca DSC eğrilerinin de desteklediği gibi alaşımlarda ikinci fazlar oluşmuştur.



Şekil 4.65. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

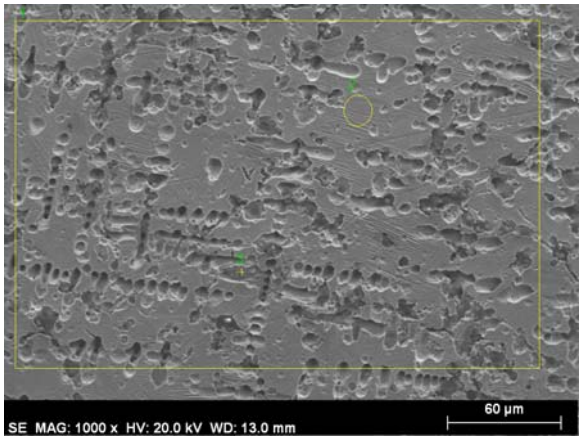
4.10.4. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) alaşımları, 75 ml HCl, 75 ml ethanol, 15 g CuSO4 ve 10 ml saf su dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmış ve bulunan değerler Tablo 4.32 de verilmiştir.

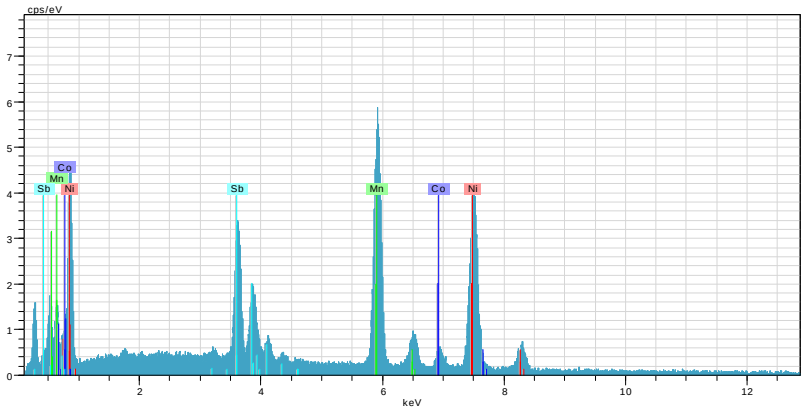
Şekil 4.66 da örnek olarak $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.67 de verilmiştir.

Tablo 4.32. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4,5) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%					EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%				
	Ni	**Mn**	**Co**	**Sb**	**B**	**Ni**	**Mn**	**Co**	**Sb**	**B**
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$	45	40	5	10	0	44,87	37,88	6,26	10,98	-
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$	45	40	5	9	1	44,31	38,45	6,62	10,60	-
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$	45	40	5	8	2	44,64	39,90	7,34	8,11	-
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$	45	40	5	7	3	45,25	40,29	6,95	7,49	-
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$	45	40	5	6	4	44,97	41,96	7,04	6,13	-
$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$	45	40	5	5	5	45,89	41,13	7,36	5,74	-



$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$



1 HV:20.0kV Puls th.:6.60kcps

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	31.36	32.87	38.12	0.9
Co	27	K-series	5.76	6.04	6.53	0.2
Ni	28	K-series	39.69	41.61	45.16	1.1
Sb	51	L-series	18.59	19.49	10.20	0.6
		Total:	95.40	100.00	100.00	

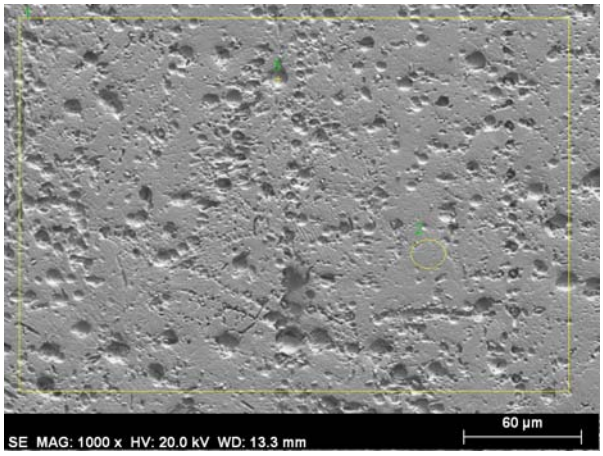
2

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	29.62	31.61	37.02	0.8
Co	27	K-series	5.37	5.73	6.26	0.2
Ni	28	K-series	38.97	41.57	45.58	1.1
Sb	51	L-series	19.77	21.09	11.15	0.6
		Total:	93.73	100.00	100.00	

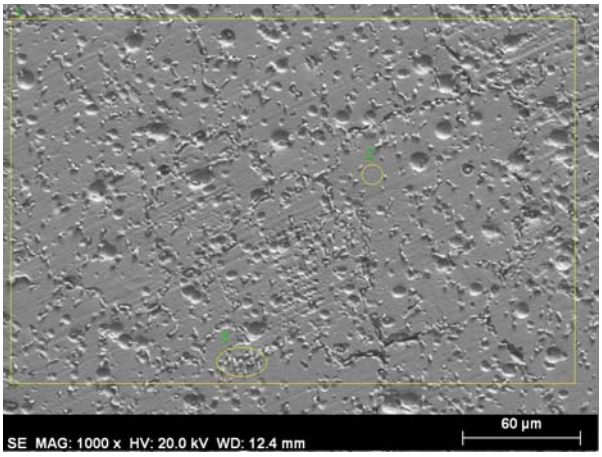
3

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Mn	25	K-series	27.74	32.75	38.50	0.8
Co	27	K-series	4.64	5.48	6.00	0.2
Ni	28	K-series	33.78	39.88	43.89	1.0
Sb	51	L-series	18.54	21.89	11.61	0.6
		Total:	84.69	100.00	100.00	

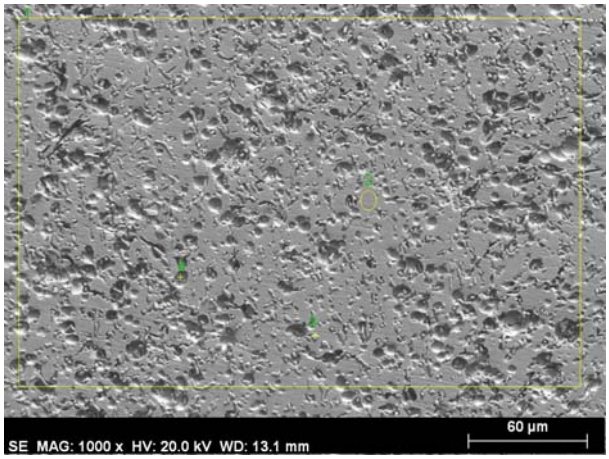
Şekil 4.66. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüsü ve EDX analiz sonuçları



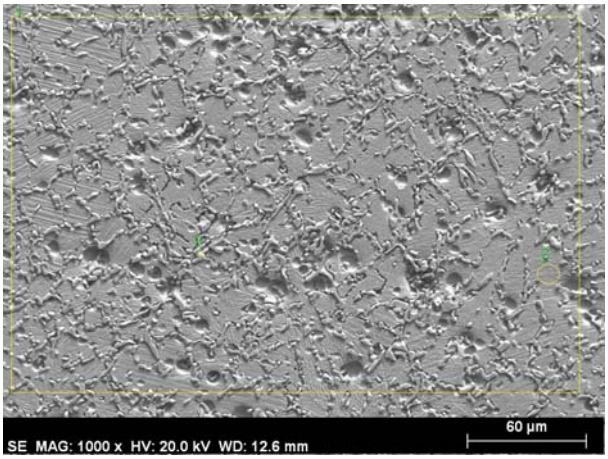
- a -



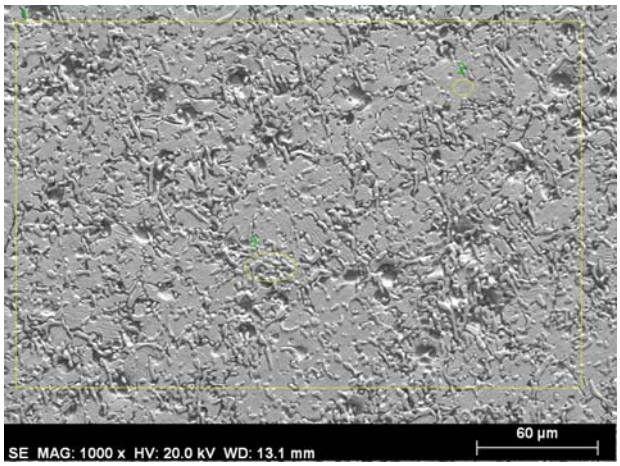
- b -



- c -



- d -



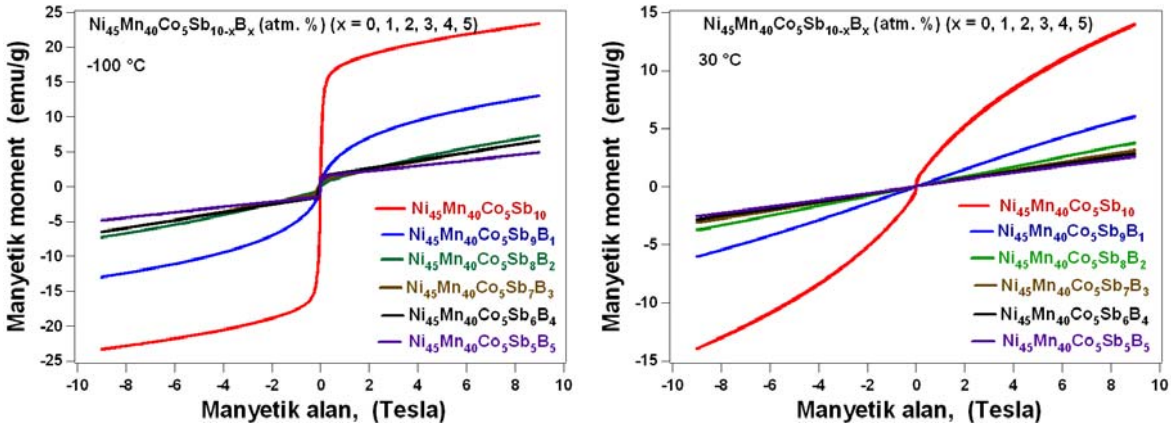
- e -

Şekil 4.67. a) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, b) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, c) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, d) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve e) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının EDX analizi yapılmış bölgelerinin SEM görüntüleri

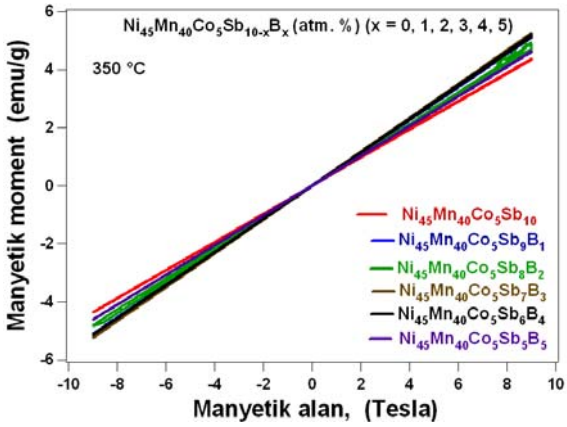
4.10.5. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

Atomikçe yüzde olarak verilen $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının manyetik alan altındaki davranışları "Quantum Design-9T PPMS" sisteminin VSM aparatı ile gerçekleştirildi. Ölçüm alınacak örneklerin kütleleri belirlenerek alaşımların elde edilen manyetik moment değerleri emu/g cinsinden grafiğe aktarıldı.

