

**Co-60 İLE IŞINLANAN Cu-BAZLI ŞEKİL HAFIZALI ALAŞIMLARIN TERMAL
PARAMETRELERİ VE YAPISAL İNCELENMELERİ**
**THERMAL PARAMETERS AND STRUCTURAL INVESTIGATIONS OF Cu-BASED
SHAPE MEMORY ALLOYS IRRADIATED WITH Co-60**

Doç. Dr. Şahide Nevin BALO 

Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ, Türkiye

Abdolvahap ORHAN 

Fırat Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Elazığ, Türkiye

Geliş Tarihi / Received: 22.10.2021
Kabul Tarihi / Accepted: 21.11.2021

Araştırma Makalesi/Research Article
DOI: 10.38065/euroasiaorg.821

ÖZET

Gama radyasyonu malzemelerin yapısal özelliklerini değiştirebilecek nitelikte bir radyasyon çeşididir. Metal ve alaşımların ışınlamaya tepki olarak kristal yapılarında oluşan kusurlar nedeniyle birçok fiziksel ve yapısal özellikleri değişir.

Şekil hafızalı alaşımlar (ŞHA), fonksiyonel malzemelerdir ve nükleer tesislerin izlenmesi için mekanik cihazlarda kullanılmaktadır. Nükleer tesislerde ŞHA'ların kullanılması malzemelerin verdiği tepki ve bu tepkinin ışınlamadan nasıl etkilendiği hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirir. Bu çalışmada bakır esaslı ŞHA'lar kullanıldı. Bakır esaslı ŞHA'lar alaşım elementlerine ve element yüzdelilerindeki küçük değişimlere oldukça duyarlıdır. Cu-11,6Al-0,42Be, Cu-11,8Al-0,47Be, Cu-13Al-4Ni ve Cu-13,5Al-4Ni (% ağırlıkça) ŞHA numuneleri 50 kGy sabit radyasyon dozu ile ışınıldı. Işınlamanın Cu-esaslı ŞHA'ların termodinamik parametreleri ve yapısal özellikleri üzerindeki etkisi incelendi. Işınlamanın termodinamik parametreler üzerindeki etkileri diferansiyel tarama kalorimetresi (DSC) ile belirlendi. Yapısal incelemeleri X-ışını difraksiyonu (XRD) ve optik mikroskop gözlemleri ile yapıldı. Mikro sertlik ölçümleri alındı. Cu-esaslı şekil hafızalı alaşımlar için elde edilen sonuçlar hem kendi arasında homojen ve ışınlanmış numuneler olarak, hem de alaşım elementlerine göre değerlendirildi.

Anahtar kelimeler: γ -radyasyonu, Cu-esaslı şekil hafızalı alaşımı, Şekil hafıza etkisi, Termodinamik parametreler, Mikro sertlik.

ABSTRACT

Gamma radiation is a type of radiation that can change the structural properties of materials. Many physical and structural properties of metals and alloys change due to defects in their crystal structures in response to irradiation.

Shape memory alloys (SMAs) are functional materials and are used in mechanical devices for monitoring nuclear facilities. In this study, copper-based SMAs were used. Copper-based SMAs are very sensitive to alloying elements and small changes in element percentages. Cu-11.6Al-0.42Be, Cu-11.8Al-0.47Be, Cu-13Al-4Ni, and Cu-13.5Al-4Ni (wt%) SMA samples were irradiated with a fixed radiation dose of 50 kGy. The effect of irradiation on the thermodynamic parameters and structural properties of copper-based SMAs was investigated. The effects of irradiation on thermodynamic parameters were determined by differential scanning calorimetry (DSC). Structural examinations were made by X-ray diffraction (XRD) and optical microscope observations. Microhardness measurements were taken. The results obtained for Cu-based SMAs were evaluated both as homogeneous and irradiated samples and according to alloying elements.

Keywords: γ -radiation, Cu-based shape memory alloy, Shape memory effect, Thermodynamic parameters, Microhardness.

1. GİRİŞ

Günümüzde Amerika birleşik devletleri ve birçok devlet elektrik enerjisinin bir kısmını uranyum yakıtlı termal nötron spektrum reaktörlerinden sağlanmaktadır. Gün geçtikçe dünyada bu tür reaktör kullanım oranı artmaktadır. Bununla birlikte, yüksek dozda farklı ışınlara maruz kalan yapısal malzemelerde büyük ölçüde değişiklikler meydana gelir. Bu düşmanca ortam için tatmin edici malzemeler sağlamak, fiziksel metalürjistler için büyük bir zorluktur. Malzemelerdeki radyasyon etkilerinin alanı, temel malzeme araştırmalarının yanı sıra, reaktör teknolojisinin de hayati bir alanıdır. ABD özellikle radyasyon etkileri araştırmalarına büyük destek vererek fon aktarmaktadır.

Radyasyon etkileri aslında ışınlamadan etkilenen tüm fiziksel metalurji alanlarını özetleyen geniş bir terimdir. Enerjik nötronların neden olduğu doğrudan yer değiştirme ile atermal olarak büyük konsantrasyonlarda nokta kusurları üretilir, bu da radyasyonla güçlendirilmiş difüzyona, boyutsal kararsızlığa, faz kararsızlığına ve mekanik özelliklerde değişikliklere yol açar. Radyasyon etkilerinin altında yatan temelin ve özellikle boyutsal kararsızlığın mevcut fiziksel anlayışı iyidir. Radyasyon kaynaklı faz kararsızlıkları ve mekanik özelliklerdeki değişiklikler gibi diğer alanlar daha az anlaşılmıştır

Radyasyon etkileri, nötron ışınmasına ek olarak yüklü parçacık ışınması ile incelenmiştir. Enerji yüklü parçacıklar da atomların yerini alır ve niteliksel olarak benzer sonuçlara yol açar. Sonuç olarak, radyasyon etkilerinin kontrol edilebilir parametrelere oldukça duyarlı olduğu geniş çapta kanıtlanmıştır. Bu parametreler malzeme tipini, alaşım elementlerinin ilavelerini ve üretim tekniklerini ve ayrıca sıcaklık, doz hızı ve stres seviyesi gibi dış koşulları içerir. Bu hassasiyetler, radyasyon etkilerine karşı dirençli alaşım tasarlamak için kullanılabilen araçlardır.

