

## FeMnSi ve FeMnSiCr Şekil Hafızalı Alaşımı Üzerinde Doğal Yaşlanmanın Etkisi

Ş. Nevin Balo <sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ/Türkiye  
<sup>1</sup> nbalo@firat.edu.tr

(Geliş/Received: 03/02/2021;

Kabul/Accepted: 15/02/2021)

**Öz:** Bu çalışmada (ağırlıkça %) Fe-30Mn-6Si ve Fe-30Mn-6Si-5Cr şekil hafızalı alaşımı kullanıldı. Yaşlanmamış ve oda sıcaklığında doğal yaşlanmış şekil hafızalı alaşım numunelerinin diferansiyel tarama kalorimetre (DSC) ve X-ışını difraksiyon (XRD) ölçümleri yapıldı. DSC ölçümleri ile şekil hafıza etkisi belirlendi ve aktivasyon enerjileri hesaplandı. XRD ölçümleri ile FeMnSi ve FeMnSiCr alaşım numunelerinin yaşlanma ile meydana gelen yapısal değişimleri incelendi. Ayrıca, Cr elementinin yaşlanma üzerindeki etkisi belirlendi.

**Anahtar Kelime:** Şekil hafıza etkisi, yaşlanma, aktivasyon enerjisi, X-ışını difraksiyonu.

### Effect of Natural Aging on FeMnSi and FeMnSiCr Shape Memory Alloy

**Abstract:** In this study, (weight %) Fe-30Mn-6Si ve Fe-30Mn-6Si-5Cr shape memory alloy was used. Differential scanning calorimetry (DSC) and X-ray diffraction (XRD) measurements were performed on the un-aged and naturally aged shape memory alloy samples at room temperature. The shape memory effect was determined by DSC measurements and activation energies were calculated. Structural changes of FeMnSi and FeMnSiCr alloy samples due to aging were investigated by XRD measurements. Also, the effect of Cr element on aging was determined.

**Key words:** Shape memory effect, aging, activation energy, X-ray diffraction.

#### 1. Giriş

Şekil hafıza etkisi martensitik dönüşümle ilişkili bir olgudur. İşlevsel bir özellik olan şekil hafıza etkisi, martensit durumunda deformasyonu takiben malzeme austenit faz bitiş sıcaklığının ( $A_f$ ) üzerine ısıtıldığında malzemenin orijinal şeklini geri kazanılması nedeniyle ortaya çıkar. Bu özelliği gösteren metalik malzemeler şekil hafızalı alaşımlar olarak adlandırılır [1]. Fe-bazlı alaşımlarda ferromanyetik ve şekil hafıza özelliğine sahip fonksiyonel malzemelerdir [2]. Bu alaşımlar, fcc→bcc, fcc→fct veya fcc→hcp dönüşümleri ile şekil hafıza etkisi seğileyebilir. Fe-Pd, Fe-Pt (fcc-fct), Fe-Ni-C, Fe-Ni-Ti-Co (fcc-bct) ve Fe-Ni-Cr gibi birkaç demir alaşımının da şekil hafıza etkisi sergilediği bilinmektedir [3-5].

Fe-bazlı şekil hafızalı alaşımlar düşük maliyetlidir ve mükemmel işlenebilirliğe sahiptir ve bu nedenle yaklaşık kırk yıldır sık sık araştırılmaktadır [6, 7]. Fe-bazlı şekil hafızalı alaşımlar bu özelliklerinin yanı sıra iyi mekanik özellikleri nedeniyle inşaat mühendisliği uygulamalarında da büyük ilgi görmüştür [8].

Dönüşüm sıcaklıkları (austenit faz başlama sıcaklığı  $A_s$ , austenit faz bitiş sıcaklığı  $A_f$ , martensit faz başlama sıcaklığı  $M_s$ , martensit faz bitiş sıcaklığı  $M_f$ ), malzemenin şeklinde bir değişikliğe yol açan faz değişikliklerinin meydana geldiği sıcaklıklardır. Dönüşüm sıcaklıkları çok kritiktir ve uygulama alanlarına göre önem kazanır. Örneğin, aktüatör uygulamaları için daha küçük bir dönüşüm histerezi, sönümleme uygulamaları için daha büyük bir dönüşüm histerezi gerekir. Dönüşüm sıcaklıkları, bileşimlerinden büyük ölçüde etkilendiğinden, bunlar aynı zamanda karakteristik dönüşüm sıcaklıkları olarak da adlandırılır.