M-H ölçümleri – 9 Tesla ile +9 Tesla (-90 kOe ile +90 kOe) aralığında değişen manyetik alan altında martensit bölgesinde, -100 ^oC, 30 ^oC de ve austenit bölgesinde ise 350 ^oC sabit sıcaklıklarında alındı (şekil 4.68). M-T ölçümleri ise 5 Tesla (50 kOe' lik) sabit manyetik alan altında 30 -350 ^oC aralığında alındı (Şekil 4.69). Şekil 4.62 da verilen DSC eğrilerinden görüldüğü gibi alaşımlar 100 ^oC sıcaklığında martensit fazında olup, şekil 4.68.a da görüldüğü gibi bu sıcaklıkta alınan M-H ölçümlerinde $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının tamamı ferromanyetik özellik sergilemektedirler. Ancak bor oranının artışı ile doyum manyetizasyonu değerlerinde düşüşler meydana gelmektedir. Şekil 4.68.b de 30 ^oC de alınan M-H ölçümlerinde $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımı oda sıcaklığı civarında austenit fazında olup, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ alaşımları halen martensit fazındadır. 30 ^oC sıcaklığında sadece $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımı ferromanyetik özellik sergilemekte ve doyum manyetizasyonuna sahiptir, diğer alaşımlar paramanyetik özellik sergilemektedirler. Şekil 4.62 da verilen DSC eğrilerinden görüldüğü gibi tüm alaşımlar 350 ^oC sıcaklığında austenit fazında olup, bu sıcaklıkta alınan M-H ölçümlerinden paramanyetik özellik sergiledikleri görülmüştür (şekil 4.68.c).



- a - **- b -**

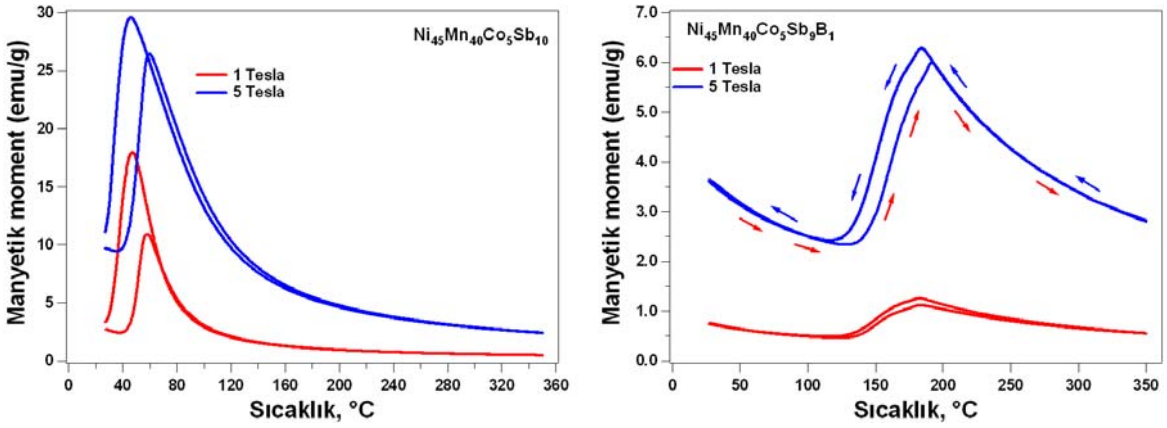


- c -

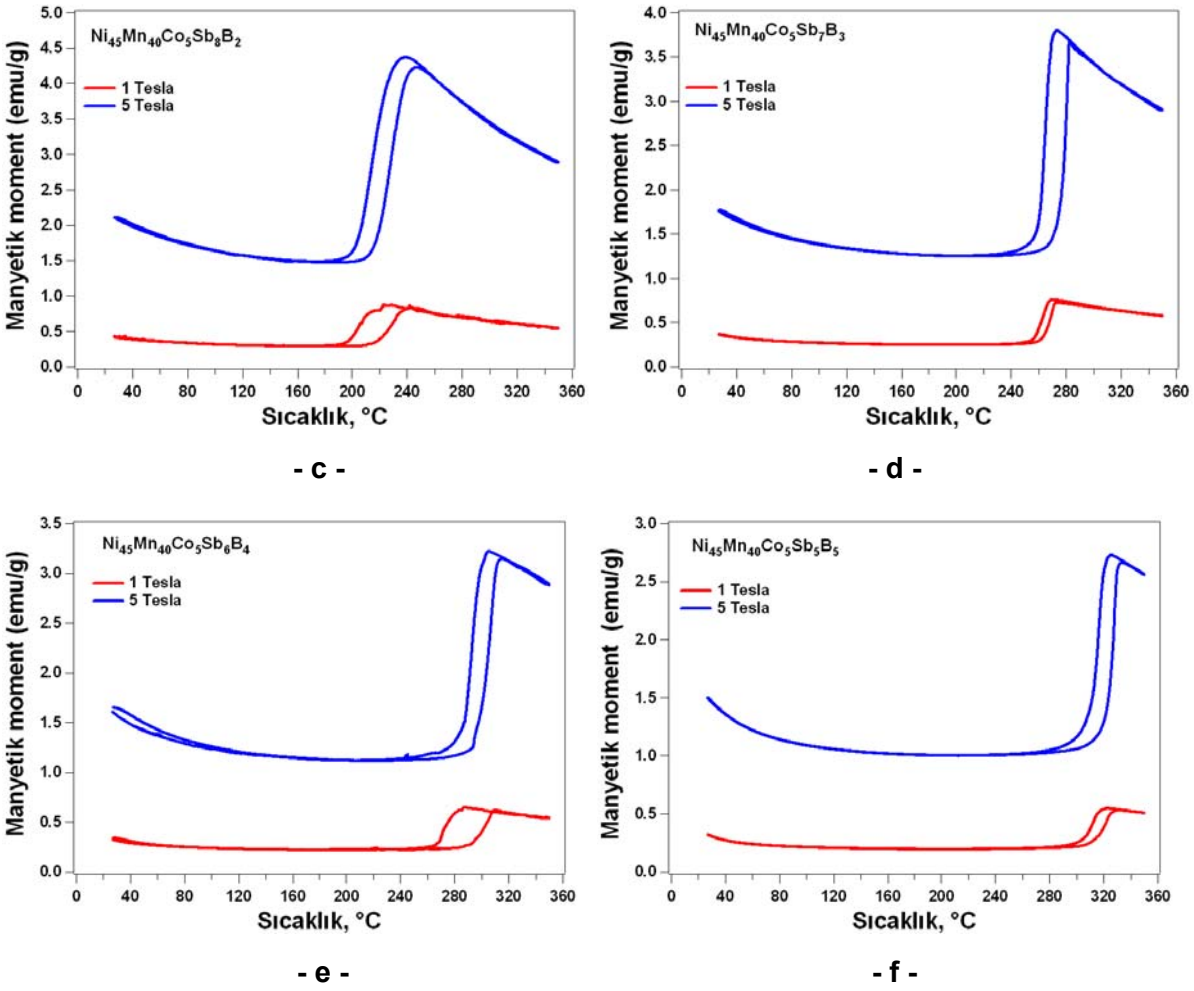
Şekil 4.68. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının a) -100 ^oC a) 30 ^oC, b) 350 ^oC de alınan M-H ölçümleri

1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30-350 ^oC sıcaklık aralığında alınan $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının M-T ölçümlerinde (şekil.4.69) bor katkısız $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımının dönüşüm sıcaklıkları oda sıcaklığı civarında olup, DSC ölçümlerinden bulunan değerler ile uyuşmaktadırlar. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının dönüşüm sıcaklıkları da DSC ölçümlerinde bulunan değerler ile uyum içerisindedir. Uygulanan manyetik alan artışı ile dönüşüm sıcaklıklarında azda olsa artışlar meydana gelmiştir.

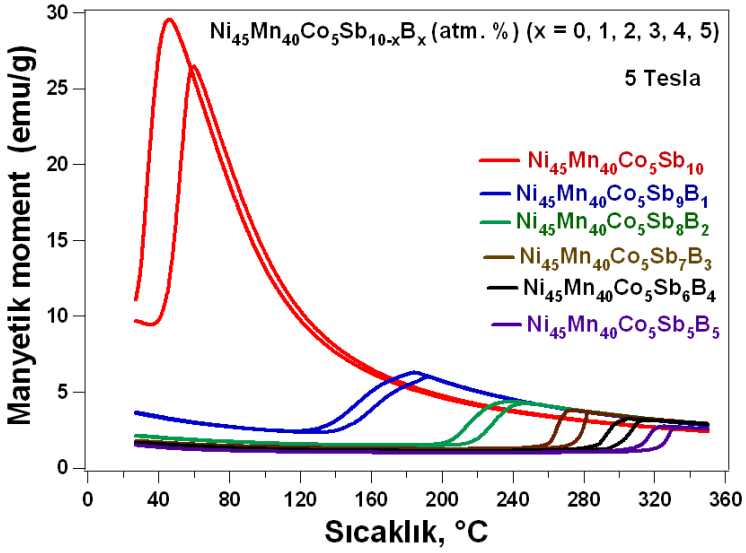
Şekil 4.70 de $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri toplu olarak verilmiştir. Bu grafiktende görüldüğü gibi bor artışı ile alaşımların manyetik moment değerlerinde düşüşler gözlenmiştir.



- a - **- b -**



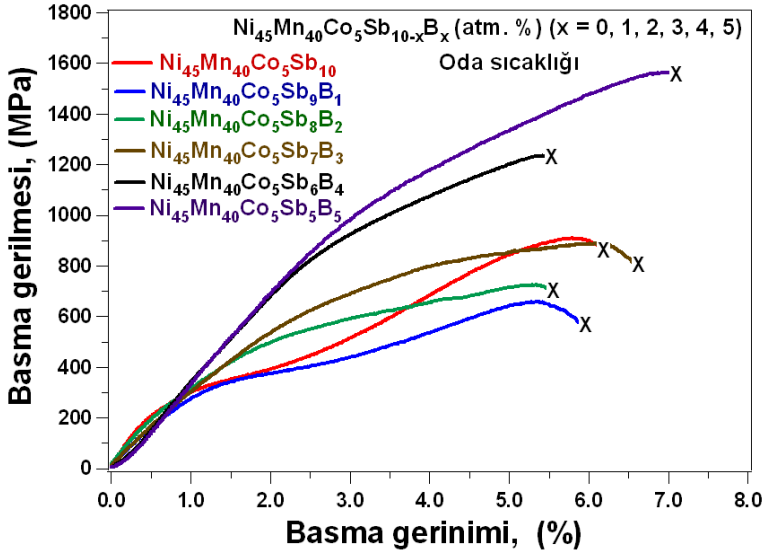
Şekil 4.69. a) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, b) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, c) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, d) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, e) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve f) $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri.



Şekil 4.70. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının 5 Tesla sabit manyetik alan altında 30 - 350 ^oC aralığında M-T ölçümleri.

4.10.6. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

4x4x8 mm^3 ebatlarında kesilmiş olan $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının mukavemet ve süneklik davranışına B katkısının belirlenmesi için oda sıcaklığında kırılana kadar basma gerilmesi uygulanarak basma gerilme-gerinim eğrileri elde edildi (şekil 4.71). DSC analizlerinden görüldüğü gibi, oda sıcaklığında $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımı austenit fazında olup $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 1, 2, 3, 4, 5) alaşımları martensit fazındadır. Bu durum göz önüne alındığında oda sıcaklığında martensit fazında bulunan alaşımlarda bor oranının artışı ile mukavemetin arttığı görülmektedir. Ancak $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımının $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$ alaşımından daha yüksek mukavemete sahip olmasının nedeni $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımının austenit fazında $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$ alaşımının ise martensit fazında olmasına bağlanabilir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$ alaşımlarının iki plato bölgesi olduğu, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının ise sadece bir plato bölgesi olduğunu açıkça görülmektedir. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_8B_2$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_7B_3$, $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_6B_4$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımlarının kırılma gerilimleri sırasıyla 909, 659, 725, 888, 1234 ve 1565 MPa olarak, maksimum deformasyonları ise sırasıyla % 6.2, % 5.9, %5.31, 6.12, 5,44 ve % 7 olarak bulundu.