Işınlamanın neden olduğu mikroyapısal değişikliklerin malzeme performansının bozulmasında önemli bir rol oynadığı iyi bilinmektedir. Radyasyon, çeşitli kusurlar getirerek, matrist faz ve dislokasyon düzeninde istenmeyen değişikliklere neden olarak ve tane sınırlarındaki veya tanelerdeki diğer arayüzlerdeki kimyayı değiştirerek orijinal mikro yapıyı değiştirebilir. Gelişmiş nükleer reaktör sistemleri için, çok daha yüksek sıcaklıklarda ve dozlarda çalışabilen gelişmiş malzemeler geliştirmek zordur.

Nükleer tesislerin operasyonel güvenliğini, izleme ve denetim süreçlerinde akıllı malzeme teknolojilerinin kullanılmasından yararlanılabilir. Bu tür tesislerde akıllı malzeme teknolojilerinin kullanılması, kişisel maruziyeti azaltırken güvenliğin artırılmasına, yaşam döngüsü maliyetlerinin azalmasına ve performans artışına neden olabilir. Ancak bu tür akıllı malzemelerin nükleer tesislerde kullanılması, malzemelerin ışınlamaya tepki verdiği ve bu tepkinin radyasyon dozundan nasıl etkilendiği hakkında bilgi sahibi olmayı gerektirir. Akıllı malzeme sınıfından olan ŞHA lar nükleer tesislerin izlenmesi için mekanik cihazlarda aktif alaşımlar olarak kullanılmıştır.

ŞHA'lar iki kristal yapı olan austenit ve martensit faz arasında dönüşüm yaparak çalışır. Bu fazlar malzemenin sıcaklığı ve iç gerilimleri tarafından belirlenir. ŞHA'lar plastik deformasyon sonrası uygulanan ısı işlem ile deformasyon öncesi şekil ve boyutlarına geri dönebilmektedir. Şekil değişikliği nispeten düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir ve şekil hatırlama ısıtma ile sağlanır. Şekil hafızalı alaşımlar, tek ve iki yönlü şekil hafıza etkisi, süperelastik ve sahte elastik etkilere dayalı fonksiyonel davranışı, yüksek sıcaklık austenit fazı ve düşük sıcaklık martensit fazı arasındaki birinci dereceden yer değiştiren, difüzyonsuz martensitik dönüşüm ile ilgilidir. Bu malzemeler üstün özellikleri nedeniyle önemli mühendislik problemlerine sıra dışı çözümler sunar. ŞHA'ların teknolojik uygulamaları için, bütünlük önemli bir gerekliliktir. Gelecekte, havacılık, otomotiv ve enerji dönüştürme/depolama sistemlerinde, nükleer tesisleri izleme sistemlerinde ŞHA'ların kullanımları ile alakalı ilgi düzeyinin önemli ölçüde artırılması beklenmektedir.

Cu-esaslı şekil hafızalı alaşımlar 1960 larda keşfedildikten sonra geliştirildi ve maliyetinin ucuz olmasından dolayı hem araştırmacıların ilgi odağı olmuş hem de teknolojik açıdan ilgi görmüştür.

Cu-esaslı şekil hafızalı alaşımlar arasında en popüler olanlar, CuAlNi, CuAlZn, CuAlBe ve CuAlMn alaşımlarıdır.

Bu çalışmada iki farklı ağırlık yüzdeye sahip CuAlBe ve CuAlNi alaşımları kullanıldı. Alaşımlar Co-60 gama radyasyon kaynağı ile sabit radyasyon dozuyla ışınıldı. Çalışma ışınlama öncesi ölçümler ve ışınlama sonrası ölçümler olarak planlandı.

2. MATERYAL VE METOT

CuAlBe ve CuAlNi şekil hafızalı alaşımları Fransa'daki TREFIMETAUX Center de Recherche'den temin edilmiştir. CuAlBe alaşımları CAB ve CuAlNi alaşımları CAN koduyla gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan alaşım elementlerinin ağırlık yüzdeleri Tablo 1. de verilmiştir.

Alaşımlardan kesilen numuneler CuAlBe ve CuAlNi alaşımlarının denge diyagramından belirlenen β faz bölgesindeki bir sıcaklıklarda tavlanmıştır ve daha sonra soğutma işlemi uygulanmıştır.

Isıl işlemler bu numunelerin bir kısmı, Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Sarayköy Nükleer Araştırma ve Eğitim Merkezi'nde (SANAEM) sabit radyasyon dozu ile (50 Gy) ışınlanmıştır. Işınlamada Co-60 γ - radyasyon kaynağı kullanılmıştır. Işınlama dozunun hızı 1273 Gy/saat dir. Homojen ve ışınlanmış numunelerin karakteristik dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreleri Perkin Elmer 8000 diferansiyel tarama kalorimetrisi (DSC) ile 10°/dk ısıtma/soğutma hızı ile belirlendi. Alaşım numunelerinin X-ışını kırınım desenleri Bruker AXS D8 Advance Model kırınım ölçer ile 30° ile 90° aralığında alındı. Alaşım numunelerinin X-ışını analizleri, oda sıcaklığında CuK α radyasyonu kullanılarak yapıldı ve kullanılan X-ışınlarının dalga boyu 1.54060 Å dur. Alaşım numunelerinde kullanılan parlatma ve kimyasal aşındırma işlemlerinin ardından optik mikroskop gözlemleri yapıldı. Mikrosertlik ölçümleri alındı.

Tablo 1. İncelenen CuAlBe ve CuAlNi alaşımlarının bileşimi (% ağırlıkça).