Fe-30% Mn-1% Si tek kristalli alaşımı için ilk şekil hafıza etkisi Sato ve arkadaşları tarafından, ve daha sonra bu alaşımın polikristal formu için Murakami ve arkadaşları tarafından keşfedildi [9, 10]. Fe-Mn-Si alaşımlarında şekil hafıza etkisinin kökeni, zor-etkili hcp  $\epsilon$ -martensitin ısıtma sırasında fcc  $\gamma$ -austenite ters dönüşümü olduğu tespit edilmiştir. % ağırlıkça 28-33Mn ve % ağırlıkça 6Si aralığında hemen hemen tam şekil kazanımı olduğunu bildirmiştir [11]. Genellikle birçok alaşımda şekil hafıza etkisi termoelastik dönüşümlerle gözlenir, ancak genellikle Fe - Mn - Si alaşım sistemi,  $\gamma/\epsilon$  ara yüzünün veya Shockley kısmi dislokasyonunun ( $a/6$ )<11<sup>2</sup>> hareket edebilmesi nedeniyle yarı termoelastik davranış göstererek tersine çevrilebilir. Büyük bir histerezi sergileyen bu dönüşümde  $A_f$ - $M_s$  sıcaklık farkı 100 K kadar büyüktür [12,13]. Tsuzaki vd. Fe-17Mn-6Si alaşımına ağırlıkça % 0,3 karbon eklenmesinin şekil hafıza etkisinin daha da artmasına neden olduğunu bulmuşlardır [11].

\* Sorumlu yazar: nbalo@firat.edu.tr. Yazarların ORCID Numarası: <sup>1</sup> 0000-0001-5632-9559.

Fe-Mn-Si alaşımına Cr ilavesi daha güçlü şekil hafıza etkisi oluşturmuştur. Ayrıca Cr ve Ni kombinasyonu şekil hafıza etkisi sergilerken daha iyi bir korozyon direncine yol açmıştır [10,14]. Bu arada Fe-bazlı alaşımların endüstriyel uygulamaları düşünülmüştür. Son zamanlarda, boru bağlantıları ve ray kaplinleri gibi yapı bileşenleri, Fe-Mn-Si bazlı şekil hafızalı alaşımların potansiyel uygulamaları olarak tartışılmıştır. Bununla birlikte, bu alaşımın uygulamaları, nispeten küçük şekil geri kazanım zorlanması nedeniyle sınırlı kalmıştır. Genel olarak Fe – Mn – Si bazlı şekil hafızalı alaşım, eritme ve ardından yüksek vakum altında (veya havada) döküm ve ardından termo-mekanik işleme ile üretilir [15].

## 2. Materyal ve Metot

Fe-30Mn-6Si (ağ. %) ve Fe-30Mn-6Si-5Cr (ağ.%) alaşımları, Türkiye bilimsel ve teknolojik araştırma kurumunda (TÜBİTAK), argon atmosferi altında yüksek frekanslı indüksiyon eritme yöntemi kullanılarak üretildi. Döküm halindeki alaşımlara  $\gamma$ -faz bölgesinde 1200°C de 1 saat ısıtma işlemi uygulandıktan sonra tuzlu-buzlu suda soğutuldu. Alaşım numunelerinin homojen haliyle oda sıcaklığında doğal olarak  $7.8 \times 10^4$  saat yaşlanmış şekil hafızalı alaşım numunelerinin diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ölçümleri Shimadzu DSC-60A diferansiyel tarama kalorimetresi ile yapıldı. Karakteristik dönüşüm sıcaklıkları belirlendi. DSC ölçümlerinde farklı ısıtma/soğutma hızında alınarak aktivasyon enerjileri hesaplandı. Alaşımların X-ışını difraksiyon desenleri  $\text{CuK}\alpha$  radyasyonu kullanılarak Rigaku RadB-DMAX II marka cihazdan alınmıştır. Işının dalga boyu  $\lambda = 1.54056 \text{ \AA}$  dur. X-ışını difraktometresinin tarama hızı 6°/dak. olarak seçilmiştir.

## 3. Sonuçlar

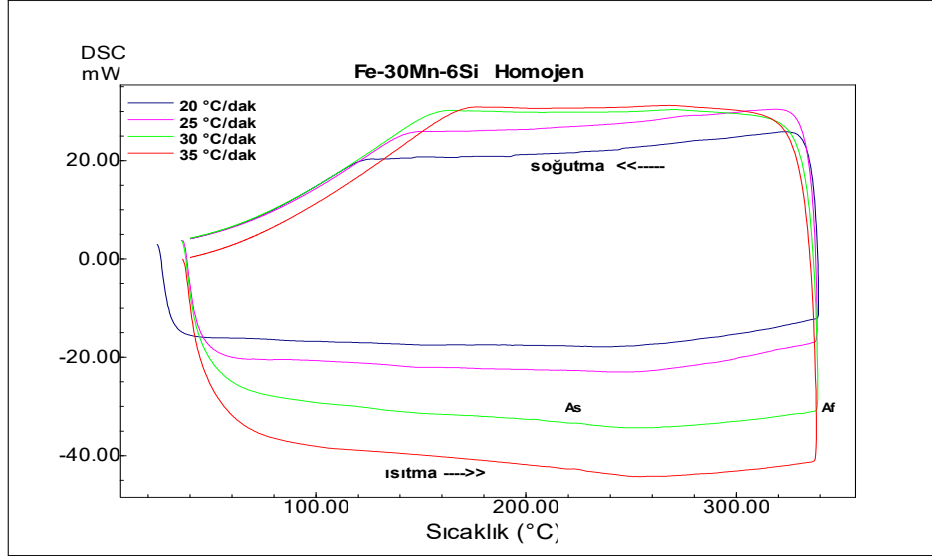
### 3.1. Diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ölçümleri