Şekil 4.71. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi

4.11. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımları

4.11.1. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Alaşım Oranları

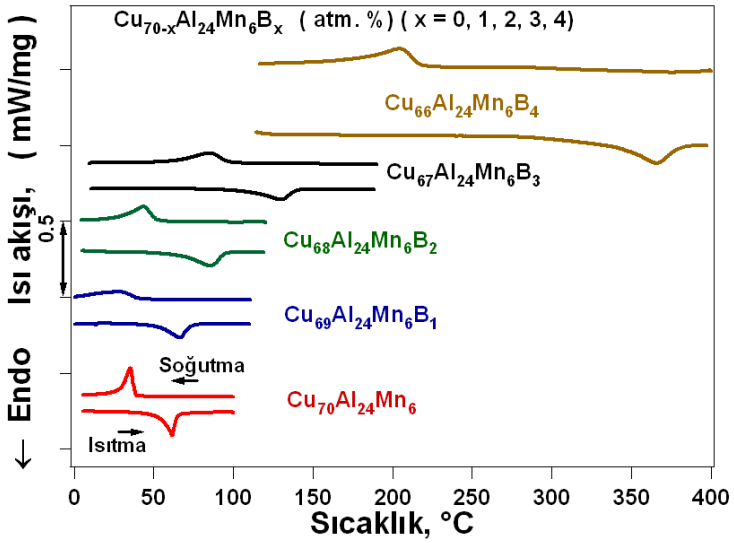
Atomikçe %24 Al, %6Mn oranları sabit olan ve Cu ile B oranları değiştirilen, ark ergitme metodu ile ingot halinde elde edilen $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x =0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarına (tablo 4.33) %99.999 saflıkta argon atmosferinde 900 °C de 20 saat homojenleştirme işlemi uygulandı ve tuzlu buzlu suda ani soğutmaya tabi tutuldular.

Tablo 4.33. Dökümü yapılan $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4)alaşım oranları

Alaşım	Atomik yüzde				Ağırlıkça yüzde				e/a
	Cu	**Al**	**Mn**	**B**	**Cu**	**Al**	**Mn**	**B**	
$Cu_{70}Al_{24}Mn_6$	70	24	6	0	81,99	11,93	6,07	0	**1,84**
$Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$	69	24	6	1	81,61	12,05	6,13	0,20	**1,86**
$Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$	68	24	6	2	81,22	12,17	6,20	0,41	**1,88**
$Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$	67	24	6	3	80,83	12,29	6,26	0,61	**1,9**
$Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$	66	24	6	4	80,43	12,42	6,32	0,83	**1,92**

4.11.2. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Termal Analiz Sonuçları

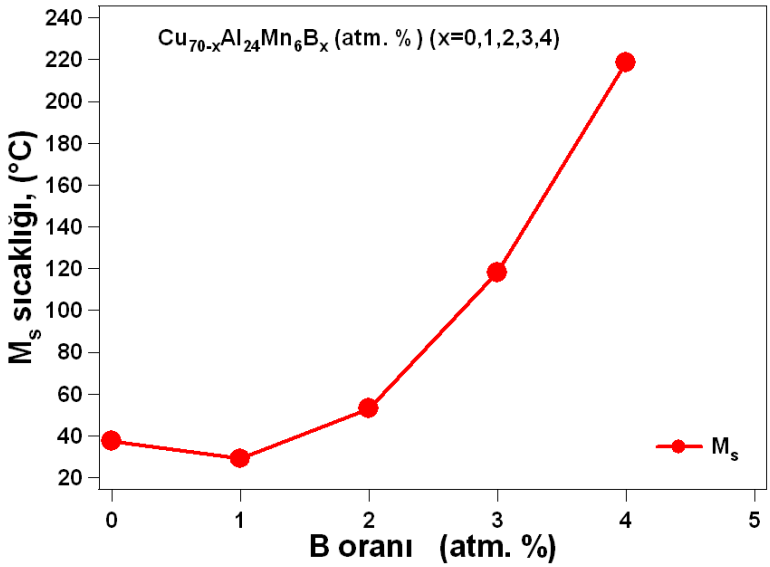
$Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi için DSC ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümlerde 5, 10,15, 20 ve 25 °C/dakika ısıtma ve soğutma hızları kullanıldı. 10 °C/dakika tarama hızlarında alınan DSC grafikleri şekil 4.72 de verildi. Bor oranı artıp bakır oranı azaldıkça $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının dönüşüm sıcaklıklarında artış gözlenmiştir (tablo 4.34). e/a oranı ile birlikte bor oranının artması ile dönüşüm sıcaklıklarında artışlar meydana gelmiştir (şekil 4.72). $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının M_s sıcaklıklarının bor oranı (atm.%) ile değişimi Şekil 4.73 de verilmiştir. Artan bor oranı ile Ms dönüşüm sıcaklıkları da artmıştır.



Şekil 4.72. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının alaşımlarının 10 °C/dakika tarama hızında alınan DSC eğrileri

Tablo 4.34. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının 10 °C/dak. tarama hızında alınan DSC ölçüm sonuçları

Numune adı	A_s °C	A_p °C	A_f °C	M_s °C	M_p °C	M_f °C	$\Delta H_{ort.}$ (J/g)
$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}$	56,41	61,58	64,50	37,73	35,28	28,84	8.5
$Ni_{44}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_1$	51,84	66,23	73,00	39,54	27,42	1,33	7.09
$Ni_{43}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_2$	66,45	85,04	94,17	50,32	43,82	27,78	10.54
$Ni_{42}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_3$	109,51	129,52	139,11	97,50	85,15	62,43	10.26
$Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$	339,49	365,77	380,78	217,66	204,53	170,85	9.39

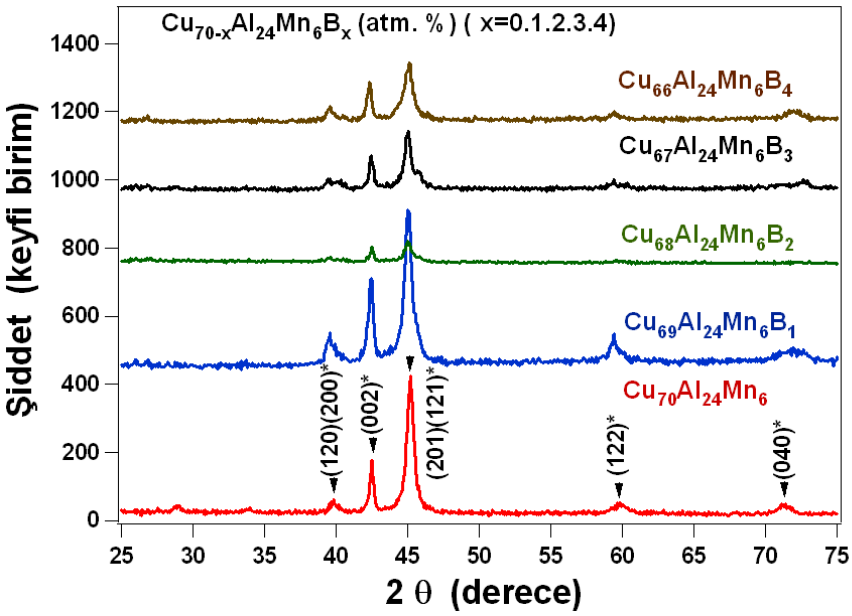


Şekil 4.73. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının M_s sıcaklıklarının bor oranı (atm.%) ile değişimi

4.11.3. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının XRD Analizleri

$Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışını analizleri Rigaku RadB-DMAX II bilgisayar kontrollü X-ışını difraktometresi ile CuK_α (λ=1.5405 Å) radyasyonu kullanılarak ölçümler 2θ= 20-80° arasında 2°/dakika sabit tarama hızında oda sıcaklığında alınmıştır (şekil 4.74). Şekil 4.72 de verilen DSC eğrilerinde görüldüğü gibi $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$ ve $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$ alaşımları oda sıcaklığında austenit fazında olup, $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$, $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımları ise oda sıcaklığına martensit fazındadır.

$Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları oda sıcaklığında γ_1' ortorombik yapıdadırlar (Aydogdu, vd., 2016).



Şekil 4.74. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının X-ışınları difraktogramları

4.11.4. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının SEM-EDX Analizleri

$Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları, 75 ml HCl, 75 ml ethanol, 15 g CuSO4 ve 10 ml saf su dağlama çözeltisi kullanılarak dağlandı. Farklı bölgelerinden alınan EDX analizlerinin ortalama değerleri alınarak atomikçe yüzde olacak şekilde alaşım oranları hesaplanmış ve bulunan değerler tablo 4.35 de verilmiştir.

Şekil 4.75 de örnek olarak $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları verilmiştir. $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$, $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$, $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri de şekil 4.76 da verilmiştir.

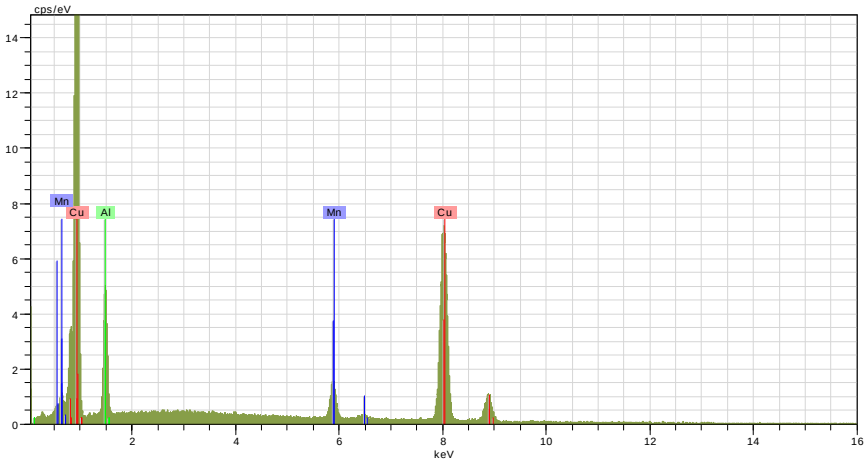
Tablo 4.35 de görüldüğü gibi $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$ ve $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$ alaşımlarının EDX analizi sonuçları ile başlangıç aşamasında hazırlanan alaşım oranları uyum içerisindedir. Ancak $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarında bu uyum gözlenmemektedir. EDX analizinde ölçüm sınırları dışında kaldığı için Bor elementi tespiti yapılamadığından oranlar doğru tespit edilememektedir. Mangan oranı sabit tutulmasına rağmen, normalize edilen datalarda bor oranının artışı ile mangan oranının azaldığı görülmüştür.