Alaşım	Al (ağ%)	Ni (ağ%)	Be (ağ%)
CAB1	11.6		0.42
CAB2	11.8		0.47
CAN1	13.0	4	
CAN2	13.5	4	

3. DENEYSEL BULGULAR

3.1 Diferansiyel Tarama Kalorimetresi (DSC) Bulguları

Homojen ve 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış numunelerin DSC ölçümleri, uygun sıcaklık aralığında atmosferik basınç altında 10 °C/dk'lık bir ısıtma/soğutma tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Alaşımların dönüşüm sıcaklıkları Tablo-2 de ve termodinamik parametreleri Tablo-3 de verilmiştir. Dönüşüm sıcaklıkları tanjant yöntemiyle belirlendi. Homojen ve ışınlanmış CAB1, CAB2, CAN1 ve CAN2 alaşımlarının DSC eğrileri sırasıyla Şekil-1, Şekil-2, Şekil-3, ve Şekil-4'de verilmiştir. İleri ve geri dönüşüm fazları arasındaki denge sıcaklığı aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$T_0 = (A_f + M_s)/2 \quad (1)$$

İfadeye M_s martensit başlangıç sıcaklığı, A_f austenit bitiş sıcaklığıdır. Ters dönüşüm esnasındaki entropi değişimi aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$\Delta S_{M \rightarrow A} = \Delta H_{M \rightarrow A} / T_0 \quad (2)$$

Burada ΔS entropi, ΔH entalpi, T_0 denge sıcaklığıdır.

Dönüşümdeki eğri T_0 - M_s sıcaklık farkı ile temsil edilir. Martensitin austenit faz içerisinde çekirdeklenmesi için itici güç olarak karakterize edilen $\Delta G^{A \rightarrow M}$ (M_s) Gibbs serbest enerjisi aşağıdaki denklem ile belirlenir.

$$\Delta G^{A \rightarrow M}(M_s) = \Delta G^{M \rightarrow A}(T_0) - \Delta G^{M \rightarrow A}(M_s) = -(T_0 - M_s) \Delta S^{M \rightarrow A} \quad (3)$$

M_f - M_s sıcaklık farkı, martensit varyantlarda kendiliğinden depolanan G_E elastiklik enerjisiyle ilgilidir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Delta G_E = \Delta G^{A \rightarrow M}(M_s) - \Delta G^{A \rightarrow M}(M_f) = (M_s) - (M_f) \Delta S^{M \rightarrow A} \quad (4)$$

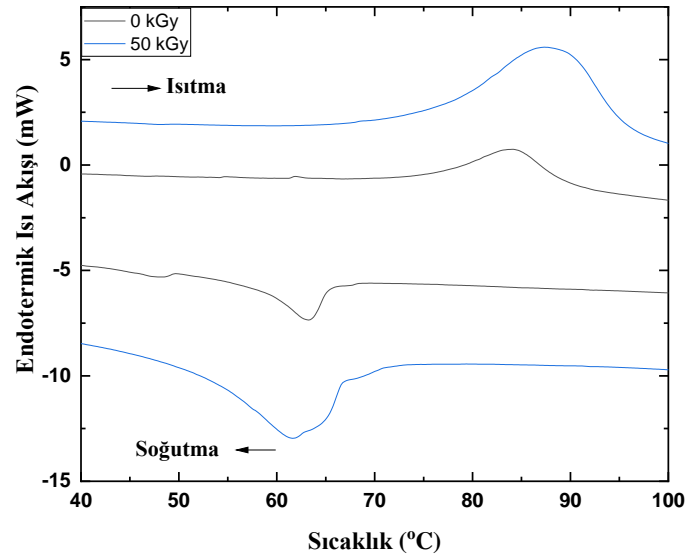
Homojen ve sabit gama radyasyon dozu altında ışınlanmış CuAlBe ve CuAlNi şekil hafızalı alaşımlarının dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametreleri Tablo-2 ve Tablo-3 de verilmiştir. Homojen CAB1 ve CAB2 alaşım numuneleri dikkate alındığında Al ve Be miktarındaki artışla denge ve dönüşüm sıcaklıkları azalmıştır. Benzer şekilde martensitten austenite dönüşüm sırasında entalpi, entropi, elastiklik enerjisinde de düşüş gözlenmektedir. Homojen CAN1 ve CAN2 alaşım numunelerinde de Al miktarındaki artış ile dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametrelerde azalmaya neden olmuştur. 50 kGy sabit γ - radyasyon dozuyla ışınlanan CAB1 ve CAB2 numunesinin dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametrelerinde düzenli olmayan değişimler, CAN1 ve CAN2 numunesinin dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametrelerinde düzenli bir artış gözlenmiştir. Işınlanmış CAB1 ve CAB2 alaşım numunelerinde entropinin azalmasıyla elastiklik enerjisi artmış, CAN1 ve CAN2 alaşım numunelerinin entropi değerlerindeki artış elastiklik enerjisini azaltmıştır.

Tablo-2. Homojen (H) ve ışınlanmış (50kGy) CuAlBe, CuAlNi ŞHA numunelerinin dönüşüm sıcaklıkları.

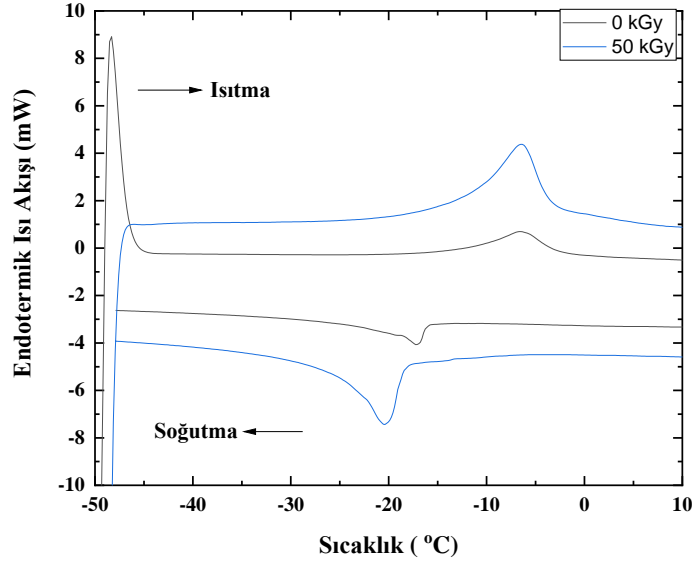
Alaşım	İşlem	M_s (K)	M_f (K)	A_s (K)	A_f (K)
CAB1	H	338.66	330.23	347.28	364.23
CAB1	50 kGy	340.67	323.89	347.95	369.71
CAB2	H	256.98	252.21	260.12	271.27
CAB2	50 kGy	254.90	248.05	260.79	270.06
CAN1	H	431.63	414.64	428.38	458.87
CAN1	50 kGy	431.81	416.87	426.85	460.75
CAN2	H	334.27	318.42	341.22	354.18
CAN2	50 kGy	337.68	321.21	344.01	355.57

Tablo-3. Homojen (H) ve ışınlanmış (50kGy) CuAlBe, CuAlNi ŞHA numunelerinin termodinamik parametreleri.