Homojenleştirilmiş ve doğal yaşlanmaya tabi tutulmuş FeMnSi ve FeMnSiCr şekil hafızalı alaşım numunelerinin karakteristik dönüşüm sıcaklıklarını elde etmek için farklı ısıtma/ ve soğutma hızlarında DSC ölçümleri alındı. Farklı ısıtma hızlarında elde edilen DSC eğrilerinden austenit faz başlama ve bitiş sıcaklıkları ( $A_s$  ve  $A_f$ ) belirlendi.  $A_s$  ve  $A_f$  sıcaklıklarından da anlaşıldığı gibi her iki alaşım da oda sıcaklığında martensit fazdadır. Isıtma ile austenit faza dönüşen numuneler soğutma ile tekrar martensit faza dönüşmemektedir. Şekil.1-2 ve Şekil 4-5 de görüldüğü gibi FeMnSi ve FeMnSiCr alaşımları tek yönlü şekil hafıza etkisi sergilemektedir. Yapılan çalışmalarda tane ne kadar küçük olursa austenit ve martensit dönüşüm sıcaklıklarının daha düşük olduğu görülmüştür [16]. FeMnSiCr elementinin  $A_s$  ve  $A_f$  sıcaklıkları FeMnSi alaşımının  $A_s$  ve  $A_f$  sıcaklıklarından daha düşüktür. Bu nedenle, Cr elementin tane boyutunu küçülttüğü düşünülmektedir.

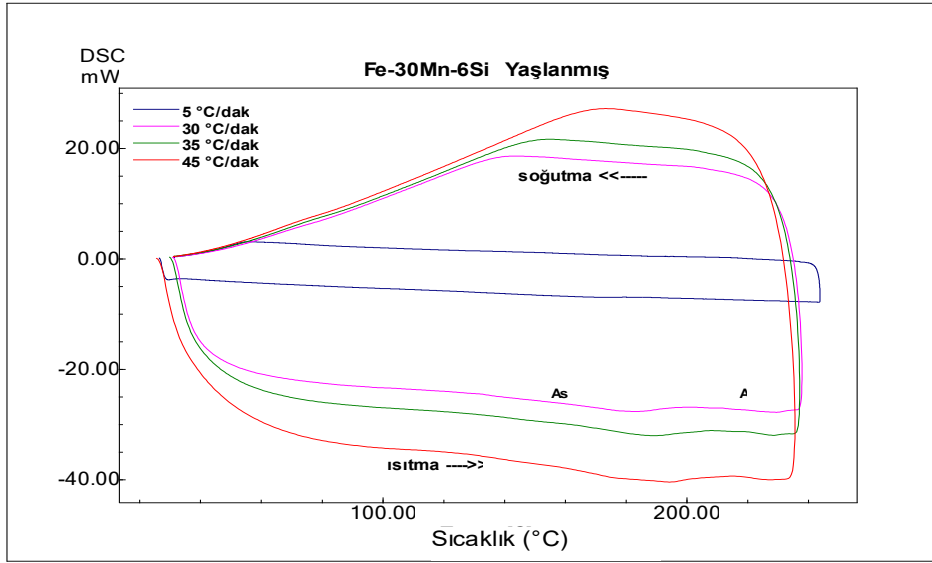
Ayrıca DSC eğrilerinden elde edilen termodinamik parametreler Tablo.1 ve Tablo.2 de verilmiştir. Elde edilen bu değerlerden yararlanarak Kissinger metodu ile yaşlanmamış ve doğal yaşlanmış alaşım numunelerinin aktivasyon enerjileri hesaplandı. Kissinger eşitliği

$$\frac{d[\ln(\phi/T_m^2)]}{d(1/T_m)} = -\frac{E}{R} \quad (1)$$

ifadesi ile verilir [17,18]. İfadede E; aktivasyon enerjisi, R; evrensel gaz sabiti,  $T_m$ ; DSC eğrisinde tepe noktasının sıcaklığı ve  $\phi$ ; ısıtma hızıdır. Faz dönüşümünün aktivasyon enerjisini elde etmek için  $T/1000$  e karşı  $\ln(\phi/T_m^2)$  grafiği çizildi. Aktivasyon enerjisi, faz dönüşümünü sağlamak için gerekli olan dönüşüm reaksiyon enerjisidir. Kissinger eğrileri, FeMnSi alaşımı için Şekil-3 de ve FeMnSiCr alaşımı için Şekil-6 da verildi. Homojen FeMnSi şekil hafızalı alaşımın aktivasyon enerjisi 64.67 kJ/mol iken oda sıcaklığında  $7.8 \times 10^4$  saat doğal yaşlanmış alaşım numunesinin aktivasyon enerjisi 165.54 kJ/mol olarak hesaplandı. Homojen FeMnSiCr Şekil hafızalı alaşım numunesinin aktivasyon enerjisi 141.55 kJ/mol ve yaşlanmış numunenin 45.63 kJ/mol olarak hesaplandı.