Tablo 4.35. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının belirlenen alaşım oranları ile EDX analiz sonucunda bulunan alaşım oranları

Alaşım	Döküme hazırlanan alaşım tozlarının atomik yüzdesi atm.%				EDX analizinden bulunan alaşımların atomik yüzdesi atm.%			
	Cu	**Al**	**Mn**	**B**	**Cu**	**Al**	**Mn**	**B**
$Cu_{70}Al_{24}Mn_6$	70	24	6	0	70,31	23,38	6,30	-
$Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$	69	24	6	1	69,42	24,48	6,08	-
$Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$	68	24	6	2	69,05	24,72	6,21	-
$Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$	67	24	6	3	70,96	26,24	4,12	-
$Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$	66	24	6	4	70,02	26,27	3,70	-



$Cu_{70}Al_{24}Mn_6$



El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Al	13	K-series	9.84	11.26	22.82	0.5
Mn	25	K-series	5.41	6.20	6.17	0.2
Cu	29	K-series	72.13	82.54	71.01	2.0
		Total:	87.38	100.00	100.00	

3

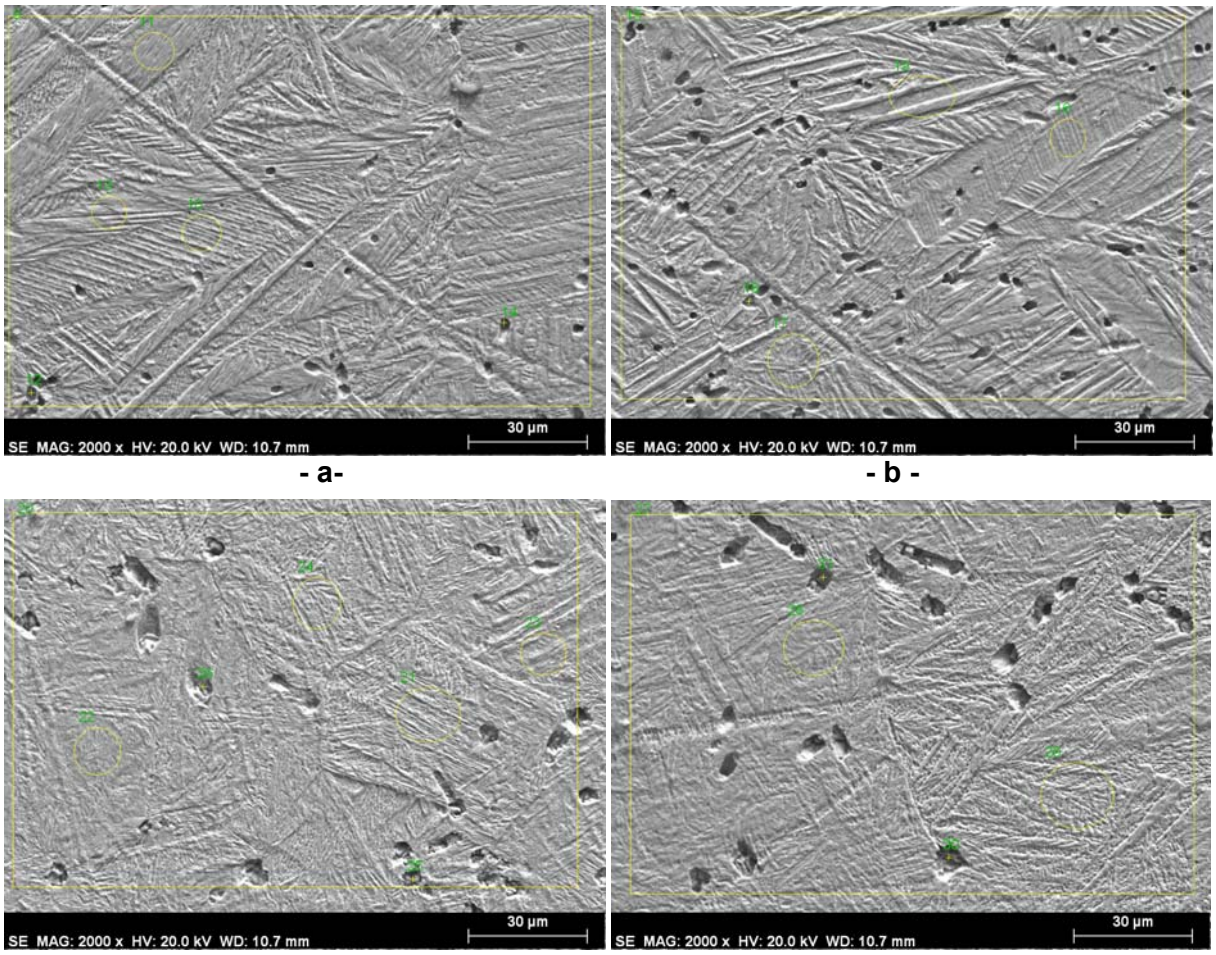
El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Al	13	K-series	10.15	11.57	23.36	0.5
Mn	25	K-series	5.56	6.34	6.29	0.2
Cu	29	K-series	72.03	82.09	70.36	2.0
		Total:	87.75	100.00	100.00	

4

El	AN	Series	unn. C [wt.%]	norm. C [wt.%]	Atom. C [at.%]	Error [%]
Al	13	K-series	9.88	11.93	23.97	0.5
Mn	25	K-series	5.42	6.55	6.46	0.2
Cu	29	K-series	67.50	81.53	69.57	1.9
		Total:	82.80	100.00	100.00	

5

Şekil 4.75. $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$ alaşımının SEM görüntüsü ve EDX analizi sonuçları

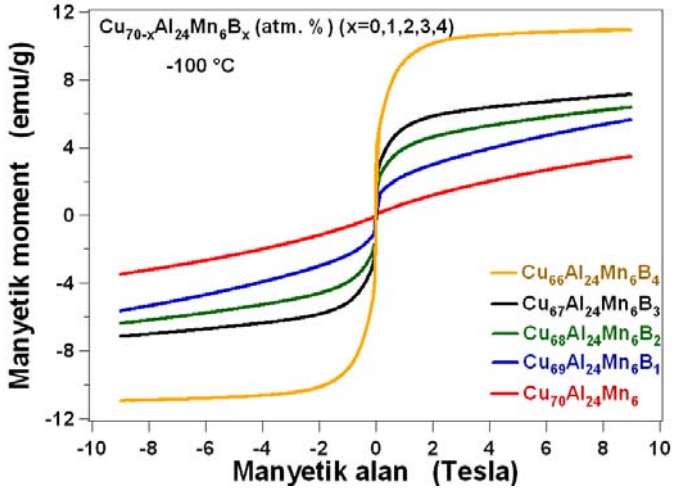


Şekil 4.76. a) $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$, b) $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$, c) $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ ve d) $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarının EDX analizleri alınmış bölgelerinin SEM görüntüleri

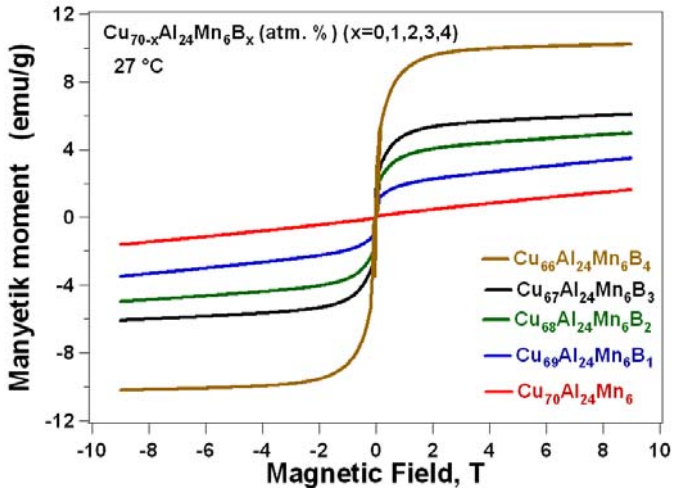
4.11.5. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Manyetik Özelliklerinin İncelenmesi

Atomikçe yüzde olarak verilen $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımları manyetik alan altındaki davranışları "Quantum Design-9T PPMS" sisteminin VSM aparatı ile gerçekleştirildi. Ölçüm alınacak örneklerin kütleleri belirlenerek alaşımların elde edilen manyetik moment değerleri emu/g cinsinden grafiğe aktarıldı.

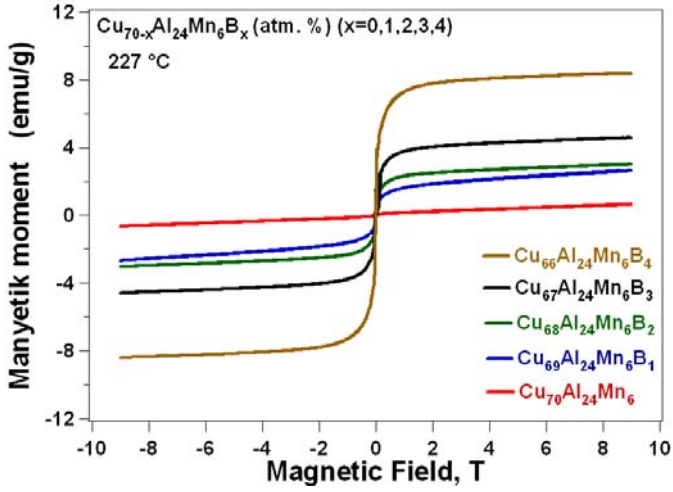
M-H ölçümleri – 9 Tesla ile +9 Tesla (-90 kOe ile +90 kOe) aralığında değişen manyetik alan altında martensit bölgesinde, -100 ^oC de, oda sıcaklığında (27 ^oC) ve tüm numunelerin austenit fazında bulunduğu 227 ^oC sabit sıcaklıklarında alındı (şekil 4.77). Şekil 4.72 de verilen DSC eğrilerinden görüldüğü gibi $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$, $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$ve $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$ alaşımları oda sıcaklığı bölgesinde austenit fazında olup $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımları ise martensit fazındadırlar. $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$ alaşımı hariç $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 1, 2, 3, 4) alaşımları martensit ve austenit fazlarında (-100 ^oC ve 227 ^oC aralığında) ferromanyetik özellik sergilemektedirler. Artan bor oranı ile doyum manyetizasyonu değerleri artmaktadır.



- a-



- b-



- c-

Şekil 4.77. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının a) -100 ^oC a) 27 ^oC, b) 227 ^oC de alınan M-H ölçümleri

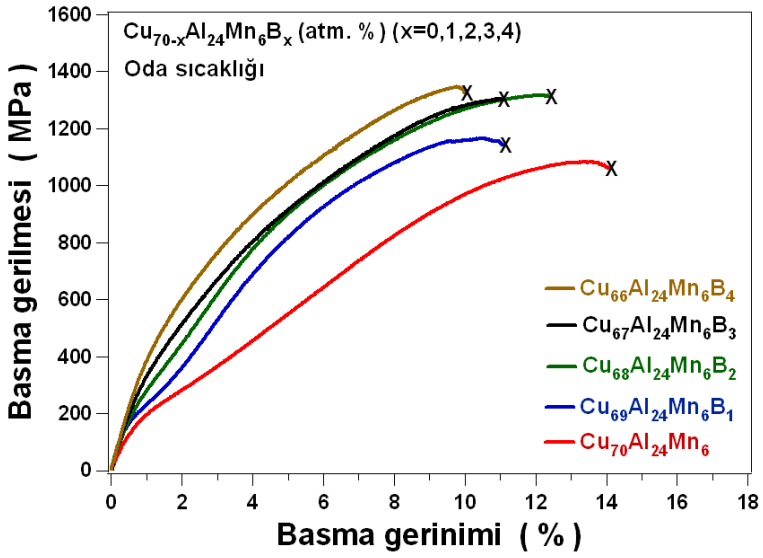
4.11.6. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) Alaşımlarının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

$Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0,1,2,3,4) alaşımlarının mukavemet ve süneklik davranışlarını belirlemek için oda sıcaklığında kırılana kadar basma gerilmesi uygulanarak basma gerilme-gerinim eğrileri elde edildi (şekil 4.78). %1 bor katkısı ile alaşımların mukavemetinin arttığı görüldü. Ancak bor oranı arttıkça mukavemeti (basma gerilmesi) artmasına rağmen sünekliği azalmaktadır.