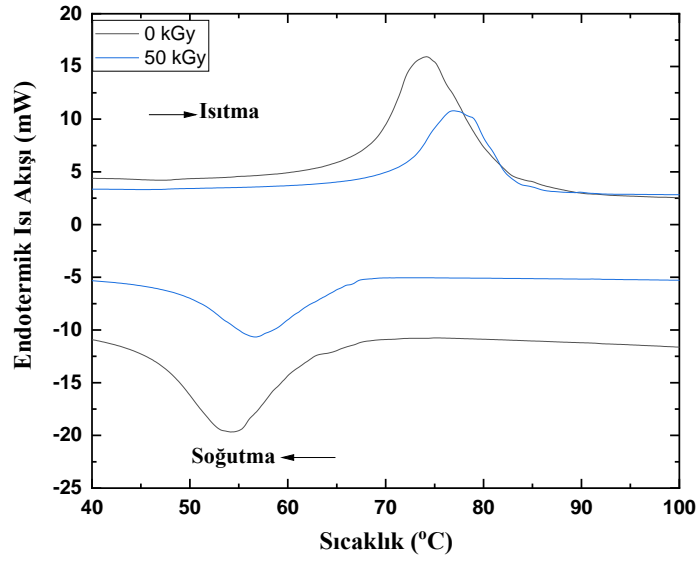
Alaşım	İşlem	T ₀ (K)	$\Delta H^{M \rightarrow A}$ (J/kg)	$\Delta H^{A \rightarrow M}$ (J/kg)	$\Delta S^{M \rightarrow A}$ (J/kgK)	$\Delta S^{A \rightarrow M}$ (J/kgK)	ΔG_E (J)	$\Delta G^{A \rightarrow M}$ (J)
CAB1	H	351.44	7871.4	-4549.7	22.39	-12.94	188.74	-286.14
CAB1	50 kGy	355.19	6830.0	-5010.0	19.22	-14.10	322.51	-279.07
CAB2	H	264.12	4464.7	-2411.1	16.90	-9.12	80.61	-120.66
CAB2	50 kGy	262.48	4864.9	-3755.7	18.53	-14.30	126.93	-140.45
CAN1	H	445.25	12280.1	-7514.3	27.58	-16.87	468.58	-375.63
CAN1	50 kGy	446.28	12999.1	-6834.5	29.12	-15.31	435.05	-421.36
CAN2	H	344.22	8437.8	-5551.9	24.51	-16.12	388.48	-243.87
CAN2	50 kGy	346.62	8661.0	-6671.6	24.98	-19.24	411.42	-223.32



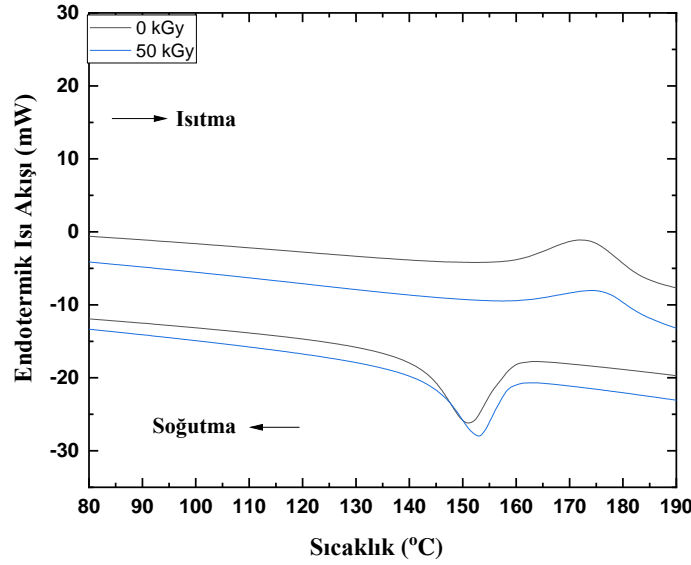
Şekil- 1. Homojen ve 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış CAB1 alaşım numunelerinin DSC eğrileri.



Şekil- 2. Homojen ve 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış CAB2 alaşım numunelerinin DSC eğrileri.



Şekil- 3. Homojen ve 50 kGy γ -radyasyon dozu ile ışınlanmış CAN1 alaşım numunelerinin DSC eğrileri.



Şekil- 4. Homojen ve 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış CAN2 alaşım numunelerinin DSC eğrileri.