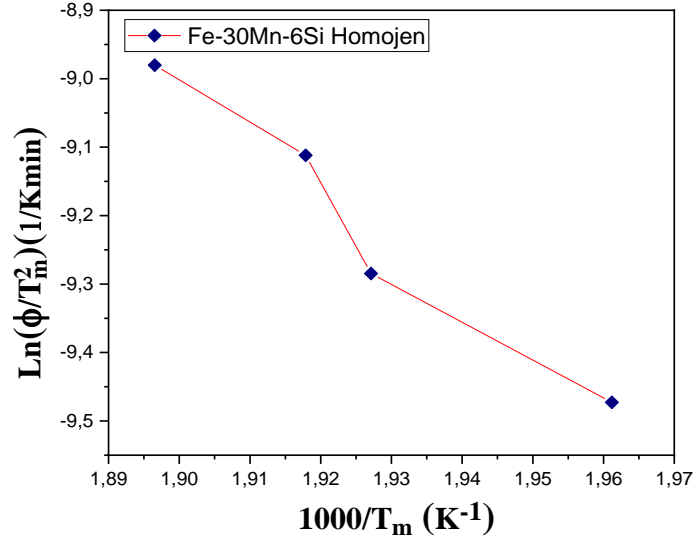
Şekil 1. Farklı ısıtma/soğutma hızlarında (20°C /dak, 25°C /dak, 30°C /dak, 35 °C /dak) homojen Fe-30Mn-6Si şekil hafıza alaşımının DSC eğrileri.



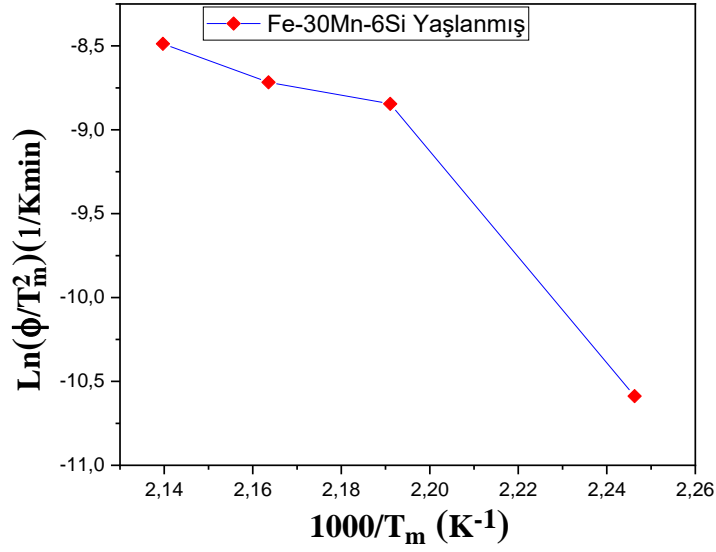
Şekil 2. Farklı ısıtma/soğutma hızlarında (5°C /dak, 30°C /dak, 35°C /dak, 45°C /dak) yaşlanmış Fe-30Mn-6Si şekil hafıza alaşımının DSC eğrileri.

Tablo 1. Homojen ve yaşlanmış FeMnSi şekil hafıza alaşımının farklı ısıtma/soğutma hızlarında termodinamik parametreleri.

Fe-30Mn-6Si	Isıtma Hızı (°C/dak.)	As (°C)	Ar (°C)	Amax (°C)	$\Delta H_{M \rightarrow A}$ (J/g)	E (kJ/mol)
Homojen	20	231.25	279.76	236.75	1.45	64.67
	25	218.79	285.91	245.76	1.67	
	30	261.26	299.72	248.26	2.28	
	35	223.17	299.43	254.13	1.86	
Yaşlanmış	5	147.95	179.09	172.03	1.97	165.54
	30	168.81	197.95	183.25	2.39	
	35	163.33	207.07	189.05	1.97	
	45	159.25	211.09	194.21	2.29	