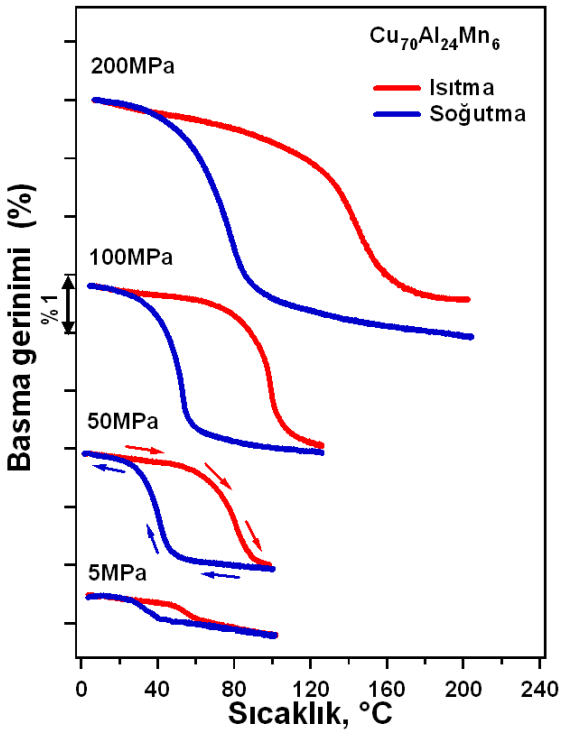
$Cu_{70}Al_{24}Mn_6$, $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarına uygulanan 5, 50, 100, 200, ve 400 MPa sabit basma gerilimleri altında basma gerinimi-sıcaklık ölçümleri yapıldı ve bulunan eğriler şekil 4.79.a-c de verildi. Numuneler sabit basma gerilimleri altında austenit bitiş sıcaklıklarının üzerine kadar ısıtıldı. Alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının uygulanan gerilme ile arttığı gözlendi. $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$, alaşımında martensit başlama sıcaklığı 5 MPa sabit basınç altında 41,1 ^oC olarak ve 200 MPa sabit basınç altında ise 88.38 ^oC olarak bulundu. Uygulanan basınç arttıkça $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$, alaşımında da martensit başlama sıcaklığının arttığı görüldü.

$Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$ ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarının 5 MPa sabit basınç altında martensit başlama sıcaklığının sırasıyla 56 ^oC ve 205 ^oC olarak bulundu.

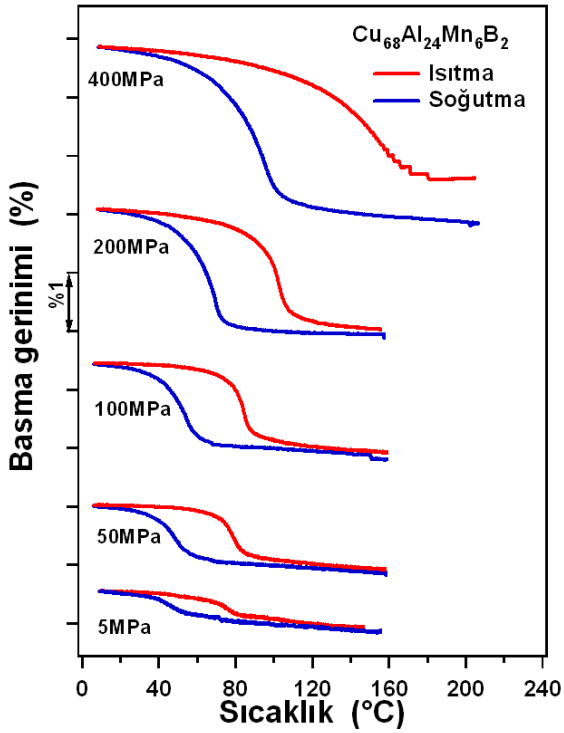
$Cu_{70}Al_{24}Mn_6$, $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$, $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$, $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarının oda sıcaklığına yapılan sertlik ölçümlerinde, alaşımların Vickers sertlikleri sırasıyla 216, 221, 306, 234 ve 250 HV olarak bulundu.



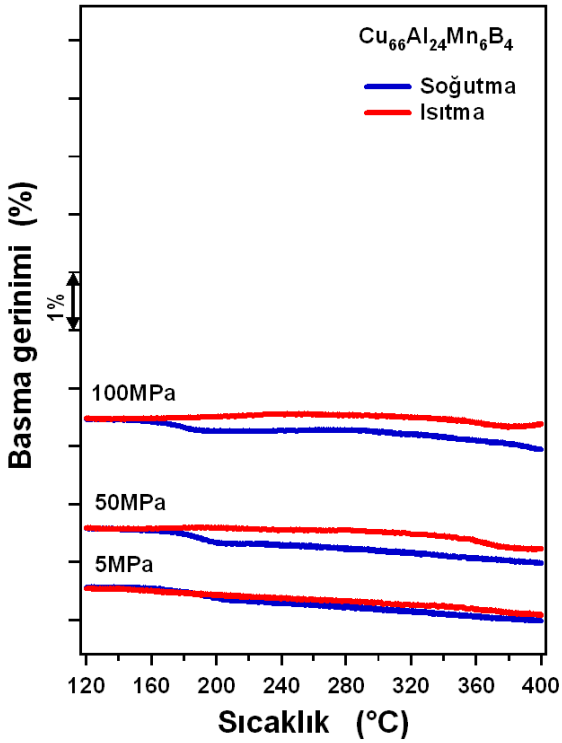
Şekil 4.78. $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarının alaşımlarının oda sıcaklığında gerilme-gerinim eğrisi



- a-



- b-



- c-

Şekil 4.79. a) $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$, b) $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$ ve c) $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımlarının uygulanan sabit basma gerilimleri altında basma gerinimi-sıcaklık eğrileri

5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, NiMn esaslı $Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3), $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3), $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8), $Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4), $Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12), $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4), $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4), $Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4), $Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4), $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımları ile $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımı ark ergitme metodu ile üretildi. Elde edilen ingot şeklindeki alaşımlar yüksek saflıkta (%99.999) argon atmosferi altında (6-70 saat zaman aralıklarında) quartz tüpler içerisinde alaşımların beta faz bölgesini içeren sıcaklıklarda (800-900 ^oC sıcaklıkları arasında) homojenleştirme işlemine tabi tutularak, tuzlu-buzlu suda ani olarak soğutuldular. Üretilen bu alaşımlara bor katkısının etkisi sistematik olarak araştırıldı. Şekil hafızalı alaşımlarda meydana gelen fiziksel değişimlerin alaşım element oranlarına bağlı olduğu gibi, ısıl işlemlere de bağlı olduğu göz önüne alındığında ısıl işlemlerden etkilenmemek için tüm alaşımlar aynı ısıl işlemlere ve ani soğutmalara tabi tutuldular.

Alaşımların austenit ve martensit dönüşüm sıcaklıkları ve kristal yapıları belirlenerek, mekanik ve manyetik özellikleri incelendi. Manyetik analizler M-H ve M-T ölçümleri alınarak yapıldı. NiMn (In, Sn, Sb) bazlı manyetik şekil hafızalı Heusler alaşımlar manyetik alan etkisi ile faz dönüşümü göstermelerinden dolayı yoğun ilgi görmektedirler. Bu alaşımlarda metamanyetik faz dönüşümü için manyetik itici güç Zeeman enerjisi tarafından sağlanmaktadır. İki faz arasındaki manyetizasyon farkı Zeeman enerjisini oluşturmaktadır. Uygulanan manyetik alanın kuvveti ile birlikte Zeeman enerjisi de artar. Zeeman enerjisi yönelime bağlı olmadığından dolayı çok kristalli malzemelerde de Zeeman enerjisi sayesinde manyetik alan etkisi ile şekil hafıza özelliği görülür. Yapılan çalışmalarımızda austenit ve martensit faz durumunda ΔM farkı net ölçülemediğinden Zeeman enerjileri hesaplanamamıştır. Ancak NiMnGaB, NiMnSnB alaşımlarında bor artışı ile manyetik moment değerlerindeki değişimler değerlendirildiğinde bor katkısının Zeeman enerji değerleri üzerinde etkili olduğu söylenebilir. Yapılan çalışmaların çoğunluğunda sayısal değer verilememiştir (Kainuma, vd., 2008; Sterin-Taulats, vd., 2014; Tan, vd., 2017; Gao, vd., 2009).

$Ni_{51}Mn_{28,5}Ga_{20,5-x}B_x$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarında atomikçe Ga oranı azaltılıp bor katkılandığında dönüşüm sıcaklıklarında (A_s, A_f, M_s ve M_f) azalmakta ve martensit fazında bu alaşımların bor oranı artışı ile manyetik moment değerleri artmaktadır. Ayrıca bor oranı artışı ile kırılma gerilimlerinde de artış gözlenmiştir. Ancak %1 bor katkılandığında süneklik %32 lere çıkmasına rağmen bor oranı %2 olduğunda basma gerinimi % 12 lere kadar düşmüştür (Kök, vd., 2014). $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımlarında atomikçe Mn oranı azaltılıp Sn oranı artırıldığında dönüşüm sıcaklıklarında azalma meydana gelmiştir (Aydoğdu, vd., 2016). $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$ alaşımında Ms dönüşüm sıcaklığı 216,83 ^oC den Sn oranı %13 olduğu

durumda 45,48 ^{o}C ye düşmüştür. $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımı oda sıcaklığında austenit fazda, $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{11}$ ve $Ni_{50}Mn_{38}Sn_{12}$ alaşımları ise martensit fazdadırlar. $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10+x}$ (x=0, 1, 2, 3) alaşımları -100 ^{o}C de ferromanyetik özellik sergilemelerine karşın oda sıcaklığı civarında $Ni_{50}Mn_{37}Sn_{13}$ alaşımı hariç paramanyetikliğe daha yatkın oldukları görüldü. Yüksek sıcaklıklarda bu alaşımlar paramanyetik özellik sergilemektedirler. Bor oranının artışı ile süneklikleri ve kırılma gerilmeleri azalmıştır (Aydoğdu, vd, 2014).

$Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımlarında Mn oranı azaltılıp Bor oranının artışı ile dönüşüm sıcaklıklarında azalmalar meydana gelmiş ve manyetik moment değerleri artmıştır(Aydogdu, vd., 2016). -100 ^{o}C de $Ni_{50}Mn_{40}Sn_{10}$, $Ni_{50}Mn_{39}Sn_{10}B_1$ alaşımları zayıf da olsa ferromanyetik özellik sergilemektedirler. Diğer alaşımlar ise yüksek manyetik moment değerlerine sahiptirler. Bor oranı artışı ile manyetik moment değerlerinde artışlar gözlenmiştir. Bor oranının artışı ile $Ni_{50}Mn_{40-x}Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8) alaşımların süneklikleri azalmış ve kırılma gerilmeleri artmıştır.

$Ni_{45}Mn_{40-x}Co_5In_{10+x}$ (x = 0, 2, 4) alaşımlarında Mn oranı azaltılıp In oranı artırıldığında dönüşüm sıcaklıklarında büyük düşüşler gözlenmiştir. $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımındaki düşüş cihazın ölçüm aralığı dışına çıktığı için belirlenememiştir. TMA analizinde de $Ni_{45}Mn_{36}Co_5In_{14}$ alaşımı için ölçüm alınamamıştır.