3.2. X- Işını Difraksiyon Bulguları

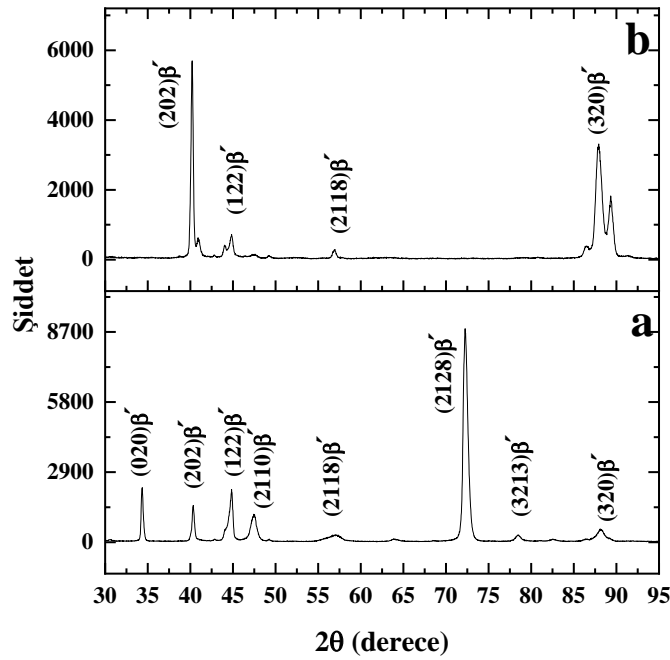
Homojen ve 50 kGy sabit γ - radyasyon dozuyula ışınlanmış CAB1, CAB2, CAN1 ve CAN2 ŞHA numunelerinin X-ışını difraksiyon desenleri Şekil-5, Şekil-6, Şekil-7 ve Şekil-8' de verilmiştir. Homojen ve 50 kGy radyasyon dozuyula ışınlanmış CAB1, CAN1 ve CAN2 alaşım numunelerinin X-ışını difraksiyon desenlerinde martensit yapıya ait pikler, CAB2 alaşım numunelerinin X-ışını difraksiyon desenlerinde martensit ve austenit yapıya ait pikler yer almaktadır. Uygulanan ışınlama ile pik şiddetlerinde değişim gözlenmiştir ve bazı pikler kaybolmuş yeni pikler oluşmuştur. Homojen CAB2 alaşımı soğutma hızına bağlı olarak austenit fazın piklerinin yanı sıra martensit fazın piklerini de seğilemektedir. 50 kGy radyasyon dozu ile ışınlanmış numunenin X-ışını difraksiyon deseninde (320) β' martensit pikinin şiddeti artmış ve (220) β austenit yapının temel piki ve (400) β , (331) β pikleri kaybolmuş, (511) β piki oluşmuştur. Ötekoide yakın bileşime sahip ikili CuAl alaşımı (Cu-11.4-11.8 ağırlıkça %Al) düzensiz austenit β fazı 565°C'nin üzerinde düzenli austenit fazı kararlıdır ve Cu-Al alaşımına az miktarda Be ilavesi, β faz kararlılığını etkilemeden martensit dönüşüm sıcaklığını olağanüstü derecede düşürür ve ayrıca yarı kararlı austenitte yapıyı destekler [26, 27]. Şekil-8 a ve b de verilen CAN2 alaşım numunelerine ait X-ışını difraksiyon deseni incelendiğinde (β' ve γ_1') martensit pikleri görülmektedir. Ayrıca homojen numunenin (Şekil-8 a) difraksiyon deseninde, soğuma hızına bağlı olarak zayıf şiddette γ_2 çökelti pikine rastlanmıştır [28, 29]. ŞHA'lar, özellikle CuAlNi sistemine ait olanlar, bileşime bağlı olarak ya tek bir dönüşüme ($\beta \leftrightarrow \beta'$ veya $\beta \leftrightarrow \gamma_1'$) veya birleşik bir dönüşüme ($\beta \leftrightarrow \beta'+\gamma_1'$) uğrayabilir.

Homojen ve ışınlanmış alaşım numunelerine ait kristal boyutu, Debye Scherrer bağıntısıyla hesaplandı.

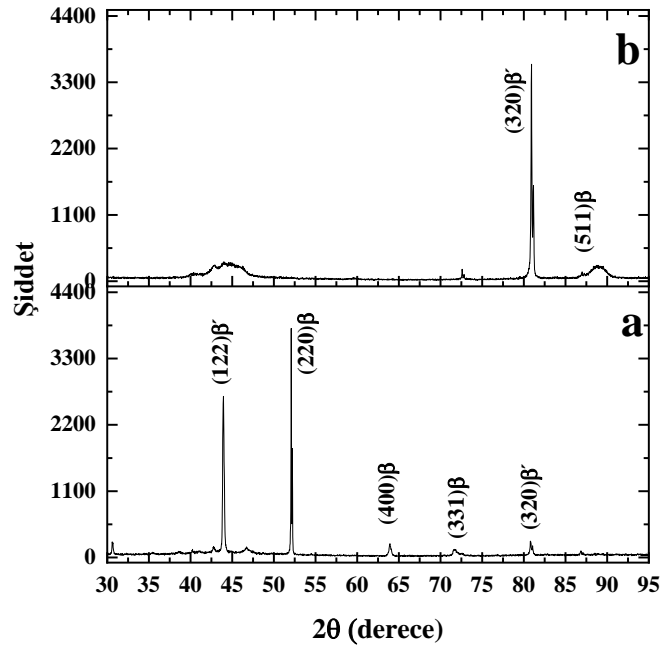
$$D = \frac{0.9\lambda}{FWHM\cos\theta} \quad (5)$$

İfade de D kristalin boyutunu, λ X- ışını dalga boyunu, FWHM maksimum pikin yarısındaki tam genişliği, θ ise Bragg açısını göstermektedir.

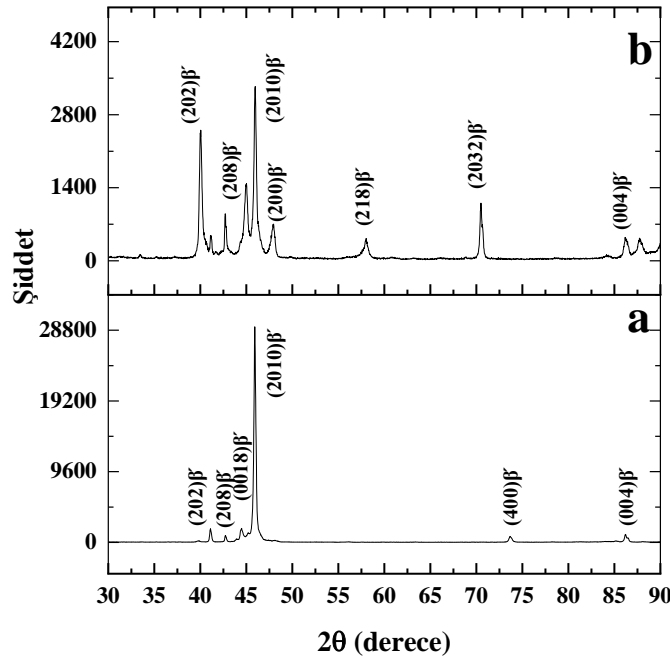
Homojen ve sabit gama radyasyon dozu ile ışınlanmış alaşım numunelerinin kristal boyutu Tablo-4 de verilmiştir. Işınlama ile CAB1 alaşım numunesinin kristal boyutu küçülürken, CAB2, CAN1, ve CAN2 alaşım numunelerinin kristal boyutu artmıştır.