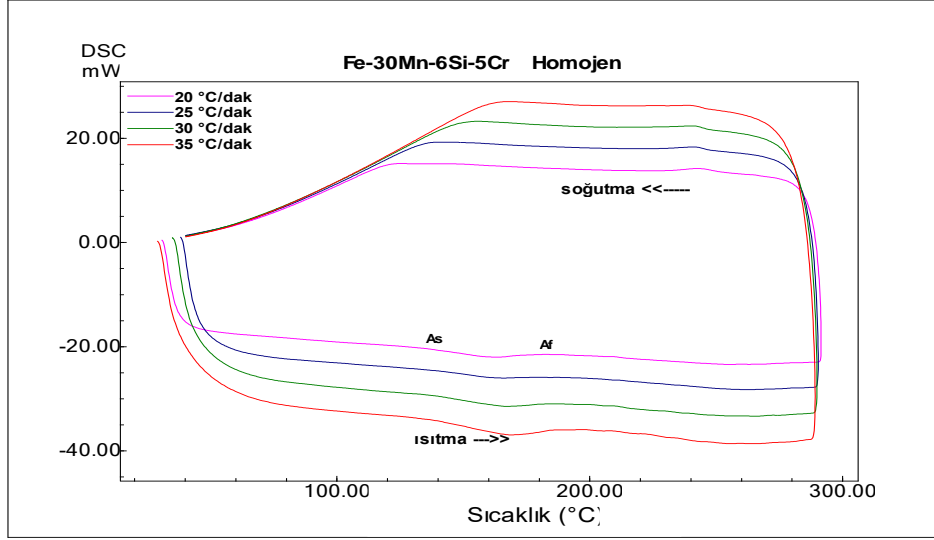


(a)

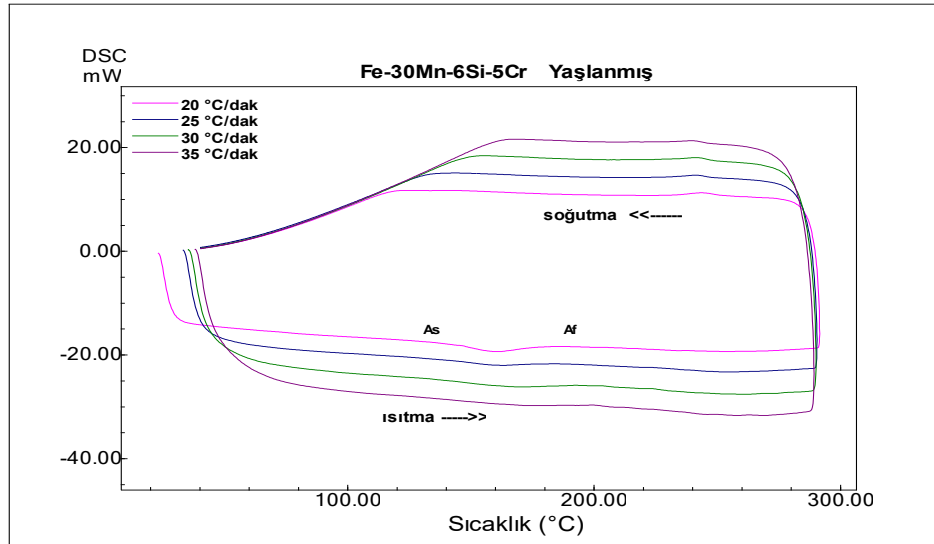


(b)

Şekil 3. Fe-30Mn-6Si şekil hafıza alaşımının Kissinger metoduna göre aktivasyon enerji eğrileri (a) homojen (b) yaşlanmış.



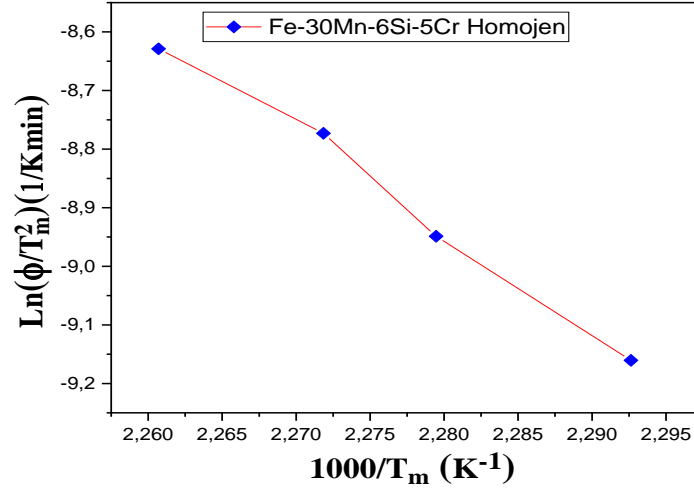
Şekil 4. Farklı ısıtma/soğutma hızlarında (20°C /dak, 25°C /dak, 30°C /dak, 35°C /dak) homojen Fe-30Mn-6Si-5Cr şekil hafıza alaşımının DSC eğrileri.



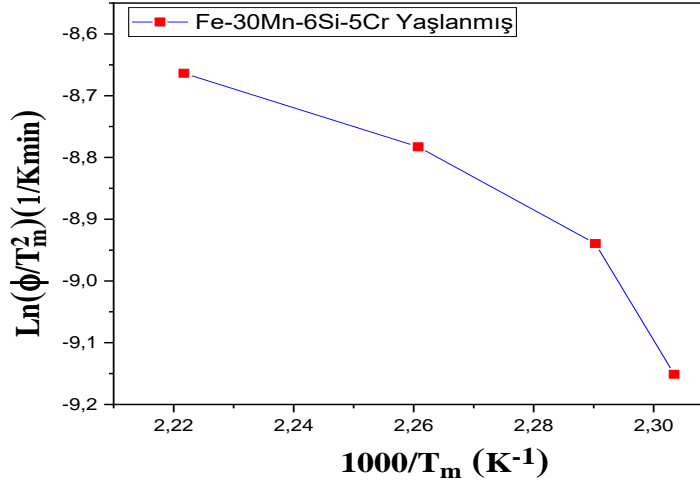
Şekil 5. Farklı ısıtma/soğutma hızlarında (20°C /dak, 25°C /dak, 30°C /dak, 35°C /dak) yaşlanmış Fe-30Mn-6Si-5Cr şekil hafıza alaşımının DSC eğrileri.