$Ni_{45}Mn_{38}Co_5In_{12-x}B_x$ (x = 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12) alaşımlarında In oranı azaltılıp Bor oranı artırıldığında dönüşüm sıcaklıklarında büyük artışlar gözlenmiştir. Dönüşüm sıcaklıklarının bor oranının % 10 dan fazla olması durumunda yüksek sıcaklıklara (500 ^{o}C nin üzerine) çıktığı görüldü. Alaşımlarda bor artışının manyetik moment değerlerinde de etkili olduğu bulundu.

$Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarında ise Sb oranının azaltılıp Bor katkılanması ile dönüşüm sıcaklıklarında bor oranının artışına bağlı olarak artışlar meydana gelmiştir. Ancak $Ni_{45}Mn_{40}Fe_5Sb_8B_2$ alaşımının dönüşüm sıcaklıkları bu uyumun dışında kalmıştır. Oda sıcaklığında bu alaşımlar martensit faz bölgesindedirler ve ferromanyetik davranış sergilemektedirler. 350 ^{o}C de bu alaşımlar austenit fazında olup paramanyetik davranış sergiledikleri bulundu. Bu alaşımlarda da martensit-austenit faz geçişi bölgelerinde manyetik moment değerlerinde artışlar gözlendi ve austenit fazı içeren sıcaklıklara çıkıldığında manyetik moment değerlerinde azalış olduğu görüldü.

Bir önceki alaşım elementlerini içeren $Ni_{45-x}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarında ise bu kez Ni oranı azaltılarak Bor katkısı artırıldı. oranı artışı ile dönüşüm sıcaklıklarında artmalar gözlenmekte ancak bor oranı atomikçe %4 olduğu $Ni_{41}Mn_{40}Fe_5Sb_{10}B_4$ alaşımı bunun dışında kalmış ve dönüşüm sıcaklıkları tekrar düşmüştür. Bu alaşımlarda oda sıcaklığında martensit fazında olup, ferromanyetik davranış sergilemektedirler. 350 ^{o}C de bu alaşımlar da austenit fazında olup paramanyetik davranış

sergilemişlerdir. 1 Tesla ve 5 Tesla sabit manyetik alan altında alınan M-T ölçümlerinde dönüşüm sıcaklıkları için yakın değerler bulunmuştur.

$Ni_{49}Mn_{40-x}Co_1Sn_{10}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarında Mn oranı azalıp bor oranının artışı ile dönüşüm sıcaklıklarında azalmalar görülmüştür. $Ni_{49}Mn_{40}Co_1Sn_{10}$ alaşımında M_s sıcaklığı 231,1 ^oC bor oranının artışı ile M_s değeri $Ni_{49}Mn_{36}Co_1Sn_{10}B_4$ alaşımında 88.6 ^oC ye düşmüştür. Bu alaşımlarda oda sıcaklığında martensit fazdadırlar.

$Ni_{50}Mn_{39-x}Sb_{11}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarında Mn oranının azalışı ve bor oranının artışı ile dönüşüm sıcaklıklarında düşüşler meydana gelmiştir. Bor katkısız $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$ alaşımında Ms sıcaklığı 121,1 ^oC iken bor katkılı $Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$ alaşımında Ms sıcaklığı -11.1 ^oC ye düşmüştür. $Ni_{50}Mn_{39}Sb_{11}$, $Ni_{50}Mn_{38}Sb_{11}B_1$ ve $Ni_{50}Mn_{37}Sb_{11}B_2$ alaşımları oda sıcaklığında martensit fazda olmalarına karşın, $Ni_{50}Mn_{36}Sb_{11}B_3$ ve $Ni_{50}Mn_{35}Sb_{11}B_4$ alaşımları oda sıcaklığında austenit fazdadırlar. Bu alaşımların Curie sıcaklıkları 40 ^oC civarında bulunmuştur.

$Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 0, 1, 2, 3, 4, 5) alaşımları oda sıcaklığında martensit fazda olup $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımı oda sıcaklığı civarında austenit fazdadır. Bu alaşımlarda Sb oranı azaltılıp Bor oranı artırıldığında dönüşüm sıcaklıklarında büyük artışlar gözlenmiştir. Bor katkısız $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımının M_s dönüşüm sıcaklığı 49,99 ^oC iken, %5 bor katkılı $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_5B_5$ alaşımının M_s dönüşüm sıcaklığı 307,84 ^oC olmuştur. $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ ve $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$ alaşımları – 100 ^oC de ferromanyetik özellik sergilemektedirler. Bor oranının artışıyla ferromanyetik özellikleri zayıflamakta ve manyetik momentlerinde düşüşler gözlenmektedir. Oda sıcaklığında $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımı ferromanyetik olup, bor katkılı $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10-x}B_x$ (x = 1, 2, 3, 4, 5) alaşımları oda sıcaklığı ve oda sıcaklıklarından yukarı sıcaklıklarda paramanyetik durumdadırlar. 350 ^oC de bu alaşımlar da austenit fazında olup paramanyetik özellik sergilemektedirler. Oda sıcaklığında martensit fazında bulunan alaşımlarda bor oranının artışı ile mukavemetin arttığı görülmektedir. Ancak $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_{10}$ alaşımı oda sıcaklığına austenit fazında olduğundan $Ni_{45}Mn_{40}Co_5Sb_9B_1$ alaşımından daha yüksek mukavemete sahip olmaktadır.

$Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x =0, 1, 2, 3, 4) alaşımlarında manyetik moment ve doyum mantetizasyonu değerlerinde bor artışı ile büyük artışlar gözlenmiştir (Aydoğdu, vd., 2016). $Cu_{70}Al_{24}Mn_6$ alaşımı martensit ve austenit fazlarında paramanyetikliğe yakın manyetik davranış sergiler iken, bor katkılanması ile $Cu_{70-x}Al_{24}Mn_6B_x$ (x =1, 2, 3, 4) alaşımlarında martensit ve austenit fazlarının her ikisinde de doyum maynetizasyonu gözlenmiştir. Bu alaşım bor katkısı ile martensit ve austenit fazlarında da ferromanyetik özellik sergilemiştir. Curie sıcaklıkları $Cu_{69}Al_{24}Mn_6B_1$, $Cu_{68}Al_{24}Mn_6B_2$, $Cu_{67}Al_{24}Mn_6B_3$ ve $Cu_{66}Al_{24}Mn_6B_4$ alaşımıda sırasıyla 273,4 ^oC, 272,8 ^oC, 271,2 ^oC ve 318 ^oC olarak bulundu. Tüm alaşımlar bu sıcaklıkta austenit fazındadır.

Yapılan çalışmalar sonucunda, NiMn esaslı ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlara veya diğer şekil hafızalı alaşımlara bor katkılanarak ısıl işlemlerden bağımsız olarak alaşımların dönüşüm sıcaklıkları (A_s, A_f, M_s ve M_f), manyetik ve mekanik özelliklerinde kontrollü değişimler yapılabildi. Düşük sıcaklık veya yüksek sıcaklık şekil hafızalı alaşımlar ile yüksek manyetik momente sahip şekil hafızalı alaşımlar elde etmek için bor katkılanarak istenilen dönüşüm sıcaklıklarına sahip yeni tür şekil hafızalı alaşımların elde edilebileceği ve bu alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının, manyetik ve mekanik özelliklerinin bor katkısı ile kontrol edilebileceği görüldü.

6. KAYNAKLAR

Akkera, H. S., Choudhary, N. ve Kaur, D. 2015. "Martensitic phase transformations and magnetocaloric effect in Al co-sputtered Ni–Mn–Sb alloy thin films", Materials Science and Engineering: B, 198, 113-119.

Albertini, F., Morellan, L., Algarabel, P. A., Ibarra, M. R., Pareti, L., Arnold, Z. ve Calestani, G. 2001. "Magnetoelastic effects and magnetic anisotropy in Ni2MnGa polycrystals", Journal of Applied Physics, 89(10), 5614-5617.

Aydoğdu, Y., Turabi, A. S., Kok, M., Aydogdu, A., Yakinci, Z.D., Aksan, M.A., Yakinci, M.E. ve Karaca, H. E. 2016-a. "The effect of Sn content on mechanical, magnetization and shape memory behavior in NiMnSn alloys", Journal of Alloys and Compounds, 683,339-345.

Aydogdu, Y., Turabi, A. S., Aydogdu, A., Kok, M., Yakinci, Z.D. ve Karaca, H. E. 2016-b. "The effects of Boron addition on the magnetic and mechanical properties of NiMnSn shape memory alloys", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 126, 399-406.

Aydogdu, Y., Turabi, A.S., Aydogdu, A., Vance, E.D., Kök, M., Kirat, G. ve Karaca, H.E. 2016-c. "The effects of substituting B for Cu on the magnetic and shape memory properties of CuAlMnB alloys", Applied Physics A, Materials Science &Processing, (122), 687, 1-8.

Aydoğdu, Y., Kürüm, F., Kök, M., Yakıncı, Z. D. ve Aydoğdu, A. 2014. "Thermal properties, microstructure and microhardness of Cu-Al-Co shape memory alloys system", Transactions of the Indian Institute of Metals, 67, 595-600.

Aydoğdu, Y., Turabi, A. S., Kök, M., Aydoğdu, A., Tobe, H. ve Karaca, H. E. 2014. "Effects of the substitution of Gallium with Boron on the physical and mechanical properties of Ni-Mn-Ga shape memory alloys", Applied Physics A- Materials Science&Processing, 117, 2073–2078.

Barnsley, L.C. 2012. "Exchange bias in manganese alloys with mixed magnetic behaviour", Griffith University, PhD Thesis.

Chattopadhyay, M.K., Sharma, V.K. ve Roy, S.B. 2008. "Thermomagnetic history dependence of magnetocaloric effect in $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$", Applied Physics Letters, 92(2), 022503.

Deltell, A., Escoda, L., Saurina, J. ve Suñol, J. J. 2015. "Martensitic Transformation in Ni-Mn-Sn-Co Heusler Alloys", Metals, 5 (2), 695-705.

Elwindari, N. ve Manaf, A. 2016. "Synthesize and microstructure characterization of $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$ Heusler alloy", AIP Conference Proceedings, 1746, 020016, 1-4.

Elwindari, N., Kurniawan, B., Kurniawan, C. ve Manaf, A. 2017. "Microstructure and Magnetic Properties of Optimally Annealed $Ni_{43}Mn_{41}Co_5Sn_{11}$Heusler Alloy", IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 196, 012019.

Feng, W. J.,Zuo, L., Li, Y. B., Wang, Y. D., Gao, M. ve Fang, G. L. 2011. "Abnormal e/a-dependence of TM and large inverse magnetocaloric effect in $Ni_{49-x}Cu_xMn_{39}Sb_{12}$ alloys", Materials Science and Engineering: B, 176, 621-625.

Gao, B., Shen, J., Hu, F.X., Wang, J., Sun, J.R. ve Shen, B.G. 2009. "Magnetic properties and magnetic entropy change in Heusler alloys $Ni_{50}Mn_{35-x}Cu_xSn_{15}$", Appl Phys A, 97, 443-447.

Gautam, B. R., Dubenko, I., Pathak, A. K., Stadler, S. ve Ali, N. 2009. "The structural and magnetic Properties of $Ni_2Mn_{1-x}B_xGa$ Heusler Alloys", Journal of Magnetizm and Magnetic Materials, 321, 29-33.

Goryczka, T., Lelatko, J., Górka-Kostrubiec, B., Ochin, P. ve Morawiec, H. 2008. "Martensitic Transformation in Melt Spun Ni-Mn-Ga Ribbon", The European Physical Journal Special Topic, 131-136.

Ito, W., Imano, Y., Kainuma, R., Sutou, Y., Oikawa, K. ve Ishida, K. 2007. "Martensitic and magnetic transformation behaviors in Heusler-type NiMnIn and NiCoMnIn metamagnetic shape memory alloys", Metallurgical and Materials Transactions A, 38, 759-766.