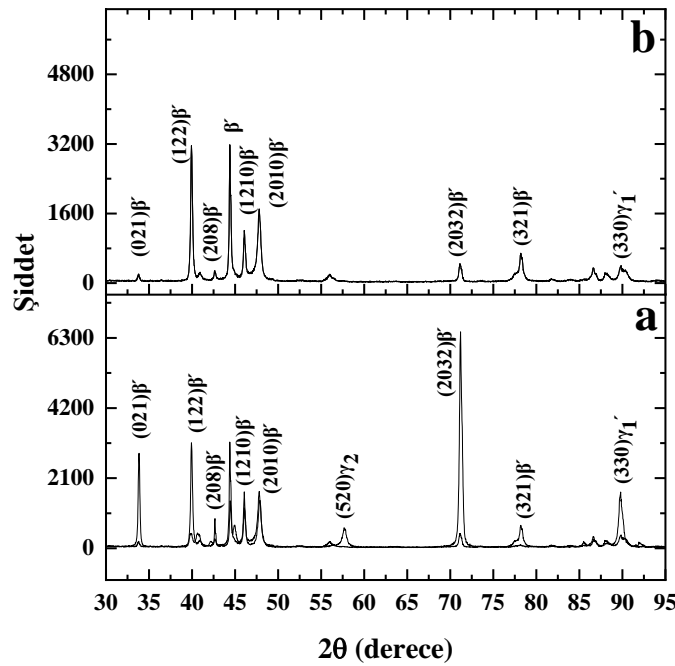
Şekil-5. CAB1 (a) homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış numunelerinin X-ışını difraksiyon desenleri.



Şekil-6. CAB2 (a) homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış numunelerinin X-ışını difraksiyon desenleri.



Şekil-7. CAN1 (a) homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış numunelerinin X-ışını difraksiyon desenleri.



Şekil-8. CAN2 (a) homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış numunelerinin X-ışını difraksiyon desenleri.

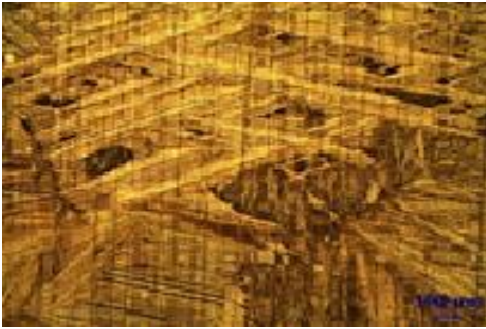
3.3. Metalografik Gözlemler Ve Mikro Sertlik Bulguları

Homojen ve sabit γ - radyasyon dozuyula ışınlanmış CAB1, CAB2, CAN1 ve CAN2 şekil hafızalı alaşım numunelerinin optik fotoğrafları Şekil-9, Şekil-10, Şekil-11ve Şekil-12' de verilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için aynı büyütmeye optik fotoğraflar kullanılmıştır. Şekil-9 (a) homojen CAB1 alaşım numunesine ait optik fotoğraftır. Fotoğraftan görüldüğü gibi polikristal bir yapıya sahiptir ve yapı martensittir. 50 kGy radyasyon dozu ile ışınlanmış numunenin optik fotoğrafından görüldüğü (Şekil-9 b) gibi tanelerde küçülme görülmektedir ve yapı martensittir. Homojen CAB2

alaşım numunesi polikristal yapıdadır. Şekil-10 a da görüldüğü gibi yapı oda sıcaklığında austenit fazdadır ve yer yer martensit çizgileri görülmektedir. 50 kGy radyasyon dozu ile ışınlanmış CAB2 alaşım numunesinin optik fotoğrafı (Şekil-10 b) incelendiğinde tanelerde büyüme göze çarpmaktadır ve martensit çizgilerinde artış görülmektedir. Aynı büyütmadaki homojen CAB1 ve CAB2 alaşım numunelerinin optik fotoğrafları karşılaştırıldığında CAB2 alaşım numunesi Al ve Be miktarındaki artış ile daha küçük taneli polikristal yapıya sahiptir ve yapıya austenit faz hakimdir.

Şekil-11 (a) ve Şekil-12 (a)' da verilen homojen CAN1 ve CAN2 alaşımlarına ait optik fotoğrafları incelendiğinde her iki numuneninde polikristal yapıda ve oda sıcaklığında martensit fazda olduğu görülmektedir. Martensitler zigzag, V-şekillidir. CAN1 ve CAN2 alaşımlarında Ni oranı sabittir, Al oranı artırılmıştır. Alüminyum oranının artması tane boyutunu küçültmüştür. Işınlanmış CAN1 ve CAN2 alaşım numunelerin tane boyutlarının büyüdüğü görülmektedir. Yapıya martensit plakalar hakimdir. Homojen CAB1, CAB2, CAN1 ve CAN2 alaşım numunelerinin optik fotoğrafları karşılaştırıldığında en küçük taneli yapı CAB2 alaşım numunesinde görülmektedir. Berilyumun etkisi alüminyumdan daha fazla olduğu söylenebilir.

Tablo-4 de verilen homojen ve ışınlanmış CAB1, CAB2, CAN1 ve CAN2 alaşım numunelerinin kristal boyutu ve mikro sertlik değerleri kendi aralarında karşılaştırılacak olursa, ışınlanmış CAB1 alaşım numunesinin kristal boyutu küçülmüş ve mikro sertliği artmıştır. Işınlanmış CAB2 ve CAN1 alaşım numunelerinin kristal boyutu artmış mikro sertlik değerleri azalmıştır. Işınlanmış CAN2 alaşım numunesinin kristal boyutunda ve mikro sertlik değerinde küçük değişimler kaydedilmiştir. Ortalama mikro sertlik değerleri optik fotoğrafları desteklemektedir.



(a)



(b)

Şekil-9. (a) Homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozuyla ışınlanmış CAB1 numunesinin optik fotoğrafları.