Tablo 2. Homojen ve yaşlanmış FeMnSiCr şekil hafıza alaşımının farklı ısıtma/soğutma hızlarında termodinamik parametreleri.

Fe-30Mn-6Si-5Cr	Isıtma Hızı (°C/dak.)	A <sub>s</sub> (°C)	A <sub>f</sub> (°C)	A <sub>max</sub> (°C)	ΔH <sub>M→A</sub> (J/g)	E (kJ/mol)
Homojen	20	138.72	175.54	163.03	1.94	141.55
	25	142.15	177.31	165.55	1.17	
	30	139.67	183.00	167.02	1.47	
	35	140.58	185.33	169.19	2.07	
Yaşlanmış	20	143.65	176.97	160.99	2.97	45.63
	25	141.41	180.96	163.48	1.62	
	30	140.13	192.57	169.18	1.63	
	35	132.53	187.19	176.95	1.06	



(a)



(b)

**Şekil 6.** Fe-30Mn-6Si-5Cr şekil hafıza alaşımının Kissinger metoduna göre aktivasyon enerji eğrileri (a) homojen (b) yaşlanmış.

### 3.2. X-Işını difraksiyon analiz sonuçları

Şekil-7 FeMnSi alaşımının ve Şekil-8 FeMnSiCr alaşımının homojen ve yaşlanmış numunelerinin XRD desenlerini göstermektedir. Homojenleştirilmiş ve yaşlandırılmış FeMnSi alaşımının difraksiyon deseninde austenit yapıya ait  $\gamma$  ve oksit pikleri yer almaktadır. Yaşlanmayla birlikte oksit piklerinin şiddetlerinde bir artış ve yeni oluşmuş (400) $\gamma$  piki gözlenmiştir. Bunun yanı sıra (111) $\gamma$  ve (200) $\gamma$  pikleri kaybolmuştur. FeMnSiCr alaşımına ait difraksiyon desenlerinde yaşlanmayla oksit pik şiddetlerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir. Yeni oluşmuş veya kaybolmuş bir pik görülmemektedir. Bu da Cr elementinin etkisi olarak düşünülmektedir. İndislenen difraksiyon pikleri referanslar ile uyumludur [10, 19-22].

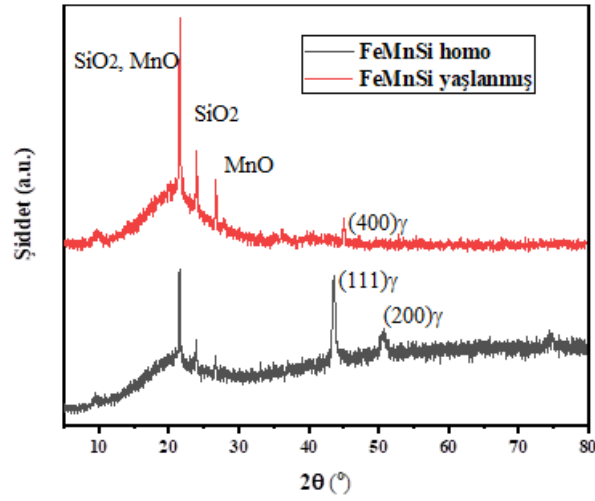
Alaşım numuneleri için kristal boyutu, Debye Scherrer bağıntısı ile hesaplandı [22-24].