Han, Z, D., Wang, D. H., Zhang, C. L., Xuan H. C., Zhang, J. R., Gu, B. X. ve Du,Y. W. 2008. "The phase transitions, magnetocaloric effect, and magnetoresistance in Co doped Ni–Mn–Sb ferromagnetic shape memory alloys", Journal Of Applıed Physıcs, 104, 053906.

Heczko O. ve Straka, L. 2004. "Magnetic properties of stress-induced martensite and martensitic transformation in Ni-Mn-Ga magnetic shape memory alloy", Materials Science and Engineering: A, 378, 394-398.

Huang, Y., J., Hu, Q. D., Bruno, N. M., Chen, J. H., Karaman, I., Ross, J. H. ve Li, J. G. 2015. "Giant elastocaloric effect in directionally solidified Ni–Mn–In magnetic shape memory alloy", Scripta Materialia, 105, 42-45.

Kainuma, R., Imano, Y., Ito, W., Sutou, Y., Morito, H., Okamoto, S., Kitakami, O., Oikawa, K., Fujita, A., Kanomata, T. ve Ishida, K. 2006. "Magnetic-field-induced shape recovery by reverse phase transformation", Nature, 439, 957-960.

Kainuma, R., Imano, Y., Ito, W., Morito, H., Sutou, Y., Oikawa, K., Fujita, A., Ishida, K., Okamoto, S., Kitakami, O. ve Kanomata, T. 2006. "Metamagnetic shape memory effect in a Heusler-type $Ni_{43}Co_{7}Mn_{39}Sn_{11}$ polycrystalline alloy", Applied Physics Letters, 88, 192513.

Kainuma, R., Oikawa, K., Ito, W., Sutou, Y., Kanomata, T. ve Ishida, K. 2008. "Metamagnetic shape memory effect in NiMn-based Heusler-type alloys", Journal of Materials Chemistry, 18, 1837-1842.

Kainuma, R. vd. 2008. "The Ni-Mn-Based Metamagnetic Shape Memory Alloys", International Conference on Martensitic Transformations.

Karaca, H.E., Karaman, I., Basaran, B., Chumlyakov, Y. I. ve Maier, H. J. 2006. "Magnetic field and stress induced martensite reorientation in NiMnGa ferromagnetic shape memory alloy single crystals", Acta Materialia, 54, 233-245.

Karaca, H.E., Karaman, I., Basaran, B., Lagoudas, D. C., Chumlyakov, Y. I. ve Maier, H. J. 2007. "On the Stress-Assisted Magnetic Field-Induced Phase Transformation in Ni_2MnGa Ferromagnetic Shape Memory Alloys", Acta Materialia, 55, 4253-4269.

Karaca, H.E. 2009. "Magnetic Field-Induced Martensitic Phase Transformation in NiMnCoIn Ferromagnetic Shape Memory Alloys", Advanced Functional Materials, 19(7), 983-998.

Karaman, I., Karaca, H.E., Basaran, B., Lagoudas, D. C., Chumlyakov, Y. I. ve Maier, H. J. 2006. "Stress-assisted reversible magnetic field-induced phase transformation in Ni_2MnGa magnetic shape memory alloys", Scripta Materialia, 55, 403-406.

Kök, M. ve Aydoğdu, Y. 2013-a. "Effect of composition on the thermal behavior of NiMnGa alloys", Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 113, 859-863.

Kök, M. ve Aydoğdu, Y. 2013-b. "A Comparative study on Thermal and Microstructural Properties of Different Types of NiMnGa Magnetic Shape Memory Alloys", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 26, 1697-1701.

Kök, M. ve Aydoğdu, Y. 2013-c. "Electron Concentration Dependence of Phase Transition and Magnetic Properties in NiMnGa Alloys", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 26, 1691-1696.

Kök, M. ve Aydoğdu, Y. 2013-d. “Effect of Heat Treatment On the Physical Properties of Ni-Mn-Ga Alloy”, Thermochimica Acta, 548, 51-55.

Kök, M., Yakıncı, Z.D., Aydogdu, A. ve Aydogdu, Y. (2014). “Thermal and magnetic properties of $Ni_{51}Mn_{28.5}Ga_{19.5}B$ magnetic-shape-memory alloy”, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 115, 555-559.

Kök, M., Pirge, G. ve Aydoğdu, Y. 2013. “Isothermal oxidation study on NiMnGa ferromagnetic shape memory alloy at 600-1000 degrees”, C . Applied Surface Science, 268, 136-140.

Krenke, T., Duman, E., Acet, M., Wassermann, E. F., Moya, X., Mañosa, L. ve Planes, A. 2005. “Inverse magnetocaloric effect in ferromagnetic Ni-Mn-Sn alloys”, Nature Materials, **4**, 450-454.

Krenke, T., Duman, E., Acet, M., Wassermann, E. F., Moya, X., Mañosa, L., Planes, A., Suard, E. ve Ouladdiaf, B. 2007. Magnetic superelasticity and inverse magnetocaloric effect in Ni-Mn-In. Physical Review B, (2007), 75, 104414.

Krenke, T., Duman, E., Acet, M., Moya, X., Mañosa, L. ve Planes, A. 2007. “Effect of Co and Fe on the inverse magnetocaloric properties of Ni-Mn-Sn”, Journal of Applied Physics, 102, 033903.

Kushwaha, V., Sharma, H., Dixit, D. K., Tulapurkar, A. ve Tomy, C. V. 2014. “Substitution Effect on Magnetic and Electrical Properties of Half-Heusler Alloy $Ni_{1-x}Co_xMn_{1-y}Fe_ySb$”, AIP Conference Proceedings, 1591, 1612-1614.

Lu, B. ve Liu, J. 2017. “Elastocaloric effect and superelastic stability in Ni–Mn–In–Co polycrystalline Heusler alloys: hysteresis and strain-rate effects”, Scientific reports, 7, 2084.

Luo, H., Fanbin, M., Jiang, Q., Liu, H., Liu, E., Wub, G, Wang, Y., (2010) “Effect of boron on the martensitic transformation and magnetic properties of Ni50Mn36.5Sb13.5xBx alloys” Scripta Materialia 63, 569–572.

Ma, S. C., Shih, C, W., Liu, J., Yuan, J. H., Lee, S. Y., Lee, Y. I., Chang, H. W. ve Chang, W. C. 2015. “Wheel speed-dependent martensitic transformation and magnetocaloric effect in Ni–Co–Mn–Sn ferromagnetic shape memory alloy ribbons”, Acta Materialia, 90, 292-302.

Mañosa, L., Planes, A., Acet, M., Duman, E. ve Wassermann, E. F. 2004. “Magnetic shape memory in Ni-Mn-Ga and Ni-Mn-Al”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 272-276, 2090-2092.

Moya, X., Mañosa, L., Planes, A., Krenke, T., Acet, M. ve Wassermann, E. F. 2006. “Martensitic transition and magnetic properties in Ni-Mn-X alloys”, Materials Science and Engineering A, 438-440, 911-915.

Moya, X., Mañosa, L., Planes, A., Krenke, T., Acet, M., Garlea, V. O., Lograsso, T. A., Schlagel, D. L. ve Zarestky, J. L. 2006. “Lattice dynamics and phonon softening in Ni-Mn-Al Heusler alloys”, Physical Review B, 73(6), 064303.

Moya, X., Mañosa, L., Planes, A., Krenke, T., Acet, M., Wassermann, E. F., Morin, M., Garlea, V. O., Lograsso, T. A. ve Zarestky, J. L. 2008. “Lattice dynamics of Ni-Mn-Al Heusler alloys”, Materials Science and Engineering: A, 481-482, 227-230.

Marioni, M.A., O’Handley, R.C., Allen, S.M., Hall, S.R., Paul, D.I., Richard, M.L., Feuchtwanger J., Peterson,B.W., Chambers, J.M. ve Techapiesancharoenkij, R. 2005. “The ferromagnetic shape-memory effect in Ni-Mn-Ga”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 290-291, 35-41.

Mathur, R.P., Singh, R. K., Ray, S., Ghosal, P. ve Chandrasekaran, V. 2012. “Effect of Trivalent Additions and Processing on Structural and Magnetic Transitions in Ni-Mn-Ga Ferromagnetic Shape Memory Alloys”, Defence Science Journal, 62, 252-260.

Murray, S.J., Marioni, M., Allen, S.M. ve O’Handley, R.C. 2000. “6% magnetic-field-induced strain by twin-boundary motion in ferromagnetic Ni-Mn-Ga”, Applied Physics Letters, 77, 886-888.

Nong, N.V., Tai, L.T., Huy, N.T., Trung, N.T., Bahl, C.R.H., Venkatesh, R., Poulsen, F.W. ve Pryds, N. 2011. “Structural, magnetic and magnetocaloric properties of Heusler alloys $Ni_{50}Mn_{38}Sb_{12}$ with boron addition”, Materials Science and Engineering B: 176,1322–1325.

O'Handley, R.C. 1998. “Model for strain and magnetization in magnetic shape-memory alloys”, Journal Applied Physics, 83, 3263-3270.

O'Handley, R.C. 2000. Modern Magnetic Materials: Principles and Applications. New York: John Wiley & Sons.

Prusika, K., Matyjaa,E., Zubkoa, M., Kubisztala, M. and Chrobak, A. 2015. “Effect of the Boron Addition on the Structure of the Ni–Mn–Co–In Alloys”, Acta Physıca Polonıca A, 130, 1023-1025.

Ramudu, M., Kumar, A. S. ve Seshubai, V. 2012. “Influence of boron addition on the microstructure, structural and magnetic properties of $Ni_{53.5}Mn_{26.0}Ga_{20.5}$ alloy” Intermetallics, 28, 51-57.

Ryba, T., Vargova, Z., Varga, R., Ilkovic, S., Reiffers, M., Haskova V., Szabo, P., Kravcak, J. ve Gyepes, R. 2014. “Structural and Magnetic Characterization of NiMnSb Half-Heusler Alloy Prepared by Rapid Quenching”, Acta Physica Polonica Series A, 126, 206-207.

Sanguinetti Ferreira, *R.A.,* Rocha Lima, E.P., Aquino Filho, A., de Quadros, N.F., Olimpio de Araújo, O. ve Yadava, Y.P. 2000. “Microestrutural Evolution in a CuZnAl Shape Memory Alloy: Kinetics and Morphological Aspects”, Materials Research, 3(4), 119-123.

Sahoo, R., Nayak, A. K., Suresh, K. ve Nigam, A. 2011-a. “Effect of Si and Ga substitutions on the magnetocaloric properties of NiCoMnSb quaternary Heusler alloys”, Journal of Applied Physics, 109, 07A921.

Sahoo, R., Nayak, A. K., Suresh, K. ve Nigam, A. 2011-b. “Effect of Fe substitution on the magnetic, transport, thermal and magnetocaloric properties in $Ni_{50}Mn_{38-x}Fe_xSb_{12}$ Heusler alloys”, Journal of Applied Physics, 109 (12), 123904.

Sahoo, R., Kumar, D. M. R., Babu, D. A., Suresh, K. G., Nigam, A. K. ve Raja, M. M. 2013. “Effect of annealing on the magnetic, magnetocaloric and magnetoresistance properties of Ni-Co-Mn-Sb melt spun ribbons”, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 347, 95-100.

Sharma, V.K., Chattopadhyay, M.K. ve Roy, S.B. 2007. “Large inverse magnetocaloric effect in $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$”, Journal of Physics D: Applied Physics, 40(7), 1869-1873.