(a)

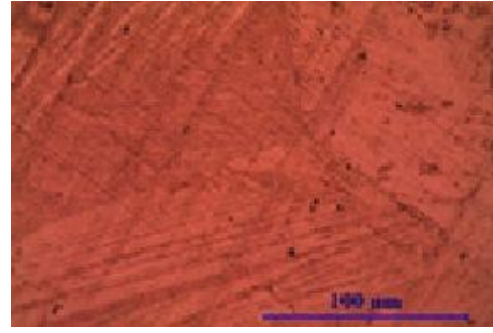


(b)

Şekil-10. (a) Homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozuyla ışınlanmış CAB2 numunesinin optik fotoğrafları.



(a)

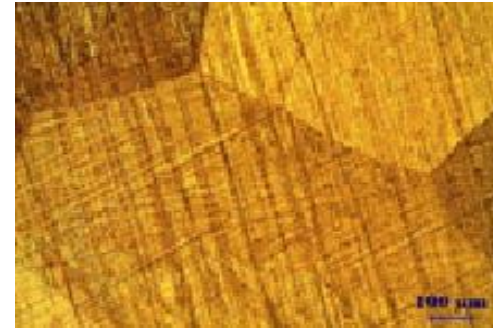


(b)

Şekil-11. (a) Homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozuyla ışınlanmış CAN1 numunesinin optik fotoğrafları.



(a)



(b)

Şekil-12. (a) Homojen (b) 50 kGy γ - radyasyon dozuyla ışınlanmış CAN2 numunesinin optik fotoğrafları.

Tablo- 4. Homojen ve sabit γ - radyasyon dozu ile ışınlanmış CuAlBe ve CuAlNi şekil hafızalı alaşımlarının ortalama mikrosertlik değerleri ve kristal boyutları.

Alaşım	İşlem	Ort. HV _{0,3} Mikro Sertlik	Kristal Boyutu (nm)
CAB1	Homojen	201,6	64,0784
CAB1	50 kGy	209,6	30,0696
CAB2	Homojen	265,4	94,4686
CAB2	50 kGy	246,8	127,8178
CAN1	Homojen	267,4	44,7306
CAN1	50 kGy	241,2	124,274
CAN2	Homojen	252,4	48,1742
CAN2	50 kGy	258,8	54,6711

4. SONUÇLAR

Cu-esaslı şekil hafızalı alaşımlar, alaşımı oluşturan elementlerine ve miktarına karşı oldukça hassastır. Bu çalışmada kullanılan CAB1, CAB2, CAN1 ve CAN2 şekil hafızalı alaşımları kendi aralarında karşılaştırılırsa,

1. CuAlBe şekil hafızalı alaşımlarda alüminyum ve berilyum miktarındaki artış ile dönüşüm sıcaklıkları düşmüştür.

2. CuAlNi şekil hafızalı alaşımlarda nikel oranı sabit olup, alüminyum miktarındaki artış ile dönüşüm sıcaklıkları düşmüştür.
3. Dönüşüm sıcaklıklarının düşmesinde berilyumun daha etkili olduğu görülmüştür.
4. Sabit 50 kGy γ - radyasyon dozu uygulanan CAB1 ve CAB2 alaşım numunelerinin dönüşüm sıcaklıklarında düzensiz değişimler gözlenirken, CAN1 ve CAN2 alaşım numunelerinin dönüşüm sıcaklıkları ve termodinamik parametrelerinde düzenli bir artış gözlenmiştir. Işınlanmış CuAlBe alaşımlarındaki düzensiz değişimin berilyum elementinden kaynaklandığı düşünülmektedir.
5. X-ışını difraksiyon desenlerinde homojen CAB1 alaşım numunesi oda sıcaklığında martensit yapıya ait pikler sergilerken, homojen CAB2 alaşım numunesi austenit yapının pikleri yanısıra martensit yapıya ait pikler de sergilemektedir. Yapıya austenit yapı pikleri hakimdir. Homojenleştirme işlemi sırasında soğutma hızının yeterli olmadığı düşünülmektedir.
6. Homojen CAN1 ve CAN2 alaşımlarına ait X-ışını difraksiyon desenleri her ikisinin de oda sıcaklığında martensit yapıda olduğunu göstermektedir.
7. Işınlanmış CAB1, CAB2, CAN1 ve CAN2 numunelerinin ışınlama ile pik şiddetleri değişmiş, bazı pikler kaybolmuş ve yeni pikler oluşmuştur. Yine CAB1, CAN1 ve CAN2 alaşım numuneleri martensit yapıdadır. CAB2 austenit ve martensit yapıya ait pikler sergilemektedir.
8. Kristal boyutu, mikro sertlik değerlerindeki değişimler ve optik fotoğraflar birbirini desteklemektedir.
9. 50 kGy gama radyasyon dozu Cu-esaslı alaşımların fiziksel parametrelerini etkilemiştir. Işınlamaya bağlı olarak malzemelerin elastiklik enerjisi entropiyle, mikro sertliği tane ve kristal boyutuyla kontrol edilebilir.

TEŞEKKÜR

Yapılan çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi **FÜBAP; FF.19.09** protokol nolu projesi ile desteklenmiştir.

KAYNAKÇA

- Mansur, L. K. & Bloom, E. E. (1982). Radiation Effects in Reactor Structural Alloys. *Journal of Metals* 23-31.
- Mansur, L.K., Coghlan, W.A. (1983). Mechanisms of Helium Interaction with Radiation Effects in Metals and Alloys: A Review. *Journal of Nuclear Materials* 119 (1983) 1-25 North-Holland, Amsterdam
- Gan, J., Allen, T.R., Birtcher, R.C., Shutthanandan, S. & Thevuthasan, S. (2008) Radiation Effects on the Microstructure of a 9Cr-ODS Alloy. *JOM* 24-28.
- Giurgiutiu, V., & Zagari, A. N. (2000). Use of smart materials technologies in radiation environments and nuclear industry. In *Smart Structures and Materials 2000: Smart Structures and Integrated Systems*. Vol. 3985, pp. 855-866. International Society for Optics and Photonics.
- Grossbeck, M. L. (2012). Effect of radiation on strength and ductility of metals and alloys.
- Was, G. S. (2016). *Fundamentals of radiation materials science: metals and alloys*. Springer.
- Recarte, V., Pérez-Landazábal, J. I., Rodríguez, P. P., Bocanegra, E. H., Nó, M. L., & San Juan, J. (2004). Thermodynamics of thermally induced martensitic transformations in Cu–Al–Ni shape memory alloys. *Acta materialia*, 52(13), 3941-3948. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2004.05.009>