$$D = \frac{0.9\lambda}{FWHM\cos\theta} \quad (1)$$

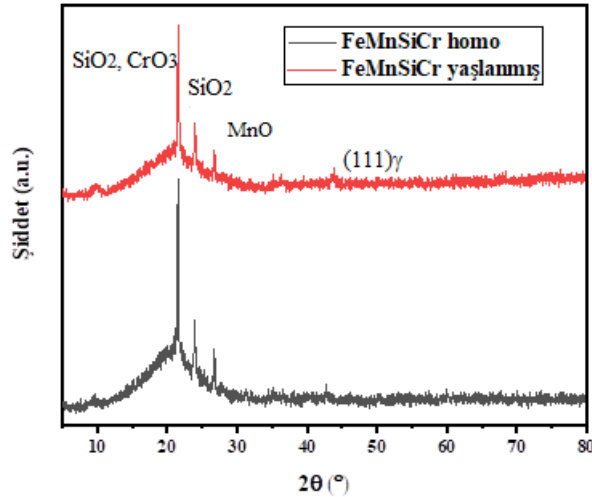
İfadede D kristalin boyutu,  $\lambda$  X-ışını dalga boyu, FWHM maksimum pikin yarısındaki tam genişlik,  $\theta$  Bragg açısıdır. Alaşım numunelerinin kristal boyutları Tablo.3 de verilmiştir. Tablodan da görüldüğü gibi homojen alaşım numunelerinin kristal boyutu Cr ilavesiyle azalmıştır. Yaşlanmış numuneler karşılaştırıldığında yaşlanmayla FeMnSiCr alaşımının kristal boyutu oldukça küçüktür. FeMnSi alaşımının yaşlanmış numunesinin kristal boyutu artmıştır. FeMnSiCr alaşımının yaşlanmış numunesinin kristal boyutu küçülmüştür.

**Tablo 3.** FeMnSi ve FeMnSiCr şekil hafıza alaşımının kristal boyutu.

Alaşım	Kristal Boyutu (nm)
Fe-30Mn-6Si Homojen	19.100
Fe-30Mn-6Si Yaşlanmış	31.384
Fe-30Mn-6Si-5Cr Homojen	21.278
Fe-30Mn-6Si-Cr Yaşlanmış	8.253



**Şekil 7.** Fe-30Mn-6Si şekil hafıza alaşımının homojen ve yaşlanmış numunelerinin X-ışını difraksiyon deseni.



**Şekil 8.** Fe-30Mn-6Si-5Cr şekil hafıza alaşımının homojen ve yaşlanmış numunelerinin X-ışını difraksiyon deseni.

#### 4. Tartışma

FeMnSi ve FeMnSiCr şekil hafızalı alaşımları tek yönlü şekil hafıza etkisi sergilemiştir.  $A_s$  ve  $A_f$  dönüşüm sıcaklıkları Cr ilavesiyle düşmüştür. Bunun yanı sıra yaşlanma ile birlikte FeMnSi alaşımının dönüşüm sıcaklıkları azalırken FeMnSiCr alaşımının dönüşüm sıcaklıkları artmıştır. Faz dönüşümünü sağlamak için gerekli dönüşüm reaksiyon enerjisi aktivasyon enerjisi olarak tanımlanır. Dolayısıyla ısı transferinde meydana gelecek etkileşme ile aktivasyon enerjisi değişim göstermektedir.  $A_s$  ve  $A_f$  sıcaklıkları daha düşük olan alaşımın aktivasyon enerjisi daha yüksektir. Homojen FeMnSi ve FeMnSiCr alaşımlarının aktivasyon enerjileri karşılaştırıldığında, Cr ilavesiyle aktivasyon enerjisi artmıştır. Yaşlandırılmış iki alaşım numunesinin aktivasyon enerjileri karşılaştırıldığında tam tersine FeMnSi alaşımının aktivasyon enerjisi artmış, FeMnSiCr alaşımının aktivasyon enerjisi azalmıştır. Aktivasyon enerjisi kristal boyutu ile de ilişkilendirilebilir. Kristal boyutu büyük olan alaşımın aktivasyon enerjisi de daha büyüktür. Oda sıcaklığında doğal olarak  $7.8 \times 10^4$  saat yaşlanmış FeMnSi şekil hafızalı alaşım numunesi, FeMnSiCr şekil hafızalı alaşımı numunesinden daha fazla oksitlendiği gözlenmiştir. Yaşlanmaya karşı FeMnSi alaşımının oksidasyon miktarındaki artışın Cr elementinin eklenmesiyle kontrol edilebileceği sonucuna varılmıştır.