Sharma, V.K., Chattopadhyay, M.K.,Ganguli, T., Tiwari, P., ve Roy, S.B., 2007. “Magnetocaloric effect in heusler alloys $Ni_{50}Mn_{34}In_{16}$ and Ni50Mn34Sn16”, Journal of Physics-Condensed Matter, 19(49), 496207.

Sozinov, A., Likhachev, A.A., Lanska, N., ve Ullakko, K., 2002. “Giant magnetic-field-induced strain in NiMnGa seven-layered martensitic phase”, Applied Physics Letters, 80(10), 1746-1748.

Sozinov, A., Likhachev, A.A., Lanska, N., Söderberg, O., Ullakko, K. veLindroos, V.K., 2004. “Stress- and magnetic-field-induced variant rearrangement in Ni-Mn-Ga single crystals

with seven-layered martensitic structure", Materials Science and Engineering A, 378, 399-402

Söderberg, O., Ge, Y., Heczko, O., ve Hannula, S.P., 2008. "Ni-Mn-Ga multifunctional compounds. Materials Science and Engineering A, (481-482), 80-85.

Stern-Taulats,E., , Castillo-Villa, P. O., Mañosa, L., Frontera, C., Pramanick, S., Majumda, S. ve Planes, Antoni. 2014. "Magnetocaloric effect in the low hysteresis Ni-Mn-In metamagnetic shape-memory Heusler alloy", Journal of Applied Physics, 115, 173907.

Suziki, Y. vd. 1998. "Effects of boron addition on microstructure and mechanical properties of Ti-Td-Ni high-temperature shape memory alloys", Materials Letters, 36, 85-94.

Tan, Changlong, Zhipeng Tai, Kun Zhang, Xiaohua Tian, and Wei Cai. 2017,"Simultaneous enhancement of magnetic and mechanical properties in Ni-Mn-Sn alloy by Fe doping." Scientific Reports, (7), 43387.

Tanaka, Y., Oikawa, K., Sutou, Y., Omori, T., Kainuma, R. ve Ishida, K.,. 2006. "Martensitic Transition and superelasticity of Co-Ni-Al ferromagnetic Shape memory Alloys with β+γ two-phase structure", Materials Science and Engineering, 1054-1060.

Thamburaja, P., Nikabdullah, N., A. 2009. "Macroscopic Constitutive Model For Shape Memory Alloys: Theory and Finite –Element Simulations", Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., 1074-1086.

Turabi, A. S., Karaca, H. E., Tobe, H., Basaran , B., Aydogdu ,Y. and Chumlyakov, Y. I. (2016). "Shape Memory Effect and Superelasticity of NiMnCoIn Metamagnetic Shape Memory Alloys under High Magnetic Field", Scrıpta Materıalia, 111, 110-113.

Ullakko K., Huang, J.K., Kantner, C. ve O'Handley, R.C. 1996. "Large magnetic-field-induced strains in Ni_2MnGa single crystals", Applied Physics Letters, 69 (13), 1966-1968.

Wang, W., Yu, J., Zhai, Q., Luo, Z. ve Zheng, H. 2013. "Co-doping effect on the martensitic transformation and magnetic properties of $Ni_{49}Mn_{39}Sn_{12}$ alloy", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 346, 103-106

Wang, Y.D., Huang, E.W., Ren, Y., Nie, Z.H., Wang, G., Liu, Y.D., Deng, J.N., Choo, H., Liaw, P.K., Brown, D.E. ve Zu, L. 2008. "In situ high-energy X-ray studies of magnetic-field-induced phase transition in a ferromagnetic shape memory Ni-Co-Mn-In alloy", Acta Materialia, 56(4), 913-923.

Xuan, H.C., Wang, D. H., Zhang, C. L., Han, Z. D., Gu, B. X. ve Du, Y. W. 2008. "Boron 's Effect on Martensitic Transformation and Magnetocaloric Effect in $Ni_{43}Mn_{46}Sn_{11}B_x$ alloys", Applied Physics letters, 92(10), 102503.

Xuan, H. C., Y. Q. Zhang, H. Li, P. D. Han, D. H. Wang, and Y. W. Du. 2015, "The martensitic transformation and magnetic properties in Ni50− xFexMn32Al18 ferromagnetic shape memory alloys." Applied Physics A, 119, (2) 597-602

Yujin, H., Hu, Q.D., Liu, J., Zeng, L., Zhang, D.F. ve Li, J.G. 2013. "Banded-like morphology and martensitic transformation of dual-phase Ni–Mn–In magnetic shape memory alloy with enhanced ductility", Acta Materialia, 61, Issue 15, 5702-5712.

Zeyu, Z., Yi, L., Jingfang, D., Peng, H., Guangheng, W. ve Yongqin, C. 2006. "Magnetocaloric Effect of $Ni_{56}Mn_{18.8}Ga_{24.5}Gd_{0.7}$ Alloy", Journal of Rare Earths, 24, Issue 5, 579-581.

Zhang, X., Liu, Q., Zeng, X., Sui, J., Cai, W., Wang, H. ve Feng, Y. 2016. "Microstructure, mechanical properties and shape memory effect of Ni–Mn–Ga–B high-temperature shape memory alloy", Intermetallics, 68, 113-117.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. YILDIRIM AYDOĞDU
Proje No:	113F234
Proje Başlığı:	Bor Katkılı Polikristal Metamanyetik Şekil Hafızalı Alaşımların Üretimi, Karakterizasyonu Ve Teknolojik Uygulamaları
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	MEDİHA KÖK, MEHMET ALİ AKSAN, AYŞE AYDOĞDU, ZEHRA DENİZ YAKINCI, MEHMET EYYUPHAN YAKINCI
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	GAZİ Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2014 - 01/09/2017
Onaylanan Bütçe:	489150.0
Harcanan Bütçe:	436844.44
Öz:	Ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlar şekil hafıza ve ferromanyetik özelliklerin birleştiği malzemeler sınıfında olup mühendislikte ve teknolojide geniş kullanım alanları bulunmaktadır. Bu alaşımlar uygulanan manyetik alan, zor ve sıcaklığa karşı tepki verdiklerinden akıllı sistemlerde, algılayıcı ve transdüserlerde kullanılmaktadırlar. Son zamanlarda yapılan araştırmalarda, ferromanyetik şekil hafızalı alaşımların yeni bir sınıfı olan NiMn-temelli Heusler tipi polikristal metamanyetik şekil hafızalı alaşımlar, NiMnGa sistemlerinde Ga yerine In, Al, Sn veya Sb gibi bazen de Co elementi kullanılarak ortaya çıkarılmıştır. Ferromanyetik alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarda bor katkılı çalışmalar bulunmasına rağmen bor katkısının NiMn sistemleri üzerine etkisi sistematik olarak araştırılmamıştır. Bu çalışmada, NiMn esaslı Ni51Mn28,5Ga20,5-xBx (x=0,1,2,3), Ni50Mn40-xSn10+x (x=0,1,2,3), Ni50Mn40-xSn10Bx (x=0,1,2,3,4,6,8), Ni45Mn40-xCo5In10+x (x=0,2,4), Ni45Mn38Co5In12-xBx (x=0,2,4,6,8,10,12), Ni45Mn40Fe5Sb10-xBx (x=0,1,2,3,4), Ni45-xMn40Fe5Sb10Bx (x=0,1,2,3,4), Ni49Mn40-xCo1Sn10Bx (x=0,1,2,3,4), Ni50Mn39-xSb11Bx (x=0,1,2,3,4), Ni45Mn40Co5Sb10-xBx (x=0,1,2,3,4,5) alaşımları ile Cu70-xAl24Mn6Bx (x=0,1,2,3,4) alaşımı ark ergitme metodu ile üretildi. Elde edilen ingot şeklindeki alaşımlar yüksek saflıktaki argon gazı atmosferi altında alaşımların beta faz bölgesini içeren sıcaklıklarda homojenleştirme işlemine tabi tutularak, tuzlu-buzlu suda ani olarak soğutuldular. Şekil hafızalı alaşımlarda meydana gelen fiziksel değişimlerin alaşım element oranlarına bağlı olduğu gibi, ısıl işlemlere de bağlı olduğu göz önüne alındığında ısıl işlemlerden etkilenmemek için tüm alaşımlar aynı ısıl işlemlere ve ani soğutmalara tabi tutuldular. Elde edilen bor katkılı alaşımların termal (dönüşüm ve Curie sıcaklıkları), yapısal, manyetik ve mekanik özellikleri incelendi ve bor katkısının etkisi sistematik olarak araştırıldı. Yapılan çalışmalar sonucunda, NiMn esaslı ferromanyetik şekil hafızalı alaşımlara veya diğer şekil hafızalı alaşımlara bor katkılanarak ısıl işlemlerden bağımsız olarak alaşımların dönüşüm (As, Af, Ms ve Mf) ve Curie sıcaklıklarında, manyetik ve mekanik özelliklerinde kontrollü değişimler yapılabildi. Bor katkılanarak istenilen dönüşüm sıcaklıklarına ve yüksek manyetik momente sahip yeni tür şekil hafızalı alaşımların elde edilebileceği bulundu. Bu alaşımların dönüşüm sıcaklıklarının, manyetik ve mekanik özelliklerinin bor katkısı ile kontrol edilebileceği görüldü.
Anahtar Kelimeler:	NiMn esaslı alaşımlar, Heusler alaşımları, Basma gerilmesi-gerinimi, Termal ve manyetik özellikler
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- The effects of substituting B for Cu on the magnetic and shape memory properties of CuAlMnB alloys (Makale - İndeksli Makale), 2- The effect of Sn content on mechanical, magnetization and shape memory behavior in NiMnSn alloys (Makale - İndeksli Makale), 3- The effects of boron addition on the magnetic and mechanical properties of NiMnSn shape memory alloys (Makale - İndeksli Makale), 4- Effect of B Element Ratio on Thermal Properties of NiMn40Fe5Sb10-XBx Alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 5- Ageing Temperature and Ageing Time Effects on Thermal Properties of CuAlCr Shape Memory Alloy (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 6- Effect of B Element Ratio on Thermal Properties of NiMn40Co5Sb10-xBx Alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 7- Shape Memory Effect and Superelasticity of NiMnCoIn Metamagnetic Shape Memory Alloys under High Magnetic Field (Makale - İndeksli Makale), 8- Shape memory effect and superelasticity of NiMnCoIn metamagnetic shape memory alloys under high magnetic field (Makale - Diğer Hakemli Makale), 9- The change of transformation temperature on NiTi shapememory alloy by pressure and thermal ageing (Makale - Diğer Hakemli Makale), 10- The effects of thermal procedure on transformationtemperature, crystal structure and microstructure of Cu-Al-Co shape memory alloy (Makale - Diğer Hakemli Makale), 11- Shape Memory Effect and Superelasticity of NiMnCoIn Metamagnetic Shape Memory Alloys under High Magnetic Field (Makale - Diğer Hakemli Makale), 12- Effects of the substitution of gallium with boron on the physical and mechanical properties of Ni-Mn-Ga shape memory alloys (Makale - Diğer Hakemli Makale), 13- The Oxidation Behavior of NiTi Based Shape Memory Alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 14- The Investigation of Thermal Properties of NiMnCoIn Shape Memory Alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 15- Effect of Boron Addition on Thermal Properties of NiMnCoInB Polycrystalline Shape Memory Alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 16- Effect of Cr Addition on Martensitic Transformation in High Temperature CuAl based Shape Memory Alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 17- The change of transformation temperature on NiTi shape memory alloy by pressure and thermal ageing (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 18- The effects of thermal procedure on transformation temperature, crystal structure and microstructure of Cu-Al-Co shape memory alloy (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 19- The effects of composition on the magnetization and shape memory behavior of NiMnSn alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 20- Effects of boron addition on the physical properties of CuAlMn shape memory alloys (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),

TÜBİTAK