- Suresh, N., & Ramamurty, U. (2008). Aging response and its effect on the functional properties of Cu–Al–Ni shape memory alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 449(1-2), 113-118. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.02.094>
- Sarı, U., & Aksoy, I. (2008). Micro-structural analysis of self-accommodating martensites in Cu–11.92 wt% Al–3.78 wt% Ni shape memory alloy. *Journal of materials processing technology*, 195(1-3), 72-76. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.04.116>
- Pelegrina, J. L., & Ahlers, M. (2004). Influence of a constant stress during isothermal β phase ageing on the martensitic transformation in a Cu–Zn–Al shape memory alloy. *Scripta materialia*, 50(4), 423-427. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2003.11.006>
- Shelyakov, A. V., Sitnikov, N. N., Sheyfer, D. V., Borodako, K. A., Menushenkov, A. P., & Fominski, V. Y. (2015). The formation of the two-way shape memory effect in rapidly quenched TiNiCu alloy under laser radiation. *Smart materials and structures*, 24(11), 115031.
- Pereira, E. C., Mathlakova, L. A., da Silva Figueiredo, A. B. H., Lima, E. S., dos Santos Paula, A., & Monteiro, S. N. (2018). Grain ejection associated with thermocycling of Cu-Al-Ni shape memory alloy. *Materials Letters*, 210, 54-57. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.08.123>
- Chung, C. Y., & Lam, C. W. H. (1999). Cu-based shape memory alloys with enhanced thermal stability and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 273, 622-624. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(99\)00335-4](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(99)00335-4)
- Dasgupta, R. (2014). A look into Cu-based shape memory alloys: Present scenario and future prospects. *Journal of Materials Research*, 29(16), 1681-1698. DOI: 10.1557/jmr.2014.189
- Otsuka, K., & Kakeshita, T. (2002). Science and technology of shape-memory alloys: new developments. *mrs bulletin*, 27(2), 91-100. <https://doi.org/10.1557/mrs2002.43>
- Markopoulos, A. P., Pressas, I. S., & Manolacos, D. E. (2016). Manufacturing processes of shape memory alloys. In *Materials Forming and Machining* (pp. 155-180). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-483-4.00007-7>
- Zárubová, N., Gemperle, A., & Novák, V. (1997). Initial stages of γ_2 precipitation in an aged Cu-Al-Ni shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 222(2), 166-174. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(96\)10520-7](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(96)10520-7)
- Prabhu, T. R. (2013). Preparation and properties evaluation of low cost Cu-Al-Be shape memory alloy. Preprint submitted to *Physics Express* 1-9
- Zuniga-Flores, H., Belkahla, S., Lovey, F.C. & Guenin G (1992). The two way memory effect of CuAlBe Alloys: General characteristics and aging. **ICOMAT 92** Proceedings of the international conference on martensitic transformations, Monterey, California, USA 1053-1058.
- Balo, Ş. N., Ceylan, M., & Aksoy, M. (2001). Effects of deformation on the microstructure of a Cu–Al–Be shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 311(1-2), 151-156. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)00927-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)00927-3)
- Balo, Ş. N., & Orhan, A. (2021). Thermal and Structural Investigations of Cu-Al-Ni Shape Memory Alloys Irradiated Under Constant Gamma Radiation Dose. *Journal of Materials and Electronic Devices*, 2(1), 24-29.
- Tong, H. C., & Wayman, C. M. (1974). Characteristic temperatures and other properties of thermoelastic martensites. *Acta Metallurgica*, 22(7), 887-896. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(74\)90055-8](https://doi.org/10.1016/0001-6160(74)90055-8)
- Malimanek, J., & Zarubova, N. (1995) Calometric investigation of the movement of phase interfaces in a Cu-Al-Ni single crystal. *Scripta metallurgica et materialia*, 32(9), 1347-1352.

- Zu, X. T., Zhang, C. F., Zhu, S., Huo, Y., Wang, Z. G., & Wang, L. M. (2003). Electron irradiation-induced changes of martensitic transformation characteristics in a TiNiCu shape memory alloy. *Materials Letters*, 57(13-14), 2099-2103. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)01145-X](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)01145-X)
- Romero, R., & Pelegrina, J. L. (2003). Change of entropy in the martensitic transformation and its dependence in Cu-based shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 354(1-2), 243-250. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(03\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(03)00013-3)
- Chentouf, S. M., Bouabdallah, M., Cheniti, H., Eberhardt, A., Patoor, E., & Sari, A. (2010). Ageing study of Cu–Al–Be hypoeutectoid shape memory alloy. *Materials characterization*, 61(11), 1187-1193. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2010.07.009>
- Montecinos, S., & Simison, S. N. (2011). Study of the corrosion products formed on a multiphase CuAlBe alloy in a sodium chloride solution by micro-Raman and in situ AFM measurements. *Applied surface science*, 257(17), 7732-7738. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2011.04.018>
- Pereira, E. C., Matlakhova, L. A., Matlakhov, A. N., de Araújo, C. J., Shigue, C. Y., & Monteiro, S. N. (2016). Reversible martensite transformations in thermal cycled polycrystalline Cu-13.7% Al-4.0% Ni alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 688, 436-446. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.07.210>
- Payandeh, Y., Mirzakhani, B., Bakhtiari, Z., & Hautcoeur, A. (2021). Precipitation and Martensitic Transformation in Polycrystalline CuAlNi Shape Memory Alloy-Effect of Short Heat Treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 162046. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.162046>
- Cullity, B.D (1978). *Elements of X-Ray Diffraction*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1978.
- Aydın, C., El-Nasser, H. M., Yakuphanoglu, F., Yahia, I. S., & Aksoy, M. (2011). Nanopowder synthesis of aluminum doped cadmium oxide via sol–gel calcination processing. *Journal of Alloys and Compounds*, 509(3), 854-858. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.111>
- Balo, Ş. N., & Sel, N. (2012). Effects of thermal aging on transformation temperatures and some physical parameters of Cu–13.5 wt.% Al–4 wt.% Ni shape memory alloy. *Thermochimica acta*, 536, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2012.02.007>