#### Kaynaklar

- [1]. Sampath V, Ayyagari SVG, Srinithi R, Rajam AGD, Andra S, Anusha A. Theoretical Analysis of Hysteresis and Characteristic Transition Temperatures of Iron-Based Memory Metals. *Trans Indian Inst Met.* 2021; <https://doi.org/10.1007/s12666-020-02147-9>.
- [2]. Todaka T, Yasuoka T, Enokizono M, Tsutsumi K, Groessinger R, Turtelli RS, Bormio- Nunes C, Wiesinger G. Magnetic properties of iron-based ferromagnetic shape-memory ribbon produced by melt-spinning technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 2006; 304: e516–e518 doi:10.1016/j.jmmm.2006.02.140.
- [3]. Druker AV, Perotti A, Esquivel I, Malarria YJ. Design of Devices and Manufacturing of Fe-Mn-Si Shape Memory Alloy Couplings. *Procedia Materials Science* 2015; 8: 878 – 885.
- [4]. Otsuka H, Yamada H, Maruyama T, Tanahashi H, Matsuda S, Murakami M. Effects of Alloying Additions on Fe-Mn-Si ShapeMemoryAlloys. *ISIJ International* 1990; 30(8): 674-679.
- [5]. Maji BC, Krishnan M, Rama Rao VV. The Microstructure of an Fe-Mn-Si-Cr-Ni Stainless Steel Shape Memory Alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A* 2003; 34A: 1030-1042.
- [6]. Todaka T, Teshima S, Enokizono M. Magnetic properties and shape memory effect of Fe-Cr-Ni-Si-Mn alloys produced by melt spinning technique. *J. Mater. Process. Technol.* 2007;181: 217–221.
- [7]. Wan J, Chen S. Martensitic transformation and shape memory effect in Fe-Mn-Si based alloys. *Curr. Opin. Solid StateMater. Sci.* 2005; 9: 303–312.
- [8]. Leinenbach C, Lee WJ, Lis A, Arabi-Hashemi A, Cayron C, Weber B. Creep and stress relaxation of a FeMnSi-based shape memory alloy at low temperatures. *Materials Science&Engineering A* 2016; 677: 106–115 <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2016.09.042>.
- [9]. Bujoreanu LG, Stanciu S, Özkal B, Comaneci RI, Meyer M. Comparative study of Fe-Mn-Si-Cr-Ni shape memory alloys obtained by classical and by powder metallurgy, respectively. In: *ESOMAT 2009*; 05003.
- [10]. Balo ŞN. A Comparative Study on Crystal Structure and Magnetic Properties of Fe-Mn-Si and Fe-Mn-Si-Cr Alloys. *J Supercond Nov Magn.* 2013; 26:1085–1088 DOI 10.1007/s10948-012-1841-5.
- [11]. Bliznuk VV, Gavriljuk VG, Kopitsa GP, Grigoriev SV, Runov VV. Fluctuations of chemical composition of austenite and their consequence on shape memory effect in Fe–Mn–(Si, Cr, Ni, C, N) alloys. *Acta Materialia* 2004; 52:4791–4799. doi:10.1016/j.actamat.2004.06.036.
- [12]. Eskil M, Kanca E. A new formulation for martensite start temperature of Fe–Mn–Si shape memory alloys using genetic programming. *Computational Materials Science* 2008; 43:774–784
- [13]. Eskil M, Kanca E. Phase evolution in Fe Mn Si shape memory alloys due to forging speed. *International Journal of Modern Physics B Vol.* 2013; 27: 1350182- 11
- [14]. Lin HC, Wang TP, Lin KM, Chung CY, Wang PC, Ho WH. The stress relaxation of a Fe59Mn30Si6Cr5 shape memory alloy. *J. Alloys Compd.* 2008; 466:119–125.
- [15]. Takeshi S, Kapusta Cz, Takasaki A. Synthesis and characterization of Fe–Mn–Si shape memory alloy by mechanical alloying and subsequent sintering. *Materials Science & Engineering A* 2014; 592: 88-94.
- [16]. Teixeira CA, Coelho RE, Lima PC, Conrado LC, Mendonça ES, Santos MS, Costa GKA, Carvalho CO, Lima EPR. Influence of Chromium in the phase Transformation Temperature of a CuAlNi Shape Memory Alloy. 2015; 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering December 6-11, 2015, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.
- [17]. Wellen RMR, Canedo EL. On the Kissinger equation and the estimate of activation energies for non-isothermal cold crystallization of PET. *Polymer Testing* 2014; 40: 33.38 <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2014.08.008>.
- [18]. Canbay CA, Karaduman O, Ünlü N, Özkul İ. An exploratory research of calorimetric and structural shape memory effect characteristics of Cu–Al–Sn alloy. *Physica B* 2020; 580:411932 <https://doi.org/10.1016/j.physb.2019.411932>.



- [19]. Caenegem NV, Duprez L, Verbeken K, Segers D, Houbaert Y. Stresses related to the shape memory effect in Fe-Mn-Si based shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*, 2008; 481-482: 183-189 doi:10.1016/j.msea.2007.02.159.
- [20]. Chou TS, Lin HC, Lin KM, Wu SK. Characterization of Internal Friction of Fe-30Mn-6Si-5Cr. *Scripta mater.* 2000; 42: 445-450.
- [21]. Lin HC, Lin KM, Wu SK, Wang TP, Hsiao YC. Effects of thermo-mechanical training on a Fe59Mn30Si6Cr5 shape memory alloy. *Materials Science and Engineering A*, 2006; 438-440: 791-795 doi:10.1016/j.msea.2006.02.119.
- [22]. Balo ŞN, Yakuphanoglu F. The effects of Cr on isothermal oxidation behavior of Fe-30Mn-6Si alloy. *Thermochimica Acta*, 2013; 560: 43-46. doi:10.1016/j.tca.2013.03.005.
- [23]. Cullity B.D. *Elements of X-Ray Diffraction*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1978.
- [24]. Canbay CA, Karaduman O, Ünlü N, Aziz, SB, Özkul İ. Heat treatment and quenching media effects on the thermodynamical, thermoelastical and structural characteristics of a new Cu-based quaternary shape memory alloy. *Composites Part B-Engineering*, 2019;174:106940- <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106940>.